

水专项支撑长江生态环境保护 修复推荐技术手册

(第一册)

水环境管理分册



水体污染控制与治理科技重大专项管理办公室

National Program Management Office for Water Pollution Control and Treatment

国家长江生态环境保护修复联合研究中心

National Joint Research Center for Yangtze River Conservation

水体污染控制与治理重大专项办公室 国家长江生态环境保护修复联合研究中心

水专项办函〔2019〕30号

关于印发《水专项支撑长江生态环境保护修复 推荐技术手册》（第一册）的通知

各长江生态环境保护修复驻点跟踪工作组：

为落实生态环境部党组关于聚焦长江经济带全面推广应用水专项成果的精神，科技助力长江生态环境保护修复攻坚战，根据《关于开展长江生态环境保护修复驻点跟踪研究工作的通知》（环科财函〔2018〕206号）的要求，水专项管理办公室联合国家长江生态保护修复联合研究中心组织“十三五”水专项集成课题，对水专项已有关键技术成果进行了梳理，形成了《水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册》（第一册）（以下简称《技术手册》（第一册）），共包括工业水污染全过程控制、城镇污水、流域面源、生态修复、水环境管理5个分册。

为支撑长江生态环境保护工作，现将《技术手册》（第一册）印发给你们。后续我们将结合长江经济带驻点工作进展情况，适时更新补充技术手册有关内容。

联系方式：

水专项管理办公室 李屹 姜琦

电 话：(010) 84665912 84665915

长江中心 王丽婧 杨荣金

电 话：18612015913 13621136123

- 附件：1. 水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册（第一册）-工业水污染全过程控制分册
2. 水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册（第一册）-城镇水污染控制与水环境综合整治分册
3. 水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册（第一册）-流域面源污染治理分册
4. 水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册（第一册）-水体生态修复分册
5. 水专项支撑长江生态环境保护修复推荐技术手册（第一册）-水环境管理分册



抄 送： 科技部重大专项司、住房城乡建设部水专项管理办公室。

目 录

1 流域水生态环境问题诊断技术.....	- 1 -
1.1 水生态健康评价.....	- 1 -
1.1.1 流域水生态健康评估技术.....	- 1 -
1.2 水环境安全评价.....	- 8 -
1.2.1 有毒有害与高氮磷污染底泥勘测鉴别评估技术.....	- 8 -
1.3 富营养化状态评价.....	- 11 -
1.3.1 基于低通滤波轨线法的湖库富营养化返贫路径识别技术.....	- 11 -
1.3.2 分湖富营养化营养足迹指数 (TFI) 评价方法.....	- 13 -
1.3.3 湖泊富营养化变权营养指数 (TLI _{cw}) 评价方法.....	- 18 -
1.4 水生态环境受损原因诊断.....	- 22 -
1.4.1 湖泊污染成因诊断的集成方法.....	- 22 -
2 排放清单编制和排污负荷核定.....	- 24 -
2.1 排污图谱解析与排放清单编制.....	- 24 -
2.1.1 基于水质降解模型与化学质量平衡模型的水污染源源解析技术.....	- 24 -
2.1.2 水污染源多相污染物排放图谱建立技术.....	- 24 -
2.1.3 水污染源优先控制污染物筛选技术.....	- 25 -
1.4.2 湖泊化学需氧量藻源内负荷贡献分析技术.....	- 26 -
2.2 水环境污染物排放负荷核定.....	- 32 -
2.2.1 杭嘉湖平原河网非点源产排污系数核算技术.....	- 32 -
2.2.2 基于分类输出系数法的平原河网区非点源污染负荷估算技术.....	- 34 -
2.2.3 基于水环境响应的水污染负荷总量核定技术.....	- 38 -
3 水环境容量总量控制与排污许可证管理.....	- 41 -
3.1 水环境响应模拟.....	- 41 -
3.1.1 河流流域水环境系统分析与模拟技术.....	- 41 -
3.1.2 湖泊流域河网水动力模型及水环境变化测报技术.....	- 43 -
3.1.3 水源地水动力水质模型并行计算技术.....	- 47 -
3.1.4 三峡水库调度与水量、水质、水华响应关系分析技术.....	- 49 -
3.2 水环境容量总量核算.....	- 51 -
3.2.1 允许纳污量计算的稳态设计水文条件选择技术.....	- 51 -
3.2.2 基于 FOEA 的水环境容量安全余量确定技术.....	- 59 -
3.2.3 基于控制单元的太湖流域水环境容量核定技术.....	- 62 -
3.3 水环境容量总量分配.....	- 65 -
3.3.1 流域水污染物总量分配技术方法：负荷历时曲线 (LDC).....	- 65 -
3.3.2 基于水质模型与优化方法的控制单元允许排放量计算方法.....	- 71 -
3.3.3 基于正反算法与情景分析法的控制单元允许排放量计算方法.....	- 75 -
3.3.4 河网总量控制目标制定与小区域分配技术.....	- 78 -
3.4 水污染物排污许可证管理.....	- 80 -
3.4.1 以容量总量控制为核心的排污许可证动态管理技术.....	- 80 -
3.4.2 基于流域水质目标的固定污染源排污许可限值确定方法.....	- 82 -
3.5 控制单元水质目标管理.....	- 85 -



3.5.1	多要素耦合的控制单元划分技术.....	85
3.5.2	河网型控制单元水质目标管理技术.....	87
3.5.3	城市河段控制单元水质目标管理技术.....	89
3.5.4	南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术.....	91
3.5.5	基于污染物断面通量的控制单元水质目标管理实施效果评估技术.....	95
4	水污染防治技术评估与排放限值管理.....	99
4.1	水污染防治最佳可行技术评估技术.....	99
4.1.1	污染防治最佳可行技术评估程序与方法.....	99
4.1.2	水污染防治技术评估指标体系.....	104
4.1.3	化学纤维工业末端治理与达标排放技术评估体系.....	110
4.2	环境技术验证与评估系统.....	114
4.2.1	基于技术性能客观评价的验证评价方法优化技术.....	114
4.2.2	虚拟生态绿色工厂评估系统.....	117
5	流域水环境监测技术.....	120
5.1	水环境质量监测.....	120
5.1.1	流域水质评价技术方法.....	120
5.1.2	水体中氮来源比例的同位素甄别技术.....	121
5.1.3	水质综合毒性分析技术.....	124
5.2	水环境应急监测.....	126
5.2.1	流域风险污染物快速测定技术.....	126
5.3	水生生物监测.....	126
5.3.1	藻毒素原位监测技术.....	126
5.3.2	水生态健康监测与评估业务化技术.....	128
5.3.3	湖泊蓝藻水华遥感监测技术.....	129
6	流域水环境风险评估与预警.....	131
6.1	突发性水环境风险评估预测与应急处置.....	131
6.1.1	水污染事故应急处置关键技术.....	131
6.1.2	三峡库区及上游“空-地-水”一体化的水环境风险评估、预警与应急处置技术.....	132
6.1.3	跨界区多元风险识别、事故预警预报与应急响应为一体的水环境风险防控技术.....	135
6.1.4	调水工程内突发水污染事件应急处置技术及设施.....	138
6.1.5	应对突发水污染事件的多等级应急响应调度技术.....	141
6.2	累积性环境风险评估与管理.....	143
6.2.1	区域河网型氮磷累积性及敏感水体的水环境风险预警技术.....	143
6.2.2	流域水生态风险识别关键技术.....	145
6.2.3	流域风险表征关键技术.....	147
6.2.4	累积性风险水污染物的溯源技术.....	148
6.2.5	流域水生态暴露评估关键技术.....	155
6.2.6	基于氮磷排放总量监控的累积性环境风险预警技术.....	156
6.3	水华及饮用水源地风险预警.....	160
6.3.1	三峡库区“水华”预警技术.....	160
6.3.2	基于饮用水源地受体敏感特征的流域水质安全预警技术.....	161
7	流域水生态空间管控与生态流量保障.....	165
7.1	水生态功能分区.....	165

7.1.1 水陆一体化生境分类技术.....	- 165 -
7.1.2 流域水生态功能三级四级分区技术.....	- 168 -
7.1.3 基于水生生物区域差异特征的水生态功能分区效验技术.....	- 175 -
7.1.4 水生态功能区分类技术.....	- 180 -
7.1.5 基于水生态环境功能分区的太湖流域产业准入与结构优化技术.....	- 187 -
7.2 水生态保护目标制定技术.....	- 190 -
7.2.1 水生态功能三级区综合管理目标体系构建技术.....	- 190 -
7.3 水生态承载力评估与优化调控技术.....	- 193 -
7.3.1 流域水生态承载力多指标评价方法技术.....	- 193 -
7.3.2 流域水生态承载力评估技术.....	- 197 -
7.4 生态流量保障.....	- 200 -
7.4.1 三峡水库及上游梯级枢纽水质水量联合调度优化模型体系.....	- 200 -
7.4.2 太湖-河网水环境安全调控方案分析计算与遴选技术.....	- 202 -
7.4.3 基于水功能区的流域水质水量总量控制技术.....	- 204 -
7.4.4 水质水量联合调控技术集成.....	- 205 -
7.4.5 分质水资源优化调配的水质水量联合调度技术.....	- 207 -
8 流域水环境监测体系与决策系统.....	- 207 -
8.1 水环境监测网络体系构建.....	- 209 -
8.1.1 水环境物联网智能感知与自动适配技术.....	- 209 -
8.1.2 基于控制单元的主要水污染物总量动态监控技术.....	- 212 -
8.2 流域大数据平台与管理系统.....	- 214 -
8.2.1 三峡水库水量水质调度决策支持系统.....	- 214 -
8.2.2 高精度信息集成、共享及业务系统无缝融合技术.....	- 221 -
8.2.3“云计算”技术在流域水环境数据中心构建中的应用.....	- 225 -
8.2.4 基于 GIS 的水环境信息集成与展示技术.....	- 227 -
8.2.5 流域水生态风险预警与平台技术.....	- 229 -
8.2.6 基于三维数字流域技术的流域水生态承载力与总量控制系统集成技术..	- 231 -
8.2.7 流域水环境实时数字化管理决策支持.....	- 239 -
8.2.8 流域水环境实时调控决策支持系统平台.....	- 240 -
8.2.9 重金属污染防治技术体系嵌入环境技术管理体系模式与程序.....	- 241 -
9 流域水环境基准标准体系.....	- 244 -
9.1 流域水环境基准制定技术.....	- 244 -
9.1.1 水生生物基准制定技术.....	- 244 -
9.1.2 湖泊营养物基准制定技术.....	- 244 -
9.1.3 沉积物基准制定技术.....	- 244 -
9.1.4 湖泊沉积物营养盐基准制订技术.....	- 248 -
9.1.5 保护人体健康的“国家-流域-区域”水质基准制定关键技术.....	- 251 -
9.1.6 水生态学基准制定技术.....	- 257 -
9.1.7 河口营养物基准制定技术.....	- 258 -
9.2 流域水环境基准校验技术.....	- 260 -
9.2.1 水生生物基准校验技术.....	- 260 -
9.2.2 沉积物质量基准校验技术.....	- 262 -
9.3 流域水环境基准向标准转化技术.....	- 264 -
9.3.1 水环境质量基准向标准转化技术.....	- 264 -



9.3.2 人体健康水质基准向标准转化技术.....	- 266 -
9.3.3 湖泊营养物标准制订技术.....	- 272 -
9.3.4 河口营养盐基准向标准转化技术.....	- 274 -
9.4 流域水环境基准及标准制定辅助技术.....	- 276 -
9.4.1 流域水环境基准优控污染物筛选技术.....	- 276 -
9.4.2 水生生物基准本土受试生物筛选技术.....	- 278 -
9.5 湖泊型流域营养物标准制定.....	- 282 -
9.5.1 分湖营养物水质目标过程管理轨线定标技术.....	- 282 -
9.5.2 湖库控藻营养物水质目标双概率定标技术.....	- 284 -
10 水环境经济政策体系.....	- 288 -
10.1 水环境质量管理经济政策集成技术.....	- 288 -
10.1.1 流域水污染防治规划投入效益测算技术.....	- 288 -
10.2 工业源污染防治的管理经济政策集成技术.....	- 289 -
10.2.1 排污权核定技术研究.....	- 289 -
10.3 城镇源污染防治的管理经济政策集成技术.....	- 291 -
10.3.1 流域污水厂群优化调控经济评估与补偿技术.....	- 291 -
10.4 以生态补偿、水生态环境资产核算为核心的“三水合一”管理经济政策集成技术..	- 292 -
10.4.1 跨省重点流域生态补偿模拟技术.....	- 292 -

1 流域水生态环境问题诊断技术

1.1 水生态健康评价

1.1.1 流域水生态健康评估技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：流域水生态监测与管理

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

流域水生态健康评估是流域可持续管理的重要科学依据之一，现阶段我国的水生态健康评估研究多集中于水质指标评价为主，但随着生态学学科的不断发展与研究的深入，人们发现理化指标只能代表水体健康评价的一部分，水生生物群落与水生态系统进行着物质循环和能量流动，其结构特性对水生态系统的干扰具有高度敏感性，反映人类活动对水生态系统的影响程度，应该将其作为水生态健康评价的一个重要方面，目前国际上发展了多套评估方法，采用理想河段或样板河段，或者采用一定的水质指标和生物指标作为评估基准值，但基于水质与水生生物之间相互关系建立“水质-生物”综合指标体系的水生态健康评估的研究还鲜见报道，此外由于自然条件分异、区域社会经济条件以及评估尺度差异显著，在流域水生态健康评估中难以制定大尺度范围内统一标准，同时也不能完全沿用国外的方法和标准，因此针对目前水生态评估体系单一以及流域水生态系统表现出的区域差异，构建适用于我国流域水生态健康评估的多指标综合评估技术体系集成显得尤为重要。为了全面反映区域空间异质性，流域水生态健康评估技术系统的调查和分析了流域水生态系统特征，并且在水质-生物相互作用机制的基础上，根据生态完整性原则构建了基于化学-生物完整性评价的“评价指标库-评估指标标准化-多层次评价结果表达-健康评估平台构建”的技术体系集成，水生态健康评估技术路线如图1所示。本技术集成包括三个核心技术：①基于“水质-生物”相互作用机制的指标体系构建以及基于资料分析法、专家意见法、分位数排序法等多层次综合的评价指标标准技术；②基于流域分区分类结果的点位评估、分区评估、分类评估的多层次评估结果分析以及基于柱状分析图、雷达分析图、空间分布图等多形式综合结果表达技术；③基于评估体系构建集数据处理、数据传输、网络共享为一体的具有通用型和可扩展性的水生态系统

健康评估平台技术。水生态健康评估技术路线如图1-1所示。

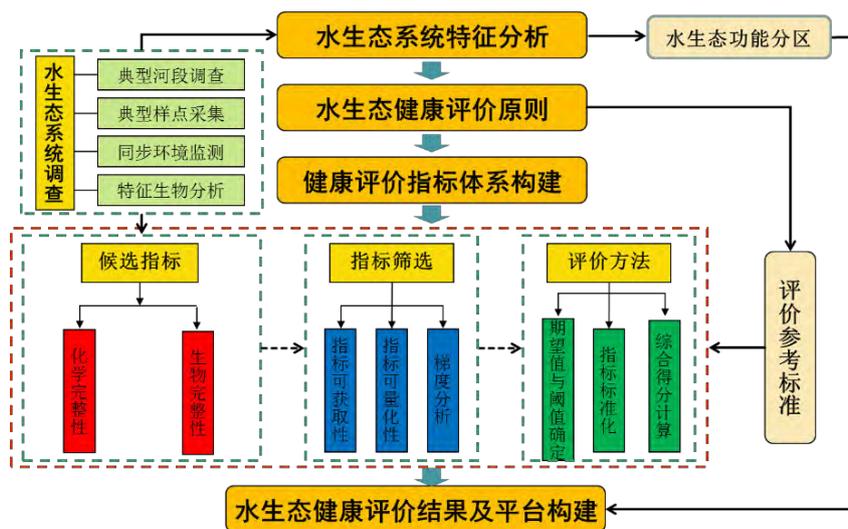


图1-1 水生态健康评估技术路线图

(2) 工艺流程

技术体系流程为“水生态系统调查与分析-评估指标备选库构建-评估指标筛选及评估方法确定-多层次评价结果表达-水生态健康评估平台构建”，具体如下：

①以标准的水生态调查方法为基础，通过全面的流域水生态调查，对流域自然特征、水资源水环境特征、水生生物特征等进行系统分析；其中在调查方面遵循系统采样的思路布设水样和水生生物采样点，充分考虑流域干流、主要支流、入湖河流、城市河段以及水库、湖体、源头溪流等各类水生态系统，并且在每个采样点均要求采集水样、浮游藻类样品和大型底栖动物样品，在部分鱼类特征明显的区域要求采集鱼类样品。

②基于化学指标为水体健康的驱动因素，水生生物为水生态系统综合响应群体的逻辑框架，构建影响流域水生态系统结构和功能特征的化学-生物完整性评估指标体系，化学-生物完整性评估指标备选体系包括水质理化指标、营养盐指标、浮游藻类指标、底栖动物指标以及鱼类指标。流域生态健康评价指标体系如表1.1。

表 1.1 流域生态健康评价指标体系

综合评价	分项评价	参数选择	数据需求	备注
综合评价	水质理化评价	溶解氧 (DO)	样点现场水样测试	
		电导率 (EC)	样点现场水样测试	
		高锰酸盐指数 (COD _{Mn})	实验室分析测试	
	营养盐评价	氨氮 (NH ₃ -N)	实验室分析测试	
		总氮 (TN)	实验室分析测试	
		总磷 (TP)	实验室分析测试	

浮游藻类评价	分类单元数 (S)	藻类群落鉴定数据	
	藻类生物多样性 Shannon-Wiener 指数 (H')	藻类群落鉴定数据	$H' = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$ 式中: n_i 为第 i 种生物的个体数; N 为总个体数; S 为物种数
	藻类 Berger-Parker 优势度指数 (D)	藻类群落鉴定数据	$D = \frac{N_{\max}}{N}$ 式中: N_{\max} 为最富集物种的个体数; N 为样方中全部物种的个体总数
底栖动物评价	分类单元数 (S)	底栖群落鉴定数据	
	EPT 科级分类单元比 (EPT-F)	蜉蝣目、襁翅目、毛翅目物种分类单元数; 样点分类单元总数	$EPT-F = \frac{N_{EPT}}{S}$ 式中: N_{EPT} 为样点 EPT 分类单元数; S 为样点分类单元总数
	BMWP 分数	底栖群落鉴定数据; BMWP 科级敏感值	$BMWP = \sum t_i$ 式中: t_i 为科 i 的 BMWP 的分数
	底栖动物 Berger-Parker 优势度指数 (D)	底栖群落鉴定数据	计算方法同藻类 Berger-Parker 优势度指数
鱼类生物评价	分类单元数 (S)	鱼类群落鉴定数据	
	鱼类生物多样性 Shannon-Wiener 指数 (H')	鱼类群落鉴定数据	$H' = -\sum_{i=1}^S \frac{n_i}{N} \log_2 \frac{n_i}{N}$ 式中: n_i 为第 i 种生物的个体数; N 为总个体数; S 为物种数
	鱼类 Berger-Parker 优势度指数 (D)	鱼类群落鉴定数据	$D = \frac{N_{\max}}{N}$ 式中: N_{\max} 为最富集物种的个体数; N 为样方中全部物种的个体总数

③为消除不同指标之间的量纲差别, 同时具有可度量可比较的标准数值, 依据各项指标计算结果, 通过资料分析法、专家意见法以及分位数排序法对核心指标标准、期望值与阈值进行确定, 评价结果通过指标归一化过程、等级标准对照确定评估等级。水生态系统健康评估指标期望值与阈值见表1.2。

表 1.2 水生态系统健康评估指标期望值与阈值

指标类别	评估指标	适用性范围	期望值	阈值
水质理化指标	DO	所有样点	7.5	3
	EC	所有样点	500	2000
	COD _{Cr}	所有样点	15	30
水质营养盐指标	TP	河流样点	0.02	0.3
	TP	水库样点	0.01	0.1



指标类别	评估指标	适用性范围	期望值	阈值
	TN	所有样点	0.2	1.5
	NH ₄ -N	所有样点	0.15	1.5
浮游生物指标	分类单元数	所有样点	S 的 5%四分位数	S 的 95%四分位数
	多样性指数	所有样点	0	3
	优势度指数	所有样点	0.05	0.95
底栖生物指标	分类单元数	所有样点	S 的 5%四分位数	S 的 95%四分位数
	EPT 科级分类比	所有样点	0	1
	BNWP 指数	山区	0	131
		平原	0	81
	优势度指数	所有样点	0.05	0.95
鱼类生物指标	分类单元数	所有样点	S 的 5%四分位数	S 的 95%四分位数
	多样性指数	所有样点	0	3
	优势度指数	所有样点	0.05	0.95

水生态系统健康评估指标及其标准化模型见表 1.3。

表 1.3 水生态系统健康评估指标及标准化模型

指标类型	指标分类	备选指标	指标标准化模型
化学	<ul style="list-style-type: none"> ● 水体物理 ● 水体化学 ● 营养盐 	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶解氧 (DO) ● 电导率 (EC) ● 高锰酸钾 (COD_{Mn}) ● 总氮 (TN) ● 总磷 (TP) ● 	<ul style="list-style-type: none"> ● 指标标准化 (除 DO) 指标得分 = $\frac{\text{期望值} - \text{测量值}}{\text{期望值} - \text{阈值}}$ ● DO 指标标准化 指标得分 = $1 - \frac{\text{期望值} - \text{测量值}}{\text{期望值} - \text{阈值}}$
生物	<ul style="list-style-type: none"> ● 藻类因子 ● 底栖动物 ● 鱼类因子 	<ul style="list-style-type: none"> ● 分类单元数 (S) ● Berger-Parker 优势度 (D) ● Shannon-Wiener 多样性指数 (H) ● 底栖动物科级分类指数 ● 	<ul style="list-style-type: none"> ● 分类单元数标准化 $S = \frac{95\% \text{measured} - 5\% \text{quantile}}{95\% \text{quantile} - 5\% \text{quantile}}$ ● 优势度指数标准化 $D = \frac{0.95 - \text{measured}}{0.95 - 0.05}$ ● 多样性指数标准化 $H = \frac{\text{measured} - 0}{3 - 0}$

④考虑到河流水生态分类和分区评估的特点, 为了更加直观和清楚地说明水生态健康评价结果, 本技术将总体评价结果以各类图形的方式进行显示, 主要包括评价等级比例柱状图、综合评价结果雷达图。分别通过柱状分析图、雷达分析图、空间分布图来综合表达流域水生

态健康评估结果，三种表达方法从单项指标-大类指标-流域等级分布三个角度系统的表达了整个流域从指标到样点的水生态健康状况，表现了较强的客观性、层次性以及科学性。

A. 柱状分析图：通过柱状分析图分析各大类指标不同等级评估结果

对每个评估样点进行单项指标和综合指标评价，评价结果均采用等级进行定性表达，等级体系为优、良、一般、差、极差五个等级。依据每个样点的得分结果，可以确定样点代表和水体所属的健康等级。为了明确不同区域河流或不同类型河流的水生态健康整体状况，分别对分布于不同水生态功能区域中和不同类型河段中的评估样点等级数量进行统计，对每个指标和综合指标分别采用柱状图表示各等级样点在某评价区域或者某评价类型中的百分比。由于等级划分标准和柱状图成图方法具有一致性，因此评估柱状图可以用以对不同河流类型或者不同水生态功能区中河流的简况状况进行对比分析。柱状图采用统一图例进行制作，以便于快速进行对比分析，图形设计如图 1-2 所示。

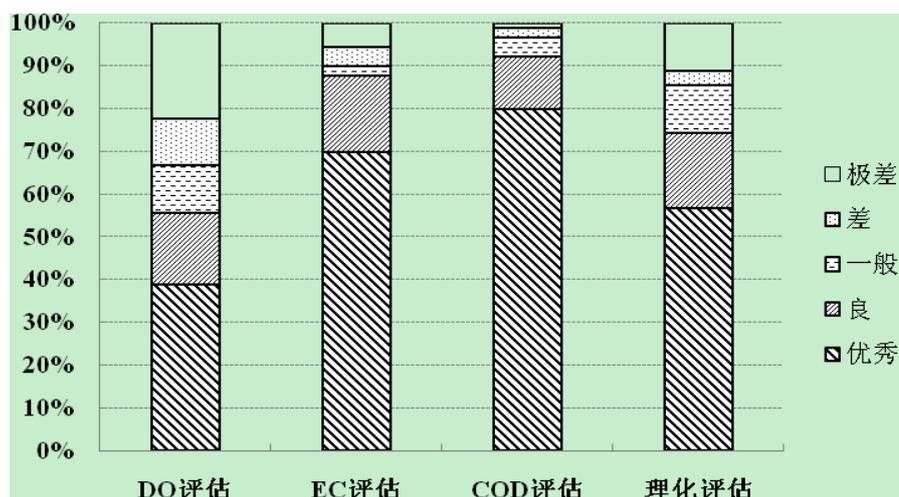


图 1-2 流域健康评价等级组成柱状图标准样图

B. 雷达分析图：通过雷达分析图分析各大类、不同分区的不同等级评估结果

对于各个区域或者每个类型评估的雷达图，每条射线分别代表不同评估指标，雷达图上阴影覆盖到射线上的位置，表明该射线所代表的指标的评估数值；对于比较不同水生态功能亚区、比较不同河段类型的水生态健康雷达图（图 1-3），射线代表被评价的类型或者生态功能亚区，雷达图上阴影覆盖到射线上的位置，表明该射线所代表的河段类型和水生态功能亚区的综合评估数值（图 1-4）。

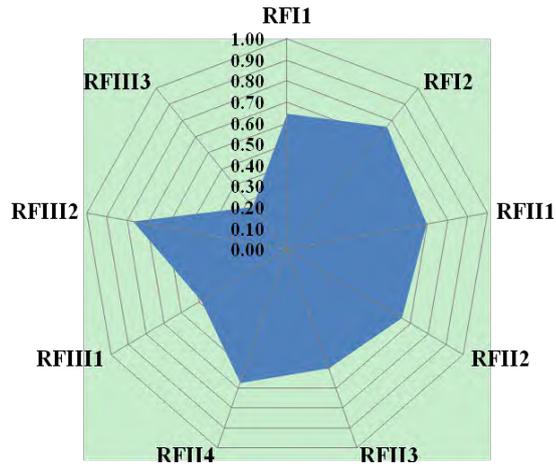
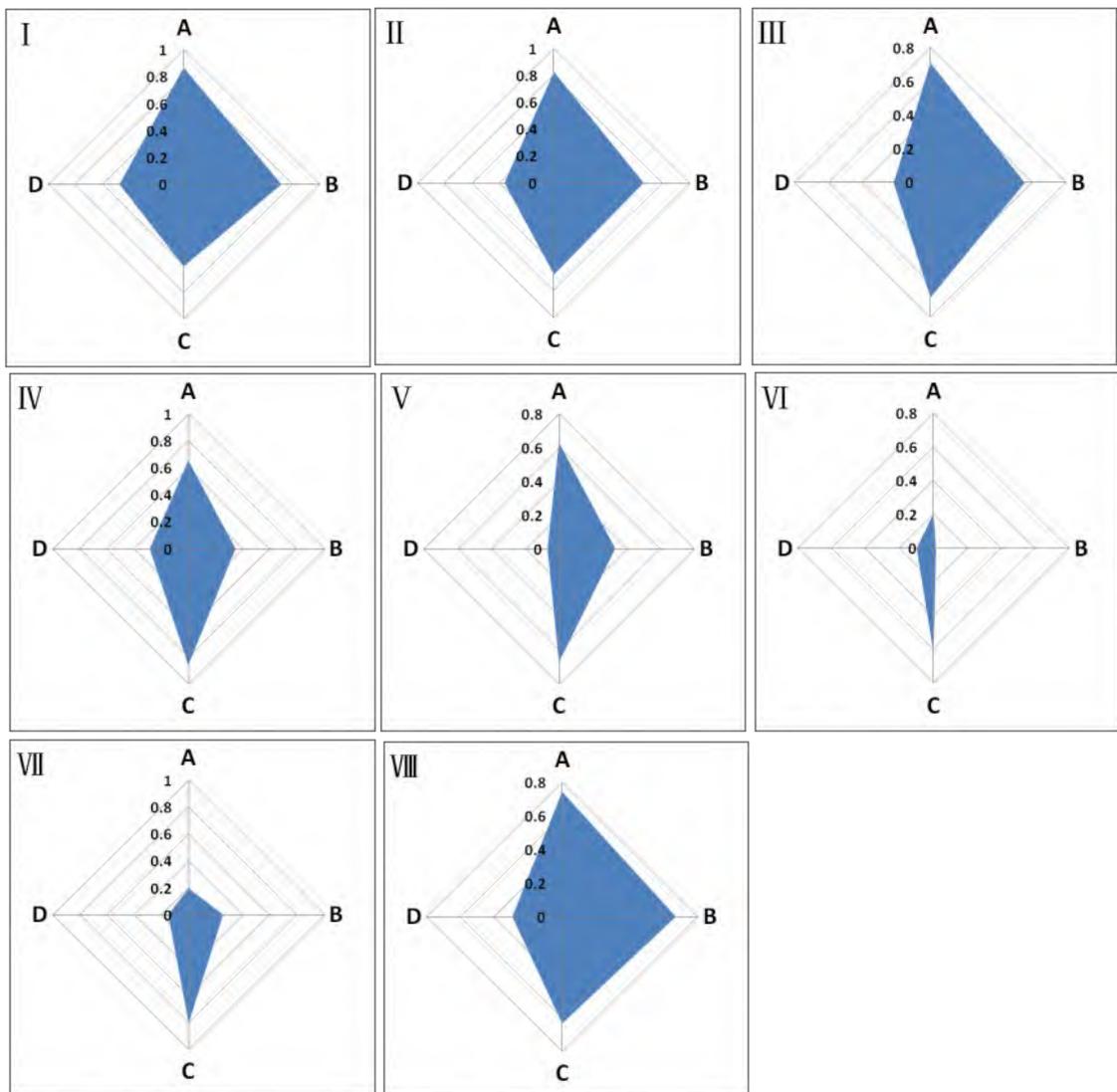


图 1-3 水生态功能亚区/河段类型生态系统健康等级综合对比图



A: 理化评估; B: 营养盐评估; C: 浮游藻类评估; D: 底栖动物评估

图 1-4 各河段类型水生态系统健康各大类评估对比结果图示

C. 空间分布图: 充分应用地理信息系统技术, 通过空间点位分布图和分区分布图表示整个流域不同等级评价结果的空间分布状况。

⑤在充分集成流域水生态系统健康评估成果的基础上, 构建评估指标库、数据库、模型库以及预案库, 并最终构建集数据处理、数据传输与网络共享、流域水生态系统健康评估为一体, 具有通用型和可扩展性的水生态系统健康评估平台技术。水生态系统健康评估平台以信息管理和评价管理两部分为主体机构, 综合运用地理信息系统技术、数据库技术和软件工程技术, 基于模块化程序设计的思想, 采用有计划分步实施的方法进行应用系统的分层集成, 并采用B/S (浏览器/服务器) 结构设计, 系统整体架构采用三层模型, 即分别为数据底层、服务中层和用户上层。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点:

①流域水生态健康评估是流域可持续管理的重要科学依据之一, 现阶段关于流域本身的水生态健康评估技术研究更多地集中于局部河段和少数断面, 对整个流域系统水生态健康评估的工作还处于起步阶段, 本技术在样点布设方面遵循系统采样的思路 and 原则, 在国内外的研究中首次充分考虑了流域干流、主要支流、入湖河流、城市河段以及水库、湖体、源头溪流等各类水生态系统, 与现有的流域评估案例相比, 充分体现了采样空间的系统性、完整性、代表性和科学性。

②目前国际上发展了多套评估方法, 采用理想河段或样板河段, 或者采用一定的水质指标和生物指标作为评估基准值, 而通过水环境与水生生物定性定量关系构建综合评估体系研究较少, 国内研究也多集中于水质指标评价为主, 本技术在水质-生物相互作用机制的基础上构建了具有客观性、适用性、科学性的“水质-生物”综合评估指标体系; 同时技术结果表达运用了三种不同统计图形式, 并从流域整体-功能分区-生境分类三个层次进行了综合分析, 这是在国内评估结果统计和分析过程中的首次应用, 在应用管理上避免了结果片面带来的后期管理决策失误。

③针对目前水生态健康评估技术体系应用性和便捷性存在的不足, 在评估技术过程实现和结果应用可视化、网络化方面构建了集数据处理、数据传输、网络共享为一体的具有通用型和可扩展性的水生态系统健康评估平台。本技术研究优化集成了现有的水生态健康评估理论和技术, 并且在结果综合分析表达以及数据库平台创建方面首次应用于流域水生态健康评估, 技术方法上达到了国内领先、国际先进水平。

(4) 技术来源及知识产权概况



优化集成。

申请发明专利 1 项，张志明，高俊峰. 一种用于生物多样性保护的河流网络构建方法及其应用. 申请号：201410629363.1。

获得软件著作权 2 项，

北京师范大学. 淡水生态系统生态健康评估软件. 登记号：2013SR083993，首次发布日期：2013年6月22日；

中国环境科学研究院，中国科学院大学. 流域水生态健康评估平台软件 V1.0. 登记号：2016SR270699，首次发布日期：2016年9月22日

实际应用案例：

案例 1

该技术已在松花江、海河、淮河、东江、黑河、滇池、洱海、巢湖等我国 8 个重点流域的水生态功能健康评估中得到了应用，完成了重点流域水生态健康评估，编制了重点流域水生态健康评估报告。

案例 2

目前本技术中的流域水生态健康评估指标体系构建技术已经被《中国重点流域水生态系统健康评价绿皮书》所采纳，该项技术将要在进一步开展的全国层面上的流域水生态健康评估过程中得到应用。

依托课题：

流域水生态保护目标制定技术研究（2012ZX07501001）和重点流域水生态功能三级四级分区研究（2012ZX07501002）

1.2 水环境安全评价

1.2.1 有毒有害与高氮磷污染底泥勘测鉴别评估技术

技术发展阶段：推广类技术

适用范围：内河湖库污染调查、底泥环保疏浚

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

底泥原状精确勘测技术是测量精确定位技术与原状取土技术的组合，污染底泥原状取土技术采用自主研发的中闭锁式原状取土器，配备相关的采样平台，实现了流态、流塑态、软

塑态底泥一次性柱状全采取。

在底泥原状精确勘测基础之上，对采集到的样品进行分析测试，得到样品的物理指标和化学指标；然后开展水体底泥的初步鉴别评估，确定重点研究区的位置及范围，利用地理信息系统的空间插值分析，确定不同类型污染研究区域及重点污染物；然后对重点研究区域及重点污染物进行详细鉴别评估，再利用地理信息系统中的空间分析模块，将已确定的总氮严重污染区、总磷严重污染区、重金属高风险区域、持久性有机物污染区域进行叠加，即可得到不同污染类型的底泥环保疏浚范围。

(2) 工艺流程：

工艺流程为“测量精确定位-原状土样采取-土样的现场检验、封装、贮存、运输-实验室分析-初步鉴别评估-详细鉴别评估-确定环保疏浚范围”。具体如下：

①测量精确定位

采用RTK定位技术与CORS网络实现勘察取样的平面定位，采用回声测深仪实现勘察取样的垂直定位。

②原状土样采取

取土器应平稳下放，不得冲击孔底；取土器下放后，确定水深、钻具长度与孔深；提升取土器之前为切断土样与孔底土的联系可以回转1~2圈或者稍加静置之后再提升；提升取土器应做到均匀平稳，避免磕碰。

③土样的现场检验、封装、贮存、运输

取土器提出地面后，小心将土样连同容器内衬管卸下，使用推土器将中闭锁轴阀中的土样推出，土样密封后填贴标签贮存，土样采取之后至开土试验之间的贮存时间不宜超过2周。

④对采集到的样品进行分析测试，得到样品的物理指标和化学指标。

⑤水体底泥的初步鉴别评估，将分析测试结果与水体的背景值或者该水体区域的底泥质量指南相比较，如果分析测试结果的数值小于阈值效应浓度，则该区域水体底泥不需要进行疏浚，如果分析测试结果的数值大于阈值效应浓度，则该分析测试结果所代表的物质为重点污染物。

⑥确定重点研究区的位置及范围，利用地理信息系统的空间插值分析，确定不同类型污染研究区域及重点污染物。

⑦对重点研究区域及重点污染物进行详细鉴别评估，对以下内容进行详细评估：采样点布设、底泥样本的采集、全底泥和间隙水化学指标评估、毒性评估、生物累积评估和/或底栖无脊椎动物群落分析。



⑧利用地理信息系统中的空间分析模块，将已确定的总氮严重污染区、总磷严重污染区、重金属高风险区域、持久性有机物污染区域进行叠加，即可得到不同污染类型的底泥环保疏浚范围。

（3）关键技术

①污染底泥精确勘测取样技术

污染底泥原状精确勘测技术主要应用于河流湖泊底质调查等岩土工程勘察领域，常规取样技术无法采取底泥上覆的悬浮、流态物质，采取表层的流塑状态的底泥时扰动大，以致在勘测过程中无法辨别和精确定位，但该段是污染物富存段，原状柱状样的采取，对环保评价十分重要。污染底泥原状取土器采用中闭锁技术，取得了悬浮状、流态、流塑态、软塑态底泥一次性柱状全采取的突破性进展。多次实践证明，污染底泥原状取土器原状率平均可达到92.3%以上，满足项目目标原状率90%的要求。

②有毒有害与高氮磷污染底泥鉴别评估的关键技术

由底泥初步鉴别评估确定出沉积物的重点研究区，在此基础上选择性的进行详细鉴别评估，最终确定底泥环保疏浚范围的边界和范围。对底泥的污染类型进行分类，分别确定不同污染类型底泥环保疏浚范围，为后续的疏浚底泥处理处置提供方式提供参考。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：天津市水利科学研究院

底泥原状精确勘测技术2010年9月应用于于桥水库底质调查采样，大幅提高了采样的效率、原状率，为后期的科研课题提供了准确的基础资料，主要表现如下：

①中闭锁式污染底泥原状取土器采样原状率均在90%以上；

②该设备采样时提高了湖泊底泥上层流动、浮动状态底泥的采取率，同时，取土器中设有可视化取土管，可以实现对污染底泥更为直观的描述与分析；

③原状取土器与精确定位技术相结合，提高了勘察结果的精确度。

湖泊底泥的精确采样，可以提供准确的基础资料，这对湖泊治理方案的科学性有较好的保障。基础资料的精确，一方面可以避免不必要的投入，节省资金，另一方面，可以科学合理地制定湖泊治理方案，经济、社会、环境效益显著。

依托课题：

有毒有害与高氮磷污染底泥环保疏浚与处理处置技术及工程示范（2008ZX07101-010）

1.3 富营养化状态评价

1.3.1 基于低通滤波轨线法的湖库富营养化返贫路径识别技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：本方法适用于历史数据较长的单一湖泊水库的富营养化恢复路径的识别

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

目前归纳的三种基本的藻型富营养化湖泊恢复路径为：

原路径：营养限制因子负荷降低，生境按原污染路径恢复，营养物浓度上升路径的富营养化基准阈值对营养物浓度下降路径依然有效，没有发生草藻迁跃、生境变动等导致的延迟。当污染较轻时，其恢复路径可接近原始上升路径，只要负荷削减到污染前的水平，*Chla* 浓度恢复，返贫成功，可称其为原路径回归。

左旋路径：当污染较重时，如浅水湖库已完成草藻迁跃后，上升路径的富营养化基准阈值对浓度下降路径无效，满足 *Chla* 阈值需求的营养物浓度控制更严格。其恢复路径将在原始上升路径的左侧，对负荷削减响应迟缓，负荷削减到污染前的水平，*Chla* 浓度仍较高，返贫艰难。

右旋路径：恢复初期营养限制因子负荷不降低而 *Chla* 下降，生境未按原污染路径逆滞或恢复，*Chla* 对营养物浓度的响应发生右偏（可能在一段时期为非协调性的负相关关系），即藻类对营养物的利用效率降低，是对物理生境改变等产生的响应。

湖泊恢复路径的表达以因果变量同步低通滤波后，在二维散点图中以矢量轨线范式表达。

(2) 技术流程

对湖泊单一变量逐一时间过程进行低通滤波，再在二维图上进行相空间轨线的描述（如 *Chla-TP* 关系），通过调试后有明显结构特征的轨线，用于湖泊返贫路径的识别或预报。

低通滤波相空间轨线概念及画法：对状态变量的时间序列数据采用相同的滤波方法及带宽 W （局部估值的数据范围，相当于所滤波周期的 2 倍）进行单一趋势变化的描述，然后将时点滤波值作为趋势项；然后按趋势项建立相空间轨线。根据不同需要，不同确定度要求，采用不同带宽，选择性过滤不同的周期的影响，识别决定性影响因素、判断因果关系及过程。

本研究低通滤波主要采用 LOESS 法(局部加权回归散点修匀法，locally weighted scatterplot smoothing)进行时间滤波，其优点是非参数化，比较灵活，时段首尾数据完整（一



般算术滑动平均方法在首尾两端数据有缺失），可以较好的处理少量数据的缺失的问题。当然由于采用的方法简单，一般不具备直接的拐点预测功能，在拐点出现后，则有一定趋势延续的预报功能。由于时间滤波方法很多，未来可以有多种选择以适应不同场合，特别是可以借助各种谱分析方法，提高预测能力。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

低通滤波轨线法：针对具体湖泊分析，可以摒弃传统方法带来多湖定标的不确定性，同时其等同于非线性相关而优于线性相关，这种非线性相关又带有时序及趋势预报功能，是将传统不分时序散点相关图及单指标时间过程趋势分析表达整合到一起的多指标时序因果关系图（相空间表达），并有多种滤波带宽的选择，增加了识别不同时间尺度问题的可能性。

技术创新点：

①摒弃了传统数据变量无时序的散点相关建立的压力-响应关系的全时段平稳假设，使压力-响应关系得应用从静态向动态过渡。可以适应多解问题；

②将几个单指标的时程趋势分析结果整合到二维轨线图上，以直观清晰表达压力-响应关系的趋势变化。较单指标时程趋势分析更便于识别指标间的领先滞后关系或因果关联，从方法学上，较人为定性得到的趋势线更为量化及多样的选择性；较采用理论方法建立纯粹的机理动力学曲线无过多假设及较苛刻的边界条件，完全根据分湖实测数据滤波演化形成；

③可以引入背景条件趋势变化分析，明确其对产藻效率及营养物环境容量的影响。如调水导致入湖水量增加、运行水位降低、滞留时间减少、电厂温排水取缔导致水温下降等，则外负荷削减过程中会出现湖库氮磷浓度提高，Chla 浓度下降（或藻类利用营养物的效率下降，如年均 Chla/TP 减低），形成治理成本相对较低的右旋路径回归。若在回归过程中出现背景条件的不利趋势性则构成左旋回归路径，往往恢复艰难成本高昂。

实际的湖泊恢复轨线还可细分为 7 种（左旋三种，右旋三种、原路径一种），通过路径识别可以了解返贫恢复的难度、已经采取措施的效果及未来改进的方向。

滤波轨线选用的滤波的带宽 W 设计：

①时间过程的多周期叠加第一主周期，且一般不超过十年（水文、气象等等受太阳辐射及太阳黑子数 11 年准周期影响，其自身指标响应的第一主周期多为 3-8 年）。一般取值 $W=2T$ 可基本过滤掉 T 周期（及其分数倍的短周期）贡献。W 取值在 11-22 之间较为使用，即以过滤掉 5.5-11 年周期为主。历史数据较长时可适当扩展。

②不封闭湖泊滞留时间一般要较封闭湖泊短。对于滞留时间超过 10 年的半封闭或封闭湖泊（如内流湖）湖泊，建议 W 最大取值 22。

③光滑原则，当曲线较为平顺，过渡自然时所选 W 即可。

④长短结合原则，滤波取长周期可平抑大的周期波动，看到明确趋势；滤波采用长周期的半周期，可以看到周期内波动及峰值影响。数据长度足够长可以进行多周期滤波对比分析，得到更有用的结论。

⑤数据长度限制，一般建议 W 小于 $Chla$ 数据长度的 $2/3$ 。

通过不同湖泊案例识别的“返贫路径范式”，可应用推广到各类湖泊藻型富营养化水质目标的适用性管理中，可有效地减低入湖氮磷总量削减的盲目性、提高补水工程效果的有效性 & 确定过程目标的合理性，以及提出应对背景环境因子趋势性变化的管理需求。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506-008）

1.3.2 分湖富营养化营养足迹指数（TFI）评价方法

技术就绪度评价等级： 8级

适用范围：本方法适用于功能水体控藻要求的湖泊的评估，有10年以上历史数据的湖泊（天然湖泊及滞留时间大于14-20天的水库等水体）

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

“营养足迹指数法（TFI）”为分湖模式-利用滤波轨线实现拐点识别及时段划分，采用参数或非参数方法建立藻类密度与营养物浓度响应关系多时段曲线，及非线性多时段营养指数 TFI 关系，实现营养状态评估的“一湖多标”。该方法的最大优势是在富营养化湖泊“返贫路径”中的非响应关系段进行适当的预估和评价，这是现有方法无法实现的。

TFI($Chla$)的计算赋分方式为全国统一，即“全国一标”，体现灾害水平的一致性。TFI($Chla$)仍维持传统方法的百分值，但将TFI增加10分的 $Chla$ 的倍增率改为 e 倍，使TFI为100分的 $Chla$ 低限值放大，可提高热带湖泊的富营养化状态的分辨能力。

TFI(TP)、TFI(TN)的计算赋分模式体现空间的异质性及时段的差异性，分湖分时体现的侧重不同，分湖强调“一湖一标”体现准度高，分湖分时段强调“一湖多标”体现动态跟踪及时把握响应关系可能发生的阶段变动，体现动态准度的把握。

分湖变权综合营养状态指数 TFI_{CW} 方法由于采用分湖数据可克服传统方法多湖回归建



模带来单湖评价系统误差（大总体关系用于小总体带来的准度偏差-“平移效应”）、采用依时序非线性相关方法可克服传统方法背景条件平稳假设导致的系统误差（以静态关系应对动态变化带来的准度偏差-“平稳效应”）、采用剔除普适性差的指标的方法可克服多指标加权带来系统误差（低敏感后果与高敏感后指标的平均导致危害水平的低估-“平坦效应”）。

（2）技术流程

①识别趋势拐点确定分时段建模数

A. 利用分湖时间序列数据建立 *Chla*-TP（TN）的滤波相空间轨线。进行拐点识别，获取可独立建立 TFI 关系的线段。

B. 利用分湖数据建立 TN-TP 的滤波相空间轨线,研判主要营养物间的领先关系。选择需要建模的营养物因子及时段。

②非参数法建模

根据每个分段的滤波轨线确定实测数据 TFI（TP）（或 TFI（TN））：

A.根据式（1）式用 *Chla* 值的滤波值序列生成对等 TFI 序列。用 TP 滤波序列与 TFI 序列值形成 TFI-TP 关系线。

营养足迹指数 TFI 算式：

$$TFI(Chla) = 50 + 10\ln\left(\frac{Chla}{10}\right) \quad (1)$$

B. 若有所求 TP 点不在轨线 TP 的取值范围内，根据轨线的走势适度外延（一般不外推到实测数据范围外）得到轨线延长线。

C. 利用轨线查图(或给出近似公式)得到所求实测点 TP 对应的 TFI 值。

③参数法建模

根据分段的数据，建立不同的 *Chla*-TP(TN)回归关系式（如幂指数、对数、指数、线性等）：

$$Chla=f_{TP}(TP) \quad (2)$$

$$Chla=f_{TN}(TN) \quad (3)$$

确定回归线参数。将 *Chla* 与营养物浓度的回归关系 (2)(3)式带入（1）

$$TFI(TP) = 50 + 10\ln\left(\frac{f_{TP}(TP)}{f_{TP}(TP_C)}\right) \quad (4)$$

$$TFI(TN) = 50 + 10\ln\left(\frac{f_{TN}(TN)}{f_{TN}(TN_C)}\right) \quad (5)$$

式中：TFI(TP)和 TFI(TN)分别为营养足迹指数关于 TP 和 TN 的函数；其富营养化临界阈值表达为：

$$TFI(Chlac) = TFI(TP_C) = 50, \text{ 对应的 } TP_C = f_{TP}^{-1}(Chla = 10)$$

$$TFI(Chlac) = TFI(TN_C) = 50, \text{ 对应的 } TN_C = f_{TN}^{-1}(Chla = 10)$$

变权综合营养足迹指数 (TFI_{CW}) 评价

变权综合营养足迹指数 (TFI_{CW}) 计算公式为:

$$TFI_{IM} = \text{Min}(TFI(TP), TFI(TN)) \quad (6)$$

式中, TFI_{EX} 为显势营养状态指数, TFI_{EX} 表达实际发生浮游植物的密度状态, 在缺乏 *Chla* 数据的且非藻类颗粒物可忽略的湖库及水质良好的景观湖泊, 可采用 SD 作为显势因子替代 *Chla* 进行营养状态评价。计算公式为:

$$TFI_{EX} = TFI(Chla) \quad (7)$$

$$\text{或 } TFI_{EX} = TFI(SD) \quad (8)$$

TFI_{IM} 为潜势营养状态指数, TFI_{IM} 表达管控的营养物指标在确定背景环境下 (相对平稳的水文气象人类活动过程等) 所可能形成的浮游植物密度的潜力, 往往受到限制因子的控制。

$$TFI_{IM} = \alpha TFI(TP) + \beta TFI(TN) \quad (9)$$

式中权重系数 $\alpha + \beta = 1$

当不存在氮磷协同效应时, 可有:

磷限制时: 取 $\alpha = 1, \beta = 0$ (*Chla*-TN 正相关性差)

氮限制时: 取 $\alpha = 0, \beta = 1$ (*Chla*-TP 正相关性差)

即:

$$TFI_{IM} = \text{Min}(TFI(TP), TFI(TN)) \quad (10)$$

当磷氮存在协同效应时 (如同等 TP 浓度条件下, TN 浓度增 *Chla* 浓度增), 建议取值:

$$\alpha = \frac{r_{TP}^2}{\sqrt{r_{TP}^2 + r_{TN}^2}} \quad (12)$$

$$\beta = \frac{r_{TN}^2}{\sqrt{r_{TP}^2 + r_{TN}^2}} \quad (13)$$

式中 r_{TP} 和 r_{TN} 分别为 *Chla* 与 TP 和 TN 的相关系数。

一般如果出现连续的 TFI_{EX} 占优 (如十年九遇), 说明背景环境因子在恶化, 原营养物标准偏松, 可能需要修正; 如果出现连续的 TFI_{IM} 占优 (如十年九遇), 说明背景环境因子在好转, 原营养物标准偏严。

分析气候变化、出湖水量等是否存在趋势性变化, 研究分段的原因, 提出未来适当的营养物控制标准, 以及恢复措施的改进。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

营养足迹指数 TFI 方法是一种分湖营养状态评价方法, 具有定标、验标及过程识别功



能。可克服多湖回归建模带给分湖评价系统误差、评价偏离基准（标准）或保证率偏离；也可以克服多湖回归建模无法应对分湖自身背景条件趋势变化带来的营养物阈值改变的问题；同时分湖的营养物浓度过程表达清晰、路径可辨，是多湖建模所无法实现。因此，依据分湖数据建立的 TFI 具有很好的灵活性，可以进行分时段建模验标或定标，并有一定的预测功能。营养足迹指数 TFI 方法可以进行多阶段变线评价、多指标变权（TFI_{cw}）评价、多指标对比评价、多周期对比分析。较之不考虑时序营养水平指数建模取值方法有更精准的取值适用区间及范围。TFI 为非线性及考虑时序方法，较之一般对数线性及不考虑时序的概率统计方法更具优势，特别是针对藻型富营养化湖泊的管理及评价。

①营养状态评估

TFI 主要采用年均进行评价。TFI(*Chla*)的计算赋分方式为全国统一，即“全国一标”，体现灾害水平的一致性。TFI(TP)、TFI(TN)的计算赋分模式体现空间的异质性及时段的差异性，分湖分时体现的侧重不同，分湖强调“一湖一标”体现准度高，分湖分时强调“一湖多标”体现动态跟踪及时把握响应关系可能发生的阶段变动，体现动态准度的把握。

②湖泊藻华敏感度评估

TFI 指数提供了这样一种湖泊藻华敏感度评估的方法，其指标为 TP_c (TN_c) 值，其含义是利用分湖 TFI 关系的建立得到的 *Chla* 临界阈值(10μg/L)与临界 TP_c (TN_c) 值，这些值在实测中很难遇到，用 TFI 公式建模推算则相对容易。

在分湖中比较，不同时期 TP_c (TN_c) 值差异体现了环境营养物承载力的变化。

在多湖中比较，同时期全国 TP_c (TN_c) 排序可以看到敏感湖泊的分布，治理投资的可能投向。

在分类研究中，可以筛选不同因素对湖泊藻华敏感度的贡献，进而研究指向明确的物理修复范式。

湖泊藻类敏感度 AS (Algal sensitivity):

$$AS = \max(ETP_c, ETN_c) = \max(10/TP_c, 100/TN_c)$$

③辅助营养物定标

由于预测恢复路径可以有效指导富营养化的治理，预测性的参考轨线是一种前瞻性的定标方法，TFI 可以依据预测轨线，进行状态评估。

④营养物验标方法

TFI 是一种跟踪历史足迹的评估方法，随着数据的向前延伸，从而识别从变化的或新的周期或模式，需要采用改进的参数，修改或修正以前的评估值。是一种自自适应可反馈的范

式。可以对现有义务标准进行校核，提出改进意见。

⑤过程识别方法

TFI 方法强调动态变化的识别及跟踪后评估性作用，是控藻过程管理的工具。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

滇池外海的恢复路径大致有三条（参见图 1-5）。若无草藻跃迁，外海大致可按绿色的原路径（污染路径）第一 TFI 线恢复（绿色）恢复，但现在已不可能。若在 1995 年以前大幅度削磷控氮还存在机会。目前补水工程实现了出湖径流的恢复（稀释环境容量仅是恢复而不是增长）。保障入湖总量削减的前提下，可能的恢复路径是第二条 TFI 线（蓝线）。若持续丰水年且叠加补水工程满负荷补给外海，构成局部时期的持续高过流量，有可能实现第三条 TFI 线恢复（红线）。

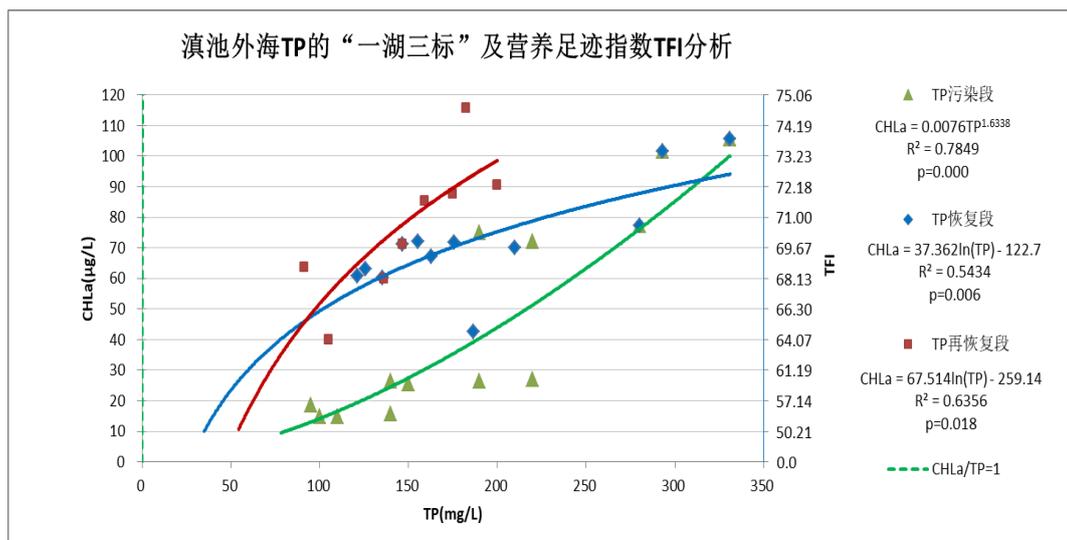


图 1-5 滇池外海 1988-2016 年分段 TFI 应用图

处于不同的阶段，TFI 需要采用不同 TFI(TP)才能比较精准的把控满足控制 *Chla* 要求的 TP 阈值范围，由于很多时候无法先验预知未来的变化，TFI 有时需要后评估修正，以消除可能的早期数据干扰，而适当的预测建模可能会把握未来变化的可能性。表 1.4 为一个分湖的湖泊藻类敏感度的过程变化评估，用湖泊藻类敏感度表示了滇池外海“一湖三标”的起伏过程，持续增流减污，则前景看好。

表 1.4 TFI=50 定义的外海湖泊敏感度变化

项目	污染段（负荷增加，水	恢复段（负荷削减，水量	再次恢复段（负荷削减，
----	------------	-------------	-------------



	量缓降)	持续减少)	水量恢复)
TPc($\mu\text{g/L}$)	81	35	54
藻类敏感度 AS	0.123	0.287	0.186

依托课题:

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506-008）

1.3.3 湖泊富营养化变权营养指数（TLI_{cw}）评价方法**技术就绪度评价等级:** 6级**适用范围:**本方法适用于湖泊水库的富营养化营养状态评价。**主要技术指标和参数:****(1) 基本原理**

变权营养状态指数法（TLI_{cw}）是对现有综合营养状态指数法（TLI）的改进。TLI_{cw}反映目前背景条件下营养物水平可以导致的浮游植物密度水平，从而与氮磷负荷的削减产生明确的关联。式中的取两者中最大值方法，相当于分项 TLI 的权重系数不固定且仅有 0 和 1 两个取值，权重系数全部赋予大者。其含义为实测 *Chla* 水平高于 *Chla* 与营养物回归线，取实测 *Chla* 值；实测 *Chla* 水平低于 *Chla* 与营养物回归线，取回归线 *Chla* 值。这较传统 TIL Σ 方法接近回归线的方法保证率更高，采用 TIL Σ 的方法保证率约 50%，即约有 50% 的年份实际发生水平高于评价水平，而 TIL_{cw} 的保证率在 75% 左右，即约有 25% 的年份实际发生水平高于评价水平。

(2) 技术流程

①收集湖泊历史数据

主要水质指标是 *Chla*、TP、TN。②制定藻密度指标的营养指数 TLI(*Chla*)公式

$$\text{TLI}(\text{Chla})=50+25\lg(\text{Chla}/10) \quad (1)$$

③建立营养物指标的营养指数 TLI (TP) 和 (TN) 公式

A. 建立 *Chla* 与营养物指标压力响应回归关系 $\text{Chla}=f_{\text{TP}}(\text{TP})$ 和 $\text{Chla}=f_{\text{TN}}(\text{TN})$ B. 利用回归关系降 (2) 式中 *Chla* 替换转化为 TP (或总氮)，得到一只表 TLI(TP)或

TLI(TN)关系式:

$$\text{TLI}(\text{TP})=50+25\lg(f_{\text{TN}}/10) \quad (2)$$

$$\text{TLI}(\text{TN})=50+25\lg(f_{\text{TN}}/10) \quad (3)$$

④评价分析

将实测数据带入(1)-(3)式得到单项指示 TLI 的计算结果,然后通过(4)计算 TLI_{cw} 表明富营养化程度。

$$TLI_{cw} = \text{Max}(TLI_{EX}, TLI_{IM}) \quad (4)$$

如果目标湖泊可用历史数据不足,可用 TLI 的全国通用公式。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

课题提出的湖泊营养状态变权综合评价方法,剔除普适性较差或处于时段非协调状态指标,在后果指标选用一个最敏感指标作为显势指标(表示实际藻灾水平),在原因指标选用一个限制性指标作为潜势指标(表示可能藻灾水平)。最终的评价水平由显势及潜势富营养化水平的高者决定,避免为得到单一综合值,而取平均和极大值带来的失准问题。

变权综合营养状态指数 TLI_{cw} 方法采用分湖数据建立响应关系,则可克服传统方法全国数据建模的通用模式 TLI 带来的单湖评价系统误差(大总体关系用于小总体带来的准度偏差-“平移效应”)、采用分湖数据依时序建立非线性相关方法可克服传统方法背景条件平稳假设导致的系统误差(以静态关系应对动态变化带来的准度偏差-“平稳效应”)。由于 TLI_{cw} 方法剔除了普适性差的后果指标 COD_{Mn} , 后果指标 $Chla$ 和 SD 二者选一的方法可克服多指标加权带来系统误差(低敏感后果与高敏感后指标的平均导致危害水平的低估-“平坦效应”)。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例:

以三峡水库支流龙河回水区评价为例说明有关问题。

从表 1.6 可以看出,按现有综合营养状态指数 TLI (Σ) 方法,龙河回水区中段 2004-2012 年 TLI ($Chla$) 连续 12 年的小于 TLI (TP) 及 TLI (TN),从理论上讲,其 TLI (TP) 及 TLI (TN) 应予 TLI ($Chla$) 处于同一水平,其数据应在其水平上下波动,保持因果关联,而不是整体偏上。这说明存在系统误差,全国通用 TLI 对 TP 或 TN 与 $Chla$ 的关系的描述不适合龙河。

TLI ($Chla$) 九年均小于 TLI (Σ),说明实际发生的富营养化水平被高估。从标中数据可以看出这一高估基于 TLI (TP)、TLI (TN) 表达的富营养化水平被高估。

表 1.6 显示 TLI ($Chla$) 12 年均大于 TLI (COD_{Mn}), 且有成倍之差,属严重低估。作为结果指标,将其纳入营养状态评估是不合适。TLI ($Chla$) 与 TLI (SD) 与虽整体偏差不足 10 分,但某些年份也差距较大,在整体呈负相关($Chla$) 与 SD 则呈正相关),且近年高



水位运行后，TLI (SD) 持续小于 TLI (Chla) 也存在藻华低估态势，作为结果指标，将其纳入营养状态评估也是不合适的。

综上所述，全国通用 TLI (Σ) 未能反映出龙河营养状态的真实情况，叶绿素 a 的营养状态指数小于其他指标的营养状态指数，相关加权后，得到的综合营养状态指数 TLI (Σ) 大于 TLI (Chla)，实际上是高估了龙河的营养状态。高水位运行后，TLI (Σ) 结果与 TLI (Chla) 接近，但这是在 TLI (COD_{Mn})、TLI (SD) 两个不适宜的代理变量引入拉低后的结果。

表 1.6 三峡水库支流龙河回水区中段 2004-2012 年营养指数 TLI

年份	TLI(Chla)	TLI(TP)	TLI(TN)	TLI(SD)	TLI(COD _{Mn})	TLI(Σ)	综合营养状态
2004	35	61	67	75	28	51.6	轻度富营养
2005	36	54	66	62	22	47.0	中营养
2006	37	58	59	48	22	44.2	中营养
2007	38	48	57	53	27	44.0	中营养
2008	44	60	65	57	31	50.7	轻度富营养
2009	38	54	64	53	21	45.2	中营养
2010	55	78	71	53	46	60.0	中度富营养
2011	43	57	64	52	27	47.8	中营养
2012	51	62	66	52	22	50.4	轻度富营养
2013	50	62	65	43	21	48.2	中营养
2014	56	64	69	43	25	51.8	轻度富营养
2015	50	60	66	47	25	49.7	中营养
2016	52	58	67	47	24	49.5	中营养
均值	45	60	65	53	26	49.3	

表 1.7 为剔除 SD 和 COD_{Mn} 的全国通用公式和龙河库湾数据建立的本地公式计算结果 TLI_{cw} 对比。从表中可以看出除了 TLI(Chla) 作为基准公式未变外，其他指标通用公式较本地公式高估 10-15 分，即全国通用公式用于龙河库湾的准确度误差超过一个营养分级。

表 1.7 全国通用公式与龙河库湾公式计算龙河回水区中段 TLI(Σ) 结果对比

年份	全国通用公式					龙河库湾公式				
	TLI(Chla)	TLI(TP)	TLI(TN)	TLI(Σ)	综合营养状态	TLI(Chla)	TLI(TP)	TLI(TN)	TLI(Σ)	综合营养状态
2004	35	61	67	52	轻富	35	46	48	41	中
2005	36	54	66	50	中	36	41	46	39	中
2006	37	58	59	49	中	37	44	36	39	中
2007	38	48	57	47	中	38	37	35	37	中
2008	44	60	65	55	轻富	44	45	45	45	中
2009	38	54	64	50	中	38	41	43	40	中
2010	55	78	71	66	中富	55	58	53	55	轻富
2011	43	57	64	53	轻富	43	43	43	43	中

2012	51	62	66	58	轻富	51	47	46	49	中
2013	50	62	65	58	轻富	50	46	45	48	中
2014	56	64	69	62	中富	56	48	51	53	轻富
2015	50	60	66	58	轻富	50	45	47	48	中
2016	52	58	67	58	轻富	52	43	47	49	中
均值	45	60	65	55		45	45	45	45	中

表 1.8 列出剔除 SD 和 COD_{Mn} 的全国通用公式与龙河库湾公式的变权指数 TLI_{cw} 结果。

对比表 2 的结果, TLI_{cw} 较 $TLI(\Sigma)$ 要偏大, 突出了单项指标的作用, 避免平均掩盖问题, 对管理的预警指示作用更强。 TLI_{cw} 提示了显势或潜势的主控类型, 全国通用公式 TLI_{cw} 全部潜势指标主控, 需要大幅度削磷 ($TLI < 50$ 保证率仅 8%), 与实际情况不符。龙河公式 62% 显势指标主控, 且以近年为主, 其提示的“脱中致富”的恶化趋势更加明显, 但削磷要求比通用公式结果低的多 ($TLI < 50$ 保证率 62%)。龙河库湾 TLI_{cw} 更精准的提示了 62% 的保证率 ($TLI < 50$), 其在管理上对磷负荷削减量确定更为精准安全。

表 1.8 全国通用公式与龙河库湾公式计算龙河回水区中段 TLI_{cw} 结果对比

年份	全国通用公式			龙河库湾公式		
	TLI_{cw}	营养级别	主控类型	TLI_{cw}	营养状态	主控类型
2004	61	中富	TP 潜势	46	中营养	TP 潜势
2005	54	轻富	TP 潜势	41	中营养	TP 潜势
2006	58	轻富	TP 潜势	37	中营养	Chla 显势
2007	48	中	TP 潜势	38	中营养	Chla 显势
2008	60	中富	TP 潜势	45	中营养	TN 潜势
2009	54	轻富	TP 潜势	41	中营养	TP 潜势
2010	71	重富	TN 潜势	55	轻度富营养	Chla 显势
2011	57	轻富	TP 潜势	43	中营养	TP 潜势
2012	62	中富	TP 潜势	51	轻度富营养	Chla 显势
2013	62	中富	TP 潜势	50	轻度富营养	Chla 显势
2014	64	中富	TP 潜势	56	轻度富营养	Chla 显势
2015	60	中富	TP 潜势	50	中营养	Chla 显势
2016	58	轻富	TP 潜势	52	轻度富营养	Chla 显势
均值	59.13	显势比例	0%	46	显势表达比例	62%

依托课题:

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广 (2012ZX07506-008)



1.4 水生态环境受损原因诊断

1.4.1 湖泊污染成因诊断的集成方法

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：湖泊污染成因诊断

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

在“前期调查-诊断分析”方法的基础上，结合已有调查成果，集成相关评价方法与模型，形成了一套完整的湖泊污染成因诊断方法。该方法包括调查与数据获取、系统分析与问题识别、研究计算与科学评价、水污染成因诊断4个步骤。相较于原“前期调查-诊断分析”方法，该“调查-识别-评价-诊断”方法的调查指标更完善，问题识别更科学，评价方法更具体，成因诊断更准确。

（2）工艺流程：

流程为：调查与数据获取-系统分析与问题识别-研究计算与科学评价-水污染成因诊断。

具体如下：

①调查与数据获取

通过现场调查和资料搜集获取湖泊与其流域的现状数据。

②系统分析与问题识别

根据所获取的资料与数据，分别开展湖泊水污染特征和流域水环境特征分析，对湖泊及其流域问题进行初步识别。湖泊内在问题识别包括湖泊水污染特征、湖泊水生态特征、水体生境（内负荷）特征；流域问题识别包括流域经济发展与产业布局、入湖河流污染特征、湖滨缓冲带特征。

③研究计算与科学评价

通过计算污染负荷、水环境承载力，定量分析与评价湖泊营养状况与生态系统健康状况，分析主要污染源特征，掌握湖泊对污染负荷的承受能力，并确定湖泊的类别，如发达地区大型浅水富营养化湖泊、欠发达地区富营养化湖泊、高原重污染湖泊、富营养化初期湖泊等，为下一步成因诊断提供科学依据。

④湖泊水污染成因诊断

通过分析流域人口密度与水体COD浓度、外界压力与湖泊承载能力的相互关系以及湖

泊-流域生态退化程度，诊断出湖泊水污染的成因即驱动力。

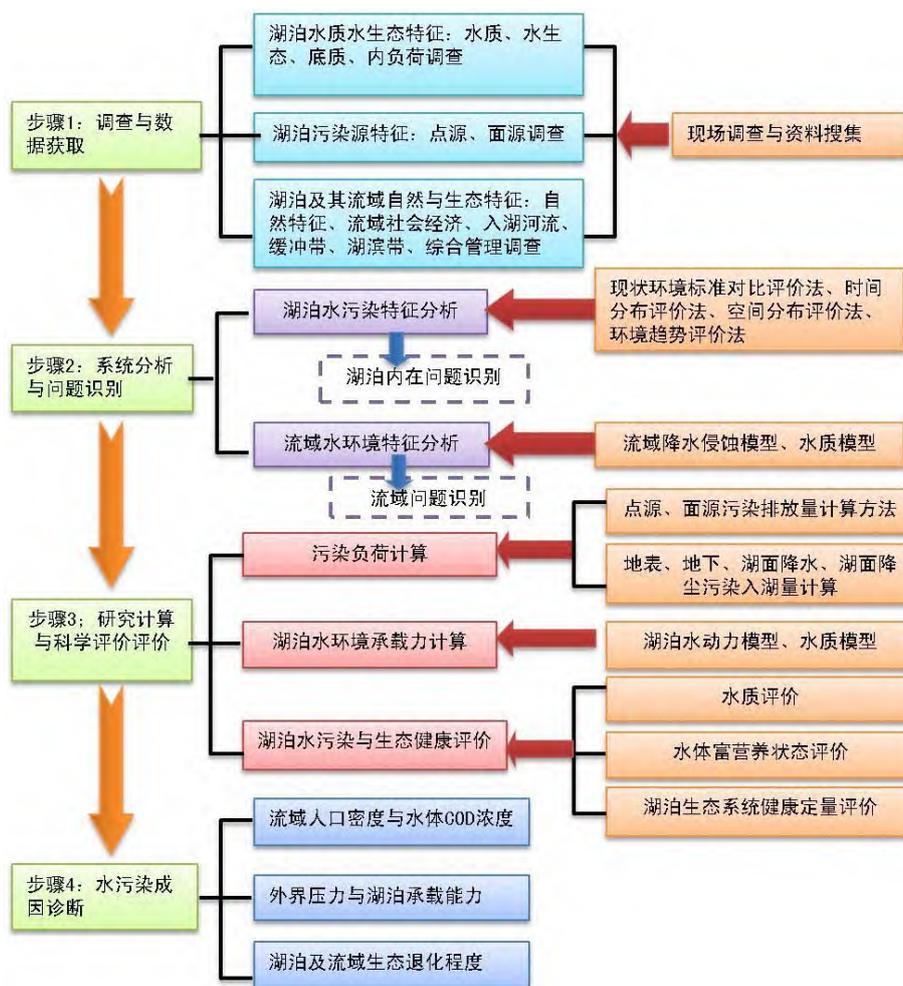


图1-6 湖泊污染成因诊断的集成方法程序

(3) 关键技术

湖泊水污染成因诊断技术。

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

在洱海流域开展湖泊水污染及富营养化成因诊断应用。

依托课题：

湖泊富营养化综合控制技术集成（2009ZX07106-005）



2 排放清单编制和排污负荷核定

2.1 排污图谱解析与排放清单编制

2.1.1 基于水质降解模型与化学质量平衡模型的水污染源源解析技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：水污染源监管

主要技术指标和参数：

研究建立了基于水质降解模型与化学质量平衡模型的流域水污染源源解析技术。该解析技术包括模型的建立、模型的优化、软件的开发，以及模型的应用。首先对水污染源与受体进行了分类，其中污染源分为上游断面、直排工业源、支流源和未知源，然后将污染源在排放口的成分谱通过一维稳态水质模型转化成在受体断面上的成分谱再进行解析。在模型构建的基础上对其进行了遗传算法优化、二重源解析优化和结果最优拟合优化。最后开发出河流污染源解析化学质量平衡受体模型软件系统（NKRCMB1.0）。本研究开发的流域水污染源源解析技术可用于流域水相中污染物的源解析，可解析出具体污染源对环境受体的贡献，既能得到相对贡献率，也能得到绝对贡献值，并附有诊断指标以判断拟合结果的优劣。

实际应用案例：

利用开发的水污染源源解析模型，在山东省小清河流域进行了应用，取得了良好的效果，该解析具有很强的推广应用价值。

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506008）

2.1.2 水污染源多相污染物排放图谱建立技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：水污染源监管

主要技术指标和参数：

研究创建了基于水污染源排放节点全过程的图谱建立技术。首先明确了图谱的类别构成，既包括正常工况排放也包括非正常工况排放，既包括常规污染物，又包括金属污染物和有机

污染物；然后制定详细可行的调查与监测计划，形成了企业综合调查表和水污染物多相监测技术，最后得到水污染源排放图谱。对图谱进一步解析得到反映行业排放特征的污染物和基于现有排放标准的关键控制指标。为便于查询和管理，我们开发出了国内首个水污染源图谱数据库。应用水污染源排放图谱建立技术，建立了钢铁、炼油、印染、杂环类除草剂农药、发酵类头孢菌素制药、啤酒酿造、合成氨化肥七种典型行业的水污染物排放图谱。这一成果可应用于各地各类工业水污染源污染物图谱的建立，弥补了我国关于水污染源污染物成分谱建立技术的空白。典型行业水污染源排放图谱对掌握水污染源特征、实现污染源精细化管理具有重要作用，从对水污染源总量减排的管理要求角度，可以针对不同类型污染源、甚至针对不同的排放源提出不同的总量减排指标限制，使国家、地区的总量控制政策真正落实到排放源。同时，该图谱的建立也是研究水污染源优控污染物筛选技术和水污染源源解析技术的基础，为我国水污染源污染物图谱库的推广建立起到了借鉴作用。另外，该图谱的建立技术将为理清各类企业的排放情况打下基础，为污染源监测、排污申报、环境统计工作和下一次国家开展污染源普查奠定坚实基础。

实际应用案例：

结合环保部规定的重污染行业分类以及山东省小清河流域济南段的污染源行业种类，选择了钢铁、石化、印染、杂环类除草剂农药、发酵类头孢菌素制药、啤酒酿造、合成氨化肥、造纸、酚醛树脂化工9种重点行业，应用水污染源排放图谱建立技术研制了这9种行业典型企业的水污染物排放图谱。

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506008）

2.1.3 水污染源优先控制污染物筛选技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：水污染源监管

主要技术指标和参数：

首次建立了基于水污染源污染物排放图谱的正常工况和非正常工况优先控制污染物的筛选技术。综合考虑污染物的暴露势、持久势和毒性势，集成定量评分系统、半定量评分系统建立了优先控制污染物筛选方法。正常工况和非正常工况优控物的筛选方法类似，仅筛选范围不同，前者仅包括水处理设施出口，后者包括原料、辅料、中间物质、产品、工艺废水、水处理设施进口、EPA或中国水环境优控物、国家标准涉及但污染源未检出的物质。筛选因



子主要包括：污染物对总量控制指标（化学需氧量）的贡献率、环境检出率、检出浓度、环境释放程度、使用量、生物降解性、生物累积性、溶解度和挥发度、一般毒性、致突变性、致畸性、致癌性共13项。对各因子归一化求和排序，大于5分的列为优控物初始名单，最后进行专家复审确定优控物名录。应用该筛选方法建立了七种典型行业的优控污染物名录。

从上世纪八十年代末开始，我国开展各类优先控制污染物名录的筛选研究，包括建立黑名单等筛选技术较多，但是大多数是以环境受体、化学品等为主进行的研究。我国参考借鉴了国外同类研究的经验和方法，但目前该领域的研究成果和水平已经超过国外水平。本课题基于水污染源污染物排放图谱的正常工况和非正常工况，尤其是将企业不同排污节点均纳入研究建立的优先控制污染物筛选技术，应该是一个新成果。这一成果可用于企业内部生产工艺过程排污控制，可以对不同产排污环节设计废水处理工艺的技术支持，工业水污染源优先监控污染物的筛选将极大的提高现有流域水环境常态管理和风险预警的有效性和针对性。

实际应用案例：

结合环保部规定的重污染行业分类以及山东省小清河流域济南段的污染源行业种类，选择了钢铁、石化、印染、杂环类除草剂农药、发酵类头孢菌素制药、啤酒酿造、化肥、造纸、化工9种行业典型企业，对其进行优控污染物的筛选。这些清单为污染源的风险控制和日常监管提供了数据支撑，提高了现有流域水环境监管的有效性和针对性，同时为其它行业优控物清单的筛选和建立提供了方法学上的借鉴。仅以发酵类头孢菌素制药行业为例，其它行业仅给出简单结论。发酵类头孢菌素制药行业的典型代表企业为齐鲁安替比奥有限公司。按照优控污染物筛选方法，对发酵类头孢菌素制药的水污染物排放图谱进行筛选，得到正常工况和非正常工况下的优先控制污染物名录。发酵类头孢菌素制药行业的优控污染物包括二氯甲烷、乙醇、苯酚、三氯甲烷、四氢呋喃、3-甲基苯酚、甲苯、乙酸乙酯、4-甲基苯酚、2-甲基苯酚、丙酮、甲基异丁基酮，应急优先控制污染物增加了乙酸甲酯、苯并噻唑。

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506008）

1.4.2 湖泊化学需氧量藻源内负荷贡献分析技术

技术就绪度评价等级:6级

适用范围：

适用于有了解藻源 COD 贡献比例的要求的湖泊，例如：

湖泊水源地由于藻源 DOM 偏高产生二甲基异茨醇等恶臭物质；以及饮用水厂处理高藻

水增加消毒副产品 DBPs（对动物致癌），严重危及到人们饮用水安全。存在这类问题湖泊及 COD 超标湖泊。可以利用本方法分解 COD 的贡献来源，识别藻源 COD 的贡献比例，进而采取针对性的措施降低不同来源的 COD。这里 COD（包括 COD_{CR} 和 COD_{Mn}）

主要技术指标和参数:

（1）基本原理

藻在生长及死亡代谢过程中，均会产生 COD，因此藻源 COD 与 *Chla* 存在正相关的因果关系（协调关系）。根据实测数据能够识别出这一关系，即可得到藻源 COD 与非藻源 COD 比例。

本方法主要借鉴了传统方法-利用年内实测 COD 和 *Chla* 协调关系，推算无藻 COD 值，然后利用 COD 年均值与无藻 COD 值的差值得到藻源 COD 年均贡献。

本方法开发了可以在 COD 和 *Chla* 非协调关系的情况下，通过滤波方法识别 COD 和 *Chla* 的协调关联，进而得到藻源 COD 贡献。

本方法同时采用轨线法或滤波轨线法，识别 COD 和 *Chla* 之间的领先与滞后关系，有助于识别其因果关联是否受到其他因素的干扰。

（2）技术流程

①直接算法:

如果湖泊非藻源COD的作用（主要指平均浓度及增幅）不是很强，可以根据实测COD和 *Chla*数据建立正相关关系。一般比较适合滞留时间小于1年的情景。计算步骤:

- A. 收集年内实测COD和*Chla*（年内测次不低于10次）构成COD和*Chla*年内时间序列；
- B. 建立COD和*Chla*散点图；
- C. 建立COD和*Chla*趋势线（线性相关），得到藻源COD年均估值

$COD = a + b \times Chla$ 。 *Chla*=0时的可认为无藻源COD贡献，即截距a可认为是非藻源COD（一般为外源COD）。藻源COD则可以根据COD的均值与a之差确定。斜率b决定了单位藻源*Chla*的COD产生量，或可称b为*Chla*的产COD效率。如果得不到显著正相关的COD和*Chla*关系，转步骤F；

- D. 建立COD和*Chla*的矢量轨线

如果轨线杂乱无章可认为 COD 和 *Chla* 在时程上同步；

如果轨线左旋可认为 *Chla* 领先 COD，*Chla* 是 COD 变化的直接原因，且未受到其他因素的明显干扰；

如果轨线右旋可认为 COD 领先 *Chla*，*Chla* 虽可能是 COD 变化的直接原因，但可能受



到其他因素的明显干扰。

E. 分析 C、D 的结果，得到藻源 COD 当年贡献比例，研判削减 TP（TN）可减低藻源 COD 的幅度；

F. 结束或选择滤波算法。

②滤波算法

如果，湖泊非藻源 COD 的作用（主要指平均浓度及增幅）很强，不能根据实测 COD 和 *Chla* 数据得到显著相关的关系。则需要采用滤波范式提取，建立 COD 和 *Chla* 过滤后数据的相关关系，进而识别藻源 COD。一般比较适合滞留时间大于 1 年的情景或滞留时间不足 1 年，但 COD 偏高且空间异质性大的湖泊。计算步骤：

A. 收集多年年内实测 COD 和 *Chla*（年内测次不低于 10 次）；

B. 进行多年分月平均（平均年数可从小到大），成 COD 和 *Chla* 年内时间序列（滤波后年内关系）；

C. 建立 COD 和 *Chla* 散点图；

D. 建立 COD 和 *Chla* 趋势线（线性相关），得到藻源 COD 年均估值；

$COD = a + b \times Chla$ 。*Chla* = 0 时的可认为无藻源 COD 贡献，即截距 *a* 可认为是非藻源 COD（一般为外源 COD）。藻源 COD 则可以根据 COD 的均值与 *a* 之差确定。斜率 *b* 决定了单位藻源 *Chla* 的 COD 产生量，或可称 *b* 为 *Chla* 的产 COD 效率。如果得不到显著正相关的 COD 和 *Chla* 关系，转步骤 F；

E. 建立 COD 和 *Chla* 的矢量轨线：

- 如果轨线杂乱无章可认为 COD 和 *Chla* 在时程上同步；

- 如果轨线左旋可认为 *Chla* 领先 COD，*Chla* 是 COD 变化的直接原因，且未受到其他因素的明显干扰；

- 如果轨线右旋可认为 COD 领先 *Chla*，*Chla* 虽可能是 COD 变化的直接原因，但可能受到其他因素的明显干扰。

F. 分析 C 和 D 的结果，得到藻源 COD 多年贡献比例，研判削减 TP（TN）可减低藻源 COD 的幅度；

G. 结束，或返回步骤 B 改变多年平均的年数。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①相对于原有方法只针对协调型湖泊，本技术可以在不协调关系下得到多年的藻源 COD 比例。

②相对于原有方法的散点无时序，本技术的轨线图可以表达因子领先-滞后关系，可以观察藻类上升期及下降期COD的响应。在领先-滞后关系清晰后具有一定的预报功能。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发与优化集成。

实际应用案例：

应用单位：太湖

为满足《江苏省“十三五”太湖流域水环境综合治理行动方案》2020年太湖COD稳定达到地表水Ⅱ类水要求，“十三五”期间陆域COD总量实现负增长16%，对比2017年COD_{Mn}超标15%（水利）的情况达标的的安全余量仅1%。从陆源COD处理角度而言，COD一级处理的尾水保守性变强，在湖里的可降解性减低，减排16%的实际效果可能不足10%。所以目前的安全余量显然是不够的，仅考虑陆源COD削减，2020年COD_{Mn}超标风险较大。

图1-7从2004年以来显示藻源COD浓度及占比有增加趋势。图1-8显示2004-2017年COD与Chla浓度的年内相关系数的趋势增长至趋于平稳。显示近期COD_{Mn}与Chla的同步性趋好，藻源贡献变大，外源COD控制有效。图1-7显示2004-2017年全湖年均COD与内源贡献COD_a和外源贡献COD_s的浓度变化过程及关系，外源COD_s平稳，COD_a及COD小幅上升，说明外源COD控制有效，外源TP控制尚不足。如果2020年TP维持在2017年的高位，COD达标存在风险，以及饮用水源地水质降低。

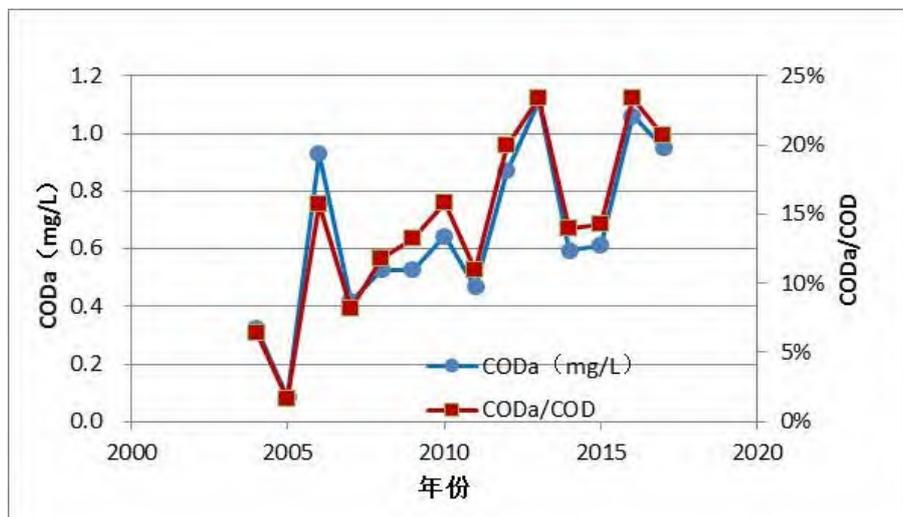
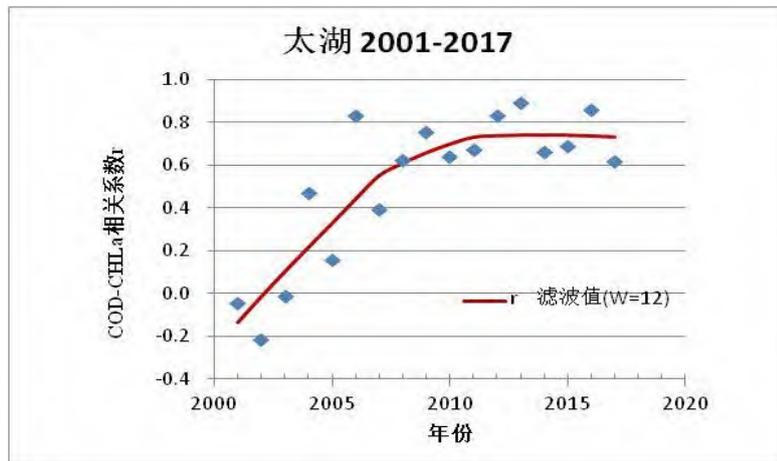


图 1-7 太湖 2004-2017 年 COD 藻源浓度 (COD_a) 及其占比 (COD_a/COD)


 图 1-8 COD_{Mn} 与 Chla 浓度的年内数据相关系数的趋势变化图

应用单位：滇池外海

外海滞留时间较长，累积影响较大，年内数据 COD_{Cr} 及 COD_{Mn} 与 Chla 非协调的情况很多，直接采用分月多年平均滤波方法考虑藻源贡献，图 1-9 和图 1-10 给出了轨线图。表 1.9 给出的分月多年平均滤波后的平均藻源 COD 贡献水平分析结果，显示多年平均的藻源内负荷比例为 COD_{Cr} 为 13% 及 COD_{Mn} 为 17%。这说明草海藻源 COD 比例较低，削磷对降低 COD 浓度效率低。由于干旱影响的浓缩效应及滞留时间长 COD 难降解比例增加，均会导致藻源 COD 贡献比例的下降。从这个意义上讲，外海 COD 的恢复主要靠保证清洁水源的供应，监控指标应该以电导率下降提示存在 COD 的汇，如近两年草海的情况。

表 1.9 外海藻源 COD 多年平均贡献分析表

项目	单位	COD _{Cr}	COD _{Mn}
外源贡献 COD _s	(mg/L)	54.8	7.82
实测平均 COD	(mg/L)	63.1	9.38
藻源贡献 COD _a	(mg/L)	8.3	1.56
藻源贡献比 COD _a /COD	(%)	13.2	16.7
分月平均年份		2005-2016	2005-2016
Chla 与 COD 相关显著水平 p		0.00109	0.00968

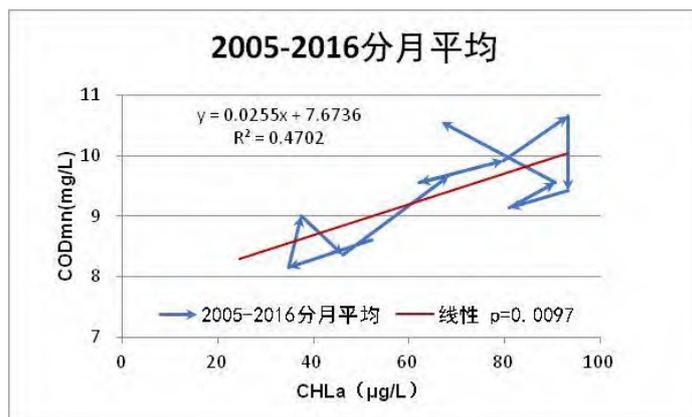


图 1-9 外海 2005-2016 年分月平均 COD_{Mn}-Chla 轨线图及线性相关线

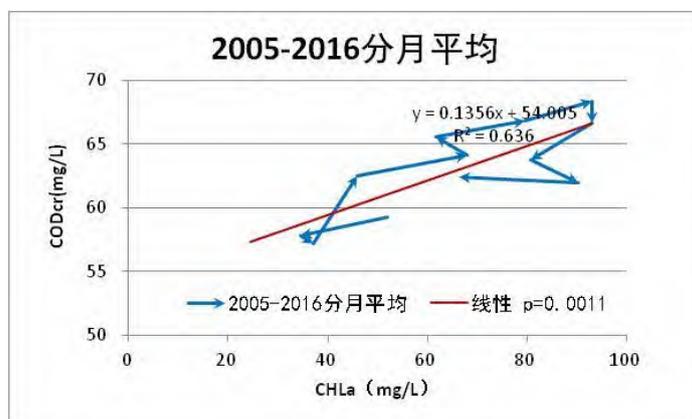


图 1-10 外海 2005-2016 年分月平均 COD_{Cr}-Chla 轨线图及线性相关线

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506-008）



2.2 水环境污染物排放负荷核定

2.2.1 杭嘉湖平原河网非点源产排污系数核算技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：太湖流域（浙江片区）

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

针对太湖流域（浙江片区）农田、养殖场、农村生活、城镇暴雨径流、典型小流域、大尺度流域、河道水生态等非点源污染问题进行了持续深入地研究，通过现场长期连续的监测，构建大型模型，并选取典型性封闭实验小区，实地验证模型关键模块及相关参数，初步完成本土化调参，提出了有关产排污及入河系数、河道富营养化氮磷生态阈值等方面的核算方法，建立了杭嘉湖平原河网非点源产排污系数核算技术。

（2）工艺流程

本技术主要流程为：农田、养殖（归一化到猪当量）、农村生活产污系数实测-小流域验证-通过验证后修改SWAT模型参数-率定期SWAT模型其他关键参数率定-验证期SWAT模型进行验证，具体如下：

- ①实地调查；
- ②定点监测；
- ③模型构建及模拟；
- ④参数调试；
- ⑤封闭小区实地验证模型参数；
- ⑥本土化模型参数；
- ⑦提出非点源产排污系数核算技术；
- ⑧与MIKE11河网模型进行耦合；
- ⑨推广至太湖流域（浙江片区）平原河网。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

课题组通过实地调查、定点监测及模型模拟等方式，对太湖流域（浙江片区）农田、养殖场、农村生活、城镇暴雨径流、典型小流域、大尺度流域、河道水生态等非点源污染问题进行了持续深入地研究，率先在国内建立了大型模型本土化调参与关键模块实地验证相结合

的杭嘉湖平原河网非点源产排污系数核算技术，提出了有关产排污及入河系数、河道富营养化氮磷生态阈值等方面的核算方法，为太湖流域（浙江片区）非点源污染控制提供了依据。本技术创新点概括为：做了两种方式的验证（系数实测验证、模型自我验证），而且是在平原区完成的，目前这在国内相关研究中为首次应用。具体创新点介绍如下：

①系数实测验证创新：通过现场实地及封闭小区研究，验证了农田、养殖场、农村生活污水及城镇暴雨径流等关键模块的产排污及入河系数课题组针对规模化养猪场不同生猪种类、不同清粪方法、不同污水处理方式，进行养猪场产排污的影响因素分析，监测得到养猪场产排污系数，以及养殖场污水排放口下游污染物沿程削减规律；按照高、中、低三个不同经济收入水平和有无污水处理设施，对典型农户进行生活污水水质水量定位监测；通过确定汇水单元范围，划分屋面、道路、草地灯不同类型下垫面，以及降雨期水量水质同步观测，获得城镇暴雨径流造成的非点源产排污系数。同时，选择了典型非点源污染型小流域，开展了全年非降雨期监测和降雨期的地表径流氮磷浓度监测，验证了上述农田、养殖及农村生活产排污系数核算的准确性。上述非点源污染系数核算方法形成了一部专著（《科学出版社》出版）。

②模型自我验证创新：利用河网刻画、土壤数据库本土化调参等手段，在国内首次构建了平原河网区SWAT非点源污染负荷估算模型本研究以太湖流域（浙江片区）嘉兴平原河网区为研究对象，通过基础数据的收集、河网刻画，以及空间数据和属性数据等数据库构建，本土化率定了36个模型参数，最终使连续5年流量，TN、TP、NH₄-N通量四个指标达到模拟精度要求，模型率定期及验证期的R²均在0.6以上，ENS均在0.6以上。

③自主研发了一套土壤氮磷迁移转化与降雨—产流过程相耦合的农田氮磷径流流失负荷模型估算技术通过对化肥施入农田后田面水中污染物的迁移转化进行研究，得出其动态变化规律，并将该规律与降雨—产流模型进行耦合，用于计算降雨过程中的农田氮磷流失负荷；同时利用“3S”技术，将该模型应用于流域范围内，可以模拟不同尺度下的农田产区非点源产排污动态变化规律。与传统的单一输出系数法相比，该方法更能反映出非点源产排污系数的时空变化；另外，与机理性模型相比，所需基础资料和参数相对较少，模型构建较容易，运行效率较高。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

授权发明专利3项，出版专著一部。



实际应用案例：

应用单位：浙江省环境监测中心

在太湖流域（浙江片区），针对太湖流域（浙江片区）农田、养殖场、农村生活、城镇暴雨径流、干湿沉降、底泥释放等非点源产排污规律，获得了适用于太湖流域（浙江片区）的非点源产排污系数，并与降雨/蒸发、农田面积、养殖规模、暴雨场次、城镇建成区面积、水面面积、底泥污染物浓度等因素建立了相关关系，应用在太湖流域（浙江片区）水环境综合管理平台上，作为污染源动态核算中非点源动态核算的基础，为平台的监测监控、容量总量、排污许可证管理、预警预报等提供支撑。

依托课题：

太湖流域（浙江片区）水环境管理技术集成及综合示范（2012ZX07506006）

2.2.2 基于分类输出系数法的平原河网区非点源污染负荷估算技术

技术发展阶段：消化吸收、推广

适用范围：平原河网区域，产汇流特征不明确

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

针对农村生活污染，考虑家庭卫生设施的类型（干厕、水冲厕）、污染排放和处置方式（还田）等构建农村生活污染输出模型，针对畜禽养殖污染，考虑养殖模式和调查粪尿的处理处置方式，分别构建畜禽养殖污染输出模型，针对农田种植类型（水稻、葡萄），考虑降雨-径流-产污过程，构建农田污染物输出模型。

（2）技术内容或工艺路线

农业非点源负荷核算技术主要包括以下内容：

①农村生活污染产生量估算法

根据人口当量负荷或产污系数来估算农村生活污染负荷产生量。

②畜禽养殖污染产生量估算法

对集约（规模）化养殖场重点调查养殖场规模、饲养环境、粪便和污水处理和处置情况、生产管理情况。对散养户调查畜禽饲养期、单头日排放量、饲料情况、圈养和最终粪尿利用途径等。通过统计资料确定畜禽养殖数据包括养殖品种、养殖数量（包括出栏数和年末存栏数）。在此基础上进行统计分析和计算，并进行结果验证。

③农田径流污染试验法

选择不同类型土地利用下垫面（如小麦、水稻和果园种植等），采用降雨—径流—产污试验的方法，观测降雨、径流和污染物的流失过程，并通过多场典型降雨过程的观测数据分析非点源污染输出系数。条件允许的地方也可以考虑采用径流池法来获得次降雨平均浓度(EMCs)，以此来估算农田径流污染流出的负荷。在平原河网地区，由于农田与受纳水体（如支流、沟渠）的距离很近，因此按照农田径流输出系数估算得到的非点源污染负荷量可认为就是农田径流污染进入受纳水体的入河量。

④农村生活污染入河系数估算方法

对于农村生活，首先需要调查该地区有无统一的下水道系统及污水处理设施。若有污水处理设施，则需要调查其污水收集率及污水处理设施的处理效率。此外，还需要调查村民家庭的卫生设施的类型、水冲厕和干厕的使用比例。对于水冲厕，需要考虑化粪池对污染物的降解作用；对于干厕，需要调查粪尿的处理处置方式。如果粪尿作为有机肥料还田，则还田的部分可以与施到农田中的化肥一起考虑，按输出系数法确定入河量。

⑤畜禽养殖污染入河系数估算方法

对于集约化的养殖，调查粪尿的处理处置方式，包括粪尿干湿分离、堆肥还田、沼气利用等。通过调查还田和直接排放的比例，可以按点源或面源分别处理。对于直接排放的部分应按点源排污来考虑；对于还田的部分，可以与农田中施用的化肥一起考虑，并按照农田的输出系数法来估算入河量。对于分散养殖，需要调查散养和圈养的比例，完全散养的排污可按肥分还田处理，与农田化肥施用一并采用输出系数法来确定其入河量；圈养的部分需要考虑粪尿的处理处置方式（作为有机肥还田、用于沼气发酵）。

（3）关键技术方法

①农村生活污染入河系数估算方法

农村生活污染的直接入河量可以按照下述公式来估算：

$$\lambda_{rl} = a(1-\eta_1)\eta_2 + a(1-\eta_1)\eta_3(1-\eta_4) + b(1-\eta_5)$$

$$L_{rl} = \lambda_{rl} G_l$$

式中， λ_{rl} 为农村生活污染入河系数； L_{rl} 为农村生活污染直接入河量； G_l 为农村生活污染负荷产生量； a 、 b 为水冲侧与干厕各占的比例（%）； η_1 为化粪池污染物去除效率（%）； η_2 为化粪池出流直接排入河道比例（%）； η_3 为化粪池出流排入污水处理设施比例



($\eta_3 = 1 - \eta_2$, %); η_4 为生活污水处理设施污染物去除效率 (%) η_5 为干厕粪尿作为有机肥还田的比例 (%)。其中, a , b 和 $\eta_i (i=1,2,\dots,5)$ 可根据实地调查和统计分析来确定。

② 畜禽养殖污染入河系数估算方法

畜禽养殖入河部分可按下式估算:

$$\lambda_{rr} = a\eta_1\eta_2(1-\eta_3) + a(1-\eta_1)(1-\eta_3) + (1-a)\eta_4$$

$$L_{rr} = \lambda_{rr} G_r$$

式中, λ_{rr} 为畜禽养殖污染入河系数; L_{rr} 为畜禽养殖排放入河量; G_r 为畜禽养殖污染负荷产生量; a 为规模化畜禽养殖比例 (%); η_1 为规模化养殖中采用粪尿干湿分离处置方式的比例 (%); η_2 为规模化养殖干湿分离后废水中所含污染物的比例 (%); η_3 为规模化养殖废水处理设施污染物去除效率 (%); η_4 为分散养殖粪尿直接排放比例 (%)。其中, a , $\eta_i (i=1,2,3,4)$ 可以根据调查和实验数据来确定。假设干湿分离得到的粪便和经过沼气发酵的粪尿全部作为有机肥还田, 并与农田化肥一起考虑。

(4) 技术创新点

① 针对河网区, 将污染过程分成产生、排放和入河3个过程, 通过排放和入河过程控制同类污染源在不同自然和人工干扰条件下对水体水质的影响作用, 更好地解析污染物对水体的影响过程, 体现出污染核算的空间差异性。

② 对于农村生活和畜禽养殖污染, 根据研究区域污染物产排、入河的过程, 分类提出污染物入河系数的计算方法。

(5) 技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

实际应用案例:

应用单位: 中国环境科学研究院

平原河网地区控制单元-太滬运河流域非点源研究

(1) 研究区概况

太滬运河流域位于江苏省常州市武进区, 运河起源于滬湖, 将水由西向东输入太湖, 贯穿前黄镇和雪堰镇, 总面积85.16km²。滬湖是苏南地区第二大湖泊, 以氮磷污染为主, 造成严重的水体富营养化。运河中水质主要受其周边前黄镇和雪堰镇污染的影响, 包括农业非点

源、工业源及大气沉降等。根据常州市2009年环境质量报告书，太滆运河为V类水质，主要污染指标为氨氮，水质受滆湖来水的影响较大。主要污染源为农业面源，包括农村生活污染、农村畜禽养殖污染和农田径流污染等。

(2) 农村生活调查

太滆运河流域是典型的平原河网地区，运河绝大部分位于武进区境内，由西向东分别贯穿武进区的前黄镇和雪堰镇，流域农村生活污染的来源主要包括生活垃圾的流失、生活污水的排放以及家庭畜禽养殖污染排放等。在调查过程中，选取前黄镇和雪堰镇的部分村庄，进行农村生活非点源污染调查，通过与农户交谈、填写问卷的方式，农村生活非点源污染情况，最后得到农村生活污染入河系数。

表2.1 农村生活污染入河系数

污染物	COD _{Cr}	TN	TP
入河系数(%)	6.6~13.3	18.1~18.6	8.2~12.5

(3) 畜禽养殖调查

对研究区域规模化畜禽养殖场和散养畜禽农户分别进行调查。对集约（规模）化养殖场重点调查养殖场规模、饲养环境、粪污处理和处置情况、生产管理情况；对散养户调查畜禽饲养种类、饲养数量、粪尿利用途径等，可与农村生活污染一起调查。

表2.2 达标排放的畜禽养殖污染入河系数

指标	干清粪						水冲粪					
	猪		鸡		牛		猪		鸡		牛	
	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季	冬季	夏季
COD _{Cr} (%)	3.59	5.39	8.97	12.56	10.17	12.97	7.48	10.47	14.35	21.52	11.97	17.95
氨氮 (%)	8.89	13.33	22.22	31.11	25.19	29.63	18.52	25.93	35.56	53.33	29.63	44.44
总磷 (%)	1.14	1.70	2.86	4.00	3.22	3.79	2.37	3.31	4.57	6.86	3.79	5.68

注：春、秋季节的入河系数为冬、夏两季的平均值

④ 农田输出系数估算

A. 水稻田输出系数估算

在监测期间，总共监测到9场降雨，但只有4场降雨水稻田出现地表径流。根据监测到的降雨、径流以及径流水质数据，计算得到各场降雨的径流量及污染物质的量，计算公式如下：

$$E = 0.01 * \overline{EMC} * R$$



其中，E：输出系数（ kg/hm^2 ）； \overline{EMC} ：次降雨平均浓度（ mg/L ）；R：径流深（ mm ）

通过上述公式可以计算得到水稻田的输出系数为：总氮为 $17.34\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ ，总磷为 $2.54\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ ， COD_{Cr} 为 $230.12\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ ，氨氮为 $12.32\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ 。

B. 葡萄园输出系数估算

葡萄园的降雨径流监测从6月下旬开始，一直持续到10月下旬。在此期间，共监测到9场降雨，其中只有5次降雨产生地表径流。根据监测到的降雨、径流以及径流水质的数据，可以计算得到各场降雨的径流量及污染物质的量，计算出葡萄园的径流平均浓度。通过以上公式计算得到葡萄园的输出系数为：总氮为 $25.21\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ ，总磷为 $3.07\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ ， COD_{Cr} 为 $213.48\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ ，氨氮为 $5.81\text{kg}/\text{hm}^2/\text{a}$ 。

依托课题：

控制单元水质目标管理技术研究（2009ZX07526-005）

2.2.3 基于水环境响应的水污染负荷总量核定技术

技术发展阶段：推广类技术

适用范围：污染源与入河/海排污口的调查监测、污染负荷核算以及流域水污染负荷总量的平衡分析与核定。

主要技术内容和关键技术：

（1）基本原理

针对我国污染源调查统计不全面、负荷核算方法不完善以及总量数据与水环境质量之间相互脱节的现象，一方面，通过现有方法改进和集成，完善工业、城镇生活与集约化畜禽养殖等不同类型点源的负荷核算方法，建立了城市、农业、农村生活与散养畜禽等非点源负荷核算的实用方法集；另一方面，建立了河流污染物通量核算的不确定性分析方法，并通过污染源排放负荷与环境水体纳污负荷之间的总量平衡分析与不确定性分析，核定区域/流域的水污染负荷总量，从而形成了基于水环境响应的流域水污染负荷总量核定技术。

（2）技术流程

①资料收集与补充监测：收集流域内社会经济、土地利用、土壤类型、地形、气象、水文、水质、城市建设、作物管理以及各类污染源和入河排污口的调查统计数据；在现有污染负荷数据资料分析的基础上，有针对性地开展工业污染源、集约化畜禽养殖污染源以及入河排污口的补充调查监测，不同类型下垫面的降雨径流监测、流域/区域主要控制断面的河流

污染源通量监测；

②点源污染源负荷核算：针对工业污染源，在现有调查统计数据 and 产排污系数的基础上，进行污染负荷数据的校核、整合，并根据区域供水或产值等宏观统计数据进行污染负荷总量估算；针对城镇生活污染源，以城镇污水处理厂进水和市政直排口出水作为“汇污负荷”核算节点，根据不同区域或城镇的基础数据资料情况分别采用“汇污浓度监测法”、“汇污总量监测法”、“汇污浓度系数法”或“污普数据推算法”进行污染负荷核算；针对集约化畜禽养殖，通过现有排泄系数核算污染负荷排放潜力，并根据不同清粪工艺粪尿中污染物的流失率以及不同污水处理工艺的污染物削减率，核算其排放负荷；在排放负荷核算的基础上，分别采用入河系数经验公式或入河流达率模型进行点源入河总量的核算；

③非点源污染负荷核算：根据不同区域数据条件选择非点源负荷核算通用方法集中的相应方法，分别进行城市、农业、农村生活与散养畜禽等非点源负荷核算；

④总量平衡分析与核定：进行流域/区域总量控制单元划分，核算主要控制断面的河流污染物通量，比较分析各控制单元污染负荷入河总量与断面污染物通量之间的差异，综合考虑通量核算的不确定性分析进行流域水污染负荷的总量核定。

（3）关键技术

- ①提出了工业污染负荷总量核定技术体系；
- ②建立了城镇综合生活污水产-汇-排污负荷核算方法；
- ③开发了非点源的污染负荷核算系统；
- ④提出河流污染物通量核算的不确定性分析方法。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：辽阳市环境保护局、江门市环境保护局

案例介绍：在广东省潭江流域和辽宁省太子河流域，分别选择典型研究区开展了流域水污染负荷总量核定技术体系的应用研究。根据两个研究区的基础数据条件，在开展补充调查监测的基础上，选择适宜的方法分别核算了其各类点源和非点源的负荷总量以及区域控制断面的河流污染物通量，并通过总量平衡分析核定了研究区的污染负荷。为辽阳市开展的流域污染源专项调查和江门市开展的《江门市环境保护和生态建设“十二五”规划》编制等工作提供了技术支撑和管理依据。



依托课题：

东江流域饮用水源型河流水质安全保障技术集成与综合示范（2014ZX07206-005）

3 水环境容量总量控制与排污许可证管理

3.1 水环境响应模拟

3.1.1 河流流域水环境系统分析与模拟技术

技术发展阶段：优化集成

适用范围：河流流域基于水生态功能分区的容量总量计算与分配

主要技术内容和关键技术：

(1) 技术原理

该技术基于河流流域容量总量管理要求，以支持流域容量总量计算和分配为目标，采用社会经济预测模型、流域分布式非点源模型和河流水体水质响应模型（含水动力模型、水工程水力学模型）等，开展流域负荷估算与水体水质响应计算，具备流域坡面水循环物理过程，主要污染物化学过程、河道与水工程水质过程等综合分析能力，实现流域经济社会-水资源系统-水环境-水生态系统过程耦合模拟。

(2) 技术内容或工艺路线

模型系统主要包括三大部分：社会经济预测模型、流域模型、水体水质响应模型（含水动力模型、水工程水力学模型）。各部分模型的耦合机理如下。水动力学模型由反映质量守恒律的水流连续方程和反映动量守恒律的运动方程组成用于描述河系的空间结构，将各种水力单元有机连接起来，并进行整体分析。对于建有壅水建筑物的河段，采用水工程水力学模型根据其各自特性将其作为流量节点进行专门处理。河流水质模型用于描述污染物质在河流中混合迁移过程，并对研究区域及其类似区域的污染进行模拟和预测。在实际应用中，将以上四种模型做耦合处理。

技术流程为：

①基于社会经济预测模型，进行经济发展预测、人口预测、工业和生活取排水预测、农业灌溉取退水预测、水产养殖污染预测和水运交通污染预测，分析流域经济社会发展及水资源取用状况，辨识研究区下垫面、水量及水质等方面特征；

②构建并率定验证流域模型，模拟并输出流域非点源污染负荷与支流量过程；

③构建并率定验证接纳水体水质响应模型（含水动力模型、水工程水力学模型），基于

下垫面、水工水力学特点、水量及水质、取排水过程结果和流域模型的径流及非点源计算成果，模拟并输出各种组合情景下的河湖水体水质浓度响应状态。

技术流程详如图3-1所示。

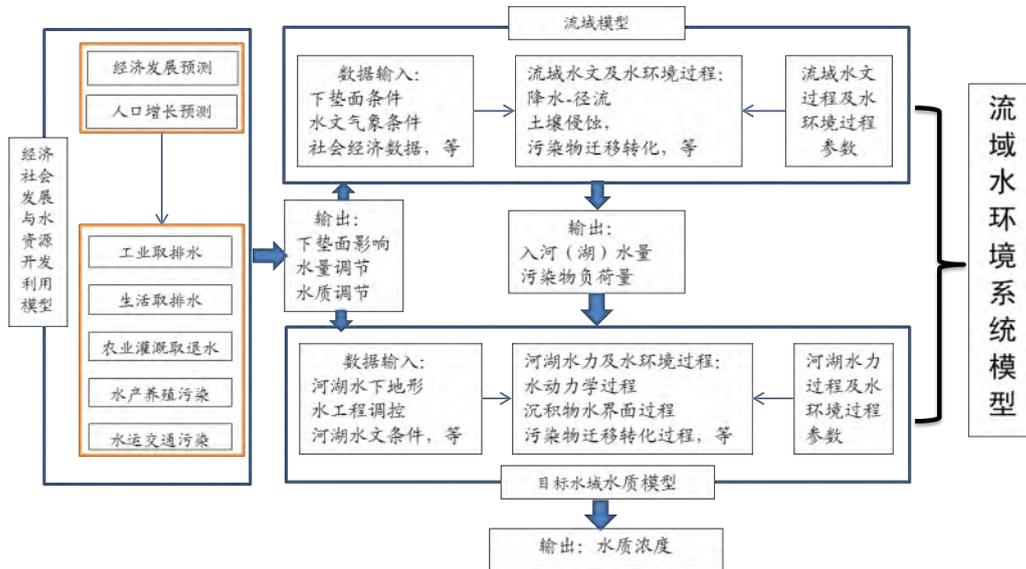


图3-1 河流流域水环境系统分析与模拟技术技术路线示意图

(1) 关键技术方法

① 基于社会水循环的社会经济预测模型

通过流域模型，以输入非点源污染负荷及支流量过程的方法，将影响自然水循环的经济社会水循环影响因素与接纳水体水质响应模型相耦合。

② 壅水建筑物（闸/坝）处的水动力处理方法

在水工程水力学模型中，当所分析模拟的河道建有闸、坝等壅水建筑物时，在模型中要对这些壅水建筑物所处节点做特殊处理，本技术中根据相邻水位点水位关系采用下述公式计算过流流量。

$$Q = \varepsilon m B \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

式中： ε -侧收缩系数； m -流量系数； B -过流宽度； H_0 -堰顶水头。根据堰坎厚度与堰顶水头之比以及水流特征将堰流分作薄壁堰、实用堰和宽顶堰三种。在实际工程计算中，根据堰流种类分别计算流量公式中的系数。

$$Q_{\text{底流}} = \tau \frac{\delta}{\sqrt{1 - (\frac{\delta w}{y_1})^2}} a \sqrt{2g} (y_1 - y_2), Q_{\text{溢流}} = b \alpha y_1^\beta [1 - \frac{y_2^{\beta-0.395}}{y_1}]$$

式中： τ -协调系数； δ -压缩系数； w -闸门开启高度； a , b -流量系数； y_1, y_2 -闸上下水位； α , β -闸门形态指数。通过闸门的流量是闸门形状和上游水位的函数。对于给定闸门开

度，流量依赖于压缩系数。压缩系数 δ 为：

$$\delta = \frac{y_s}{w}$$

式中： y_s -维纳收缩点的高度。

(4) 技术创新点

该技术耦合了社会经济预测模型、流域水文模型、河流水力学过程、水工程调控过程的流域水环境模型，统筹流域上下游和水工程，综合点源和非点源陆域迁移转化过程，形成完整的水循环过程模拟分析系统。

(5) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：中国水利水电科学研究院

将太子河流域非点源模型与太子河水质模型相耦合，以非点源模型产汇流及面源计算结果作为干流水水质模型输入边界条件，以水力学模型模拟各类水工程调度过程，形成太子河流域水环境系统模型。采用社会经济预测模型进行经济发展预测、人口预测、工业和生活取排水预测、农业灌溉取退水预测、水产养殖污染预测和水运交通污染预测。采用SWAT模型对太子河流域非点源污染物的产生和运移过程进行模拟分析。模型的计算结果都集成在Access数据库中，能够在ArcGIS中方便地显示和输出。并用观测和试验获取的数据和参数，对模型进行了参数率定和验证。干流中水质随时空变换过程是由太子河水质模型描述(仿真的)。太子河水质模型是基于河流水动力学模型的对流扩散模型。太子河水质模型的范围为观音阁水库坝下至人大辽河口，模型的上边界为已知流量边界，下边界为已知水位边界。太子河流经山区和平原，河道地形变化，支流众多、同时有水库和闸坝等多种水工程建筑物，为此，需要对河流及其建筑物进行概化处理。基于构建的太子河流域水环境系统模型，进行了太子河流域典型年主要非点源污染物负荷预测分析与典型水文年水期水质特征分析。

依托课题：

重点流域环境流量保障与容量总量控制管理关键技术与应用示范（2013ZX07501-004）

3.1.2 湖泊流域河网水动力模型及水环境变化测报技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：湖泊流域河网水动力模拟测报



主要技术指标和参数：

（1）基本原理

太湖流域地势平坦，河网密布，下游河道受感潮影响，流域内河道纵横，湖荡星罗棋布，是典型的平原河网地区。水资源量严重不足造成清污不分，水流条件复杂，污染输移监测十分困难。利用流域河网水动力模型与测报技术相结合，能有效地减少由于监测点位少、次数有限造成的预报、预测误差。本研究在现有监测技术与条件的基础上，提出一套流域河网水动力模型与监测技术相结合的方法，对太湖流域水环境变化进行测报。

本技术适用范围：受闸坝控制或非控制水力坡度平缓河网区。该技术的主要特点是：①能为监测数据的变化规律及成因分析提供技术条件；②能为监测数据的时空延拓提供依据。

水环境变化测报技术模型应包含水动力模型及水环境变化模型。基于质量守恒定律构建的水流连续方程、动量守恒定律构建的动量方程组成河网非恒定流水流模型。基于营养盐或污染物的质量守恒原理构建的物质运输、转化方程组成水环境变化模型。两模型包含流量 Q 、水位 Z 、氮磷营养盐等状态变量的偏微分方程。其中水流连续方程及动量方程采用普列斯曼（Preissmann）加权隐格式求解。污染物（营养盐）输运方程采用迎风加权隐格式数值方法。

（2）技术工艺与技术参数

①工艺流程

本技术需要降雨、闸坝调度、长江大通站流量监测数据以及流域土地利用、河网拓扑关系、河道断面、闸坝圩等水利工程的设计参数、长江口与杭州湾天文潮潮汐常数、工业点源、人口分布等基础数据库作为数据支撑。数据的可靠度、精度以及完整性将影响计算分析的精度。水环境模拟需要在水位、水质校核良好的条件下对研究区域内的水环境状况进行分析与评价。工艺流程如图3-2所示。

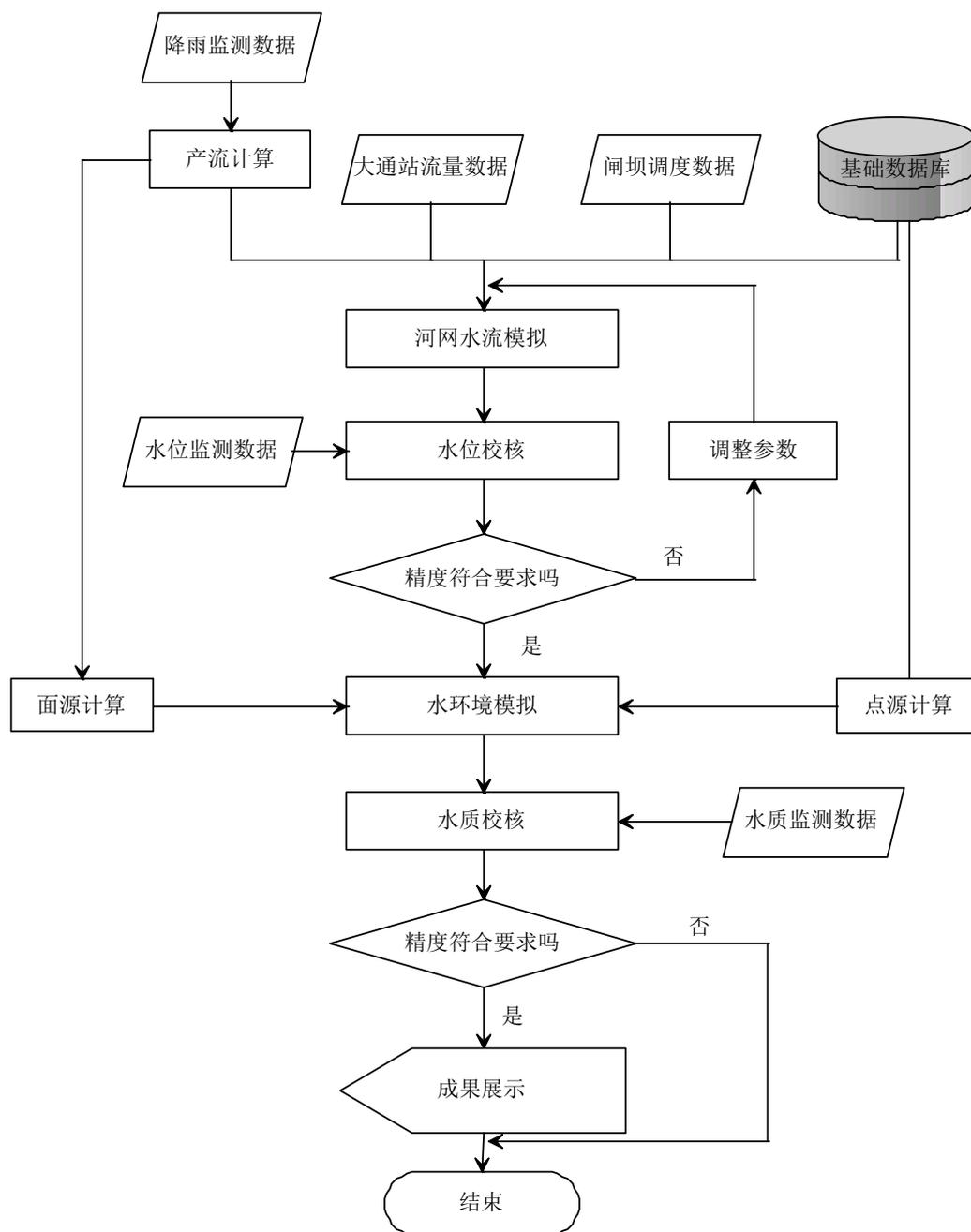


图3-2 工艺流程图

②主要技术参数的确定

A. 水动力模型参数主要是糙率。利用1995年实测水文资料，对太湖流域河网河道糙率分布进行了率定，率定得到的流域河道糙率值在0.015至0.022之间变化。

B. 河网污染物扩散系数为3~8m²/s。

C. 河道CODMn的降解系数为0.1~0.2/日，湖泊为0.0025~0.004/日，氨氮的水质降解系数数值为0.1至0.2/日之间。

③技术设计



设计特色：

自动化程度高，不易改变的基础数据存库，其余参数均可快速在线获得；模拟精度高且性能稳定，采用较成熟的计算方法与加速算法，保证了模拟精度与稳定性；模型结构与运行方式灵活，模型各模块独立设计，保证结构与运行方式的灵活性；精度可评估性，与实时监测数据相互对比，对模型的精度自动评估；营养盐转化采用先进的动力模型。

设计的主要内容：

基础数据库的设计；营养盐转化模块的设计；面源产出模块的设计；模型库相互耦合框架的设计。

（3）主要技术经济指标

应用该技术，可在保证监测精度的前提下有效降低监测频率与空间密度，降低监测成本。同时，该技术可分析研究污染成因与迁移规律，为截污、控制污染以及区域经济补偿等工作提供科学依据。

（4）应用实例

①模型构建范围

由于太湖流域水系密布，河网纵横交错，受长江河口潮汐、区域水文情势、湖区风场等多种动力因素交互影响，加上流域内闸、泵等水利设施繁多，流域水系自然流动结构十分复杂，如河网内部水流流向往复不定，河网与湖湾、湖湾与湖体水流交换复杂多变。研究营养盐在该河网地区的输运规律，往往需要很大的研究区域，以消除边界条件对关注区域内水流运动的影响。据此，初步确定计算区域如图3-3所示。模型共概化河段1997条，河网节点1304个，闸门224座。

②太湖流域水环境变化模型精度的评估

由于水质模型的验证需要反映流域下垫面的最新状况，宜选取较新的资料进行验证，并兼顾水文条件的典型性。经比较，2008年为平水年，2009年为丰水年，具有较好的代表性。故选取这两年进行水文、水质验证计算的年份。

针对河网、太湖水量水质特征，建立和完善了环太湖河网水量、水质数学模型，并对2008、2009年流域日水位过程进行验证。2008年各主要站水位验证误差统计表所示。水位验证误差标准差为不超过7cm，最大误差控制在20cm以内。这表明，模型基本反映了该河网区水流运动规律，能够为模拟营养盐输运提供良好的基础。

为监测湖西区河网输入太湖的营养盐总量及营养盐产生量，环保部门于2008年、2009年对湖西区主要入湖河流进行了监测。并对2008年、2009年水质资料进行了验证。2008、2009

年各主要站水质计算统计表所示。小于20%的验证误差约占20%，小于40%的验证误差约占56%。基本反映了流域营养盐输运及转化规律，模型参数是合理的。

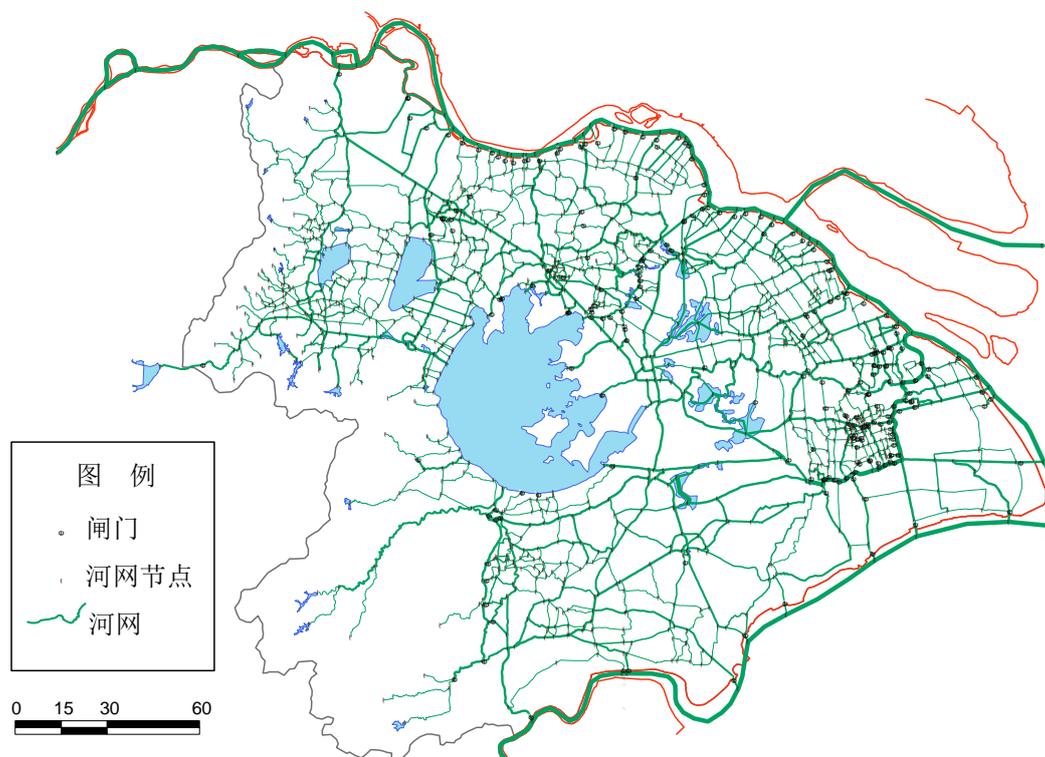


图3-3 模型研究范围及河网概化图

(5) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

(6) 应用前景

将在监测站网优化、污染物溯源、区域经济补偿等方面有广泛应用价值。

3.1.3 水源地水动力水质模型并行计算技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：南水北调中线水源地、中线和东线中大型湖泊及水库可推广到全国任意流域

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

通过流域水系的识别划分和分布式集群通讯，通过“化整为零”和“合零为整”的分区方法，用高精度网格完成流域尺度的水动力水质模拟；基于分布式通讯协议MPI和共享内存并行协议OpenMP，以分布式节点进行数据交换，构建内部-分块-模型之间的三级并行耦合模式，实现高效率与高精度水动力水质模型计算，并有效的集成于南水北调水质水量联合调控自动



化运行平台。

（2）技术流程

技术流程为“网格绘制-区域分块-分布式集群计算体系构建-分块内并行划分”。具体如下：

①网格绘制。基于流域水系识别提取水系边界，以流域水系边界为控制单元绘制一定精度的整体网格；

②区域分块。按照水系之间的空间地理关系，将流域水系划分为一级计算区块，然后将网格整理网格划分为范围相等区块，并对区块进行重新编号，以减少计算量，并在相邻区块之间设置重叠区进行数据交换保证模拟的连续性和准确性；

③分布式集群体系构建。构建局域网内的分布式计算集群，系统内所有计算机通过IP识别机器并进行节点编号，开展分布式并行计算；

④分块内并行划分。识别分块内的水动力方程求解及水动力迭代运行代码及逻辑结构，将循环语句并行化，模型的子函数并行化；实现分块内的并行处理，进一步提高分布式并行的运算效率。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

针对南水北调工程中线水源区，中线总干渠和东线水网湖区开展复杂水域大尺度水体水污染事件水质水量快速预测技术研究，创新性的提出了大尺度水体水污染事件水质水量预测的信息融合和快速预测模型架构设计，以充分的信息支撑和合理的模型架构保证模型预测精度。技术集成复杂水域大尺度水体水质水量预测的多源信息融合和模型架构设计方法，形成面向深水水库、大型渠道、水网湖区等复杂水域大尺度水体水质水量快速预测模型构建技术。

水源地水动力水质模型并行计算技术突破了流域尺度海量网格绘制与分块技术，创新性地构建了流域尺度水动力水质模型的三级并行耦合集群体系，实现了流域尺度水动力水质模型的高精度与高效能集群计算。该套模型体系的构建，能有效的解决水环境模拟局限在小尺度和较粗网格的问题，极大的提高了水环境模拟的自动化和智能化水平，以及模型计算的效率和精度。

采用线程并行、核并行与机器并行相结合，共享内存并行与不共享内存并行混合处理的方式，对模型体系进行并行化处理，其中，线程级的模型内部计算并行采用OPENMP模式、核级别和机器级别的模型分布式并行采用消息传递模式（MPI）。基于 σ 坐标系构建水源地水动力水质模型的网格体系，进行区域分块与交换，将丹江口水库库区垂向分为6层，平面分成22块采用并行计算，对丹江口库区水动力学进行模拟计算。在同样计算条件下，经测试，该算法效率比传统串行算法效率有极大地提高，平均并行加速比为7.9，即计算所需的时间

为串行的1/7.9，平均并行效率为36%。该方法可以充分利用现有的计算条件，无需花费昂贵的费用重新购置大型计算机即可实现大型水域的水质水量快速计算。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

实际应用案例：

应用单位：南水北调中线工程建设管理局、南水北调东线江苏水源有限责任公司数据中心
适用于大型水环境管理系统平台建设。

应用本技术成果作为核心技术之一开发了水环境管理评估决策系统平台，平台进行了业务化的部署，平台中集成的水环境模型，能快速的开展水质水量的预测，极大地提高了业务部门的决策精度和效率。本技术成果在我国水环境保护管理和风险评估与预警等方面具有重要的应用前景，并已经在流域水环境风险评估与预警等业务中得到了广泛应用。

依托课题：

水质水量联合调控与应急处置关键技术研究及运行示范（2012ZX07205005）

3.1.4 三峡水库调度与水量、水质、水华响应关系分析技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：适用于三峡库区典型支流

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

三峡水库调度与库区支流的水质、水华之间存在着错综复杂的响应关系。明确三峡水库水量调度与库区水质状况的响应关系，可为“调度改善水质”方案的优化设计奠定科学基础。因此，几年来课题组着力开发了三峡水库调度与水量、水质、水华响应关系的分析技术。该技术融合了现场观测、实验分析和数值模拟等手段。基于多年来各种调度条件下的水质观测和模拟数据，并考虑库区水量、水质及水华等参数在时间上的动态性和空间上的异质性，课题组开发了多元统计分析研究方法，并确定了以分层异向流动为关键特征的三峡水库调度与库区水质状况响应关系，从而为“调度改善水质”方案的优化设计提供了技术支持。

(2) 工艺流程

三峡水库调度与水量、水质、水华响应关系分析技术的总体设计框架如下图所示。通过室内模型试验，定量研究了藻类在不同光照、温度、营养盐以及流速条件下的生长规律。通过建立三峡水库干流一维、支流立面二维的水流水质模型，对三峡水库香溪河库湾水动力与

水温特征进行了模拟分析，并开展了基于库湾上游来流量、库湾水温、水位日变幅等参数的正交数值模拟实验。由此，总结了一系列对支流水华过程具有显著影响的干流倒灌异重流运动规律，并分析了三峡水库调度行为与水量、水质和水华的响应关系。

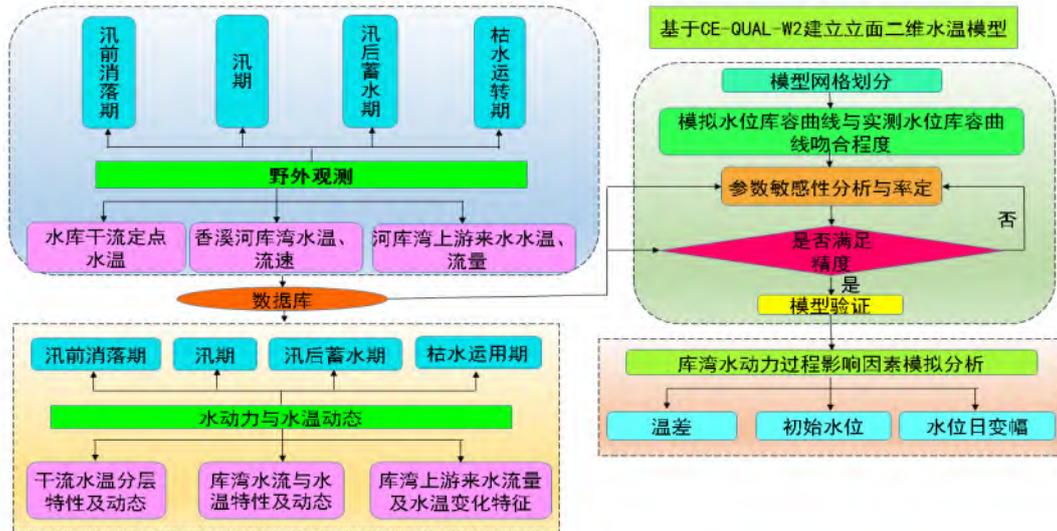


图3-4 三峡水库调度行为与水量、水质和水华的响应关系分析示意图

(3) 关键技术

在野外观测分析基础上，课题组进行了室内模型试验（如下图2所示），以定量研究藻类对光照、温度、营养盐的吸收规律及其在不同流速下的生长规律。其中，主要包括：1）环境与营养因子对蓝藻水华生消的复合影响试验，选取多个环境因子(光照、水温)和营养因子(氮、磷)进行分析，每个因子设置三个水平，进行正交试验，以研究氮、磷、水温和光照对铜绿微囊藻生长的复合影响；2）流速对蓝藻水华生消的影响试验（具体分为小流速试验和大流速试验），在水温、光照、初始pH值、营养盐浓度相同的条件下，改变水流流速，以探讨在不同流速条件下铜绿微囊藻的生长与繁殖规律。通过对试验数据的分析，研究了小流速对蓝藻水华生消的影响以及相关水质参数的变化规律。

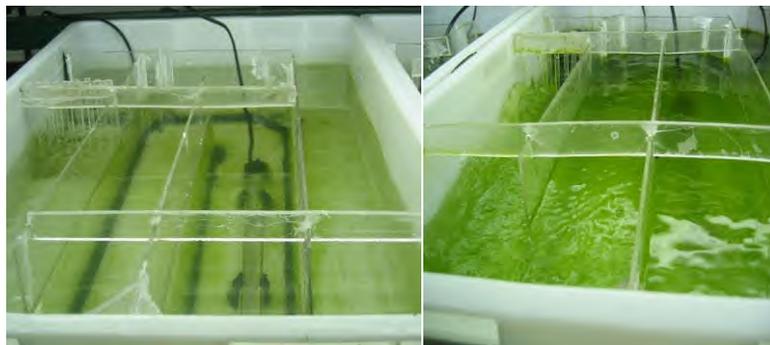


图3-5 小流速试验装置示意图

三峡水库调度行为与水量、水质和水华响应关系分析技术是一个基于野外观测、数值模拟与理论分析相结合的研究方法。通过建立三峡水库干流一维、支流立面二维水流水质模型，分析了支流库湾水流水质对三峡水库调度过程的响应关系。其中，干流一维模型主要为支流立面二维模型提供下游边界条件。同时，建立了基于CE-QUAL-W2的立面二维水流水温模型，对三峡库区典型支流（如香溪河）库湾水动力与水温特征进行了模拟分析。在此基础上，对库湾上游不来流量、库湾水温、水位日变幅等重要因素进行了正交数值模拟实验，以分析不同因素对干流倒灌异重流的影响规律。通过支流库湾数十项水流水质相关指标日步长连续监测，基于逐步聚类分析技术的开发以及相关分析和检验等多元统计分析技术利用，揭示了三峡水库调度行为对库区不同范围不同调度时期内支流水量、水质和水华条件影响规律。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：华北电力大学、三峡大学

通过参照课题组所开发的水库调度与库区支流水量、水质和水华之间的响应关系分析技术框架，结合流域水量水质水华现场监测、室内实验和数值模拟等技术手段，分析了调度条件下库湾地区水动力条件变化机理、藻类生长规律及其对水量水质条件的响应机制，探讨了不同时空范围内调度行为对流域水量、水质和水华条件的影响规律，并由此构建了一系列科学高效的多元离散统计分析模型，为如何通过调度行为的规划而实现多尺度水量分配、水质保护和水华控制等综合效益的最大化提供了技术支持。

依托课题：

三峡水库优化调度改善水库水质的关键技术研究（2009ZX07104-004）

3.2 水环境容量总量核算

3.2.1 允许纳污量计算的稳态设计水文条件选择技术

技术发展阶段：引进/消化吸收

适用范围：河流稳态纳污能力计算

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

针对确定环境风险条件下，选用稳态水质模型，进行允许纳污量计算和总量分配时采用



的设计水文条件，常为一个常数。该水文条件的选择需要根据水污染控制指标类型和环境风险特征，确定污染物浓度的允许平均期和允许超标期，在此基础上计算稳态设计水文条件。

（2）技术内容或工艺路线

设计水文条件选择主要包括以下内容：

①确定设计水文指标体系参数

主要参数如下：径流量： Q (m^3/s)、水体容积： V (m^3)、水（潮）位： Z (m)、流速： U (m/s)、水温： T ($^{\circ}\text{C}$)、进潮量： W (m^3)、交换率： EA 、滞留时间： RT (天)等，可以根据所选模型及其他具体情况可选择其它能代表水体特征的参数。

②不同水体规划及评价可选择的主要指标参数

河流：径流量、水温、pH、硬度、水温

湖库：容积（水位）、流量、流速、水温、交换率、滞留时间

河口：径流量、进潮量、潮位、水温、交换率、滞留时间

海湾：径流量、进潮量、潮位、交换率、水温

③多指标和多流量来源情况下设计水文条件的处理

A. 多指标组合

当设计水文指标不只一个，如有流量、水温、pH值要求，此时为组合频率问题，建议以主控指标频率为主，其它参数的频率可以降低，如流量为主控指标，水温及pH值为辅助指标，具体可采用两种方法：

（a）辅助指标的频率低于主控指标的频率（组合频率接近设计频率），如主控指标频率为66.7%，辅助指标可取50%，或多年平均（这样的数据也较易得到。此时实际进行总量分配的安全余量可取略大一点）。

（b）辅助指标的频率可采用与主控指标同频率（组合频率高于设计频率），此时设计偏安全，实际进行总量分配时的安全余量可以取小一点，或取零。

B. 多来源组合

当设计流量包括多条河流，如湖泊、海湾有多条河流要计算入湖入海设计，也是组合频率问题，其处理方式也可以有两种：

各河流同频率，均采用设计频率（组合频率高于设计频率）；

各河流流量相加形成合成流量，再计算符合设计频率的设计流量。对于湖、海湾面积较大的情况计算流量时，可以考虑降雨、蒸发和渗漏对进入水体总水量的影响。

④稳态设计水文条件表达

根据对设计水文条件要素的分析，设计水文表达规范格式为：

$TxHcy$ (t)

其中：

T：类型系列：有**H**-传统水文学方法；**B**-生物安全方法；**HH**-人类健康安全方法；**E**-生态安全方法。

x：允许平均期：平均时段的连续天数，对急性毒性、慢性毒性、窒息、酸碱、三致、耗氧有机物等要求的允许平均期各不相同。

Hc：水文指标：有**Q**-流量；**U**-流速；**Z**-水位、潮位；**V**-体积；**T**-水温；**R**-滞留时间或交换率；和其它可表现水体特征的指标。

下标**c**指示平均方法：**a**-算术平均；**h**-调和平均；**g**-几何平均；**w**-加权平均，未注明时表示算术平均。

y：重现期：出现超限事件的平均间隔，以年计。

t：控制时段，年内危险时段（年内排污量最大、温度最高、非点源负荷最大等时段，和估计历年监测数据评价指标最差的时段），**L**-枯水期；**N**-平水期；**F**-丰水期；**Y**-全年；整数字为月份表达，如（12-6）表示12月到来年6月。分数为季节性容量计算设计条件表达：如1/2表一年分两期估算容量，1/4表示分期估算容量，1/12表示分月估算容量，忽略表示按全年数据估算。

⑤设计水文条件计算

根据研究区风险特征和风险控制需求，选择适当的表达形式进行设计水文条件计算。

（3）关键技术方法

①单一河道设计流量选择和计算方法

A. 基于水文学的设计流量计算方法

设计流量的表达方式为 xQy ，其中**H**表示为水文学方法，**y**表示重现期（年），**x**表示允许平均期（天），**Q**表示算术平均流量。 xQy 的计算步骤如下：

（a）确定允许平均期**x**，如30天；

（b）确定重现期**y**，换算设计频率**P**。如10年重现期换算为设计频率**P=90%**；

（c）收集水文站历史日流量资料，资料年数**n**一般情况下是重现期的3倍以上；

（d）对每一年（水文年、日历年均可，按水文年比日历年更合理一些）的数据按时序进行**x**天的滑动算术平均值计算，然后找到年内**x**天的最小算术滑动均值（如7日、30天最枯平均流量等）。



(e) 将多年 x 天的最小算术滑动均值的年极端径流量从大到小排列，按经验频率式计算经验频率：

$$P = \frac{m}{n+1} \quad (5)$$

式中， P 为设计频率， m 为径流量的排列序号， n 为样本容量。

(f) 建立年极端径流量与经验频率的关系，计算设计流量值。

B. 基于水生生物安全的设计流量计算方法

生物安全河流设计流量的表达方式 xBy ，其中 B 表示生物安全（这里代表调和平均流量）， y 表示重现期（年）， x 表示允许平均期（天）。 xBy 的计算步骤如下：

(a) 确定允许平均期 x ，如4天（毒性物质）或30天（耗氧性有机物）；

(b) 确定重现期 y ，如3年；

(c) 收集水文站历史日流量资料，一般情况下资料年数 n 要达到重现期的3倍以上；

(d) 确定允许破坏段（excursion）的个数 ne ，用资料年数 n 除以重现期 y 。 $ne = n/y$ 。如12年的数据，按重现期3年计，可允许出现4个破坏段，破坏段可覆盖 $4x$ 天；

(e) 对多年的数据按时序进行 x 天的滑动调和平均值计算，得到多年内的全部连续的滑动调和平均值的新的流量序列；

(f) 通过试算（一般可通过计算机办公软件的“单变量规划”直接求解）找到不超过允许破坏段数的最大流量即设计流量。给出试算流量值 Q_0 ，计算资料年数内的破坏段数 ne_0 ，如果 $ne_0 > ne$ ，将采用新的调小的 Q_0 重新试算；如果 $ne_0 < ne$ ，将采用新的调大的 Q_0 重新试算；重复以上过程，直到 $ne_0 = ne$ ，或 $ne_0 < ne$ 且无法上升为止。这时的流量为设计流量。试算时出现多个调和平均破坏段重合，则扣除重合部分的日数，将调和平均破坏段覆盖的日数汇总除允许平均期 x 即可得到破坏段的个数。

C. 基于人类健康的设计流量计算方法

影响人类健康的指标主要指致癌类污染物，包括地表水饮用水源地的特征污染物指标及致癌的其他重金属指标。

假定对于致癌类污染物主要与点源排放有关，且致癌物比较保守，一般采用长期调和平均流量 Q_h 进行限制负荷分析。允许平均期为长期（70年），重现期超过近人的平均寿命，由于致癌物无阈值，采用的致癌风险率（如一百万人七十年饮用同一水源致癌率为一人，用 10^{-6} 表达）控制，其计算步骤：

(a) 收集水文站历史日流量资料，资料年数 n 尽可能长，达到70年以上最好；

(b) 剔除零流量数据，由于断流无水饮用，将会采用其他备用水源，因此假设断流时对人体不产生致癌物质的累积；

(c) 对多年的数据进行全部数据的调和平均值计算，得到多年调和平均流量 Q_h 。

采用 Q_h 可以较精确的计算恒定点源排放条件下人类个体一生的累积量。实际监控中采用年均达标控制将偏安全。

D. 基于细菌类设计流量计算方法

细菌类设计流量的表达方式 xGy ，其中 y 表示重现期（年）， G 表示几何平均（这里代表几何平均流量） x 表示允许平均期（天）。 xGy 的计算步骤为：

(a) 确定允许平均期 x ，如30天；

(b) 确定重现期 y ，如3年；

(c) 收集水文站历史日流量资料，一般情况下资料年数 n 要达到重现期的3倍以上；

(d) 确定允许破坏段（excursion）的个数 n_e ，用资料年数 n 除以重现期 y 。 $n_e = n/y$ 。如12年的数据，按重现期3年计，可允许出现4个破坏段，可覆盖 $4x$ 天；

(e) 对多年的数据按时序进行 x 天的滑动几何平均值计算，得到多年内的全部连续的滑动调和平均值的新的流量序列；

(f) 通过试算（一般可通过计算机办公软件的“单变量规划”直接求解）找到不超过允许破坏段数的最大流量即设计流量。给出试算流量值 Q_0 ，计算资料年数内的破坏段数 n_{e0} ，如果 $n_{e0} > n_e$ ，将采用新的调小的 Q_0 重新试算；如果 $n_{e0} < n_e$ ，将采用新的调大的 Q_0 重新试算；重复以上过程，直到 $n_{e0} = n_e$ ，或 $n_{e0} < n_e$ 且无法上升为止。这时的流量为设计流量。试算时出现多个调和平均破坏段重合，则扣除重合部分的日数，将调和平均破坏段覆盖的日数汇总除允许平均期 x 即可得到破坏段的个数。

②河段节点稳态设计流量分析方法

A. 流量合成法

流量合成法：采用已知两个（或更多）水文站的原始日流量系列，根据同时刻节点平衡原则加和后得到新的日流量系列，然后根据新的日流量系列生成设计保证率下的流量。常用于入湖（水库、河口）设计水量的分析。合成方法概念清楚，方法简单，很容易实现。

B. 流量减成法

流量减成法：采用已知两个（或更多）水文站的原始日流量系列，根据同时刻节点平衡原则相减后得到新的日流量系列，然后根据新的日流量系列生成设计保证率下的流量。减成方法概念清楚，方法简单，很容易实现。



C. 流量分成法

(a) 流入流量分成法：采用一个（或更多）流出节点的水文站的原始日流量系列，根据同时刻节点平衡原则估算几个流入河段的设计保证率流量。流入分成方法概念相对比较模糊，由于单一平衡方程多未知量，直接计算是不可能的。由于有流入河段流域面积均小于汇流后的流域面积，从流域面积越小，调节能力越差的定性角度来看，可以判断，分成后的设计流量之和要小于分成前的流出设计流量，定量表达不容易实现。推荐的处理方法：

建立流域内多站设计流量与流域面积关系：

采用拟合曲线（自然过程明显）

采用折线过程（人工水源水汇较大）

然后根据入流河段进入节点前的集水面积，代入关系曲线进行设计流量估算。

(b) 流出流量分成法：采用一个（或更多）流入节点的水文站的原始日流量系列，根据同时刻节点平衡原则估算几个流出河段的设计保证率流量。流入分成方法概念相对比较模糊。流入分成方法相对比较模糊，但由于单平衡方程多未知量，直接计算是不可能的。如果采用固定的分流比，则可直接得到各河段的设计流量，实现这一方法难度较大。推荐的处理方法：

利用历时防洪、工程实测的历时数据数据，建立不同流量条件下分流比关系曲线，然后利用分流比系列推算多站日流量系列。

利用实测数据率定河道 n 值，采用数值计算方法得到不同流量的分流比系列，然后利用分流比系列推算多站日流量系列。

采用固定分流比确定设计流量，但采用一定的安全余量，如降低10%-20%作为容量计算的设计流量。

(4) 技术创新点

①在充分调研国内外水文条件设计的基础上，提出了统一的稳态水文条件的表达形式，适用基于传统水文学方法、生物安全方法、人类健康安全方法及生态安全方法的设计水文条件的设计，采用多年几何平均、多年调和平均、多年算术平均以及最小生态流量、枯水设计流量等多种方式进行稳态水文条件设计的方法。

②提出了稳态流量节点不平衡原理，纠正了近期规划的常见错误，可大幅度减少一些支流河段设计流量过度高估的问题，降低了规划夸大系数环境容量的风险；提出了稳态流量节点不平衡时无水文站河段的合成、减成、合成处理方法，较好地解决了稳态流量节点不平衡导致的设计流量的计算问题。

(5) 技术来源及知识产权概况

自主研发/优化集成。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

南沙河流域控制单元设计水文条件。南沙河流域内有三个水文站，分别为千山站、温泉站、立山站，其中千山站和温泉站设计流量为零，因此选择南沙河所在的浑太河流域内具有代表性的几个站进行设计流量与流域面积的非线性关系估算。

利用GIS系统，生成各节点上下游集水面积。

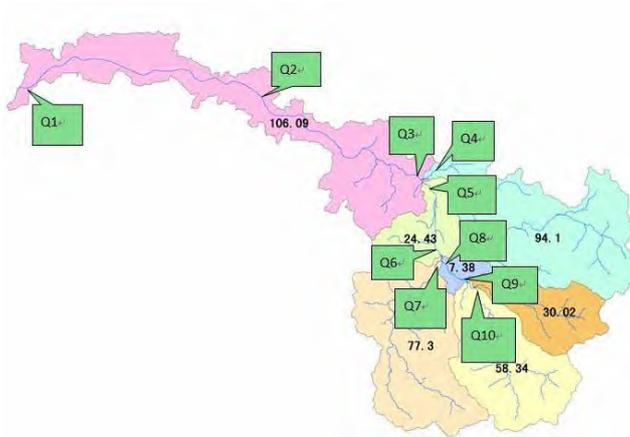


图 3-6 南沙河节点集水面积图

表 3.1 设计流量估算曲线选取的水文站

站点	集水面积 (km ²)	30B3 (m ³ /s)	4B3 (m ³ /s)	7Q10 (m ³ /s)	30Q10 (m ³ /s)
梨底峪站	50	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
东洲二站	417	0.14	0.09	0.10	0.11
南甸峪站	524	0.25	0.17	0.18	0.24
桥头二站	765	0.28	0.19	0.20	0.20
桥头二站	1023	0.76	0.46	0.59	0.76

分别对设计流量四个指标30B3、4B3、7Q10、30Q10生成多项式和乘幂的关系曲线，选择能够较好地反映设计流量和集水面积之间的关系曲线，代入关系曲线进行无水文站河段的稳态设计流量的近似估算。

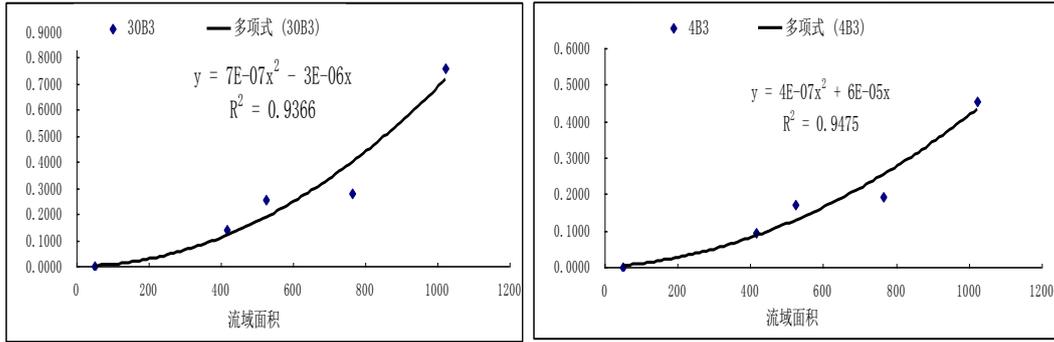


图 3-7 南沙河无水文站 30B3 估算曲线图 3 南沙河无水文站 4B3 估算曲线

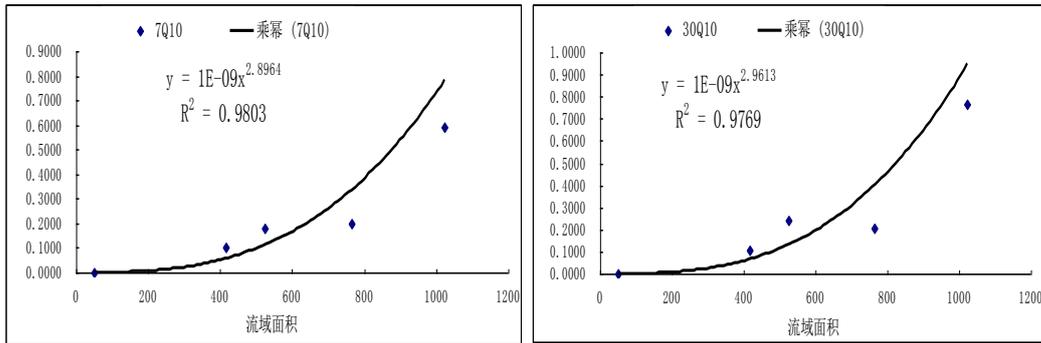


图 3-8 南沙河无水文站 7Q10 估算曲线图 5 南沙河无水文站 30Q10 估算曲线

生成的估算曲线表达为：

$$Q_{\text{设}} = \alpha A^{\beta} \quad (\beta > 1)$$

或者 $Q_{\text{设}} = \alpha A^2 + \beta A + \gamma$

其中：A为集水面积。

带入节点上下游的集水面积估算设计流量。

表 3.2 南沙河无水文站节点上下游设计流量

节点断面	面积 (km ²)	30B3 (m ³ /s)	4B3 (m ³ /s)	7Q10 (m ³ /s)	30Q10 (m ³ /s)
Q1	397.66	0.1095	0.0871	0.0338	0.0499
Q2	330	0.0752	0.0634	0.0197	0.0287
Q3	291.57	0.0586	0.0515	0.0138	0.0199
Q5	197.47	0.0267	0.0274	0.0045	0.0063
Q6	173.04	0.0204	0.0224	0.0030	0.0042
Q8	95.74	0.0061	0.0094	0.0005	0.0007
Q4	94.1	0.0059	0.0092	0.0005	0.0007
Q9	88.36	0.0052	0.0084	0.0004	0.0006
Q7	77.3	0.0040	0.0070	0.0003	0.0004
Q10	58.34	0.0022	0.0049	0.0001	0.0002

本例说明了利用水文站资料生成所有计算断面设计流量的方法,非线性的预测估算模式有别于传统的线性的水文比拟法,具有很高的应用价值。

由于数据为相关生成,无水文站区域流量存在一定的预测误差,实际计算中,可尽量采用数据的下包络线附近的数据,使上游的小支流的设计流量尽量偏小,有助于减少上游排污及生态保护,而适当增加了下游的纳污量。

依托课题:

控制单元水质目标管理技术研究(2009ZX07526-005)

3.2.2 基于 FOEA 的水环境容量安全余量确定技术

技术发展阶段: 引进和消化吸收

试用范围: 控制单元污染物总量分配

主要技术内容和关键技术:

(1) 技术原理

安全余量(Marginofsafety,简称MOS)是指水环境容量计算过程中,由于水环境管理中计算污染负荷与受纳水体之间关系时存在的不确定性,以及考虑未来发展所预留的部分可容纳负荷的余量。目的为了保证水环境管理与污染负荷控制在执行后能对水体环境状况的改善有保证性的效果,降低由于模型的不确定性以及管理方法本身的误差所带来的水质超标风险。模型不确定性,包括模型结构不确定性和参数不确定性两个方面,课题提出了基于模型参数不确定性FOEA(First-OrderErrorAnalysis)的安全余量计算方法,该方法建立在基于方差分析的线性近似的基础上,是近年来常用于水环境模型不确定性分析的新方法。

(2) 技术内容或工艺路线

基于模型不确定性FOEA(First-OrderErrorAnalysis)法的安全余量计算方法主要步骤如下:

①确定模型的关键变量。通过对模型的机理研究,以及参数灵敏度研究,可以找到影响模型运算结果不确定性的关键变量。

②利用有限差分法计算偏微分。采用数值近似的方法,利用有限差分法,计算在泰勒多项式展开点的 $\partial Y/\partial x_i$ 。

③计算每一个关键变量的CV(CoefficientofVariation,离散系数)。离散系数又称为变异系数,是标准差与平均值的比值,反应变量的离散情况。

④计算模型输出的整体方差与标准差。在FOEA方法中,可以确定每一个变量对模型最

终输出结果方差的贡献度，在进行模型参数不确定性分析时，通过一阶误差分析方程，将模型输出的总体方差与每一个独立参数方差的取值的方差联系起来。

⑤将模型输出的整体方差或标准差的结果，用以确定安全余量。寻找关键参数取值样本情况下所产生的模拟结果样本中最大的 Y_{max} ，通过限制 Y_{max} 的值必须低于水质标准值，计算此时模型实际参数取值时的模拟结果 Y 与 Y_{max} 之间的差值，即可认为其是基于模型不确定性而计算出的MOS。

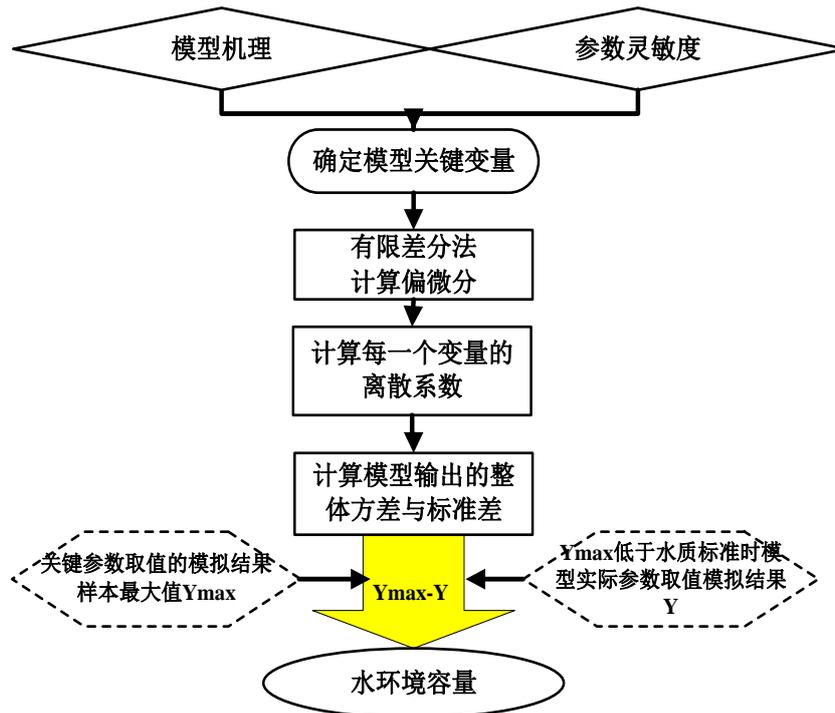


图 3-9 安全余量计算技术路线

(3) 关键技术方法

一阶误差分析方程如下所示：

$$\begin{aligned}
 (CV_Y)^2 &= \sum_{i=1}^p (CV_{x_i})^2 \cdot S_i^2 \\
 &= \sum_{i=1}^p (CV_{x_i})^2 \cdot \left[\frac{\Delta Y(x_i) / Y(x_i)}{\Delta x_i / x_i} \right]^2 \\
 &= \sum_{i=1}^p (CV_{x_i})^2 \cdot \left[\frac{[Y(x_i + \Delta x) - Y(x_i - \Delta x)] / Y(x_i)}{(2\Delta x_i / x_i)} \right]^2
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中： CV_Y 为模型某模拟指标输出结果的离散系数； CV_{x_i} 为第 i 个模型参数取值的离散系数； $Y(x_i)$ 为当第 i 个模型参数取值为 x_i 时的模拟指标输出结果； S_i 为第 i 个参数在参数样本均

值点附近的灵敏度。

利用一阶误差分析的方法进行模型不确定性的计算的前提条件是,模型的变量能够满足线性规律,即变量的中值可以代表变量的概率分布下的平均值。FOEA法是利用了泰勒多项式对模型进行一阶展开,展开式如下所示:

$$Y = Y(X_e) + \sum_{i=1}^p (x_i - x_{ie}) \left. \frac{\partial Y}{\partial x_i} \right|_{x_e} \quad (2)$$

式中: X_e 为在展开点处的各变量的取值向量(x_1, x_2, \dots, x_{n2}); Y 为泰勒展开式在 X_e 附近对模型结果的近似; x_i, x_{ie} 表示第 i 个变量的取值以及其在展开点的值。

根据以上方程,在变量的取值点使用泰勒展开,则可以推导在变量取均值的点附近, Y 的方差与 x_i 的方差之间的关系,如下式所示:

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^p \left[\left. \frac{\partial Y}{\partial x_i} \right|_{x_{ie}} \cdot \sigma_i^2 \right] \quad (3)$$

根据上式,可利用离散系数建立变量样本离散系数与模拟结果样本离散系数之间的关系。

(4) 技术创新点

在对安全余量相关方法的总结与深入研究基础上,提出了基于模型参数不确定性FOEA法的安全余量计算方法,并应用于柴河水库的水体允许纳污量计算过程,取得了更精确的计算结果,有效地降低了水质超标风险,又提高了水环境容量利用率。

(5) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例:

应用单位:江苏省环境科学研究院

在计算柴河水库氨氮允许纳污量的安全余量时,使用FOEA法,基于对相关模型参数的不确定性分析,计算安全余量。在计算总磷安全余量时,采用定比例分配的估算方法。

根据丰水年特定水文条件下的EFDC模型参数率定过程,对参数灵敏度进行分析,分析结果如表3.3所示:

表 3.3 参数灵敏度分析结果表

参数名	参数说明	参数取值	灵敏度系数 (%)
rNitM	最大硝化速率系数	0.8	-6.76
KNit1	水温大于最适硝化作用温度时的温度系数	0.059	15.64



参数名	参数说明	参数取值	灵敏度系数（%）
KNit2	水温小于最适硝化作用温度时的温度系数	0.003	0.114
KDN	有机N矿化速率系数	0.04	16.83
KHNiDO	硝化作用的DO半饱和系数	1	0.582
KDRN	有机N相间分配系数	0.58	34.50

根据不同的方法进行两种污染物安全余量的确定。氨氮的安全余量计算基于对模型的不确定性研究进行，利用FOEA法计算出的模拟结果的离散系数体现了模拟结果总体方差与模拟结果值之间的比例，此比例是模型参数不确定性造成的模拟结果不确定性占模拟结果值的比例。在计算安全余量时，要求模型在考虑最大不确定性的情况下，模拟结果仍低于水质浓度标准，即计算出的允许纳污量是实际可分配负荷的111.33%，安全余量占总体允许纳污量的10.18%。允许纳污量-安全余量-实际可供分配负荷量的关系如表3.4和图3-10所示。

表 3.4 丰水月情景下允许入库负荷量及安全余量计算结果表

指标	丰水月 允许入库浓度 (mg/L)	丰水月 允许入库负荷量 (t/month)	安全余量 (t/month)	丰水月 可分配负荷 (t/month)
氨氮	0.496	142.78	14.53	128.25
总氮	1.37	394.37	40.15	354.22
总磷	0.061	17.53	0.88	16.65

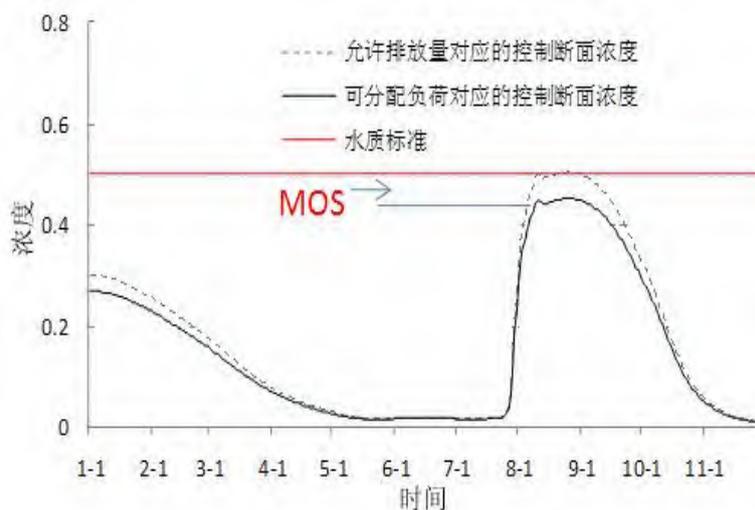


图 3-10 可分配负荷入库情景下的控制断面水质结果图

3.2.3 基于控制单元的太湖流域水环境容量核定技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：太湖流域控制单元的水环境容量核定

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

控制单元是对重要水质控制断面产生影响的主要污染负荷所在区域。基于构建的太湖流域水环境数学模型,分析对控制断面水质产生影响的主要污染负荷区域,以控制断面水质达标为核心原则,水生态功能分区为基础,兼顾考虑流域水文情势和太湖流域圩区分布、区县行政边界和江苏省水资源分区,划分出太湖流域(江苏)控制单元。

构建太湖流域水环境数学模型,选取典型水文设计条件及合适模型参数,计算满足水功能区水质达标的水环境容量;选取水源地、控制断面等保护目标作为水质控制断面,根据现状污染物入河排放量、污染物削减程度、社会经济发展水平、污染治理程度等,利用水环境数学模型计算满足控制断面水质达标的水环境容量。按照水功能区和控制断面水质均达标要求,分析得到满足“双达标”(水功能区及控制断面水质均达标)要求的水环境容量。在此基础上,按照水域面积及功能区划长度的权重系数法,核定分配区域水环境容量至各控制单元。

(2) 工艺流程

工艺流程为“建立太湖流域基础资料库-构建太湖流域水环境数学模型-控制单元水环境容量计算分析”:

①建立太湖流域基础资料库

收集太湖流域水文、水质资料、污染源资料、“十一五”水专项相关资料、区域社会、经济及环境资料,在此基础上建立太湖流域基础资料库。

②构建太湖流域水环境数学模型

基于太湖流域基础资料库,在太湖流域河网模型和太湖湖体模型基础上,构建太湖流域水环境数学模型。根据太湖流域重点断面实测水质资料对模型率定验证。

③控制单元水环境容量计算分析

以控制断面水质达标为核心原则,划分太湖流域(江苏)控制单元。以水功能区及控制断面水质同时达标-“双达标”的要求为前提,应用构建的太湖流域水环境数学模型,分析计算满足“双达标”的要求区域水环境容量,并进行合理性分析。基于控制单元划分结果,按照权重系数法,将计算得到的太湖流域(江苏)区域水环境容量核定分配至各控制单元。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点:

①太湖流域(江苏)控制单元划分技术

提出了控制单元为影响控制断面水质的主要区域,引入单位污染负荷水质影响比的概念,



明确控制单元内部单位污染负荷对控制断面的水质影响比应超过50%；制定了控制单元划分原则：以控制断面水质达标为核心，兼顾水生态功能分区、考虑流域水文情势和太湖流域圩区分布、区县行政边界和江苏省水资源分区。

②太湖流域（江苏）控制单元水环境容量核算技术

基于水功能区及控制断面水质双达标的原则，计算得到了太湖流域（江苏）区域水环境容量值；提出了基于区域水质超标率及污染物削减率分析区域水环境容量计算结果合理性的方法，并应用于太湖流域（江苏）区域，分析表明太湖流域（江苏）水环境容量计算结果较为合理。基于控制单元划分结果，提出了按照水域面积及功能区划长度的权重系数法，分配区域水环境容量至控制单元的方法，根据权重系数法，将计算得到的太湖流域（江苏）区域水环境容量分配至70个控制单元。

主要技术经济指标：

基于本课题控制单元划分原则将太湖流域（江苏）区域划分为70个控制单元。明确水质控制断面为饮用水源地、重要水质控制断面、太湖一级保护区与重要水系相交断面，基于建立的太湖流域水环境数学模型，对已划分的70个控制单元范围进行了调整，确定了太湖流域（江苏）区域共70个控制单元范围，这70个控制单元的单位污染负荷水质影响比均大于50%。

本课题研究提出的控制单元划分技术和控制单元水环境容量核算技术具有一定的创新性，研究方法可供类似地区借鉴。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

表3.5 知识产权

编号	软件名称	著作权人	作者单位	开发完成日期	首次发表日期	权利取得方式	登记号	证书号	软件代码行数
1	江苏省水环境容量信息查询系统	逢勇、李一平	河海大学	2012年11月5日	2012年12月6日	原始取得	2013SR067054	0572816	4890
2	水环境容量与纳污能力计算模型软件		河海大学			原始取得			

实际应用案例：

应用单位：江苏省环境科学研究院

太湖流域(江苏)面向排污许可实施的基于控制单元的太湖流域水环境容量核定技术,在太湖流域的污染总量减排和环境管理工作中发挥了作用,同时也为建立太湖流域(江苏)排污许可证管理体系和太湖流域(江苏)排污许可证技术管理中心等工作提供了重要的基础技术支撑,确保了示范区无锡市区、宜兴市、常州市武进区开展基于容量总量的排污许可证管理的业务化运行。

依托课题:

太湖流域(江苏)控制单元水质目标管理与水污染物排放许可实施(2012ZX07506002)

3.3 水环境容量总量分配

3.3.1 流域水污染物总量分配技术方法: 负荷历时曲线(LDC)

技术发展阶段: 自主/集成创新

适用范围: 该方法可广泛应用资料丰富或匮乏流域的总量分配

主要技术内容和关键技术:

(1) 技术原理

历时曲线法是一种非常实用的水质管理方法,主要包括两种,一种是流量历时曲线,另一种是负荷历时曲线。

① 流量历时曲线

流量历时曲线(FlowDurationCurves,简称FDC),主要用于水体水文学的研究,但尚未应用到污染物总量控制的工作中。FDC是指目标河流断面处某个时段内大于和等于某一流量的保证率,是描绘某一给定流量在一段时间内发生频次高低的曲线。这里的流量可以是日流量,也可以是月流量,数据越多,FDC越准确,但必须能反映出研究断面一年内流量总体变化规律。FDC的计算公式见下式:

$$Pf=m/n$$

式中: Pf代表流量值时的保证率; m代表大于或等于流量值f时的流量监测数; n代表流量监测总数。

② 负荷历时曲线

负荷历时曲线(LoadDurationCurves,简称LDC),是在流量历时曲线的基础上乘以水质目标或标准值后得到的曲线。LDC将流量与污染物负荷容量合理的联系在一起,曲线上各



点代表不同流量保证率下的污染物负荷容量。

（2）技术内容或工艺路线

确定污染负荷容量

TMDL计划在实施的初期，确定水体污染负荷容量常用的方法是计算7Q10或平均流量情况下的水体负荷容量，以此值作为水体全年的负荷容量；我国在计算环境需水量及水体污染负荷容量时也经常使用上述方法。利用7Q10或平均流量计算出的负荷容量值来保护水体水质，存在着明显的保护过度或保护不足的情况。LDC代表的是水体多年平均情况下、整个流量段的负荷容量，避免了上述缺点。

为了使总量控制更加合理，FDC定义了流量历时区域(FlowDurationIntervals, 简称FDI,)即将FDC划分为不同的区域。EPA一般将整个FDC划分为5个FDI：高流量区或叫特丰区(highflows)、丰水区(moistconditions)、中流量区或叫平水区(mid-rangeflows)、枯水区(dryconditions)和低流量区或叫特枯区(lowflows)，各区在X轴上对应的流量保证率分别为0-10%、10%-40%、40%-60%、60%-90%和90%-100%。FDI的划分具有重要的意义，EPA一般将各个FDI中点对应的LDC值作为此段FDI的负荷容量值，进而将污染物的总量控制工作细化到了不同的流量范围。FDI间隔的确定可根据研究内容的不同而变化，如美国密西西比州环境污染物控制部门利用LDC对亚祖河(密西西比河的一个重要支流)制定粪大肠菌群(FecalColiform) TMDL计划时，由于各个流量段的负荷容量变化不大，所以没有进行FDI区划；有的研究者将FDC平均划分为10个FDI，或者根据水体情况，只研究与水体水质密切相关的流量段。

确定污染物现有负荷、消减量

污染负荷的消减及分配是TMDL计划的一个关键步骤，是水体水质能够达标的基础。历时曲线可以方便地确定出各FDI内的污染物现有负荷及消减量。具体方法是：

- ①确定出研究断面的LDC；
- ②利用断面实测污染物浓度数据乘以对应浓度下的瞬时流量值得到污染物的日负荷；
- ③根据瞬时流量值的保证率，确定出日负荷在LDC上的位置，以散点图表示。高于曲线的点表明超过了水质标准，水体水质受损；反之，符合水质标准；
- ④统计每个FDI内污染物的日负荷，得到90%保证率下的值（即：高于此值的日负荷只占10%），以此值代表FDI下污染物的现有负荷；
- ⑤比较各FDI下污染物的现有负荷值和负荷容量值，确定是否需要进行污染物的消减或需要消减多少。

由于天然水体存在很多不确定性，因此TMDL计划为不确定性因素预先设定了安全临界值（MOS）。当MOS和利用历时曲线得到的消减量共同作用于水体总量控制工作时，两者可保证水体有90%以上的水质监测数据能够达标。

（3）关键技术方法

建立流量历时曲线（FDC）

FDC是指控制河流断面处某个时段内大于和等于某一流量的保证率，是描绘某一给定流量在一段时间内发生频次高低的曲线。这里的流量可以是日流量，也可以是月流量，数据越多，FDC越准确。对于水文测站布局较多，控制性好的流域，FDC曲线很容易作出；对于流域内控制水文测站站点稀少或控制性不好，控制断面没有水文测站时，可以利用面积比修订得出水文系列或者通过构建分布式水文模型，如本研究中构建的SWAT模型，充分利用降雨资料推求各控制断面或单元的径流系列；对于没有水文测站的中小流域，可以利用临近相似流域，利用水文比拟法（即用面积比加雨量修正，按径流深等值线图验证）得到FDC曲线。

建立负荷历时曲线（LDC）

根据建立的流量历时曲线和实测的水质资料，利用前述的技术原理即可建立各控制单元的LDC，如图3-11所示。

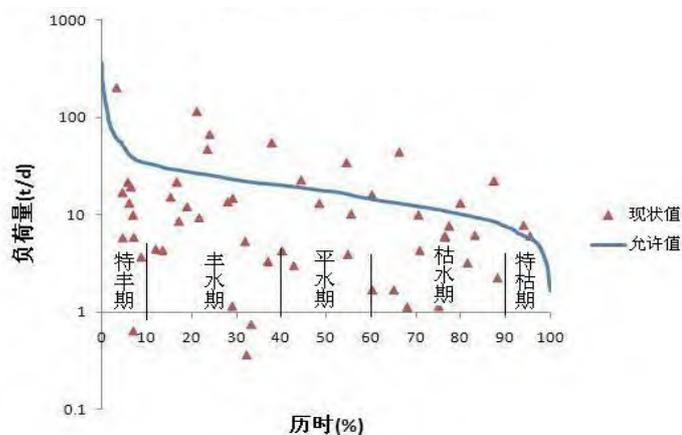


图 3-11 LDC 法总量分配方法示意图

（4）技术创新点

实用于资料系列完整或资料缺乏地区

LDC是一种基于完整流量模式下的简单数据分析工具，以具体地点水质要求和完整流量系列为基础（对资料缺乏地区可以根据水文学中的面积比拟法获取流量系列，或充分利用降雨资料，通过构建水文模型的进行模拟分析），建立河道断面水质变化与流域潜在污染机制间的联系。特定污染物的LDC综合分析图建立后，包含和反映了流域水质现状、允许负荷通



量、现状负荷通量、关键水质条件、潜在污染发生机制等诸多水环境信息，可为水质特征分析提供合理依据。由于常规日流量系列的监测和推演已经十分普遍，该方法提出后在美国日益受到重视，许多资料缺乏地区开始陆续采用LDC制定并实施TMDL计划。

容量计算可避免功能虚置的问题

在流域分配已经完成的情况下，实测断面的允许浓度可能低于功能区水质标准，即功能虚置的问题。因此，计算中要采用分配确定的水质目标。

实现水污染分期控制

历时曲线法在分析季节变化对总量控制的影响时，首先统计各个季节内瞬时流量值，得到不同保证率下的流量值，再乘以水质目标值，即可以得到不同保证率下的日负荷，分析保证率为25%-75%的日负荷所在的FDI，选取此FDI下的负荷容量和消减量应用于整个季节。

实现点源和非点源的容量总量控制

利用LDC能够清楚的表明水质受损时的流量区间：若多发生于低流量段，表明点源的污染贡献量较大；若发生于高流量段，表明非点源的污染贡献量较大。因点源的量全年相对比较固定，其中点源量可以通过低流量段的量来估计，因此，非点源量为高流量段的总量扣除按低流量段的估计点源值即是非点源量。

（5）技术来源及知识产权概况

自主/集成创新。

实际应用案例：

应用单位：四川大学

（1）控制单元超标及其削减项目的确定

以赣江袁河流域作为实例。在实例中，结合袁河流域水功能区划、行政区划和排污状况将袁河流域四个一级区、十一个二级分区及控制单元。根据前述原理，分别作出各控制单元的LDC，通过分析各控制单元的LDC图，对极个别点超标情况可能由于监测数据的问题或者当时出现特殊情况，如果对只有极个别点超标的区域也进行削减，则会极大限制当地经济的发展，因此考虑到袁河当地经济的问题，只对出现明显超标的区域进行削减（即新余工业区和新余保留区II），而对只出现极个别超标的区域不考虑削减问题，这也与实际比较符合，即新余工业区超标，由于新余工业区未达标，导致其下游的保留区也超标。最后得需削减的控制单元及削减目标。

（2）污染类型及削减量

LDC法可突出反映水文条件，即从图中看出超标是发生在特丰期还是特枯期从而判断污

染类型：水质超标发生在特枯期，枯期表示主要为点源污染；发生在丰水期，特丰期表示主要为非点源污染；发生在平水期则为点源与非点源的综合。

利用对污染物的分配工作遵循从点源到非点源，从低流量到高流量区的原则，在低流量区超标的为点源，进行点源的削减，高流量区扣除点源削减后为非点源需要削减的量。

由于水质超标在各类流量模式下均有发生，为了判断最关键水质条件，采用上述代表值分别估算不同流量与实测水质样本的日负荷通量系列第90百分位数的浓度值相乘，与标准水质对比得到削减率。

即：现状日均负荷通量削减率=（90百分位日均负荷通量-标准日均负荷通量）/90百分位日均负荷通量。

由已计算出的LDC图按上述算法算得各控制区各项指标削减率并分析其污染类型，如图3-12至图3-14和表3.6至表3.8所示。

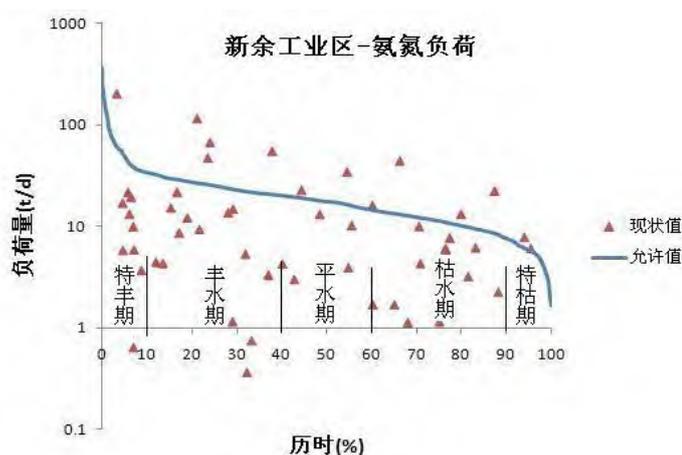


图 3-12 新余工业区-氨氮超标负荷削减图

表 3.6 新余工业区氨氮削减表

氨氮	发生时段	水质现状(t/d)	水质目标(t/d)	削减量(t/d)	主要污染源
新余工业区	丰水期	46.54	24.84	21.7	点源
	平水期	20.85	17.28	3.57	
	枯水期	29.42	7.16	22.26	

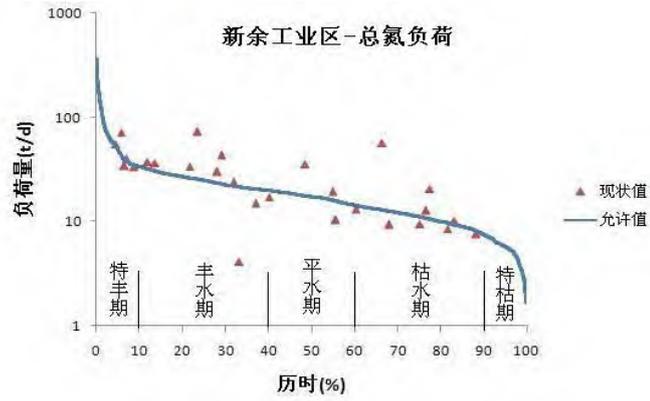


图 3-13 新余工业区-总氮超标负荷削减图

表 3.7 新余工业区总氮削减表

总氮	发生时段	水质现状(t/d)	水质目标(t/d)	削减量(t/d)	主要污染源
新余 工业区	丰水期	32.13	24.84	7.29	点源 非点源
	平水期	20.73	17.28	3.46	
	枯水期	13.17	7.16	6.01	

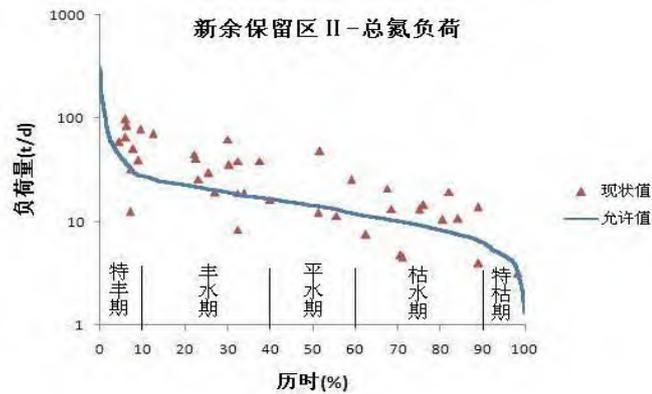


图 3-14 新余保留区 II-总氮超标负荷削减图

表 3.8 新余保留区 II 总氮削减表

总氮	发生时段	水质现状(t/d)	水质目标(t/d)	削减量(t/d)	主要污染源
新余保留区 II	丰水期	44.46	20.87	23.59	点源、非点源
	平水期	30.24	14.33	15.91	
	枯水期	18.51	5.98	12.53	

(3) 各控制单元点源和非点源削减分配结果

分配路线：先利用LDC确定控制单元水体的环境容量TMDL，将TMDL初始分配到点源和非点源，分析各子流域点源和非点源的污染负荷；再根据削减量，设置不同的削减情景，利用SWAT进行模拟，确定需要削减的污染负荷和削减方案的可行性。

污染负荷分配过程包括以下几个步骤：

①根据SWAT模拟的非点源污染负荷和点源调查资料，参考相应河段水质标准采用美国环保局（USEPA）的TMDL推算出点源和非点源的分配方案和削减量。

$$TMDL=WLA+LA+MOS$$

其中：TMDL=WQS*flow（WQS为容许浓度标准、flow为对应的流量），由LDC计算结果获得。WLA：各个点源负荷分配，LA：非点源负荷分配，MOS：安全余量，是关于污染物负荷与受纳水体之间关系的不确定数量；

②计算负荷水质标准的最大日负荷总量（TMDL），即满足水质标准情况下，水体能够接受的某种污染物的最大年负荷量；

③计算现存的污染负荷包括点源污染负荷（WLA）、非点源污染负荷（LA）和安全余量（MOS，本研究中取为环境容量的5%）；

④对比实际负荷与最大日负荷总量来进一步确定污染物的削减量；

⑤在各类污染源之间利用合理的负荷分配方法进行负荷分配。

表 3.9 新余保留区 II 总氮削减表

控制区	削减比例（%）	
	点源	非点源
新余工业区（氨氮）	75.66	0
新余工业区(TN)	45.63	6.75
新余保留区 II (TN)	35.22	19.46

3.3.2 基于水质模型与优化方法的控制单元允许排放量计算方法

技术发展阶段：消化吸收

试用范围：河流型控制单元

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

通过水质模型模拟计算设计水文条件下污染负荷输入与受纳水体水质响应关系，通过优化算法求解满足分配原则下控制单元多目标总量分配模型，并结合方案比较法确定控制单元排污口的允许排放量。

（2）技术内容或工艺路线

基于WESC2D水质模型和RPSM粒子群方法，求解以水环境容量利用率最大和修正的总



量分配合理性指数最大为目标，以保证水环境功能区首断面达标和混合区限制达标为空间约束，以30天平均浓度重现期3年不允许超过1次超标为时间约束，目标函数和约束方程均为非线性的多目标总量分配模型，同时方案比较进行控制单元排污口允许排放量计算。在此基础上，以类似方法建立基于不同原则下污染源总量分配模型或其他分配方法如等比例消减，将入河排污口允许排放量逐级分配到各污染源。技术路线如图3-15所示。

①水质目标核定

根据控制单元的空间位置和流域河流的服务功能，利用水环境功能区划、水功能区等水质要求和排污混合区限制要求，确定控制单元水质目标的空间约束（达标控制断面）和时间约束（达标时间及频率）。

②控制因子识别

对控制单元水域物理、化学、生物特征进行调查和分析，重点进行水质评价，确定控制单元水体的受损类别和受损程度，识别水环境容量计算的水质因子。

③响应关系计算

依据控制单元河流及控制因子特点选择适用的水质模型，并在模型参数率定及验证基础上，选择适当的设计水文条件作为模型水流计算边界条件，分别模拟与分析背景负荷（入境浓度和非点源负荷）和不同可控污染源（排污口单位负荷）对河流水质的响应关系。

④水环境容量计算

以污染物入河量最大为目标，以水质目标为约束，基于污染源与水质的响应关系，建立水环境容量规划模型。依据规划模型的特点，选择线性优化、非线性优化或其他优化方法，计算控制单元各排污口的最大允许纳污量即水环境容量。

⑤排污口总量分配

以满足水环境容量利用率最大和修正的总量分配合理性指数最大为目标，以水质目标为约束，基于污染源与水质的响应关系，建立多目标污染物总量分配模型，选择优化方法计算控制单元各入河排放口的分配量，即为污染物总量分配方案。为了保证方案更加切实可行，可以结合情景分析方法增加不同的有倾向性的约束条件或不同分配合理性指数的权重进一步计算不同的分配方案，从各个优化方案中挑选最佳可行分配方案作为最终决策方案。

⑥污染源总量分配

明确排污口纳污范围内各污染源对河流水质贡献，建立基于不同原则下污染源总量分配模型，选择合适的优化方法，在排污口总量分配基础上，将入河排污口允许排污量最终分配到各污染源。



分配模型以满足水环境容量利用率最大和修正的总量分配合理性指数（扣除环境容量利用率）最大为目标函数，建立以保证所有控制断面和混合区约束控制断面（点）30天平均浓度3年重现期内不允许超过1次超标为约束条件，目标函数和约束方程均为非线性的多目标总量分配模型，其中，采用传统目标加权法，将多目标函数转为单目标函数，即：

目标函数：

$$f_1(X) = \max(\alpha_1 I_1), \alpha_1 = 1 \quad (2)$$

$$f_2(X) = \max(\sum \alpha_k I_k), k = 2, \dots, 6 \quad (3)$$

$$f(X) = 0.5f_1(X) + 0.5f_2(X) \quad (4)$$

约束方程：

$$St_{ik} = \sum_{j=1}^m a_{ijk} X_j, i = 1, 2, \dots, N, k = 1, 2, \dots, d \quad (5)$$

$$ASt_{l+29} = \text{avg}(\sum_{k=l}^{l+29} St_{ik}), l = 1, 2, \dots, d - 29 \quad (6)$$

$$No_l = \begin{cases} 0, ASt_l \leq C_i, l = 30, 31, \dots, d, i = 1, 2, \dots, N \\ 1, ASt_l > C_i, l = 30, 31, \dots, d, i = 1, 2, \dots, N \\ 0, l = 1, 2, \dots, 29. \text{ or } l = d + 1, d + 2, \dots, d + 29 \end{cases} \quad (7)$$

$$SN_{o_l} = \sum_{k=l}^{l+29} No_l, l = 1, 2, \dots, d \quad (8)$$

$$DN_{o_l} = \begin{cases} 0, SN_{o_l} < 1, l = 1, 2, \dots, d \\ 1, SN_{o_l} \geq 1, l = 1, 2, \dots, d \end{cases} \quad (9)$$

$$G_i = \sum_{l=1}^d DN_{o_l} \leq \text{允许破坏段数}, i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$X_j \geq 0 \quad (11)$$

决策变量上下限约束：

$$X_{jmin} \leq X_j \leq X_{jmax} \quad (12)$$

式中决策变量 X_j 为第 j 个污染源的入河量， a_{ijk} 为第 k 天第 j 污染源对第 i 控制断面（点）的响应系数，由水质模型模拟计算得到。 St_{ik} 为第 k 天排放口入河量对第 i 控制断面（点）的浓度贡献。依据 St_{ik} 的30天滑动平均值 ASt_{l+29} ，判断是否超过 i 控制断面（点）的水质控制浓度 C_i （除去背景浓度），如果超标 No_l 即为1，否则 No_l 为0。而后统计 i 控制断面（点）滑动30天平均浓度超标破坏的段数 G_i ，其中10年允许破坏段数不超过3.3作为控制断面约束条件。求解方法采用RPSM（RepulsiveParticleSwarmMethod）粒子群算法。模拟方法采用WESC2D模型的水流模块HYD和富营养化模块EUTRO。

（4）技术创新点

动态水文条件下基于WESC2D模型和RPSM算法的多目标允许排放量计算方法，不需要反复试算，灵活高效；以空间断面浓度超标时段和频率直接取代了以设计水文条件控制风险，

显著的提高了计算的精度;相比于其他允许排放量计算方法,可以更好更快的寻找出优化解,避免了情景方案中大量可行解而非优化解以及难于取舍的决策分析困境,兼顾了公平与效率原则,实现了在各个排污单位或者污染源之间进行科学、合理地分配污染物允许排放量。

(5) 技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

实际应用案例:

应用单位:江西省环境科学研究院

赣江下游控制单元污染物允许排放量分配方案制定。(水质模型:WESC2D,优化算法:RPSM,总量分配模型:多目标非线性规划模型)

以1999-2008年10年水文过程为动态水文条件,分别以17.45mg/L和0.82mg/L(2000年-2009年地表水监测数据)为COD和NH₃-N入境浓度,采用WESC2D模型计算河流响应浓度和非点源负荷响应浓度为背景负荷,分别计算8个入河排放口排放负荷与水质响应关系,利用RPSM粒子群方法求解水环境容量模型。安全余量确定方法采用对所有排放源的分配降低一个百分比(10%)。以水环境容量利用率和总量分配合理性指标最大为目标建立了排污口总量分配模型进行入河排污口允许排放量分配,以等比例消减法对各排污口纳污范围内企业进行污染源允许排放量分配。赣江下游控制单元现状水质达标率为70%,该方法的总量分配方案必然能够满足所有断面水质目标的要求。

依托课题:

控制单元水质目标管理技术研究(2009ZX07526-005)

3.3.3 基于正反算法与情景分析法的控制单元允许排放量计算方法

技术发展阶段:引进和消化吸收

试用范围:湖库型控制单元

主要技术内容和关键技术:

(1) 技术原理

通过反算法利用简单的水质模型可以得到允许纳污量总量的初算结果,以此为基础,结合污染负荷的分配方法,制定不同的负荷分配情景,然后通过正算法利用动态水质模型进行分配方案的达标校核与其对水质影响的分析。在负荷分配方案优化中,利用模型对污染源贡献度的分析,计算污染源权重,并结合分配方案的环境影响程度、经济因素、技术可行性因素等,对方案进行筛选和优化。

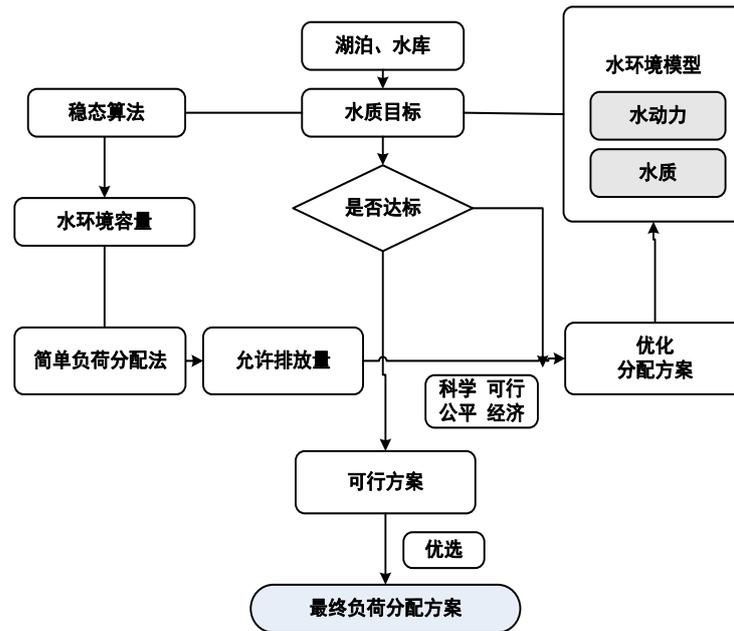


图 3-16 基于正反算法与情景分析法的控制单元允许排放量计算方法

(2) 技术内容或工艺路线

首先采用稳态算法估算目标水体的环境容量，并据此得出初步负荷分配方案，再用动态算法对相应的水动力和水质过程进行模拟分析，根据控制目标，确定准确的允许排放量。

具体算法如下：

①反算法过程估算总体允许纳污量：反算法即是在确定水质目标的情况下，通过较简单的零维或一维水环境容量模型计算湖库水环境容量，再通过排放方式概化与简单的负荷分配假定，计算排污口的允许排放量。反算法因为考虑因素较少，概化尺度较大，计算结果相对粗略，可用于估算总体允许纳污量；

②优化负荷分配方案：基于反算法的结果，以及“科学性、可行性、公平性、经济性”四大原则，优化负荷分配方案，制定优化后的排污情景，作为正算法的输入条件；

③正算法校核负荷分配情景下目标区域达标情况：在已知污染源位置、污染源排放方式、研究水体水文条件等情况下，通过复杂水环境模型，计算研究水体各空间点、时间点上的水质指标。模型考虑多种边界条件，考虑多指标之间的相互作用，最终计算出精度较高的模拟结果。分析模拟结果是否达到水质目标的要求，如果能够达到水质要求，即将此分配方案存入可行方案库；如果不能达到水质要求，则依据分配原则，再次修改方案，并应用模型进行试算；

④优选可行方案：对于优化分配方式后仍能达到水质目标的方案，依据不同的控制目标，例如经济最优，水质最优，技术最简等，进行方案的优选，得到适于湖库实际情况的最终污

染分配方案。

(3) 关键技术方法

①污染源-水质响应关系与污染源贡献度分析方法。主要是基于动态水质模型的模拟分析,包括建立污染源排放方式时间函数,模拟单个污染源对控制断面的影响,模拟多个污染源联合排放对控制断面的影响,建立污染源-控制断面水质响应关系函数,分析污染源对混合区面积的影响五个步骤;

②减排可行性与经济效益分析方法。确定污染源减排在技术可行情况下的最大减排值,即负荷分配情景的实际的污染物排放量应大于技术可行、政策支持的情况下能进行最大程度减排后的排放量而小于不经过任何污染物减排处理的情况下的最大污染物排放量。以重点污染期为计算时间点,建立减排量或减排比例与减排费用得经济函数;

③优化负荷分配方案确定方法。基于污染源-水质响应关系分析、污染源贡献度分析、减污经济效益分析、减污技术可行性分析等,求解相应的限制条件下的优化分配结果,并根据实际的管理目标、政策要求、利益相关者博弈等实际中的复杂因素,对方案进行再度的改良与筛选,最终得到能够均衡各方条件的相对优方案。

(4) 技术创新点

提出了将“允许纳污负荷计算”与“负荷分配”整合为一体的正反双向算法新技术路线,把由控制断面水质推算允许纳污负荷量反向算法,与由污染负荷分配情景模拟水体水质变化的正向算法相结合的允许纳污负荷估算方法。使得污染源与水体水质直接建立关系,水质目标确定后,直接将管理要求落实到污染源,便于实际治污工作的开展。与现状容量总量控制技术相比在进行湖库允许纳污负荷量计算时,具备更高的计算效率与精度。

(5) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例:

应用单位:江苏省环境科学研究院

根据可降解型污染物容量模型和营养盐类容量模型估算了柴河水库氨氮和总磷的允许纳污量。在此基础上,选择丰水年中的丰水月作为最不利设计水文条件,基于EFDC水动力—水质模型建立与分析了柴河水库污染源-水质响应关系分析与达标情景,通过比较,以及对距离权重因子优化分配方案的公平性评价,确定使用效率优先的距离权重因子分配方案作为柴河水库控制单元的最终负荷分配方案,并通过多因子基尼系数比较分配法对分配方案公平性进行了评价,制定了效率较优并满足公平原则要求的最终分配方案。



依托课题：

控制单元水质目标管理技术研究（2009ZX07526-005）

3.3.4 河网总量控制目标制定与小区域分配技术

技术发展阶段： /

适用范围：河网总量控制目标制定与小区域分配

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

通过水文、水质同步监测得到的重污染区污染物降解规律成果，依据国家和地方制定的重污染区水体水质目标，考虑研究区域水文情势和水流特征，采用非稳态水环境数学模型计算成果为基础的容量测算技术，以河道单元（几百米至几公里）为最小计算单元，开展各河道逐日水环境容量计算，进行时间及空间求和后得出研究区域的污染物总量控制目标值。

以各镇区水面面积与水体水质目标两者为权重，将区域的污染物总量控制值分配到各镇区单元，各镇区水面面积根据遥感资料解译成果及GIS技术分析得到。根据入湖通量的测算结果和太湖流域入湖断面的水质达标控制要求，综合考虑区域内社会经济的影响，制定重污染区主要入太湖河流水质达标的区域污染物分配方案。

（2）工艺流程

工艺流程为“水环境容量计算-总量的小区域分配-保证入湖控制断面水质达标的各入河排污口总量分配”，具体如下：

①水环境容量计算

根据确定的边界水文条件，利用重污染区河网水环境数学模型，计算出研究区域最小空间单元和最小时间单元的水环境容量值；再根据容量计算公式汇总出研究区域的水环境容量值。研究区总量分配削减方案得出的污染物削减率与重污染区国控及省控断面的水质监测资料数据中断面水质超标率进行对比分析，若两者数据基本保持一致，则说明水环境容量计算结果基本符合实际。根据重污染区污染物削减率与水质超标率对比结果可知，重污染区污染物削减率与水质超标率基本一致（误差在20%以内），表明水环境容量计算结果与水质状况基本吻合，重污染区水环境容量计算结果基本合理。

②总量的小区域分配

针对研究区河网较为密布这一特点，相对于一般考虑国土面积及河段长度的水环境容量分配方法进行了优化，采用考虑区域内的各镇水域面积所占国土面积的权重，并结合各镇内

水功能区划的情况对水环境容量进行小区域分配。

在研究区水环境容量计算过程中，以水功能区为最小计算单元，累加各功能区得到地市水环境容量。在分配时考虑到各镇内的水功能区划要求，并基于遥感资料和GIS技术分析得到的各镇区水域面积，计算得出水域面积所占的权重，参照以上原则将水环境容量分配至各镇区。

③保证入湖控制断面水质达标的各入河排污口总量分配技术

采用河流一维稳态模型进行控制断面水质的水质计算，根据影响各控制断面水质的概化排污口的位置，采用枯水期设计水文条件，在区域外的边界水质取功能区水质，可建立控制断面与区域内各概化排污口的响应关系。

为得出保证主要入湖控制断面水质达标时，上游各污染源的最大允许排污量，进行控制断面水质达标计算。控制断面达标算法能够保证控制断面水质达标，特别适用于饮用水源地的保护以及国控、省控、市控等重要水质控制断面水质达标的管理。设：控制断面水质浓度为 C_1 ；控制断面上游各污染源排污量为： W_1 、 W_2 、 W_3等。可根据水质模型公式推导得出控制断面水质与上游排污量之间的函数响应关系式为： $C_1=C(W_1, W_2, W_3, \dots)$ 。根据函数关系可分析在不同上游排污量情况下 W_1 、 W_2 、 W_3对 C_1 的影响情况。接下来逐一建立各入湖控制断面与上游河流边界水质及概化排污口排污量响应关系，并对各概化排污口在不同削减方案下的最大允许排污量进行计算。

利用控制断面与上游污染源响应关系模型进行计算，得出在保证主要入湖控制断面水质达标情况下各排污口污染物削减情况。为了验证各入河排污口的总量分配是否合理，利用已经建立的重污染区水环境数学模型，采用响应关系模型计算得出的各排污口污染物最大允许排放量，选取典型入湖控制断面进行水质达标的 uncertainty 分析。

(3) 关键技术

保证入湖控制断面水质达标的各入河排污口总量分配技术。

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：江苏省环境科学研究院

通过水文、水质同步监测得到的重污染区污染物降解规律成果，依据重污染区河网水体水质目标，考虑重污染区的水文情势和水流特征，采用非稳态水环境数学模型计算建立了容量测算体系，并对容量的计算成果采用了分析区域水质超标率与污染削减率之间相对误差的



方法进行了合理性分析。对于水环境容量分配方法进行了优化，一方面是将水环境容量分配的最小控制单元划分到了镇（街道）级，另一方面采用了考虑控制单元内水域面积所占国土面积的权重，并结合各镇内水功能区划的方法对水环境容量进行小区域分配。在重污染区水环境数学模型的基础上，采用响应关系模型计算得出的各排污口污染物最大允许排放量为重污染区数学模型中输入的污染源排放值进行计算，计算得出主要控制断面的水质值，以验证保证入湖控制断面水质达标时各入河排污口总量分配是否合理。

依托课题：

重污染区入湖主要污染源控制与污染物减（2008ZX07101-002）

3.4 水污染物排污许可证管理

3.4.1 以容量总量控制为核心的排污许可证动态管理技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：市、区、县级依托容量总量控制进行排污许可证申报和管理

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

综合运用软件技术、互联网技术和GIS技术，对各个控制单元地图区域进行划分并信息化储存并提供动态仿真演示功能，提供多种推演、分析功能；能根据控制单元的承载容量实时监控、反控及动态仿真演示功能；对省级行政单位进行宏观调控起到帮助，降低决策风险；对地方行政单位起到指导协助完善排污许可证管理工作；将控制单元的承载容量与试点地区发放的排污许可证许可容量进行汇总对比。

基于以上需求，采用微软.net4.5技术与arcgis技术结合，开发太湖流域(江苏)污染物排放许可证管理平台。以往各个地方行政区在管理排污许可证发放工作时，往往依托于自身以往的业务经验进行发证；而新开发的排污许可证管理平台可进一步简化工作内容、加强宏观决策分析辅助功能，并自动建立各个行政区用户层级关系，上级行政区可查询下级行政区相关信息数据。

（2）工艺流程

系统开发的主要技术路线及基础平台如下：

- ① B/S三层体系架构，具有广泛的浏览器支持能力，支持IE6.0以上、chrome、Firefox等主流浏览器。

- ②系统开发采用.NET技术路线，使用IIS应用服务器。
- ③系统数据库采用SQLSERVER2008R2。
- ④应用软件设计开发应采用“无状态”模式，支持集群应用和负载均衡。
- ⑤服务器端采用Windows2008Sever及以上操作系统。
- ⑥系统采用SOA架构进行总体设计，使用WebService技术。
- ⑦采用XML作为系统接口的数据交换标准，进行信息资源整合。
- ⑧采用信息开放等级划分、权限许可和角色认证的方法，建立系统安全机制。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

目前国内尚无与控制单元水环境容量相结合的排污许可证动态管理系统，本系统结合课题基于环境容量的企业最大初始排污许可量核算结果，将环境容量与企业排污许可证挂钩，以环境容量指导企业排污，实现污染物排放控制由目标总量控制向容量总量控制转变。①系统在满足排污许可证的申领、审批、制证等日常管理功能的基础上，集成多项数据，管理部门在审批排污许可证时，可实时查询控制单元的环境容量信息，指导企业排污许可量的核定。②结合GIS技术进行水污染物排放总量的管理，设计了数据查询分析模块和GIS展示及综合管理模块，将基于容量总量的控制单元污染物排放总量控制在管理系统中实现。在系统中，每个控制单元已发的排污许可量和环境容量将会显示在系统中，并可以通过GIS系统直观显示。③对接近环境容量的控制单元进行预警，省级管理部门可以对超过环境容量的控制单元进行锁止，为控制单元水质目标管理体系的建设和基于容量总量的控制单元污染物排放总量控制提供技术支撑。④系统可以对环境容量进行动态更新，当区域环境容量发生变化，可随时调整控制单元环境容量控制目标，实现动态管理。⑤系统还具有统计分析功能，可以按行政区、控制单元、主要行业统计排污许可证发放情况，为宏观综合决策提供支持。

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：江苏省环境科学研究院

太湖流域（江苏）水污染物排放许可证示范：在调查无锡市区、宜兴市和武进区重点水污染源的基础上，筛选一定范围内的试点企业，参考江苏省太湖流域重点污染源初始排污许可量的核定结果，由无锡市区、宜兴市和武进区环保局在江苏省太湖流域重点污染源排污许可证管理中心系统平台上，按照审批权限承担排污许可证发放的受理、审核和批准



工作，实现了排污许可证的业务化运行，增强了地方行政机构审批效率，约束了地方行政机构在发证过程中的规范性，加强了上级部门对下级部门监管能力。

依托课题：

太湖流域（江苏）控制单元水质目标管理与水污染物排放许证实施
(2012ZX07506002)

3.4.2 基于流域水质目标的固定污染源排污许可限值确定方法

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：支撑流域水质达标和流域内固定污染源排污许可管理

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

以流域水质改善为目标，将固定污染源排污许可限值的确定置于流域水质目标管理的框架之下。进行控制单元逐级划分，提高流域管理的空间精度。以污染物排放与水质的响应关系为依据，解析固定污染源对水质的影响和贡献；依据基于水质目标要求的总量分配结果，确定控制单元“多源”排放限值；在控制单元内进一步考虑经济技术可行性等因素及企业污水排放波动特征，通过制定行业排放限值或确定“一企一证”的单个源排放限值，从而将流域水质改善要求落实到固定污染源的排放限值上，使得固定污染源减排精准支持流域水质目标的改善，促进水污染防治工作中流域“片”与固定“点”源管理的融合和互为支撑。

（2）工艺流程

①控制单元划分

依据流域水系、地形资料以及污染物实际输送情况，划分控制单元，要求划分精度高，控制单元空间范围小。

②水环境问题诊断

调查、收集流域地形、水系、水文、水质和污染源监测数据。基于控制单元划分结果，进行污染源结构分析；进行流域水环境问题诊断和原因分析，明确流域水质问题、主要污染因子、超标位置和时段等；采用枯水期污染物通量校核，明确各类污染源，以及固定污染源中重点源和分散源之间的排放结构。

③控制单元排污许可限值确定技术流程

A. 未受损水体排污许可限值确定技术

（a）针对流域或控制单元内固定污染源，根据污染物排放标准、总量控制指标、环境

影响评价文件及批复要求等，依法合理确定许可排放的污染物种类、浓度及排放量，作为初始限值。

(b) 建立流域水环境模型，分析不利条件下各个精细化分的单元中固定污染源排放对混合区水质的影响和对下游流域控制断面水质的影响。如果模拟结果显示污染物排放不会导致流域水质和混合区水质目标的实现，则以初始限值作为单元内固定污染源的最终限值；如果模拟结果显示污染物排放将导致域水质和混合区水质目标的实现，则采用该模型进行模拟，确定精细单元适宜的排放限值。在精细单元内，考虑固定污染源减排排放现状、减排的经济技术性等因素，通过确定行业排放限值或直接确定各个污染源排放限值。

B. 受损水体排污许可限值确定技术

(a) 进行水系概化，根据资料精细程度，将镇级、村级行政区或自然村概化为一个排放口，或者将规模较小的支流概化为一个排放口。建立流域水质模型并进行验证，建立流域中概化后的排放口(即精细控制单元)与流域各控制断面之间的响应关系，形成响应系数场。

(b) 排污许可限值推导方法

本项技术有2条实现路径，一条路径为基于容量约束的限值确定方法，一条为基于响应关系和情景设计的限值确定方法。

方法1：基于容量约束的限值确定方法

计算流域环境容量，得到控制单元划分得到的每一个单元的允许纳污量。

遵循一定分配原则，针对控制单元划分得到的每一个单元，确定每个控制单元的污染物排放限值，以及每个控制单元内每个镇级或村级行政区的污染物排放限值。

针对每个控制单元内的固定污染源，根据控制单元排放限值要求，考虑减排经济技术可行性等因素，设计固定污染源排放限值方案，如停产、限产等。在污染源数量较多的情况下，可以考虑确定行业排放限值；在污染源数量较少，可以根据污染源所处位置、对控制单元水质的影响程度等，确定“一企一证”的排放限值。

方法2：基于响应关系和情景设计的限值确定方法

基于各精细单元(或排放口)及镇级或村级行政区与流域控制单元水质的响应关系，考虑减排经济技术可行性等因素，设计各精细单元(或排放口)及控制单元内固定污染源排放限值的情景，确定个精细单元的排放限值，以及单元内各固定污染源的排放限值。

④不同平均期许可限值转换系数确定方法

根据固定污染源污染物排放监测数据的多寡，采取以下三种方法计算不同平均期许可限值转换系数。



A. 固定污染源具有线监测数据或满足每周一次以上的监测频率，可以使用监测数据分析法直接计算不同污染物的长期平均排放负荷限值LTA、最大日排放负荷限值MDL和月平均排放负荷限值AML。最大日排放负荷限值MDL及月平均排放负荷限值AML与长期平均排放负荷限值LTA之间的转换系数 β_{MDL} 和 β_{AML} 为：

$$\beta_{MDL} = \frac{MDL}{LTA} \quad (1)$$

$$\beta_{AML} = \frac{AML}{LTA} \quad (2)$$

B. 固定污染源的监测频率达到每月一次，在污水排放满足对数正态分布的假设下，采用以下方法计算长期平均排放负荷限值LTA，进而推导出最大日排放负荷限值MDL和月平均排放负荷限值AML，计算 β_{MDL} 和 β_{AML}

其中，LTA 表征污染物的平均控制水平

$$LTA = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3)$$

式中： X_i 为COD排放量每日监测值，kg； n 为监测值的个数。

污染物排放的标准偏差和变异系数的计算方法为：

$$S = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - LTA)^2 \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$CV = \frac{S}{LTA} \quad (5)$$

式中： S 为样本的标准偏差； CV 为变异系数，可衡量样本的变化程度。

在对数正态分布的假设条件下，MDL和AML的计算方法如下：

$$MDL = LTA \times \text{Exp}(z\sigma_1 - 0.5\sigma_1^2) \quad (6)$$

$$AML = LTA \times \text{Exp}(z\sigma_{30} - 0.5\sigma_{30}^2) \quad (7)$$

$$\sigma_n = \left[\ln \left(\frac{CV^2}{c} + 1 \right) \right]^{0.5} \quad (8)$$

式中： σ_n 用来估计样本的变化差异状况； z 为不同的保证概率下的标准正态的分位数，该研究取95%保证率下的 z 值，为1.646； n 为不同时限的天数。

C. 在没有监测数据的情况下，可以参考同行业中，工艺水平和生产规模类似的企业已有监测结果计算 β_{MDL} 和 β_{AML} 的变化范围，并依据经验从该变化范围中取值。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①该项技术围绕流域水质改善为目标，将固定污染源排污许可限值的确定置于流域水质目标管理的框架之下，提出了控制单元“多源”排放限值和单元内固定污染源“一企一证”排放限值的确定方法，使得固定污染源减排精准支持流域水质目标。

②已基于该项技术编制了《基于水质的固定污染源排污许可限值确定技术指南》。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

(1) 铁岭控制单元排污许可限值方案

(2) 常州市化工行业排污许可限值确定方案

依托课题：

控制单元水生态承载力与污染物总量控制技术研究与示范（2013ZX07501005）

3.5 控制单元水质目标管理

3.5.1 多要素耦合的控制单元划分技术

技术发展阶段：集成、推广

适用范围：流域汇水区域明确

主要技术内容和关键技术：

(1) 技术原理

基于控制断面空间分布确定子流域划分尺度，明确陆域汇水区与水质断面的空间对应关系；通过水质管理主体和污染源分布特征，确定管理单元的划分尺度，明确污染源的产生、排放、入河特征；通过空间叠加技术，将子流域与管理单元进行拆分，得到具有子流域汇水特征和管理特征的控制区；通过空间聚类技术，将具有相同汇水特征和污染源管理特征的区域确定为水质目标管理的控制单元。

(2) 技术内容或工艺路线

控制单元划分技术主要包括以下7个工作内容：

①控制断面确定

明确水质控制断面的空间分布。

②子流域划分

依据数字高程模型（DEM）进行流域地表水文分析，获取包含空间拓扑信息的河网与子流域分割信息，识别出控制断面对应的子流域汇水区。

③管理单元空间尺度确定和划分

根据管理政策、措施实施主体的特点，确定管理单元的空间尺度。

④子流域与管理单元叠加分析

子流域与管理单元进行空间叠加，得到具有流域产汇流特征和污染源产排特征的控制区。

⑤控制区聚类分析

将具有统一管理属性的控制区进行聚类，得到具有污染产排特征的水质目标管理单元。

⑥控制单元划分结果合理性检验和校正

对划分结果进行分析和校正，确保控制单元管理主体明确，污染控制措施科学。

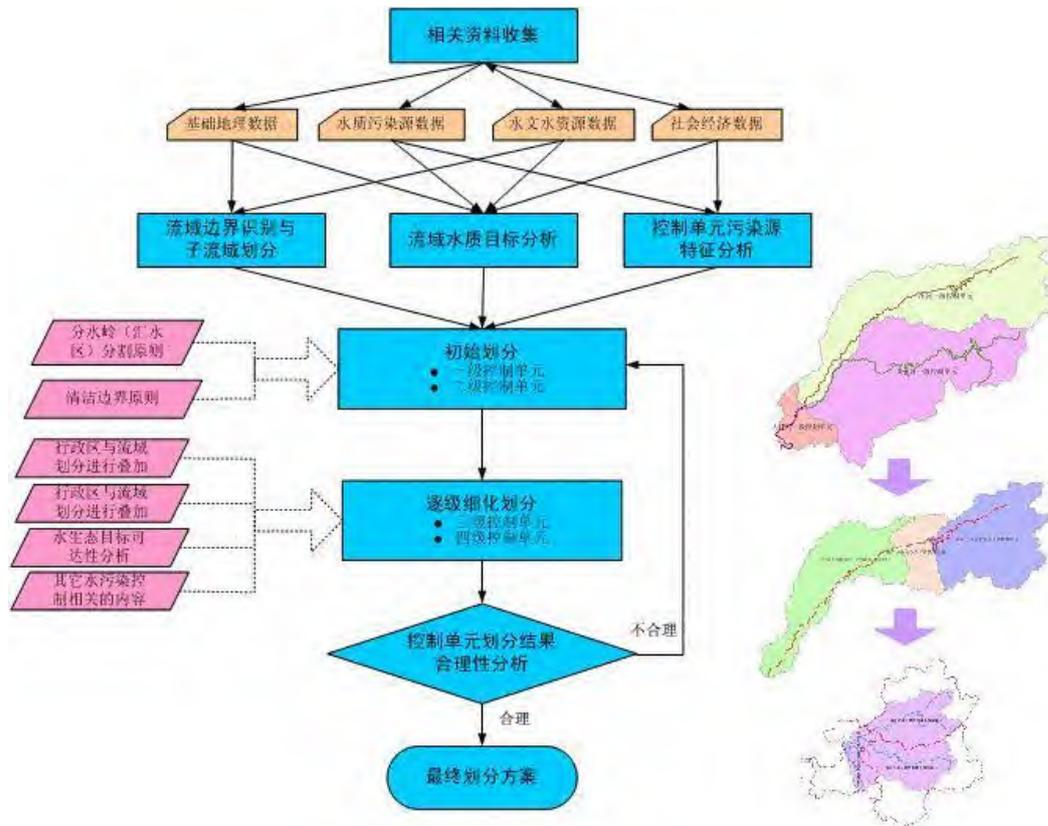


图 3-17 控制单元划分技术路线

(3) 关键技术方法

控制单元划分技术主要包括3项关键技术：划分原则、子流域识别和划分、子流域与行政区域。

①确定划分原则

A. 等级性原则：根据流域特征的不同，控制单元可以逐级划分。

B. 优先保护高功能水体（清洁边界隔离）原则：以清洁边界为控制单元划分的边界，优先保护高功能区水质目标，实现相邻河段之间水质目标的协调，消除单元之间的边界纠纷。

C. 汇水区边界隔离原则：控制区以流域或子流域界作为控制单元之间的隔离边界，确

保污染物核定方法科学。

D. 行政管理隔离原则：充分考虑到行政区边界，尽可能维持行政区完整，确保管理措施的落实和实施。原则上控制单元不跨省级行政区范围。

E. 水体类型隔离原则：将河流-湖泊、河流-水库、河流-河口的交界断面作为控制单元的边界，以便于不同类别水体水质目标管理方案的衔接。

F. 其他隔离原则：有利于简化污染源管理便于明确环境质量责任人的原则。

②子流域识别和划分

基于数字高程模型（DEM），利用Arc/Info软件进行流域地表水文分析，获取控制断面对应的、含空间拓扑信息的子流域汇水区。

③子流域与管理区域叠加和聚类分析

子流域与管理单元叠加，划分控制区，在此基础上进行管理特征聚类分析，获得污染核算科学、管理主体明确的控制单元。

（4）技术创新点

①解析控制单元的内涵，确定控制单元划分的原则，提出控制单元划分的技术方法和步骤，解决以往控制单元划分标准不统一，难以实施的困难。

②综合考虑行政区污染源分布和目标水体控制断面的空间分布，在以往单元空间尺度划分的基础上，扩展了充分考虑污染源与水质因子相互作用的功能性划分，从而确定控制单元的空间尺度和控制类型。

（5）技术来源及知识产权概况

自主研发/优化集成

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

以大辽河水系为例进行控制单元划分案例研究。

依托课题：

控制单元水质目标管理技术研究（2009ZX07526-005）

3.5.2 河网型控制单元水质目标管理技术

技术发展阶段：示范类

适用范围：平原河网

主要技术内容和关键技术：



（1）技术原理

基于分类输出系数法核算平原河网区非点源污染负荷，分析污染物产生、排放、入河量；基于EFDC模型构建河网和湖体水动力水质模型，得到水质响应特征曲线；基于5级分配技术得到总量控制方案。

（2）技术内容或工艺路线

①基于分类输出系数法进行污染源核算

河网地区水系密布、水流复杂、污染物去向不清晰，难以通过建立大尺度模型直接核算流域污染负荷，这对控制单元非点源核算带来很大的难度。针对这种情况，常采用输出系数法进行污染负荷或者入河负荷核算。河网区非点源主要包括农村生活、畜禽养殖、农业种植3类污染，在实际核算中应根据各类污染的产生、排放和入河过程，建立分类输出系数模型，分区核算。

②应用动态模型进行污染源-水质压力响应关系分析

河网地区河流水质响应规律不明显，难以采用经验性、稳态的水质模型获得清晰、明确的压力响应关系。必须采用动态水质模型进行水质模拟，在进行模型敏感性分析和不确定分析的基础上，获得相对稳定的水质压力响应特征曲线。

③应用分级污染分配体系进行总量分配

太湖地区湖泊、河网互相连通，长江、太湖通过河网相互补给，流域内污染物通过支流进入河网，而后进入湖泊。对于控制单元而言，污染主要来源于上游输入、本区支流排放、本区直排。在污染控制中应进行污染源结构分析，明确主控污染源，遵循“分区核算、分类控制”的原则，划分上游污染、本地排放的比例关系，重点控制本地污染，分点、面源进行总量分配。

（3）关键技术方法

①建立水质响应特征曲线。基于EFDC模型分别建立太滬运河河网水动力模型和滬湖三维水动力，基于wasp模型建立水质模型，结合设计水文条件和污染源情况，进行水质模拟，得到水质响应特征曲线。

②控制单元分级污染分配。按照湖体直接污染源（大气沉降、湖体内源、河流输入等）、直接入湖河流污染负荷、河流上游和本地污染负荷、本地点面源污染负荷等5个级别进行污染源分配，得到控制单元污染分配方案。

（4）技术创新点

①综合考虑水环境功能目标、常规污染物含量限制、有毒物质限制、水华限制等多要素，确定控制单元水质控制目标。

②自下而上将污染源逐层划分为5级，分级进行控制单元总量分配。

(5) 技术来源及知识产权概况

自主研发/优化集成

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

太湖竺山湾-太隔运河控制单元的水质目标管理研究

依托课题：

国家环境技术评估（BAT）及推广体系研究与流域示范（2013ZX07504-004）

3.5.3 城市河段控制单元水质目标管理技术

技术发展阶段：示范类

试用范围：城市河段控制单元

主要技术内容和关键技术：

(1) 技术原理

针对城市河段控制单元点源污染及城市暴雨径流污染为主的特点，重点针对水质目标管理技术环节中城市非点源污染负荷的估算及点源允许排放负荷计算的方法开展应用研究。

(2) 技术内容或工艺路线

城市河段控制单元一般人口比较集中，经济相对发达，污染相对严重。污染源主要以点源为主，非点源主要是由于城市的快速化发展导致的城市暴雨径流污染。因此，课题提出了基于城市点源入河系数估算和非点源类型源试验和SWMM模型计算-设计水文条件的选择-基于水质模型的输入响应关系计算-水环境容量计算-污染物允许排放负荷计算的城市河段控制单元水质目标管理方法。城市河段控制单元水质目标管理技术路线如图3-18所示。其中关键是城市非点源污染负荷核定以及城市点源允许排放负荷的分配原则与计算方法。

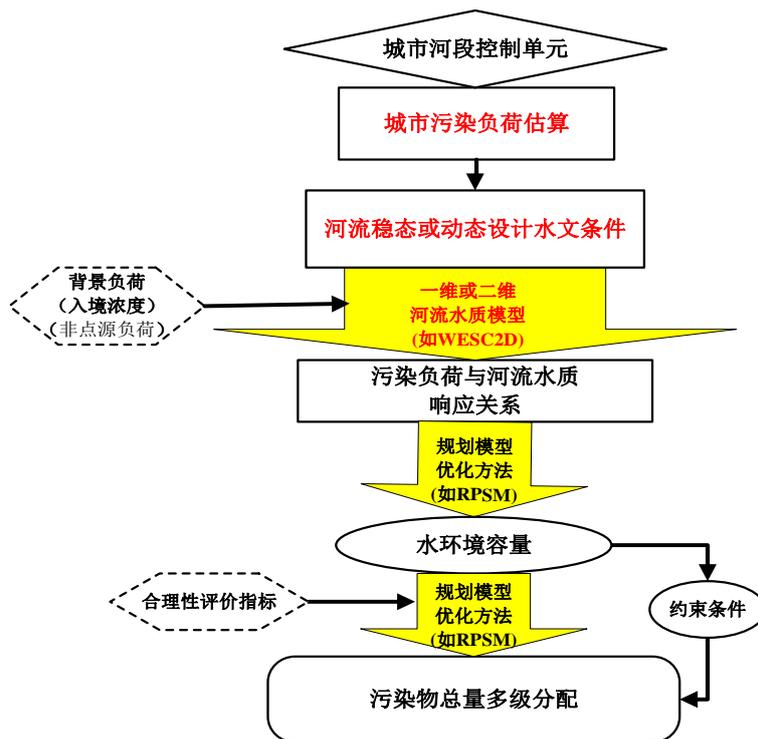


图 3-18 城市河段控制单元水质目标管理技术路线（模拟优化）

（3）关键技术方法

①城市暴雨径流的污染负荷估算方法。主要有包括降雨、径流、水质同步观测和降雨、水质同步观测的径流污染试验法，完全合流制、截流式合流制、完全分流制和截流式分流制的水文分割法，水质与流域特征相关关系法，城市非点源污染物冲刷量计算模型法以及适用于城市径流污染模拟的非点源模型法，主要包括SWMM、Wallingford、STORM、DR3M-QUAL、MOUSE和SLAMM等模型。

②城市点源允许排放负荷的分配原则与计算方法。城市河段入河口允许排放负荷计算方法主要是以考虑科学、公平和效率原则的总量分配合理性指标最大为原则的优化分配方法。污染源允许排放负荷计算方法是基于效率原则和入河系数的优化分配方法。

（4）技术创新点

提出了采用类型源试验与基于城市排水系统构建SWMM数学模型的方法来进行城市非点源负荷核定和基于合理性评价指标的入河排放口允许排放量和基于入河系数的污染源允许排放量计算方法，并在大辽河控制单元进行了应用研究。

（5）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：江西省环境科学研究院，辽宁省环境科学研究院

在赣江下游和大辽河控制单元应用。

依托课题：

控制单元水质目标管理技术研究（2009ZX07526-005）

3.5.4 南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术

技术发展阶段：示范类推广

适用范围：南方丰水型丘陵平原河流域控制单元水质目标管理

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

南方丰水型河流的典型特点是河流源自峡谷，中上游流经丘陵山地，生态环境质量相对较好，中下游流经平原，受人类活动干扰较大，河流来水以雨水补给为主。目前，这种类型河流的水环境管理是基于行政区划的出境断面达标管理，即采用浓度控制和目标总量控制相结合的管理技术，这种管理模式未充分考虑河流的流域属性和水环境容量资源，对排污源头也缺乏有效的约束，极易造成行政区内水环境污染，特别是在一些支流子流域更是如此。

南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术基于控制单元提出了一套水质目标管理的技术体系，该体系打破了传统的行政区划管理模式，而是依据河流的流域属性划分控制单元进行管理，基于控制单元内的排污单元和控制断面分布对控制单元的水环境容量总量进行核算并合理分配至各排污单元，制定出各排污单元的污染减排规划方案，从而为流域水环境管理从基于浓度控制的行政区划管理向基于水生态系统健康的控制单元管理转变，从目标总量控制向容量总量控制转变提供了新的理念和思路。

（2）技术内容或工艺路线

①技术内容

南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术主要涉及四方面的内容，从而构成了一个完整的技术体系，具体介绍如下：

A. 设计水文条件选择

南方丰水型河流与北方枯水型河流不同，设计水文条件必须考虑丰水期面源污染的影响，采用传统的最枯月平均流量法存在一定的弊端，因为在枯水季节达标的断面在丰水期时存在超标的风险。

B. 控制单元水环境容量总量核算

南方丰水型河流水量相对北方河流充沛，因此控制单元的水环境容量核算需根据河流排



污口分布等情况确定水质目标模型，容量核算主要包括控制单元内水质目标确定、污染源分布、控制断面选择、水质模型及参数率定、污染源-控制断面水质响应关系等。

C. 安全余量确定与容量总量分配

南方丰水型河流在丰水期时面源污染相对较重，在确定安全余量时，应考虑丰水期面源污染的影响，该内容主要包括控制单元内丰水期面源污染负荷核算及安全余量的确定、总量分配原则的确定等。

②技术路线与步骤

南方丰水型河流控制单元水质目标管理的技术路线如图1所示，具体步骤如下：

- A. 根据各水环境功能区、监测断面、排污口等确定水质目标，选定合适的水质模型，同时计算控制断面的设计水文条件；
- B. 建立控制单元内污染源-控制断面水质线性响应系数矩阵，并计算控制单元的最大允许排放负荷；
- C. 根据控制单元内丰水时期的面源污染负荷，结合控制单元的水质现状，确定安全余量，计算可供分配的水环境容量总量；
- D. 根据控制单元内污染源的及技术经济条件确定容量总量分配的原则，由分配原则决定目标函数中污染源的分配比例；
- E. 由分配原则确定的分配比例计算各源的允许排放量，得到该分配原则下的分配方案；
- F. 采用合理性指数对确定的分配原则下的分配方案进行合理性评估，对分配结果不满意，调整分配比例（原则），重新进行分配，直到得到的分配方案满意为止。

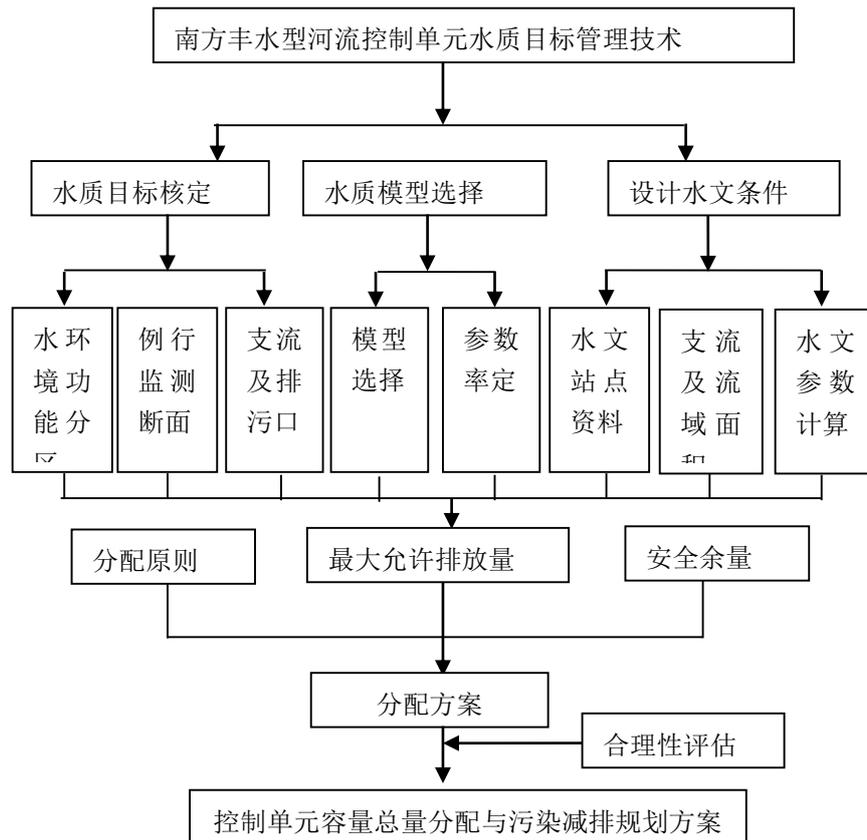


图 3-19 最大允许排放负荷核算技术路线

(3) 关键技术方法

① 南方丰水型河流水环境容量设计水文条件选择与计算

设计水文条件是计算水环境容量总量的前提和基础，包括设计流量、流速、河宽、平均水深等水文参数。常规污染物（COD和氨氮）的设计流量一般采用调和平均流量（30B3）或极端算术平均流量（30Q10），然而对于南方丰水型丘陵平原河流流域来讲，丰水期的非点源污染可能较枯水期的污染更为严重，采用30Q10设计流量计算的达标排放量在丰水期时存在超标的风险，因此南方丰水型丘陵河流流域的设计水文条件选取基于生物安全的调和平均流量（30B3），计算公式如下：

$$Q_{\text{设}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{Q_i}\right)}$$

式中： $Q_{\text{设}}$ 为设计水文条件， n 为观测的断面流量数据的个数， Q_i 为断面 i 的流量数据。一般来讲，基于生物安全的设计流量计算所需水文资料年数是重现期的三倍以上，按此推算，如果采用30B3设计水文条件，则所需资料年数应为九年。设计水文条件计算出后，采用区域化方法推求各控制断面的设计水文条件和河流水文参数。



②南方丰水型河流控制单元水环境容量核算水质模型选择

南方丰水型河流水量丰富，如果采用断面达标控制，容量特别大，控制单元水环境容量核算通常选取了二维水质模型，在排污口下游设置一定范围的混合区，采用排污口混合区控制；在没有排污口汇入且混合均匀的河段，可考虑选用一维稳态模型简化。

③南方丰水型河流控制单元安全余量的确定

控制单元的安全余量是确定容量分配量的前提，通常是预留出一定的比例（如5%~10%）作为控制单元的安全余量，不参与分配。南方丰水型河流在丰水期时面源污染通常较重，在枯水期分配的面源容量在丰水期时存在超标的风险。因此，为保障南方丰水型河流控制单元在丰水期时水质也达标，将丰水期面源污染负荷作为安全余量的一部分，不参与分配。

（4）技术创新点

南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术主要是对控制单元设计水文条件计算、水环境容量核算及安全余量确定进行集成优化，提出南方丰水型河流在丰水期面源污染较为突出，设计水文条件不宜采用最枯月流量平均法，而应采用基于生物安全的调和平均流量；在进行控制单元水环境容量核算时，通常选取二维水质模型，即在排污口下游设置一定范围的混合区，采用排污口混合区控制；控制单元的安全余量可以将丰水期面源污染负荷考虑在内，这样可以降低丰水期时因面源污染导致的河流控制断面超标的风险。

研究提出的南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术是基于控制单元的一套技术体系，该体系打破了传统的基于行政区划的出境断面达标的水质管理模式，提出流域水环境管理要从基于浓度控制的行政区划管理向基于水生态系统健康的控制单元管理转变，从目标总量控制向容量总量控制转变，从而为南方丰水型河流控制单元的水质目标管理提供了新的理念和思路。

（5）技术来源及知识产权概况

示范类推广。

实际应用案例：

该技术在赣江的三个子流域袁河、锦江、遂川江及赣江下游（南昌段）选取了13个控制单元开展水质目标管理技术示范，结果表明该项技术可以方便快捷的完成控制单元最大允许排放量的核算，并对容量总量进行分配。从应用情况看，南方丰水型河流控制单元水质目标管理技术在南方丰水型河流流域有广阔的应用前景；并且，该技术提出的流域水环境管理要从传统的基于行政区划的浓度控制管理向基于水生态系统健康的控制单元管理转变，从目标总量控制向容量总量控制转变的理念和思路在我国南方丰水型流域水环境管理中将会得到

越来越广的应用。

依托课题：

赣江流域水生态功能分区与质量目标管理技术示范（2008ZX07526-008）

3.5.5 基于污染物断面通量的控制单元水质目标管理实施效果评估技术

技术发展阶段：消化吸收、推广类技术

试用范围：污染物总量评估

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

污染物总量监控,是指对具有一定空间范围的流域或具体的污染源排放总量进行监督性监测和评估的过程。通量监控是指通过控制断面的污染物通量,计算区域或者污染源污染物排放总量和,评估其总量目标完成情况。本技术根据污染物通量计算的五种方法,采用随机抽样的方法,对河流断面和污染源排污口断面的采样频率的误差进行了分析,提出不同污染物和排污条件下通量估算的方法和监控频率建议。

（2）技术内容或工艺路线

结合水环境总量考核的需求,重点包括断面通量统计方法的确定、监控频率和污染源抽样监控方法研究,基于污染物通量的控制单元水质目标管理实施效果评估技术具体实施路线见图3-20。

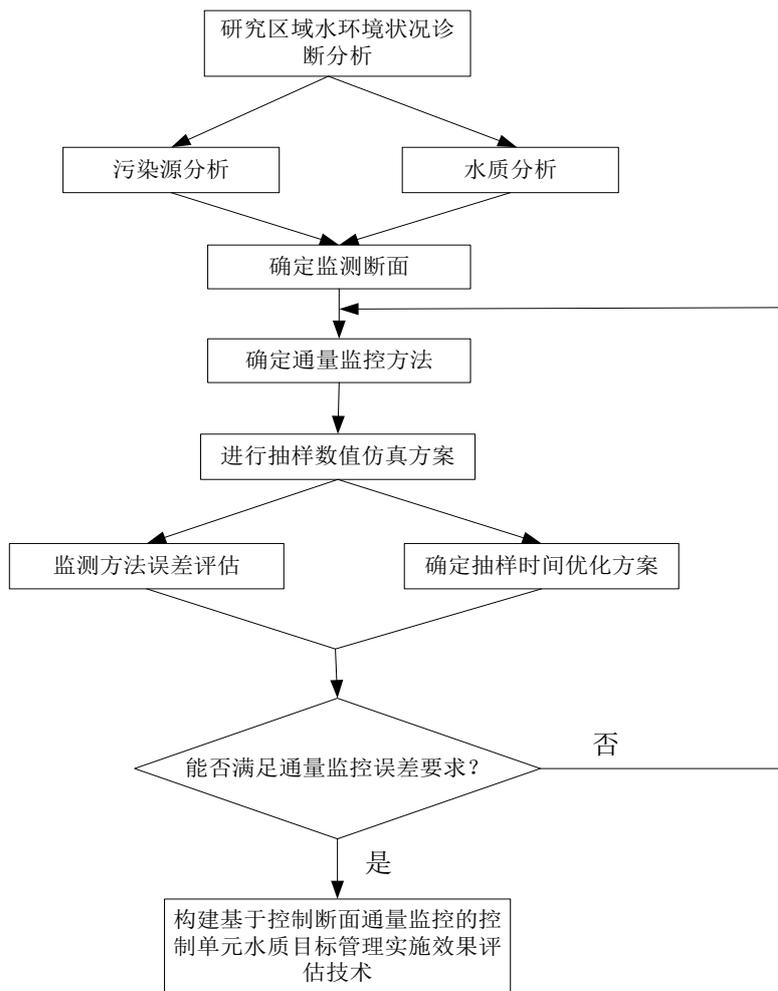


图 3-20 通量监控技术路线图

(3) 关键技术方法

① 通量估算方法

根据研究，时段通量的计算简化为以下五种方法见表3.11。

表 3.11 非感潮河段时段通量公式

算法	估算式	方法要点	应用范围
A	$W_A = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$	瞬时浓度 C_i 平均与 瞬时流量 Q_i 平均之积	第一项远大于时均离散项 的情况，弱化径流量的作 用
B	$W_B = K \left[\sum_i^n \frac{C_i}{n} \right] \bar{Q}_r$	瞬时浓度 C_i 平均与 时段平均流量 \bar{Q}_r 之积	第一项远大于时均离散项 的情况，强调径流量的作 用
C	$W_C = K \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{n}$	瞬时通量 $C_i Q_i$ 平均	弱化径流量的作用，较适 合点源占优的情况

D	$W_D = K \sum_{i=1}^n C_i \bar{Q}_{Pi}$	瞬时浓度 C_i 与代表时段平均流量 \bar{Q}_{Pi} 之积	强调径流量的作用，较适合非点源占优的情况
E	$W_E = K \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r$	时段通量平均浓度 $\frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i}$ 与时段平均流量 \bar{Q}_r 之积	强调时段总径流量的作用，较适合非点源占优的情况

②通量估算误差分析方法

通量估算误差通常考虑系统误差（偏差）和随机误差（准确度），分析方法主要有均值估计法、百分比估计法、线性回归法等。研究选取COD_{Mn}、NH₃-N两种污染物，利用2005-2007年3年的每日水质和流量数据计算基准年通量，作为该断面年通量的“真实值”；然后采用MonteCarlo方法模拟不同时间间隔下的采样方案，计算各方案的污染物年通量，并与基准年通量进行比较，对不同时间间隔采样方案的系统误差和随机误差进行分析，从而建立不同水质指标的最优通量估算方法。

第一步确定通量误差指示。确定通量误差的指示指标： e_{50} 和 Δe ，其中 e_{50} 为通量50%概率下的误差， $\Delta e_j(d) = e_{90j}(d) - e_{10j}(d)$ 为90%与10%概率误差的差值，代表误差的离散程度。

第二步由每日数据计算基准年通量 F_{ref}

$$F_{ref} = 0.0864 \sum_{i=1}^{365} (Q_i C_i) \quad (1)$$

式中： F_{ref} 为河口物质基准年通量（t a⁻¹）； Q_i 为日流量（m³ s⁻¹）； C_i 为日浓度（mg l⁻¹）； i 为日序号， $i=1, \dots, 365$ （366）。

第三步模拟不同时间间隔的采样方案

常规监测中采样频率从每周一次到每月一次甚至更长的间隔，并且往往不是按照等间隔采样的。采用MonteCarlo方法分别模拟了时间间隔为2d、3d、5d、6d、10d、15d和30d共7种随机离散采样方案。例如d=30代表常规采样中每月一次的离散采样。为了呈现各模拟方案的统计规律，对每种间隔的方案模拟次数都在100万次。

第四步计算不同算法的通量值

分别采用文献中推荐的5种通量算法对COD_{Mn}、NH₃-N的年通量 F 进行计算。

第五步误差分析。年通量误差 e_d 的公式如下：



$$e_d = 100 \frac{F_d - F_{ref}}{F_{ref}} \quad (2)$$

e_d 代表在时间间隔 d 下的误差， F_d 为在各算法在时间间隔 d 下的年通量， F_{ref} 为基准年通量。 e_{10} 、 e_{50} 、 e_{90} 为对应时间间隔下10%、50%、90%保证率下（升序排列）的误差值。其中 e_{50} 为误差的中值，表征算法的系统误差， $e_{90}-e_{10}$ 反映算法的准确性，代表随机误差的离散程度。

第六步相关性分析

分析误差关于采样间隔的相关性，做误差指示关于采样间隔的线性规划图。

第七步误差分析

在相同采样间隔下，比较采用5种通量估计公式估计的通量误差。

第八步通量估计方法的筛选

在第七步基础上，以系统误差和随机误差范围最小为原则，进一步筛选出最适宜通量统计方法。

（4）技术创新点

建立了以MonteCarlo抽样理论为基础的通量估算误差分析方法，利用历史的水质和流量监测数据，针对断面不同的污染物指标确定合适的通量估算公式。在此基础上，通过通量误差关于采样间隔的相关性分析，给出了一种在给定估计精度下最低采样频率的确定方法。采用MonteCarlo方法模拟了不同频率的监督性监测方案，并分析各监测方案的统计误差，建立了排放量统计误差关于监督频率的相关性趋势线。

（5）技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

实际应用案例：

应用单位：江西省环境科学研究院，常州市环境科学研究院

- （1）赣江下游控制单元滁槎断面总量监控分析
- （2）常州某污水处理厂排放总量监控分析

依托课题：

控制单元水质目标管理技术研究（2009ZX07526-005）

4 水污染防治技术评估与排放限值管理

4.1 水污染防治最佳可行技术评估技术

4.1.1 污染防治最佳可行技术评估程序与方法

技术发展阶段：示范技术

适用范围：污染防治最佳可行技术筛选与评估

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

最佳可行技术指南文件的编制工作基本按照《污染防治最佳可行技术制修订管理办法》（试行）文件中要求的程序进行，而最佳可行技术的评估主要以技术的调研数据为依据进行简单专家评估而得出，缺乏科学的评估过程；并且调研过程中，数据主要以企业提供为主，难以保证技术数据的真实性和全面性。因此，评估筛选出的最佳可行技术的科学性不足。考虑到同一行业的污染防治技术数量较多，并且往往差异性较大，设计将污染防治最佳可行技术评价工作分为三个阶段：技术初筛阶段、技术调查阶段、技术评价阶段。

技术初筛阶段主要采用专家咨询法（即基于专家经验判断的定性评价方法），对参选技术进行初步筛选，确定备选技术。本阶段工作内容主要包括：列出所有技术、确定参选技术、成立评价专家组、确定备选技术等工作环节。技术调查阶段主要采取书面调查与现场调查相结合的方法，获得技术评价工作所需的技术数据。本阶段工作内容主要包括：确定调查对象和指标、开展技术调查、数据审核补充、数据整理入库等工作环节。技术评价阶段主要利用技术调查数据，通过科学的评估方法和经济性分析等手段，对备选技术进行定量评价，经过比较和筛选确定最佳可行技术。本阶段工作内容主要包括：确定评价指标、经济性分析、综合评价、确定最佳可行技术等工作环节。

(2) 工艺流程

污染防治最佳可行技术指南评价程序如图4-1所示。

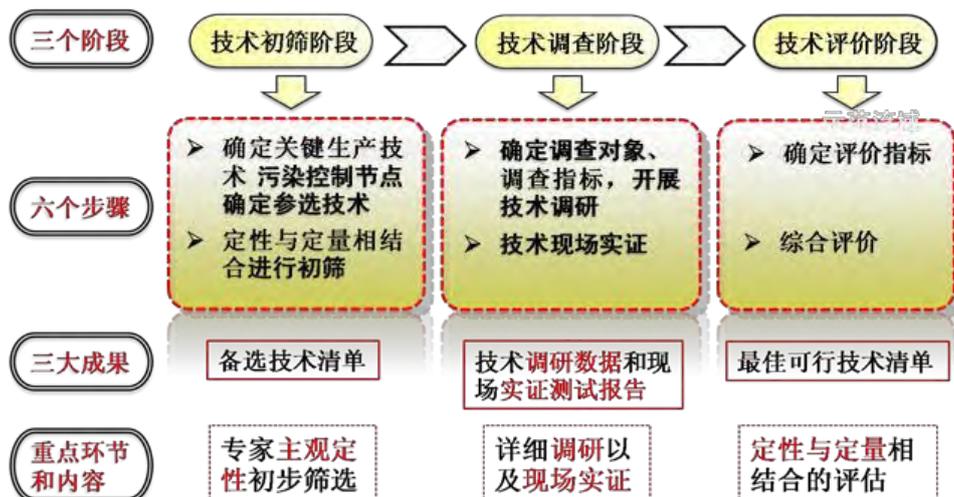


图 4-1 污染防治最佳可行技术指南评价程序

评估过程中，可以根据实际情况和最佳可行技术评估工作进展情况，合理选择评价机构。评价机构是由环境主管部门指定或委托机构选定的第三方有资质的评价单位，现阶段是指各污染防治最佳可行技术指南编制单位。评价机构负责按规定程序组织完成整个评价工作。技术评价人员是指负责某行业或重点污染源污染防治最佳可行技术评价工作开展的技术人员，通常是来自指南编制单位。技术评价人员的能力、经验和专业知识结构应能满足技术评价工作的需要，并遵守回避原则。评价机构和技术评价人员必须符合和遵守《科技评估规范》、《科技评估管理暂行办法》、《国家环境保护技术评价与示范管理办法》中的相关要求。

（3）关键技术

①技术初筛阶段

A. 确定参选技术

评价机构在对被评价技术背景资料全面了解的基础上，列出该行业或重点污染源当前实际应用的所有技术，形成所有技术清单，并按照过程控制技术和污染治理技术进行分类。评价机构对所有技术进行初步筛选，确定参选技术。参选技术应满足以下要求：

- 在国内有实际应用工程实例，且能稳定运行；
- 符合国家相关产业政策；
- 符合行业清洁生产要求或清洁生产标准。

B. 成立评价专家组

根据被评价技术所属类型成立相应的评价专家组，即过程控制技术评价专家组或污染治理技术评价专家组。过程控制技术评价专家组以生产工艺专家和行业管理专家为主；污染治理技术评价专家组以环保技术专家和环境管理专家为主。必要时过程控制技术评价专家组和

污染治理技术评价专家组中的成员可以有交叉。评价专家组专家人数应不少于9人。

C. 确定备选技术

备选技术确定过程是按照规定的工作流程，采用基于专家经验判断的定性评价方法，从参选技术中筛选出备选技术。定性评价方法参照专家咨询法（Delphi法），依据系统的程序，采用匿名发表意见的方式，即专家之间不得互相交流和讨论，只能与调查人员联系，通过多轮次调查专家对问卷所提问题的看法，经过反复征询、归纳、修改，最后汇总成专家基本一致的看法，作为预测的结果。这种方法具有广泛的代表性，较为可靠。备选技术确定的工作流程如下：

（a）根据被评价技术特点，确定定性评价指标。

（b）列出定性评价指标表，征询专家意见，必要时根据专家意见对定性评价指标进行适当调整。

（c）制作定性评价专家评分表，发给评价专家，由各评价专家独立打分。1~5不同的分值分别代表很差、较差、一般、较好、很好。

（d）对专家评分进行统计，如果存在较大歧异，则将统计结果反馈给评价专家，由专家重新打分。必要时重复本步骤。

根据专家打分统计结果，达到一般水平（该技术总得分 $\geq 3 \times$ 专家人数 \times 评价指标个数）的参选技术即定为备选技术，形成备选技术清单。当某行业或重点污染源的备选技术数量低于5（含）种时，则备选技术即定为该行业或重点污染源的最佳可行技术。

②技术调查阶段

A. 调查方式分类

调查方式分为书面调查和现场调查两种。书面调查是以发调查表的形式对技术应用单位进行调查。现场调查是以实地考察的形式对技术应用单位进行调查。

B. 确定调查对象

根据备选技术清单，选择代表不同规模、技术类别、应用时间、区域环境、用户管理水平行业里面有代表性的工程项目，确定被调查单位名单。调查数量应满足以下要求：

（a）书面调查：总数原则上应不少于行业内企业数量的20%；如果行业结构过于分散、中小规模企业数量众多，则调查对象的生产能力合计应不少于行业总产能的50%。

（b）现场调查：每种备选技术，调查单位数量不少于3家。

C. 确定调查指标

（a）根据被评价技术特点，确定技术调查指标。技术调查指标主要包括资源和能源消



耗、污染物排放、经济成本、技术可靠性四类，过程控制技术调查通常涵盖全部指标，污染治理技术调查则通常侧重后三类。不同类型技术在调查指标设计过程中需征求相应评价专家组的意见。

(b) 根据已确定的技术调查指标，制作针对技术应用企业的调查表。因调查方式和内容不同，书面调查表和现场调查表在表格的设计上也有所差别。

D. 开展技术调查

(a) 书面调查：评价人员制作调查表，发往被调查技术应用单位，并责成其填报后返回。被调查单位应如实填写采用此类技术的设备运行情况及相关参数，对不能填写的项目要说明理由；调查表填好后返还给评价机构。

(b) 现场调查：评价人员到被调查技术应用单位，实地考察设备运行情况，收集相关技术资料 and 运行参数；必要时选择有代表性的工程项目进行检测；将收集、记录、实测等方式得到的数据填入调查表中。

(c) 在技术调查过程中应注意问题：确保调查数据的真实、可靠；调查过程中若发现问题应及时调整；现场调查一定要对技术应用企业进行实地考察，收集尽量详细的资料和信息。

E. 数据审核补充

对调查数据进行审核、分析、总结，如果发现某些关键数据信息缺乏、不符合要求或难以确定其置信度，则需要进一步核实或补充调查。

F. 数据整理入库

对调查数据进行整理，录入环境保护行政主管部门指定的技术管理信息库，并与污染防治最佳可行技术指南一起交环境保护行政主管部门留存。

③技术评价阶段

A. 确定评价指标

根据技术调查指标及调查结果，确定技术评价指标。在确定评价指标过程中需征求相应评价专家组的意见。

B. 经济性分析

用经济性评价方法对备选技术进行定量经济性评价，成本效益分析是通过计算技术的年度总成本和年度环境收益，得到该技术的收益率，计算公式如下：

$$\text{收益率} = \text{年度环境收益} / \text{年度总成本}$$

在计算出各备选技术的收益率后，需求得平均值，作为备选技术经济性评价的平均水平。

经济评估的方法会以后面的章节详细介绍。

C. 综合评价

(a) 综合评价过程是根据确定的评价指标，选择适宜的综合评价方法，运用技术调查数据，对被评价技术进行定量综合评价。

(b) 综合评价过程中可采用专家咨询法、层次分析法、主成分分析法、属性层次模型等计算方法确定指标权重，本通则推荐使用属性层次模型。评价方法以后面的章节进行了案例分析。

(c) 确定指标权重应遵循自上而下的原则，即先确定一级评价指标权重，再确定二级评价指标权重，依此类推。

(d) 各一级评价指标权重之和为1；某一级评价指标权重等于其从属的各二级评价指标权重之和；某二级评价指标权重等于其从属的各三级评价指标权重之和；依此类推。

(e) 综合评价过程中可采用层次分析法、模糊综合评判法、主成分分析法、属性综合评价模型等计算方法进行综合评价计算，本通则推荐使用属性综合评价模型。

(f) 综合评价计算应遵循自下而上的原则，即先确定最底层评价指标的评价分值，逐级加和计算，得到上一级评价指标的评价分值，最终得到被评价技术的综合评价分值。

(g) 依计算得到的综合评价分值大小，对备选技术排序。

D. 确定最佳可行技术

(a) 评价人员根据被评价技术的实际情况、经济性分析和综合评价的定量评价结果，制定污染防治最佳可行技术筛选原则，可参考原则：经济性评价达到平均水平以上的技术；综合评价结果排名在前50%（含50%）的技术。

(b) 评估计算所确定的最佳可行技术应再次征求专家意见，形成最终的最佳可行技术清单。

(c) 列出污染防治最佳可行技术清单，并对每项技术的适用条件、环境效果、经济性等进行必要的描述。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

依托课题：

水污染防治技术管理体系框架及评估方法研究（2009ZX07529-001）



4.1.2 水污染防治技术评估指标体系

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：技术评估指标体系构建

主要技术指标和参数：

（1）技术内容

主要分为：环境技术评估指标分类、环境技术评估指标体系、指标体系的构建程序及相关方法、指标体系量化方法、环境技术评估指标示例等五部分。

①环境技术评估指标分类

环境技术评估指标一般可分为定性指标、定量指标两类，按照指标的性质又可分为：实验测试指标、是非判断指标、程度分类指标、问题诊断指标、经济评价指标等，详见表4.1。

表 4.1 环境技术评估指标分类

指标性质	指标类型	含义	示例	适用评价模式
定量指标	实测指标	可通过实测，得到相应的指标值，如污染物排放值、污染物去除率，技术性能和运行参数、效果参数等即为常见的实测指标。或其它可用标准量度计量的指标，如货币成本。	如水处理技术对应的 COD、BOD，DO、充氧效率、pH 值等。	单项技术综合评价、同行筛选评价、多指标综合筛选评价、ETV 等。
	经济指标	经济分析是技术评估的一个重要方面，而经济分析的专业性较强，所用指标种类多类，因此，我们将经济评价指标单独归为一类。这里主要指专业的经济分析指标，不包括专家定性判断指标。	例如：电耗、药剂消耗量、运行费、投资回报率等。另外，如进行建设方案评价时，可以进行建设方案的投资分析、财务分析、经济分析等专业的经济分析。	范围同上，主要用于对技术进行经济分析。
定性指标	是非判断指标	在筛选技术时，可以设定是非判断指标，将不符合要求的技术从评价任务中去除。	如在做技术方案比选时，根据国家相关政策，可以判断出哪些技术符合技术发展方向，哪些是国家规定限制淘汰的技术。	技术资料审核、技术初评、技术定性筛选（如对技术进行初步遴选、淘汰）
	程度分类指标	对程度的判断指标。在技术评估时常用的指标。	如在同行评议时，专家可以根据经验判断出技术的先进性，常见的指标等级为：国际先进、国内先进、较好、一般、较差等。	单项技术综合评价、同行筛选评价、多指标综合筛选评价等。应用范围较广。
	问题诊断指标	事实判断指标、价值评价指标、原因分析指标等。	如：在对技术的推广前景分析时，可以列出技术推广可能遇到的困难，列出可能选项。这些选项即为原因分析指标。	同前。主要作为参考信息指标，帮助评价者分析问题，对评价指标进行分析判断。

②环境技术评估指标体系

项目建立了由技术性能指标、经济指标、环境影响指标、其它影响指标四个一级指标；性能参数指标、技术先进性、技术成熟度等15个二级指标。环境技术评估二级指标体系见图4-2。

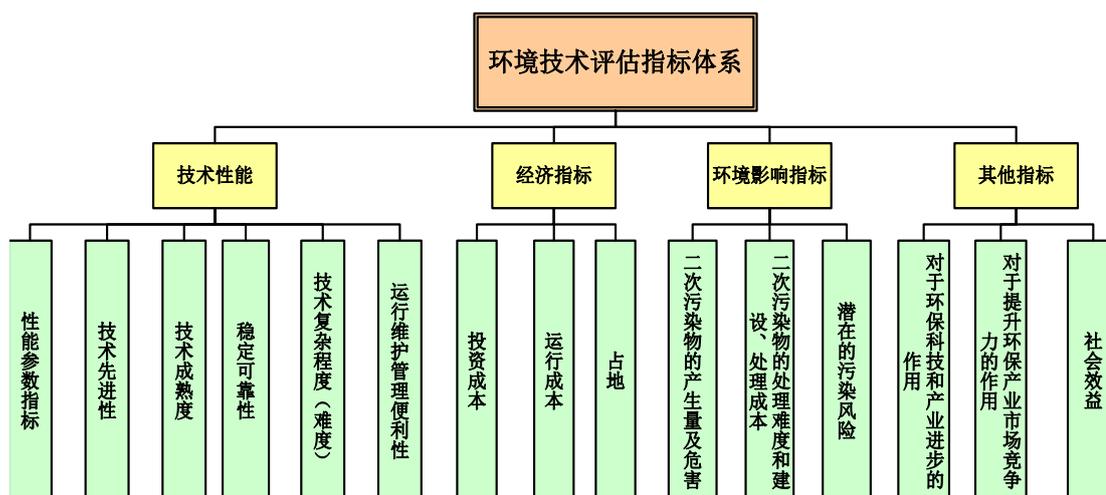


图 4-2 环境技术评估二级指标体系

环境技术评估的目的、对象和评估模式有较大差异，需要根据不同的评估要求建立不同的指标体系。指标体系的构成和层次等需要针对不同的评估目的进行设计，并且应通过一定的方法审核指标体系的可行性、适应性。项目未将指标的形式和层次固定，而是以指标示例的形式给出了常用评估指标，编制成手册，指导环境技术评估工作。

③ 指标体系的构建程序及相关方法

环境技术评估一般都需要构建指标体系，以明确评价内容，制定评价标准，而评价指标相关程序一般为：指标体系的构建、复权、综合值合成（计算）等。下面对各步骤的方法进行简介。

指标体系的构建：

一般来说，指标体系构建过程可大致分为以下四个环节：理论准备、指标体系初选、指标体系测验和优化、指标体系应用。首先，应对被评价技术的相关理论、技术发展、技术性能等进行系统的了解，在此基础上，通过分析，提出评价要点和指标体系框架；之后，通过调整，使得初选指标更加科学、合理；必要时通过实例验证，对指标体系进行优化。

A. 指标体系初选方法

指标体系初选方法可以归纳总结为五种，见表4.2。

表 4.2 技术评估指标体系构建方法

方法名称	主要特点	典型模式
综合法	对已经存在的指标群按照一定的标准进行聚类，使之体系化，构成指标体系。	将文献资料中的多种指标体系进行总结分析，通过优化，提出新的指标体系。
分析法	将指标体系的度量对象和度量目标划分成若干子系统，并逐步细分，直到每一个部分和侧面都可以用具体的评价指标来描述、实现。	如层次分析法：将评价目标分解成不同的子目标或侧面，然后对子目标或侧面再进行分解指标化，得出有层次的指标体系。
交叉法	通过二维或三维甚至更多维的交叉，派	例如：在评价环境技术经济性时，常用“投入”与“效

	生出一系列的指标参数。	果”的比值作为经济分析指标，如费用效益分析法。
指标属性分组法	由于指标本身具有许多不同属性，有不同的表现形式，因此，初选评价指标体系时，也可以从指标属性角度构思体系中指标元素的组成。	例如：在一个初步的指标体系建成后，可以分别加入动态、静态指标；绝对数值、相对数值指标等不同属性的指标，以进一步完善指标体系，丰富指标的构成。
指标体系结构化方法	对指标进行归类，合并。归类的方法一般采用定性判断法。	例如：通过咨询专家，按照类别对指标进行整理，使其层次清晰，构成合理。

上述五种指标体系构建方法往往需要结合起来使用。最常用的方法是综合法和分析法。通常，应参考现有资料中的指标体系，通过分析法对评价目标进行分解，得到基础的指标体系及指标，再用交叉法、指标属性分组法等辅助方法进行补充。指标过于繁杂时，可用指标体系结构化方法对指标进行结构化整理。指标体系初选方法之间的关系见图4-3。

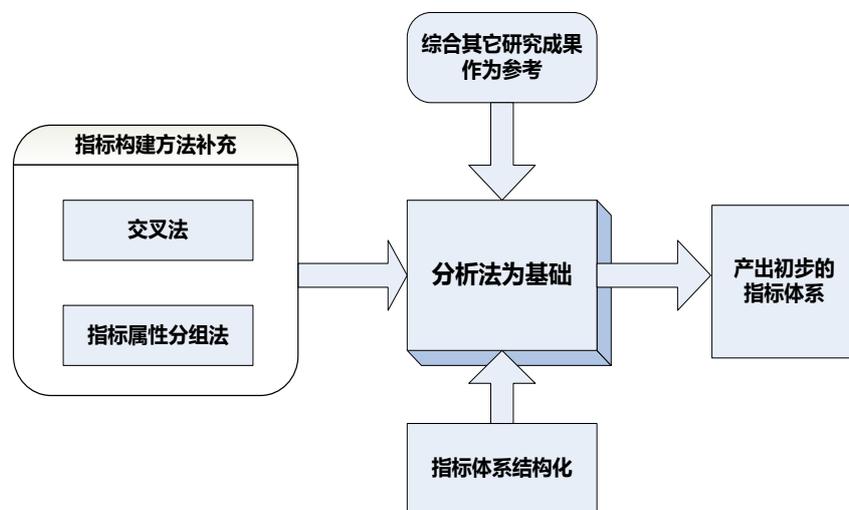


图 4-3 指标体系初选方法之间的关系图

A. 指标体系检验和优化方法

初步构建起指标体系后，可以从以下几个方面对指标体系进行检验和优化：

(a) 指标体系的测验要从完整性、正确性、可行性入手，注重检验指标体系中元素的必要性。在不失全面性的情况之下，尽量减少体系中指标个数，注重指标体系的评价、预测及决策功能的发挥，保证每一评价指标和指标体系在整体上的科学性。

(b) 采用定性或定量的检验方法对指标体系进行检验。定性检验要准确把握评价的本质，对评价对象的技术、质量、价值水平及综合绩效等进行分析与比较。其缺点是“客观性”差一些。定量检验的优点在其“客观性”，通过对指标定量检验，如正负值测试、灵敏度测试等，可以发现定性检验无法察觉的一些问题，如指标之间的重叠度太高或区分度太低等。

在检验时，应以定性测验为基础，以定量检验为补充。这是因为，无论用什么数学方法进行指标筛选，都不能代替主观分析判断，否则很可能会使指标的“全面性”受损或者出现严重的偏差。

(c) 具体的指标体系结构优化方法主要有：结构完备性分析、“深度”与“出度”分析、聚合情况分析、体系网关结构分解等。

(d) 在实际操作中，主要采用层次分析原理，来保证结构完备性，使评价指标体系呈树状结构。在构建指标体系过程中，考虑评价的合理性、科学性宜将某指标的下一层对应指标的数量控制在4~6个（如某二级指标对应的三级指标数量宜控制在4~6个）。

赋权：

指标权重是多指标综合评价中影响评价结果的重要因素，是对评价目标和评价内容的量化表达。为了保证评价结果的科学性，可采用各种方法进行计算，为指标准确赋权。

确定指标权重的方法分为主观赋权法和客观赋权法两类。主观赋权法是指通过主观判断（专家判断），获得指标之间的轻重关系，通过一定的数学方法计算或直接由主观给出指标权重的赋权方法。客观赋权法是指以数据样本为基础，通过数理统计分析的方法，对数据指标的信息量、敏感性、独立性等方面进行计算得到的计算权重。一般情况下信息量大、敏感性高的指标，所占权重较大，反之则权重较小。

主观赋权法以其简便、灵活、准确性高的特点，广泛应用于技术评估中。常用的赋权方法有：层次分析法、专家直接赋权法（包括德尔菲法）、模糊赋权法、多属性层次模型等，其中层次分析法、专家直接赋权法是较为常用的两类方法。客观赋权法中常见的有：主成分分析法、方差（离散）信息构权法、熵权法等。

判断一组权重的合理与否，需要看其是否反映了指标的真实重要性。技术评估的目的和侧重点千差万别，技术资料水平参差不齐，因此，由数理统计分析决定的计算权重，受样本大小、样本结构的影响很大，往往反映不出真实的评价目标，不能说清指标含义，限制了其在技术评估中的使用。

主观赋权法，根据评价目的和对象的特点，由专家根据经验比较得出，较适合于技术评估。根据方法的应用推广程度及其科学性推荐采用层次分析法、专家直接赋权法、模糊综合评价法、属性层次模型进行赋权。

综合值合成（计算）：

在构建完成指标后，按照相应的标准和方法，可以得到单个指标值，此时，我们通过指标合成公式（如线性加权法）计算出综合值（或称为“总分”），这一计算过程，称为综合分值合成。

最常见的指标合成方法是线性加权法（也称为算术加权平均法），即各指标值乘以权重，然后简单求和。通常情况下，采用这种方法即可以满足综合评价的要求。



模糊综合评价法、属性综合评价法可运用各自的计算方法得到评价综合值，在使用这两种方法时，参见《水污染防治技术评估筛选指南》（建议稿）。

④指标体系量化方法

指标体系的量化方法包括两类：评价指标消除量纲方法和定性指标定量化方法。

消除量纲方法：

消除量纲的方法可分为两类：线性功效系数法、非线性系统法。最常用的消除量纲方法是线性功效系数法。

线性功效系数法计算方法示例如下：

A. 对于极大型指标 x ，令

$$x^* = \frac{x - m}{M - m}$$

式中： m 为指标 x 的一个允许下界， M 为指标 x 的一个允许上界。

B. 对于极小型指标 x ，令

$$x^* = \frac{M - x}{M - m}$$

式中： m 为指标 x 的一个允许下界， M 为指标 x 的一个允许上界。

C. 对于居中型指标 x ，令

$$x^* = \begin{cases} 2(x - M), & \text{若 } m \leq x \leq \frac{M + m}{2} \\ 2(M - x), & \text{若 } \frac{m + M}{2} \leq x \leq M \end{cases}$$

式中： m 为指标 x 的一个允许下界， M 为指标 x 的一个允许上界。

D. 对于区间型指标 x ，令

$$x^* = \begin{cases} 1.0 - \frac{q_1 - x}{\max\{q_1 - m, M - q_2\}}, & \text{若 } x < q_1 \\ 1.0, & \text{若 } x \in [q_1, q_2] \\ 1.0 - \frac{x - q_2}{\max\{q_1 - m, M - q_2\}}, & \text{若 } x > q_2 \end{cases}$$

式中： $[q_1, q_2]$ 为指标 x 的最佳稳定区间， M 、 m 分别为 x 的允许上、下界。

定性指标定量化方法：

定性指标定量化方法有：直接评价法、分解合并法、模糊评价法、两两比较评分法、分类统计法、专家评分法、定性排序量化法、尺度评分法等。详见表4.3。

表 4.3 定性指标量化方法

方法	主要特征
直接法	直接对评价对象打分或者对于评价等级直接给出分值。
分解合并法	将定性变量分解为一系列可操作的概念，然后逐一量化，合并成一个“综合指标”，类似于层次分析法。
模糊评价法	将定性变量划分成若干等级，然后通过足够数量专家评价结果进行模糊分析，求出隶属度值。用最大隶属度原则确定该指标所处的等级。类似于模糊综合评价法。
两两比较评分法	通过两两比较的方式确定各个被评价对象某一定性变量的“程度值”或不同定性等级的量化值。如：层次分析法。
分类统计法	当被评价对象个数较多时，将定性指标分成若干等级进行评价。假设评价等级对应的被评价对象的数量符合正态分布（中等多，高等和低等少），则可按照频次比例（代表面积）查正态分布表，找到对应的 x 值的中值，作为定性指标的量化值中值。将量化值线性化处理，可以得到每个等级的量化值。
专家评分法	由专家小组成员独立或者讨论给出每一个定性变量不同取值类别的量化值。若是独立给出，则最后还需要将专家所给分值进行统计平均。当然，也可以通过多轮反馈以确定最终评分值，即德尔菲法。
定性排序量化法	为了弥补直接评分法的不足，我们可以用“定性排序”方法作辅助手段。方法一是：将全部个体按得出的次序排列，确定相临两个个体之间大致比值及归一化权值。然后如同“两两比较评分法”进行变换。 方法二是：将定性排序结果进行评秩（排名次，不考虑重要性程度变化），然后将名次转化为“名次百分”值，不同排名结果之间是等差数列。
尺度评分法	由于每一个定性变量都有其“程度”上的变化，因此可以将定性变量的取值（评语）按方向（两极）和深度（强弱）进行细化，形成一个分级标尺。每个被评价对象可以按照标尺进行评分。

以上各种“定性指标的定量化方法”可以组合应用，例如：可以在分解合并法时引入专家评审，确保定性指标量化的科学性；也可以先用定性排序，然后再两两较法将定性指标量化；在参与评价的专家较多时，则可以适当采用模糊评价和分类统计等数理方法将定性指标量化过程标准化，便于提高工作效率。

⑤环境技术评估指标示例

适用指标类型：

每类技术评估指标，可根据不同的评价模式选用不同的定性和定量指标。

定性指标使用时，要注意制定统一细致的评分标准，统一专家的判断准则，减少专家之间由于标准不统一而产生的人为偏差；定量指标使用时，要注意数据获得条件的一致性和代表性，一般认为在不同应用现场、不同应用条件下取得的相同指标数值，不具备可比性，需要引入专家咨询，对数据代表的技术水平进行判断。环境技术评估指标适用的指标类型及示例见表4.4。



表 4.4 环境技术评估指标适用指标类型

指标内含	主要适用指标类型	示例	
技术性能	实测指标	COD、BOD、SS	COD=60mg/L、BOD=120mg/L、SS=30mg/L
	实测指标	COD 去除率、SS 去除率	COD 去除率大于 85%，SS 去除率大于 90%
	实测指标	DO, pH, 污泥脱水率	DO=6mg/L, pH=7.0, 污泥脱水率大于 80%
	程度分类指标	污染物去除效果:	很好、较好、一般、较差、差
	是非判断指标	该技术是否可以稳定达标	是、否
经济性	经济指标	污水处理成本	0.65 元/t
	经济指标	电耗	单位处理能力的电耗, 如: kw/t (水)
	程度分类指标	处理成本	很高、较高、高、一般、较低、低
污染物排放	实测指标	污泥产量	200kg/万吨(水)
	程度分类指标	二次污染程度	很重、重、一般
	是非判断指标	是否存在环境风险	是、否
其它	程度分类指标	对环保产业竞争力的提升程度	很大、大、一般
	经济指标	直接经济效益	1000 万元/年

环境技术评价指标示例:

项目研究给出了常见的污染物排放指标、技术性指标、经济指标、环境影响指标、其它影响指标示例;给出评估材料审核指标、参考信息指标的示例;同时,根据科研项目成果管理的需要,给出了科研项目技术成果评估指标示例。指标示例详见《水污染防治技术评估指标及其量化技术规范》(建议稿)。

4.1.3 化学纤维工业末端治理与达标排放技术评估体系

技术发展阶段: 示范类技术

适用范围: 化学纤维工业末端治理与达标排放技术评估

主要技术指标和参数:

(1) 技术背景

2007年,国家环境保护部下达了《关于印发<国家环境技术管理体系建设规划>的通知》(环办[2007]150号),提出制订《化学纤维工业污染防治最佳可行技术指南》技术指导文件的工作任务。同期,国家水体污染控制与治理科技重大专项将化纤行业污染防治技术评估与示范列入其流域水污染防治监控预警技术与综合示范主题(课题号2008ZX07529-004-002),

由中国科学院生态环境研究中心负责进行化纤行业污染防治技术评估与示范的研究,并在此基础上制订《化学纤维工业污染防治最佳可行技术指南(BAT)》,为化学纤维行业提供导向性技术支撑,以促进化学纤维工业与环境保护的和谐发展。

(2) 技术内容

对化学纤维工业污染防治技术的评估以末端治理与达标排放为目标,采用经验与理论相结合的方法,包括:确定化学纤维工业污染防治技术评估指标,采用层次分析法计算化学纤维工业污染防治技术评估指标权重,和采用模糊综合评估模型从备选技术中筛选最佳可行技术共三个步骤。其中,评估指标权重的计算依据专家对评估指标重要性的排序,备选技术的模糊评估依据专家对技术的分指标评估。

以下以精对苯二甲酸(PTA)生产废水的末端治理为例,描述其最佳可行技术的筛选过程。

① 评估指标

化纤工业水污染防治技术评估指标是在国家环境保护部科技标准司提供的基本评估指标的基础上,根据化纤工业水污染防治技术的自身特点进行增删后形成的,并通过专家进行了审核。化纤工业水污染防治技术评估指标见表4.5。

表 4.5 化学纤维工业水污染防治技术评估指标

一级指标	二级指标	三级指标	单位
污染物消减和排放指标	污染物消减指标	废水总量	t/h; t/a
		COD	kg/t 废水; mg/L
		氨氮	kg/t 废水; mg/L
	污染物排放指标	废水总量	t/h; t/a
		COD	kg/t 废水; mg/L
		氨氮	kg/t 废水; mg/L
资源和能源消耗指标	资源消耗指标	药剂消耗量	t/t 废水
		占地面积	m ²
	能源消耗指标	综合能耗	t 标准煤/t 废水 t 标准煤/tCOD
		电耗	kWh/t 废水 kWh/tCOD
经济成本指标	投资成本	建设总投资	万元
	运行成本	运行总成本	万元/年



②指标权重

化学纤维工业水污染防治技术评估指标权重的计算采用层次分析法。请20名专家对已确定评估指标按照重要性进行排序，排序指标以二级指标和三级指标为主。鉴于国内环保要求的不断升级和化纤行业本身对节能减排、提升竞争力的需要，专家对评估指标排序一致度很高。根据表分析计算结果，对专家排序结果重新认定后列于表4.6。

表 4.6 化学纤维工业水污染防治技术评估指标专家排序

二级指标	专家排序	三级指标	专家排序
污染物消减指标	(2)	废水总量	(2)
		COD	(1)
		氨氮	(3)
污染物排放指标	(1)	废水总量	(2)
		COD	(1)
		氨氮	(3)
资源消耗指标	(3)	药剂消耗量	(2)
		占地面积	(1)
能源消耗指标	(2)	综合能耗	(1)
		电耗	(1)
投资成本	(4)	建设总投资	(1)
运行成本	(3)	运行总成本	(1)

化学纤维生产废水、废气和固体废物处理技术评估指标及其权重见表4.7和表4.8。

表 4.7 化学纤维生产废水污染防治技术评估指标及其权重

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标权重	
污染物消减和排放指标	污染物消减指标	废水总量	t/h; t/a	0.050	
		COD	kg/t 废水; mg/L	0.123	
		氨氮	kg/t 废水; mg/L	0.020	
	污染物排放指标	污染物排放指标	废水总量	t/h; t/a	0.108
			COD	kg/t 废水; mg/L	0.268
			氨氮	kg/t 废水; mg/L	0.044
资源和能源消耗指标	资源消耗指标	药剂消耗量	t/t 废水	0.020	
		占地面积	m ²	0.059	
	能源消耗指标	综合能耗	t 标准煤/t 废水 t 标准煤/tCOD	0.097	
		电耗	kWh/t 废水 kWh/tCOD	0.097	

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标权重
经济成本指标	投资成本	建设总投资	万元	0.036
	运行成本	运行总成本	万元/年	0.078

表 4.8 化学纤维生产废气污染防治技术评估指标及其权重

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标权重
污染物消减和排放指标	污染物消减指标	废气总量	Nm ³ /h; Nm ³ /a	0.050
		SO ₂	mg/Nm ³	0.123
		粉尘	mg/Nm ³	0.020
	污染物排放指标	废气总量	Nm ³ /h; Nm ³ /a	0.108
		SO ₂	mg/Nm ³	0.268
		粉尘	mg/Nm ³	0.044
资源和能源消耗指标	资源消耗指标	药剂消耗量	t/Nm ³ 废气	0.020
		占地面积	m ²	0.059
	能源消耗指标	综合能耗	t 标准煤/Nm ³ 废气	0.097
		电耗	kWh/Nm ³ 废气	0.097
经济成本指标	投资成本	建设总投资	万元	0.036
	运行成本	运行总成本	万元/年	0.078

表 4.9 化学纤维生产固体废物污染防治技术评估指标及其权重

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标权重
污染物消减和排放指标	污染物消减指标	固体废物总量	t/a	0.193
	污染物排放指标	固体废物总量	t/a	0.420
资源和能源消耗指标	资源消耗指标	药剂消耗量	t/t 固体废物	0.020
		占地面积	m ²	0.059
	能源消耗指标	综合能耗	t 标准煤/t 固体废物	0.097
		电耗	kWh/t 固体废物	0.097
经济成本指标	投资成本	建设总投资	万元	0.036
	运行成本	运行总成本	万元/年	0.078

③技术评估

化学纤维工业水污染防治技术评估与筛选采用模糊综合评估法。请专家对备选技术进行评估,按照“很好”、“好”、“一般”和“不好”4个级别对备选技术的各项评估指标分别给予评估。



若对各评估级别分别赋值，即：“很好”级别为90分，“好”级别为80分，“一般”级别为60分，“不好”级别为40分，可将综合评估结果通过加权评价进一步量化为分值形式。

实际应用案例：

化学纤维工业水污染防治技术的评估与筛选采用模糊综合评估法。请专家对备选技术进行评估，按照“很好”、“好”、“一般”和“不好”4个级别对备选技术的各项评估指标分别给予评估。根据专家对3项备选技术的模糊评估结果，构造评估矩阵，最终评估出最佳可行技术。

依托课题：

炼化、化纤、氮肥等重污染化工行业水污染防治技术评估研究与示范（2008ZX07529-004）

4.2 环境技术验证与评估系统

4.2.1 基于技术性能客观评价的验证评价方法优化技术

技术就绪度评价等级：8级

适用范围：水污染防治技术验证评价

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

在验证评价指标体系框架、传统数理统计方法、常规验证测试手段基础上，结合不同类型技术验证评价需求和现代化测试手段发展现状，优化验证评价方法，提高验证评价结果的科学性。基于技术性能客观评价的验证评价方法优化技术包括以下三部分：

①验证评价指标优化技术：在对技术类型进行细分的基础上，设计分层次分领域的环境技术验证评价指标清单，在此基础上结合技术创新点和技术自我声明、环境保护需求、知识产权保护要求等，建立了常规指标、特征指标、参考指标、综合评价指标的遴选原则和优化方法。

②数据评价方法优化技术：在验证数据大量正态样本群数据中，离群值在未断定为有效值之前，既不能用于平均值计算，也不能任意舍去。构建了以负荷波动影响分析、工艺运行条件影响分析、相关因子一致性分析、污染物总量复核等方法为基础的验证测试数据离群值与技术性能相关性分析及处理方法。

③关键运行参数采集匹配技术：建立电波流速仪法、非接触式超声波计流量计法等先进测试手段与算法相结合的复杂工况、复杂现场条件关键技术参数采集匹配方法。

(2) 工艺流程

①验证指标优化技术

A. 技术自我声明审查：对拟验证技术的技术原理科学性、技术自我声明合理性、测试可操作性等进行审查。

B. 特征指标遴选：根据技术自我声明、技术创新点、特异性目标污染物的去除能力等确定特征指标。

C. 通用指标遴选：参考技术适用的污染物排放标准选取能够表征该类技术共性的环境效果指标作为通用指标。

D. 参考指标遴选：优先选择影响验证技术稳定运行效果、运行成本的关键工艺运行指标作为参考指标进行测试。原则上不得选取涉及技术机密的工艺运行指标。

E. 综合评价指标遴选

根据验证目标及污染治理技术需求、市场需求确定综合评价指标。

②数据评价方法优化技术

A. 采样及分析过程质量审核：按照GB/T 4883标准判断测试数据是否为离群值。

B. 负荷波动影响分析：分析离群值产生前后的污染负荷变化，负荷超出设定范围时离群数据可不作为平均值的计算，可为抗冲击负荷能力分析的依据。

C. 相关因子一致性分析：分析与其他相关因子波动趋势是否一致，趋势一致时，离群值与技术运行效果有一定相关性。

D. 工艺运行条件影响分析：分析离群值产生前后的工艺运行参数变化，分析离群值产生的原因。

E. 污染物总量复核：根据污染物去除机理，计算污染物去除合理范围，违背客观规律的数据应剔除。

F. 离群值处理方法：辅助专家判断，确认离群值与技术运行效果相关性较大时，不能舍去，应作为有效数据应用于数理统计分析。

③关键运行参数采集匹配技术

A. 现场条件及工况确认：确认现场是否有单独计量设备，确认现场工艺运行条件。

B. 数据采集条件确认：确认是否存在管道无开口、无法直接靠近等导致的测试难题。

C. 先进测试手段匹配：匹配电波流速仪法、非接触式超声波流量计法、激光测距法等先进测试手段，并与算法相结合获取流量、流速等关键运行参数。

D. 辅助计算：无法直接测试情况下，根据现场情况，电量、水量等关键参数可采用负



荷法、功率因数法、功率流量转换法等算法获得。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

在验证评价指标体系框架基础上，基于创新技术验证评价需求和验证成本控制、知识产权保护等因素，设计了验证评价指标清单，构建了以定量指标为主的验证评价特征指标、通用指标、参考指标、综合评价指标的指标遴选原则与优化方法，提高了验证评价结果的代表性和完整性；在常规数理统计方法基础上，基于验证数据客观评价的需要，构建了验证数据离群值与技术运行效果相关性的有效性判断方法及处理方法，提高了验证评价数据的真实性和可靠性；在传统工艺运行指标测试手段基础上，结合现代化测试手段发展水平，构建了复杂工况、复杂现场条件关键技术参数采集匹配方法，提高了验证测试效率，降低了验证测试成本。基于技术性能客观评价的验证评价方法优化技术，为验证评价结果科学性提供了支持。

主要技术经济指标：

①支持水污染防治技术多指标、全过程的验证评价：在水污染防治技术类型细分基础上设计了污水生物处理技术、污水物化处理技术、分散型污水处理技术验证评价指标清单，指标清单包括环境效果指标、工艺运行指标、维护管理指标及评价指标4部分，污水生物处理技术指标清单共包括125个指标，分散型污水处理技术共包括102个指标。在指标清单基础上提出验证评价特征指标、通用指标、参考指标、综合评价指标的指标遴选原则与优化方法，兼顾创新技术知识产权的保护及验证成本控制、可操作性等因素。

②实现离群值与技术运行效果的相关性判断和处理：提出了6个步骤的离群值与验证技术运行效果相关性判断方法和数据处理方法，避免了离群数据不合理取舍造成的评价信息不完整问题，评价结果不科学的问题。

③实现了复杂工况、复杂现场条件下的运行数据高效采集：将先进的超声波流量计、电波流速仪等先进测试手段与算法相结合，设计了6种现场情况下的流量、耗电量指标测试方法的先进测试手段与计算方法匹配模式，以适应各种复杂的现场情况和工艺运行情况，提高了数据获取的范围，保证了数据的精确性和准确性，降低了验证测试成本，提高了验证测试效率。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：苏州嘉净环境保护有限公司等

开发的关键技术为《环境保护技术验证评价规范》、《环境保护技术验证评价通用规范》、《污水生物处理技术验证评价规范》等规范的发布及《分散型污水处理技术验证评价规程》（审议稿）、《污水物化处理技术验证评价规程》（审议稿）的编制提供了技术支持，实现了关键技术应用的标准化、规范化，并在“DSP一体化污水处理技术验证”“高效厌氧处理技术及成套设备”“化学制浆造纸黑液提取率提升技术”等分散型污水处理、化工废水处理、造纸废水处理、水体修复等技术领域的验证评价中得到应用，验证评价结果为技术的优化、新技术的推广应用提供了支持。在当前流域污染治理迫切需要可靠使用的创新技术支持的形式下，所开发的关键技术具有良好的应用前景。

依托课题：

辽河等流域水污染减排技术验证评估（ETV）与应用示范（2014ZX07504-003）

4.2.2 虚拟生态绿色工厂评估系统

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：企业/咨询公司和研究机构两大类用户

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

遵循自底向上的技术系统模拟思路，基于“原料-工艺-技术-产品”的匹配关系和污染物产生、排放的路径特征，完整模拟行业技术系统，并建设行业技术数据库，据此核算企业现有技术体系下的基础能耗和污染物排放水平。构建三重标杆数据库进行对标管理，包括①国际-国内最佳可得技术标杆；②各流程能耗、污染物排放的强度和浓度标杆；③各规模案例企业的标杆技术组合。在将企业的技术、能耗和污染物排放水平与标杆数据库对标核算的基础上，定量评估企业的节能减排改进空间和潜力。内置优化目标和国家标准规定的基线约束，企业亦可自主设定能耗、污染物排放、成本等自定义目标和约束，设定完成后，系统将输出满足要求的最优节能减排技术组合，为企业提供成本有效性最优的技术改造方案。构建了包括能源与资源投入、环境排放、资源综合利用、装备和设施、成本效益五类指标在内的综合评价指标体系，通过定量化评分进行绿色工厂评价，清晰定位企业自身的绿色化水平及在行业中所处位置，促进企业绿色化改造。内置重点行业水污染物减排潜力分析模型，基于虚拟生态工厂系统技术参数和区域用户输入的宏观参数，为区域用户提供该区域行业层面的节能减排潜力核算工具。



（2）工艺流程

①新建虚拟生态绿色工厂：基于行业技术系统模拟，引导企业用户根据实际需求，实现标准化生态虚拟建厂；

②生态工厂模板库：储存了标杆企业信息，并保存用户建厂的数据信息，构建生态工厂模板库，成为企业的对标管理平台；

③工厂评估与优化：通过信息化技术，将技术系统与多目标优化算法模型和对标系统耦合嵌套在一起，实现企业层面技术系统模拟及动态优化调整，为企业新建项目技术路径规划和现有项目技术改造提供组合方案；

④绿色工厂评价：智能化直接调用原有自主构建的生态虚拟工厂数据，自动比对绿色工厂指标，不足部分自动生成由用户补充输入少量基础数据，系统核算企业定量化评分及在模板库所有企业中的排名位次，并针对薄弱环节提出改进的绿色化技术改造建议方案；

⑤区域节能减排潜力评估：研究机构可直接应用此功能，自主选择行业/区域和关注目标，录入或导入宏观参数开展综合性评估，系统将输出基准年与目标年区域/行业能耗（排放量）预测，以及目标年结构、技术变动情景相对于基准情景的节能（减排）潜力。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

首次提出了虚拟生态工厂概念，突破行业全流程工艺技术数据智能匹配关联，实现了企业技术系统标准化自主创建，集成行业BAT技术、多维数据底层封装和优化算法等，通过千万量级匹配模糊快速检索，构建了高效、动态、灵活的环境技术优化和绿色评估系统平台，突破了传统系统底层数据库和分析算法的捆绑，大幅降低使用成本。

主要技术经济指标：

①基于数据智能归集及匹配建模技术，构建了多行业大数据体系：克服传统各工业行业内部工艺、技术、各类标杆数据离散分立，无法统一调配应用的困难，在智能化匹配算法下实现了数据源自动创建标准化模版，搭建多行业完整技术类别的数据架构自动化体系，该体系支持数据模板的实时更新，可以高效复制和拓展。

②实现了多行业标准化虚拟建厂及多目标优化系统：将专项行业软件的开发周期由数月降至2—4周水平；优化比对程序算法，借助千万量级匹配进行模糊化快速检索，克服传统方法单一速度劣势问题，高效筛选多目标协同最优的技术组合；同时提供方便灵活的行业引入机制，大幅度降低开发成本，更利于系统广泛推广。

③基于多维数据底层封装、算法云模块服务技术，构建绿色工厂评价及节能减排潜力评

估服务架构：克服传统系统功能单一和技术数据库的底层捆绑问题，该架构可根据用户需求自行定义组合区域、行业关注指标，架构将快速匹配底层算法和用户参数，灵活集成，大幅度降低学习使用成本，方便相关评价体系快速推广应用。

该系统已经支持开放注册，可以接受企业、政府和专业科研机构用户使用，综合系统自身的高扩展性、灵活性和易用性，已经具备快速推广的条件。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

获得计算机软件著作权2项。

登记号2016SR082744（证书号软著登字第1261361号）；

登记号2016SR087632（证书号软著登字第1266249号）。

依托课题：

国家环境技术评估（BAT）及推广体系研究与流域示范（2013ZX07504-004）



5 流域水环境监测技术

5.1 水环境质量监测

5.1.1 流域水质评价技术方法

技术发展阶段：推广类技术

适用范围：地表水河流、流域、水系、湖库

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

通过监测断面（点位）的指标筛选，评价频次、断面设置、水质评价等优化方法，合理有效的对河流水质监测断面进行管理，在充分反映水质状况的同时，提高水质监测的效率。针对整条河流（湖库），运用河长（面积）评价法全面的、有代表性的反映河流（湖库）的整体水质情况。

（2）工艺流程

①河流监测断面（点位）优化方法包括指标筛选、评价频次优化、断面设置优化、水质评价等，具体如下：

指标筛选：根据污染分担率来确定监测指标；

评价频次：依据实际断面监测数据，运用不同间隔水污染指数法（WPI）之间的偏差率确定断面的最佳评价频次；

断面设置：采用一维水质模型与聚类分析法相结合的方式对河流监测断面进行优化；

水质评价：计算某一断面每个参加水质评价项目的WPI值，取WPI最大值为断面WPI值，对断面进行定性评价。

②整条河流或者水库的水质评价方法包括河流的河长评价法、湖库的面积评价法等，具体如下：

河长评价法：采用一维水质模型及聚类分析方法确定河流中各个代表点位所代表的河流长度，结合代表点位水质等级，最终确定河流整体水质情况。

面积评价法：采用克里金插值及聚类分析方法确定湖库中各个代表点位所代表的湖库面积，结合代表点位水质等级，最终确定湖库整体水质情况。

(3) 关键技术

①水污染指数(WPI)计算方法;②偏差率的计算方法及确定;③一维水质模型;④聚类分析法;⑤克里金插值法。

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例:

应用单位:沈阳环境监测站、重庆市环保局

沈阳环境监测站运用流域水质评价技术对浑河流域干流及支流24个监测断面进行应用,取得了良好的成效;重庆市环保局运用流域水质评价技术对三峡库区流域干流及支流82个监测断面进行应用,同样取得了良好的成效。

依托课题:

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广(2012ZX07506008)

5.1.2 水体中氮来源比例的同位素甄别技术

技术发展阶段: 示范类技术

适用范围: 适用于定量区分湖泊流域化肥、生活污水、大气降雨等2-4种主要氮污染源之间比例关系确定

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

自然界中存在的氮,除了基本核素 ^{14}N 外,稳定同位素 ^{15}N 也占有相当大的比例;而对水体中的氧,除基本核素 ^{16}O 外, ^{18}O 是最主要的稳定同位素。在自然界生物利用过程中,由于利用途径不同,化合物中 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 、 $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ 比值在不同自然单元中不同。不同来源氮污染源中,如化肥(直接利用大气氮合成)、生活污水、植物残体、大气降雨中, $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 比值关系不同,不同比例混合结果,可以反推各单元来源量及其比值。

(2) 工艺流程:

对于两来源A、B的情况:

根据同位素质量守恒关系有

$$\begin{cases} m_0 = m_A + m_B \\ m_0 \delta_0 = m_A \delta_A + m_B \delta_B \end{cases}$$

式中: δ_0 、 δ_A 、 δ_B 为混合水样、源A、源B的同位素 δ 值, m_0 、 m_A 、 m_B 分别为对应的质量。



整理该式可得：

$$\begin{cases} 1 = \frac{m_A}{m_0} + \frac{m_B}{m_0} \\ \delta_0 = \frac{m_A}{m_0} \delta_A + \frac{m_B}{m_0} \delta_B \end{cases}$$

当混合水样、源A、源B相应的同位素浓度不同时：

$$\begin{cases} 1 = \frac{c_A V_A}{c_0 V_0} + \frac{c_B V_B}{c_0 V_0} \\ \delta_0 = \frac{c_A V_A}{c_0 V_0} \delta_A + \frac{c_B V_B}{c_0 V_0} \delta_B \end{cases} \quad \text{即} \quad \begin{cases} c_0 = \frac{c_A V_A}{V_0} + \frac{c_B V_B}{V_0} \\ c_0 \delta_0 = \frac{c_A V_A}{V_0} \delta_A + \frac{c_B V_B}{V_0} \delta_B \end{cases}$$

其中 c_0 、 c_A 、 c_B 和 V_0 、 V_A 、 V_B 分别为相应的浓度和体积。令 $f_A = \frac{V_A}{V_0}$ 、 $f_B = \frac{V_B}{V_0}$ 并视其

为来源的贡献份额。则：

$$\begin{cases} c_0 = \frac{c_A V_A}{V_0} + \frac{c_B V_B}{V_0} \\ c_0 \delta_0 = \frac{c_A V_A}{V_0} \delta_A + \frac{c_B V_B}{V_0} \delta_B \end{cases}, \text{可表示为} \begin{cases} c_0 = f_A c_A + f_B c_B \\ c_0 \delta_0 = f_A c_A \delta_A + f_B c_B \delta_B \end{cases}$$

根据上式可计算出唯一的 f_A 和 f_B 。

对于三来源A、B、C的情况：

根据同位素质量守恒关系有

$$\begin{cases} c_0 = f_A c_A + f_B c_B + f_C c_C \\ c'_0 = f_A c'_A + f_B c'_B + f_C c'_C \\ c_0 \delta_0 = f_A c_A \delta_A + f_B c_B \delta_B + f_C c_C \delta_C \\ c'_0 \delta'_0 = f_A c'_A \delta'_A + f_B c'_B \delta'_B + f_C c'_C \delta'_C \end{cases}$$

式中： δ 、 δ' 分别为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的N同位素 δ 值， c 、 c' 分别为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的N同位素浓度。解得来源A、B、C的贡献份额 f_A 、 f_B 、 f_C 。

由以上分析可见测定k个同位素值可以解得k+1个来源的贡献份额。如果条件所限不能测得足够的同位素值时可以考虑采用统计学方法求解。

$$\begin{cases} c_{ji} = \sum_{k=1}^K c_{jk} \delta_{jk} \\ c_{ji} = \sum_{k=1}^K f_k c_{jk} \delta_{jk} \end{cases}$$

其中 c_{ji} 是水样i的j同位素浓度； δ_{jk} 为来源k的j同位素值， δ_{jk} 约等于 $N(\mu_{jk}, \sigma_{jk}^2)$ ； c_{jk}

是来源 k 的 j 同位素浓度； f_k 是来源 k 的贡献份额。由于有 $0 \leq f_k \leq 1$ 的约束条件且所有 f_k 之和为1，当 $k > j+1$ 时可以对其离散化求解。解出 f_k 介于0至1（100%）之间的分布情况进行来源分析。

另外，对于存在同位素分馏和硝化反硝化作用的情况可以考虑按下式进行：

$$c_{ji} = \sum_{k=1}^K f_k c_{jk} (\delta_{jk} + \varepsilon_{jk})$$

其中 ε_{jk} 为分馏和硝化作用影响参数。

如果条件所限不能测得足够的同位素值时可以考虑采用欧几里得距离模型和统计学方法求解。欧几里得距离模型的三种计算方法：

$$\% X = \left(\frac{DX}{DA + DB + DC + \dots} \right) \times 100\%$$

$$\% X = \left(1 - \frac{1/DX}{1/DA + 1/DB + 1/DC + \dots} \right) \times 100\%$$

$$\% X = \left(\frac{1/DX}{1/DA + 1/DB + 1/DC + \dots} \right) \times 100\%$$

X代表样品A、B、C...；DX代表相应的线距，DA、DB、DC...即相应值在坐标上的直线距离，即欧几里得距离。

该技术尚未进入工艺阶段。

（2）关键技术

- ①同位素质量守恒关系；
- ②欧几里得距离模型。

（3）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：中科环境科学研究院

本技术主要用于太湖氮的来源，从应用的情况看，能够较好地反映太湖的情况，可对类似湖泊的污染源分析提供服务。

依托课题：

太湖流域（江苏）主要水污染物总量监控与风险预警平台构建及示范（2012ZX07506-004）



5.1.3 水质综合毒性分析技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：可在三峡库区水体水质综合毒性现场检测

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

对水体综合毒性研究，从菌种冻干粉保存和发光度在线检测等方面，研制微型化连续分析综合毒性的在线仪器。利用自动化水质综合毒性分析仪，进行现场的自动化分析，并将分析结果同步传输至分析总站，进而获得监测区域水质综合毒性的全面实时的数据信息。

微型化装置包括如下部分：发光细菌保存单元、温控系统、发光检测单元和数据在线分析软件。在发光细菌保存单元，重点开发自动低能耗控温装置；在检测单元，开发自动荧光检测器与数据自动分析软件。

（2）工艺流程

微型化装置包括如下部分：发光细菌保存单元、温控系统、发光检测单元和数据在线分析软件。具体如下：

发光杆菌与水样结合；

记录发光杆菌发光强度并进行光电转换；

放大电信号，对电信号进行采集、分析与处理；

根据发光强度的变化，评估水体毒性。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

为提高发光菌法在水质急性毒性连续、在线监测上的应用范围，结合课题需要，本研究分别使用细菌连续培养、冻干粉、固定化三种方法开展研究，以探索发光菌法水质生物毒性原位、在线、连续检测的技术方案。

目前在使用发光菌法进行毒性评估时，一般实验室只具备普通的发光菌光子检测仪器，样品与发光菌的混合由实验人员手动完成，计时也由实验人员完成。由于发光细菌的发光强度在自然条件下就有缓慢的衰减，在较长时间的实验过程中，会带来一定的系统误差，同时人工操作也会带来一定的系统误差。此外、不同批次的发光菌发光强度有明显差异，人工修正过程复杂，难以快速获得准确的结果，并且在处理较高毒性样品时，不易准确获取反应初始阶段的详细数据。

因此，开发自动化操作的水质综合毒性检测仪器，可以延长菌剂的维护周期、减少人工

干预、支持系统集成并扩大仪器的应用范围，满足水质综合毒性现场检测的需求。

在发光菌保存方面，通过优化冻存试剂的成分配比，提高了冻干发光细菌复苏的效率，同时也保证了复苏后发光细菌发光强度的稳定性。在仪器中设置了低温模块区域，保证发光细菌冻干粉通过稳定保存，7天内的复苏效率稳定，数据准确可靠。

在光子检测方面，利用了光电倍增管对发光信号进行实时检测，并绘制发光强度衰减曲线，并通过软件自动计算相对发光强度及抑制率。提高了检测的灵敏性，并可以实时获取发光细菌发光强度的信息。

通过自动化控制，仪器可远程自动运行并输出数据，可实现原位水质综合毒性在线检测。

根据发光菌相对发光度表征水体综合生物毒性，相对发光度>70%：低，相对发光度50%-70%：中，相对发光度0%-30%：高；检测范围：光强100-120,000,000光子；检测时间：30分钟；仪器重复性精度：小于等于15%；适用pH范围：5-9；其它：菌体更换周期：大于等于7天；仪器稳定运行周期大于一个月。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

申请发明专利2项。

①明亮发光杆菌冻干粉及其制备方法，已授权：CN104762209A

②利用发光菌连续培养进行水质监测的方法及装置，已公开：CN104792770A

实际应用案例：

案例1：

应用单位：长江万州航道处

与长江万州航道处建立合作关系，将水质综合毒性检测仪投放到草堂河现场的航标船平台内进行运作。

案例2：

应用单位：中国科学院重庆绿色智能技术研究院

该技术已经在重庆市云阳县，湖北省宜昌市兴山县，重庆市巫山县和重庆市奉节县内长江支流进行了应用示范。通过在以上四个地点完成浮标原位观察系统的安装，形成可实时监测水质毒性的能力。

依托课题：

三峡库区水生态环境感知系统及平台业务化运行（2014ZX07104-006）



5.2 水环境应急监测

5.2.1 流域风险污染物快速测定技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：污染物快速测定

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

根据目标物的性质开发集成水体等环境样品的快速前处理技术以及分析检测技术，建立目标污染物简便快速的分析测定方法。依据地方的检测技术水平方法选择合适的方法，尽量使用了简便可靠的采样、制样和测定方法，确保分析方法的准确性和实用性。同时建立严格的质量保证/质量控制（QA/QC）体系和详细的标准操作规程（SOP）。

（2）关键技术

- ①顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用
- ②中空纤维支载液膜静态萃取
- ③选择性萃取阿特拉津的分子印迹固相萃取吸附剂

（3）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

发展了基于固相微萃取、液相微萃取和分子印迹固相萃取等技术高效样品前处理方法，并与可视化检测、气相色谱-质谱、液相色谱-质谱等联用，建立了松花江优先风险污染物清单中前20种污染物的简便快速的分析测定方法，并编写了详细的分析测定操作指南。

依托课题：

水环境监测的新技术、新方法研发与应用示范（2009ZX07527-005）

5.3 水生生物监测

5.3.1 藻毒素原位监测技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：针对三峡库区水体藻毒素现场检测

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

基于液相色谱原理设计一款在线微囊藻毒素检测仪,实现水中微囊藻毒素在线监测,实时上报检测结果,系统包括在线样品过滤装置,自唤醒高压输液泵,在线自动进样装置,微囊藻毒素专用色谱柱、紫外检测器、仪器控制平台及在线微囊藻毒素专用分析软件等几部分组成。

系统通过样品选择阀选择标准样品或实际样品,通过进样泵输送到自动进样阀定量环中,切换阀状态到进样状态,流动相携带标样或样品进入色谱柱中,将藻毒素与其它杂质分离开,按着设定好的色谱条件,检测微囊藻毒素含量。

(2) 工艺流程

基于液相色谱原理设计一款在线微囊藻毒素检测仪,实现水中微囊藻毒素在线监测,实时上报检测结果,系统包括在线样品过滤装置,自唤醒高压输液泵,在线自动进样装置,微囊藻毒素专用色谱柱、紫外检测器、仪器控制平台及在线微囊藻毒素专用分析软件等几部分组成。

系统通过样品选择阀,选择标准样品或实际样品;通过进样泵输送到自动进样阀定量环中,切换阀状态到进样状态,流动相携带标样或样品进入色谱柱中;将藻毒素与其它杂质分离开,按着设定好的色谱条件,检测微囊藻毒素含量。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

通过采用微型化液相色谱技术,实现对水样富集、分离与检测一体化。系统包括在线样品过滤装置,自唤醒高压输液泵,在线自动进样装置,微囊藻毒素专用色谱柱、紫外检测器、仪器控制平台及在线微囊藻毒素专用分析软件等几部分组成。通过分别测得标准样品和水样的色谱图进行对比,完成对水样中微囊藻毒素浓度的测定。

在60分钟内完成检测,可实现0~0.01mg/L范围的微囊藻毒素测量,最低可检出1 μg/L的微囊藻毒素。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例:

案例1:

应用单位:长江万州航道处

与长江万州航道处建立合作关系,将微囊藻毒素检测仪投放到草堂河现场的航标船平台



内进行运作。

案例2:

应用单位：中国科学院重庆绿色智能技术研究院

该技术已经在重庆市云阳县，湖北省宜昌市兴山县，重庆市巫山县和重庆市奉节县内长江支流进行了应用示范。通过在以上四个地点完成浮标原位观察系统的安装，形成可实时监测藻毒素的能力。

依托课题:

三峡库区水生态环境感知系统及平台业务化运行（2014ZX07104-006）

5.3.2 水生态健康监测与评估业务化技术

技术就绪度评价等级: 8级

适用范围: 水生态系统综合监测与评估

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

基于流域生态基本调查数据，以生态完整性为理论支撑，建立了包含水质、底栖动物和浮游植物在内的流域水生态健康评估技术体系及分级标准，最终实现湖泊流域水生态系统综合监测与评估。

(2) 技术流程

- ①湖泊流域水质和底栖动物、浮游植物基础调查数据；
- ②基础调查数据处理；
- ③湖泊流域水生态健康指数计算；
- ④湖泊流域水生态健康状况评估和判断。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

针对河流、湖库两大类型水体特点，以生态完整性为理论支撑，选择“最少干扰状态”为参照，通过流域120个点位物理生境、水化学和水生生物调查，筛选了要素层和指标层的敏感性指标，构建了以底栖动物和浮游藻类完整性为导向的水生态监测指标和评估方法。结合太湖流域水生态功能分区，在底栖动物和浮游藻类完整性为导向的水生态监测评估基础上，立足水生态监测能力现状，提出了以水生态健康指数为核心的水生态监测与评估技术体系，建立了适应水生态功能分区需求的水生态监测点位布设原则。选择综合污染指数和底栖动物完整性指数组成河流水生态健康指数，综合营养状态指数、大型底栖动物完整性指数和浮游

藻类完整性指数组成湖库水生态健康指数，并提出了分级评价标准。该技术以生物完整性理论为基础，保证了水生态健康评价结果的科学性；兼顾监测能力现状，保证实际监测工作开展可操作性。根据规程对太湖流域水生态环境功能分区中水生态健康状况进行评估，结果显示49个分区“优”、“良”、“中”、“一般”、“差”的数量分别为0、6、21、17、5，较好地呈现了区域水生态质量状况。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：江苏省环境保护厅

2016年4月17日，《江苏省太湖流域水生态环境功能区划（试行）》得到江苏省人民政府批复。课题编制的《太湖流域（江苏）水生态健康评估技术规程（试行）》、《水生态健康监测技术规程淡水大型底栖无脊椎动物（试行）》和《水生态健康监测技术规程淡水浮游藻类（试行）》等3个技术规程被批复采纳，作为江苏省太湖流域水生态环境功能区划（试行）年度目标考核结果的计算依据，并对各水生态环境功能分区现状进行了计算。

依托课题：

太湖流域（江苏）水生态监控系统建设与业务化运行示范（2012ZX07506003）

5.3.3 湖泊蓝藻水华遥感监测技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：流域内大型水体水华暴发监测

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

采用卫星遥感数据监测蓝藻水华的主要原理是基于正常水体光谱与发生水华水体光谱的差异。由于蓝藻体内含有大量的叶绿素，在红波段存在吸收峰，使得水体反射光谱在红波段存在较为明显的反射谷，在近红外波段具有类似于植被光谱曲线特征的“反射峰平台效应”，而正常水体在近红外有强烈的吸收，导致近红外波段反射率一般低于红波段反射率。因此，通过计算植被指数可以区分水华和正常水体。

（2）技术流程

- ①遥感图像辐射校正，几何校正；
- ②遥感图像裁切；



- ③遥感图像大气校正；
- ④水陆分离、云识别和水草识别；
- ⑤植被指数计算；
- ⑥阈值分割和水华二值图；
- ⑦水华面积和水华面积比例计算。

（3）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：江苏省环境监测中心

在江苏省环境监测中心已进行了多年示范和业务化应用，形成蓝藻水华监测报送流程、数据处理、信息发布和统计归档等多个工作制度，建立了蓝藻水华遥感监测综合会商机制。

每年解译各类遥感影像近500景，与2300余次的地面车、船巡测相互呼应，编制各类监测日报、月报、年报和专报450余份，发送预警信息1500余条，数据量达到了1.8TB。

蓝藻水华遥感监测业务由省级层面逐步向无锡、苏州、常州、宜兴等地市级层面延伸，目前无锡、常州均具备了独立开展遥感卫星数据接收和蓝藻水华监测预警的业务化能力。

依托课题：

国家水环境遥感技术体系研究与示范（2009ZX07527006）

6 流域水环境风险评估与预警

6.1 突发性水环境风险评估预测与应急处置

6.1.1 水污染事故应急处置关键技术

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：水环境污染事故应急处置

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

基于综合集成方法体系，技术集成流域环境污染事故与应急案例，综合集成高环境风险河流管理技术、有毒有害污染物控制技术、冰封期水质保障技术、出境河流水环境管理技术四大技术体系，依托决策支持平台形成技术集成模块，构建基于高环境风险的流域水环境风险管理技术及风险控制与污染物控制技术体系，为流域污染事故提供应急预案和决策支持。

(2) 关键技术

- ①高风险河流水环境管理技术体系；
- ②有毒有机物减排技术体系；
- ③冰封期水环境管理技术体系。

(3) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

松花江污染事故应急处置关键技术，在黑龙江省环境保护厅、吉林省环境保护厅和环保部东北督查中心，随松花江水环境质量管理决策支持系统，作为子模块安装部署，应用效果通过了第三方评估，评估结果该技术提高了相关部门对松花江流域水污染应急处置能力。

依托课题：

松花江水环境质量管理决策支持技术平台（2017ZX07207-011）



6.1.2 三峡库区及上游“空-地-水”一体化的水环境风险评估、预警与应急处置技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：流域水环境模拟、水质预测、水文预测、非点源预测评估、气象预测、突发事故预测评估、水华预测、河长制、水环境精细化管理

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

研究了流域大气、陆地、水体的物质、水的物理循环和能量流动机理，通过完善和改进气象数值模型、陆地模型和水动力-水质-水生态模型，研究各模型之间的耦合机制与界面物质能量交换机理，形成空-地-水一体化的全流域的环境模型体系。为保障模型的高效、高精度模拟计算，基于流域内具有动力学机理的、引入高效能计算技术，通过流域水环境模型的模型间-模型内部和模型分块间的三级并行计算技术，实现模型的高效能计算。

（2）技术流程

模型构建→业务需求分析→条件准备和参数率定验证→业务执行

①模型构建

构建气象数值模型、分布式水文陆地模型和三维水动力-水质-水生态模型，确定模型之间的耦合接口，形成空-地-水一体化模型体系。

②业务需求分析

根据要开展的业务，选择需要的模型。如进行突发事故模拟预测，则选择突发事故模型；进行水华模拟预测，则选择水华模型，确认所要开展的任务，以任务选择需要的模型。

③条件准备和参数率定验证

准备需要的条件，包括气象要素、水文要素、DEM图、土地利用类型、河网划分空间数据，土壤类型、水质要素、点源污防资料、市州统计年鉴、水质监测数据等；在条件准备完成后，进行参数的验证率定。

④业务执行

确定模拟时间，进行模拟计算，将模拟结果用于业务的评估和分析。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

该体系在技术上的创新点表现在：

①构建了能按业务化需求进行动态耦合的“空-地-水”一体化模型体系。研究了流域大气、

陆地、水体的物质、水的物理循环和能量流动机理，通过完善和改进气象数值模型、陆地模型和水动力-水质-水生态模型，研究各模型之间的耦合机制与界面物质能量交换机理，形成空-地-水一体化的全流域的环境模型体系。将模型体系中的模型按照彼此关系分为条件模型和应用模型，条件模型一方面针对水环境管理业务化的需求，实现对整个流域全局范围在线实时的水环境模拟预测；另一方面为局部精细模拟，即为应用模型的模拟提供边界条件。应用模型针对流域水环境管理中具体区域内的实际应用而设定，能用于评价分析流域内局部区域气象水文水质状况、开展突发事件应急决策。空-地-水模型体系，既可无缝耦合又能独立模拟，具有强大的扩展性和可伸缩性，适应于不同流域。无论是突发事件模拟预测、水华预测预报还是漂浮物风险评估或情景模拟，通过改变模型间的耦合方式，以一套模型体系实现模拟预测需求。

②提出了“空-地-水”一体化模型的三级并行耦合计算技术，实现了流域水环境模型的高效能计算。构建了流域水环境模型的模型间-模型内部和模型分块间的三级并行计算技术。在现有小尺度单一环境模型集群计算的基础上，以流域环境大数据为分析对象、以流域大尺度高精度计算为目标，基于流域陆地模型、水动力模型和水质水生态模型的边界关系，研究各模型的耦合集成接口，构建流域水环境模型的并行耦合集群计算体系；通过设置模型应用节点和模型条件节点，基于空间分块技术和并行技术，提出了耦合模型的递进并行启动模式和分段控制运行方法，开展集群模型的同步运算，实现模型内部-分块-模型之间的三级动态耦合，同步提升单个模型和整体模型的运算效率，以满足大尺度高效率流域环境模拟的需要。

该套模型体系的构建，能有效的解决水环境风险局限在小尺度和较粗网格的问题，极大的提高了水环境模拟的自动化和智能化水平，以及模型计算的效率和精度。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

授权发明专利12项，软件著作权3项。

①专利：

水体水华风险快速预警方法，属于自主研发，发明专利，已授权；

水体表面漂浮物迁移、堆积和清漂过程的数值模拟方法，属于自主研发，发明专利，已公开；

流域大尺度复杂河网海量精细规划网格的绘编方法，属于自主研发，发明专利，已公开；

一种基于源-质响应情景数据库的突发事件污染源追踪溯源工程化应用技术，属于自主研发，发明专利，已公开；



流域复杂地形的网格处理方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

流域大尺度复杂河网的网格拼接方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

一种面向服务的空地水一体化环境耦合系统，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

复杂河道地形快速精细生成方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

一种河流二维水质数值模拟模型计算网格优化绘制方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

一种基于遥感影像和水生态模型的叶绿素计算方法，属于自主研发，发明专利，已受理；

一种基于水动力水质模型的污染源普查结果达标评估方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

复杂河网干支流交汇口网格绘制及江心洲网格处理方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权。

②软件著作权：

流域大尺度水系分布式水动力模型的并行计算软件（PDBH）V1.0；

多中心流域水环境分布式集群管理系统（BMEDS）V1.0；

三峡库区湖北辖区水环境监测预警信息平台V1.0。

实际应用案例：

应用单位：四川省环境监测总站、重庆环境监测站

空地水一体化模型集成与业务化平台，对业务部门环境风险业务的开展起到了极大地辅助作用。

①四川示范区平台通过集成空地水一体化模型体系，业务化运行以来，一共向业务管理人员推送了14850多条水质信息，监测了120多万条数据，主动识别发现了釜溪河上游企业2起偷排事件，并自动发出预警，在环保部门的及时处置下，避免了更大的损失；重庆示范区平台自2015年运行以来，已预知预告了3起水华事件，云阳、万州和重庆环境监测站等业务部门通过使用本平台发出的警报，准确预知了可能发生水华的位置、时间、程度和范围，进而提前向相关部门提出了预报和处置建议，将被动发现水华暴发事件，转变成了主动预测发现，在时效上得到巨大提高；

②平台快速预测预报突发污染事故的发生时间、影响范围和程度，指导应急监测，节省了时间、人力、物力，极大地支撑了应急决策：平台成功应用于2014年4月30日晚重庆江津区3吨邻二甲苯泄漏事件和2015年11月24日锦尾矿库发生尾砂泄漏事件的应急处置。通过应用平台，应急部门准确快速地模拟预测了河流水体中污染物的浓度变化过程，确定了其污染

范围、污染发展趋势，决策者根据模拟的结果，进行应急监测，避免了盲目监测；同时根据影响的程度安排应急人员和物资，既节省了人力物力，又有效地处置了突发事件带来的风险。

依托课题：

三峡库区及上游流域水环境风险评估与预警技术与示范（2013ZX07503001）

6.1.3 跨界区多元风险识别、事故预警预报与应急响应为一体的水环境风险防控技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：太湖流域跨界区域

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

通过跨界区风险识别与评估、风险预警、水资源优化配置、事故应急响应的技术研发，构建系统的流域跨界区域水环境风险防控技术体系，以提升和加强太湖流域跨界水环境风险防控能力。基于模糊积分法，构建跨界区域水环境风险评估指标体系、评估方法及等级划分方法，建立跨界区域风险等级、类型和危害评估方法和运算程序，形成较为完善的跨界区域突发污染事故风险定量评估技术；针对太湖流域枯水年或枯水季节等水资源量大幅减少时期跨界断面水质达标率下降的特征，从区域防控的角度提出保障跨界断面水环境质量的水质水量联合调控技术方案，为跨界区域突发污染事故应急处置提供保障，基于DHI的MIKE模型平台，构建了太湖流域跨界区典型敏感河流的水量水质模型，提出多种水资源优化配置方案；根据水质模型的计算，定量评估跨界区突发污染事件的风险场，根据环境污染事件的类型和相关监控、监测数据，综合判别警情，发布预警信息；针对太湖流域跨界区风险源特点和潜在事故类型，通过风险场的评估，结合专家应急系统，集成污染快速拦截、转移以及就地快速处置等应急技术，完成构建跨界区水环境风险减免技术体系。

（2）工艺流程

①跨界区水环境风险源基础信息数据库构建

收集整理了近5年太湖流域跨界区风险源数据，主要包括：2203家工业点源数据，其中包括327家三大高风险行业（化工、制药、炼焦）企业的化学品存储信息；73家污水处理厂数据；129个以乡镇、街道为风险评估单元的面源数据；12条高等级航道（五级以



上航道）数据，以及31条主要跨界河流近十年的水文水质数据，661个水污染事故的案例信息、200余处应急资源库信息及130个专家信息。构建完成跨界区水环境风险源基础信息数据库。

②跨界区多元风险源识别与评估

在风险源的危险性、环境介质的自净性和风险受体的易损性等3个一级指标框架下，在对跨界区社会经济风险源分布充分调研的基础上，考虑指标的代表性、数据可获得性和跨界区的特征等因素，优化筛选建立了52个二级指标，形成污染事故风险源评估指标体系。完成了跨界区包括工业点源、面源、移动源、化学品仓库、废弃物集中处理处置场所等5大类共计2713个风险源的风险等级评估，共筛选出320个高风险污染源，占评估风险源总数的12%，次高风险源517家，占风险源总数的19%；中风险污染源649家，占风险源总数的24%；低风险污染源1258家，占风险源总数的45%，完成了跨界区5大类2713个风险源的风险等级评估。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①针对太湖流域跨界区风险源类型多样、区域敏感性强、风险高等特点，建立了涵盖风险源、环境介质和风险受体三个方面的52项指标，完成了跨界区生产企业、废弃物集中处理处置场、面源风险、化学品仓库、运输源等5大类2713个风险源的风险等级评估。针对风险跨流域行政区界的特点，在风险受体的易损性表征中，设定“风险源与跨界断面的距离”、“风险源与下游饮用水源地保护区距离”等体现风险跨界特点的表征指标，采用模糊积分等方法，建立了风险评估模型及风险等级划分方法，确定跨界区域风险源风险综合评估指数，进行跨界区风险源分级，最终筛选出320个高风险污染源，实现了跨界区两省一市风险源等基础信息的共享。

②基于地理信息的高精度支持和风险源位置高速传递、加密监测的参数优化，建立了综合考虑污染物输移、稀释、混合、降解过程的高精度预警模型。集成、优化风险减免防控技术，集成多源数据信息，根据环境污染事件的类型和相关现场监控、监测数据，综合判别警情，发布预警信息，构建了集信息化、智能化、动态化为一体的跨界区水环境风险评估与预警系统。

③基于MIKE11进行二次开发，构建了跨界区敏感水域水量水质优化联合调控技术，针对跨界区河网风险事故类型和风险源分布特点，构建了跨界区敏感水域水质水量调控的块化方案。完成构建了集监控、风险评估、预测预警、风险管理为一体的太湖流域跨界区水环境风险减免与应急响应系统，该系统适用于跨界区蓄积污染风险和突发事件风

险的预警以及跨界区河网风险减免方案的选择和效果评估。自2015年8月以来已经在华东督查中心及上海青浦区环境监测站完成调试安装、运行。投入运行以来，系统基本稳定，运行数据表明，预测精度可达80%以上。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

授权发明专利3项，登记软件著作权1项。

①一种流域跨界风险源风险表征方法,钱新;姚红;夏必胜;朱文婷;张瑞斌,专利号: ZL201410048204.2,公告号: CN103942406B,授权公告日: 2017年3月15日;

②一种基于水质模型的区域环境风险评估方法,钱新,姚红,朱文婷,夏必胜,高海龙,专利号: ZL201410048205.7,授权公告号: CN103810537B,授权公告日: 2016年9月28日;

③一种环境管理数据传输、预警和存储查询的系统及其方法,钱新,夏必胜,王玉磊,高海龙,殷洪,专利号: ZL201310175477.9,授权公告号: CN103235099B,授权公告日: 2015年8月26日;

水污染数据采集传输与预警系统软件,南京大学,登记号2012SR111846,软著登字第0479882号,2012年7月28日。

实际应用案例:

应用单位: 上海市青浦区环境监测站

太湖流域跨界水环境综合管理平台子系统2——太湖流域跨界区域水环境风险减免与应急响应系统于2015年8月已经在上海青浦区环境监测站完成调试安装,试运行以来,系统基本稳定。连续试运行11个月以来,系统中太浦河高锰酸盐指数、氨氮和总磷的预测值与实测值的比较,系统预测的趋势与实测值的月际变化趋势基本吻合。误差分析结果表明,太浦河高锰酸盐指数浓度预测相对误差为3.48%;太浦河氨氮浓度预测相对误差为14.51%;太浦河总磷浓度预测相对误差为7.62%。参照GB/T22482-2008《水文情报预报规范》,预报项目的精度评定规定:一次预报的误差小于许可误差时,为合格预报。合格预报次数与预报总次数之比的百分数为合格率,表示多次预报总体的精度水平。对11个月运行结果进行统计分析,系统预测主要水质指标(高锰酸盐指数、氨氮和总磷)在许可误差20%的情况下,预测精度可达81.8%。

依托课题:

太湖流域跨界水环境综合管理平台建设与业务化运行(2012ZX07506007)

6.1.4 调水工程内突发水污染事件应急处置技术及设施

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：适用于明渠和湖泊中不同类型污染的应急处置，部分成果已成功应用于南水北调中线工程京石段示范工程

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

从环境风险管理的角度出发，面向各利益相关者，建立了基于“四步三模型”的面向风险交流的动态预警技术（图6-1）。考虑了污染物自身属性和污染物的发生季节、发生位置和迁移特征等外在属性及预警时空尺度，建立基于威胁度评估的动态预警技术，开发工程化应用组件。

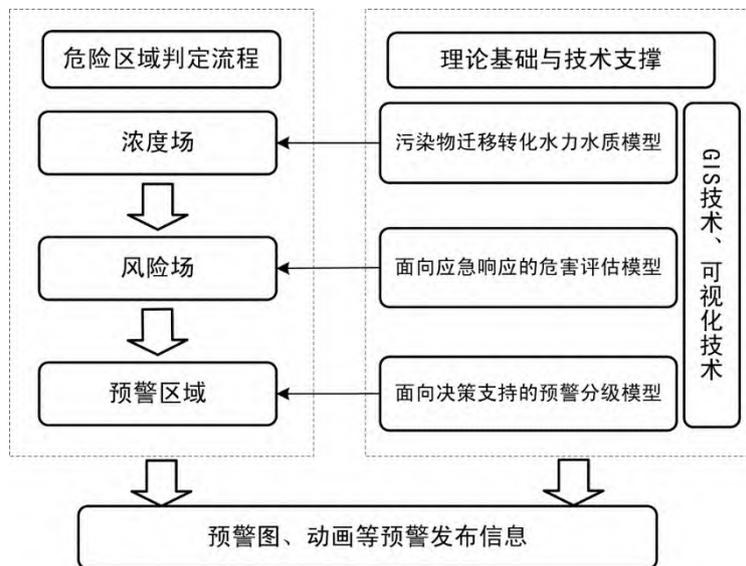


图 6-1 突发污染水质预警流程图

基于事故威胁度，建立处置工程启动判别模型。组合突发水污染应急处置案例库、技术库和物资库，采用CBR方法、熵权G1法和区间三角模糊多属性群决策模型，建立了应急处置预案智能生成的“三步筛选法”。基于CBR方法检索相似案例，形成最佳处置方案。采用多属性群决策（VIKOR）方法，对应急物资筛选和评估。

基于污染物在水中的扩散规律与吸附传质机理等理论，构建了以污染物源头控制技术、污染物防扩散技术、污染物消除技术和应急废物处置技术为主的应急技术体系，围绕该技术体系研发应急处置技术。

（2）工艺流程

突发水污染危害评估与预警分级的“四步三模型”模式，其技术流程为：首先，利用污

染物传输模型预测污染物在水体中的迁移转化和时空分布；其次，构建用于突发水污染应急预案的基于阈值法的评价体系；再次，采用线性分段预警分级模型，将污染事件的实时风险进行分级；最后，将前三步的计算结果转化成感官效果强的预警信息。

应急处置预案智能生成技术流程为：首先，汇总污染物信息；其次，将目标案例与案例库中案例进行比对筛选出相似案例的应急处置技术，进一步分析应急处置技术的适用性、经济性、可行性；最后，对筛选后的应急方案进行评估，生成应急技术预案。

在污染团完成横向混合前，及时采取扩散限制技术防止污染范围进一步扩大，并通过调节污染发生地附近的泵站降低输水流量，将污染团导流退水至附近的河道来处置，在处置过程中可采取跟踪移动处置技术和固定处置技术削减污染团浓度；退出总干渠的水在进入退水区之前和之后都要进行退水修复处理。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

从环境风险管理角度出发，面向各利益相关者的风险交流，建立了基于“四步三模型”的面向风险交流的动态预警技术；针对水污染灾害的特点把应急处置工程决策纳入水污染预警的范畴，综合考虑污染物自身属性和污染物的发生季节、发生位置和迁移特征等外在属性及预警时空尺度，建立基于威胁度评估的面向应急调控处置的动态预警技术；开发了工程化应用组件，为突发事故应急处置决策提供较为完整的风险信息支持和调控处置工程的启动提供预判。

把应急处置工程决策纳入水污染预警范畴，构建了“风险预警-应急处置启动-处置技术筛选-工程参数确定”应急预案处置新框架。输入监测数据、污染源信息和应急处置预案等信息，通过风险交流污染预警模块评估事故期的环境风险；结合现场条件确定应急处置工程是否实施；一旦处置工程启动，通过应急处置技术筛选模型和工程参数优化模型确定处置技术、材料及其他工程参数。拓展后的新框架为应急处置小组等利益相关者提供系统化信息支持。

对南水北调典型工况，提出的“污染源控制-污染物防扩散-污染物消除-应急废物处置”四位一体的应急处置方略对整个应急处置过程的实施有很好的指导意义；研发的应急处置装备具有大流量、低流阻可快装投放的优点，现场适用性更强，能更好地应对突发污染。

主要技术经济指标：

动态预警模型包括浓度场追踪（预测）、危险场评估、预警分级和预警信息可视化四步，前三步通过污染物传输模型，事故期危害评价模型和预警分级模型实现。针对不同风险受体，构建了四级预警模型，生成风险图谱，用于信息发布和风险交流。



南水北调工程突发水污染应急处置预案库采用了“案例-技术-物资”三段筛选智能预案生成技术,依据污染情景动态生成应急处置预案,推荐应急处置采用的技术、材料和装备等。涵盖应急处置技术35种、核心装置22种、材料150种。

研发了10种现场适用性强和污染物去除效率高新材料主要包括以生物质材料(如木屑和黄麻)和商用纤维(如聚丙烯腈纤维)为基体的高效吸附材料。针对南水北调典型工况,在现有装备的基础上,研发了5项应急处置实验装备:1)用于扩散限制和固定处置的“悬挂式纤维吸附帘”;2)用于移动处置的“悬挂振荡吸附装置实验室模型”;3)用于移动处置的“高效吸附流化床”;4)用于移动处置的“折流式吸附固定床”;5)用于应急物资再生的“活性炭快速无害化再生装置实验室模型”。借助数值模拟优化设计了导流退水技术和围油栏-收油机联合处置技术。

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

授权发明专利2项。

实际应用案例:

应用单位:南水北调中线工程建设管理局

技术应用现状:动态风险预警与应急处置技术智能生成已经集成至南水北调中线工程和东线工程的相关应急决策支持系统中,在中线调度大厅和东线水源公司应急大厅进行了试运行。研发水流通量大、处理效率高、能适应不同应急现场条件的系统化处置技术尤为重要,所研发的悬挂式纤维吸附帘已成功应用于南水北调中线京石段示范工程。

技术应用范围:水环境保护,突发水污染事件应急,适用于明渠和湖泊中不同类型污染的应急处置。

技术应用效果:该技术研究的动态风险预警与应急处置技术智能生成已经应用于南水北调工程相关示范工程中,为南水北调突发事故应急处置提供技术预案,指导实际处置。所研发的悬挂式纤维吸附帘已成功应用于南水北调中线京石段示范工程。经过布设的悬挂式纤维吸附帘后,污染物总量有明显的削减。渠道左侧污染物经过两排吸附坝后依次削减了26.2%和40.3%,整体削减66.5%;河道中间污染物经过两排吸附坝后依次削减了21.2%和17.8%,整体削减39.0%;河道右侧污染物经过两排吸附坝后依次削减了41.8%和17.5%,整体削减了59.3%。

技术应用前景分析:在我国突发水污染的应急处置、流域污染防范等方面具有重要的应用前景。

依托课题：

水质水量联合调控与应急处置关键技术研究及运行示范（2012ZX07205005）

6.1.5 应对突发水污染事件的多等级应急响应调度技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：水源地突发水污染事件的应急处理

主要技术指标和参数：**（1）基本原理**

通过三峡水库及上游水库群的联合调度，并采取物理、化学和生物等辅助措施，确保发生突发污染事件后，饮用水源地的水质在1-5天内满足水源地取水要求（水质要求标准依据GB3838-2002《地表水环境质量标准》），以保障饮用水源地水质安全。整个突发水污染事件的应急响应处理工艺流程，均在常规条件下进行。

（2）工艺流程

工艺流程为“三峡库区饮用水源地水质安全预警预报模拟-单库（三峡）调度/水库群（溪洛渡-向家坝-三峡）联合调度-水质监测-必要的辅助措施-饮用水源地水质达标。具体如下：

①突发水污染事件发生后，首先在保障水电站正常效益的前提下，根据三峡库区饮用水源地水质安全预警预报软件，得出保障饮用水源地水质安全的“单库（三峡）调度/水库群（溪洛渡-向家坝-三峡）联合调度”的调度需求；

②根据调度需求，实施水库调度；

③对发生突发污染事件的水源地进行水质监测；

④若仍不满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类水体水质要求，则采取物理、化学和生物等辅助措施，进一步改善水源地水质，确保饮用水源地水质安全。

（3）技术创新点及主要技术经济指标**技术创新点：**

①三峡库区饮用水源地水质安全预警预报技术

结合全国重要饮用水水源地安全保障达标建设目标要求，根据三峡库区饮用水源地水环境安全的保障要求，在“十一五”课题“流域水环境预警技术研究与三峡库区示范（2009ZX07528-003）”研究成果“三峡库区水污染源风险评估”的基础上，梳理出“十一五”期间三峡库区突发水污染事件的情况，辨识出饮用水源地的水环境风险源、风险大小及形成机制；依据“十一五”所取得的“三峡库区水环境系统脆弱性评价”成果，从水动力学条件、水质、



水生态等方面遴选出水源地水环境安全指标，建立了三峡库区饮用水源地水环境安全评判体系；综合考虑饮用水源地的风险演变过程和水质安全阈值，基于水环境系统复杂性分析技术，耦合不确定性理论、水动力及污染物输移规律，根据“十一五”所取得的成果“流域水环境安全预警技术”，构建了适用于三峡库区的饮用水源地水质安全预警预报模型；最终形成了三峡库区饮用水源地水质安全预警预报技术。

②突发水污染事件的快速模拟和预案响应技术

基于三峡库区饮用水源地水质安全预警预报模型和可视化平台，反演典型饮用水源地在不同水环境状况下的突发污染事件情景，实现三峡库区饮用水源地突发水污染事件的快速模拟；在保证水电站正常效益发挥的前提下，针对三峡水库饮用水源地水环境安全保障目标，提出了不同水环境状况下、保障典型饮用水源地水环境安全的梯级水库水位涨落幅度及变化过程等调度需求；根据调度需求和水库群可能的调度空间，形成了基于三峡及上游水库群联合调度的、多等级的、保障饮用水源地水环境安全的应急响应调度预案；参考《国家突发环境事件应急预案》中对突发环境事件的等级划分，针对不同等级的突发性水污染事件，基于提出的应急响应调度预案，结合必要的物理、化学和生物措施，集成“十一五”所取得“流域水环境突发型风险应急控制技术”成果，以“快速、可行、高效”为目标，进一步形成了基于三峡及上游水库群联合调度的应急响应预案。

主要技术经济指标为：

通过水库群联合调度，使重庆市南岸区长江黄桷渡水源地、宜昌市秭归县长江段水源地、九龙坡区长江和尚山水源地3个库区重要水源地水质保证达标95%以上；通过应急调度，使水环境在1-5天内满足水源地取水要求。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

申请发明专利4项：

- ①一种计算突发污染事故下保证河流水质的流速阈值方法；
- ②一种多功能远距离测量仪；
- ③一种用于27类水质检验指标水样运输保存的车载恒温箱；
- ④一种用于活性炭与交联剂制备PVDF共混膜的方法。

实际应用案例：

应用单位：中国长江三峡集团有限公司

2017年5月20-25日，三峡水库和向家坝水库联合实施了生态调度示范，该调度示范结果

表明：通过多库联合调度可基本满足水源地水质安全保障要求，且调度并未影响水电站经济效益、社会效益等正常效益。可见，应对突发水污染事件的多等级应急响应调度技术在未来饮用水源地水质安全保障领域可进行推广应用。

依托课题：

基于三峡水库及下游水环境改善的水库群联合调度关键技术与示范
(2014ZX07104-005)

6.2 累积性环境风险评估与管理

6.2.1 区域河网型氮磷累积性及敏感水体的水环境风险预警技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：太湖流域（浙江片区）

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

课题对太湖流域（浙江片区）164条河道进行了概化，利用当前较为领先的MIKE水环境模型，构建了太湖流域（浙江片区）水环境综合管理平台，在大数据和实时数据支撑下，初步实现三大预警目标（即跨界水污染物通量预警、河网区水环境氮磷累积风险预警和敏感水体风险预警），以及在此基础上的水环境溯源技术。

①通量预警：基于地表水水质水量在线监控系统实时数据，运用平台进行模拟计算，根据课题研究确定的通量预警阈值，对不同行政区划、不同控制单元，实现出入境通量预警；

②河网区水环境氮磷累积风险预警：基于课题建立的累积性风险评估指标体系，着重关注流域内氮磷污染源对重点控制断面水质在时间和空间上的累积性影响；

③敏感水体预警：依靠在线生物毒性监控系统，对企业超标排放或事故排放对敏感水体的影响进行预警和快速查源；

④溯源：运用河网区氮磷累积性风险评估技术体系，计算307个计算子流域里各类污染源对55个主要控制断面和15个饮用水源地的累积影响等级，溯源到区；结合通量预警，以及敏感水体预警技术，在区域内重点源风险信息数据库的基础上，初步实现溯源到污染源。

（2）工艺流程

①确定出入境通量预警阈值，实现通量预警；

②建立氮磷累积性风险评估指标体系，利用河网水环境数学模型，在确定主要控制断面



和划分计算子流域的基础上，收集基础资料，包括各主要控制断面基本信息、各计算子流域污染源信息等，进行累积风险评估与预警；

③确定主要敏感水体，构建点源风险评估指标体系，评价3022家工业企业的点源风险，筛选出高风险企业，选择其中35家进行实地调查，建立高风险企业危险物质、周围敏感目标、厂区布置等详细的信息数据库；建立敏感水体生物毒性在线监测预警；

④在三大预警技术的基础上，针对污染事故，进行溯源分析；

⑤整理溯源结果，提出建议。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①基于不同类型水环境保护目标的流域控制单元划分

基于“十一五”太湖流域控制单元划分成果，将区域饮用水源地、跨界断面等敏感目标作为控制断面，利用杭嘉湖区域水环境数学模型，计算得到了影响控制断面水质的主要区域，在杭嘉湖区域划分了35个控制单元；利用权重分析技术，分析得出了控制单元内外单位污染负荷对控制断面水质的影响程度介于65%-89%，说明杭嘉湖区域控制单元划分基本合理。

②流域水环境累积风险评估技术体系

基于“十一五”河网区水环境风险评估体系，考虑水生态指标，制定了以压力、状态、响应为准则层的杭嘉湖区域三级区域累积风险评估技术体系，采用熵值法和层次分析法相结合的方法，得出了各风险等级阈值计算方法，从而建立了杭嘉湖流域水环境累积风险评估技术体系；通过调查得到的杭嘉湖区域2011年污染排放量、水质和水生态指标，计算了杭嘉湖区域在2011年的压力、状态、响应指标值，得到了以控制单元为基础的累积风险等级空间分布。

③监控预警模型技术体系

基于杭嘉湖区域控制单元分化结果，采用系统耦合技术，将建立的杭嘉湖区域三级区域累积风险评估技术体系中的各风险等级阈值的计算方法嵌入管理平台系统，集成得到了杭嘉湖区域风险评估技术体系平台。利用该平台及构建的杭嘉湖区域水环境数学模型，建立了杭嘉湖区域监控预警模型技术体系，可进行各控制单元区域累积风险等级实时判定并显示。

④通量预警技术系统集成

基于建立的太湖流域（浙江片区）水环境综合管理平台系统，采用系统耦合技术，将建立的跨界及出入太湖污染物通量测算技术体系中的基础信息及模型系统嵌入管理平台系统，集成得到了跨界及出入太湖污染物通量测算技术体系平台。利用该平台可进行跨界及出入太湖污染物通量的实时计算；实现区域污染物总量及是否达标情况的自动测算显示；在区域敏感目标水质超标时可进行自动报警。

⑤基于河网氮磷水环境累积性风险评估的常规水质溯源技术

以区域内55个交接断面和15个饮用水源地为对象，结合水生态四级功能分区、控制单元划分、行政区划、河网分布、汇水区等，将太湖流域（浙江片区）划分为307个计算子流域，运用该河网区氮磷累积性风险评估技术体系，计算307个计算子流域里各类污染源对55个主要控制断面和15个饮用水源地的累积影响等级，在溯源到区的基础上，实现溯源到污染源。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：嘉善县环保局

嘉善县划分为121个计算子流域，以13个主要控制断面为对象，将各计算子流域对控制断面氮磷常规水质超标的累积性污染来源进行了分析，例如嘉善红旗塘大坝断面氨氮超标，可能影响它的区域即为对应时间段内累积风险为高风险的计算子流域，在改善该断面水质的工作中，可以优先排查这几个计算子流域所在的区域。

依托课题：

太湖流域（浙江片区）水环境管理技术集成及综合示范（2012ZX07506006）

6.2.2 流域水生态风险识别关键技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：各种淡水沉积物

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

流域水生态风险识别关键技术是集生物测试、化学分析和数理统计分析，确定污染物类别和浓度，同时阐释沉积物中污染物与其毒性的剂量-效应关系，鉴定主要致毒污染物，并进一步评价主要致毒污染物的沉积物毒性。根据沉积物污染特征，添加针对不同污染物类型的添加剂预处理沉积物后进行生物毒性测试，通过锁定降低特定类型污染物的生物可利用性和毒性，确定致毒污染物类别（如氨氮、重金属和有机污染物）；以此为基础，利用化学分析测定沉积物中可能致毒污染物的浓度水平，并结合生物毒性测试结果，建立剂量-效应关系，最终确定主要毒性贡献者。

（2）工艺流程



评价流程为“毒性初筛—毒性表征—毒性鉴别—毒性确认”。具体如下：

①毒性初筛：利用沉积物毒性测试对待评价沉积物进行筛查，对模式生物表现出毒性的沉积物作进一步毒性鉴别评价。根据沉积物污染特征，选择合适的淡水生物及其毒性终点。

②毒性表征：利用不同处理方式改变沉积物中某类污染物的毒性，由此推断沉积物的毒性特征及引起毒性的污染物类别。重点关注的污染物类别包括氨氮、重金属和有机污染物，其对应的沉积物处理方式包括分别加入沸石、阳离子树脂和椰壳活性炭。主要的预处理方式为粉碎—过筛—清洗—储存，其中活性炭材料还包括脱气。沉积物处理后开展生物毒性测试，确定致毒物类别。

③毒性鉴别：利用化学分析推断潜在致毒物质并测定其浓度水平。

④毒性确认：对前两个阶段的判断进行再确认及解释说明，采用相关性分析、加标沉积物毒性测试、质量平衡等方法进行毒性确认。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

通过加入添加剂改变沉积物中特定污染物的生物可利用性和毒性，判断致毒污染物类别，进一步结合化学分析测定的沉积物中污染物的浓度水平，利用剂量-效应相关性确定主要致毒污染物。同时，针对我国沉积物毒性高的特点，优化了沉积物毒性鉴别评价过程中以剂量-效应关系为基础的沉积物稀释及毒性测试方法。

主要技术经济指标：

添加剂对模式生物无毒性效应，保证致死性应低于20%；而添加剂的加入显著改变沉积物毒性水平（ $p < 0.05$ ），即可说明对应类污染物类别具有毒性贡献。高毒性沉积物毒性测试中需按照剂量-效应关系逐级稀释沉积物，直至得到低于50%致死率的毒性数据。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：暨南大学

本研究以广州市为研究区域，采集了6个沉积物样品，评价水体沉积物的毒性风险，并推断主要的致毒物质。应用全沉积物毒性鉴别评价方法对广州市水体沉积物进行测试，结果表明广州市水体沉积物对摇蚊幼虫表现出严重的致死毒性。表现出生物毒性的沉积物中，氨氮无明显的毒性贡献，致死毒性主要由有机污染物和重金属共同导致，化学分析结果显示，主要的致毒重金属为镍、铅和锌等，主要的致毒有机物为氯氰菊酯、三氟氯氰菊酯和氟虫腈

类等有机杀虫剂。全沉积物毒性鉴定评价方法可有效区分不同类别的污染物导致的毒性效应，即将沉积物中的污染物分为有机物、重金属和氨氮三大类，通过进一步的化学分析，可推断具体的致毒物质，为多种污染物并存的复合污染区域的沉积物风险评价提供有效手段。

依托课题：

流域水生态风险评估与预警技术体系（2012ZX07503003）

6.2.3 流域风险表征关键技术

技术就绪度评价等级：4级

适用范围：流域沉积物重金属

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

工农业活动产生大量含有重金属的废弃物，其中的重金属通过迁移释放等过程进入河流和湖泊等水体，绝大部分迅速地转移至沉积物与悬浮物中，悬浮物在被水流搬运的过程中也会逐步转变为沉积物的一部分。沉积物中的重金属含量通常会比水体中的重金属含量要高得多，并会随环境条件的变化而逐渐被释放成为水体重金属污染的主要内源。沉积物中重金属的生态风险不仅取决于其含量，还取决于其从沉积物向水体的释放，更直接取决于其对生物的毒性效应，特别是评估多种重金属生态风险的时候，由于每种重金属的毒性效应不一样，因此需要引入重金属毒性系数权重，而重金属的毒性效应也受生物种类的影响，且不同流域的生物种类分布存在差异。

（2）工艺流程

①筛选流域内主要水生生物；②沉积物采样并确定检测重金属种类；③测量沉积物中重金属浓度；④收集重金属释放系数；⑤收集重金属毒性数据并对数据进行拟合；⑥根据拟合 HCI_5 方程确定重金属 HCI_5 值；⑦计算重金属毒性系数；⑧计算重金属毒性响应系数；⑨计算重金属的生态风险指数；⑩计算多种重金属生态风险综合指数。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①本技术采用金属对水生生物实际的金属毒性效应数据，而且考虑了不同物种对金属毒性的毒性敏感性，并采用保护95%生物的阈值来确定金属的毒性系数，在毒性系数的确定中引入了风险的概念。相比于现有的采用地壳丰度来衡量金属毒性效应的现有技术，本新发明技术能更准确的反映沉积物中重金属对水生生物以及所评流域的生态风险。

②基于毒性效应的流域沉积物中重金属生态风险评估方法中的重金属的毒性系数是以



流域的生物区系分布为基础而计算得出的，当所评流域的生物区系分布具有一定的代表性时，本发明所计算出的重金属毒性系数即可做为重金属毒性系数参考值来评价其他具有类似生物区系分布的流域，而不用对重金属毒性系数重新计算。举例来说，如果所评流域是我国典型东部平原型浅水湖泊，用本发明评估方法所得出的毒性系数即可作为参考值，用于评价我国其他东部平原型浅水湖泊。

通过使用公式 $RI = \sum_{i=1}^N Er^i$ 计算评价水体中多种重金属污染物所造成的总生态风险综合指数RI，通过RI来确定所评估流域的生态风险：

- ①当 $RI < 150$ 时，流域存在轻微的生态危害；
- ②当 $150 \leq RI < 300$ 时，流域存在中等的生态危害；
- ③当 $300 \leq RI < 600$ 时，流域存在较强生态危害；
- ④当 $RI \geq 600$ 时，流域存在极强的生态危害。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

授权发明专利。

实际应用案例：

应用单位：江苏省生态环境监控中心

对某湖泊沉积物中重金属的生态风险进行评估。

依托课题：

流域水生态风险评估与预警技术体系（2012ZX07503003）

6.2.4 累积性风险水污染物的溯源技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：河流流域N、P累积性风险预警

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

基于地理信息系统技术、污染负荷估算分析河流上下游断面N与P累积性风险关系，基于水体中不同污染类型N、P、O同位素差异，确定流域特定累积性风险点的污染类型，编制相关信息软件模型，评估流域内N、P累积性风险的主要污染类型和空间来源。

（2）工艺流程

本技术针对N、P累积性风险预警确定的流域风险点（断面），基于流域内人口分布、产业布局、点源污染等信息调研和定期水样采集检测，建立流域污染负荷与风险贡献时空分布数据库，通过地理信息系统技术分析断面和河流上下游空间关系，提供框选、列表、上下游链接方式帮助查询断面水质数据和相关支流风险贡献比例，提供重点污染断面或支浜空间覆盖范围分析，且可对该区域内的所有点、面源进行检索，根据N/O、P/O同位素分析结果确定主要风险源类型（种植业、养殖业、工业、生活污水等），并对风险源进行排序，最终确定主要风险源类型与空间位置。

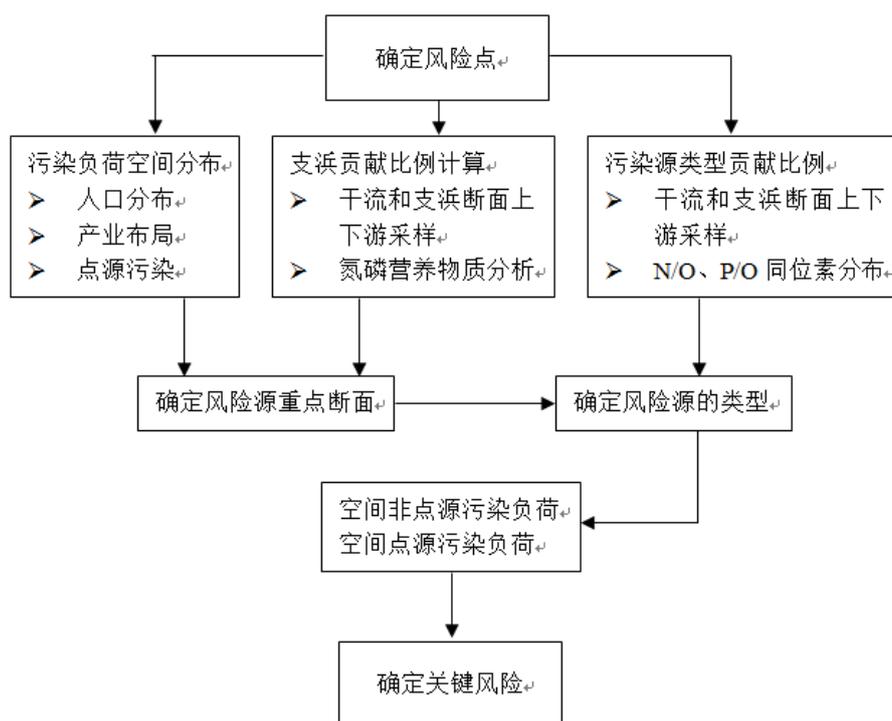


图 6-2 风险溯源技术流程图

（3）技术创新点及主要技术经济指标

本研究首次建立流域污染负荷与风险贡献时空分布数据库，通过GIS技术分析断面和河流上下游空间关系，结合监测数据对所有点、面源进行检索，根据同位素分析结果确定主要风险源类型，并对风险源进行排序，最终实现主要风险源类型甄别与空间位置追踪。

本研究将整个空间划分为若干相同规则网格（2km×2km），打破行政区划和流域的界限，但通过空间关系与其两者及用地图斑、点源建立联系，在溯源过程中，在目标河段所涉及的空间范围内，以等大小格网的形成展现溯源的空间情景概率分析结果。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。



实际应用案例：

应用单位：江苏省环境监测中心、宜兴市环保局、常州武进区环保局

在太滬南运河、漕桥河、太滬运河流域推广示范应用1年，评估示范区内入太湖断面的N、P累积性风险。

以2013年枯水期为例，对太滬运河、漕桥河和殷村港入湖河流中COD_{Mn}、氨氮、总磷和总氮进行溯源分析。示范区范围如图2所示，其中每条入湖河流的末端有一个自动监测站，提供2013年COD_{Mn}、氨氮、总磷和总氮的日值浓度数据。

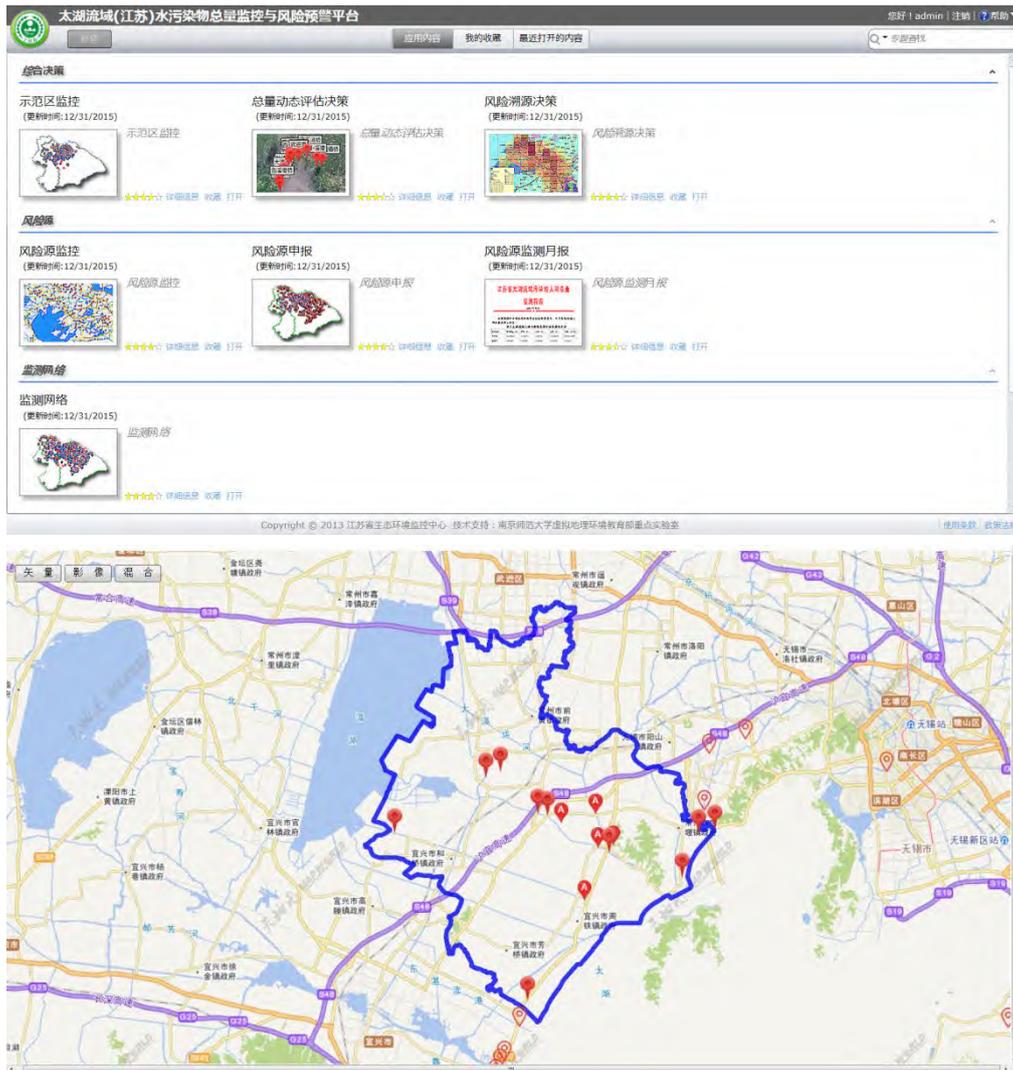


图 6-3 风险预警与溯源平台

TMDL成分	COD kg/d	NH ₄ -N kg/d	TN kg/d	TP kg/d
当前排放量	1973.01	657.22	2194.52	80.55
TMDL	1719.36	687.74	1375.49	51.58
非点源排放量	1547.42	618.97	1237.94	46.42
点源排放量	0.00	0.00	0.00	0.00
安全余量	171.94	68.77	137.55	5.16
污染负荷削减量	253.65	-30.52	819.03	28.97
污染负荷削减率	21.57 %	5.82 %	43.59 %	42.37 %
达标率和风险等级	达标比例47.8% [I级]	达标比例45.6% [I级]	达标比例1.1% [I级]	达标比例7.8% [I级]
浓度水质标准	5.00 mg/L	2.00 mg/L	4.00 mg/L	0.15 mg/L
浓度最小值	4.152 mg/L	0.837 mg/L	0.000 mg/L	0.027 mg/L
浓度最大值	6.579 mg/L	3.746 mg/L	12.272 mg/L	0.319 mg/L
浓度平均值	5.064 mg/L	2.103 mg/L	7.172 mg/L	0.208 mg/L
浓度标准偏差	0.464 mg/L	0.562 mg/L	1.678 mg/L	0.047 mg/L
浓度5%位次数	4.405 mg/L	1.330 mg/L	5.160 mg/L	0.133 mg/L
浓度50%位次数	5.019 mg/L	2.061 mg/L	6.883 mg/L	0.205 mg/L
浓度95%位次数	5.873 mg/L	3.073 mg/L	9.835 mg/L	0.294 mg/L

图 6-4 2013 年枯水期太漏运河累积性风险预警与 TMDL 报告

TMDL成分	COD kg/d	NH ₄ -N kg/d	TN kg/d	TP kg/d
当前排放量	3944.75	2285.45	7659.08	305.24
TMDL	4406.40	1762.56	3525.12	132.19
非点源排放量	3965.76	1586.30	3172.61	118.97
点源排放量	0.00	0.00	0.00	0.00
安全余量	440.64	176.26	352.51	13.22
污染负荷削减量	-461.65	522.89	4133.96	173.05
污染负荷削减率	-0.53 %	30.59 %	58.58 %	61.02 %
达标率和风险等级	达标比例78.9% [III级]	达标比例14.4% [I级]	达标比例0.0% [I级]	达标比例0.0% [I级]
浓度水质标准	5.00 mg/L	2.00 mg/L	4.00 mg/L	0.15 mg/L
浓度最小值	3.174 mg/L	1.348 mg/L	6.040 mg/L	0.165 mg/L
浓度最大值	5.960 mg/L	5.921 mg/L	17.427 mg/L	0.539 mg/L
浓度平均值	4.550 mg/L	2.608 mg/L	9.658 mg/L	0.345 mg/L
浓度标准偏差	0.556 mg/L	0.672 mg/L	2.245 mg/L	0.079 mg/L
浓度5%位次数	3.693 mg/L	1.543 mg/L	7.028 mg/L	0.219 mg/L
浓度50%位次数	4.520 mg/L	2.593 mg/L	8.777 mg/L	0.342 mg/L
浓度95%位次数	5.483 mg/L	3.512 mg/L	13.346 mg/L	0.462 mg/L

图 6-5 2013 年枯水期漕桥河累积性风险预警与 TMDL 报告



TMDL成分	COD kg/d	NH ₄ -N kg/d	TN kg/d	TP kg/d
当前排放量	3531.28	1833.06	5537.94	197.25
TMDL	4423.68	1769.47	3538.94	132.71
非点源排放量	3981.31	1592.52	3185.05	119.44
点源排放量	0.00	0.00	0.00	0.00
安全余量	442.37	176.95	353.89	13.27
污染负荷消减量	-892.40	63.59	1999.00	64.54
污染负荷消减率	-12.74 %	13.12 %	42.49 %	39.45 %
达标率和风险等级	达标比例85.6% [III级]	达标比例43.3% [I级]	达标比例0.0% [I级]	达标比例4.4% [I级]
浓度水质标准	5.00 mg/L	2.00 mg/L	4.00 mg/L	0.15 mg/L
浓度最小值	2.202 mg/L	0.000 mg/L	4.166 mg/L	0.123 mg/L
浓度最大值	8.364 mg/L	127.718 mg/L	8.348 mg/L	2.027 mg/L
浓度平均值	4.076 mg/L	3.322 mg/L	6.042 mg/L	0.259 mg/L
浓度标准偏差	0.893 mg/L	13.194 mg/L	0.945 mg/L	0.205 mg/L
浓度5%位次	2.302 mg/L	1.158 mg/L	4.305 mg/L	0.156 mg/L
浓度50%位次	4.047 mg/L	2.040 mg/L	6.163 mg/L	0.220 mg/L
浓度95%位次	5.116 mg/L	2.552 mg/L	7.620 mg/L	0.356 mg/L

图 6-6 2013 年枯水期殷村港累积性风险预警与 TMDL 报告

从图中可以看出，太滬运河在2013年枯水期各种污染物均处于 I 级红色预警状态，水质达标率均低于50%；漕桥河在枯水期COD_{Mn}为III级黄色预警，达标率为78.9%，即在平水期有78.9%的监测时间内COD_{Mn}浓度小于或等于5.0mg/L，而总氮和总磷的污染最为严重，监测浓度全部在标准阈值之上，合理消减量分别为4134和173kg/d；殷村港在枯水期COD_{Mn}也为III级黄色预警，还具有一定的纳污能力，负荷消减率为-12.74%，总氮监测浓度全部超标，最小值为4.166mg/L，最大值为8.348mg/L，负荷消减率为42.5%。为了考查导致入湖河流水质污染的来源及相应贡献比例，采用上文溯源方法对竺山湖流域2013年枯水期进行溯源研究，如图6-7~图6-10所示。

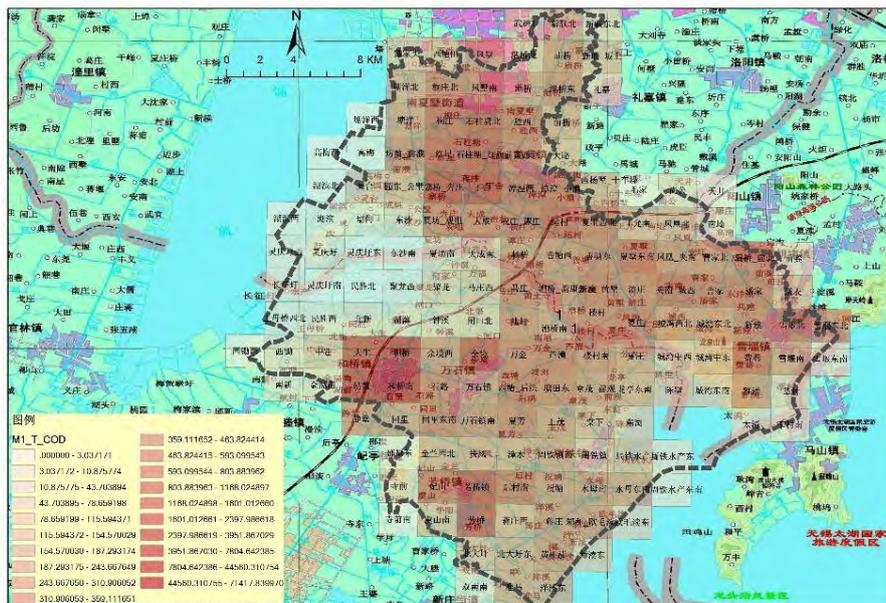


图 6-7 竺山湖流域枯水期 CODMn 控制单元污染负荷分布

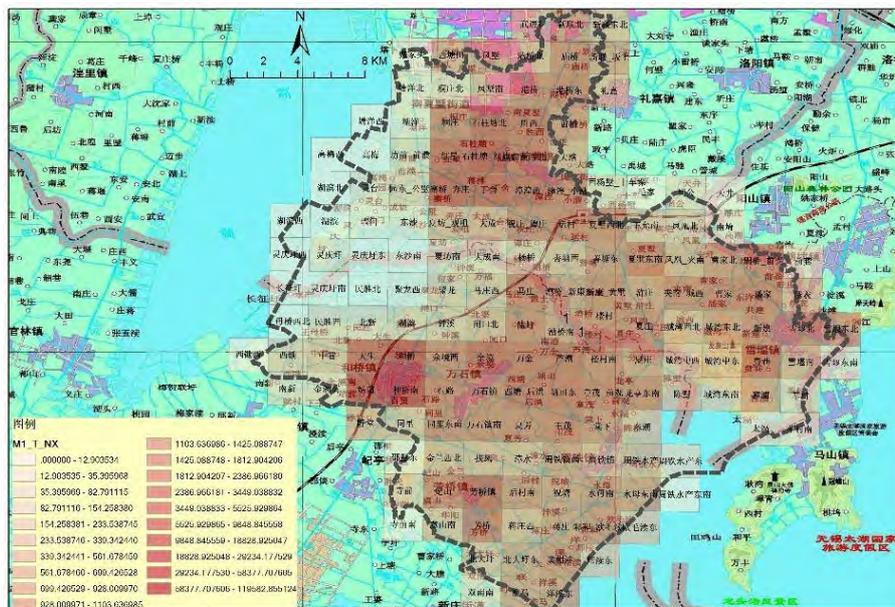


图 6-8 竺山湖流域枯水期氨氮控制单元污染负荷分布

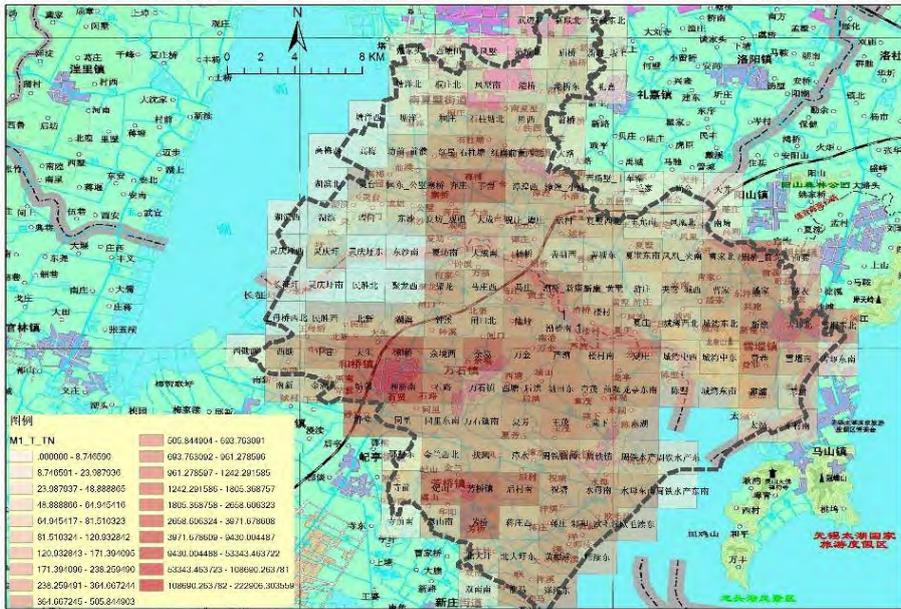


图 6-9 竺山湖流域枯水期总氮控制单元污染负荷分布

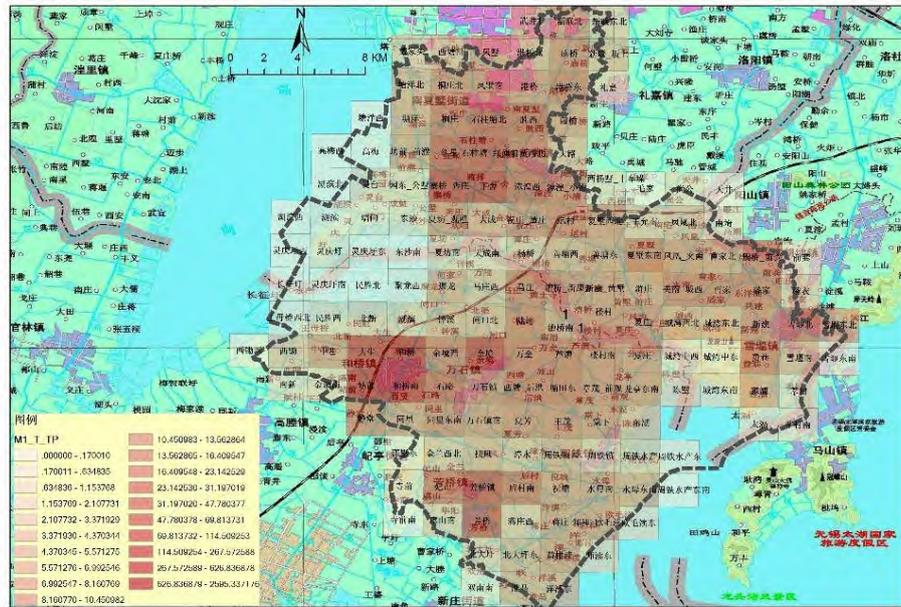


图 6-10 竺山湖流域枯水期总磷控制单元污染负荷分布

由图可知在竺山湖流域COD_{Mn}、氨氮、总氮和总磷累积性风险较大，累积性风险集中在示范区北部、中部和南部。其中COD_{Mn}累积性风险最重的区域为和桥南、站前和寨桥_奔庄，为重点控制单元，负荷值分别为286702.78、145034.38和131087.32kg/d。氨氮累积性风险最重的区域为和桥南、站前和和桥，为重点控制单元，负荷值分别为23316.19、11492.42和10245.06kg/d。总氮累积性风险最重的区域为和桥南、站前和和桥，为重点控制单元，负荷值分别为141546.08、69689.42和62099.60kg/d。总磷累积性风险最重的区域为和桥南、站前和和桥，为重点控制单元，负荷值分别为6766.19、3331.75和2969.04kg/d。综合四个方面的累积性风险，平水期时和桥南、站前、和桥和寨桥_奔庄为重点控制单元。

依托课题：

太湖流域(江苏)主要水污染物总量监控与风险预警平台构建及示范(2012ZX07506004)

6.2.5 流域水生态暴露评估关键技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：各类水体环境

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

水环境中污染物总浓度并非生物的真正暴露水平,往往给生态毒性风险评估带来较大的误差。对于生物体来说,污染物主要是以溶解态的形式进入有机体,被生物所利用,从而产生生态风险,该部分称为生物可利用性。因此,污染物的生态暴露与其生物可利用性有密切的关系。流域水生态暴露评估关键技术是通过被动采样技术获取污染物的生物可利用态浓度,从而对其进行生态暴露评估。被动采样技术是利用目标物在环境介质与吸附相之间的逸度差,基于分子扩散或渗透原理使目标物富集在吸附相上,从而获得其上层水体、沉积物水体及沉积物-水界面处自由溶解态有机污染物的浓度,再经数学公式模拟确定目标物在沉积物-水界面的通量。

(2) 工艺流程

工艺流程为“吸附相预处理—组装采样装置—将被动采样器放置水体环境—回收采样装置—定量水体中污染物浓度”。具体如下:

①首先将吸附相(例如低密度聚乙烯膜)浸泡至有机溶剂中进行预处理,然后将行为参考物质预吸附在低密度聚乙烯膜;

②将预载了行为参考物质的低密度聚乙烯膜与其它配件组装成被动采样器;

③将被动采样器放置于水体环境中,例如开放式水体被动采样器则放置于水面以下一米处,多段孔隙水采样器则放置于沉积物中,沉积物-水界面采样器则放置于沉积物-水界面处;放置时间依据不同环境介质而变化;

④放置时间结束后,将被动采样器回收;

⑤将回收采样器的吸附相(低密度聚乙烯膜)取出,进行有机溶剂萃取及仪器测量,从而确定污染物在吸附相的浓度。再通过数学公式的估算,确定目标物在水体环境中的浓度。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

流域水生态暴露评估关键技术体系的主要创新点是被动采样装置的设计,其主要原创点



在于：①采用金属过滤网及玻璃纤维滤膜可以有效使自由溶解态的目标物进入采样器的腔体内，而颗粒物不能进入；②开放式水体被动采样装置包含了梳状结构吸附相固定装置，可保证吸附相无重叠，且便于水体流动，加快对目标物的萃取；③多段式孔隙水采样器在不同采样单元间设置了间隔环，用于防止上下两个单元的孔隙水交换，能测定不同深度沉积物孔隙水中污染物的浓度趋势；④沉积物-水界面通量采样器的上层水体部分的采样单元呈水平纵向螺旋式排列，采样单元间的距离可通过不同高度的不锈钢垫片调节，总体高度为20 cm，其中最底层的采样单元距离沉积物-水界面的高度约为0.17 cm；⑤对于界面通量采样器，积极将数学模型与采样装置的测量参数进行了创新性结合。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

授权发明专利3项，国际发明专利5项。

- ① 一种污染物水体被动采样器：ZL 2011 1 0040648.8；
- ② 多段式沉积物孔隙水被动采样器：ZL 2011 1 0020502.7；
- ③ 水体-沉积物界面有机污染物渐升螺旋式采样器：ZL 2012 1 0545905.8；
- ④ 荷兰发明专利两项：NL 2007275和NL 2010469；
- ⑤ 美国发明专利两项：US 8,578,797 B2，另一个发明专利证书在制订；
- ⑥ 丹麦发明专利一项：DK 178448 B1。

实际应用案例：

应用单位：暨南大学

于2013–2015年间在全国的东北（松花江和辽河流域）、中部（长江流域）、西北地区（塔里木河流域）及西藏地区，共47个淡水水体湖泊、河流以及水库中放置了开放式水体被动采样器，结果显示开放式水体被动采样器可用于水体生态暴露评估技术。

依托课题：

流域水生态风险评估与预警技术体系（2012ZX07503003）

6.2.6 基于氮磷排放总量监控的累积性环境风险预警技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：平原河网地区入湖河流

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

根据入湖河流水质自动监测站实时传输数据，计算数值的威布尔点位置值，获得累积性概率分布图，即某条河流某个水质变量在指定时间段内的浓度累积概率分布；基于阈值标准（红线）与浓度累积概率分布图的交点，判断在X%监测时间范围内有Y%的污染物浓度在阈值浓度之下，即达标百分率，确定相应的风险等级，给出累积性风险等级并预警。在获得风险预警级别的基础上，基于TMDL技术提出水污染物总量控制方案。通过实时水质监测浓度和流量，获得即时的污染物负荷总量，采用污染负荷历时曲线(Load Duration Curve, LDC)的计算方法得到每条河流每个污染物的非点源、点源允许排放量、消减量以及安全余量。

(2) 工艺流程

基于监测数据得到污染物浓度的累积概率曲线，结合水质目标的阈值，得到达标百分率，小于50%监测时间范围内，污染物浓度达标，为I级红色预警；介于50%-70%监测时间范围内，污染物浓度达标，为II级橙色预警；介于70%-90%监测时间范围内，污染物浓度达标，为III级黄色预警；大于90%监测时间范围内，污染物浓度达标，为IV级绿色预警，不进行报警，得到预警级别的同时，对应流量历时曲线得到该风险等级下的水文条件。基于历史连续性的河流流量和水质标准建立不同水文条件下的环境容量。

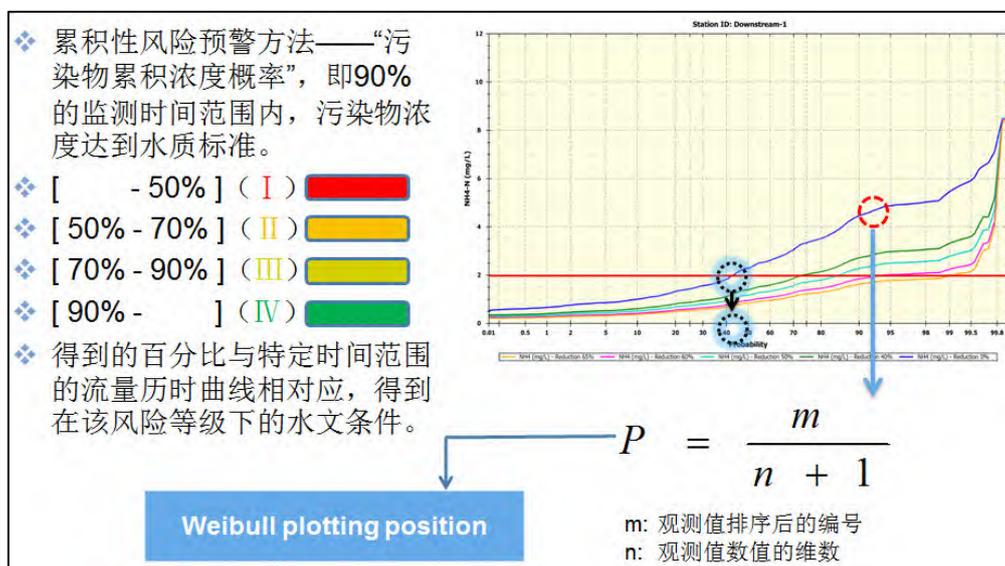


图 6-11 累积性环境风险评估与预警体系构建

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

根据污染物浓度的累积性概率划分风险等级。一方面示范区典型入湖河流的氮磷污染是点源和非点源长期排放的结果；另一方面，在自然和人为条件的扰动下水体沉积层的营养盐释放到水层中，两者共同体现“累积性”的特点。



（4）技术来源及知识产权概况

自主研发

实际应用案例：

应用单位：江苏省环境监测中心、宜兴市环保局、常州武进区环保局

该应用成果在殷村港、漕桥河、太滪运河以及竺山湖湖区进行应用示范。以2016年3月漕桥河监测站为例，如图2和图3所示，漕桥河总氮的达标率为19.4%，属于一级红色预警。当前排放量为2150kg/d，TMDL为1562kg/d，安全余量为156kg/d，负荷消减量为588kg/d，负荷消减率为34.6%。

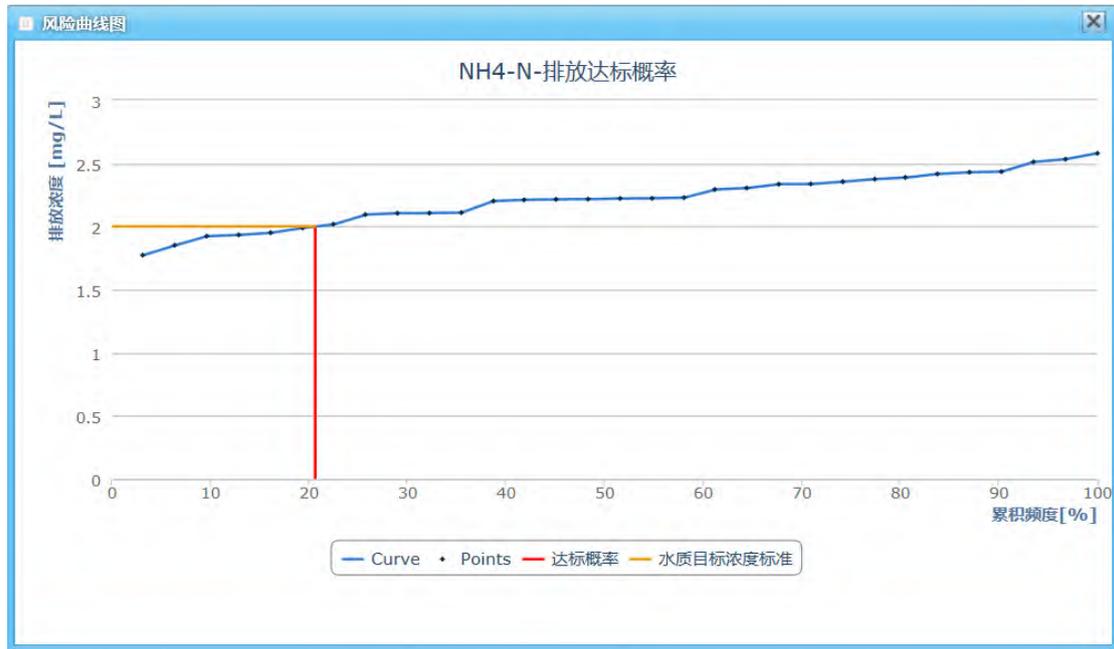
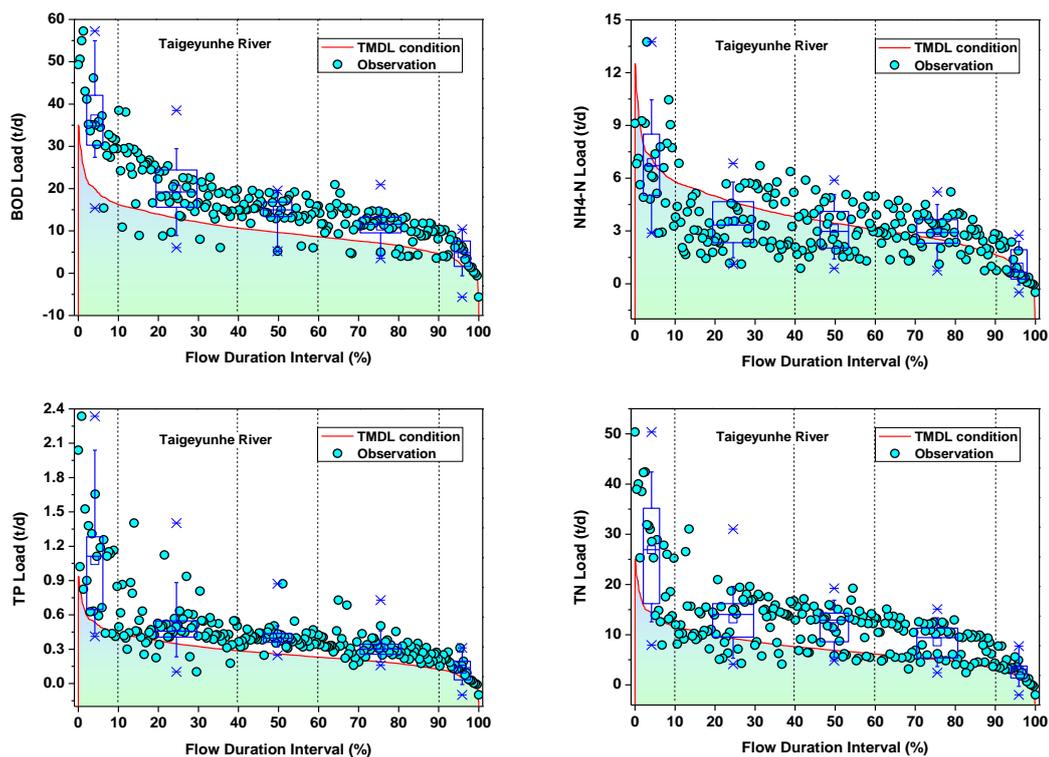


图 6-12 2016 年 3 月漕桥河总氮累积概率曲线

TMDL成分	COD kg/d	NH ₄ -N kg/d	TN kg/d	TP kg/d
当前排放量	3596.31	2149.86	8683.37	358.53
TMDL	3905.28	1562.11	3124.22	117.16
非点源排放量	3504.75	1395.90	2801.80	95.44
点源排放量	10.00	10.00	10.00	10.00
安全余量	390.53	156.21	312.42	11.72
污染负荷减量	-308.97	587.75	5559.15	241.37
污染负荷削减率	2.27 %	34.61 %	67.62 %	70.59 %
达标率和风险等级	达标比例83.9% [III级]	达标比例19.4% [I级]	达标比例0.0% [I级]	达标比例0.0% [I级]
浓度水质标准	5.00 mg/L	2.00 mg/L	4.00 mg/L	0.15 mg/L
浓度最小值	3.533 mg/L	1.773 mg/L	7.218 mg/L	0.304 mg/L
浓度最大值	5.283 mg/L	2.580 mg/L	13.255 mg/L	0.437 mg/L
浓度平均值	4.412 mg/L	2.215 mg/L	10.513 mg/L	0.374 mg/L
浓度标准偏差	0.455 mg/L	0.203 mg/L	1.480 mg/L	0.035 mg/L
浓度5%位次数	3.883 mg/L	1.852 mg/L	7.599 mg/L	0.325 mg/L
浓度50%位次数	4.300 mg/L	2.222 mg/L	10.807 mg/L	0.371 mg/L
浓度95%位次数	5.233 mg/L	2.533 mg/L	12.667 mg/L	0.429 mg/L

图 6-13 2016 年 3 月漕桥河总氮水质报告

图 6-14 2007-2011 年太漕运河 COD_{Mn}、氨氮、总磷和总氮负荷历时分析

依托课题:

太湖流域(江苏)主要水污染物总量监控与风险预警平台构建及示范(2012ZX07506004)



6.3 水华及饮用水源地风险预警

6.3.1 三峡库区“水华”预警技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：藻类浓度预测、水华风险评估预警、富营养化评估预测、精细化环境管理

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

在对环境风险识别与评估的基础上，通过构建环境风险的评估方法，再基于“水华”的模拟预测方法，对比环境风险的判定标准提出预警。课题在全面解析环境风险的识别、风险评估与风险预警的基础上，确定了三峡库区“水华”风险的阈值和预警等级，并提出了水华风险快速预测、精确预测判定的方法，以满足不同需求的水华风险的判定和预警；在此基础上，综合考虑三峡库区水功能区划特点、水环境现状与发展趋势以及社会经济发展现状和趋势，构建了三峡库区的水华风险预警判定的指标和预警等级体系。

（2）技术流程

水华预测模型构建→水华风险阈值设定→预测方法选择→水华风险评估预警。

①水华风险快速预测：在构建的叶绿素浓度快速预测和精细预测模型的基础上，通过叶绿素a/藻类生物量的含量和动态变化过程，分析浮游植物生物量状况及其变化趋势，从而对水华风险的程度、“水华”发生的时间以及“水华”发生影响的水域范围（水华风险的“三要素”）进行预测评价。

②水华风险阈值和等级确定：在水域的水质、水动力、生物等环境条件，以及所在研究区域的气象资料详细调查的基础上，通过对水体“水华”暴发时期优势藻类分析，进行优势藻类的剂量-效应试验，从而确定“水华”风险阈值和风险评估与预警等级。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

结合累积型水环境风险评价的热点问题，在对国内外相关研究进行全面综述的基础上，基于空地水一体化模型和水华风险判定与预警评估方法，提出了基于分布面源污染模型、河网水动力水质模型、生态模型的三峡库区“水华”预警技术，该套技术方法的创新点表现在：

①基于环境风险识别、判定和分级技术，提出了适应于三峡库区水功能区划特点、水环境现状与发展趋势以及社会经济发展现状和趋势的“水华”风险的判定技术、确定了水华风险发生的藻类浓度阈值和三峡库区水华风险评估预警的等级。

②提出了基于生物累积模型的多因素风险评价的通用模式，构建了综合考虑了气象、水文、水质、生物等多种因素对水华风险的持续影响，建立了基于水体藻类累积动力学模型的藻类浓度预测方法和基于水华风险等级判定的水华风险快速评价方法。

③基于“空-地-水”一体化模型，三峡库区水华风险的判定阈值与风险预警等级，考虑了藻类生长的多因素影响和生长动力学机理，浮游动物对藻类的影响以及湖泊底泥污染物的释放对湖泊水质的影响，构建了多要素耦合三峡库区“水华”预测模型和风险评估与预警技术。该模型实现了对水体未来水华风险“三要素”的详细、准确的评价和预测，其评价结果可用于辅助制定水域的水质规划，以及相关的水环境应急管理措施。

(4) 技术来源及知识产权概况

专利3项，软件著作权2项：

①水体水华风险快速预警方法，属于自主研发，发明专利，已授权；

②一种基于遥感影像和水生态模型的叶绿素计算方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

③一种基于水动力水质模型的污染源普查结果达标评估方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权；

水环境风险评估与预警模型集成系统（MDIS）V 1.0；

三峡库区重庆辖区累积性风险评估与预警平台 V 1.0。

实际应用案例

应用单位：重庆市环境科学研究院

该技术成功应用于重庆市环境科学研究院。基于环境分析结果构建藻类生物量预测模型；采用藻类生物量预测模型获得藻类生物量预测值；确定优势藻类的藻类生物量水华风险阈值；比较藻类生物量预测值和藻类生物量水华风险阈值，判断是否发出水华预警。基于该成果，重庆市环科院已经成功在三峡库区彭溪河流域预测了两起水华事件。

依托课题：

三峡库区及上游流域水环境风险评估与预警技术研究与示范（2013ZX07503001）

6.3.2 基于饮用水源地受体敏感特征的流域水质安全预警技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：富营养化湖泊型饮用水源地基于饮用水源受体敏感特征的流域水质安全预警

主要技术指标和参数：



（1）基本原理

针对富营养化问题导致的饮用水源地—贡湖水质安全问题,开展小流域尺度的基于受体敏感特征(饮用水源地)的流域水质安全预警技术研究,结合湖泊饮用水源地的功能特性综合分析饮用水源地水质安全及影响因素,识别出影响水质安全的风险问题;重点针对饮用水源对人体健康的影响,开展饮用水源地人体健康风险特征污染物质含量水平、组成特征以及时空分布特征分析。以饮用水源地人体健康为侧重点,结合富营养化带来的水质变化特征以及水生态变化特征分析结果,确定合理的针对饮用水源地基于人体健康的水质安全预警指标、预警阈值,预警级别,建立基于人体健康风险的流域水质安全预警指标体系。

（2）技术流程

技术流程为“模型构建-模型适用性检验-预警指标体系的确立-预警阈值与级别”。

①模型构建:以太湖贡湖湾小流域为研究代表和研究对象,根据太湖贡湖湾的水质和水生态环境特点,建立三维数值预警模型,模型包括风浪子模型、湖流子模型、标量迁移扩散子模型、生态子模型和悬移质子模型等26个子模型或函数构成。

②模型适用性检验:通过模型网格布设、模型初始条件确定、模型边界条件确定、模型参数率定与计算能力检验、模型长期预测精度检验,检验模型适用性。

③预警指标体系的确立:基于人体健康的角度,根据水质风险评估结果,预警指标主要考虑叶绿素Chla(与水华相关)与溶解氧DO(与臭味物质相关)两项。

④预警阈值与级别:以饮用水源地人体健康为侧重点,结合水质变化趋势分析以及水生态变化特征分析结果,确定合理的预警指标、预警阈值,预警级别。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点:

当前,太湖流域水环境质量风险管理相关经验非常缺乏。模型围绕贡湖及其入湖河道的水环境问题的基本特征,用数学方程描述水动力、沉积物悬浮及内源释放、水生动植物演替、蓝藻主动和被动活动、营养盐循环和有机物降解等湖泊生物地球化学循环过程。在此基础上,在垂向压缩坐标系中,以有限差分法离散这些数学方程,构建数值模型,利用计算机模拟水体的流速、水位、波高、周期、营养盐、藻类生物量、溶解氧、PAR、水生动物、生化需氧量、悬移质、臭味物质等水质参数的随时间变化过程。使得模型能够较准确预测贡湖生态系统和水质安全的短期变化,能够演算贡湖生态系统的中长期变化趋势,有利于加强水源地水资源保护,有效降低供水风险,保障城乡供水安全,为环境保护行政主管部门的决策提供科学依据。

主要技术经济指标:**①水质正常（水体中Chla浓度低于 80 $\mu\text{g/L}$ ，DO浓度大于4 mg/L）**

当水体处于无警时，表明此时饮用水源水体的水质安全风险值属于可接受的水平范围内，水体没有异味。水体Chla浓度低于 80 $\mu\text{g/L}$ ，DO浓度大于4 mg/L。人体可短时间暴露这一水平的水体，并不会对人体造成健康危害。饮用水源地水华健康风险处于这一水平时，仍具有供水功能，水厂可取水。

②轻微警情（水体中Chla高于 80 $\mu\text{g/L}$ ，低于 120 $\mu\text{g/L}$ ，DO浓度小于4 mg/L，大于2 mg/L）

当水体中Chla浓度，溶解氧处于轻警范围内时，表明人体经饮用途径暴露该水平的水体，将会增加人体出现不利健康风险的机率。如果饮用水未经处理的水，或者处理效果不佳的水体，就算在短期内饮用这一水平的水体，也会造成不利的健康风险。当饮用水源水体处于低风险级时，供水厂需要采取有效的水处理工艺，去除水体中有害物质。同时，需要采取调水稀释方式或者物理方式控制水体中微囊藻细胞的发生或者扩散，随时对饮用水源水质进行监测。同时，饮用水源管理部门需要将水源水体监测数据通知媒体及公众，并且提醒供水厂采用控制水体中污染物的水处理技术，同时，应持续开展水华监测，直到水体中藻密度减少。

③严重警情（水体中Chla高于 120 $\mu\text{g/L}$ ，DO浓度小于2mg/L）

当水体Chla浓度高于 120 $\mu\text{g/L}$ ，DO浓度小于2mg/L时，表明饮用水源地水质安全风险已经达到了高风险水平。当水体处于这一风险级别时，应该尽量避免人群对水体的暴露，在有条件的情况下，应该启用备用水源。对于不能提供备用水源的地方，供水厂需要深度水处理工艺，控制该工艺的有效性，以达到水厂水中污染物的浓度处于人体可接受的水平。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

获得软件著作权2项。

实际应用案例:

应用单位：无锡市环境保护局

基于本技术开发了“贡湖水质安全评估与预警模型软件系统”。“预警系统”有“贡湖水质评价”“饮用水源风险评估”和“预测预警”3大功能块。“预警系统”在“无锡市环境质量自动监测（控）系统”平台的“太湖新城水生态动态监控与评估系统”上应用，作为“监控与评估系统”的一个重要功能和子系统开展业务化运行，系统模块性能稳定，运行良好，效果明显，对叶绿素、藻密度等的指标预测准确率达到80%以上，显现出良好的应用前景和经济、社会、环



境效益。为在典型湖泊型流域进行水质安全评估与预警管理技术示范提供技术支撑。

依托课题：

流域水质安全评估与预警管理技术研究（2012ZX07503002）

7 流域水生态空间管控与生态流量保障

7.1 水生态功能分区

7.1.1 水陆一体化生境分类技术

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：根据河段/小流域尺度河流自然特征对河流生境进行快速分类

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

基于坡降、蜿蜒度、河流等级、封闭度、河道数等河道地貌形态指标反映代表了河流水生群落类型、水生生物多样性、水生物物种分布、水体理化特征等河流水生态特征的理论，利用水系矢量数据、高分辨率遥感影像、DEM等河段尺度上的自然地理信息数据，提取坡降、蜿蜒度、河流等级、封闭度、河道数等指标数值，通过单一指标分类、多指标综合分类的方法，划分河流类型，得到不同河段的河流类型。

基于DEM数据提取汇水子流域，确定适宜的汇水子流域面积范围，提取子流域内河道，分析主导河流类型，得到集水子流域尺度上的河流类型。

基于水陆一体化划分指标，对河流类型命名，体现河流类型的物理结构特征及其包含的水生态系统特征。

(2) 工艺流程

水陆一体化生境分类技术路线为“分类指标库构建-河段单元和集水小流域单元划定-分类指标选取-分类指标计算与分析-定性定量河流分类”。

具体步骤如下：

①分类指标库构建。通过文献调研建立河流分类指标库，通常可用的指标包括坡降、河流等级、封闭度、河道数量、蜿蜒度等；

②河段单元和集水小流域单元划定。在ArcGIS10.0软件下，基于DEM数据提取流域边界和河流水系，以水系图中的河流交汇点、水库、闸坝、湖泊为分割点进行河流分段；

③分类指标选取。根据专家经验、数据可获取性、河流主导生态特征选取分类指标；

④分类指标计算与分析。实地调查、水系矢量数据、高分辨率遥感影像、DEM等河段尺

度上的自然地理信息数据，计算提取分类指标值，分析其空间变化；

⑤定性定量河流分类。采用阈值法、聚类分析法进行河流分类，可单指标，也可多指标综合分类；

⑥命名。根据主导河流类型进行命名。

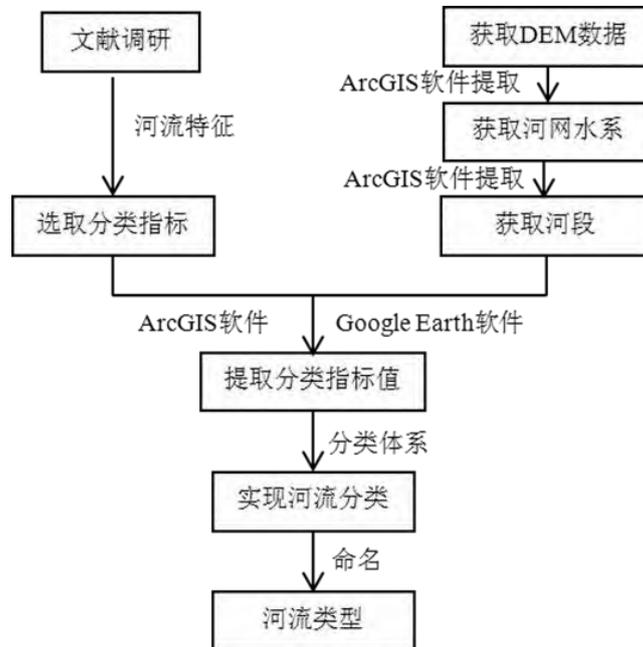


图7-1 河流分类技术路线

（3）技术创新点及主要技术经济指标

水陆一体化生境分类技术指标易于获取，解决了遥感数据昂贵、指标获取工作量大、难以在大面积的流域应用的不足，可以在其它大流域河流分类中使用。

①数据易于获取，且覆盖全。目前常用的河流分类主要在大流域尺度、河段尺度和样点尺度开展，大流域尺度的河流分类主要是宏观尺度上的河流分类，难以满足中小尺度上的管理需求；样点尺度的分类需要进行样点上河流生境的调查，花费时间经费较多；而河段/小流域尺度上的河流分类，可用于中小尺度上的水生态保护和流域管理，数据主要采用地理信息数据、遥感影像等空间数据，易于获取，覆盖全部河段，可以快速全面的进行河流分类，实现管理需求。

②分类体现生境类型，为河流生态系统保护提供局地中小尺度管理依据。选取的指标体现水生物种分布、水生群落多样性、水生态系统类型特征，代表了生物生活史完成所需要的生境类型特征，不仅反映了水体特征，还反映了陆地生态特征，形成了完整的生态系统，在中小尺度及河段尺度上的管理上更具备科学性和实用性。

③具有可推广性，可在全国推广应用。分类使用的指标适用于全国各地的河流，因此，

该方法可在全国的河流分类管理中使用。

④指标体系

建立由底质、栖息地复杂性、速度-深度结合特性、堤岸稳定性、河道变化、河水水量状况、植被多样性、水质状况、人类活动强度和河岸土地利用类型10个指标所构成的指标体系。

将流域河流分成高坡度溪流和低坡度河流，建立包括河道项目指标（生境多样性、河道水流状态、水质、速度-深度环境、河道宽深比、沉积物沉积、河道变化、河道蜿蜒性、急流频率）、河岸项目指标（河岸稳定性、河岸坡度、河岸植被多样性）和滨岸带项目指标（滨岸带植被宽度、人类活动强度）的指标体系。

⑤评价方法

根据质量状况优劣程度，将指标分成4个级别，分值是通过现场调查，目测评分的方法获取。每个指标20分，4个级别的分值范围为：20~16(好)、15~11(较好)、10~6(一般)、5~1(差)，10项指标总和的满分为200分。总分>150为好的等级，介于120和150之间为较好等级，介于90和120之间为一般等级，介于60和90之间为较差等级，小于60为差等级。

按照质量状况优劣程度，将指标进行分级，得到河道栖息地、河岸栖息地和滨岸带栖息地的分值，累计求和得到每个样点的河流栖息地质量指数。

⑥采样点设置

根据不同的河段类型，在整个流域内分别选取不同类型河段进行调查。在室内根据遥感影像与水系图设计采样点，根据遥感影像图中显示的不同河流类型的河流结构特点、样点是否具有可到达性（是否有桥）以及是否断流三个原则。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

已申请专利：一种河流分类系统。

实际应用案例：

应用单位：南开大学，中科院生态环境中心，南京大学，中国水利水电科学研究院，北京师范大学，江西环科院，中科院南京地理与湖泊研究所，北京大学，中科院武汉水生所

成果为“流域水生态承载力与污染减排管理技术研究”项目下共性技术课题“流域水生态保护目标制定技术”研究成果，应用于该项目下第二课题“重点流域水生态功能三级四级分区研究（2012ZX07501002）”。河流分类技术是流域水生态功能四级分区的基础，在河流分类的基础上进行流域功能评估，最终形成流域水生态功能四级分区结果。河流分类理论及其技术方法对于松花江、海河、淮河、黑河、东江、赣江、巢湖、滇池、洱海等重点流域水生态



功能四级分区提供参考和借鉴。有助于松花江、海河、淮河、黑河、东江、赣江、巢湖、滇池、洱海等重点流域形成从水质目标管理向水生态健康管理拓展的四级分区管理单元，是流域水生态保护与水质目标管理的基础。河流分类技术是流域水生态管理的重要一环，该研究成果具有广阔的管理应用前景，将有利于“分区，分类，分级，分期”多维水污染控制模式的基础，有利于水十条管理目标的最终实现。

依托课题：

流域水生态保护目标制定技术研究（2012ZX07501-001）

7.1.2 流域水生态功能三级四级分区技术

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：流域水生态功能三级四级分区

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

流域水生态功能三级四级分区技术以生态系统服务功能、水陆关联与耦合、地域分异规律、尺度效应等相关理论为基础，提出水陆一体化的水生态功能分区体系，划分水陆一体的基本空间单元，识别影响流域水生态特征与水生态功能的关键因子，实现符合水生态特征的因子空间化，构建流域三级四级水生态功能分区指标体系，并集成分区边界确定、分区合理性验证以及分区专题地图制图技术。流域水生态功能三级四级分区技术由以下关键核心技术组合而成：1) 基本分区单元划分技术：以水文分析为基础，辅以人工判别修正，将针对水域的河段单元与针对陆域的汇水单元进行一对一匹配。2) 指标空间化技术：综合运用多种地理信息系统空间分析方法，实现更符合水生态特征且精度更高的指标空间化。3) 分区指标筛选技术：综合运用多种多元对应分析方法，建立起生物因子与环境因子之间的多元关联渠道，实现更为高效和全面的指标筛选。4) 分区边界确定技术：使用空间聚类、图层融合等方法，辅以专家判别，确定分区边界。5) 分区合理性验证技术：同时运用多种类群水生生物空间分异特征，以及水质、压力等环境因子空间分异特征，进行多特征空间匹配分析，增强分区合理性验证的可靠度。6) 分区专题地图制图技术：将表现水域的河段单元叠加在表现陆域的汇水单元之上，辅以编码与命名、线形、填充、颜色、注记等要素的丰富变化，实现水陆并重的表达效果。

（2）工艺流程

流域水生态功能三级四级分区包括以下工艺流程：

①划分基本分区单元：以DEM为基础进行水文分析，设定最小汇流面积阈值，提取河段，通过人工判别修正部分位置或流向错误的河段，并据此更正原DEM，以更正后的DEM再次重复水文分析，获得正确的线状河段单元，并同时生成与之对应的面状汇水单元；

②确定备选分区指标集并对其进行空间化：通过文献调研，结合专家判断，列举影响流域水生态系统时空分异的关键因子，寻找可以表达这些因子的指标，构建备选分区指标集，借助地理信息系统空间分析方法实现这些指标的空间化；

③筛选分区指标：利用典范对应分析、相关分析、主成分分析等多元分析方法，根据与分区目标原则的匹配性，与水生生物分布特征关联的灵敏性，表达含义的不重叠性，以及空间尺度匹配性，从备选分区指标集中筛选出适合的分区指标；

④确定分区边界：根据相似相邻原则，使用空间聚类、图层融合等方法，获得初步的四级区边界，结合水生态功能二级区边界，根据三级分区的目的和原则，考虑子流域完整性、行政边界完整性等具体要求，辅以专家判别，确定三级区边界；结合三级区边界，对初步的四级区边界进行进一步划分，确定最终的四级区边界；

⑤验证分区合理性：同时运用多种类群水生生物空间分异特征，以及水质、压力等环境因子空间分异特征，进行多特征空间匹配分析；

⑥表达分区成果：对分区结果进行编码与命名、构建分区成果数据库、撰写分区说明、完成分区专题地图制图。

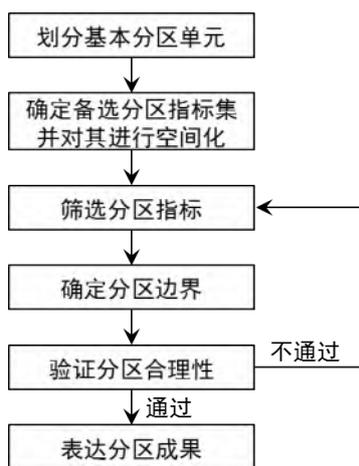


图 7-2 水生态功能三级四级分区技术流程图

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

①水陆一体化的分区基本单元划分：传统分区或者偏重对陆域的划分，或者偏重对水域的划分，常常导致二者无法在空间上实现匹配，从而不便于实施水陆一体化管理。本技术在划分基本分区单元时，将针对水域的河段单元与针对陆域的汇水单元进行一对一匹配，以便于分别针对陆域和水域开展水生态调查和分区指标空间化，同时又保证了二者的空间匹配，从而便于实施水陆一体化的流域管理。

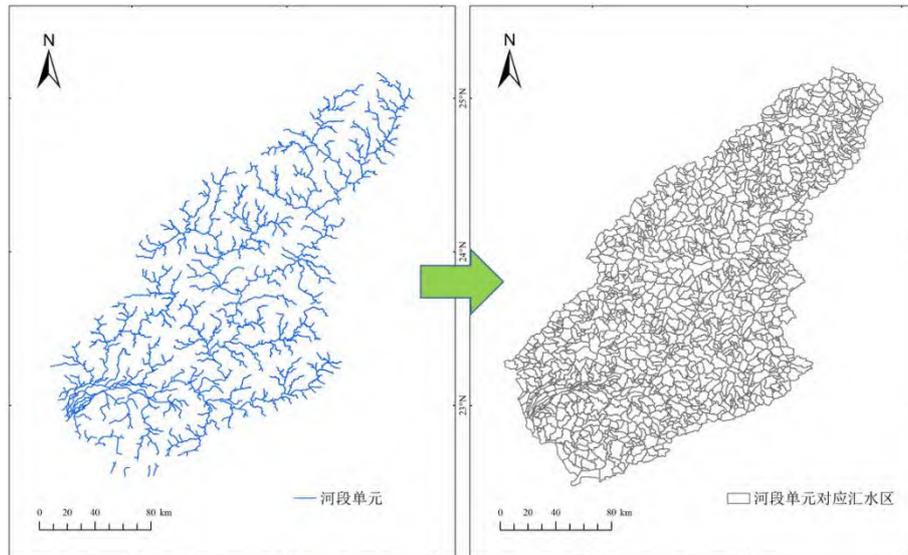


图 7-3 水陆一体的分区基本单元划分示意图（以东江流域为例）

②面向水生态特征的指标空间化：传统简单根据样点调查数据进行插值的指标空间化技术，并不能完全符合水生态系统空间分异特征。本技术综合运用多种地理信息系统空间分析方法，如汇流尺度分析、汇水单元分区统计、基于地形的指标校正、边界自动识别、约束边界的空间聚类等，实现了更符合水生态特征且精度更高的指标空间化。

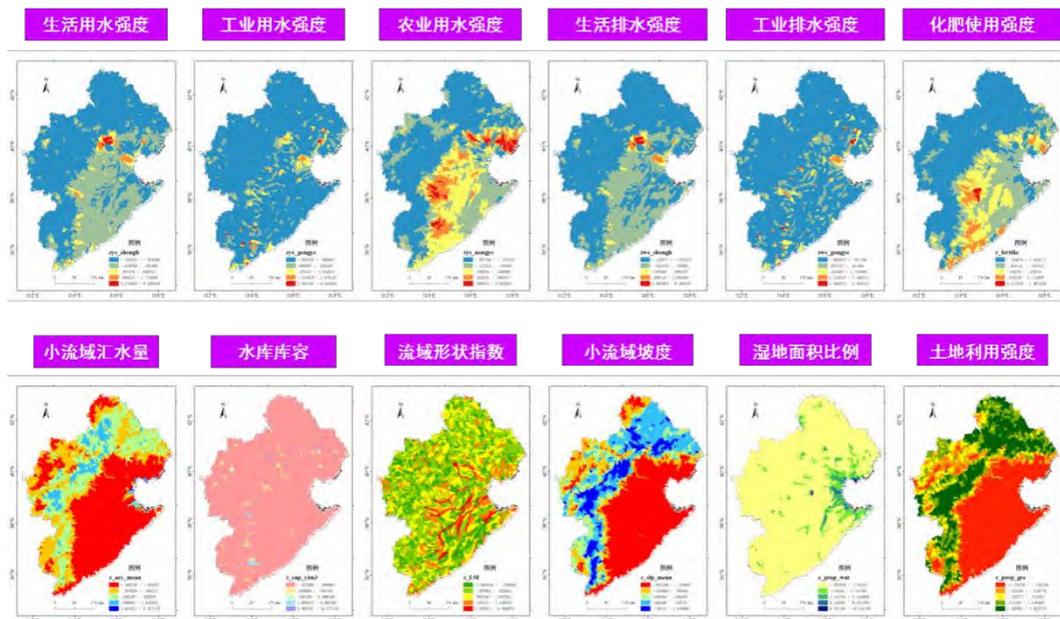
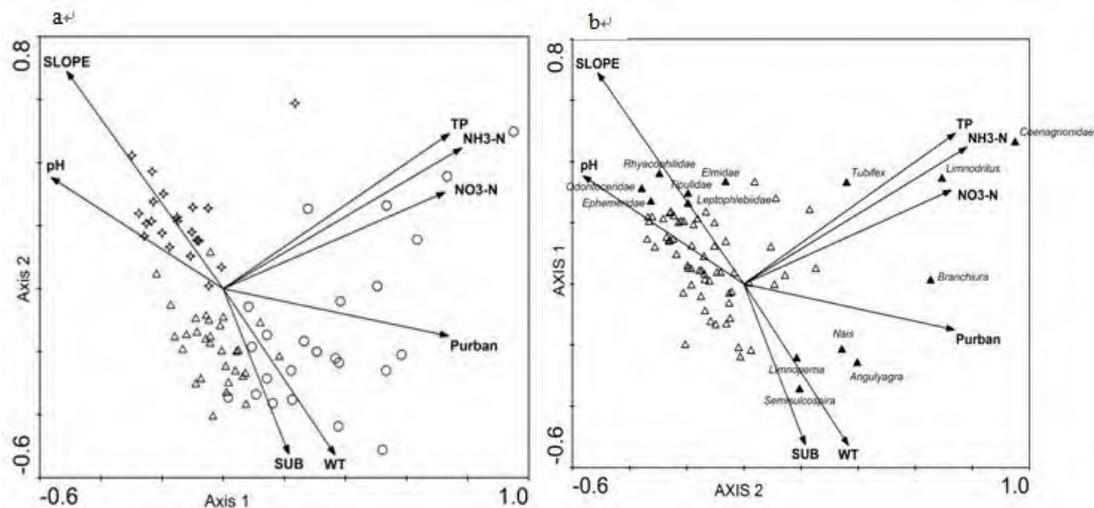


图 7-4 指标空间化结果示意图（以海河流域为例）

③基于水生态关联分析的分区指标筛选: 本技术通过结合对大量水生态调查数据的分析和对大量相关文献的总结, 并结合对水生生物分布空间分异特征的分析和对水生态功能的评估, 借助典范对应分析、除趋势对应分析、冗余分析、自然邻域聚类分析、主成分分析等多元分析方法, 建立起生物因子与环境因子之间的多元关联渠道, 从而克服了单一方法在指标筛选效率和全面性方面的不足。



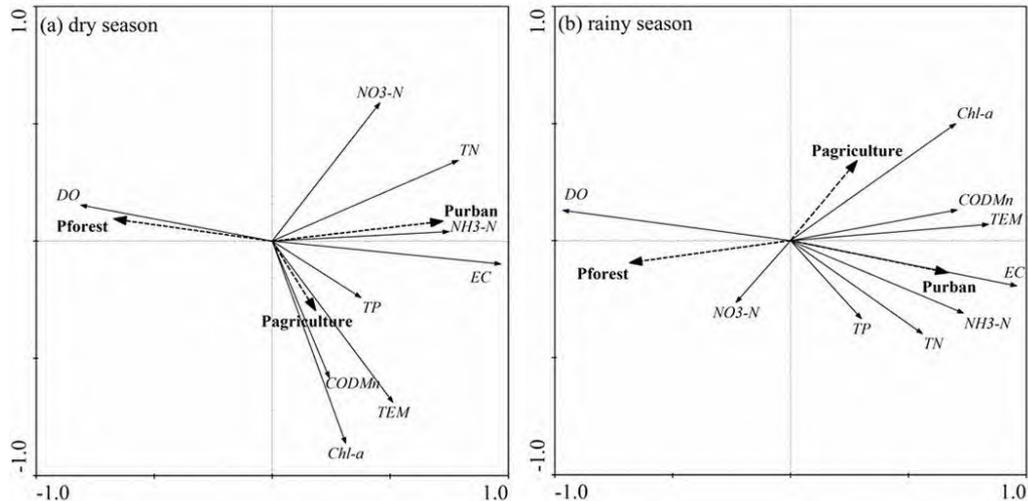


图 7-5 分区指标筛选示意图（以东江流域为例）

④区域分区与类型分区有机结合：传统分区技术或仅强调区域分区，或仅强调类型分区，少有实现二者结合，更未在水生态功能分区中有所应用。本技术在较大空间尺度的三级分区中更强调区域共轭性，即在区域划分上做到既不重叠也不遗漏，遵从面向分区管理的区域分区理念；在较小空间尺度的四级分区中更强调类型共轭性，即在类型划分上既不重叠也不遗漏，遵从面向分类管理的类型分区理念，实现了区域分区与类型分区有机结合。

⑤基于多特征匹配的分区合理性验证：传统分区或者缺乏分区合理性验证环节，或者虽有验证环节但却普遍存在用分区指标进行“自我验证”的现象。本技术在进行水生态关联分析的基础上，同时运用鱼类、底栖动物、藻类等不同类群水生生物空间分异特征，以及水质、压力等环境因子空间分异特征，进行多特征空间匹配分析，明显增强了分区合理性验证的可靠程度。

⑥水陆并重的分区结果专题制图：传统陆域分区仅关注对陆地要素的表达，而水域分区仅关注对水体要素的表达，割裂了“陆域是水域的背景，水域是陆域的反映”这样一种本已存在的天然联系，给人造成“水是水、陆是陆”的错误印象。本技术在分区结果表达时，将陆域作为有分区含义的背景，将水域作为有分区含义的前景，力求做到水陆并重，展现水陆一体化思想。

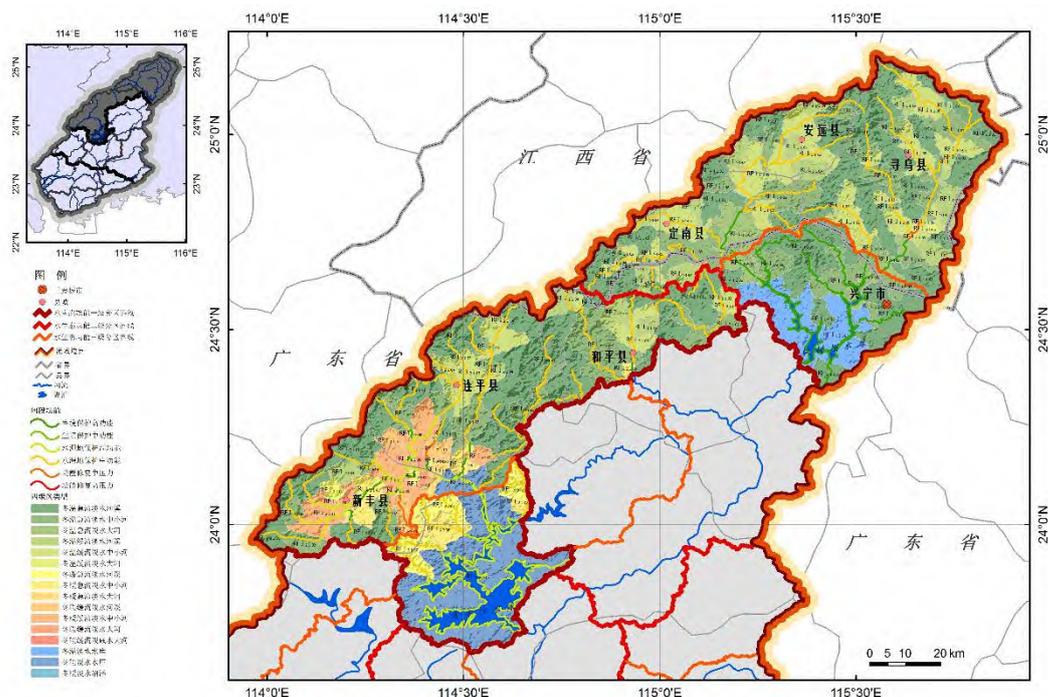


图 7-6 水陆并重的分区结果表达示意图（以东江流域为例）

主要技术经济指标:

① 构建了松花江、海河、淮河、东江、黑河、滇池、洱海、巢湖等我国 8 个重点流域的水生态功能三级四级分区基础数据库；

② 完成了松花江、海河、淮河、东江、黑河、滇池、洱海、巢湖等我国 8 个重点流域的水生态功能三级四级分区方案；

③ 提出了松花江、海河、淮河、东江、黑河、滇池、洱海、巢湖等我国 8 个重点流域的水生生物保护物种名录；

④ 开发完成了流域水生态功能分区信息共享与服务系统，并已获得相关计算机软件著作权“流域水生态功能分区信息共享与服务系统软件 V1.0”（登记号：2016SR205629）；

⑤ 发表了流域水生态功能分区相关学术论文 29 篇（SCI 论文 13 篇），学术专著 4 部，申请相关发明专利 4 项（1 项已获批）。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

已申请 4 项发明专利，申请获批计算机软件著作权 1 项目。

专利:

①江源, 彭秋志, 任斐鹏, 黄晓霞, 丁佼, 康慕谊. 一种基于水生态功能的流域分区方法. (专利号: ZL 201510500790.4)



②朱文泉，郑周涛，张东海，江源. 一种遥感图像反立体校正方法.（专利号：ZL201510157663.9） 申请日：2015年4月7日

③张志明，高俊峰，高永年. 一种湖泊型流域水生态功能三级分区方法.（申请号：201510777134.9） 申请日：2015年11月13日

④高俊峰，高永年，张志明，陈炯烽. 一种湖泊型流域水生态功能一二级分区方法.（申请号：201510219533.3） 申请日：2015年4月30日

软件著作权：

中国环境科学研究院，“流域水生态功能分区信息共享与服务系统软件 V1.0”，登记号：2016SR205629，首次发表日期：2016年3月1日。

实际应用案例：

案例 1

该技术已在松花江、海河、淮河、东江、黑河、滇池、洱海、巢湖等我国 8 个重点流域的水生态功能三级四级分区中得到了应用，完成了以上 8 个流域的水生态功能分区，主要成果包括：（1）分区报告，（2）分区说明书，（3）分区图集，具体结果如下：

松花江流域：松花江流域是我国东北温带-寒温带地区、冷水型水生态系统的代表案例。划分出了 38 个水生态功能三级区，303 个水生态功能四级区。

海河流域：海河流域划分出了 73 个水生态功能三级区，428 个水生态功能四级区，代表了我国华北受高强度人类活动影响且季节性断流频发的流域特征，分区成果在河北省环境保护厅自然生态保护处组织编制的《河北省生态功能保护红线》，以及河北省环境科学研究院组织编制的《河北省环境功能区划》中得到了体现。

淮河流域：淮河流域划分出了 41 个水生态功能三级区，375 个水生态功能四级区，代表了我国气候南北分界线附近的典型流域特征。

东江流域：东江流域划分出了 22 个水生态功能三级区，112 个水生态功能四级区，代表了我国东南沿海受高强度人类活动影响的丰水型流域特征。

黑河流域：黑河流域划分出了 21 个水生态功能三级区，319 个水生态功能四级区，代表了我国西北干旱内流区大河的典型流域特征，分区成果在黄河水利委员会黑河流域管理局组织编制的《黑河流域综合规划》中得到了体现。

滇池流域：滇池流域划分出了 23 个水生态功能三级区，41 个水生态功能四级区，代表了我国西南高原湖泊受高强度人类活动影响的典型流域特征，分区成果在昆明市环境科学研究院组织编制的《滇池流域水污染防治规划(2016-2020 年)》中得到了体现。

洱海流域：洱海流域划分出了 14 个水生态功能三级区，70 个水生态功能四级区，代表了我国西南高原湖泊受中低强度人类活动影响的典型流域特征。

巢湖流域：巢湖流域划分出了 28 个水生态功能三级区，62 个水生态功能四级区，代表了我国长江中下游地区受中等强度人类活动影响的典型流域特征，分区成果在合肥市发展和改革委员会组织编制的《环湖带生态环境建设与区域经济发展总体方案》，以及合肥市规划局组织编制的《环巢湖生态示范区生态保护与建设规划》中得到了体现。

案例 2

2015 年 4 月至 2016 年 3 月期间，环境保护部水环境管理司主持编制了《全国流域水生态环境功能分区体系方案》。制定过程充分采用了课题中水生态功能分区及相关研究成果，完成了全国重点流域的水生态环境功能三级分区方案。该方案目前已应用于我国重点流域水污染防治“十三五”规划、全国水环境监测体系构建、流域水污染防治考核等环保部管理工作中，对于支撑《水十条》和推动我国水环境管理的精细化和科学化具有积极作用。

案例 3

目前该技术在课题组层面已形成了共性技术和方法，有效解决了不同流域水生态功能分区过程中面临的共性技术问题，未来流域水生态功能三级四级分区技术可在全国范围内进行推广，为划定水质目标管理控制单元提供客观科学依据，为实施更为全面的水生态系统健康管理提供分区技术支持。

依托课题：

重点流域水生态功能三级和四级分区研究（2012ZX07501-002）

7.1.3 基于水生生物区域差异特征的水生态功能分区效验技术

技术发展阶段：原创，集成类技术

适用范围：检验流域水生态功能分区结果的合理性

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

流域水生态功能一级二级分区的核心内容即通过陆域生态指标与水域生态指标关系对流域进行划分，水生生物数量结构与多样性功能指标对水域环境特征具有重要的指示作用，同时水域环境特征指标又影响着水生生物的分布，水生生物数量结构与多样性指数空间异质性特征能够反映流域水生态系统的空间异质性，因此，基于应用水生生物的空间分布来验证水生态功能分区结果的原则，构建了“指标计算-统计分析-结果验证”的基于水生生物区域差

异特征的水生态功能分区效验技术，该技术应用数学统计、聚类分析、DCA等方法对流域水生态系统中水生生物（鱼类、底栖生物、浮游藻类、水生植物）数量结构与多样性特征进行分析，根据水生生物特征、空间异质性特征，通过列表对照或统计分析图对流域水生态功能一级二级分区结果进行校验。

（2）技术内容或工艺路线

该技术主要通过野外调查和资料调研的水生生物数据对流域水生态功能分区结果进行验证，技术内容主要包括3部分：

①水生生物指标计算：水生生物类型包括鱼类、浮游藻类、底栖动物、大型水生植物等，数据指标包括各属种密度、多样性指数（Shannon-Wiener生物多样性指数，Pielou种类均匀度指数，Margalef种类丰度指数）等；

②指标数学统计与空间统计：指标统计分析方法分为数学计算分析与空间统计分析，其中数学统计是基于水生态功能分区结果将不同区域水生生物指标数据进行算术平均值计算与方差分析，通过数据直接比对进行验证；而空间统计分析应用聚类分析或DCA分析将流域内所有样点进行空间化分组，实质是应用水生生物空间异质性特征来验证基于陆域分区指标的水生态功能一级二级分区结果；

③结果对比：数据统计分析结果可应用列表法和统计分析图进行直接对比。

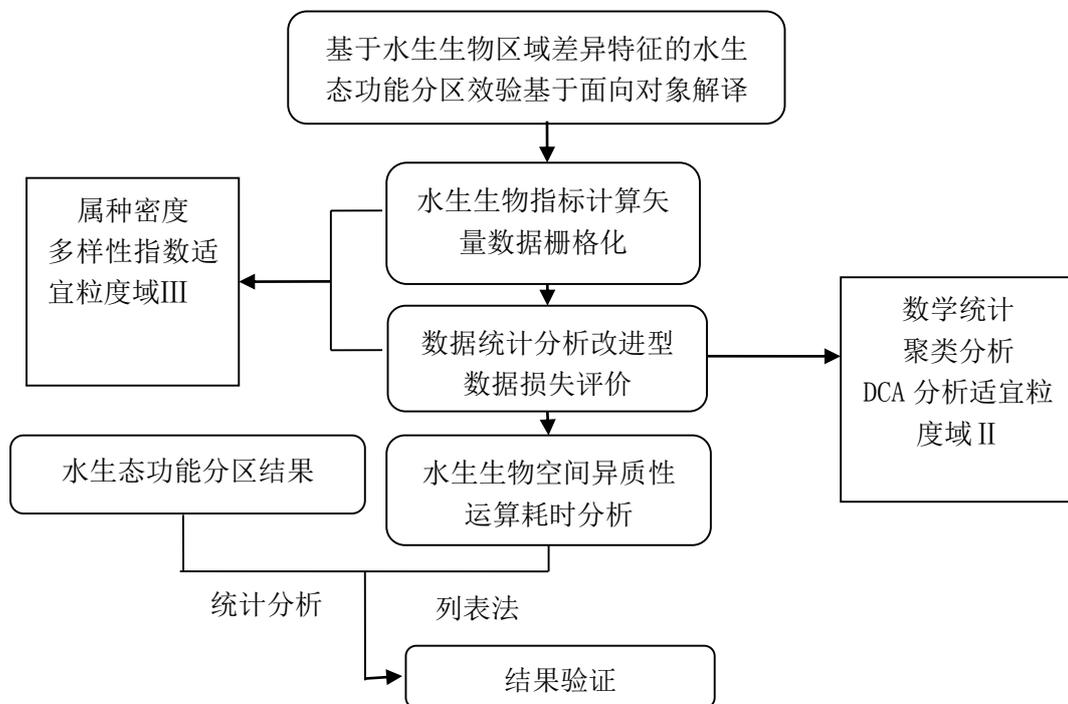


图 7-7 技术路线图

(3) 关键技术方法

关键技术方法主要包括：数据统计检验法和结果对比表达。数据统计是通过对分区结果中不同区域的水生生物数量结构指标（属种密度）进行数学统计（算术平均值）与空间统计分析（聚类分析、DCA分析）来判断结果的合理性；结果对比表达是通过列表法或统计分析图法将数据统计结果进行直接对比分析。

①数据统计分析：通过对分区结果中不同区域的相关生物量或者水量等因素的统计分析来判断结果的合理性。该方法主要是采用数学方法来反映客观现象总体数量，对数据精度的要求较高。该校验法主要分为3种：

A. 数学统计

数学统计是基于水生态功能分区结果将不同区域水生生物指标数据进行算术平均值计算与方差分析，根据不同区域内各指标平均值、分布范围、方差值的差异性来检验分区结果是否可行，一般该过程可在Spss等统计软件中完成。

B. 空间聚类

聚类分析在水生态功能区划中可用来对多个空间指标数据构成的聚合图层进行分类。在分析水生生物分布格局中聚类分析可以将数量和功能分布特征相近的区域进行分组划分，特别在一些大尺度流域上广泛使用。聚类分析一般在Spss系统软件上完成，其具体流程为：首先将水生生物原始数据进行标准化，以便数据格式和类型统一；其次通过层次分析法将样点进行分组，最后结果输出和验证。聚类分析在松花江流域鱼类聚类分析中得到了较好验证。

C. DCA

DCA法是一种排序分析方法，是将样方或植物种排列在一定的空间，使得排序轴能够反映一定的生态梯度，从而能够解释植被或植物种的分布与环境因子间的关系。例如，巢湖流域主要采用DCA法对全流域59个野外采样点的底栖动物样本进行DCA分析，然后观察采样点在DCA散点图上的分布，从而直观判断不同组样点对环境因子变化的响应是否存在明显差异，最终实现对巢湖流域水生态功能一级二级分区结果的校验。

DCA法所用软件为Canoco for Windows。它对调查样点的密度分布有要求，须确保落在每一分区的生态调查样点数至少为5个。具体操作过程为：调查数据预处理（生物相对丰度计算）-样点所属分区归属标识-DCA分析-出图-结果分析。通过对水生态功能分区的结果进行校验，可以验证分区结果的合理性，确保数据获取、处理以及分区过程中技术方法合理使用。

②结果对比分析检验：通过对比分区成果与其相关原则来判断结果的合理性。主要是通过列表或图层叠加等方式直观地进行差异性分析。

A. 列表法：通过列表方式，列出不同分区内的相同指标的具体数据，直观地判断分区之间的差异性。

B. 统计分析图：通过聚类分析、DCA分析后输出统计结果图，通过将分区结果图中分组结果与水生态功能分区结果进行直接比对，判断各分区单元内样点分布与水生生物分布格局是否一致，从而得出结论。

（4）技术创新点

该技术应用数学统计和空间统计方法提出了基于浮游生物组成、底栖生物的物种密度、鱼类区系、水生生物多样性指数为依据的流域水生态功能分区校验方法，这是在流域功能分区研究应用中的首次尝试，该技术完善了流域水生态功能分区内容，确保了分区结果的合理性，具有较高的推广应用价值。

（5）技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

实际应用案例

针对松花江、东江、黑河、滇池、洱海、巢湖流域特点，应用浮游生物组成、底栖生物的物种密度、鱼类区系、水生生物综合多样性指数等指标，进行水生态功能分区结果的校验，验证流域特征空间分异与流域水生态系统差异的关联性，验证结果见图7-8至图7-10和表7.1。

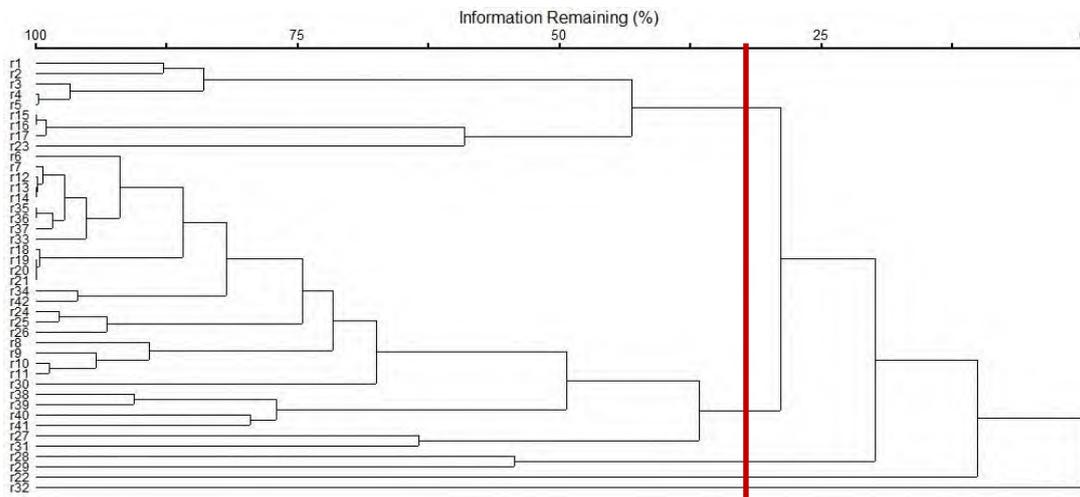


图 7-8 松花江流域鱼类聚类分析

表 7.1 黑河流域不同水生态功能区浮游植物生物多样性指数

序号	水生态功能一级区	流域位置	多样性指数	均匀性指数
1	祁连山山区河流水源涵养水生态区（RB I）	流域上游	0.53~2.33	0.11-0.49
2	河西走廊绿洲平原河流量供给水生态区（RB II）	流域中游	0.00~2.89	0.00-0.61

3	甘蒙戈壁荒漠平原河流域维持水生态区 (RBIII)	流域下游	1.66~2.86	0.35-0.60
---	---------------------------	------	-----------	-----------

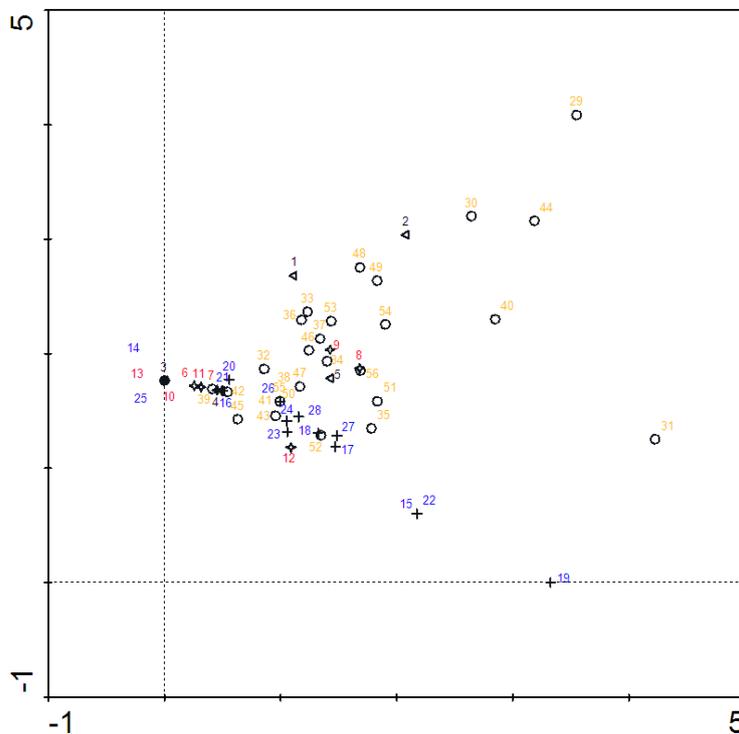


图 7-9 滇池流域底栖动物的生物密度 DCA 分析

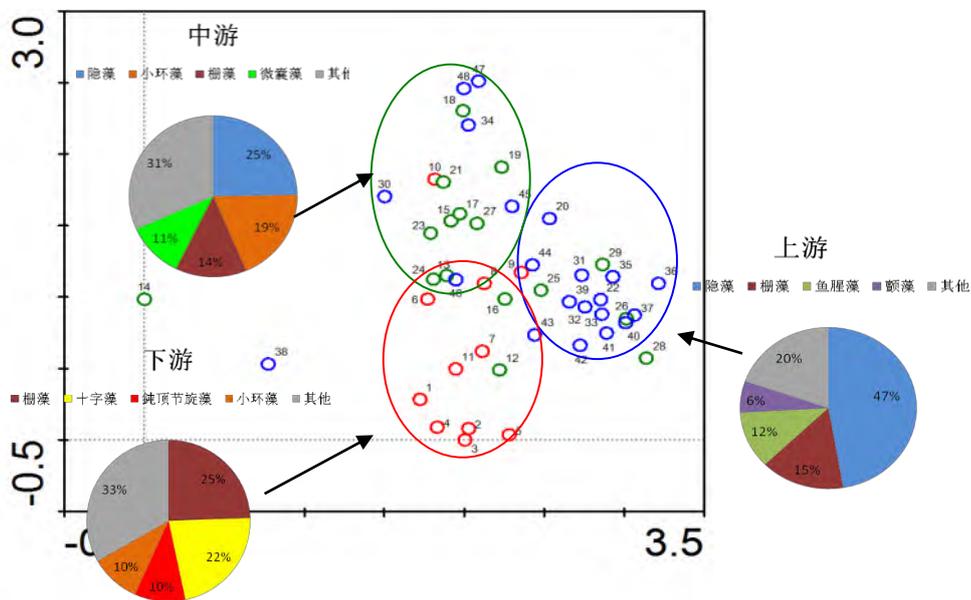


图 7-10 东江流域浮游藻类密度 DCA 分析

注：上游 (U)：RFI 区；中游 (U)：RFII 区；下游 (U)：RFIII



依托课题：

重点流域水生态功能一级二级分区研究（2008ZX07526002）

7.1.4 水生态功能区分类技术

技术发展阶段：推广类技术

适用范围：水生态功能区分类、水生态功能综合评价、主导功能判别

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

生态功能评价是对功能各要素优劣程度的定量描述。通过评价，可以明确功能状况、功能演变的规律以及发展趋势，为流域规划与管理提供依据。指标评价法是建立一套指标评价体系，对具体功能进行指标评价。评价方法主要采用评分法，首先制定水文、生物、化学、物理形态等方面的评价指数，然后为每个指数选取适当的指标，为这些指标制定适当的评分标准，然后调查待评价水体并计算各项指标值的大小，根据评分标准为各项指标打分，将各指标得分进行加权处理后得到每一项指数的分值，再将各项指数得分求和，以累计总分作为评价和分类依据。

（2）工艺流程

- ①以小流域为单元开展生态系统调查，对小流域内的生态系统状况以及滨岸带、河道、水质、水文状况特征进行分析；
- ②根据流域生态系统功能的分类体系和评价原则，结合流域特点，建立流域生态系统功能评价指标体系；
- ③将点位的指标值空间化至河道、湖体内，统计每个小流域单元的指标值，形成小流域评价指标库；
- ④运用多指标评价和专家打分等方法，采用权重加和，对生态系统单项功能进行评价；
- ⑤根据多个单指标分值，综合计算出生态功能的综合指数，进行综合评价。

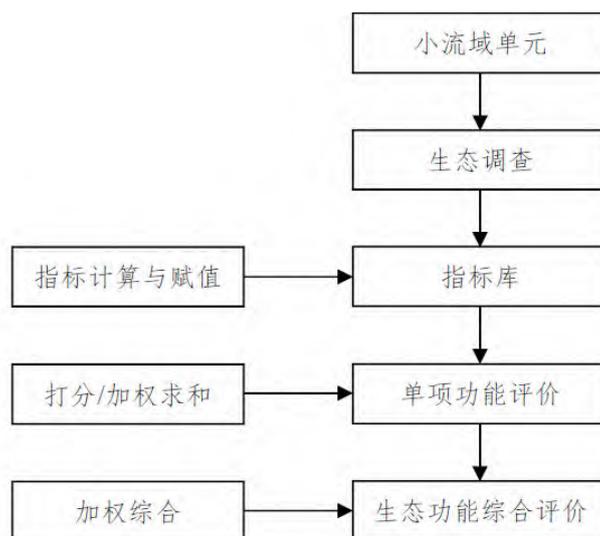


图 7-11 水生态功能综合评价技术路线

(3) 关键技术

水生生物多样性维持功能评价技术

水生生物包括鱼类、无脊椎动物、藻类及细菌等，它们可以直接反映出水体的营养和一些有毒物质的状况。在河段尺度下，水生物多样性的维持功能状况主要选取了底栖动物的耐污性、浮游植物的耐污性和鱼类的丰富性指标。

①底栖动物耐污性（fBEN）：底栖动物对河流环境压力，如生境扰动、水文变异、水质污染有较敏感的反应。本研究选取底栖动物BPI生物学污染指数（Biology Pollution Index）和香农多样性指数（Shannon Diversity Index）来反映这一指标。

底栖动物BPI 生物学污染指数（BPI）

$$BPI = \frac{\log(N_1 + 2)}{\log(N_2 + 2)} + \log(N_3 + 2) \quad (1)$$

式中，N1为寡毛类、蛭类和摇蚊幼虫个体数；N2为多毛类、甲壳类、除摇蚊幼虫以外的水生昆虫个体数；N3为软体动物个体数。

底栖动物香农多样性指数（Hb）

$$H_b = -\sum_{i=1}^S \left[\left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \frac{n_i}{N} \right] \quad (2)$$

式中，S 为群落内的物种数，ni为第i个种的个体数；N为群落中所有物种的个体总数。

②浮游植物多样性（fPHY）：浮游植物是水生生态系统生物资源的基础，作为初级生产者，其种群变动和群落结构直接影响水生生态系统的结构和功能，浮游植物的时空变化特征



与环境因子关系密切，生态系统中环境因子的改变直接作用于浮游植物群落结构，因此，其群落结构特征一定程度地反映了水体生态环境状况。本研究选取浮游植物香农多样性指数（Shannon Diversity Index）和Margalef丰富度指数（Species Richness Index）来反映这一指标。

A. 浮游植物香农多样性指数（ H_p ）

$$H_p = -\sum_{i=1}^S \left[\left(\frac{n_i}{N} \right) \ln \frac{n_i}{N} \right] \quad (3)$$

式中，S为群落内的物种数， n_i 为第*i*个种的个体数；N为群落中所有物种的个体总数。

B. 浮游植物Margalef丰富度指数（ D_p ）

$$D_p = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (4)$$

式中，S为群落中的总数目；N为观察到的个体总数。

C. 鱼类丰富性（fFIS）：

鱼类作为水生（河流、湖泊）生态系统中主要组成部分，对水生态系统中营养和物质循环、水体自净能力，乃至对整个生态系统的结构和功能起着重要的调节作用，而物理栖息地条件差异、生境扰动、水文变异、水质污染等生态环境的变化对鱼类多样性及其群落结构有极大的影响。本研究选取鱼类Margalef丰富度指数（Species Richness Index）来反映这一指标。

D. 鱼类Margalef丰富度指数（ D_f ）

$$D_f = \frac{(S-1)}{\ln N} \quad (5)$$

式中，S为群落中的总数目；N为观察到的个体总数。

表 7.2 生物多样性维持功能单项指标评分分级赋值表

分项	5分	4分	3分	2分	1分
底栖动物 BPI 生物学污染指数（BPI）	≤ 0.1	≤ 0.5	≤ 1.5	≤ 5.0	> 5.0
底栖动物香农多样性指数（ H_b ）	> 3.5	≤ 3.5	≤ 3.0	≤ 2.0	≤ 1.0
浮游植物香农多样性指数（ H_p ）	> 3.5	≤ 3.5	≤ 3.0	≤ 2.0	≤ 1.0
浮游植物 Margalef 丰富度指数（ D_p ）	> 3.0	≤ 3.0	≤ 2.5	≤ 1.5	≤ 1.0
鱼类 Margalef 丰富度指数（ D_f ）	> 3.0	≤ 3.0	≤ 2.5	≤ 1.5	≤ 1.0

根据表7.2对三项指数赋值，并采用加权求和的方式计算生物多样性维持功能综合指数。

$$f_{DIV} = (f_{BEN} + f_{PHY} + f_{FIS}) / 3 \quad (6)$$

式中， f_{DIV} 为生物多样性维持功能评分； f_{BEN} 为底栖动物耐污性评分； f_{PHY} 为浮游植物多样性评分； f_{FIS} 为鱼类丰富性评分；三者等权重；

底栖动物耐污性指标 f_{BEN} 取底栖动物BPI 生物学污染指数BPI 和底栖动物香农多样性指数 H_b 评价结果的算术平均值作为其最终赋值；

浮游植物多样性指标 f_{PHY} 取浮游植物香农多样性指数 H_p 和浮游植物Margalef丰富度指数 D_p 评价结果的算术平均值作为其最终赋值；

鱼类丰富性指标 f_{FIS} 直接取鱼类Margalef丰富度指数 D_f 评价结果作为其最终赋值。

按式4计算， f_{DIV} 将成为一个介于1~5之间的值，其越大表明生物多样性维持功能越好。

水生生境维持功能评价技术

重要生境维持功能状况主要取决于其生境自然性、滨岸带稳定性、生境多样性和生境重要性。

①生境自然性 (f_{NAT})：表示评价单元内河道生境未受人类影响的程度，是生态系统功能评价优先考虑的自然特征。自然性评价实质就是评价人类对自然环境的侵扰程度。显然，自然性高的区域可提供最佳的本底值。一般可根据人为影响的多寡把自然性分成5种类型，完全自然型、轻度受扰自然型、中度干扰自然型、退化自然型和人工修复型。该指标由河道滨岸形态与河道连通性组成。

表 7.3 生境自然性单项指标评分分级赋值表

分项	5分	4分	3分	2分	1分
河道滨岸形态	河道保持原始状态，自然生境完好，河道周围无人工构筑物，如自然的或采用天然材料构筑的护岸，植物生长环境未遭受破坏	河道系统无明显的结构变化，自然生境基本完好，河道周围有极少生态工程，如采用天然材料构筑，河底少量干扰，植物生长环境基本不受影响	河道系统结构发生一定变化，自然生境受到一定程度破坏，河道周围有较多的生态人工工程，如采用人工复合材料，河底一定程度被破坏，如挖沙、清淤，使植物生长环境遭到了一定破坏	河道系统结构发生较大变化，自然生境退化，河道周围有一定的人工工程，如河道大部分采用硬质不透水材料，河底结构破坏较重(大量挖沙)，有少数可见的植被	河道自然状态基本上为人工状态所替代，河道周围有较多的人工工程，如完全采用不透水的硬质材料，人为活动完全破坏河底结构没有植被生长
河道连通性	单元内未见有任何堰坝，生物迁徙未受到任何阻隔	单元内建有少数小型堰坝，小型生物迁徙受到一定阻隔	单元内建有一定数量中小型堰坝，一定数量生物迁徙受到阻隔	单元内建有大量堰坝或者大型水坝和水库，但是建有鱼道系统，生物迁徙受到很大程度的阻隔	单元内建有大型水坝和水库，无鱼道系统，生物廊道受到完全阻隔
类型	完全自然型	轻度自然型	中度干扰自然型	退化自然型	人工修复型



生境自然性指标 f_{NAT} 是根据表7.3中各项评价结果，取其算术平均值作为生境自然性指标的最终赋值。

②滨岸带稳定性 (f_{STA})：滨岸带发挥着提供生境以及为水体提供缓冲区域的作用，从而减缓流域内人类活动对水体生态系统的直接干扰作用。其支持功能的发挥主要取决于滨岸带植被覆盖率以及河岸稳定程度。滨岸带稳定性指标 f_{STA} 是根据表7.4中的各项评价结果，取其算术平均值作为滨岸带稳定性的最终赋值。

表 7.4 滨岸带稳定性单项指标评分分级赋值表

分项	5分	4分	3分	2分	1分
滨岸带植被覆盖度	>40%	≤40%	≤30%	≤20%	≤10%
河岸稳定程度	河岸稳定；没有明显的侵蚀和河岸失稳症状；<5%河岸受到影响	河岸中等稳定；小区域侵蚀严重；5%~20%河岸受到影响	河岸中等不稳定；在洪水季节存在严重侵蚀；20%~40%河道存在侵蚀	河岸不稳定；存在明显的侵蚀状况；40%~60%河道存在侵蚀	河岸严重不稳定；存在明显的泥沼；>60%河道存在侵蚀

③生境多样性 (f_{VAR})：生境多样性是指河道形态具有一定复杂性和河岸带景观多样性，这个指标是生态系统多样性的基础。一般认为生境多样性越高，其生物多样性越高，越有可能成为重要的水生生物栖息地场所。本研究选取河岸带景观多样性来反映这一指标。

河岸带景观多样性 (H')

$$H' = -\sum_{i=1}^m P_i \log 2P_i \quad (7)$$

式中， m 为景观类型的总数目； P_i 为第 i 类景观类型所占的面积比例。

生境多样性指标 f_{VAR} 根据表7.5中河岸带景观多样性指标 H' 的评价结果赋值。

表 7.5 生境多样性单项指标评分分级赋值表

分项	5分	4分	3分	2分	1分
河岸带景观多样性	>1.5	≤1.5	≤1.3	≤1.1	≤1.0

④生境重要性 (f_{IMP})：这是一个广义概念，主要指该生境是否反映区域生态系统的重要特征，以及包括区域范围内的珍稀鱼类、重要文化景观的特征，也可兼顾生境典型性。对于野生生物的栖息地而言，可以根据分析单元中是否包含自然生态系统的关键物种和重点保护物种的关键性生境，以及对其依赖的程度如何，采用分级打分的方法评价。例如某些野生动物的季节性栖息地，都应赋予较高的重要性分值。生境重要性 f_{IMP} 是根据表5中重要生境价值的评价结果作为其最终赋值。

表 7.6 生境重要性单项指标评分分级赋值表

分项	5分	4分	3分	2分	1分
重要生境价值	具有国际和国家一级珍稀濒危保护物种的避难所、保育场、索饵场、产卵场	具有国家二级保护物种的避难所、保育场、索饵场、产卵场	是一般物种的避难所、保育场、索饵场、产卵场	是水生生物的重要活动场所	是水生生物的非重要活动场所

重要生境维持功能 f_{HAB} 采用加权求和的方式计算，计算公式为：

$$f_{HAB} = 0.2f_{NAT} + 0.15f_{STA} + 0.15f_{VAR} + 0.5f_{IMP} \quad (8)$$

式中， f_{HAB} 为重要生境维持功能评分； f_{NAT} 为生境自然性评分； f_{STA} 为滨岸带稳定性评分； f_{VAR} 为生境多样性评分； f_{IMP} 为生境重要性评分；0.2、0.15、0.15、0.5 分别为四者的权重。根据式6计算，重要生境维持功能 f_{HAB} 将成为一个介于1~5 之间的值，其值越大，表明生境功能越好。

水环境支持功能评价技术

水环境支持功能是水体为水生生物提供良好生境质量的基本功能，选取常规水质总体状况来反映这一指标。根据高锰酸盐指数、氨氮、总磷、总氮（湖库考虑）等常规理化参数进行水质评价，水质参数分级赋值见表7.7。

表 7.7 常规水质总体状况单项指标评分分级赋值表

分项	5分	4分	3分	2分	1分
高锰酸盐指数	≤ 2.0	≤ 4.0	≤ 6.0	≤ 10.0	> 10.0
氨氮	≤ 0.1 5	≤ 0.5	≤ 1.0	≤ 1.5	> 1.5
总磷	≤ 0.0 2	≤ 0.1	≤ 0.2	≤ 0.3	> 0.3
总磷（湖库）	≤ 0.0 1	≤ 0.025	≤ 0.05	≤ 0.1	> 0.1
总氮（湖库）	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 1.0	≤ 1.5	> 1.5

水环境支持功能指标 f_{WAT} 是根据表6中常规水质总体状况指标 f_{QUA} 的各项评价结果，取算术平均值作为其最终赋值。计算后， f_{WAT} 将成为一个介于1~5之间的值，其值越大表明水环境支持功能越好。

生态功能综合评估

在生物多样性维持功能（ f_{DIV} ）、重要生境维持功能（ f_{HAB} ）、水环境支持功能（ f_{WAT} ）指标计算的基础上，采用求和的方法，计算生态功能综合指数，根据分级标准，确定生态功能综合等级。计算公式为式7。



$$F_{\text{综合}} = f_{\text{DIV}} + f_{\text{HAB}} + f_{\text{WAT}} \quad (9)$$

式中， $F_{\text{综合}}$ 为生态功能综合得分； f_{DIV} 、 f_{HAB} 、 f_{WAT} 分别为生物多样性维持功能、重要生境维持功能、水环境支持功能单项功能指标值。生态功能综合指数将为介于3~15 之间，其可以按照下列标准进行等级划分（表7）。从高到低可分为4 个等级：I 级分值13~15（不包括13），表示生态功能高；II级分值10~13（不包括10），表示生态功能较高；III级分值8~10（不包括8），表示生态功能一般；IV级分值 ≤ 8 ，表示生态功能低。

表 7.8 生态功能综合评价分级表

功能等级	重要性	综合分值	意义
I	高	≤ 15	水生系统保持自然生态状态，具有健全的生态功能，需要全面保护的区域
II	较高	≤ 13	水生态系统保持较好生态状态，具有较健全的生态功能，需重点保护的区域
III	一般	≤ 10	水生态系统保持一般生态状态，部分生态功能受到威胁，需重点修复的区域
IV	低	≤ 8	水生态系统保持较差生态状态，能发挥一定程度的生态功能，需全面修复的区域

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：太湖流域

①构建了太湖流域水生态功能评价指标体系

表7.9 评价指标体系

一级类型	二级类型	评价指数
生物多样性维持功能 (f_{DIV})	底栖动物耐污性 (f_{BEN})	BPI、多样性
	浮游植物耐污性 (f_{BEN2})	多样性、丰富度
	鱼类丰富性 (f_{FIS})	丰富度
重要生境维持功能 (f_{HAB})	生境自然性 (f_{NAT})	河道滨岸形态
		河道连通性
	滨岸带稳定性 (f_{STA})	滨岸带植被覆盖度
		河岸稳定程度
生境多样性 (f_{VAR})	河岸带景观多样性	
生境重要性 (f_{IMP})	重要生境价值	
水环境支持功能 (f_{WAT})	常规水质 (f_{QUA})	常规水质指标得分

②利用太湖流域2012-2014年水生态监测点位数据，分别计算了太湖流域49个水生态功能区的生物多样性维持功能、重要生境维持功能、水环境支持功能指数值。

③将生物多样性维持功能、重要生境维持功能、水环境支持功能指标值进行加和，计算出生态功能综合指数，根据分级标准，确定各分区生态功能综合等级。

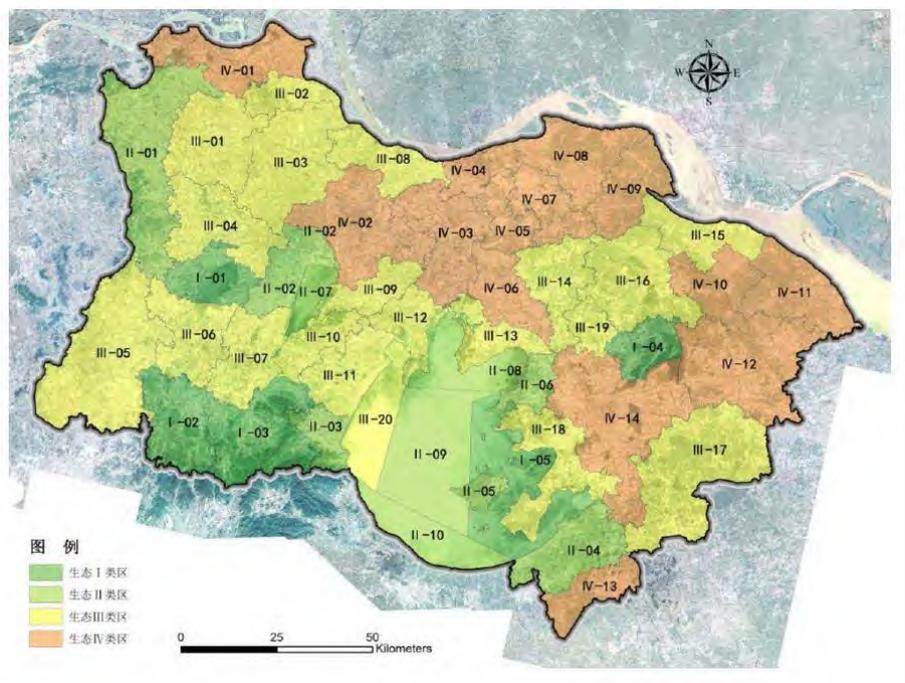


图 7-12 太湖流域水生态功能综合评估

依托课题：

太湖流域（江苏）水生态功能分区与标准管理工程建设（2012ZX07506-001）

7.1.5 基于水生态环境功能分区的太湖流域产业准入与结构优化技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：江苏省太湖流域

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

在研究太湖流域产业结构、土地利用与水生态健康相关关系的基础上，针对江苏省太湖流域水生态环境功能区水生态保护和管理目标，提出差别化的产业结构优化调整建议，通过采用多目标优化、聚类分析、空间耦合、环境绩效分析等技术方法，在示范区开展工业、农业产业结构调整，编制了结构调整的推荐方案与对策建议；通过2000、2010年土地利用遥感解译，分析分区土地利用现状及变化趋势，研究土地利用与水生态的相关性，从水面率、湿地面积、比例等指标分析分区水生生态系统现状及变化趋势，结合江苏省主体功能区规划、江苏省生态红线区域保护规划，制定了太湖流域水生态环境功能区土地结构优化管理措施；



从保护优先、保护与合理开发利用的角度，充分考虑各分区的主要特点及湿地保护面临的主要问题，依据合理布局、突出重点、因地制宜等原则，明确主攻方向，开展生态适宜性研究，确定重点保护水域，提出生态保护与恢复的推荐应用模式，编制完成生态恢复与保护工程指导方案。

（2）工艺流程

①基于水生态环境功能分区的太湖流域产业准入与结构调整。根据课题研究成果，太湖流域（江苏）划分为49个水生态环境功能分区，根据生态健康状况分为生态 I -IV级共四个等级，其中 I 级区5个、II级区10个、III级区20个、IV级区14个。课题调查了太湖流域产业结构现状和历史趋势、现有产业政策，总结目前存在的问题；开展了流域及典型园区水质与水生态监测，分析了水质和水生态之间的相关关系；解析了各类污染物排放的行业来源，识别出对水生态健康影响较大的行业及其分布情况。在此基础上，结合现有政策要求、各分区水生态管控、空间管控和物种保护目标，制定了太湖流域水生态环境功能分区产业结构优化调整措施，提出了化工、印染、电镀及含电镀工序的电子信息等重点行业总体调整方案和基于 I -IV级水生态环境功能分区的分级优化调整建议（在生态III级、IV级区新建项目实行污染物排放等量或减量置换；在生态 I 级、II级区新建、扩建产业开发项目逐步实现污染物排放减二增一）。在流域产业准入与结构调整方案的指导下，课题在示范区开展了工业、农业结构调整。对于工业产业结构调整，主要从行业层面和空间管控层面两个方向进行，行业层面主要通过环境绩效分析、聚类分析和价值效率分析来确定行业准入及调整对象，采用多目标优化方法来优化发展模式；空间管控层面主要从水生态环境功能分区、分区负荷及容量压力、水生态健康压力及生态红线等方面进行耦合，确定空间调整对象和空间准入区域，提出空间管控要求，形成了工业产业结构调整的建议方案与对策建议，并得到示范区管理部门采纳，完成了30项以上重污染企业的关停并转等结构调整。对于农业产业结构调整，主要对示范区内种植业和畜禽养殖业的结构比例进行调整，对农业空间布局进行优化，提出了农业产业结构相应的推荐调整模式，主要包括种植业因地制宜生态拦截模式、小型分散式畜禽养殖管理减排处理模式、小型规模化分散养殖集中收集处理及原位资源化利用模式、大型规模化养殖原位收集处理及资源化利用模式。

②基于水生态环境功能分区的土地利用结构优化。通过2000、2010年土地利用遥感解译，分析分区土地利用现状及变化趋势，研究土地利用与水生态的相关性，从水面率、湿地面积、比例等指标分析分区水生态系统现状及变化趋势。结合江苏省主体功能区规划、江苏省生态红线区域保护规划，对分区与水生态系统相关的生态红线进行优化调整，校核生态红线保护

区域内是否存在不符合相关保护要求的土地利用情况，提出了水生态保护空间（禁止开发区域）的管控建议，制定了太湖流域水生态环境功能分区土地结构优化管理措施，主要包括：严格禁止人工湿地、河流湿地、湖泊湿地转为建设用地，控制流域重点分区的城镇建设用地总量，提高建设用地利用率；加强水域管理与保护，防止现有水域面积衰减，并采取有效措施，确保各分区内基本水面率不降低；校核生态红线保护区域内是否存在不符合相关保护要求的土地利用情况，提出水生态保护空间的管控建议；将各分区水生态保护物种（植物、动物）或栖息地建立水生态物种保护区。

③基于水生态环境功能分区的水生态系统保护与恢复。从保护优先、保护与合理开发利用的角度，充分考虑各分区的主要特点及湿地保护面临的主要问题，依据合理布局、突出重点、因地制宜等原则，提出了推进生态补偿政策、打造太湖生态保护廊道、建立完善水生态系统保护的长效管护机制等水生态保护和恢复工程管理及政策建议。在示范区开展了生态适宜性研究，确定重点保护水域，提出了水生态保护与恢复的应用模式，重点推荐了生态湿地原位恢复重建模式及农业面源排水区域综合处理及养分回用模式，编制完成了生态恢复与保护工程指导方案。针对不同生态功能类别，提出了差异化的水生态环境功能分区保护管理建议：重要物种保护功能——侧重于国家重点保护物种、濒危级保护物种、易危级保护物种等重要物种的保护；重点保持生态系统完整性，保护当地物种的原始种群，保持鱼类群落、生境，排除人为物种引进。对处于濒危状况或受到人类活动潜在威胁的特有物种，重点开展针对性的养殖和人工放流；重要生境维持功能——侧重于河道滨岸形态、河道连通性、河岸带植被覆盖度、河岸稳定性、河岸带景观多样性的保护和改善；重点通过生态清淤、河岸带修复、生态护岸、河道空间再造、河道内栖息地的修复、生境物种恢复等措施实现河流生境保护和修复，达到河流生态功能的良性运行；生物多样性维持功能——侧重于鱼类丰富度的提升。重点保持生态系统完整性，保护当地物种的原始种群，保持鱼类群落、生境，排除人为物种引进。重点通过强化大中型经济鱼类的增殖放流，同时，通过浮游食性鱼类控藻和鱼类种群结构优化，以实现太湖流域渔业的可持续发展和湖泊生态环境的恢复；水环境维持功能侧重于水质改善。重点通过底泥疏浚、生态护岸等工程，达到水质改善的目的。

（3）技术创新点及主要经济技术指标

成果从产业准入与结构调整、土地利用结构优化、生态保护与恢复三个方面提出了基于水生态环境功能分区的流域水生态健康管理方案，编制了示范区工业产业结构调整优化方案、农业产业结构调整优化方案和生态恢复保护优化方案，并指导了30多项依托工程完成工业企业关停并转迁升级改造、10项依托工程完成农业畜禽养殖综合治理、农田氮磷拦截、支



滨护坡生态化改造及生态湿地恢复与保护，取得了明显的环境和社会效益，为实现示范区水质管理向水生态管理转变提供了重要依据与技术支持。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：宜兴市环境保护局、武进区环境保护局

已在宜兴市、武进区进行示范。

依托课题：

太湖流域（江苏）水生态功能分区与标准管理工程建设（2012ZX07506001）

7.2 水生态保护目标制定技术

7.2.1 水生态功能三级区综合管理目标体系构建技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：辽河流域水污染防治

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

在“十一五”研究成果的基础上，遵循“分区、分类、分级、分期”的原则，针对辽河流域水生态功能三级区，按照不同类型水生态功能区，开展辽河流域水生态调查，诊断辽河流域水生态功能三级区“自然-社会-经济”复合系统特征，调整并修正“十一五”课题提出的三级水生态功能分区方案，进而评估辽河流域水生态功能三级区水生态安全，判定水生态安全等级；在此基础上，分区、分类制定水生态功能三级区生物完整性、物理完整性和化学完整性管理目标，结合水环境质量和产业准入制度等，构建水生态功能三级区综合管理目标体系。

（2）工艺流程

依据辽河流域水生态系统具有的服务功能，根据气候条件、水文条件、生态系统状况和当地经济社会发展现状等，对辽河流域水生态安全进行评价，得到较安全、基本安全、不安全三种类别。采用辽河流域水生态安全评估的评价结论，同时选择近二十年来辽河流域部分三级区清洁时期水文、生态状况与管理目标比较接近的某一年作为参照年进行历史参照，并针对辽河流域相近的多个不同三级区进行对比分析，使多个生态管理目标朝着优良生态系统

的参照三级区方向发展进行生态类比。最终综合确定辽河流域水生态功能三级区管理目标。

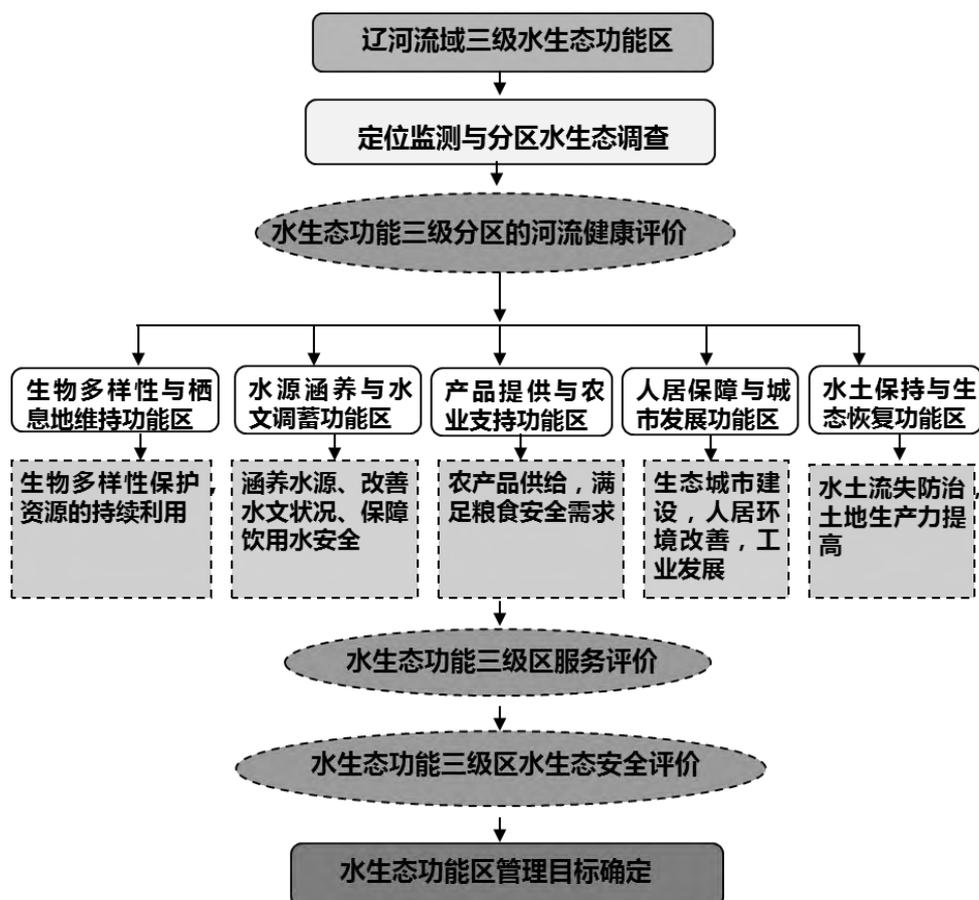


图7-13 工艺流程图

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

首先依据辽河流域水生态系统具有的服务功能，并且根据气候条件、水文条件、生态系统状况和当地经济社会发展现状等，对辽河流域水生态安全进行评价，得到较安全、基本安全、不安全三种类别。

其次采用辽河流域水生态安全评估的评价结论，同时选择近二十年来辽河流域部分三级区清洁时期水文、生态状况与管理目标比较接近的某一年作为参照年进行历史参照，并针对辽河流域相近的多个不同三级区进行对比分析，使多个生态管理目标朝着优良生态系统的参照三级区方向发展进行生态类比。

最终在生态学原则、协调发展原则、尊重历史的原则以及动态性原则四种原则基础上，在生态安全评估法、生态类比法、历史参照等方法指导下，结合《辽宁省水污染防治工作方案》，制定辽河流域水生态功能区管理目标。从水质（COD_{Cr}、氨氮、溶解氧、总氮、总磷）、保护物种（鱼类、鸟类、藻类、底栖生物）、生态流量、河岸植被缓冲带完整性等多方面指



定保护目标。并且充分考虑辽河流域水生态功能三级区不同服务功能不同，监测指标不同这一特点。以农业发展为主导功能的区域需考虑主要农作物测土配方施肥覆盖率，畜禽粪便养分还田率，主要农作物肥料利用率，主要农作物病虫害绿色防治覆盖率，主要农作物农药利用率，化肥施用总量、农药施用总量等指标。以城市发展为主导功能的区域除考虑上述部分指标外，还需考虑城市污水处理率；城市雨污分流比例；新建城区硬化地面，可渗透面积；城市再生水利用率；径流水、尾水景观处理率；城市建成区黑臭水体；污泥无害化处置率；公共供水管网漏损率等指标。以生物栖息地保护为主导功能的区域除考虑上述部分指标外，还需考虑沼泽、河流水域和滩涂面积；湿地面积和单位面积生物量；一类保护动物数量；二类保护动物数量等指标。以水文调蓄为主导功能的区域除考虑上述部分指标外，还需考虑生态蓄水位；生态库容等指标。以水源涵养为主导功能的区域除考虑上述部分指标外，还需考虑乔灌草结构；水源涵养林水源涵养功能等指标，功能性的确定管理目标。并且以近期目标（2016-2020）、远期目标（2021-2030）分期确定水生态功能目标。目标的确定主要依据水生态功能三级区水生态功能确定，最终综合确定辽河流域水生态功能三级区管理目标。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：辽宁省辽河流域水污染防治工作领导小组办公室

由辽宁石油化工大学承担的《辽河流域水生态功能区生态安全评估与管理目标》课题，通过辽河流域水生态系统特征分析，提出了辽河流域水生态功能三级分区方案，对各水生态功能三级区水生态健康进行评价，并定量评估各三级区水生态主导服务功能及水生态安全等级，在此基础上提出了水生态功能三级区水生态管理目标与方案。

该课题提出的辽河流域水生态功能三级分区、水生态系统服务功能、水生态健康评价、水生态管理目标与方案等研究成果在辽河流域水污染防治、流域水生态系统功能提升和水生态建设中得到了应用。课题研究成果明确了辽河流域水生态功能三级区主导生态功能、水生态健康状况和水生态安全级别，基于水生态功能三级区水生态系统特征提出的水生态管理目标与方案为《辽宁省水污染防治工作方案》的有效推行，以及辽河流域水生态环境质量全面改善提供了重要的科技支撑。

依托课题：

辽河流域水生态功能区管理体系研究与综合示范课题（2012ZX07505-001）

7.3 水生态承载力评估与优化调控技术

7.3.1 流域水生态承载力多指标评价方法技术

技术发展结果：示范推广类，原创/集成

适用范围：流域规划制定，流域尺度的污染物治理方案制定

主要技术内容和关键技术：

(1) 技术原理

流域生态系统是以二元水循环为驱动的“水资源-水环境-水生态-社会经济”互动的复合系统，流域水生态承载力评价须考虑流域内的社会经济与生态环境之间的耦合和协同进化关系。以河流生态学理论及复合生态系统调控理论为指导，提出了社会经济-河湖复合生态系统的概化模型，明确了水资源在社会经济系统内的“供-用-耗-排”流动及其伴生的污染物排泄的耦合机制，界定了以水环境容量及生态流量为核心的约束条件，提出了流域水生态承载力概念。以驱动力-压力-状态-响应为框架，筛选了可以良好描述系统结构的推荐指标集和相应量化计算方法，形成了流域水生态承载力多指标评价方法。

(2) 工艺路线

该技术包括三部分技术内容。首先，根据理论分析，提出了二元循环驱动下的社会经济河湖复合生态系统概化模型。其次，基于DPSIR框架，筛选了描述该复合生态系统结构特征的相应指标。最后，采用层次分析法，确定各指标层、准则层权重系数和综合加权公式，实现对流域水生态承载度的度量。技术路线图见图7-14。

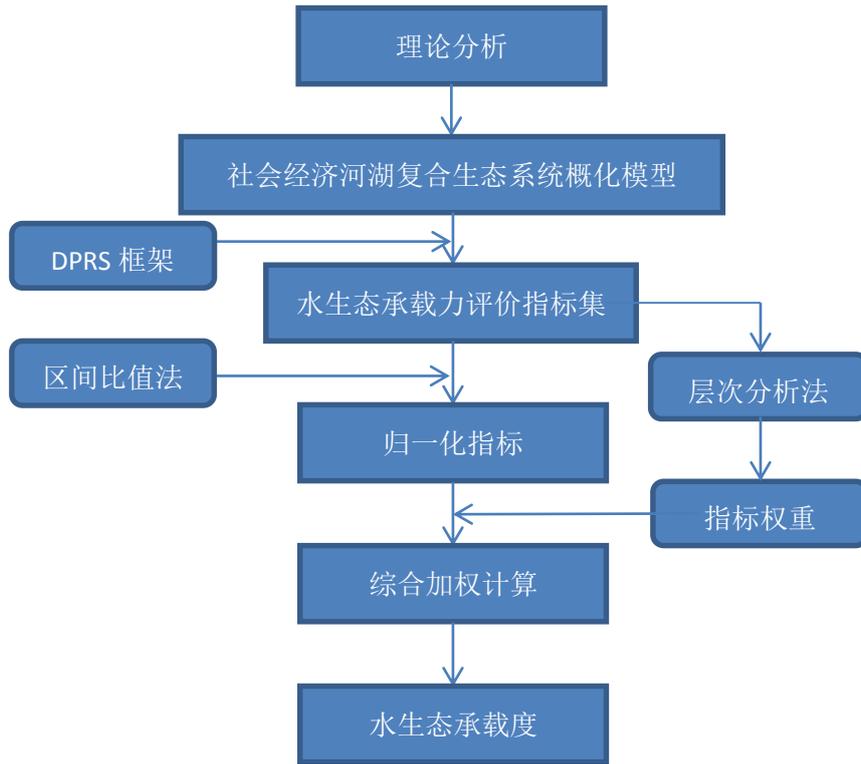


图 7-14 流域水生态承载度计算技术路线

（3）关键技术方法

① DPSR框架指导下的指标选取

24项指标的水生态承载力推荐指标集。其中：

驱动力指标6项：人口密度、城镇化率、单位国土面积经济强度、人均GDP、第三产业占GDP比重、重点污染工业行业比重；

压力指标4项：包括单位GDP用水量、人均生活用水量、单位工业产值污染物排放量、人均生活排污量；

状态指标4项：包括生态需水保证率、水环境容量利用率、栖息地面积满足率（鱼类）、植被覆盖率；

响应指标10项：包括农村生活污水处理率、城镇生活污水处理率、工业废水处理率、中水回用率、农村生活污水排放标准、污水处理厂排放标准、工业废水排放标准、工业用水重复率、节水灌溉面积比、污水治理投资占GDP比例。

②水生态承载力量化模型

考虑到各个指标对水生态承载力的影响力大小不同，引入总权重 $w_i(i=1,2,n)$ 表示各分指标对总体的影响程度。则各方案水生态承载度E可以用以下公式计算：

$$E = \sum_{i=1}^n W_i S_i$$

s_i 为*i*指标的分数值， w_i 为*i*指标在系统中层次总权重。

根据可承载隶属度值大小，可以对整个系统的“可承载”状况进行分类，见表7-10。

表 7.10 承载类型的分类

承载度	0~0.2	0.2~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
类型	不可承载	弱可承载	基本可承载	良好可承载

由于水生态承载力系统非常复杂，影响因素众多，系统动力学在研究复杂系统的行为，在处理高度非线性、高阶次、多变量、多重反馈问题方面具有优势；隶属度对水生态承载力的描述直接明了，在确定各项指标权重时，采用层次分析法弥补了均权数法和人为方法使其结果受人为因素影响的不足

（4）技术创新点

首次提出并界定了流域水生态承载力概念及内涵，引入了水环境容量、生态需水保证率、栖息地满足率等生态环境约束指标，在传统的水资源承载力、水环境承载力等强调水量、水质约束的基础上，整合了反映水生生物需求的约束，更好地体现了水量、水质、水生态的“量、质、序”的递进约束。

（5）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：中国水利水电科学研究院

以太子河流域作为实例。太子河流域生态环境总体特征为：工农业较发达，水资源短缺，水质污染严重，水生态严重破坏。根据太子河流域生态环境特征，基于“DPRS”框架方法构建太子河流域水生态承载力评价指标体系，共有12个指标；利用层次分析法，确定了太子河流域水生态承载力指标体系的权重（表7.11）。

表 7.11 太子河流域水生态承载力评价指标体系

准则层	分项	指标	指标权重
驱动力	人口	城镇化率 C1	0.184
	经济	人均 GDPC2	0.036
压力	用水	万元 GDP 需水量 C3	0.058
	排污	万元 GDP 污水排放量 C4	0.161
状态	水资源	人均水资源可供量 C6	0.058
		供水量与需水量之比 C7	0.058



	水环境	COD 环境容量利用率 C11	0.096
		氨氮环境容量利用率 C12	0.222
	水生态	森林覆盖率 C8	0.067
		河流生态环境需水率 C9	0.106
		栖息地面积 C10	0.043
响应	治污	万元 GDP 污水处理量 C5	0.085

应用上述指标体系，对太子河流域水生态承载力进行预测，结果表明：综合方案均比原规划方案和其他单项方案的水生态承载度有所提高，其中，观音阁下游区、茭窝水库区、汤河区、柳壕河区提高效果较为显著，北沙河区、辽阳城区改善程度次之，而本溪城区、鞍山城区的改善效果较为有限。各单项方案中，方案3的调控效果均为最好，次优的方案在各水生态分区各有不同。不同调控方案下2007~2015年各年的水生态承载度结果见下图。

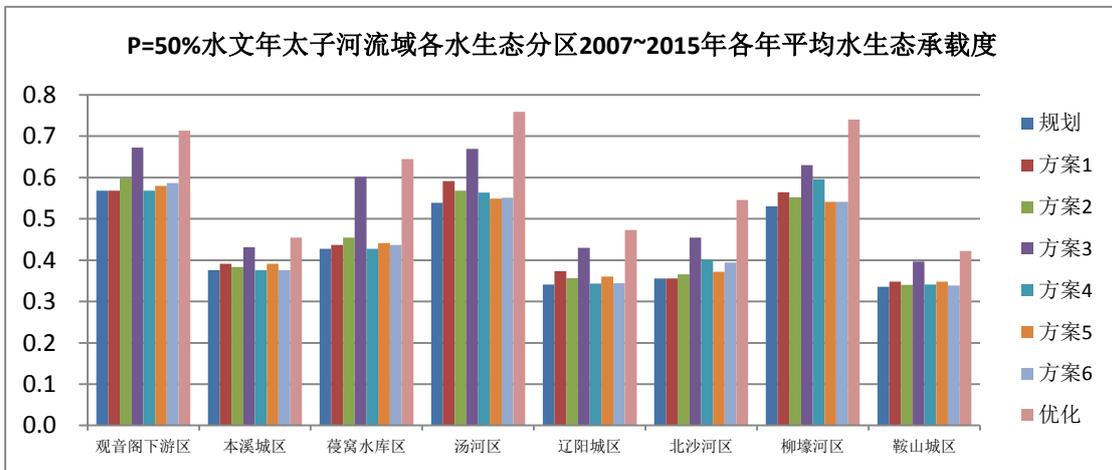


图 7-14 P=50%水文年太子河流域各水生态分区各年平均水生态承载度

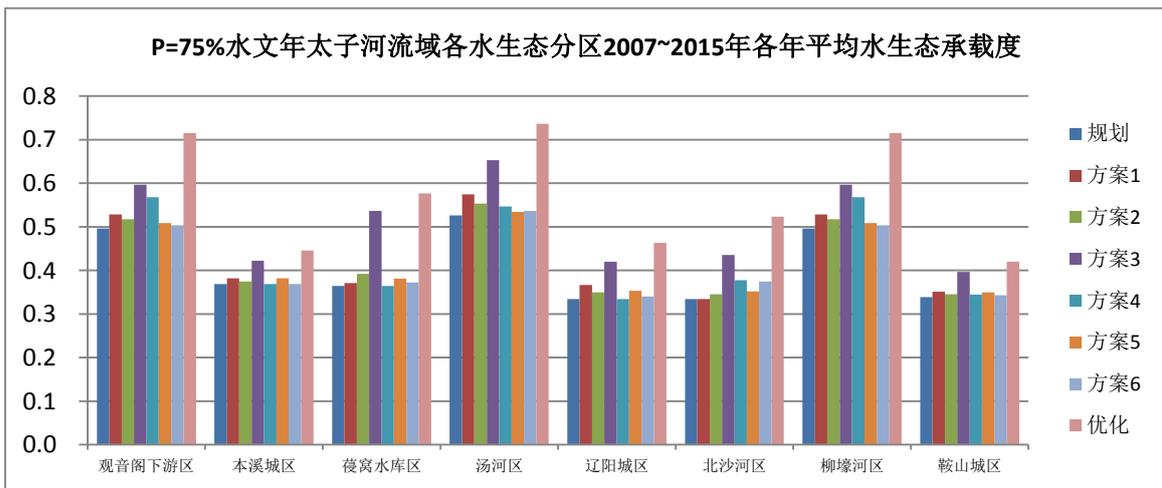


图 7-15 P=75%水文年太子河流域各水生态分区各年平均水生态承载度

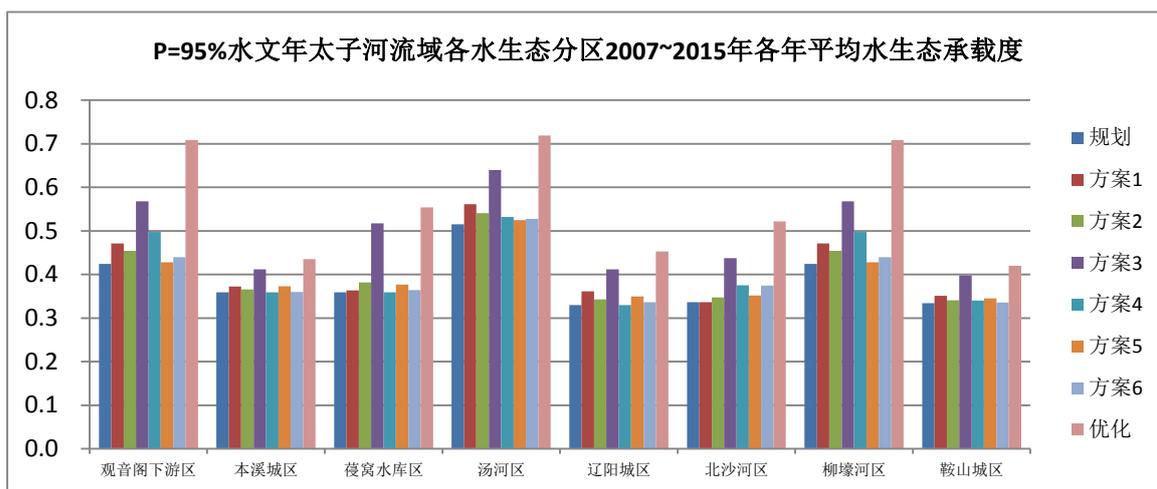


图 7-16 P=90%水文年太子河流域各水生态分区各年平均水生态承载度

依托课题:

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广 (2012ZX07506008)

7.3.2 流域水生态承载力评估技术

技术就绪度评价等级: 6级

适用范围: 适用于我国境内流域水生态承载力评估、产业结构和布局优化调控

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

以流域为单元, 构建了基于系统动力学的流域水生态承载力评估模型 (WECC-SDM), 包含6个子模块, 即人口和经济子模块、水资源子模块、水环境子模块、土地利用子模块、水生态子模块和承压分析与模拟调控子模块。模型评估和模拟的主线是水生态系统健康需求-水生态支持力约束关系、社会经济驱动力-水生态压力响应关系和水生态压力-支持力承压关系三个主要作用关系。水生态子模块的功能是根据问题诊断识别主要承压因子, 确定约束关系, 作为计算水生态支持力的输入; 人口和经济子模块输出驱动力因素, 结合响应关系, 一同作为计算水生态压力的输入; 中间3个子模块作用是承接载体, 计算并输出水生态支持力和压力; 最后基于承压关系利用承压分析与模拟调控子模块, 通过动态模拟输出评估结果。建立了评估指标体系, 将表征各子系统的评估指标输入WECC-SDM模型, 依据承压度指数对水生态系统的承载状况做出判断, 计算水生态承载力。

(2) 技术流程

以“水生态问题诊断-水生态系统支持力和压力因子识别-评估模型构建与验证-承压状态判定-动态模拟-优化调控”为主线进行流域水生态承载力评估与优化调控。



①水生态问题诊断。进行资料收集和调研，分析研究区域复合水生态系统特征，开展水生态调查与诊断，获取相关信息和数据。本研究确定了涵盖生物、化学和物理三方面的水生态问题诊断方法。

②水生态承压因子识别。结合研究区域复合水生态系统特征和水生态问题诊断结果，确定评估单元的水生态系统要素及其因果关系，识别承压因子。

③ WECC-SDM构建与验证。建立基于系统动力学原理的流域水生态承载力评估模型（WECC-SDM），包含6个子模块，即人口和经济子模块、水资源子模块、水环境子模块、土地利用子模块、水生态子模块和承压分析与模拟调控子模块。采用评估单元的相关历史数据对WECC-SDM进行验证。

④动态评估。利用WECC-SDM进行流域水生态承载力动态模拟评估，根据评估结果分析流域水生态系统的承压状况并计算水生态承载力。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

①以复合水生态系统承压作用分析与模拟为主线，通过水生态问题诊断识别复合系统中的主要矛盾和关键问题，直接聚焦承压关系的薄弱环节，提高了水生态承载力评估的针对性和有效性。

②基于系统动力学建立的水生态承载力评估模型是建立在对复合水生态系统主要耦合关系进行系统模拟基础之上，可以实现系统处于均衡状态下反馈回路的求解问题，并且符合水生态承载力的内涵、特征。

③实现了水生态承载力动态评估与调控，特色是在评估过程中考虑了人口、经济、土地利用、用水强度、排污强度等因素的动态变化特征，并纳入模型模拟。

④基于水生态承载力评估结果，采用情景分析法建立产业结构优化情景方案集，通过WECC-SDM模拟可实现多方案比选。

主要技术经济指标：

围绕水生态承载力评估需重点考虑的三个关系，从社会经济规模（驱动力指标）、水生态压力（压力指标）、水生态支持力（支持力指标）、水生态系统健康状况和需求（约束指标）以及影响驱动力-压力响应关系的人类响应措施（响应指标）5个方面分析水生态承载力评估涉及的主要指标，主要指标汇总如表7.12所示。

表 7.12 水生态承载力评估涉及的主要指标

大类	小类	主要指标名称
社会经济规模（驱动力指标）	人口	人口数量、农村人口数量、城镇人口数量、城镇化率
	经济	GDP、三次产业(分行业)增加值、人均GDP
水生态压力（压力指标）	用水	生产用水、生活用水和生态环境用水
	排污	来自生活和生产的主要污染物入河量
	占地	土地覆被变化、滩涂水域或河岸带占用
水生态支持力（支持力指标）	其它压力	水生生物过量捕捞、筑坝等
	水资源供给	水资源可利用量
	水环境纳污	水环境对主要污染物的容纳能力
	其它支持力	水产品供给、航运、景观、娱乐等
水生态系统健康状况和需求（约束指标）	水量需求	河流生态需水量
	水质要求	满足生物健康的水质要求（水生生物水质基准）
	栖息地需求	河流物理生境质量
	健康状况	生物完整性
	技术进步	清洁生产技术、污染防治技术
人类采取的响应措施和效果（响应指标）	结构调整	产业结构调整、污染预防
	意识提高	公众参与、习惯改善
	管理措施	行政法规、经济政策、标准规范
	工程措施	节水措施、治污措施、污水回用、生态修复
	响应效果	用水强度、排污强度和生态破坏强度

（4）技术来源及知识产权概况

WECC-SDM水生态承载力评估软件V1.0，获软件著作权（软著登字第1611571号）。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院，铁岭市环保局，常州市环境科学研究院

本项技术成果以辽河流域铁岭市、太湖流域常州市为研发和应用的示范区，为两市地方政府编制经济社会发展和环境保护“十三五”规划提供了技术支撑。

铁岭市：①铁岭市主要水生态支持力因子为水资源可利用量（S1）和氨氮水环境容量（S2）。水资源可利用量与社会经济用总水量形成一组承压关系（P1-S1），氨氮水环境容量与氨氮入河量构成另一组承压关系（P2-S2）。②铁岭市社会经济用水量和氨氮入河量均超过允许值，分别超出6%和52%。采用短板效应取分项中的最大值作为最终结果，铁岭市水生态承载度为1.52，承载状况现状判定结果为超载。③铁岭市水生态承载力呈现出显著的时变特征，总体变化趋势是随社会经济发展水平的提高而增强，2030年适宜承载的人口数量和GDP分别达到基准年适宜承载值的1.4和3.6倍。

常州市：①常州市主要水生态支持力因子为水资源可利用量（S1）和COD水环境容量（S2）。水资源可利用量与社会经济用总水量形成一组承压关系（P1-S1），COD水环境容量与氨氮入河量构成另一组承压关系（P2-S2）。②常州市社会经济用水量和COD入河量均



超过允许值，分别超出6%和20%。常州市水生态承载度为1.20，承载状况现状判定结果为超载。③常州市2025年超载趋势加重，到2050年水环境承载力处于可承载状态。从空间格局上分析，存在整体超载，但局部可承载的情况，同时2050年总体水环境承载力可承载情况下，存在局部空间单元不同程度的超载情况。

本项技术具有普适性，可为我国境内流域地区开展水生态承载力评估和优化调控相关工作，编制流域地区产业发展、环境保护规划提供科学依据。

依托课题：

控制单元水生态承载力与污染物总量控制技术与示范（2013ZX07501005）

7.4 生态流量保障

7.4.1 三峡水库及上游梯级枢纽水质水量联合调度优化模型体系

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：适用于考虑生态目标的水库水质水量优化调度，分析减缓水华事件发生的水库调度模式

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

利用系统理论、水库调度、多目标决策等方法，考虑水质水量联合调度的多层次多维特征，结合库区水质模型预测，构建了水质水量联合调度的多目标耦合模型。利用现有的水利水文观测网站及数据信息，构建了不同种类的分类数据库及知识库、调度库等，结合不同信息源的多源数据同化与信息融合技术，采用分布式、开放网络结构，突破了水库水环境安全运行及预警平台的关键整合技术，建立了基于现有观测数据的三峡库区水质水量联合调度监控与预警技术。本技术综合考虑了三峡水库入库径流特征、流速、流量、入库污染浓度和通量等的响应关系，依据各梯级联合调度方案对三峡库区水环境产生的累积影响规律，在传统的水库运行安全和经济效益最优为目标的水库调度方案中，加入了三峡库区水环境水生态目标和水库调度风险预警，实施上游梯级水库的联合调度。

（2）技术流程

首先收集现有观测数据，构建包括分析溪洛渡水库、向家坝水库与三峡水库天然入库径流量的时空分布特征以及梯级水库群联合调度运行的研究成果的，涵盖水库调控能力、水位、下泄流量、水量平衡、发电出力、水质保护与水生态修复以及调度规则等在内的数据；基于

已有数据和水库调度规则，研究供水、发电、航运、水环境与水生态保护调度方式的转换与耦合的控制条件，确定水库水量水质联合调度的目标和约束条件，确定综合考虑水质-水量-水生态的多目标函数表述形式；然后利用具有鲁棒性的多目标遗传算法NSGA-II对调度方案中的决策变量进行参数优选，从而建立了复杂约束条件下多维多目标水质水量联合调度优化模型；最后基于多层次分析法，确定调度的风险评估方法，进行调度的风险评估。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

一方面，综合考虑了三峡水库入库径流特征、流速、流量、入库污染浓度和通量等的响应关系，依据各梯级联合调度方案对三峡库区水环境产生的累积影响规律，在传统的水库运行安全和经济效益最优为目标的水库调度方案中，加入了三峡库区水环境水生态目标，实施上游梯级水库的联合调度。另一方面，结合三峡库区水质水量和水生态同步监测结果，以及库区气象、水动力、水质、水生态数学模型，在保障防洪、发电、灌溉、供水、航运等效益的基础上，兼顾水环境水生态目标，构建了优化调度模型和规避调度风险的多层次风险评估模型，能确保水量数值联合调度的可行性、可靠性和科学性。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

授权发明专利4项，软件著作权1项。

①一种流域大尺度水系分布式水动力模型的并行计算方法，属于自主研发，发明专利，已授权。

②复杂河道地形快速精细生成方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权。

③一种河流二维水质数值模拟模型计算网格优化绘制方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权。

④复杂河网干支流交汇口网格绘制及江心洲网格处理方法，属于自主研发，发明专利，已申请未授权。

三峡水库运行调度安全评估与监控预警平台 V1.0。

实际应用案例：

应用单位：长江水利委员会水文局

该套技术体系已经集成在课题重要示范管理平台，三峡水库运行调度安全评估与监控预警业务化运行平台，基于该技术体系，通过确定调度目标和现状条件下的来流水量，进行调度方案的设置，并利用设置的调度方案运行模型，获得不同调度方案下的水质变化情况，进而可评估调度的效果。



依托课题：

三峡库区及上游流域水环境风险评估与预警技术研究与示范（2013ZX07503001）

7.4.2 太湖-河网水环境安全调控方案分析计算与遴选技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：太湖流域平原河网地区

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

太湖流域为典型的平原河网地区，自然地理及水文条件特殊，人工控制建筑物星罗棋布，水流运动极其复杂。根据流域平原河网地区特点，从流域产汇流，产污以及河网水量水质迁移机制出发，构建了太湖流域模型。核心模型包括：山丘区水文模型、平原区水文模型、零维一维二维河网水动力模型、堰闸泵水利工程模拟模型、污染负荷模型、零维一维二维水质模型以及来水组成模型，同时能够对以上任意模型组合的水量、水质的耦合联解。按水量、水环境、水生态方面不同目的的水环境安全指标，构建流域分区代表点的调控规则。调控方案以不同河网水位、不同河网流速、不同河网流向、不同污染物释放降解系数为初始状态，以不同降雨、不同上游来水、不同潮位为边界输入，以重要闸泵水利工程为调控手段，调控代表断面的水位、水质浓度在水环境安全范围以内，组成流域水环境安全调控方案集合，借助偏最小二乘及人工神经网络分析工具，对太湖-河网水环境安全调控方案分析计算与遴选。

（2）技术流程

基于太湖流域河网水量水质数学模型，进行河网水环境安全调控方案研究，分析河网水质和水生态安全与河网格局、水动力、水资源利用等的关系，建立河网水环境安全的关键约束条件，以气象降雨、引排水量、河网水位、河网水质COD/BOD/TP/TN/NH₃-N/DO浓度为输入，构建流域河网水质、水生态安全的调控方案，进行不同调控情景下水环境安全模拟计算，将不同场景的调控方案成果进行保存。对保存的方案计算成果补充实测资料，采用偏最小二乘法分析水环境安全调控目标与闸泵调度工程之间的相关性，获得相关性较高的组合，采用人工神经网络工具构建太湖及主要分区代表点水环境安全与闸泵工程调度的相关模型，快速形成初步可行的调度方案，将形成的初步方案利用太湖流域河网水量水质数学模型进行验证优化调整，从而得出满足要求的太湖河网水环境安全的可行调控方案，根据不同水环境安全调控目标构建调度方案，建立太湖河网水环境情景—调度方案库。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点:**①不同调度方案结果生成技术**

在现有太湖河网水量水质数学模型的基础上,以不同气象降雨、沿长江杭州湾引排水量、河网水位、河网水质条件为输入,以重要闸泵水利工程为调控手段,构建太湖河网水量水质数学模型调度方案,采用数值模拟求解太湖流域河网水量水质模型方程,得到各调度方案下的太湖及主要分区代表点的水位及水质COD/BOD/TP/TN/NH₃-N/DO浓度,结合流域代表站点实测的水量水质及降雨、引排及闸泵工程调度资料,形成调度方案结果库。通过数学模型对不同气象降雨、沿长江杭州湾引排水量、河网水位、河网水质条件及闸泵水利工程不同调度进行组合模拟计算,丰富了不同条件下的闸泵水利工程调度结果资料,解决了研究太湖水环境安全调控方案缺少实测调度资料,尤其缺少各种极端条件组合下实测调度资料的难题。

②结合偏最小二乘法和人工神经网络模型的调度方案分析计算与遴选技术

通过数学模型模拟能够获得海量调度方案结果,这些方案结果需要进行分析 and 筛选才能形成可行的水环境安全调控方案。采用人工对海量调度方案结果进行对比分析工作量极大,而且对比的标准不够客观全面。采用偏最小二乘法可以快速建立水环境安全调控目标与闸泵调度工程之间的相关模型,分析相关性较高的闸泵调控因子组合,然后对这些闸泵调控因子采用人工神经网络模型工具,构建太湖及主要分区代表点水环境安全与闸泵工程调度的神经网络相关模型,可以快速形成初步可行的调度方案。对初步可行调度方案带入太湖河网水量水质数学模型,修正优化相关调度,就可以得到较优的水环境安全调控目标构建调度方案,针对不同水环境安全调控目标,就可以建立太湖河网水环境情景—调度方案库。

③太湖河网水环境安全调控方案管理技术

太湖-河网水环境安全调控方案库形成需要模拟计算各种不同条件组合下方案,因此需要采用调控方案分组管理,将调控结果分类保存,才能进行方案分析计算与比选。

主要技术指标:

①太湖河网水量水质数学模型实测资料有2008年~2016年,不同降雨、沿长江杭州湾引排水量、河网水位、河网水质、工程调度条件组合集较小,只有9组,通过数学模型对边界及内部控制调度进行组合,可以获得各种条件下海量调度方案结果;

②现有调度方案形成通过人工枚对比分析获得,效率低下,分析的方案量级为几十个,通过偏最小二乘法和人工神经网络模型技术可以快速处理海量结果,将分析方案的量级增加到几百个;

③现有调度方案结果管理是数据文件形式保存,结果提取分析困难,本次通过设计合理



的数据库表结构，将调度方案结果保存在数据库中，降低了分析难度，提高了分析效率。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

授权发明专利1项，授权软件著作权2项。

王船海，一种基于分形理论的水文模型升尺度方法（ZL201610157195.X）。

王船海，江苏省中小型水库调洪计算软件V1.0（2015SR081663）；王船海，数字流域系统V4.0（2015SR085100）；王船海，基于webservice模式下的模型集成组件软件V1.0（2016SR390403）。

实际应用案例：

太湖流域水资源监控与保护预警系统预警模型完善与开发。

依托课题：

太湖河网水环境安全调控与决策业务化平台（2014ZX07101011）

7.4.3 基于水功能区的流域水质水量总量控制技术

技术发展阶段：推广类技术

适用范围：适用于大流域的水量、水质控制综合分析决策

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

考虑人工用水、工程调度与自然水循环三方面关系，建立流域级水功能区的水量调控模拟模型，根据用水后调控后的河流水量过程使用纳污能力分析模型计算水功能区纳污能力，根据分析计算结果对流域的水量和水质进行调控，为水功能区污染负荷入河控制量分析提供基础，实现流域水质水量总量控制技术。

（2）工艺流程

①构建水量调控模拟模型：用于将二级流域区或者地级以上行政区，以流域水资源分区和行政分区嵌套形成水功能区的计算单元，将水功能区的主要控制工程节点和水功能区控制断面作为基本信息模拟单元；分析所述水功能区范围内的水量平衡信息，建立计算单元与水功能区地表径流汇流与用水退水的关系，计算用水影响下的水功能区控制断面的过流量。

②设置变化用水情景：用于水功能区断面流量计算公式中，当采用不同用水情景时，调整水功能区所在单元取用水，计算出水功能区控制断面在不同用水情景下过流量，分析出水量变化条件下水质状况模拟和控制目标，实现了人工用水与水循环过程动态关系的模拟。

③构建水功能区纳污能力分析模型：用于以上所述的计算单元和模拟单元，根据水功能区控制断面过流过程，采用一维水质模拟公式计算用水影响条件下的水功能区纳污能力。

④水量水质联合分析调控的步骤：用于以月为计算时段，通过所述的水量调控模拟模型和水功能区纳污能力分析模型同步耦合形成流域水量水质联合调控模拟分析工具，使用所述水量水质联合调控模拟分析工具，对所述水功能区进行分析，根据分析结果对所述水功能区进行调控。

（3）关键技术

本实施例采用了一种水资源分区和水功能区嵌套计算的新形式，实现了水量调控模拟和河流纳污能力计算的融合，关键技术包括：整体水量水质调控的技术模型体系设计；基于水功能区的水量调控模拟模型；基于用水变化请假的动态纳污能力计算。其中，基于水功能区的水量调控模拟模型计算是本实施例的重点所在。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：松辽水利委员会

通过模型计算提出了符合水功能区达标要求的松花江流域未来用水总量控制目标以及主要断面耗排水控制指标，在松花江流域综合规划编制工作中得到了应用。

分析提出了未来不同情景下松花江流域水功能区纳污能力以及污染负荷优化控制措施，为松花江流域水资源保护规划管理决策提供了技术支撑。

依托课题：

重点流域环境流量保障与容量总量控制管理关键技术与应用示范（2013ZX07501-004）

7.4.4 水质水量联合调控技术集成

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：适用于我国大江大河搭建面向水污染突发事件的应急调度与管理系统

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

通过对松花江干流风险源、保护目标与调控措施的调查分析以及分类、分级，基于松花江干流水动力学模型的基础上，构建了面向水污染突发事件的基于规则的多目标、多工程、变时间和空间尺度的“模拟-调度”耦合模型。



（2）工艺流程

①对松花江干流202个风险源、87个保护目标（35处水源地和52个主要水功能区）以及12个水利工程（4座大型水库、2个蓄滞洪区、6个引水工程）等调控工程进行了分类和分级，为制定应急调度方案和应急措施提供了前提；

②建立了松花江干流水动力学水质水量模拟模型，实现了全时段（冰封期、枯季、汛期）、任意地点的典型污染物（溶于水、浮于水和沉于水）的模拟；

③建立了面向水污染突发事件的水利工程联合调度模型。该模型针对不同时间、污染物类型、发生地点给出推荐的调度措施，基于各个水利工程和水库的调度规则，以水动力学模型为基础进行多目标、多工程、多时间和空间尺度的应急调度，并给出推荐方案，建立了松花江干流面向水污染突发事件的应急调度方案和措施库；

④开发了一套应急调度与三维仿真系统。基于应急调度模型与水动力学模型，研制了松花江流域面向水污染突发事件的应急调度决策支持与三维展示平台。

（3）关键技术

①调度模型与河流水动力学模型的有机耦合，实现了全时段（冰封期、枯季、汛期）、任意地点的典型污染物（溶于水、浮于水和沉于水）的模拟和调度，通过该模型实现了推荐调控方案或给定调控措施下各种水利工程的联合调度结果以及模拟预报期内各个断面污染物浓度、水位、流量等预报结果，实现了不同调度方案下的水质水量全过程仿真；

②面向水污染突发事件的水利工程联合调度模型。以突发事件为主，综合考虑防洪、供水、发电、航运等目标，按照“预报-调度-后评估-滚动修正”的思路构建了应急调度模型。该模型针对不同时间、污染物类型、发生地点给出推荐调度措施，基于各个水利工程和水库调度规则，以水动力学模型为基础进行多目标、多工程、多时间和空间尺度应急调度，并给出推荐方案，建立了松花江干流面向水污染突发事件的应急调度方案和措施库。在此基础上创造性的开发了三维水质水量模拟与调度系统平台，为应急调度和决策会商提供了支撑。填补了我国流域级面向突发性水污染事件的水质水量耦合模拟与调度模型和系统的空白。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：松辽水利委员会

①研发的软件系统已经成功布置到了松辽水利委员会信息中心；

②系统运行稳定、正常，各个功能模块都较好地发挥了作用，为示范工程的应用单位提

供了应用证明并充分肯定了该技术的作用。

依托课题：

松花江流域水质水量联合调控技术及工程示范（2008ZX07207-006）

7.4.5 分质水资源优化调配的水质水量联合调度技术

技术发展阶段：推广类技术

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

针对研究区域水源补给复杂、闸坝众多、水质恶化等典型环境问题，以及城市化、半城市化河流生态功能定位，对国内外河流水量水质联合调度、闸坝生态调度、非点源污染模型等进行了充分调研，在借鉴国内外相关技术研究的成功经验与成果的基础上，从北运河流域河流污染和水资源补给等实际情况出发，确定采用两种生态调度方式：次暴雨调度、生态基流调度。构建了镶嵌闸坝模型的流域水量水质联合调度模型，实现了流域水文模型、水动力学水质模型和闸坝模型的有机耦合和无缝集成，解决了多闸坝河流水量水质联合调控的技术难题，模拟和分析不同调度方案的可行性和优劣性，寻求满足河流多目标功能定位的较佳方案，指导流域闸坝的调度。

（2）工艺流程

基于长短嵌套、滚动修正、情景分析、预案生成的调控需求，结合流域闸坝调度需求（防洪调度、生态基流保障等），构建不同时间尺度（次暴雨径流-小时调度、连续暴雨径流-天调度）的分布式非点源污染模型（DWSM模型-小时模拟、SWAT模型-天模拟）、模拟尺度（干流、示范区域）的水量水质耦合模型系统（一维模型、二维模型、一维河网模型）、不同类型（溢流堰、水闸）闸坝调度模型，集成流域径流预报和非点源预测、河道洪水演进和闸坝调控、污染物迁移模拟的水量水质联合调度系统。以水量平衡为基本原理，结合河流生态需水时空特征，建立基于分区、分时段的分质水资源配置方案，构建涵盖水量指标、生态指标、环境指标、富营养化抑制水力控制指标和防洪安全指标的水量水质联合调度评估指标体系。以水量水质联合调度系统为依托，结合流域闸坝生态调度准则和生态基流，由调度方案与水文年组合而成多种调控情景，分析水量水质调控的多目标效果，制定流域分质水量水质调控方案，开发涵盖情境设计、水量水质响应、调度评估的水量水质联合调度方案系统，形成以分质水资源调控、重污染多闸坝河流的流域水量水质联合调度技术。

（3）关键技术



- ① 闸坝生态调度模式；
- ② 北运河分质水资源优化调配的水量水质联合调度技术方案；
- ③ 闸坝调控对河流水环境影响评价技术。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：北京市通州区水务局

针对示范区域清水资源不足、来水水质较差，以及水系不畅、水流迟缓、河流自净能力不足等环境问题，开发河流分质水资源调配的水量水质联合调度模型系统，提出保障河流水质改善的水量水质联合调度技术方案，形成保障北关闸—甘棠橡胶坝之间河段景观用水功能的水量水质条件。

水量水质联合调度平台系统在通州区水务局、甘棠坝及师姑庄闸等单位的闸坝日常管理、防洪调度中得到应用，经过近1年的实践应用，系统性能稳定、结果可靠。

依托课题：

北运河水系水量水质联合调度关键技术与示范研究课题（2008ZX07209-002）

8 流域水环境监测体系与决策系统

8.1 水环境监测网络体系构建

8.1.1 水环境物联网智能感知与自动适配技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：对各类点源、面源、入河排污口、河段监控断面等在线设备的动态管控

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

本技术由以下两个部分组成：

①基于XML的传感器设备描述方法，其通用的数据解析程序，替代传统的“设备驱动”工作，设备驱动实现的功能和所起的作用完全由基于设备描述文件的数据解析技术实现，缩短了设备发布时的工作量，为不同厂商设备的互联互通提供了通用的技术基础。

② M2M终端管理，通过“网络”传递信息从而实现机器对机器或人对机器的数据交换，也就是通过通信网络实现机器之间的互联互通，是机器和机器之间的一种智能化、交互式的通信。也就是说，即使管理者没有实时发出指令，机器也会根据既定程序主动进行通信，并根据所得到的数据智能化地做出选择，对相关设备发出正确的指令。

本课题研究的无线机器通信技术，包含了两个层面的内容，一是感知终端本身和终端管理平台间的数据交换，以实现平台对终端的登录、注册、参数读取/设置、远程控制、固件更新等管理；二是平台可以透过终端，通过动态加载对应的设备描述文件，自动适配前端的在线设备，实现对各类污染源在线设备的动态管控，通过设备工作状态实时获取、关键参数变化报警、异常情况辅助分析等功能，一定程度上解决监控数据造价的难题。

(2) 工艺流程

①感知终端加载要适配的传感器或者在线设备的设备描述文件；

②感知终端根据设备描述文件，调用对应的驱动程序和通信协议，实现与传感器或者在线设备的数据交换；

③平台可对设备描述文件进行二次修改，根据实际情况配置采集周期、上下限报警阈值等参数；



④终端依据设备描述文件，周期性的采集在线设备的各类运行参数，根据规则判断是否触发上报；

⑤终端管理平台接收到终端上报的数据后，根据报警的类别形成不同级别的消息日志和消息推送，管理人员可根据数据分析结果对前端在线设备可能存在的风险或异常情况做出响应；

⑥管理人员也可在平台上对终端的运行参数进行修改、远程升级固件，足不出户完成对现场感知终端的透明化管理。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

①研究了包括IEEE、ISO/IEC、ITU-T、3GPP、3GPP2等物联网领域主要国际标准组织发布的各类标准和技术规范，从中提取出共性技术，并结合HJ/T212-2005，制定了面向水环境监测的物联网无线机器通信协议，该协议由功能体系结构、技术参考模型、数据体系结构、元数据注册方法、智能传感器等部分组成，系统全面且容易实现；

②在自组织网路构建中，应用动态信道调度、无线链路质量在线跟踪估计和动态建模、集中-分布式的密钥管理等关键技术，保证了自组织无线网络的高可靠、高实时和高并发，有效的解决了环保在线设备到智能感知终端的无线数据汇聚问题；

③基于IEEE1451国际标准，提出感知设备模型框架和实现方法，采用基于XML设备描述文件的方法，解决设备统一适配的技术难题；

④通过在M2M平台上集成的设备管理、参数管理、状态管理和应用管理四大模块，实现智能终端的可视化管理；

⑤基于网络信道质量自动择优技术和数据压缩与断点续传技术，保障网络恶劣条件下数据传输的完整性和实时性；

⑥建立基于规则的在线设备参数改变识别策略，且具有自学习功能；同时构建在线设备检测参数异常报警模型，通过测量结果的质量评估，对造假数据行为进行预警。

目前研制的智能感知终端在辽河流域8个地市70余个重点企业安装约170套，已完成对国内外10余家设备厂商，超过20个型号的氨氮和COD在线设备的动态管控，稳定运行超过24个月，每天产生数据超过5000条，很好解决了在线设备的动态管控问题。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例

案例1

应用单位：辽宁省环境保护厅

系统上线以来，监控中心工作人员通过终端平台，可以一目了然的获取示范区内所有感知终端的工作状态，如是否在线，累计运行时间、所在地点的信号强度等；同时可以以地市为单位，整体看是否有主要检测指标超标的情况，对于异常数据，可以根据平台的日志信息对该设备的运行参数进行分析，从而对监测数据的真实性做出判断。

2015年7月3日上午九时许，监控中心管理人员登录平台后发现新宾县污水处理厂入口和出口智能感知设备全部处于离线状态，与现场核实后得知当日发生了短暂的电力故障，管理人员据此对在线数据的监测异常情况进行了备案。

案例2

应用单位：沈阳市环境保护局

目前在沈阳示范区的蒲河流域，在9家污水处理厂共部署了14套前端的智能感知设备，全部运行正常，在原来的在线监控平台上，只能看到氨氮测量值的分钟数据或者小时数据，无法获得更多的信息，现在平台上还可以看到设备的参数改变情况或者工作状态变化情况，使得工作人员可以对设备的运行状况有所了解，一定程度上避免了造假行为。

2016年4月15日，管理人员发现兴隆堡污水处理厂出口氨氮监测数据在三个测量周期内连续超标，在告警信息中系统提示有在线设备相关系数修改提示信息，与现场运维人员联系后，确定是对相关系数的错误操作，运维人员及时进行了更正，避免了后续监测数据的误报。

案例3

应用单位：铁岭市环境保护局

本课题研发的动态管控系统，增加了在线监测设备运行状态、设备运算过程中用到的仪器关键参数、监测设备的报警状态和远程反控等功能。对日常业务很有必要。目前在铁岭氨氮和COD的检测设备主要是湖南力合提供的，平台上可以监测的参数包括各参数的量程、斜率、截距等仪器参数，校准浓度、标定浓度、校准时间、标定时间等运行参数，以及仪器的连接状态、工作状态、故障状态等。以上参数如果发生改变，在平台就会有报警提示和历史数据记录，这样不仅使得管理人员在执法时有理有据，更对企业形成一种威慑作用，规范他们的日常行为。

在这个平台上可以比较清楚的了解所有在线设备的运行情况，比如是否在线，所处位置的移动信号强度等，这样为设备维护工作带来了相当大的便利，改变了过去一出问题就必须



到现场进行维护的方式，极大的方便了日常维护工作。

2014年8月12日，管理人员在污染源在线监控平台上发现调兵山污水处理厂出口COD监测数据在4个测量周期内一直保持不变，经过与M2M平台的对比，发现感知终端在第一个采样周期开始时上报了在线设备“取样异常”的报警信息，经现场运维人员排查，是进水管水泵发生故障，排除故障后监测数据恢复正常。

依托课题：

辽河流域水环境综合管理智能化平台建设课题（2012ZX07505004）

8.1.2 基于控制单元的主要水污染物总量动态监控技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：基于控制单元和水生态功能目标管理的流域水污染物总量监测

主要技术路线：

（1）基本目标

太湖流域现有的监测网络已具有一定的规模，可以通过自动监测系统能捕获一定的水污染超标状况，通过例行监测数据能够分析流域水质变化趋势，但在氮、磷等主要污染物总量监测、超标预警等工作上尚未形成一个完整的监测网络体系。同时污染物排放总量依然超过环境容量，传统产业比重仍然较大，其中纺织、化工、冶金等行业污染物排放量仍然相对偏高，农业面源和生活污染也还占相当大的比例，污水处理设施发挥效益存在滞后效应，入湖河流尤其是支流污染问题也较为突出，长期淤积造成较严重的内源污染。加强对污染物入湖总量变化的动态监控，采用具有高频次、高灵敏性、高精度性、快速性在线监测技术，准确客观核实入湖总量，并开展动态监控对太湖蓝藻治理具有十分重要的意义。本技术选择太湖宜兴、武进地区主要典型河流作为研究示范区域，进行高锰酸盐指数、氨氮、总磷和总氮入湖总量核实及动态监控，为太湖流域水环境监测预警提供示范。

通过在太湖流域建立基于控制单元的流域主要水污染物总量监测技术体系并进行业务化运行，将为国家在重点流域水污染物总量减排实施上提供有力的技术支持，对推动重点流域水污染物监控与预警的研究目标具有积极的意义。

（2）技术路线

以水生态功能分区和控制单元划分结果为基础，开展主要风险源主要水污染物排放总量自动在线监测体系、主要汇水通道主要水污染物通量自动监测体系和主要水污染物总量减排水质目标考核断面自动在线监测体系研究构建，并补充人工监测点位，优化调整基于控制单

元的流域内主要水污染物排放总量和环境风险监测网络,提出涵盖基于控制单元污染控制和主要水污染物排放总量的水质目标双重管理体系,实现基于水生态功能区目标管理的水环境监测体系与现行考核目标监测体系的并轨运行。

在监测网络示范运行的基础上,对其中入太湖的主要河流采用自动监测技术,实现水质和流量的自动监测,并对其中不可靠的部分流量进行校准,利用水质和校准后的流量从而得到入湖总量,结合修编后的总体方案制定总量阈值目标,利用自动监测手段实现以天为时间单位的动态监控,并在典型入湖河流进行示范。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

在“十一五”太湖流域总量监测网络基础上,结合“十二五”水生态功能分区和控制单元划分结果,全面系统的完善“十二五”太湖流域主要水污染物排放总量和环境风险监测网络研究与建设。以水环境风险源分级结果为基础,切合累积性风险污染物监控要求,研究构建太湖流域“十二五”主要污染源主要水污染物排放总量监测体系;并根据控制单元监测断面设置原则和国家、省流域管理要求,在占入湖污染物总量80%的30条主要、次主要汇水通道和65个水污染治理目标考核断面设置完成的基础上,结合污染源分布情况,对太湖流域各控制单元内水环境监测断面进行优化调整,研究布设了147个基于控制单元的流域主要水污染物监测断面,其中水污染总量一级控制断面共77个,二级控制断面共计39个,二级以下控制断面20个,其余11个为太湖上、下游汇水区域湖库水污染负荷总量监测点位,其中已建成水质自动站98个。通过下发文件组织相关监测机构对布设的点位开展监测,并根据监测数据有效监控流域水质状况,形成了流域(江苏太湖流域)、区域(县级行政区域-宜兴、武进等)和控制单元三级主要污染物总量超标和累积性环境风险监测网络体系。相比国内外同类研究,本研究首次将监测网络布设与控制单元划分相结合,并全面增加了总氮监测指标。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例:

应用单位: 13个市环境监测中心站

构建完成的基于控制单元的太湖流域主要水污染物排放总量和环境风险监测网络,已由江苏省环保厅通过每年印发的全省环境监测实施方案组织太湖流域有关部门开展流域水环境监测。流域、区域和控制单元三级主要污染物总量超标和环境风险监测网络体系的建立,形成了对太湖全流域及全湖体水质的监测预警能力,有效监控太湖流域水质状况、流量情况,确保流域水质安全、总量达标,对支撑太湖流域水污染物总量减排监控与评估体系的建立和



国家在重点流域水污染物总量减排目标的完成具有积极的意义。

依托课题：

太湖流域（江苏）主要水污染物总量监控与风险预警平台构建及示范（2012ZX07506-004）

8.2 流域大数据平台与管理系统

8.2.1 三峡水库水量水质调度决策支持系统

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：三峡库区

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

根据“特征辨识-过程模拟-评价分析-系统优化-综合决策”的逻辑原理，三峡水库水量水质调度决策支持系统将基于实地考察、定位监测、文献查询和实验分析，并集成模拟优化和虚拟调控技术，为三峡水库的水量水质综合调控提供决策支持。具体而言，在保证防洪抗旱、发电和航运的基础上进行水量预报，综合三峡水库水量水质优化调度数据库系统以及上游来水和本地污染现状，集成三峡库区水文、水循环及水环境过程水量水质耦合模拟分析，嵌入水库系统中不确定性的定量分析和表征，融合水流水质状况的响应机制及调度条件下的库区生态环境脆弱性分析，生成理论优化调度方案。基于专家意见和问卷调查产出的水库调度专家系统对调度方案集进行测评，最终输出水库水量水质调度的最优调度方案，其流程图如图8-1所示。

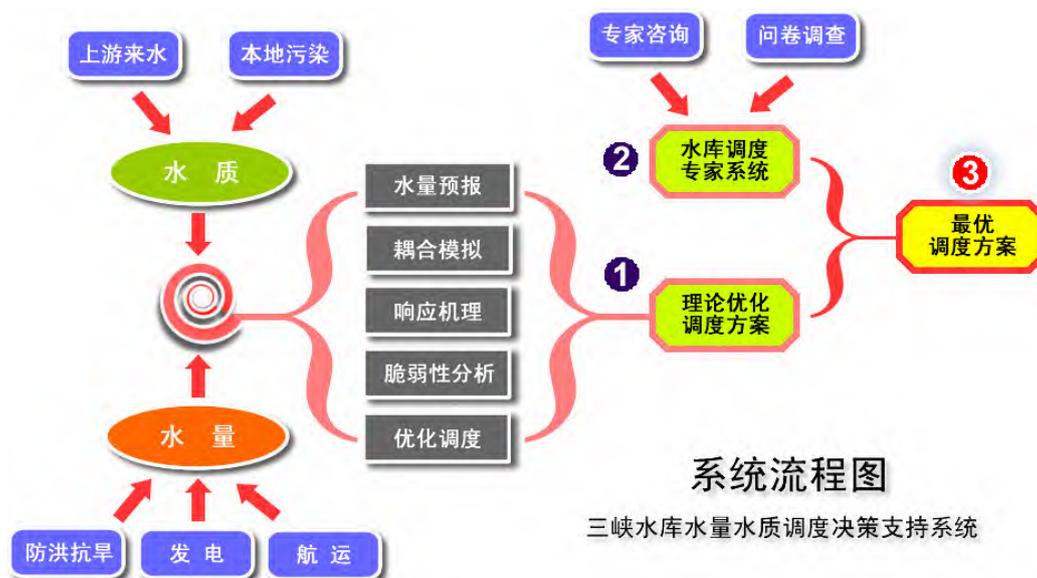


图 8-1 三峡水库水量水质调度决策支持系统系统流程图

(2) 工艺流程

以库区及典型支流为对象，结合现场调研与水文水环境模拟，并综合考虑多种水文水动力条件下的支流量水质响应模式，开发了涵盖三峡库区点源和非点源污染控制的水质管理模型，并提出了通过水库调度改善库区支流水质的管理措施。在此基础上，进一步对库区沿岸各行业废水和城镇生活污水的排放进行了综合规划，由此形成了区域性水质改善方案，并促进了库区水污染的有效控制和社会经济的可持续发展。此外，针对传统调度方案轻视水库水环境保护的缺陷，本研究通过集成水文水质模拟与预报、水库调度、发电-防洪-航运核算、污染事故评估等模块，建立了涵盖环境评价、公众调查、数据管理、风险评估、应急响应和效益分析的三峡水库调度决策支持系统，并通过修正基于模型解的调度方案，提出了调度改善水质的优化供选方案。

(3) 关键技术

三峡水库水量水质调度决策支持系统包含两项关键技术：水量水质优化调度数据库管理系统和水量水质联合调度仿真系统。

三峡库区水量水质优化调度数据库管理系统：综合运用了SQL Server技术、WEB技术、NET技术和ArcGIS Server技术；集成了三峡库区水质现状、水生态环境保护、富营养化水平、污染源排放、三峡水库调度、三峡电站运行、水资源分配、水文气象等大量数据；实现了数据的统筹管理和综合展示，为水库调度方案的确定提供了有效数据支持。三峡库区水量水质优化调度数据库管理系统是三峡库区水量水质优化调度决策支持系统的支撑和基础，负责对水量水质优化调度数据进行有效的管理和维护，既为模型计算和科学决策提供数据支持，又



可存储计算得出的调度方案数据。

三峡水库水量水质联合调度仿真系统：在考虑三峡水库的防洪风险、发电效益和航运效益等因素的前提下，该系统集成水质与水库调度的相互响应机制，可为三峡水库的水量水质综合调控提供决策支持，同时可对具体的水质管理、水华抑制方案进行综合分析。

三峡水库水量水质调度决策支持系统的建立是基于大量的现场观测、实地考察、问卷调查和模型研究，所运用的方法和手段包括人工智能技术、计算机技术、多判据分析、多目标优化、风险评价等。由此形成一个具有评估、模拟与优化功能的“调度改善水质”综合决策支持系统。系统的核心模块包括：水量情景模块、水质情景模块、调度方案生成模块、方案综合评估模块等，具体如下：

①系统登录界面

三峡水库水量水质调度决策支持系统为用户设计了友好的登录界面，操作方便，有利于该系统的推广和实际应用。登录界面及首页见图8-2。



图 8-2 三峡水库水量水质调度决策支持系统登陆界面及首页

②水量情景模块

根据历史数据和其它小组的研究结果，产出三峡库区上游各子流域的水库流量时间序列图，进而得到上游来水总量的时间序列图。用户还可以对所产生的时间序列图进行动态更新。主要操作界面如图8-3所示。



(a) 基于历史来水统计数据而随机生成的来水情景



(b) 选择模拟情景

图 8-3 水量情景模块的操作界面

③水质情景模块

根据历史水质的动态变化，分析未来水质的动态特征；用户可以对未来水质的情景曲线进行动态更新（如总磷、总氮、BOD、pH、叶绿素a、悬浮物等指标的浓度）。主要操作界面如如图8-4所示。



(a) 设定水质情景（总磷）



(b) 用户更新的水质情景

图 8-4 水质情景模块的主要操作界面

④调度方案生成模块

根据三峡水库的基准调度曲线和近几年的实际调度曲线，结合现场问卷调查和专家咨询等得到的结果，并针对多种水质情景和上游来水情景，生成相应的微调方案（水位和下泄流量的动态分布曲线）；用户可以对产生的调度曲线进行更新，进而可通过方案评价模块（后述）来分析各微调方案对防洪、发电、航运等的影响。部分操作界面如图8-5所示。



(a) 设定水质要求

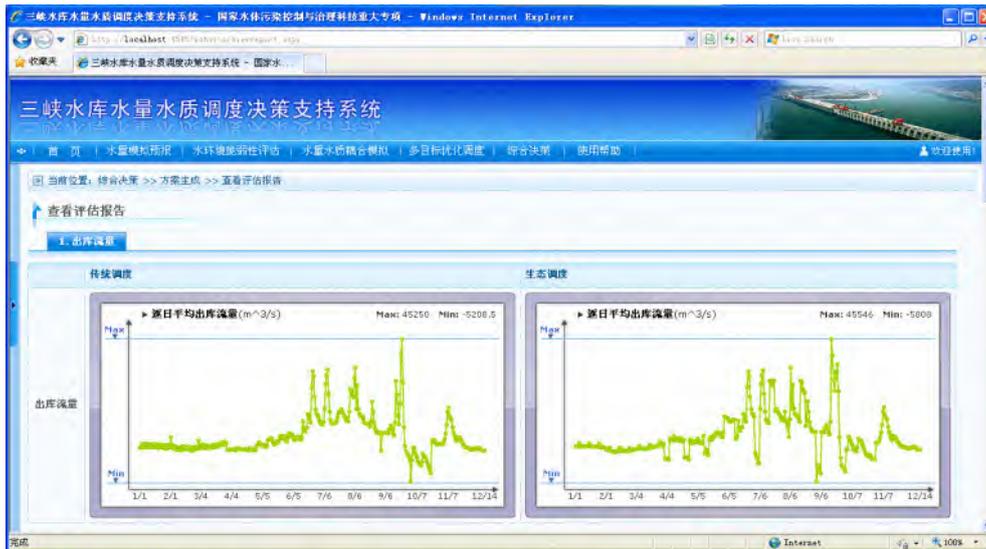


(b) 当前调度方案

图 8-5 调度方案生成模块的部分操作界面

⑤方案评价模块

根据所制定的评价指标体系，并基于多种综合评价方法（AHP、TOPSIS、秩和比法等），可对所产生的各个“调度改善水质”微调方案所相应的出库流量、洪水风险、发电效益和航运效益进行综合分析，并将计算结果以方案集的形式展示出来。此外，该模块还能对不同的评价方法进行结果比对。主要结果展示界面如图8-6所示。



(a) 计算出库流量



(b) 洪水风险计算

方案查询

方案名称: 方案年份:

年份: 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021

名称	年份	水位风险	流量风险	年发电量	通航率
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-随机来水-传统方案	011	-16.5 m	-26655 m ³ /s	71854.18 GW ^h	97.54 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-较大来水-传统方案	011	-20.9 m	-26684 m ³ /s	68836.61 GW ^h	97.53 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-较小来水-传统方案	011	-22.6 m	-5309 m ³ /s	106154.22 GW ^h	48.63 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-适中来水-传统方案	2011	-22.8 m	-9671 m ³ /s	98995.48 GW ^h	55.46 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-最大来水-传统方案	2011	-22.5 m	-16714 m ³ /s	91518.6 GW ^h	62.57 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-最小来水-传统方案	2011	-22.6 m	-9901 m ³ /s	98126.43 GW ^h	56.99 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-随机来水-生态方案	2011	-20.6 m	-5309 m ³ /s	109183.55 GW ^h	48.63 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-较大来水-生态方案	2011	-22.8 m	-11557 m ³ /s	100008.41 GW ^h	54.64 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-较小来水-生态方案	2011	-22 m	-26655 m ³ /s	67864.25 GW ^h	97.54 %
<input checked="" type="checkbox"/> 2011-适中来水-传统方案	2011	-22.6 m	16745 m ³ /s	120409.37 GW ^h	34.25 %

选择评价方法: 综合指数法 层次分析法 TOPSIS 熵和比法

(c) 方案查询



(d) 方案比较

图 8-6 方案评价模块的部分界面

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：三峡水利枢纽梯级调度通信中心

通过人工智能技术和计算机技术，结合实地考察、现场走访及问卷调查，综合利用多判据分析、不确定性分析、多目标优化和多重后优化分析等技术，基于模拟模型的不确定性风险评价方法进行推理和判断，开发了以改善水质为目的的三峡水库水量水质优化调度决策支持系统，能够模拟生成不同水质情景下的水库优化调度方案，并可通过对比分析功能辅助筛选出最优调度方案。同时，用户界面简单易用，能够为三峡水库调度方案的制定和优选提供决策支持。

依托课题：

三峡水库优化调度改善水库水质的关键技术研究（2009ZX07104004）

8.2.2 高精度信息集成、共享及业务系统无缝融合技术

技术就绪度评价等级：7级

适用范围：太湖流域跨界区域

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

在三维可视化水环境信息集成GIS工具的支持下，实现太湖流域跨界区多元化、多



级化数据的高精度可视化表达，以及水环境专题数据建模；以太湖流域跨界区水环境综合管理的业务流和数据流为中心，采用面向业务化的集成技术以及统一数据标准，采用统一开放式接口的方式，通过在数据服务层的数据集成和功能应用层的功能集成相结合；以统一的功能模块组成结构和调用方式，来达到系统间的无缝集成；构建了集多业务功能为一体的太湖流域跨界水环境综合管理平台，并得到业务化示范应用。

（2）工艺流程

高精度信息集成、共享及业务系统无缝融合技术的关键技术流程包括：

①三维可视化高精度水环境信息集成及共享技术研发

选择先进三维GIS工具“EV-Globe”作为承载跨界区综合管理数据的支撑软件，以分辨率高、大面积连续覆盖、时相一致性好的遥感、航空影像作为底层，以此为基准对综合管理业务专题数据点位及区划范围进行校准、核定，获得地物对应、空间定位精准的高精度数据；利用先进的三维可视化和遥感图形或图像技术，实现对水环境跨界综合管理中各类信息的精准制作、分析和处理，将多元化、多级化数据进行可视化，实现定位精准的太湖流域跨界区域水环境专题数值建模，以及完整、有序、直观表征。为查询定位、模型关键参数输入、结果输出、叠加分析等业务应用提供了良好数据基础。

②多业务系统无缝融合技术研发

以太湖流域跨界区水环境综合管理的业务流和数据流为中心，采用面向业务化的集成技术以及统一数据标准，通过在数据服务层的数据集成和功能应用层的功能集成相结合，以统一的功能模块组成结构和调用方式，来达到系统间的无缝集成。

采用基于面向服务体系（SOA）的信息系统集成技术，基于实际需求和定义的构件模型，从流域水环境领域提取出了通用构件和业务构件，将数据库、模型库集成到公共服务平台上，形成领域核心资产库，实现技术集成创新。以太湖流域跨界区水环境综合管理的数据流为中心，采取统一数据标准以及集总式统一数据库，通过“关系型数据库+空间数据引擎”中间件解决方案，实现空间数据和属性数据在关系数据库中的一体化存储，同时能充分利用关系数据库的海量数据管理、数据共享及事务处理能力、高效查询以及安全性等多种优势。

③多系统无缝衔接太湖流域跨界区水环境综合管理业务化平台构建

在充分开展太湖流域跨界区域水环境综合管理的业务流程和功能、性能与安全等方面系统分析的基础上，确定平台的主要系统模块及其相互之间的关系，进行平台总体架构、逻辑体系、功能体系、数据交互和运行应用模式的优化。通过统一开放式接口的方

式，以原生模型或二次开发控件的形式，面向标准化的业务数据、模型、功能模块等进行紧密集成，构建太湖流域跨界水环境综合管理平台，实现平台与各子系统成果的有效规范整合，实现太湖流域水环境风险识别、预测预警、通量核查、矛盾调解等业务的系统化、自动化，在平台数层面和用户界面功能层面达到良好集成以及统一调用。针对流域跨界区环境风险特征，在集成跨界水环境综合管理区污染物总量核算及通量核查技术，多元风险识别、事故预警预报与应急防控系统集成技术，跨界区污染溯源、责任认定及生态补偿核算技术，高精度信息集成、共享及业务系统无缝融合技术的基础上，建立了跨界水环境监控与污染物通量核查、水环境风险预警防控、责任认定与矛盾调处、信息交流与共享4个系统，构建完成了集“通量核查、风险防控、责任溯源与补偿、信息共享”等多功能为一体的水环境综合管理平台，并已部署在华东督查中心环境管理与监控平台。面向外业工作的信息查询、采集与现场分析等需求，基于M/S（移动应用系统）的分布式部署架构开展了移动端APP应用平台开发。该移动平台端实现了跨界区水环境敏感点（区）的定位查询、跨界国控断面水质和污染物通量月报的移动端推送、跨界区应急资源的查询与通讯联动等业务化运用。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①基于三维可视化高精度水环境信息集成及共享技术，实现太湖流域跨界区多元化、多级化数据的高精度可视化表达以及水环境专题数据建模，为业务集成及应用提供了良好数据基础。

②基于面向业务化集成技术的多业务系统无缝融合技术，在数据、模型、功能模块标准化框架下，实现对于通量核查、责任溯源与补偿、风险防控、信息共享等业务流程的紧密集成。通过在数据服务层的数据集成和功能应用层的功能集成相结合，以统一的功能模块组成结构和调用方式，来实现多业务流程系统的信息化集成及无缝对接。上述关键技术规范和优化了平台融合过程，实现了模型、数据、系统间的无缝集成，对按预定目标建成太湖流域跨界水环境综合管理平台并进行应用示范起到了关键作用，为有效提升跨界区管理决策水平起到促进作用。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

获得软件著作权4项。采用的三维GIS工具“EV-Globe”具有国内自主知识产权。

实际应用案例：

案例1



应用单位：环境保护部华东环境保护督查中心

基于高精度信息集成、共享及业务系统无缝融合技术构建完成的集“通量核查、风险防控、责任溯源与补偿、信息共享”等多功能为一体的水环境综合管理平台已部署在华东督查中心环境管理与监控平台，实现了业务化运行。平台提供了太湖流域跨界区重点国控断面水质在线动态监控，跨界区跨界断面主要污物通量核算与通量超标预警，跨界区突发性污染事故的风险预警及应急演练模拟，太湖流域省际跨界区重点污染源、风险源、水文水质监测站点等信息查询与共享等功能，提高了业务处理效率，有效提升了跨界区综合管理决策水平。

案例2

应用单位：江苏省环境应急与事故调查中心

2015年12月23日至24日，课题组应邀参加由江苏省环保厅、上海市环保局、浙江省环保厅和安徽省环保厅主办，江苏省环境应急与事故调查中心、苏州市环保局及吴江区人民政府联合承办的“携手苏浙沪、共保太浦河”长三角跨界突发环境事件应急演练，借助课题构建的太湖流域跨界水环境综合管理平台，为本次环境应急演练提供了全程技术支撑。本次长三角跨界突发环境事件应急演练以太浦河突发特征污染因子浓度异常情况并对下游水源地造成影响为背景，实战模拟了事故发生后各方开展的应对工作。课题组针对本次演练给定的模拟事故情景进行分析，依托平台中太浦河水环境风险预警预报系统，制定演练方案，对本次演练突发事件进行了多方案预测和研判；依托平台中跨界区域突发水污染事故应急处置专家决策系统，研究对不同调控应急技术方案的防控效果及技术经济可行性进行综合比对。通过对应急演练的多次预演，提出了演练突发情境下的最优应对措施建议，及时提交指挥部，为圆满完成此次应急演练发挥了重要支撑作用，得到三省一市观摩代表和专家的一致肯定。本次课题成果的成功应用，标志着“太湖流域跨界水环境综合管理平台建设与业务化运行”课题研究成果在太湖流域跨界区水环境管理中得到进一步实际验证和应用，并将在太湖流域跨界区水环境管理工作中继续发挥重要科技与决策支撑作用。

依托课题：

太湖流域跨界水环境综合管理平台建设与业务化运行（2012ZX07506007）

8.2.3“云计算”技术在流域水环境数据中心构建中的应用

技术就绪度评价等级：8级

适用范围：支撑环保云计算数据中心运行

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

云计算技术是将计算任务分部在大量计算机构成的资源池上,使各种应用系统能够根据需要获取计算力、存储空间和各种软件服务。使得数据的存储更加简便,工作人员可以高效率访问庞大的数据库。

将云计算技术应用到环境信息资源管理,利用大型关系型数据库在数据安全、一致性和分布式处理等方面的优势,将各主要环境业务部门的数据集中起来,使用户通过单一界面就可以方便的管理、查询、分析大量的环境数据,从而简化环境数据管理的难度,提高环境数据管理水平。

应用云计算技术构建数据中心,使之同时具备“资源管理器”和“系统开发器”功能。“资源管理器”管理两大资源:①数据资源;②功能资源。“系统开发器”提供搭建式、插件式和配置式的开发,提供对流程、表单、应用程序界面和数据等完整的搭建方案。由于数据中心技术诸多优点,是解决环境信息资源优化整合的首选方案,实现了对环境数据的统一管理,为后期数据的整理、分析和利用铺平道路。

(2) 工艺流程

工艺流程:数据抽取采集-数据清洗-数据转换-数据装载-云发布。

①数据抽取采集:数据抽取是指从交换库中获取的各类业务结构化数据过程;

②数据清洗:数据源的数据合并-域转换和同步-数据类型和格式转换;

③数据转换:主要完成由于以下原因造成的数据不一致性问题;

④数据装载:将从数据源系统中抽取、转换后的数据加载到数据中心平台中。要求数据加载工具必须具有高效的加载性能;

⑤云发布:将数据上传到云上,使得各个信任系统之间可以共享。



（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

①通过云计算系统为数据中心提供服务，实现对平台下各子系统用户透明，用户无需了解云计算的具体机制，就可以从数据中心获得需要的服务。

②用冗余方式提供水环境业务数据的可靠性，云计算系统由大量商用计算机组成机群向各子系统提供数据处理服务。随着计算机数量的增加，系统出现错误的概率大大增加。本技术采用数据冗余和分布式存储来保证数据的可靠性。

③通过集成海量存储和高性能的计算能力，云能提供非常完善的接口使用质量。云计算系统可以自动检测失效节点，并将失效节点排除，不影响其它水环境子系统的正常运行。

主要技术经济指标：

根据辽河流域水环境信息数据中心平台建设需求，该系统具有涉及范围广、难度大、性能要求高、业务间关系复杂等特点，考虑到这些特点，通过研究建立辽河流域水环境数据中心，解决数据统一、共享和适应环保业务不断变化，为水环境管理提供必要数据支持。通过云计算技术组建一个采用大量商业机组成的数据中心机群，相对于同样性能的超级计算机花费的资金要少，效率高。应用“云计算”技术建设数据中心，管理了100余台各种品牌服务器、30块存储刀片的不间断运行，并且支持多种操作系统。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

案例1

应用单位：辽宁省环保厅

2016年辽河流域水环境数据中心在辽河流域实现了业务化运行，系统运行管理规范，运行稳定。该系统在辽宁业务化运行的过程中，共收录了集成了全省10668个污染源、120个监测站点、140个验收项目、2409108条行政处罚记录以及1168个风险源的数据。数据中心的容量为20TB，每日数据增长量约45万条，简单数据查询速度小于3秒，复杂数据查询速度小于7秒。

通过辽宁省环境数据中心的建设，形成统一的信息资源标准，解决目前存在的信息孤岛状态，将环保数据进行集中管理，深度分析及挖掘业务数据，为改善环境质量提供决策依据。

案例2

应用单位：沈阳市环保局

2016年水环境数据中心在沈阳蒲河实现了业务化运行，系统运行管理规范，运行稳定。该系统在沈阳业务化运行的过程中，共收录了集成了全省668个污染源、24个监测站点、60个验收项目、19108条行政处罚记录。数据日增长量约20万条，简单数据查询速度小于3秒，复杂数据查询速度小于7秒。

通过沈阳环境数据中心的建设，形成统一的信息资源标准，解决目前存在的信息孤岛状态，将环保数据进行集中管理，深度分析及挖掘业务数据，为改善环境质量提供决策依据。

案例3

应用单位：铁岭市环保局

2016年水环境数据中心在铁岭清河、凡河实现了业务化运行，系统运行管理规范，运行稳定。该系统在铁岭业务化运行的过程中，共收录了集成了全省47个污染源、12个监测站点、35个验收项目、4108条行政处罚记录。数据日增长量约17万条，简单数据查询速度小于3秒，复杂数据查询速度小于7秒。

通过铁岭环境数据中心的建设，形成统一的信息资源标准，解决目前存在的信息孤岛状态，将环保数据进行集中管理，深度分析及挖掘业务数据，为改善环境质量提供决策依据。

依托课题：

辽河流域水环境综合管理智能化平台建设课题（2012ZX07505004）

8.2.4 基于 GIS 的水环境信息集成与展示技术

技术就绪度评价等级：8级

适用范围：辽河流域水环境中污染源、河流、监测站的空间数据与检测数据的展现

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

GIS 是解决空间问题的工具、方法和技术；从学科的角度，GIS 是在地理学、地图学、测量学和计算机科学等学科基础上发展起来的一门学科，具有独立的学科体系；从功能上，GIS 具有空间数据的获取、存储、显示、编辑、处理、分析、输出和应用等功能；从系统学的角度，GIS 具有一定的结构和功能，是一个完整的系统。

通过在一体化实时监控系統内搭建GIS平台来实现Web GIS应用模式，这种部署方式使得组织机构里的每个人都能够随时随地、使用任何设备来发现、创建和分享GIS内容。GIS服务可运行在云、基础设施、本地私有或者虚拟的环境里，并能够与现有的IT基础设施和企业安全系统共同工作。



系统中实时监控分为污染源小时数据实时监控与视屏监控两部分。该系统以数据中心为基础，结合空间数据，实现污染源的实时监控信息展示。经过铁岭清河、凡河，沈阳蒲河流域示范后，在辽河流域实现业务化运行，实现了专项实施与技术创新、应用示范结合，推动了“数字化、信息化、智能化”辽河建设；实现地图、排放数据、监控视频的联动，提升流域水环境风险管理水平；实现实时监控与智能监管齐抓共管，全面提升辽河流域水环境安全监管能力，在辽河流域水污染治理中发挥了重要科技支撑作用。

（2）工艺流程

工艺流程为：空间数据获取-数据整合变为图层-特殊地点描点-叠加图层展现-添加辅助功能

①获取空间数据：包括区域边界、站点位置、街道、河流等；②将现有空间数据整合，变成可叠加显示的图层；③对于特殊要求的点位进行描点，如突发事件点位等；④应用web技术展现图层；⑤添加测量、缩放等辅助工具。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

根据辽河流域重化工业密集，结构型、复合型、压缩型污染严重，工业污染主要来自于集中分布在河流两岸的冶金、化工、医药、采矿、石化、纺织等行业的工业企业的这一特点，以GIS技术为支撑，对已有的监测数据进行整合，并且应用空间位置、数据可视化、实时视频等多种手段展现了辽河流域水环境的实时情况，达到了直观、高效、便捷操作的目的，推动了“数字化、信息化、智能化”辽河建设，实现了实时监控与智能监管齐抓共管，全面提升了辽河流域水环境安全监管能力。

主要技术经济指标：

经过铁岭清河、凡河，沈阳蒲河流域示范，在辽河流域实现业务化运行，实现了技术创新与应用示范相结合，提升了使用人员的工作效率，实现了“数字辽河”、“感知辽河”和智能化、业务化运行的目标，建立先进一体化实时监控系统，全面反映了环境质量状况和趋势，全面提升了流域水环境综合管理技术水平和流域水环境监控能力，构成了天地一体的、立体的、全方位、全覆盖的智能综合展示系统，使得监测人员污染溯源时间缩短为5分钟。

（4）技术来源及知识产权概况

本技术由东软集团股份有限公司在开源技术上开发而来，并申请了一项著作权。

实际应用案例：

应用单位：辽宁省环保厅

2016年辽河流域水环境一体化实时监控系统在示范区及辽河流域实现了业务化运行,系统运行管理规范,运行稳定。环境监管人员可以通过一体化实时监控系统可以对流域的环境状况一目了然,系统采用GIS展现技术与缓冲区分析技术对地图上的指定区域,进行环境要素(污染源、污染物、河流)分析,可以完成水质超标溯源分析,有助于监管人员快速定位问题原因,提高执法效率,保障人民健康及财产安全。2016年9月,工作人员在日常监测工作中,发现南大桥站点氨氮(96小时数据)数值超标,通过一体化实时监控系统溯源分析5分钟定位到该站点上游相关可能的污染源企业清单(3家企业),监察执法人员根据清单中企业分布情况,兵分3路调查取证,确定北票市污水处理厂氨氮中和过滤设备未开启导致超标排放。责令该厂立即开启氨氮中和过滤设备,连续监测4小时后南大桥站点氨氮(96小时数据)数值变为0.08mg/L,监测指标恢复正常。

依托课题:

辽河流域水环境综合管理智能化平台建设课题(2012ZX07505004)

8.2.5 流域水生态风险预警与平台技术

技术就绪度评价等级: 6级

适用范围: 流域水生态风险预警

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

为实现流域水生态环境管理和生态风险控制,针对我国区域特征和流域水生态管理的迫切需求,耦合分析流域水生态系统与社会经济系统,在系统角度对生态风险发生机理进行分析,建立流域水生态风险预警综合模型的集成技术,构建流域水生态风险评估与预警平台,开展业务化应用示范研究。旨在通过科技创新支撑重点流域水生态质量改善,为流域风险管理的实际工作提供有力技术支撑。

(2) 工艺流程

①通过改变生态系统物质和能量输入打破原有生态平衡,进而改变生态系统物质和能量转化的方式的事、物即为压力源,主要包括风险源和胁迫因子;

②生态系统组成要素及其相互联系复杂多样,从生态学理论出发,生态系统本质属性被抽象成结构、过程、功能和服务四部分,生态系统状态从结构和过程进行刻画,生态系统功能即生态系统为人类直接或间接提供服务的能力,并通过其不断输出生态系统服务;

③基于相对风险模型基本原理,构建风险组分间关联关系,收集流域风险源及生态系统



状态监测数据，并结合数据标准化处理方法及地表水环境指标标准（GB 3838-2002）等标准进行量化；通过层次分析法依次对各组分间的关联进行量化；最终通过风险组分的关联运算对湖泊流域生态风险进行量化表征；

④开发流域水生态风险预警平台，集成数据管理与模型运算功能，实现流域水生态风险预警功能。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

- ①流域水生态风险预警模型构建；
- ②流域水生态风险预警模型开发；
- ③流域水生态风险预警数据库设计开发；
- ④流域水生态风险预警平台集成开发。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

获得软件著作权1项。

实际应用案例：

应用单位：江苏省生态环境监控中心

江苏省生态环境监控系统（简称1831）中应用了中国环境科学研究院研发的流域水生态风险预警与平台技术，技术支持了平台功能的实现和业务化运行；为太湖流域水生态风险管理工作提供服务，效果良好。

将该技术应用于1831平台，可为其增添功能。在平台环境可兼容情况下，将水生态风险预警模型与地图开发为服务，发布至1831平台中的ArcGIS Server的Web Service运行。

江苏省生态环境监控中心利用已有的服务器和存储，开展生态环境监控数据建设工作，采用微软SQL Server作为数据库软件平台、构建了统一、安全的生态环境数据中心。业务数据中心存储了全省992个重点污染源（废水330，污水处理厂366，废弃230，重金属66），252个水质自动站，182个空气自动站，559个辐射监控点，121家尾监测站，800个应急风险源，500个水质监测断面（国控125个、省控375个），128个开发区，1316个环境功能分区等信息。

江苏省生态环境监控中心充分利用成熟的信息技术，采用成熟的消息中间件，建成全省共享的生态环境监控数据交换平台，提供饮用水水源地、流域水环境、大气环境、重点污染源、机动车尾气、辐射环境、危险废物、应急风险源等八大监控要素信息交换功能，实现太湖流域水环境监测、空气环境自动监测等自动实时数据。

依托课题：

流域水生态风险评估与预警技术体系（2012ZX07503003）

8.2.6 基于三维数字流域技术的流域水生态承载力与总量控制系统集成技术

技术发展阶段：自主/集成

适用范围：流域尺度水环境管理

主要技术内容和关键技术：

（1）技术原理

以流域水环境系统为核心，用数字化的手段刻画整个流域，以覆盖全流域的整体模型作为基础模拟流域的环境现象和过程，处理大量的流域信息，这些信息包括流域水文水环境信息、流域水工程信息、流域经济社会发展信息。

三维可视化包括流域地形影像可视化、矢量数据可视化、水利工程（三维模型）可视化、模型计算结果可视化、虚拟现实技术五个方面。

地形影像可视化包括地形可视化和影像可视化。地形可视化是将流域范围内的数字高程网格进行三角网构建，同时实现地形数据连续多分辨率的管理和渲染；影像可视化是对影像数据的多分辨率组织管理和展示方式，实现影像金字塔构建和三维可视化流畅的浏览。

矢量数据可视化是将二维矢量数据（点、线、面、体）和三维地形数据的匹配，通过获取地形高程实现矢量数据的贴地、相对高程、绝对高程、矢量面填充等多种可视化展现方式。

水利工程（三维模型）可视化是利用第三方建模工具（3DSMAX）对水利工程进行建模，然后将三维模型导入三维GIS平台和三维地形进行匹配显示。

模型计算结果可视化是在地形影像、矢量可视化基础上，实现模型计算结果在时空维度上的变化过程，主要方式是以计算结果与空间数据（河道面、水库、闸坝）进行仿真展示。

虚拟现实技术是以场景美化和模拟真实世界为目的，系统中主要包括水库水面可视化、水库泄洪可视化、河道面可视化等方式进行展示。

（2）工艺路线

系统采用四层的总体架构（图8-5），分为数据库层、平台层、业务逻辑层和应用层。数据库层主要实现对空间数据、基础属性数据、监测数据、社会经济数据、模型数据、方案数据等的统一数据库平台。平台层主要利用三维GIS平台、数据库管理平台实现数据的导入、

编辑、删除及权限控制的管理。业务逻辑层主要根据系统需求实现空间查询、数据导入导出、数据查询/分析、三维地图服务等功能。系统应用层主要实现了三维流域交互式浏览模块、基础信息及监测信息的查询分析模块、GIS分析模块、专题图层管理模块、水生态承载力分析模块、情景方案可视化分析模块。

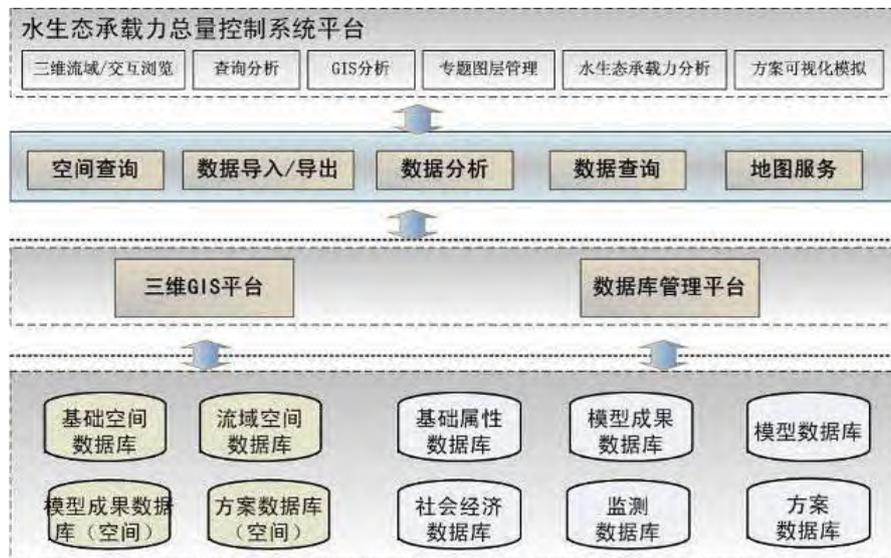


图 8-5 集成系统总体结构

系统以三维GIS平台为基础，主要实现数据管理、数据集成、数据应用分析。

数据管理分为实现空间数据可视化管理、空间数据与属性数据的关联、属性数据的可视化管理三个方面。空间数据以图层方式实现地形数据、影像数据、河道数据、水利工程数据、行政区划数据等基础数据的三维可视化管理，同时利用空间数据和属性数据集成技术实现基础属性、模型数据、监测数据、方案数据和空间数据的无缝集成，实现空间数据到属性数据的可视化管理；数据集成主要将监测数、计算模型输入/输出数据以文件和数据库方式进行集成管理；数据应用是以数据中心为基础，实现业务数据的时空展示、分析和可视化展示。

（3）关键技术方法

①数据库管理子系统

基础空间数据包括行政区划图、乡镇区划图、水系、道路等基础地形图；污染源数据主要包括城市污水处理厂污染源、工业污染源、沿河生活污染源等；支流污染是指支流与干流之间的交汇处，支流中所携带的污染物；水文水质监测数据是指各监测站历年监测到的河流水文水质数据，它能够为数学模型提供输入数据；模型计算结果数据主要包括断面水位、流量、污染物浓度等数据。

②模型管理子系统

采用了包括流域分布式非点源模型、地表水水动力水质模型、系统动力学（SD）模型等在内的多个水环境数学模型，为了加强模型管理，系统根据其特点，采用的集成方式介于紧密集成和完全集成之间，将各类模型进行分类管理，形成模型库，与系统进行耦合，构成以模型库为核心的模型管理子系统。在该子系统中，模型库系统负责水文、水质模拟，水生态承载力计算等工作，而GIS负责模型库系统所需的空间和属性数据的管理和分析、在模拟前和模拟后的辅助。各类模型中，流域分布式非点源模型的集成方式是松散集成，即模型输入数据的前处理、模型的运行和结果输出在系统外依托其他软件完成，但模型结果的展示置入本系统内完成。系统动力学模型采用松散集成的方式，本系统可以从数据库中读取数据，为系统动力学的软件Vensim提供输入条件，Vensim的计算成果则导入数据库系统，并由本集成系统进行展示。地表水水动力水质模型采用完全集成的方式，模型输入条件的前处理、模型的运行以及模型计算结果的后处理均在系统内完成，并且模型数据和成果均与系统数据库进行数据交换。

③流域水生态承载力计算分析子系统

采用系统动力学（SD）软件Vensim计算流域水生态承载力，构建了水生态承载力的指标体系，设计了不同的方案计算承载力，并进行方案比选。由于Vensim软件为商用系统，不具有可与其他系统集成的开放接口，故在本系统中采用了松散集成的方式，本系统可以从数据库中读取数据，给系统动力学的软件Vensim提供输入条件，Vensim的计算成果则导入数据库系统，并由本集成系统进行展示。系统通过调用数据库系统中的相关库表，可对各项指标的数值、年变化趋势及特点进行查询和分析。系统可对其计算结果，即流域水生态承载力进行展示和查询，并实现了多方案水生态承载力对比分析。本研究中采用的流域水生态承载力指标体系包含两层指标，第一层有4个，分别为社会经济指标、水资源指标、水生态指标和水环境指标，第二层共12个，分别是城镇化率、人均GDP、万元GDP需水量、万元GDP污水排放量、人均水资源可供量、供水量与需水量之比、植被覆盖率、河流生态环境需水率、栖息地面积、COD环境容量承载率和氨氮环境容量承载率等。

④三维虚拟仿真可视化子系统

以EviaSightPlatform作为三维GIS平台，该平台提供海量DOM（影像数据）、DEM（地形数据）、3D-Model（三维模型数据）、DLG（矢量数据）、Label（注记）、VR-Effect（VR特效）等空间信息数据的集成、编辑、场景构建功能。三维子系统功能基本功能包括：浏览操作、定制飞行、兴趣点导航、景观特效（水流效果、水质类别）光影技术、凹凸纹理、日照分析、天气模拟等功能。查询分析基本功能包括：查询测量（点图查询、属性查图、测量



坐标、测量距离、测量面积、通视分析、测量状态清除等），空间查询（周边查询、区域查询），定制飞行（受控飞行、环绕飞行），辅助决策（水淹分析、水利工程规划模拟、水资源方案分析）、趋势分析（指标趋势分析）。

（4）技术创新点

针对流域水生态承载力与总量控制工作的数字化和业务化需求，以流域水环境系统模型为核心，基于流域水环境系统的科学认知，初步提出统筹流域水生态、水环境、水文水资源、水工程、经济社会等，基于水生态功能分区技术体系，服务流域总量控制管理的流域数字水环境系统总体架构。

提出支持流域数字水环境系统和流域水环境综合管理的流域水环境系统综合数据库结构，流域水环境系统综合数据库包括流域水生态、水环境、水文水资源、水工程、经济社会等方面的分数据库。

研发了适宜流域水环境综合管理的流域数字水环境系统多种可视化技术，实现流域水环境系统多维信息描述，研究流域水环境系统多类模型、流域数字水环境系统综合数据库、流域数字水环境系统成果可视化等的系统集成技术。

以该项目为基础，推动开发了具有自主知识产权的三维GIS平台“易景三维平台软件”（EviaSightPlatformV2.0）。

（5）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例

应用单位：中国水利水电科学研究院

以太子河流域作为实例。

（1）三维虚拟现实分析功能

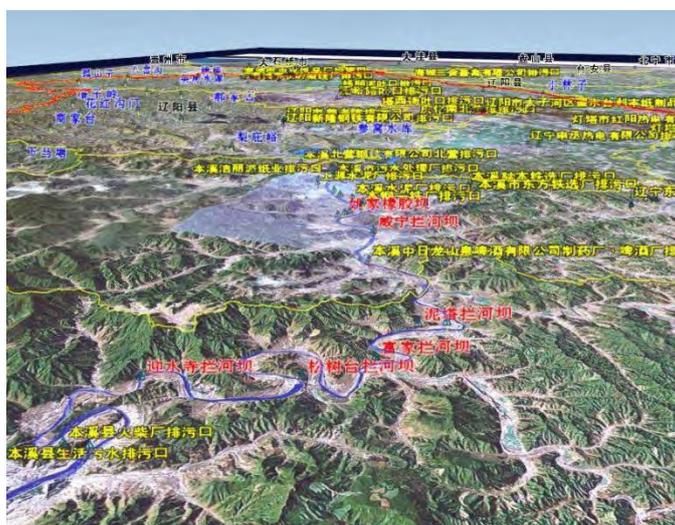
针对三维流域，系统提供了多种交互浏览的手段，包括场景的平移、旋转、缩放、全图，以及图层属性等，功能与二维GIS平台的空间信息浏览功能类似，但由于其场景具有的三维特性，所以也具有其特有的“旋转”功能，可以实现在不同的三维透视角度浏览三维流域的各类空间信息（图8-7）。

三维系统提供了三种地图漫游方式：飞行漫游、旋转浏览和平移浏览。飞行漫游状态下通过鼠标和键盘操作控制视点位置与视角的大小，可以自动调节视角和漫游速度，也可以自由定义和调整速度和视角，实现特定视角下的场景画面漫游。旋转浏览状态下通过按下鼠标左键时鼠标的移动实现视角的调整，按下右键时鼠标的移动实现视点的拉近和远离。平移浏

览则通过按下鼠标左键时鼠标的移动来完成视点的水平移动。通过上述三种方式的操作，就可以方便的实现不同场合、不同用途的流域场景漫游。

路径漫游指的是根据预先设置的路径自动调整位置和视角对所关注线路的三维场景进行自动漫游。本系统采用了开路径的漫游方式，即漫游至终点即结束。

三维动态查询，通过鼠标选择和点击操作，对三维虚拟场景中各个实体的信息进行直接查询，不需要进行场景画面的切换。通过该功能可以在虚拟场景下将三维实体与数据库中相应实体的属性信息（文本、图片、多媒体）连接起来，达到实体三维显示与相关属性信息的一体化表现。



(a) 太子河流域三维场景



(b) 大型水库——覆窝水库

图 8-7 太子河流域三维场景及关键地物示意图



（2）查询分析功能

集成系统提供菜单操作、按钮操作和面向图形操作等多种操作方式。用户可在菜单、按钮或图形上直接查询到相关的各种信息。主要可完成三类查询：一是根据空间定位的图形要素（点状实体、线状实体、面状实体）查询该图形要素所有相关的属性信息，即由图到表的查询方式；二是根据属性数据库信息进行属性信息的查询，即由表到图的查询方式；三是根据空间属性之间的关系，进行由图形到图形的图层之间的查询，即由图形到图形的查询。具体的几类功能如下：

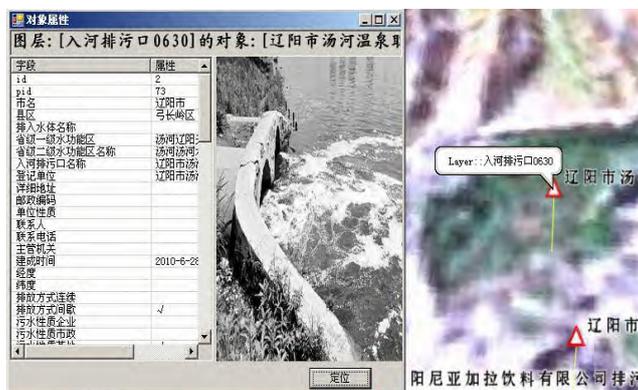
①基础信息查询

基础信息查询主要实现对水文水质站点信息、气象雨量站点信息、污染源信息、入河排污口信息、水库闸坝信息、污水处理厂信息等各类流域基础信息的查询。

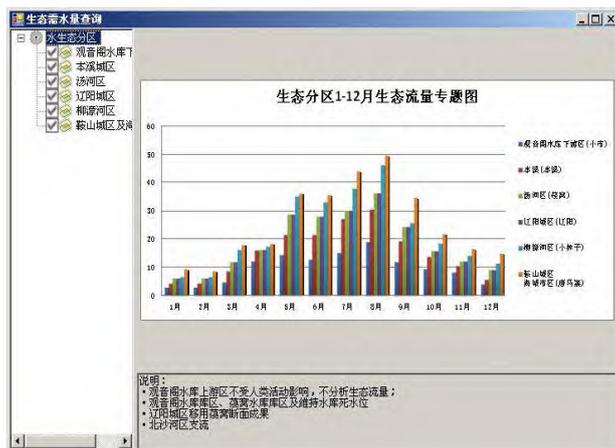
该功能实现了对各类专业数据的查询，并可对数据信息绘制曲线图、柱状图等专业图表。该查询功能可实现两类查询，一类是菜单查询，即通过集成系统的“业务信息查询”菜单来实现；另一类是图形查询，即在三维流域的系统界面中，选择具体对象（如：水文水质站点），弹出信息查询框来实现。具体包括：水文信息查询、水质信息查询、排污口信息查询。其中以排污口信息查询为例，图2中所示为太子河的辽阳市汤河温泉排污口，点击菜单或三维流域中的排污口要素后，弹出排污口的属性数据，包括排污口名称、排放去向、排放方式、强度等属性信息，以及排污口的影像信息。

②流域生态需水量查询

集成系统中开发了流域生态需水量的查询功能，以太子河为例，根据本研究成果，太子河流域分为11个生态需水计算分区（污染控制分区），其中共有六个分区具有生态需水量的计算成果。集成系统中，可以对这六个分区的生态需水量计算成果进行查询和图表的展示（图8-8（a）），具体查询界面如图8-8（b）所示。



(a) 排污口信息查询



(b) 生态流量查询

图 8-8 分区生态需水查询

③河道水环境容量查询

集成系统中实现了对河道水环境容量的查询，根据本研究，太子河流域COD的允许排放量总计为53724.9t/a，氨氮的允许排放量总计为3326.0t/a。根据各排污口的分布位置，将其与11个污染控制分区对应归类，得到其中8个分区对应的太子河干流水环境容量值。集成系统的“河道水环境容量查询”功能就是实现了对上述各分区对应的太子河干流水环境容量值的查询。查询的对话框界面见图8-9示，由图可见，对话框左侧为各分区的列表，分别为观音阁水库下游区、本溪城区、筏窝水库区等；对话框右侧顶端是概化后的太子河干支流、排污口和水质控制断面的空间分布图，由此可对各排污口的位置进行判断；该分布图下端即各污染控制分区COD或氨氮的水环境容量的计算结果查询结果图，可以柱状图或线状图的形式进行展示。

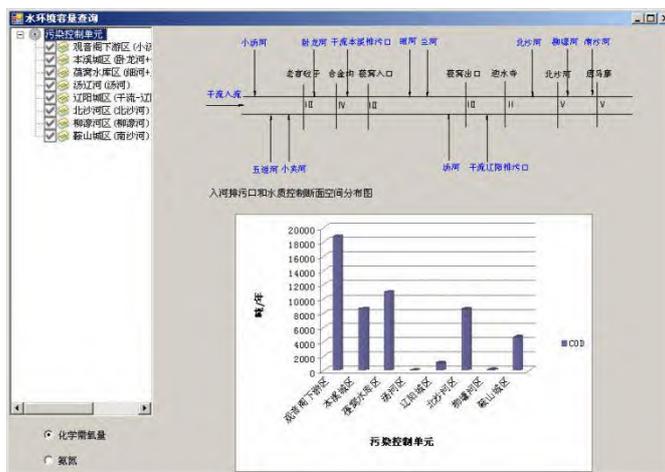


图 8-9 水环境容量查询

（3）环境数学模型分析功能

①流域模型功能

“流域模型”菜单下主要包括“流域污染负荷估算模型”和“流域水环境容量计算模型”，这两个选项主要实现了流域非点源污染负荷估算模型的基础数据、模拟结果等的空间展示以及流域水环境容量计算模型的前处理、模型驱动和模拟结果分析等功能。

②水生态承载力分析

流域水生态承载力分析在流域概况调研及数据收集、水生态承载力指标体系确立后，利用系统动力学（SD）的手段分析各污染控制分区的水生态承载力水平（以“水生态承载度”进行表示），模拟计算水生态承载力各指标的变化特征，由此分析计算未来发展水平下流域内各分区的水生态承载力变化情况。进而可对各种流域发展情景设定方案，分析计算各种发展情景下的流域分区水生态承载力的变化，由此实现各种发展方案的备选，优选出适宜于各流域分区的发展方案。水生态承载力分析的菜单如图8-10示。

“水生态承载力分析”菜单中的“指标分析”选项主要实现对流域水生态承载力指标体系中第二层各指标的分析 and 预测。其左侧为各分区列表，右侧上端为指标体系的框架图，可以通过点击其中的指标，弹出对应指标的多年预测结果。从而实现了单个分区分指标的多年分析，或者多个分区某个指标的多年对比分析等分析和查询功能。另外，系统也可以针对某个具体的分区，进行多种频率年、多种方案的对比查询。

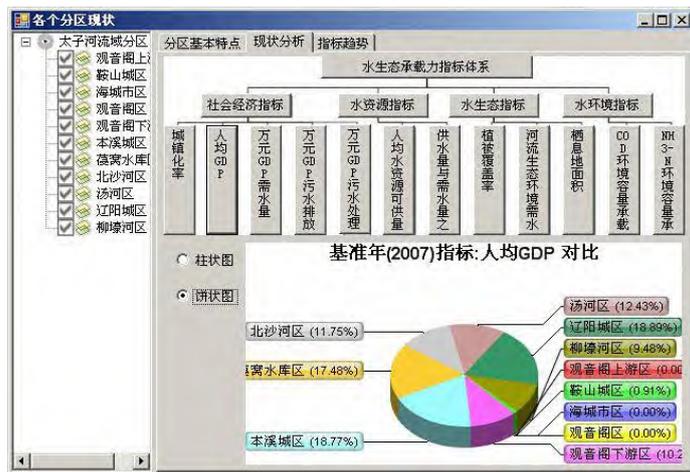


图 8-10 水生态承载力指标分析

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506008）

8.2.7 流域水环境实时数字化管理决策支持

技术发展阶段：初期

适用范围：饮用水源流域

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

采用综合决策支持系统的最新理论和技术,以水环境模型为驱动,融合VR、GIS、OpenGL等技术,开发具有模型参数的动态校正功能的实时控制平台;研发环境数据共享技术,研制动态数据交互适配器,实现基于多方式的系统与实时监测网络无缝连接。

(2) 工艺流程

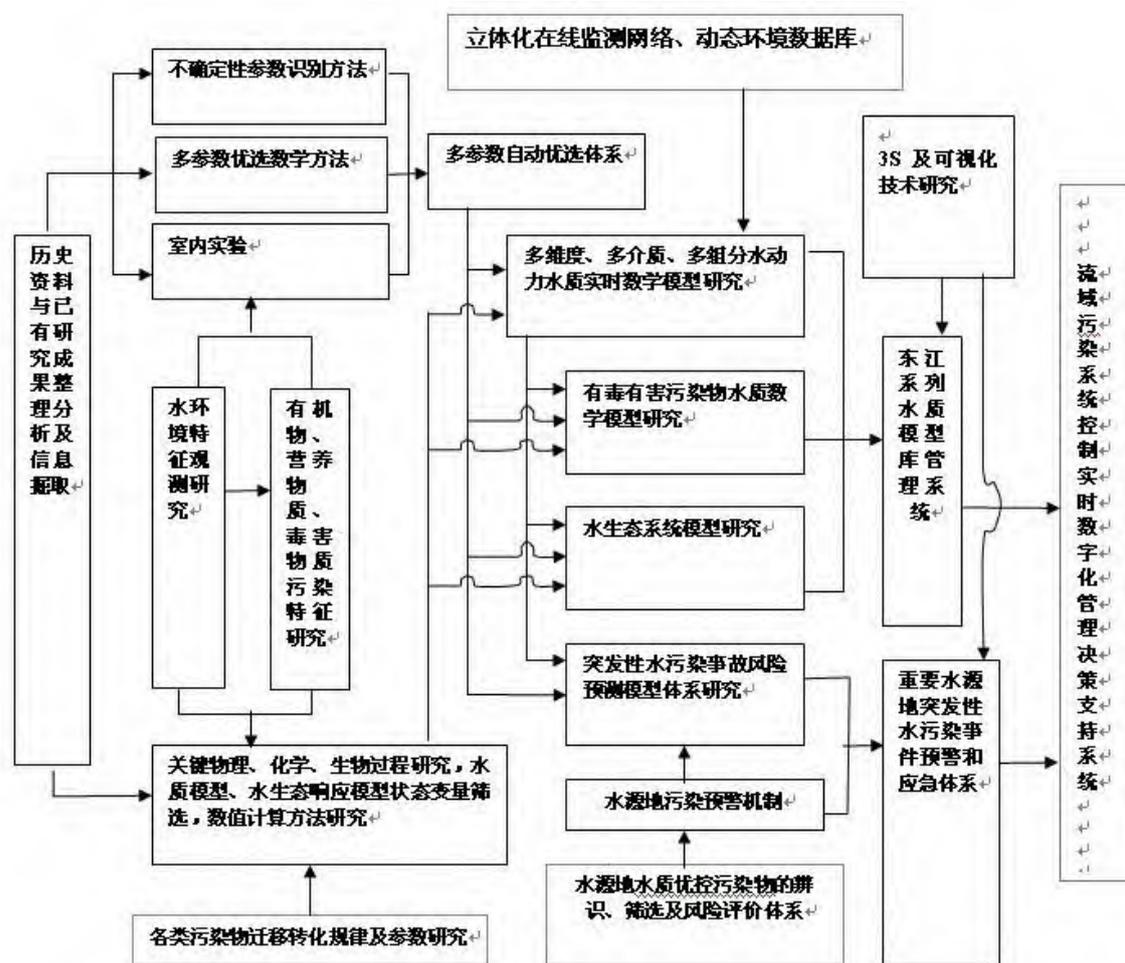


图 8-11 工艺流程图

(3) 关键技术

流域水环境实时数字化管理决策支持系统集成技术。研发了环境数据库、模型库与在线监测网络的实时连接技术以及水动力与水质模拟结果的三维动态仿真技术,对常规污染物实



现了水质实时监测、入河通量实时预报以及污染控制方案优化分析等功能。

实际应用案例

应用单位：在东江流域

采用SQL和ArcGIS等技术，解决了海量异质数据的分类管理和高效存储问题，集成了流域环境数据的元数据标准，建立了基于GIS平台的流域环境数据库，实现了数据动态的可视化管理。

针对东江流域“支流(水库)-干流-三角洲河网”的空间结构，突破了闸坝模拟、河道精准离散、多进程并行计算等关键技术，建立了一体化大流域水环境实时模拟系统，计算速度和模拟精度基本达到实时管理的要求，为水污染控制方案优化决策提供了关键技术支持工具。

以水质实时监测、入河污染负荷实时预报和流域水环境实时模拟系统为核心，在重要河段建立了水质实时预警与应急处置调度系统。结合天气预报，预警时间可提前3~5天，通过系统对东江流量、石马河排水和太园泵站取水优化调度，2010年取水水质达标率提高到99%。

依托课题：

东江流域水污染系统控制实时数字化管理体系研究与应用示范（2008ZX07211-010）

8.2.8 流域水环境实时调控决策支持系统平台

技术发展阶段：示范类技术

适用范围：水环境治理方案优化和实时调控

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

集成了针对重要水质指标的在线水文水质监测网络、流域水环境模型和水环境容量动态分配模型，开发了自主知识产权的水环境实时调控决策支持系统平台。平台实现了空间数据与属性数据管理，包括子流域图、水系图、行政区划图以及水质监测站点等数据资料，能够通过情境模拟，分析不同削减方案下河道水环境的状况，从而实现对流域水环境调控。通过链接水环境实时在线监测数据，初步实现了北运河流域水环境实时调控决策支持功能；采用可视化技术，提升了决策支持能力。

（2）工艺流程

集成了针对重要水质指标的在线水文水质监测网络、流域水环境模型和水环境容量动态分配模型，开发了自主知识产权的水环境实时调控决策支持系统。平台在水利部海河水利委员会水资源保护局进行了示范应用，为实现北运河流域水质的实时在线监测和水环境精细化

管理提供了技术支撑。

平台实现了空间数据与属性数据管理，包括子流域图、行政区划图、土地利用图、土壤类型图、DEM图、水系图、雨量站点图、水文信息监测站点图、水质监测站点图等图层，以及站点降雨量、日照、风速、水位、流量、排污量等流域模拟相关的数据资料。

实现了对水环境状况的模拟与调控。通过情境模拟，分析不同削减方案下河道水环境的状态，从而实现对流域水环境的调控。

链接水环境实时在线监测数据，初步实现了北运河流域水环境实时调控决策支持功能。

采用可视化技术，实现了模拟结果的空间图层分类显示、平面曲线显示、列表显示、不同方案的可视化比较，提升了决策支持能力。

(3) 关键技术

集成流域入河污染源强模型、河流水环境模型、负荷动态分配模型以及在线监测网络，通过多元数据融合及数据模型同化实现了水环境治理方案优化和实时调控。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：水利部海河水利委员会水资源保护局

“北运河水环境实时调控与决策支持系统”的运行地点为海河水利委员会信息网络中心，该系统实际示范区域为沙河闸至老米店闸155km 河段，控制面积4799km²。根据北运河流域代表性小流域径流场实验，揭示污染负荷产生和迁移转化机制，开发北运河流域入河污染源强模型；通过原位实验和室内模拟，确定目标污染物在水体中的迁移转化过程及重要参数；开发河流一维非稳态水环境模型，实现与源强模型的耦合，建立河道水质对入河源强的响应关系；根据各河段的水质目标，采用建立的模型，估算各河段水环境承载能力、分析安全区间、确定负荷削减分配方案；开发监测网络—数据库—水环境模型的无缝链接，建立北运河水环境与污染负荷实时调控系统平台。

依托课题：

海河流域北运河水系水环境实时管理决策支持系统研究与示范（2009ZX07209-001）

8.2.9 重金属污染防治技术体系嵌入环境技术管理体系模式与程序

技术就绪度评价等级：9级

适用范围：重金属污染防治主管部门



主要技术指标和参数：

（1）基本原理

按照项目生命周期过程，重金属污染防治技术管理体系从项目申报立项、设计建设、建成营运等方面全面嵌入项目管理各个环节，实现重金属污染从源头到末端的全过程控制；基于嵌入模型，开发综合防治管理系统软件，以实现重金属污染防治技术体系框架嵌入环境管理制度体系的程序化操作目标，从而提升管理效率和科学决策水平。

（2）应用平台

湖南省重金属污染防治综合管理系统基于防治技术体系与管理体系嵌入模式，将重金属污染防治技术与环境管理制度体系无缝嵌入，形成基于防治技术体系的常态化管理机制，实现重金属综合防治目标。本系统以重金属防治示范区湖南省为对象，综合运用GIS、RS、数据库、网络等手段，开发了重金属项目在线信息化全过程管理、重金属污染源及流域环境信息化管理为一体的重金属污染综合防治管理平台，可实现重金属建设和治理项目在线申报、立项审批、验收和日常监管等功能，为全国重金属污染防治和日常管理提供示范。系统主要功能包括重金属污染防治信息管理、重金属项目全过程管理和污染源特征信息查询功能。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

在现行管理模式的基础上，研发了重金属污染防治技术体系与环境管理制度无缝嵌入技术，该技术和模式可用于重金属污染防治综合管理系统管理流程的筛选和制定；采用三层网络逻辑结构，综合运用GIS、RS、数据库、网络等技术手段，实现了重金属污染防治技术管理体系与环境技术管理制度嵌入模式程序化，使得软件系统既具有良好的操作性和实用性，又保障了政务系统的信息安全。

主要技术经济指标：

系统主要性能：响应时间首页不超过2秒，复杂查询页面不超过3秒；并发用户数为1000用户；日吞吐量达到5万人次；24小时平均无故障运行时间的标准；交互性能：以Web Service接口、Excel文件、Windows API等形式实现和环保数据中心进行数据交互及内部子系统间的数据交互，实现与这些系统的应用、门户、数据等各层面上无缝连接；系统将涉及重金属管理的主要功能集成开发，大大提升了管理效率。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

获得软件著作权。

实际应用案例：

应用单位：湖南省环境保护厅

基于防治技术体系与管理体系统嵌入模式的重金属污染管理系统已获得软件著作权，并于2015年12月在湖南省环境保护厅正式上线运行，运行效果表明系统运行稳定，各硬件设备和软件系统均运行正常，系统软、硬件功能均能达到预期目标。同时，已经按照商业软件开发模式，进行二次开发和升级，以适应不同区域流域和不同行业的污染防治综合管理特点，具有较好的市场价值和应用前景。

依托课题：

典型重金属污染防治技术评估研究及示范（2013ZX07504-001）



9 流域水环境基准标准体系

9.1 流域水环境基准制定技术

9.1.1 水生生物基准制定技术

参见《淡水水生生物基准制定技术指南》（HJ831-2017）

9.1.2 湖泊营养物基准制定技术

参见《湖泊营养物基准制定技术指南》（HJ 838-2017）

9.1.3 沉积物基准制定技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：适用于流域水环境中污染物或化学品的沉积物质量基准值的制定

主要技术指标和参数：

（1）沉积物质量基准制定流程

沉积物质量基准的制定主要包括3个步骤（图9-1），具体如下：

①毒性数据的收集和筛选；②沉积物质量基准的推导；③沉积物质量基准的校验和审核。

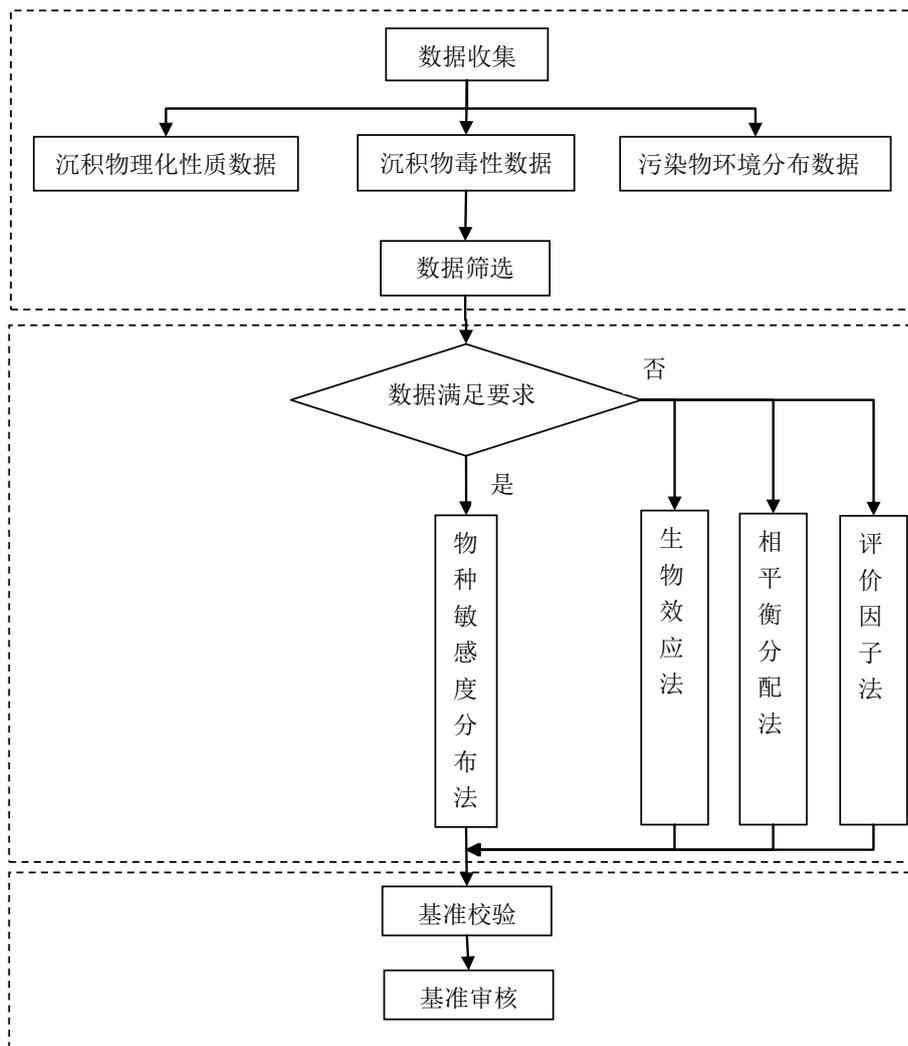


图 9-1 沉积物质量基准制定技术流程

(2) 毒性数据的收集和筛选

①数据来源

数据包括沉积物毒性数据、沉积物理化性质数据、污染物的理化性质数据和环境分布数据等。数据来源包括公开发表的文献资料、国内外相关数据库和实测数据。

②沉积物毒性数据受试物种的选择

优先收集以代表性底栖生物作为受试生物的沉积物毒性数据。受试底栖生物应具有比较丰富的生物学背景资料，具有较高的敏感性，具有比较广泛的地理分布和足够数量，容易在实验室内驯养和试验。受试物种应尽量涵盖多个营养级。

③沉积物毒性数据的收集

沉积物基准指标主要是基于生物个体水平的毒理学试验终点指标，通常包括对生物个体的急性毒性和慢性毒性指标。通过模型预测获得的毒性数据，经过验证后可以作为参照数据。



急性毒性指标是指相对于受试生物的生命史，污染物暴露较短的时间产生的短期有害效应。测试时间一般不超过96小时，测试指标为死亡或生物体主要功能受损，一般用 LC_{50} （半数致死浓度）或 EC_{50} （半数效应浓度）表示。

慢性毒性指标是指相对于受试生物的生命史，污染物暴露较长的时间产生的长期有害效应。试验时间通常在10天以上。另外，可以选择底栖生物最敏感的生活阶段进行毒性测试。

④数据评估与筛选

为了保证沉积物质量基准的科学性，需要对数据进行评估和筛选。数据评估与筛选的原则主要包括：A. 是否使用国际、国家或行业的标准测试方法，操作过程是否遵循良好实验室规范（good laboratory practice, GLP）；B. 对于非标准测试方法的实验，所用方法是否科学合理；C. 实验过程和实验结果的描述是否详细；D. 文献是否提供了原始数据。

用于沉积物基准制定的数据，应符合以下筛选条件：

A. 受试生物的分类学信息、生活阶段和效应终点明确；B. 实验过程中应严格控制实验条件，使受试生物处于最适的生长环境；C. 实验必须设置对照，对照组受试生物的生活生长状况良好，成活率不应低于70%-90%；D. 实验方法应包括沉积物pH、有机质含量、粒径分布等重要的理化参数信息；E. 污染物的实测浓度与理论浓度的偏差应小于20%，如果大于20%，应采用实测浓度计算剂量-效应关系。

（3）沉积物质量基准的推导

①沉积物质量基准推导方法

优先推荐采用物种敏感度分布法推导沉积物质量基准。一般需要不同门类10种以上生物的沉积物毒性数据建立物种敏感度分布模型。可以利用急慢性比（ACR）推算沉积物毒性数据或质量基准。当毒性数据不能满足方法要求时，可以采用生物效应数据库法、相平衡分配法、评价因子法等备用方法推导沉积物质量基准。

物种敏感度分布法推导沉积物质量基准的具体步骤如下：

A. 毒性数据分布检验。将筛选获得的污染物的毒性数据进行正态分布检验。如果不符合正态分布，进行数据变换后重新检验。

B. 累积概率计算。将所有已筛选物种的最终毒性值按照从小到大的顺序进行排列，计算其分配等级R，最小的最终毒性值的等级为1，最大的最终毒性值等级为N，依次排列。如果有两个或者两个以上物种的毒性值相等，那么将其任意排成连续的等级，计算每个物种的最终毒性值的累积概率，计算公式如下：

$$P = \frac{R}{N+1} \times 100\%$$

式中： P —累积概率，%； R —物种排序的等级； N —物种的个数。

C. 模型拟合与评价。推荐使用逻辑斯谛分布、正态分布、极值分布三个模型进行数据拟合，根据模型的拟合优度评价参数分别评价这些模型的拟合度。最终选择的分布模型应能充分描绘数据分布情况，确保根据拟合的SSD曲线外推得出的沉积物基准在统计学上具有合理性和可靠性。

D. 沉积物质量基准外推。SSD曲线上累积概率5%对应的浓度值为 HC_5 ，即可以保护沉积物中95%的生物所对应的污染物浓度。根据推导基准的有效数据的数量和质量，除以一个安全系数，即可确定最终的沉积物质量基准。

②沉积物质量基准的结果表述

按照物种敏感度分布法，由沉积物急性毒性数据推导的基准值作为沉积物质量基准高值（SQC-H），由沉积物慢性毒性数据推导的基准值作为沉积物质量基准低值（SQC-L）。

沉积物质量基准以单位干重沉积物中污染物质量表示，单位为mg/kg。对于有机污染物，折算为TOC为1%时的沉积物质量基准。

（4）沉积物质量基准的校验和审核

①基准的校验

沉积物质量基准校验包括基于加标沉积物的实验室校验和基于实际沉积物的现场校验。

实验室校验是根据已经制定的沉积物质量基准数值设计一系列浓度梯度进行污染物加标沉积物毒性试验。如果不同加标浓度的沉积物表现出相应合理的生物毒性，那么制定的基准值通过加标沉积物的实验室校验。

现场校验是在取自现场的实际沉积物样品中分别添加不同的材料，选择性吸附或螯合沉积物中的非极性有机物、重金属或氨氮等污染物，去除干扰物质，保留受试物。测定沉积物中受试物的实际浓度，与已经制定的沉积物质量基准进行对比，并进行沉积物毒性试验。如果沉积物中的污染物浓度表现出相应合理的生物毒性，那么制定的基准值通过实际沉积物的现场校验。

一般情况下，在实验室校验和现场校验过程中，沉积物中污染物的浓度与生物毒性的符合程度达到70%，沉积物质量基准可以通过校验。

②基准的审核

沉积物质量基准的最终确定需要技术专家对基准值进行咨询论证，审核项目包括：



A. 基准推导所用的数据是否可靠；B. 受试物种的种类和数量是否符合沉积物质量基准推导要求；C. 基准推导过程是否符合技术指南；D. 得出的基准值是否合理；E. 是否有任何背离技术指南的内容并评估是否可接受。

（5）沉积物质量基准的应用

①用于沉积物质量标准的制修订。沉积物质量基准是制订沉积物质量标准的基础。依据本标准制定出的沉积物质量基准可以用于指导沉积物质量标准的制修订。

②用于沉积物质量评价与风险评估。沉积物质量基准是沉积物质量评价和风险评估的重要依据。依据本标准制定的沉积物质量基准可用于沉积物质量评价以及沉积物中污染物的风险评估。

③用于应急事故管理和环境损害鉴定评估。沉积物基准为污染物的应急事故管理和环境损害鉴定评估提供重要参考。当某一污染物造成突发性污染事故，而又没有相应的沉积物标准作为参考时，污染物的处理处置以及损害鉴定评估可以参照沉积物质量基准进行。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.1.4 湖泊沉积物营养盐基准制订技术

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：不同类型湖泊沉积物营养盐基准阈值制订

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

将相平衡分配法、吸附-解吸平衡法、背景值比较法、沉积速率法等沉积物营养盐基准制订中的关键技术系统集成，建立了湖泊营养物基准制订技术。相平衡分配法认为间隙水、沉积物相均是底栖生物有效的接触相，化学物质在孔隙水、沉积物和底栖生物组织中处于热力学平衡状态，当与沉积物处于平衡的间隙水相中的营养盐浓度达到水质基准时，其在沉积物中的浓度即可视为沉积物营养盐基准；吸附-解吸平衡法通过代表性区域大量样品的吸附解析实验，建立营养盐含量与平衡点之间的线性回归方程，确定沉积物营养盐基准阈值；背景值比较法通过对比同一区域不同湖泊的污染背景值或单个湖泊不同点位的污染背景值，确定该区域或单个湖泊沉积物营养盐基准值；沉积速率法计算沉积物中营养盐的沉积物通量，通过其时间变化趋势判断自然富营养化的基准点，并推算出沉积物营养盐基准值。对于区域湖泊或者单个湖泊采用不同沉积物营养盐基准制订方法的优化组合和系统分析，科学确定湖

泊沉积物营养盐基准阈值。

(2) 技术流程

技术流程为“相平衡分配法-吸附解吸平衡法-背景值比较法-沉积速率法-综合评估”。

①构建区域湖泊或者单个湖泊表层水中TP、TN与沉积物中相应的TP、TN的函数关系，并根据水质基准推导相应的沉积物营养盐基准值阈值；②通过代表性区域大量样品吸附解析实验，确定沉积物的吸附-解吸平衡浓度，建立营养盐含量与平衡点之间的线性回归方程，反推沉积物营养盐基准阈值；③通过对比同一区域不同湖泊的污染背景值或单个湖泊不同点位的污染背景值，确定该区域或单个湖泊沉积物营养盐基准阈值；④计算沉积物中营养盐的沉积物通量，通过其时间变化趋势判断自然富营养化的基准点，并推算出沉积物营养盐基准阈值；⑤评估区同一区域不同湖泊的污染背景值或单个湖泊不同点位沉积物污染状况和上覆水体水质，评估各种方法确定的沉积物营养盐基准阈值的科学性和合理性，最终确定区域湖泊或单个湖泊沉积物营养盐基准。

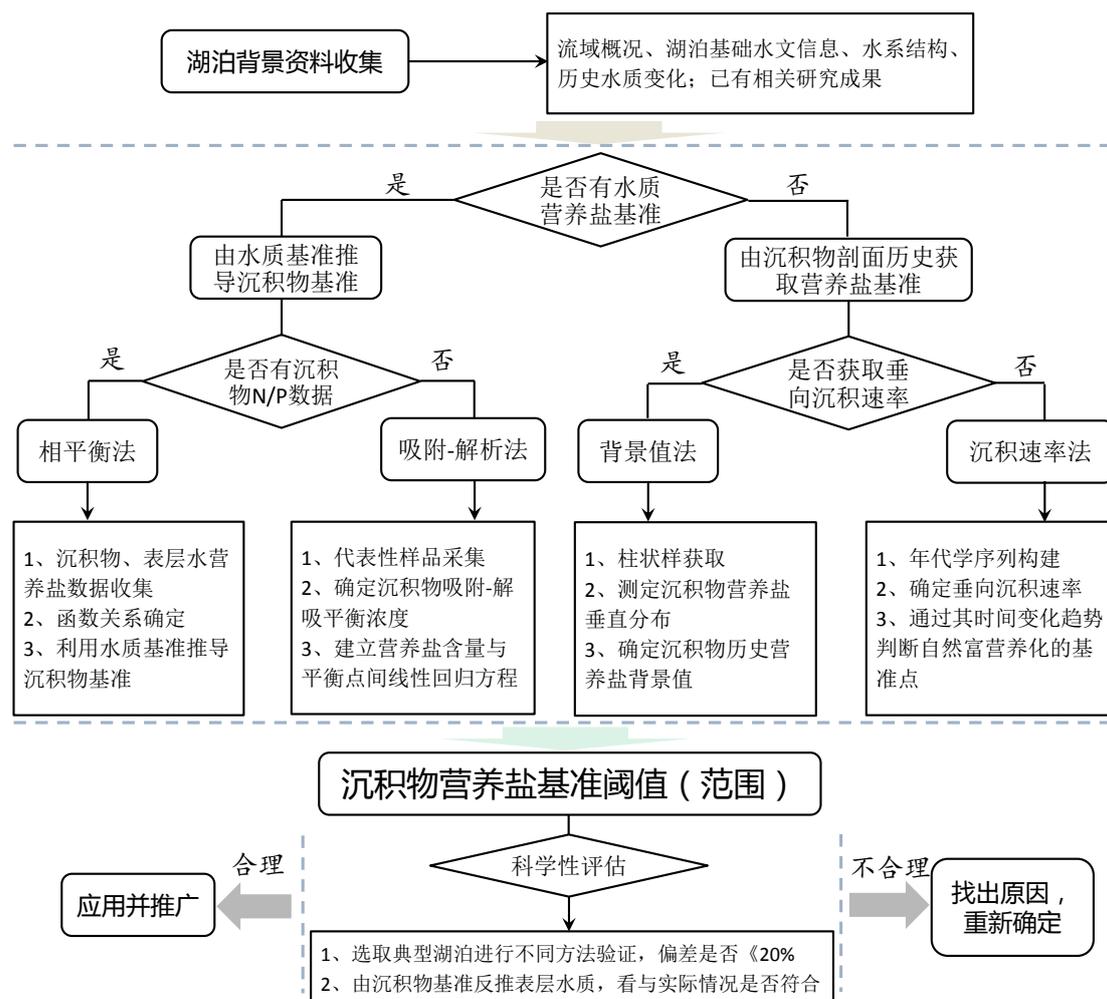


图 9-1 浅水湖泊沉积物营养盐基准制订技术流程图



（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

背景值比较法和沉积速率法适于具体某个湖泊或某一类自然输入和沉积条件类似的湖泊沉积物营养盐基准阈值的制订。相平衡分配法、吸附-解吸平衡法都是基于静态吸附-解吸实验所确定的吸附-解吸平衡浓度来确定沉积物营养盐基准阈值，对于受水动力扰动较大的湖泊，沉积物、间隙水和上覆水中营养盐的交换比较频繁，在采用该方法时，需尽可能多的获取不同点位不同季节的沉积物营养盐数据，以减少方法的不确定性，因而更适于水动力影响较小的湖泊沉积物中营养盐基准的制订。“十一五”没有开展沉积物营养基准的研究，“十二五”通过系统研究，将几种方法优化集成，体现湖泊沉积物中营养盐分布的异质性和易迁移转化性，可以科学确定不同类型湖泊沉积物营养盐基准阈值。通过国内外公开发表文献检索，本关键技术是国内外首次优化集成了湖泊沉积物营养盐基准制定技术，尤其在浅水湖泊沉积物营养盐基准制定方面有重大创新。

主要技术经济指标：

①背景值法和沉积速率法要求湖泊沉积物采样密度为1个点/16km²，采样点控制面积占湖泊总面积的70%以上，柱芯深度要大于20cm，区域内多个湖泊的沉积物营养盐基准阈值需保证在90%置信区间内；②相平衡分配法、吸附-解吸平衡法的相关性系数（R²）需要达到0.9以上，残差值符合正态分布，满足线性和方差齐次的假设，采用90%置信区间估计预测阈值不确定性；③四种方法综合应用确定的沉积物营养物基准阈值区间重合率可达到70%以上，保证确定的沉积物营养物基准值可以保护90%区域内湖泊。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

应用本关键技术初步确定了东部浅水湖区、太湖和巢湖沉积物营养盐基准阈值范围，通过不同方法的优化组合分析，保障确定阈值的合理性和科学性，可以有效指导区域湖泊或单个湖泊沉积物营养盐污染的控制。

（1）在巢湖开展了浅水湖泊沉积物营养盐基准制订技术应用研究。在全湖区700km²采集了超过50个沉积物柱状样，分析发现其不同湖区沉积速率在0.15-0.30g/cm²/a，但在垂直分布上，近年来无明显变化趋势，表明富营养化对于沉积速率的贡献不显著；全湖沉积物对于上覆水P的贡献42t/a，约占年负荷的5%；建议巢湖沉积物P基准为0.3-0.5mg/kg。上述结果已

被合肥市规划部门采纳应用，将有力支撑巢湖流域污染防治和生态保护实践。随着巢湖污染治理的推进，沉积物污染治理的需求将进一步凸显，上述巢湖沉积物营养盐分布状况和内源贡献的结果，将在未来存在广泛的应用前景。

(2) 在武汉梁子湖开展了浅水湖泊沉积物营养盐基准制订技术应用研究。在120km²湖面采集了超过20个沉积物柱状样，分析发现氮磷营养盐垂直分布上无明显变化趋势，全湖内源氮磷贡献量分别为1.7t/a、480t/a；建议梁子湖沉积物氮磷的基准为0.4-0.5mg/kg和650-830mg/kg。上述结果已被梁子湖区规划部门采纳，对于湖区水产养殖控制提供了支撑。此外，案例研究还发现梁子湖营养盐问题主要集中在湖区沿岸区域和河口区域，这将对未来的全流域水污染控制和治理提供支撑。

(3) 在重庆园博园龙景湖开展了浅水湖泊沉积物营养盐基准制订技术应用研究。在0.7km²湖面(包括原湖区和新增淹没区)采集了超过17个沉积物柱状样，分析发现整个湖区N负荷贡献量为3.95t/a，新增淹没区贡献率为85%；P负荷贡献量为0.4t/a，新增淹没区贡献率为72%。上述研究结果已被重庆园博园管理处采纳，并纳入了龙景湖水质保持及上游流域水污染治理规划，指导了园区水污染控制工程设计并开展了应用，工程实施后，实现湖体水质达到地表水IV类标准。由于重庆市正在开展次级河流和湖库的水污染治理和生态修复工程实践，率先开展的园博园龙景湖的治理模式对于后续湖泊治理具有很好的借鉴意义，因此具有较好的应用推广前景。

依托课题：

东部浅水湖泊营养物基准标准及太湖达标应用研究（2012ZX07101002）

9.1.5 保护人体健康的“国家-流域-区域”水质基准制定关键技术

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：地表水饮用水水源地水质基准、用于水产养殖水体或渔业捕捞的淡水水体质量基准，以及上述2种用途的淡水水体质量基准的制定

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

人体健康水质基准技术适用于水体不同指定用途的地表水人体健康水质基准的制定。制定人体健康水质基准的目标是，通过制定环境水体的最高浓度限值，确保长期经口暴露的一般人群的身体健康。环境水体与人体经口暴露相关的有两种主要指定用途。

为了保证上述两种水体指定用途，确保摄入饮用水和水产品的一般人群的健康和安全，

应用人体健康风险评价原理，建立人体健康水质基准推导方法。

（2）工艺流程

建立我国特定地方人体健康水质基准制定方法。本方法的特定地方适用于我国所有地方，如US EPA定义的特定地方可以是州、授权的部落和其他地区（如河流、湖泊、溪流、池塘等）等受关注的地方，因此，本方法的特定地方也适用于上述特定水体（流域、区域、省、河流、湖泊、溪流、池塘等一系列受关注的地方）。因此，对于所有位点来说，没有一种方法是最好的、最适用的。在每一种情况下，研究人员应基于对特定地方的充分理解，确定开展人体健康基准的推导程序。

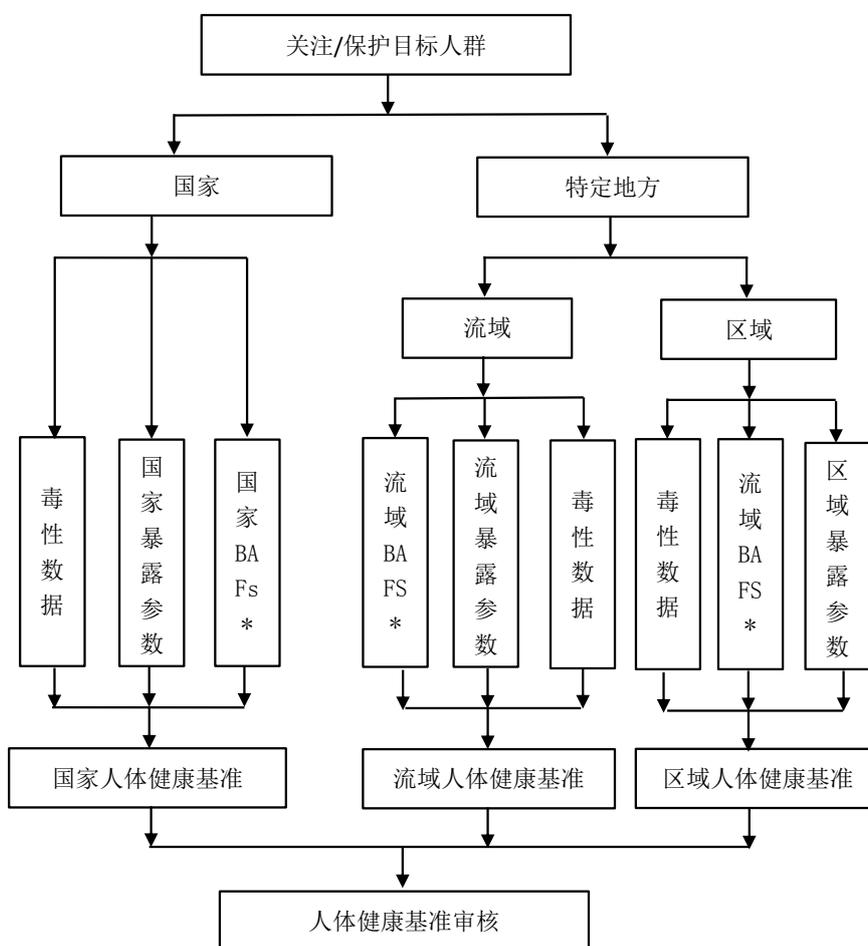


图9-2 工艺流程图

具体工艺流程如下：

①人体健康水质基准推导技术：基于人体健康风险评价的基本原理，开展化学物质的健康危害评估、人群暴露评价（暴露参数和相关源贡献）、化学物质的生物蓄积性研究，人体健康水质基准推导（图9-3）。

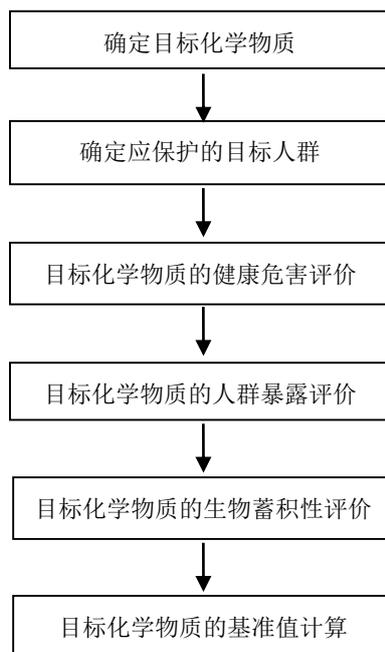


图 9-3 人体健康水质基准制定技术流程

②人体健康危害评价

人体健康危害评价优先选用人类流行病学研究数据。缺乏人类流行病学研究数据时，从动物试验数据外推至人类，以动物试验研究结果为起点，常用的数据有NOAEL、LOAEL或10%附加风险剂量的95%置信下限（LED₁₀）。化学物质的人体健康危害评价分为致癌物和非致癌物危害评价，致癌物危害评价又可分为线性致癌物和非线性致癌物危害评价。

A. 非致癌物效应的危害评价

化学物质非致癌效应健康危害评价采用参考剂量（Reference Dose, RfD）。优先采用可靠非致癌物RfD为流行病学调查的人体数据。缺乏人体数据时，从动物试验研究数据推导RfD。

B. 致癌效应的危害评价

致癌效应的危害评价首先要进行证据效力陈述，即依据生物学、化学和物理学方面的考虑做全面的判断。列出关键证据，针对肿瘤数据、有关作用模式的信息、对包括敏感亚群在内的人体健康危害、剂量-效应评价等方面进行讨论。重点描述暴露途径和浓度及其与人类的相关性，并对数据库的优缺点进行讨论。

③暴露评价

推导人体健康基准的保护目标，就是保护人体免于遭受长期暴露效应的基准，认为特定成年人与终生暴露相关的暴露参数值是最适数值。

A. 暴露参数的选择

暴露参数依据保护目标可作调整。流域（区域）人体健康水质基准优先选择本流域（区



域)的暴露参数,其次选择可采用全国性调查数据计算的暴露参数。根据人体健康水质基准设定的保护对象选择暴露参数,如:保护对象为儿童、育龄妇女、孕妇等特殊人群,可开展相关调查获取暴露参数。

人体健康水质基准所用到的体重、饮用水摄入量、鱼虾贝类摄入量等暴露参数可参考《中国居民营养与健康状况调查报告之一:2002综合报告》和《中国人群暴露参数手册(成人卷)》,也可以依据保护需求,通过调查或者计算,获得当地最新的鱼类摄入量均值或第90%分位数。

B. 相关源贡献

对于非致癌物和非线性致癌物的暴露评估,需要考虑来自饮用水、食物、呼吸和皮肤途径的暴露总量。将来自水源和鱼类摄入的一部分暴露量占总暴露量的比值,即相关源贡献进行说明,确定RSC的方法主要为暴露决策树法。RSC的默认值为20%。

④生物累积系数的推导

依据化学物质的性质,选择生物累积系数推导方法,见图9-4。

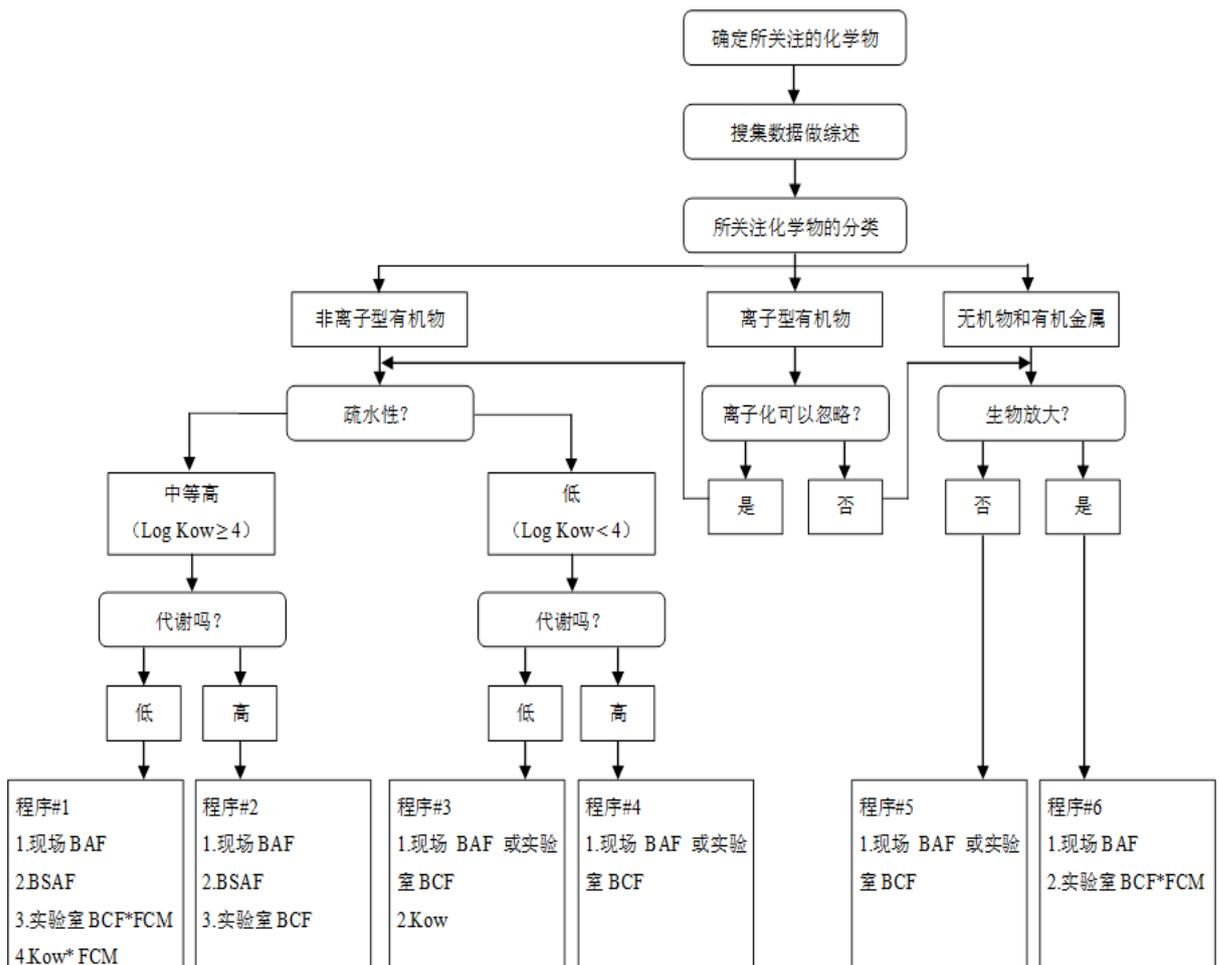


图 9-4 生物累积系数推导程序

生物累积系数推导完成后,依据以下顺序选择最终基线 BAF^{fd} :

A. 现场实测BAF推导的基线BAF^{fd}; B. 现场实测BSAF推导的预测基线BAF^{fd}; C. 实验室实测BCF和FCM预测的基线BAF^{fd}; D. 从K_{ow}和FCM预测基线BAF^{fd}。

⑤人体健康水质基准的制定

A. 同时摄入饮用水和鱼类 (W+F) 的人体健康水质基准

(a) 非致癌物的W+F基准计算

$$WQC_{W+F} = Rfd \times RSC \times \frac{BW}{DI + \sum_{i=2}^4 (FI_i \times BAF_i)} \times 1000 \quad (1)$$

公式(1)中: WQC_{W+F}——同时摄入饮用水和鱼类 (W+F) 的人体健康水质基准, μg/L; RfD——非致癌物参考剂量, mg/kg·d; BW——成年人平均体重, 60.6 kg; DI——成年人每日平均饮水量, 1.85 L/d; FI_i——成年人每日第i营养级鱼虾贝类平均摄入量, 29.6 g/d; BAF_i——第i营养级鱼虾贝类生物累积系数, L/kg; RSC——相关源贡献。

(b) 致癌物的W+F基准计算

非线性致癌物

$$WQC_{W+F} = \frac{POD}{UF} \times \frac{BW}{DI + \sum_{i=2}^4 (FI_i \times BAF_i)} \times 1000 \quad (2)$$

线性致癌物

$$WQC_{W+F} = \frac{ILCR}{CSF} \times \frac{BW}{DI + \sum_{i=2}^4 (FI_i \times BAF_i)} \times 1000 \quad (3)$$

公式(2)、(3)中: WQC_{W+F}、BW、DI、FI_i、BAF_i的参数含义见公式(1), POD是致癌物质非线性低剂量外推法的起始点, 通常为LOAEL、NOAEL或LED₁₀, CSF为癌斜率因子, mg/kg d, ILCR为终身增量致癌风险, 10⁻⁶。

C. 仅摄入鱼虾贝类 (F) 的人体健康水质基准

(a) 非致癌物的F基准计算

$$WQC_F = Rfd \times RSC \times \frac{BW}{\sum_{i=2}^4 (FI_i \times BAF_i)} \times 1000 \quad (4)$$

(b) 致癌物的F基准计算

非线性致癌物



$$WQC_F = \frac{POD}{UF} \times \frac{BW}{\sum_{i=2}^4 (FI_i \times BAF_i)} \times 1000 \quad (5)$$

线性致癌物

$$WQC_F = \frac{ILCR}{CSF} \times \frac{BW}{\sum_{i=2}^4 (FI_i \times BAF_i)} \times 1000 \quad (6)$$

公式（4）、（5）、（6）中： WQC_{W+F} 、 BW 、 DI 、 FI_i 、 BAF_i 、 POD 、 CSF 、 $ILCR$ 的参数含义见公式（1）、（2）和（3）。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

①初步建立水生蔬菜的生物富集测试技术，符合我国人群消费水产品的实际情况。

在文献调研的基础上，选择我国分布较为广泛、种植面积较大、居民比较普遍食用的蕹菜和水芹菜作为生物富集试验的受试生物，设计相关试验装置、制定水生蔬菜生物富集试验的方法。开展了重金属镉、铅和邻苯二甲酸乙基己基酯的生物富集试验，获得它们在水生蔬菜中的生物富集系数。

②初步提出“国家-流域-区域”三级人体健康水质基准的制定技术框架

借鉴美国EPA特定地方人体健康水质基准制定方法，建立我国特定地方人体健康水质基准制定方法，本方法的特定地方适用于我国所有地方，如美国EPA定义的特定地方可以是州、授权的部落和其他地区（如河流、湖泊、溪流、池塘等）等受关注的地方，因此，本方法的特定地方也适用于上述特定水体（流域、区域、省、河流、湖泊、溪流、池塘等一系列受关注的地方）。因此，在每一种情况下，研究人员应基于对特定地方的充分理解，确定开展人体健康基准的推导程序。

（4）技术来源及知识产权情况

优化集成。

申请发明专利1项。

“一种获取水生蔬菜污染物富集系数的方法及装置”，申请号：201410616832.6

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

采用上述技术方法提出5项人体健康水质基准值如表9.1所示。

表9.1 人体健康水质基准

项目	基准值	
	W+O	O
硝基苯	12 µg/L	167 µg/L
邻苯二甲酸乙基己基酯	0.20 µg/L	0.22 µg/L
镍	376µg/L	880µg/L
锌	5633µg/L	13201µg/L
镉	0.6 µg/L	0.7 µg/L

保护人体健康的环境水体质量基准（简称人体健康水质基准）是环境水体中化学物质对暴露人群不可能造成显著风险的浓度估值，它是一个预期的最高浓度。本方法以保证后面两种功能的安全性为目标，提供具有我国特色的人体健康水质基准制定程序、技术框架和方法。制定基准的主要目标是保障流域人群在生命周期内摄入来自环境水体的饮用水和鱼虾贝类水产品时，水体中的化学物质不会对人体健康造成显著的健康风险。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.1.6 水生态学基准制定技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：适用于不同生态功能分区的河流、湖泊（水库）以及河口水生态学基准的推导

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

水生态学（含营养物）基准的制定主要考虑水生态完整性与水质的关系，通过现场调查和历史资料分析出水质良好或健康的参照点状况，以此为基准值制定的主要依据，再通过实验或调查结果对基准值进行校验。

（2）技术流程

水生态学基准制定的技术流程包括五个步骤：

- ①参考状态的确定；
- ②基准参数指标的筛选；
- ③参数指标的调查；
- ④基准值的推导；
- ⑤基准值的校验与评价。



（3）技术创新点及主要技术经济指标

采用综合指数法和参照状态法结合，从水生态系统水平上，推导制定水质基准。根据水环境生态类型（湖库、河流、河口）特点，同时推导出多项生态学指标和复合型指标的基准建议值（TN、TP、COD、DO、*Chl a*）。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

（5）水生态学基准的应用

最终确定的生态学基准主要可应用于以下领域：

①水质生态学标准的转化和制定。生态学基准可用于不同水体用途和管理目标下，各级别生态学标准的转化和确定，同时也可藉此用作水质保持过程中的评判依据之一；

②水污染控制。生态学基准可应用于基于水环境质量的水体污染控制，包括水体现状评价和污染控制目标的量化，环境承载力及特定目标下TMDL的计算基线等；

③流域管理。生态学基准基于流域制定，可作为流域水质管理，尤其是非点源污染影响下流域管理的重要依据，包括对营养化过程的评价和控制、复合污染物的控制等。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.1.7 河口营养物基准制定技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：适用于我国河口营养物基准制定

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

根据河口水质状况、栖息地环境质量和生物生态特征构建了河口生态健康评估技术，在确定河口生态健康等级的基础上，采用频数分布、压力-响应模型等方法构建了河口营养物基准制定技术。

（2）技术流程

河口营养物基准推导包括以下五个步骤，具体制定技术流程见图9-5。

①河口分类；

②数据收集及筛选；

③营养物状态变量指标筛选；

④营养物基准推导；

⑤基准值的审核。

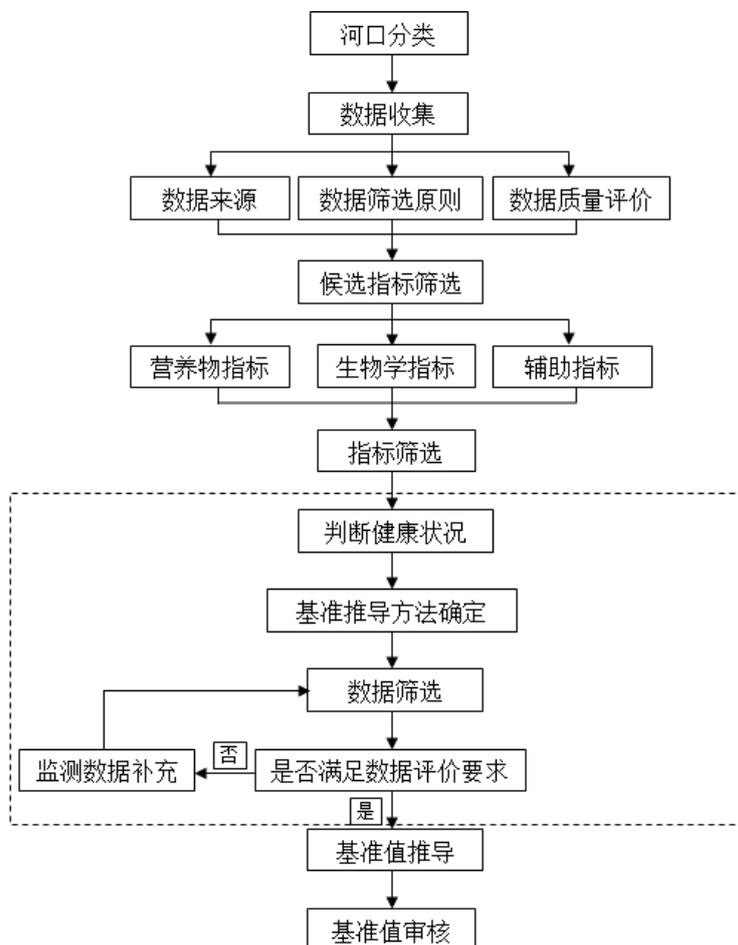


图9-5 工艺流程图

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

采用模糊综合评价法构建了涵盖河口水质、栖息地质量和生物生态特征的河口生态健康综合评估技术。根据河口地貌和水文特征，建立了河口分类和分区技术方法，为分类、分区制定河口营养物基准提供了技术支撑。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.2 流域水环境基准校验技术

9.2.1 水生生物基准校验技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：流域水生生物基准的校验

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

收集并整理流域水环境中优先控制污染物的毒性数据，并实验补充流域本土水生生物的急性毒性数据和慢性毒性数据，利用物种敏感度分布曲线法推导校验保护流域不同年代水生生物的污染物急性和慢性水质基准值。此外，鉴于流域水化学因子和生态因子对污染物的毒性产生影响，需要考虑水效应和生物效应来校验水质基准。验证试验的测试方法需参照OECD、ASTM、USEPA或我国颁布的标准毒性测试方法进行。

（2）工艺流程

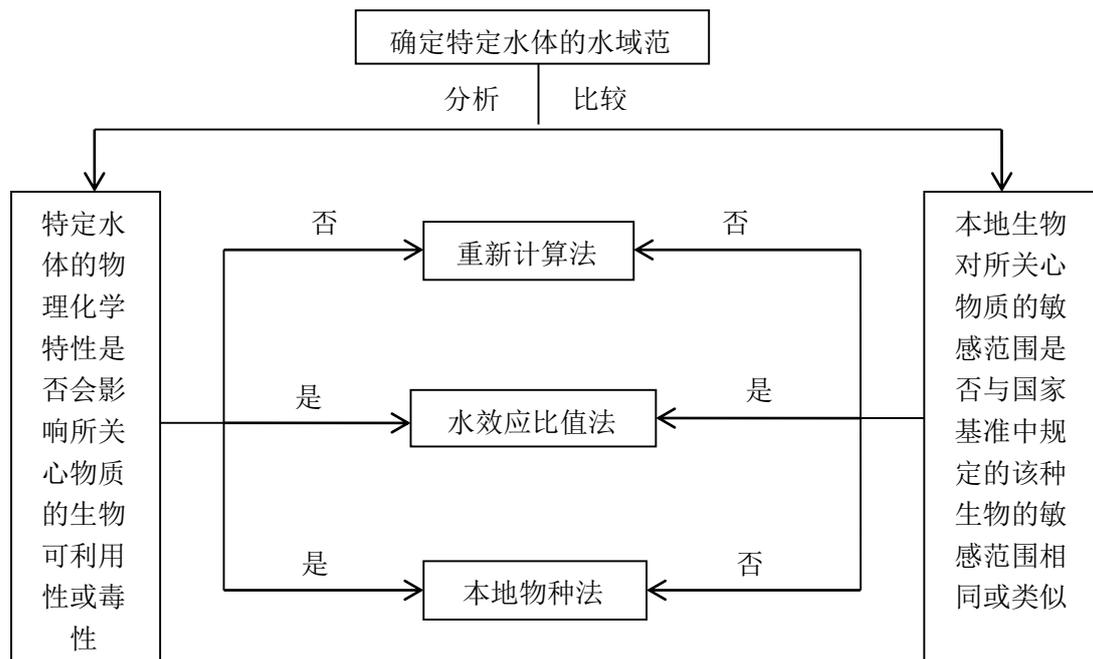


图 9-6 基准修正方法选择技术路线

（3）技术创新点及主要技术经济指标

考虑水化学因子（如pH、硬度等）对污染物生物毒性的影响，获得水效应比；考虑水生生物差异对污染物毒性的影响，获得生物效应比；根据污染物毒性数据的不足，结合当前研究区系的物种分布，补充多门多种流域本土水生生物急性毒性实验；进行敏感性较高的水生

生物的慢性毒性实验，计算其慢性结果，使其在代表流域水生生物对污染物的敏感性方面更具说服力；根据文献调研整理获得上世纪80年代和现在的流域物种组成，利用赋予物种权重的物种敏感度分布曲线法推导急性和慢性基准值，得到保护太湖流域当前和1980s的水生生物污染物基准。

(4) 技术来源及知识产权情况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

根据文献数据和实验室的补充数据，依据US-EPA生物敏感度排序法程序，获得了硝基苯的国家CMC= 5.7mg/L，CCC=3.5mg/L。生物毒性数据只要是获得比较敏感的生物数据，不一定是数据量越大获得的基准值越小，越能与保护目标接近。关键是要首先了解流域生物区系及其分级，根据该分级确定的保护目标下的敏感生物，然后获得这些敏感生物的毒性效应数据，应用美国生物敏感度排序法推导后，再用实际水环境因子的水效应比来校准获得的基准值。

基于太湖地区原水毒性试验的硝基苯基准校验：2013年7月到8月之间，研究人员对太湖流域进行了特定水体的现场采样，为宜兴市距离大浦港20公里处太湖水（东经120°13'38"，北纬31°17'6"）。并且进行了水质物理化学特性的测定。水样进行了预处理，采用3-6m/h的小型活性炭吸附过滤器装置进行预处理，净化水体中异味、胶体，降低水体浊度、色度与有机质（COD）。并采用实验室暴气自来水作为水效应比的对照水体。

代表性生物硝基苯毒性试验：在用于基准推导三门生物中选择五种生物：斜生栅藻、大型溞、霍甫水丝蚓、中华圆田螺、锦鲫作为测定水效应的校验生物。采用太湖原水和实验室的暴气自来水开展了毒性实验，测定硝基苯在两种水中对5种生物的毒性数据，观察水体物理化学特性对硝基苯毒性的影响。

根据USEPA推荐的用于修订国家水质基准的方法，研究硝基苯在两种水体中对水生生物的毒性，将污染物在原水中的毒性终点除以在配置水中的同一毒性终点，得到WER如表9.2所示。

表 9.2 硝基苯对 5 种受试生物的抑制效应浓度 LC₅₀ 或 EC₅₀(mg/L) 及水效应比

不同水体	斜生栅藻 48h-EC ₅₀	大型溞 96h- EC ₅₀	霍甫水丝蚓 96h-LC ₅₀	中华田螺 96h-LC ₅₀	锦鲤 96h-LC ₅₀
自来水	17.19	37.9	30.70	77.21	59.48
太湖水	2.96	37.1	30.77	60.08	97.28
WER	0.172	0.979	1.002	0.778	1.636

针对性生物校验的水效应比值 (WER)：由于生物对水质变化的敏感性不同，表1中硝基苯对5种生物在太湖水和自来水中的毒性响应有一定差异，WER的变化范围在0.172-1.636之间，取其平均值得太湖的水效应比为WER=0.913，依据该WER对适用于太湖地区的硝基苯水生生物基准进行校验得到相应的CMC和CCC（表9.3）。

表 9.3 基于水效应比的太湖地区水质基准校验值 (mg/L)

国家基准	CMC	5.7
	CCC	3.5
太湖基准	CMC	5.2
	CCC	3.2

考虑流域水环境因子的影响，获得太湖保护水生生物硝基苯的CMC和CCC分别为4.75 mg/L和2.92mg/L。

应用前景：该技术可直接为流域制定准确、严谨、合理的污染物水质标准提供技术服务，同时也为我国不同流域及水体制定水质基准与标准提供科学方法。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501-003）

9.2.2 沉积物质量基准校验技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：适用于流域水环境中污染物或化学品的沉积物质量基准值的校验

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

沉积物质量基准的校验包括加标沉积物校验和实际沉积物校验。

加标沉积物验证是根据已经制定的受试物沉积物基准数值设计一系列浓度梯度进行加标沉积物毒性试验。如果不同加标浓度的沉积物表现出相应合理的生物毒性，那么制定的基准值通过加标沉积物验证。

实际沉积物验证是在取自流域现场实际沉积物样品中分别添加不同材料，吸附或螯合沉

积物中的非极性有机物、重金属或氨氮等污染物，去除干扰物质，保留受试物。测定沉积物中受试物的实际浓度，与已经制定的沉积物基准进行对比，并进行沉积物毒性试验。如果沉积物中的受试物浓度表现出相应合理的生物毒性，那么制定的基准值通过实际沉积物验证。

(2) 工艺流程

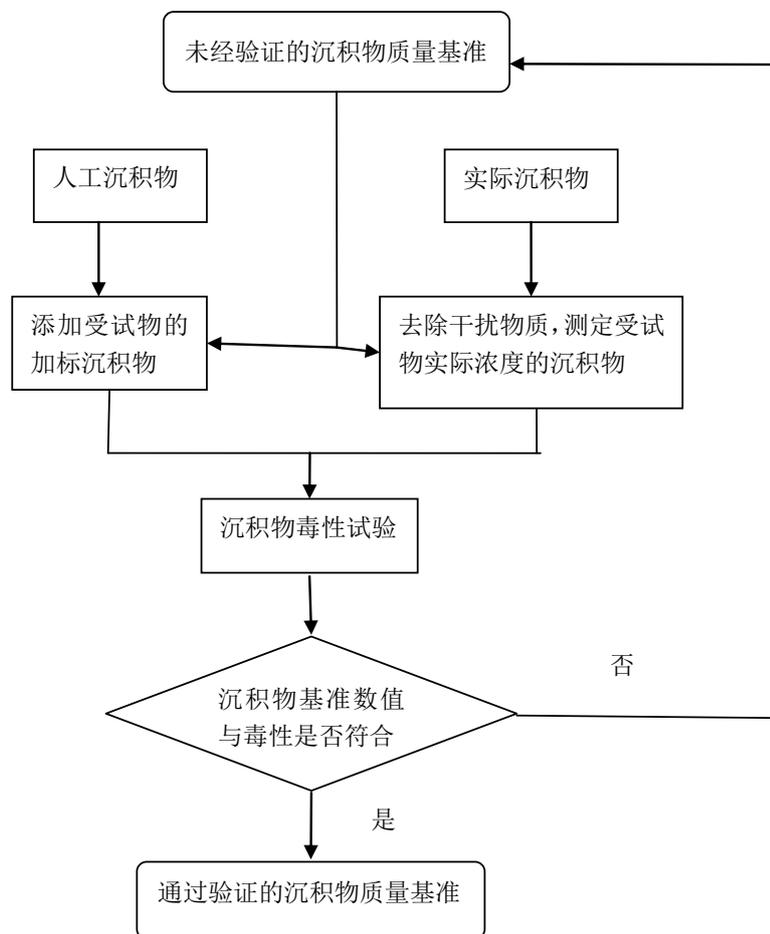


图 9-7 工艺流程图

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

①筛选了能够高效吸附或螯合沉积物中非极性有机物、重金属或氨氮等污染物的功能材料，包括粉末状椰壳木炭、沸石、大孔螯合树脂等，对底栖水生生物均不产生毒性；

②建立了以淡水底栖生物为受试生物的沉积物毒性测试方法，符合相关测试规范要求。

(4) 技术来源及知识产权情况

自主研发。

申请发明专利2项：

①祝凌燕，沈兆爽，韩雨薇，钟文珏，张彦峰. 一种研究沉积物-水体中泥鳅毒性的试验



方法，申请号201510937868.9；

②祝凌燕，沈兆爽，张彦峰，陈萌，钟文珏. 一种研究沉积物-水体中霍甫水丝蚓毒性的试验方法，申请号201510834611.0。

申请软件著作权1项：

祝凌燕，李江，钟文珏，张彦峰，罗吴亮，韩雨薇，沈兆爽，优控污染物沉积物基准数据库系统，登记号2015SR099229。

实际应用案例：

应用单位：南开大学

使用生物测试来验证生物效应数据库法推导出的沉积物质量基准TEL（临界效应浓度）和PEL（可能效应浓度）。选用实验室世代培养的模式底栖生物伸展摇蚊幼虫、泥鳅和河蚬作为沉积物质量基准室内验证的受试生物，通过人工沉积物加标毒性试验对Pb、Cu、Cd、Zn和Ni五种重金属的沉积物质量基准进行了实验室验证。摇蚊幼虫和水丝蚓作为沉积物质量基准现场验证的受试生物，通过采自太湖的沉积物的毒性试验对Pb、Cu、Cd、Zn和Ni五种重金属的沉积物质量基准进行了现场验证。通过沉积物毒性试验来检验TEL和PEL值是否符合其所代表的意义：沉积物中某重金属含量低于其TEL值时，表示负面生物效应几乎不会产生；若高于其PEL值，则表示负面生物效应经常发生；若介于两者之间，则不能确定负面生物效应是否会发生。验证结果显示，总体说来，五种重金属的TEL和PEL值基本符合对沉积物毒性的预测结果。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.3 流域水环境基准向标准转化技术

9.3.1 水环境质量基准向标准转化技术

技术就绪度评价等级：4级

适用范围：本技术针对不同污染物不同用途分国家、流域、区域不同层次对水质基准进行转化

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

水质基准向标准转化流程主要包括水质基准的校验和水质基准向标准转化，针对不同污染物不同用途分国家、流域、区域不同层次对水质基准进行转化。

水生生物基准的校验：包括原水的处理，验证试验受试生物的选择，水质基准阈值的验证方法及验证值的评价。水环境基准向标准的转化根据标准种类、应用区域以及污染物种类的不同有不同的方法，本导则对于国家级标准的转化，在毒性数据较为充足（多于 10 个 SMAV 或 SMCV）的情况下，使用物种敏感度分布技术，对标准进行分级转化；对于流域水环境标准的转化，如果污染物的毒性受到水质参数的显著影响，建议可以根据区域水质参数对基准进行转化（如污染物氨氮），不受水质参数影响的污染物可基于风险评估进行水质标准转化；对于区域（河段）水环境标准，都可以使用水效应比（WER）技术对基准进行转化。

（2）工艺流程

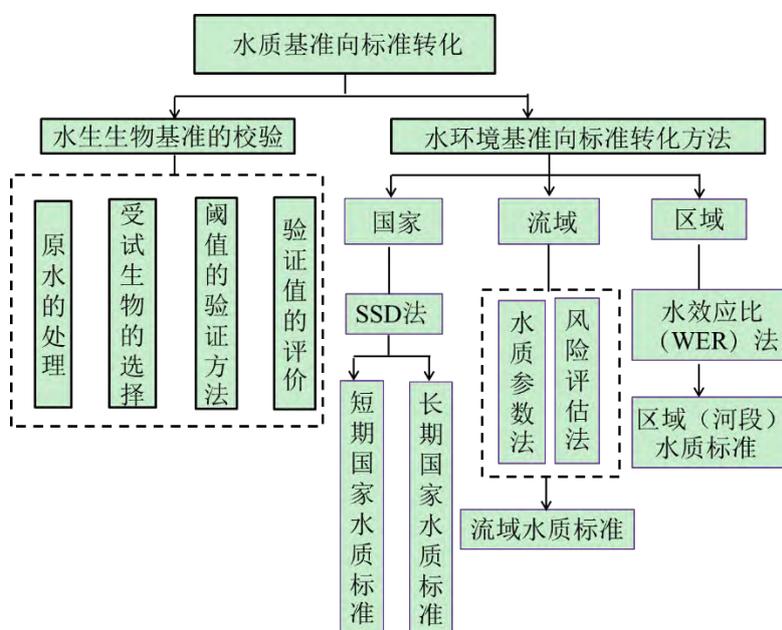


图 9-8 工艺流程图

（3）技术创新点及主要技术经济指标

本研究创新性根据标准种类、应用区域以及污染物种类的不同采用不同的方法对水质基准进行转化。对于国家基准，物种敏感度分布（SSD）方法是世界各国制定水质标准的主要技术，不同程度地建立了水质标准技术体系和相关限值，但针对分级标准的研究较少，本研究基于 SSD 和风险评估技术，初步建立了分级水质标准方法学，提出将受污染物暴露胁迫的水生生物比例达到 5 %、15 %、30 % 和 50 % 时对应的生态风险级别分别设定为 I 级、II 级、III 级和 IV 级，建立了 4 级短期（应急）水质标准，使用此方法也可将污染物的基准转化为分级的长期国家水质标准。

我国地域辽阔，水质条件复杂，不同流域的水体有不同的特征和水质状况，水生生物区



系具有地域性，代表性物种不同，因此国家统一制定的水质基准不一定完全适用于流域，需要在全国水质基准的基础上，结合各水体流域的水质参数和生物区系等特点对国家基准进行修正，以便得出具有针对性和区域性的流域水质标准，另外，对于生物毒性不受水质参数影响的污染物，基于联合概率分线曲线关系，依据污染物风险概率设置风险等级，根据流域的污染物水平和污染物的毒性分布关系，计算出标准建议值。区域（河段）水质标准转化：利用区域物种在本地的原水和配制水中进行毒性暴露平行试验，然后利用污染物在原水中的毒性终点值除以在配制水中的同一毒性终点值，得到水效应比值(WER)，区域基准等于国家基准与 WER 值的乘积，同时选择当地重要的或有代表性的物种进行毒性试验，同时关注物种差异和水质差异。

（4）技术来源及知识产权情况

自主研发。

申请发明专利2项。

①闫振广，郑欣，刘征涛。确定区域性水生生物基准阈值的方法。专利申请号：201410318073.5

②闫振广，郑欣，刘征涛。获取区域水质标准限值的方法及装置。专利申请号：201410616834.5

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

我国已进入环境污染事故频发的高风险期，在突发事件的区域生态风险评估中对污染物应急水质标准的需求迫切，针对辽河流域的特征污染物六价铬和无机汞，应用本技术建立的综合应急水质标准方法学，推算了六价铬和无机汞的辽河流域应急水质标准限值，提出了相应的流域风险指示生物，为突发性水环境污染事故风险分析提供了参考。

在区域水质基准向标准转化的研究中，对全国镉基准在辽河沈阳河段的适用性进行了评价，计算得到辽河干流的镉 WER 值为 0.68，因此辽河干流的镉标准相对于全国的镉基准应该收严 32%，建立了更加适用于辽河干流的镉水质基准。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.3.2 人体健康水质基准向标准转化技术

技术就绪度评价等级：3级

适用范围：适用于我国地表水和可提供水产品的淡水水域人体健康水质基准向标准的转化

主要技术内容和关键技术：

(1) 人体健康水质基准向标准转化的原则

采用保守的、保护性的方法制定水质标准，以充分保护人体健康和福利，是人体健康水质基准向标准转化应遵循的原则：

①人体健康风险可接受水平。人体健康水质基准的制定过程中，所采用的非致癌物日参考剂量Rfd和致癌物的人体健康基准中采用的增量癌症风险水平均为 10^{-6} ，是世界各国所公认的环境中污染物质不对人体产生额外健康风险的可接受水平。因此，在人体健康水质基准向标准转化中，不应引入额外的转化因子来增加人体健康风险。

②水环境质量基准值。对于已经制定水环境质量基准值的污染物质，水质基准的转化应综合考虑水生生物水质基准值等其他水环境质量基准值。

③环境化学分析水平。对于已经制定人体健康水质基准的污染物质，如果基准值低于检测方法的检测限，默认检测方法的实际定量限（Practical Quantitation Limit, PQL）为水质标准。

(2) 人体健康水质基准向标准转化的流程

①饮用水源地的水质基准向水质标准转化

在设定饮用水水源地水质标准时，根据已制定的人体健康水质基准和生活饮用水卫生标准，依据不同场景进行转化：

场景1（不食用饮用水源地水生生物）：污染物质属于《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006）所规定的污染物质，并且水质基准值大于生活饮用水卫生标准所规定的污染物质浓度限值，则该污染物质的水质标准不应低于生活饮用水卫生标准/（1-各类集中、分散式供水设施对该污染物质的处理效率）。

场景2（不食用饮用水源地水生生物）：污染物质属于《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006）所规定的污染物质，并且水质基准值小于或等于生活饮用水卫生标准所规定的污染物质浓度限值，则该污染物质的水质标准为水质基准/（1-各类集中、分散式供水设施对该污染物质的处理效率）。

场景3（不食用饮用水源地水生生物）：污染物质不属于《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006）所规定的污染物质，则该污染物质的水质标准直接采用水质基准。

场景4（食用饮用水源地水生生物）：水质标准直接采用W+F人体健康水质基准（当制定的W+F人体健康水质基准值等于F人体健康基准值时，设定W+F人体健康基准为水质标准）。



上述场景1、2、3、4，如果制定了水生生物基准等其他水环境质量基准，应与其他基准值进行比较，水生生物长期水质基准小于 $W+F$ 人体健康基准时，采用水生生物长期水质基准作为水质标准。

制定饮用水源地水质标准的程序见图9-9。

②一般地表水的水质基准向水质标准转化

场景5（食用水生生物+饮水）：对于该地表水体的水质标准，水质标准直接采用 $W+F$ 人体健康水质基准（当制定的 $W+F$ 人体健康水质基准值等于 F 人体健康基准值时，设定 $W+F$ 人体健康基准为水质标准）。

如果制定了水生生物基准等其他水环境质量基准，应与其他基准值进行比较，水生生物长期水质基准小于 $W+F$ 人体健康基准值时，采用水生生物长期水质基准作为水质标准。

制定一般地表水（场景5）水质标准的程序见图9-10。

场景6（仅食用水生生物）：对于该地表水体的水质标准，水质标准直接采用 F 人体健康水质基准。

如果制定了水生生物基准等其他水环境质量基准，应与其他基准值进行比较，水生生物长期水质基准小于 F 人体健康基准值时，采用水生生物长期水质基准作为水质标准。

制定一般地表水（场景6）水质标准的程序见图9-11。

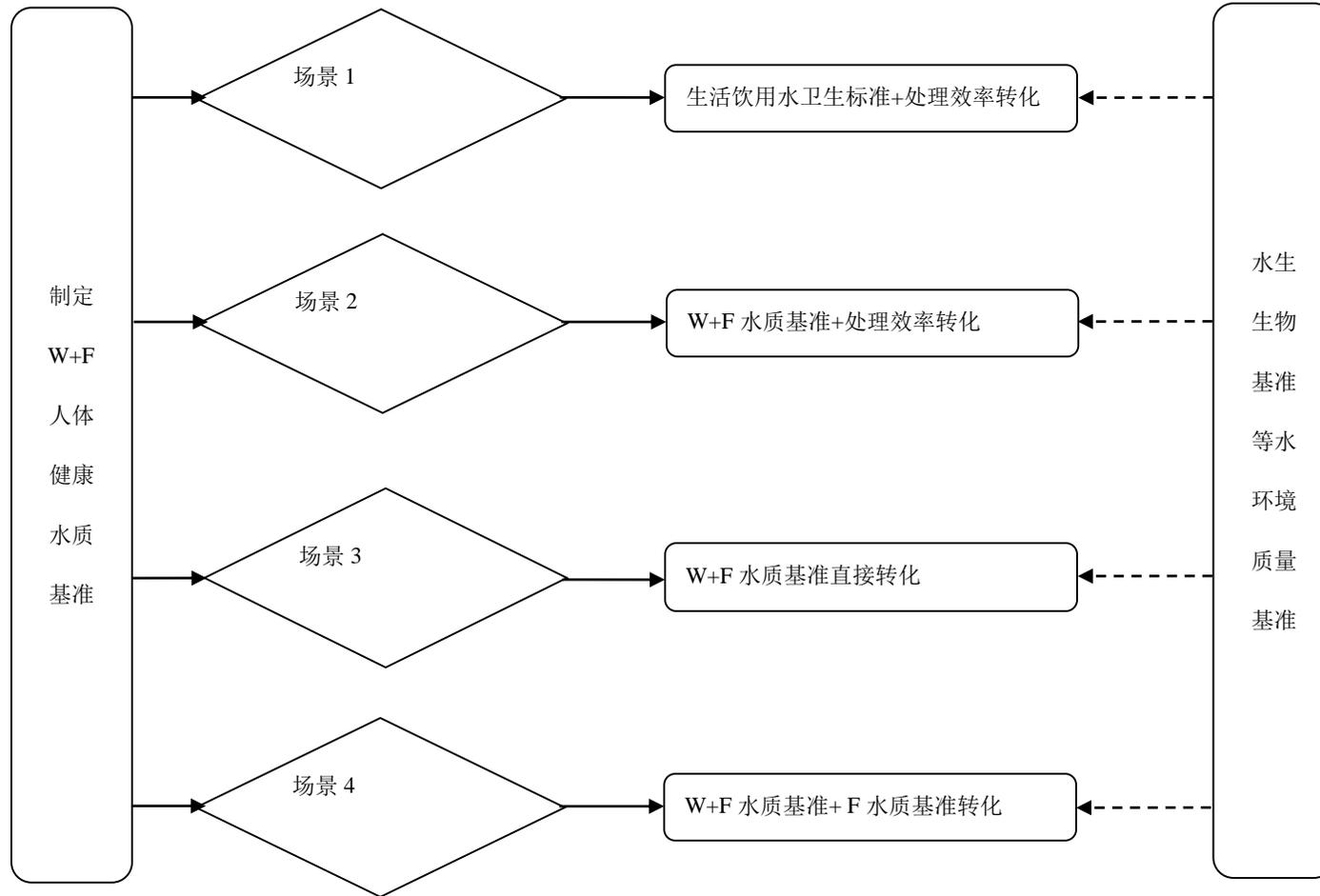


图 9-9 制定饮用水源地 W+F 水质标准的流程图

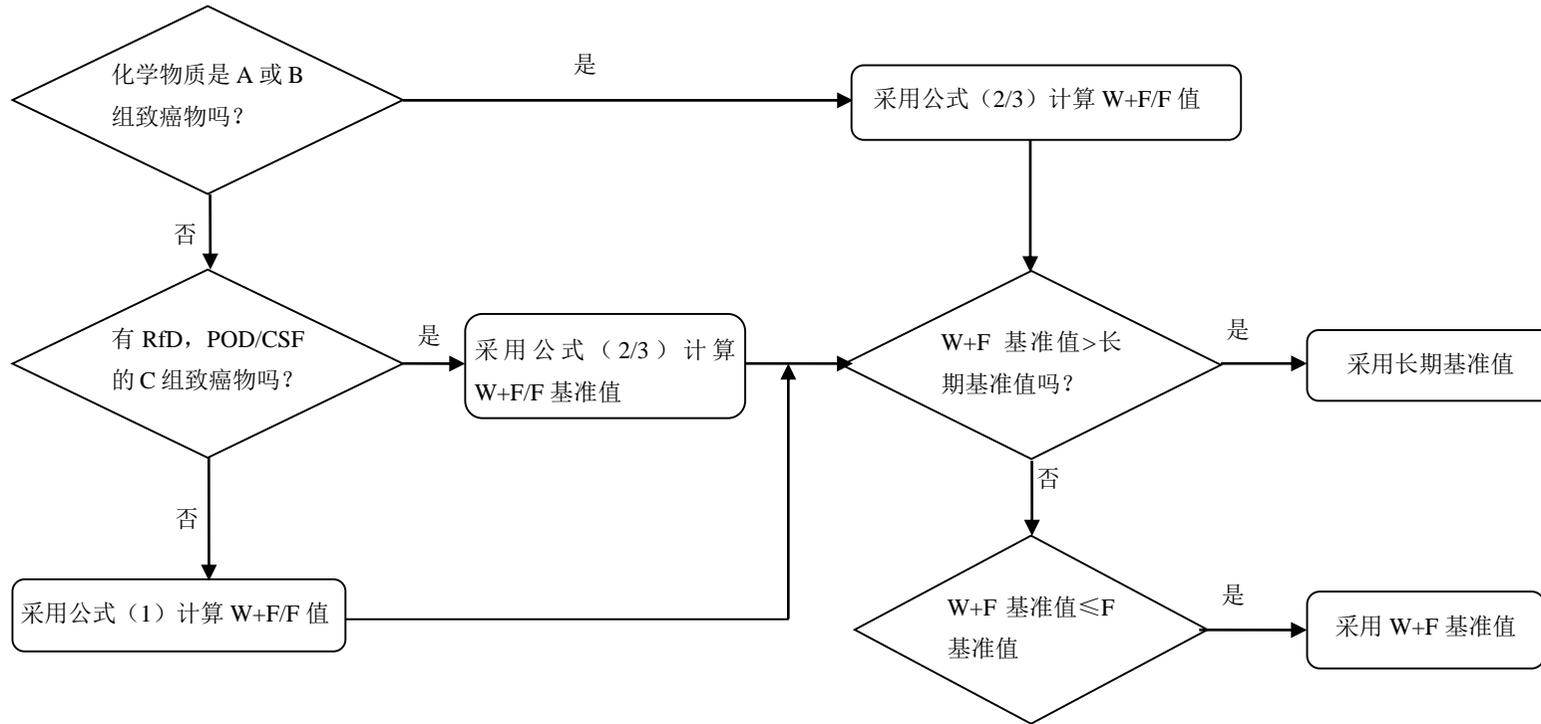


图 9-10 制定一般地表水（场景 5）水质标准的流程图

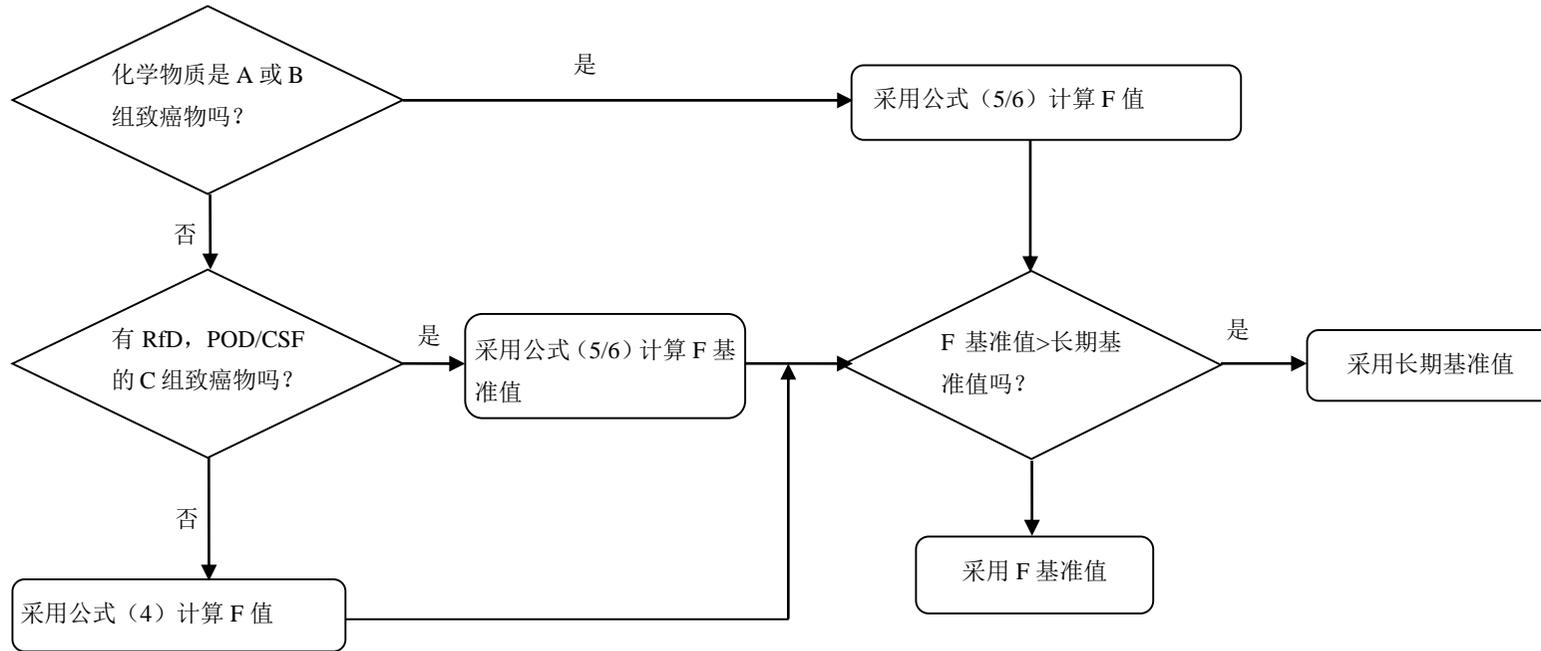


图 9-11 制定一般地表水（场景 6）水质标准的流程图



（3）水生生物基准等其他基准值

在人体健康水质基准向标准转化的过程中，对于已经制定水环境质量基准值的污染物质，水质基准的转化应综合考虑水生生物水质基准值等其他水环境质量基准值。

已颁布的其他水质基准制定指南为《淡水生生物水质基准制定技术指南》HJ 831-2017，依据本指南，制定的基准值分为短期水质基准和长期水质基准，在人体健康水质基准向标准转化的过程中，应考虑保护水生生物的短期水质基准和长期水质基准。

依托课题：

流域水环境基准及标准制定方法技术集成（2017ZX07301002）

9.3.3 湖泊营养物标准制订技术

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：营养物标准阈值制订

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

以基准为出发点，建立区域湖泊功能分级体系，通过数据统计分析、调查调研的方式确定不同功能营养物指标阈值，运用结构方程模型和专家系统相结合的方法建立营养指标与指定用途之间的关系，通过监测数据集，邀请专家参考湖区营养物基准进行打分，并依据打分结果建立结构方程模型。结构方程模型是一种多元统计方法，通过该模型可以建立多个指标相互间的相关关系，在结构方程模型中，指标之间的路径即表示指标之间相关，通过模型求得的路径系数的大小表示指标间相互作用的大小，而箭头所指的方向即为指标间影响作用的方向。此外，区别于普通的多元统计模型，结构方程模型不仅可以建立指标之间的直接关系，还可以通过中间变量来反映两个指标之间的间接关系。通过模型的结果推算出不同功能可达性水平下的营养物标准建议值。同时，通过分析湖泊藻毒素与叶绿素的关系，得到不同藻毒素水平下叶绿素的阈值范围，验证营养物阈值的合理性和科学性。结合标准阈值的技术经济评估，通过系统集成，构建了东部浅水湖泊营养物基准向标准转化技术。

（2）技术流程

通过与专家系统相结合的结构方程模型来制定标准值，技术流程为“营养物基准和水体功能-标准指标-标准定值-技术经济评估”。其制定过程主要通过以下几个步骤：

①确定区域或者单个湖泊营养物基准和水体功能。制订合理的标准限值，湖泊营养物水质标准值的确定应以营养物基准为出发点，以水体用途为依据；②收集所研究湖区的多年

历史数据；分析营养物指标之间的关系及各指标对营养状态的影响，构建描述湖区营养物指标间关系的结构方程模型的概念模型；③建立专家打分系统，制定专家打分表，筛选历史数据作为专家打分数据库；④邀请湖泊领域的专家，依据参考营养物基准对所提供的数据库中各指标值所代表的水体状态能达到水体指定用途的可能性进行打分；⑤将专家打分结果作为新的观测变量引入结构方程模型，构建描述营养物指标与水体用途可达性之间关系的结构方程模型；⑥将数据代入模型，运行模型，得到对指定用途影响最大的关键指标作为营养物标准指标；⑦将筛选得到的关键指标与功能可达性之间建立相关性方程，指定的功能可达性（近期85%，远期90%）所对应的关键指标浓度即为该指标的标准建议值；⑧通过藻毒素-叶绿素阈值方法和水生生态数据对该方法得到的标准建议值进行验证；⑨通过技术经济评估，评估标准建议值的实施对区域的技术经济影响是否可以承受。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

技术创新点：

以基准为出发点，建立区域湖泊功能分级体系，通过数据统计分析、调查调研的方式确定不同功能营养物指标阈值，运用结构方程模型与专家系统相结合的方法，邀请专家参考湖区营养物基准，通过湖泊水质指标与达到功能百分数建立区域湖泊功能分级体系及标准建议值，该技术能在区域湖泊营养物基准的基础上，将营养物标准与湖泊功能相联系，对不同功能湖泊营养物标准进行分级，制定标准值，同时进行标准可达性的技术经济评估。本技术成果适用于不同区域湖泊污染特征的营养物水质标准制订，已经在不同污染程度的区域或单个湖泊开展营养物水质标准的制订应用工作。基准向标准转化是国际研究热点和难点，本关键技术创新的将专家系统和结构方程模型相结合，有效的实现了基准向标准数值化转化，避免了以往根据经验定值的缺点。

主要技术经济指标：

①通过结构方程模型建立营养物水质指标与湖泊功能可达性之间的关系，形成了湖泊营养物基准向标准转化的技术方法，通过该方法得到的湖泊营养物标准建议值能够在近期（85%水质达标）和远期（90%水质达标）水质达标，所对应的关键指标浓度即为该指标的标准建议值。

②通过太湖流域藻毒素相关调查和统计数据，以及水生生态数据，对所建立的标准建议值进行验证分析，得到标准的建议值能够保证湖泊水体功能85%以上达到所在功能的要求。

③标准技术经济评估一级评估的湖泊营养物标准实施达标成本占国民生产总值的比例大小为小于2.5%，如果超过，需要对标准值进行调整；二级评估在一级预评估筛选打分和二



级评估打分的基础上，进行矩阵叠加，评估结果为对区域经济的影响分为弱（<1.5%）、中（1.5-2.5%）、强（>2.5%）。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发和优化集成。

授权发明专利2项。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

应用该技术制订太湖营养物水质标准。在东部浅水湖泊营养物基准的基础上，考虑太湖水体功能的多样性和作为饮用水源地的特殊性，以实现太湖不同水体功能目标为重点，通过模型模拟、统计分析、实验室模拟和现场调查等手段，建立湖泊营养物基准向标准转化的技术方法，得到太湖营养物标准建议值，包括总磷、总氮和叶绿素a三项指标。同时，针对太湖流域水体特征、社会经济条件及发展规划，在流域水质-环境经济相关分析结果基础上，建立适合太湖流域标准实施的技术经济评估程序方法，通过太湖流域水质-环境经济耦合模型分析水质变化对所在区域的社会经济发展所产生的影响，对太湖营养物水质标准的技术经济可行性进行评估，证明应用该技术制订的太湖营养物水质标准具有可行性。

太湖营养物标准适用范围为太湖，标准规定了太湖营养物水质标准值、监测分析方法、反降级政策、对下游负责的条款以及标准的实施与监督等相关规定，可用于太湖流域水质营养状态识别、分析和诊断、湖泊水质管理和营养物控制（包括营养物削减）的目标制订、湖泊流域规划、容量总量计算和建设项目环境影响评价等。

太湖营养物标准为长江中下游其他湖泊营养物水质标准制订提供了综合技术示范，加强了太湖及东部浅水湖泊营养物削减绩效以及富营养化控制和管理的科学性，在国家层面可以有效指导分区湖泊的富营养化控制。太湖营养物标准建议值可以为我国正在进行的按照营养物生态分区修订《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）工作提供科学技术支持。

依托课题：

东部浅水湖泊营养物基准标准及太湖达标应用研究（2012ZX07101002）

9.3.4 河口营养盐基准向标准转化技术

技术就绪度评价等级：4级

适用范围：适用于基于不同生态功能分区的河口水域营养盐基准向营养盐标准的转化

主要技术指标和参数：

(1) 基本原理

不同生态特征水体环境应该具有不同生态学基准。在转化过程中，要在全面分析水环境现状等的基础上，构建环境基准向环境标准转化的影响因子体系。对河口水体环境进行分区、获取各区域水环境基准、确定各区域环境保护目标、在环境基准的基础上制订环境质量标准。

(2) 技术流程

河口水域水环境营养盐基准转化为营养盐标准的流程如图9-12所示



图9-12 河口营养盐基准向标准转化技术流程

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

针对不同的河口类型分别制定营养物标准以体现河口营养状态的差异，为分类、分区制定河口营养物基准提供了技术支撑。

(4) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.4 流域水环境基准及标准制定辅助技术

9.4.1 流域水环境基准优控污染物筛选技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：流域水环境优控污染物的筛选

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

建立针对流域水环境的优控污染物筛选方法。根据各国已公布的优先名单、流域特征污染物名单、流域污染物定性、定量监测结果、流域污染事件报告确立流域优控污染物的初始名单。根据污染物不同类型分三部分对污染物进行综合评价，包括有机污染物类、重金属类和复合污染指标类。有机污染物类和重金属类评价方法依据国内外相关毒性数据库，对名单中污染物毒性及持久性、累积性进行评价，结合污染物监测数据对污染物的毒性效应、暴露状况和生态效应进行综合评分。复合污染指标依据《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）一级标准确定污染物的超标率结合污染物排放强度进行综合评分。将三部分评价结果进行综合排序确立流域水环境优控污染物的优先级。

（2）工艺流程

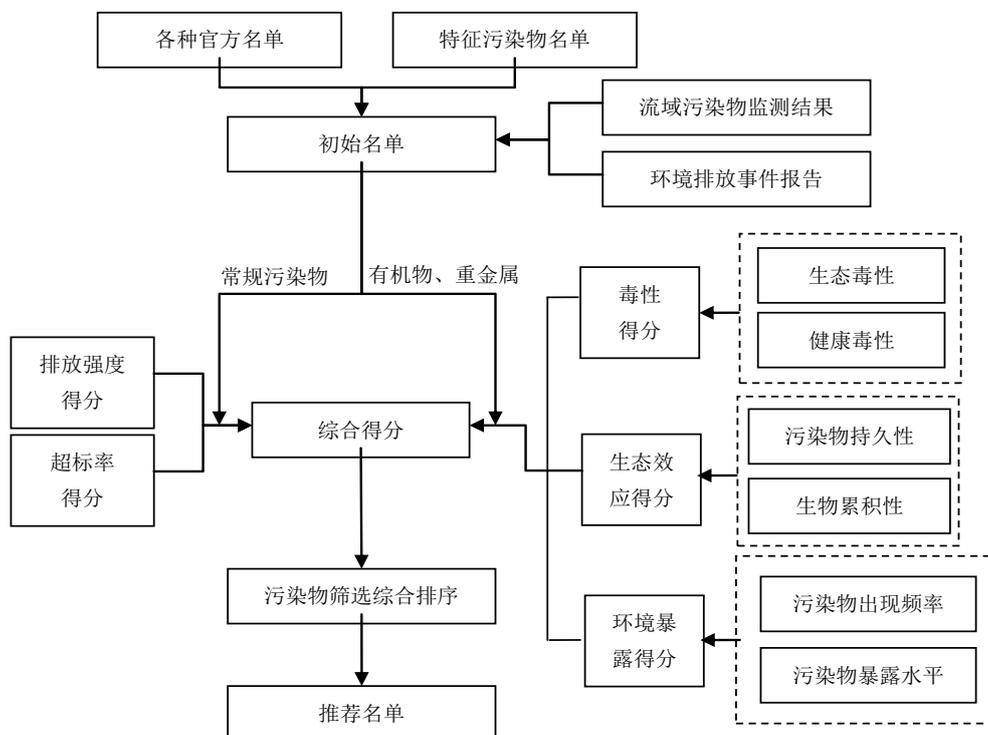


图9-13 工艺流程图

（3）技术创新点及主要技术经济指标

关键技术：

①毒性效应评价：参考国内外毒性数据库数据，毒性效应评价参数分为以下四大项：水生生物急性毒性、哺乳动物急性毒性、哺乳动物慢性毒性、致癌性。根据不同的分级计算方法确定其各部分的TES（Toxicity/Environmental Score）值，然后以较小的TES值作为最终的 TES_{min} 值，再通过2/3累积指数法对数据进行转化得到毒性最终得分。评价过程中优先考虑本土生物毒性数据，以达到保护流域水生态的目标。

②生态效应评价：依据环境中具有持久性和生物累积性污染物对人体健康及生态环境潜在影响较大的特点，对污染物生态效应进行评价，包括污染物持久性和生物累积性两部分。

③环境暴露评价：污染物的环境暴露评价包括污染物检出频率和污染物暴露浓度评价两部分。采用几何分组法对水体及沉积物中污染物浓度分别进行分级，用等比级数定义分级标准。监测介质包括水体、沉积物和水生动植物。

④复合污染指标的评价：由于复合污染指标无法准备定量其毒性，通过污染物超标率和污染物排放强度反映污染物环境负荷。依据《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）一级标准确定污染物超标率。

技术创新点：

①采用2/3累积指数法进行毒性评分，最大化的反映污染物的毒性状况；②充分利用各监测数据、毒性数据库及文献资料；③建立污染物毒性数据的分级及综合评价方法；④将常规污染指标纳入综合评价过程中，为流域更快的开展污染控制提供参考；⑤在暴露评估中综合考虑了污染物在水体、沉积物及水生生物中的暴露状况，更准确的反映了污染物的潜在危害情况，保护了流域水生态环境。

（4）技术来源及知识产权情况

自主研发。

实际应用案例：

应用单位：中国环境科学研究院

应用上述筛选方法对太湖、辽河流域水环境基准优控污染物进行了筛选。太湖流域初始名单中确立了237种优先污染物，辽河流域初始名单中确立了245种优先污染物。通过综合得分的计算分级最终确立太湖、辽河流域的优控污染物名单。研究发现太湖流域和辽河流域优控污染物名单中多环芳烃类、多氯联苯类、砷、汞等污染物排名靠前，其生态风险较高，应纳入流域监管重点。



依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.4.2 水生生物基准本土受试生物筛选技术

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：用于我国流域水生生物基准的受试物种选择，以适应我国特定流域的水生生物保护与水环境质量基准确定

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

根据筛选代表性本土生物的依据包括地理分布范围、区域代表性、生态学意义、数据丰度、经济价值、特有性及可获得性等确定代表性本土生物名单，搜集筛查ECOTOX、CNKI等数据库，分析代表生物的毒性数据，得出毒性最大的目标污染物名单，利用物种敏感性分布法分析代表性生物的敏感性，步骤为：

（1）针对毒性最大的污染物名单，选择对同类别各物种比较敏感的污染物，根据数据筛选原则，重新筛选各污染物的急性生物毒性数据；

（2）对再次筛选得到的合格急性毒性数据进行分析与排序，使用SSD法对同一物种的不同污染物的SMAV从小到大进行排序，获得生物对各污染物的敏感度分布状况；

（3）根据各物种在对应的污染物物种敏感性分布曲线中的累积概率进行敏感性评价；

（4）确定对污染物相对敏感的生物类别，提出基准本土受试生物名单。

（2）工艺流程

水生生物基准敏感本土受试生物的筛选主要包括4个步骤：

- ①代表性本土水生生物的确；
- ②受试生物毒性数据的搜集筛选；
- ③对受试生物毒性最大污染物的确定。

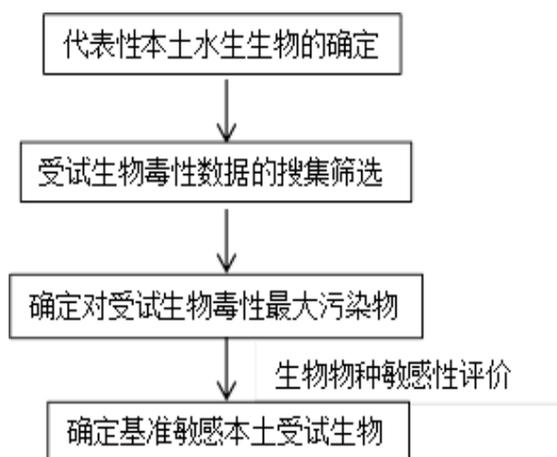


图9-14 工艺流程图

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

我国本土基准受试生物筛选方法：根据地理分布、生态学及经济价值、区域特有性、稀有性等确定代表性本土生物名单，搜集筛查ECOTOX、CNKI等数据库，分析代表生物的毒性数据，得出毒性最大的目标污染物名单，利用物种敏感性分布法分析代表性生物的敏感性，进一步找出敏感生物作为基准研究的受试生物。

① 代表性本土水生生物确定

主要依据公开发表的文献对我国本土生物的分布进行调查，主要参考资料包括《中国动物志》、CNKI数据库等。根据美国、欧盟等国家和地区推导水质基准的物种选择范围和考虑因素，结合我国生物区系特征，物种选择需要从以下方面考虑：

选择地理分布范围广泛的，至少在我国2个流域以上或多省份有分布的；选择具有很好代表性的本土物种，包括具有重要生态学意义的、经济价值的、区域代表性本土物种；选择容易获得且实验室容易培养的本土物种；毒性数据数量相对丰富的。为保证对物种敏感性做出正确评价，要求搜集评价的污染物毒性数据至少涉及3种污染物以上。

② 受试生物毒性数据的搜集筛选

毒性数据主要包括淡水水生生物毒性数据，数据来源：A. 国内外毒性数据库，包括美国ECOTOX毒性数据库、TOXNET等；B. 本土物种实测数据；C. 公开发表的文献或报告：Web of Science，中国知网CNKI。

对筛选得到的代表性本土生物进行毒性数据搜集，数据筛选原则：

A. 要有明确的测试终点、暴露时间及试验条件的相关描述，急性毒性试验指标为48h、96h LC₅₀或EC₅₀；B. 优先选择流水式试验结果及对试验溶液浓度有监控的毒性数据；C. 同种污染物的急性毒性数据如果差异过大（超出1个数量级），应被判断为有疑点的数据而谨



慎用；D. 一些有问题或有疑点的数据（如没有设立对照组等试验设计不科学的、试验生物曾经暴露于污染物中的）均不能采用；E. 所有毒性数据都要求有明确的测试终点、测试时间及对测试阶段或指标的详细描述，对于同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时，使用几何平均值。

③确定对受试生物毒性最大的污染物

对筛选得到的合格急性毒性数据进行整理和排序，大致步骤为：

A. 对筛选得到的合格急性毒性数据进行整理，同一物种的毒性值的几何平均值，计算SMAV；

B. 对于每种生物，获得各污染物毒性大小的排序，筛选出排序前3位，即是对该生物的毒性最大的污染物类别。

④本土基准受试生物的确定

利用SSD法确定生物物种敏感性，步骤为：

A. 针对毒性最大的污染物名单，选择对同类别各物种比较敏感的污染物，参考上述数据筛选原则，重新筛选各污染物的急性生物毒性数据；

B. 对再次筛选得到的合格急性毒性数据进行分析与排序，使用SSD法对同一物种的不同污染物的SMAV从小到大进行排序，获得生物对各污染物的敏感度分布状况，数据分析软件为Origin9.0；

C. 根据各物种在对应的污染物物种敏感性分布曲线中的累积概率进行敏感性评价；根据水质基准技术惯例，能保护95%生物体的污染物浓度为水质基准值，因此如果生物的敏感性排序小于5%，可将该生物界定为非常敏感。当受胁迫的生物分别超过15%和30%时，污染物引起的生态风险定义为具有一定风险和明显风险，因此可将物种敏感性排序达到此限值的生物分类为敏感和较敏感。此外，根据荷兰公共卫生和环境研究院（RIVM）风险评估技术标准，当受危害生物超过50%时，生态风险等级为“严重”，可将物种敏感性排序超过50%的物种定为不敏感。选择敏感性较高的生物（累积概率不超过15%）作为基准受试生物；

D. 确定对污染物相对敏感的生物类别，提出基准本土受试生物名单。

（4）其他代表性本土受试生物推荐

由于我国特有种类很多，很多目前还不是毒理学试验常用物种，因此数据丰度不足，但分布范围广泛、生态价值高的本土物种推荐：

①鳗鲡（*Anguilla japonica*）

分类：脊椎动物门硬骨鱼纲鳗鲡目鳗鲡亚目鳗鲡科鳗鲡属；

推荐理由：是一种江河性洄游鱼类，原产于海中，溯河到淡水内长大，后回到海中产卵；分布广泛，在黄河、长江、闽江、韩江及珠江等流域，海南岛、台湾和东北等地均有分布；区域代表性，长江、钱塘江、闽江等的河口地段尤多，江浙两省的鳗苗资源约占全国的一半以上。

②蛇鮈 (*Saurogobiodabryi*)

分类：脊椎动物门硬骨鱼纲鲤形目鮈亚科蛇鮈属

推荐理由：中下层小型鱼类，个体不大，但数量较多，体肥壮，味较美，食用鱼类，有一定经济价值；分布极广，从黑龙江向南直至珠江全国各主要水系均产此鱼。已有重金属对蛇鮈的急性毒性研究，易获得。

③乌鳢 (*Ophiocephalusargus*)

分类：脊椎动物门硬骨鱼纲鳢形目鳢亚目乌鳢科鳢属。

推荐理由：中国的鳢科鱼类共有7个种，其中只有乌鳢是一个广布种，分布于全国各大水系，产量也最大，繁殖力强，食用鱼类，经济价值高。

④哲罗鲑 (*Huchotaimen*)

分类：脊椎动物门硬骨鱼纲鲑形目鲑科哲罗鱼属。

推荐理由：为冷水性的纯淡水鱼类，我国鱼类以暖水性鱼类为主，但作为基准受试生物还应考虑冷水鱼类；分布于我国境内的黑龙江、图们江、额尔齐斯河等水系；哲罗鲑肉味鲜美，为珍贵鱼类，经济价值高；根据哲罗鱼的生活习性已有良好的养殖条件，易获得。

⑤中国林蛙 (*Rana chensinensis*)

分类：脊索动物门两栖纲无尾目蛙科林蛙属。

推荐理由：分布范围广，包括黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、河北、山西、陕西、甘肃、青海、新疆、山东、江苏、四川、西藏；种群数量趋势稳定，无生存危机。

⑥中华大蟾蜍 (*bufogargarizans*)

分类：脊索动物门两栖纲无尾目蟾蜍科蟾蜍属。

推荐理由：在我国分布广泛，分布于东北、华北、华东、华中、西北、西南年省区；是毒理试验中常用的物种，其药用价值很高；并且对环境条件的要求较高，适合作为推导水质基准的物种。

⑦泽蛙 (*Rana limnocharis*)

分类：脊索动物门两栖纲无尾目蛙科蛙属。

推荐理由：是一种最习见小形蛙类；数量多，分布于河北、山东、西藏、江苏、浙江、安



徽、福建、江西、河南、湖北、湖南、广东、广西、海南、四川、云南、贵州、陕西、甘肃。

依托课题：

重点流域优控污染物水环境质量基准研究（2012ZX07501003）

9.5 湖泊型流域营养物标准制定

9.5.1 分湖营养物水质目标过程管理轨线定标技术

技术就绪度评价等级：8级

适用范围：本方法适用于历史数据较长的单一湖泊水库的营养物允许浓度的确定识别

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

本研究采用滤波相空间轨线技术，可以克服波动干扰，在看似混乱无序近乎随机游走的数据中寻找随时序变化的因果关系，为单一湖泊路径发展演化评估及治理措施效果研判及重大背景环境因素变化的响应识别提供技术工具，可用于单一湖泊多时段的营养物允许浓度的确定。

通过滤波轨线的起点、各个拐点及终点，可以建立藻密度与限制性营养物 *Chla*-TP（或 TN）多段相关关系（较为明显的原路径回归则仅需要一段相关关系），选择其中的协调段作为定标时段（必要时可以延长协调段的定标）关系线，由功能区允许 *Chla* 阈值推算各段限制性营养物的允许浓度。

滤波轨线营养物定标是强时序的分段定标，强调对近期路径的依赖，即含有时序信息的定标。利用路径依赖特性（拐点之后一般可延续数年）可实现一定的预报功能，对近期的治污有一定的指导性。多程定标可实现“一湖多标”，使管理在不同背景环境因子条件下采用不同主要限制性营养物的定标值。

（2）技术流程

利用轨线历史数据起点、各个拐点及终点，可以建立 *Chla*-TP 多段相关关系（较为明显的原路径回归则仅需要一段相关关系），具体的方法可分为：

①参数化方法

利用各段数据，采用多种函数进行趋势线拟合，选用决定系数 R 最大的函数线作为定标曲线。

②非参数化方法

直接利用 $Chla$ -TP 滤波相空间轨线作为趋势线拟合线作为定标曲线。

滤波相空间轨线定标的内容及技术步骤：

A. 收集数据：目标湖泊长期TN、TP等压力指标和响应指标 $Chla$ （或透明度）的监测数据；

B. 单指标时序滤波：试算获取滤波周期，得到TN、TP和 $Chla$ （或透明度）各指标的滤波值。根据设计的滤波带宽 W （一般为所滤周期的两倍），建立压力指标（TN、TP）与响应指标 $Chla$ 的滤波相空间轨线图；

C. 单一过程研判：以确定的 $Chla$ 阈值研判压力指标（TN、TP）与响应指标 $Chla$ 在不同时段的响应特性，研判过程的特征指标；

D. 确定营养物浓度的控制阈值：根据水体功能要求的 $Chla$ 目标阈值，按照不同协调段的响应关系项得到限制性营养物浓度的对应阈值；

E. 建议营养物浓度的控制标准：限制性营养物浓度阈值，参考流域社会经济状况，治理强度是可达性，建议限制性营养物浓度阈值的阶段控制标准。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

分湖强时序营养物低通滤波轨线定标方法的创新及优势：

①分湖定标可规避分区分类分层的多湖数据建模用于分湖带来的系统误差，即无“平移效应”，只根据自身数据定标有更高的准度；

②分湖定标通过拐点时间分段可以规避不分段带来的“平稳效应”，及分段定标可以排除某些不适用历史数据的干扰，对近期定标应用有更高的准度；

③分湖定标通过强调主要营养物限制因子的定标方法，突出了分湖管理的重点，“一湖多标”的演进过程，突出背景条件趋势变化对营养物产藻效率及环境容量的动态影响；

④方法学上，早期建立 $Chla$ -TP 多段相关关系传统方法为线性（或对数线性）的正态分布假定，且人为目测分段，有一定的任意性。比较先进的分类分层分段方法可以实现较为合理分段，但相对于本方法的依时程分段，分类分层分段尚有不足。

定标准度及系统误差的控制可以避免管理的欠保护或过保护，可以将降低治理的经济成本及时间成本。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

依托课题：

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506-008）



9.5.2 湖库控藻营养物水质目标双概率定标技术

技术就绪度评价等级: 8级

适用范围: 本方法适用于历史数据较长的单一湖泊水库的营养物承载浓度的确定识别

主要技术指标和参数:

(1) 基本原理

湖泊营养物过程水质目标选择采用两步时序双概率法：第一步使用功能需求定标，确认可接受的藻类密度的水质目标，以 $Chla$ 的年均阈值浓度及设计保证率表达；第二步采用背景条件变动适标，确认背景条件变化下满足 $Chla$ 目标要求的营养物浓度 TP (TN) 浓度阈值。第二步中采用长期数据概率与近期数据概率结合定标兼顾了长周期可能的影响，也考虑了近期趋势改变时错用历史数据低估风险的问题。

营养物产藻效率是已知及未知的多种因素(或成百上千)的函数(以下主要讨论磷效率)： $ETP=Chla/TP=f$ (物理：温度，辐射，水深，透明度，水色...；生物：细菌，藻种，动物，沉水植物...；化学：碱度、DO、离子浓度...)。由于因素众多，难以一一罗列并进行机理分析，本方法采用实测数据的产藻效率，作为背景条件影响指标，其概率分布反映了所有背景条件影响的贡献。

借助产藻效率的长期数据概率与近期沿时程滑动概率得到满足设计保证率的设计产藻效率，然后以 $Chla$ 的年均阈值浓度/设计产藻效率得到营养物承载浓度。

(2) 技术流程

①数据准备：收集目标湖泊长期TN、TP等压力指标和响应指标 $Chla$ （或透明度）的监测数据，建立各指标的时序数据集。收集目标湖泊使用功能信息及保护目标；

②根据湖泊的功能区用途以及保护目标确认可接受的藻密度水质目标。如年均值 $Chla-a=10\mu g/L$ ，设计保证率 $P=90\%$ （重现期为10年）；

③长期数据营养物产藻效率概率计算：根据计算年份前所有历史数据计算营养物产藻效率的设计保证率值。如TP的产藻效率值 $ETP(P=90\%)$ ，TN的产藻效率值 $ETN(P=90\%)$ 。设计产藻效率值 $EPN_n=\max(ETP, ETN)$ ；

④近期数据营养物产藻效率概率计算：根据计算年份前10年（可通过试算或优化取变化更平稳的值）营养物产藻效率的设计保证率值 $EPN_{10}=\max(ETP, ETN)$ ；

⑤对比计算年份长、近期产藻效率的设计保证率值，两者中取大值作为设计产藻效率 $EPN=\max(EPN_n, EPN_{10})$ ；

⑥根据设计产藻效率，得到计算年份的营养物承载浓度。如 $TPa=Chla-a/EPN$ ， $TNa=10Chla-a/EPN$ ；

⑦限制性营养物承载浓度随时间的变化过程性构成湖泊营养物环境容量的变迁过程，其趋势变化，可作为未来一段时间制定营养物标准的依据。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

①分湖定标可规避分区分类分层的多湖数据建模用于分湖带来的系统误差，即无“平移效应”，只根据自身数据定标有更高的准度；

②双概率分湖定标可跟踪背景条件变化可以规避传统方法带来的“平稳效应”，可以排除某些不适用历史数据的干扰，对近期定标应用有更高的准度；形成了动态定标，避免了完全平稳假设；

③双概率分湖定标通过营养物承载浓度的时程变化直观地营养物环境容量的变化过程，突出背景条件趋势变化对营养物产藻效率及环境容量的动态影响；

④不直接对营养物定标，而是通过产藻效率（ $ETP=Chla/TP$ ）定标，将已知及未知的环境背景因素通过限制营养物的产藻效率的过程反映出来。通过产藻效率的过程变化，确定限制营养物的标准以及是否到达调整时点；

⑤不采用先验模式（ $Chla-TP$ 的参数及非参数关系），避免了模式带来的不确定性或模式误差；

⑥对于非平稳过程，如草藻迁跃、藻草迁跃、藻藻演替（或迁跃）、温度迁跃、滞留时间迁跃等多种不同的藻类水平及产藻效率的渐变及突变转变有很好的跟踪能力，对持续性年 $Chla-TP$ 负相关问题有很好的适应性；

⑦超前的预警作用。出现迟滞的左旋恢复路径时，产藻效率不断提高，双概率计算的营养物承载浓度跟踪性提高，有趋势预警效应。出现超前的右旋恢复路径时，产藻效率出现非协调下降，双概率计算的营养物承载浓度跟踪性下降，提示背景条件改善，物理类生物类治理项目有效，而营养物外源及内源治理控制低效；浅水草型湖泊出现原路径情景时，随着营养物趋势性上升，产藻效率非线性增加，双概率计算的营养物承载浓度存在惩罚性质的加严（相对于减污可以原路径回归的情况），趋势预警陷入失稳状态的可能性越来越大；

⑧相对于目前的营养物国家标准的全国一标模式，本方法突出了灾害指标 $Chla$ 的普适性质，而将营养物标准变为“一湖一标”（强调空间异质性）以及“一湖多标”（强调背景条件的动态性），再有历史数据的前提下，分湖水质目标的精准把握，可节约治理的经济成本及时间成本；

⑨从方法学上考虑，本方法非协调段的适用性是现有其他方法无法替代的。

双概率营养物定标是弱时序的分段定标，强调对近期路径的依赖，即含有时序信息的定标。对于全国模式标准严于、松于研究湖泊本地模式的情况，双概率营养物定标采用的是目标湖泊模式标准，不仅能实现分湖精细管理，同时能够适应气候等背景因素变化引起的标准阶段性和动态性特性，实现营养物承载浓度的动态跟踪过程管理。

（4）技术来源及知识产权概况

自主研发。

实际应用案例：

图9-14、图9-15表示了采用东部湖区巢湖西部、太湖、淀山湖；云贵高原湖区滇池、洱海、抚仙湖6个湖区的双概率方法分析的总磷承载浓度TPa的变化过程，其中云贵高原湖区3湖呈持续下降态势；东部湖区3呈震荡态势；6湖近期均处与总磷承载浓度TPa的低位，需要采取进一步措施恢复湖体的承载能力或减低总磷入湖总量。



图9-14 东部三湖的总磷承载浓度TPa的变化过程

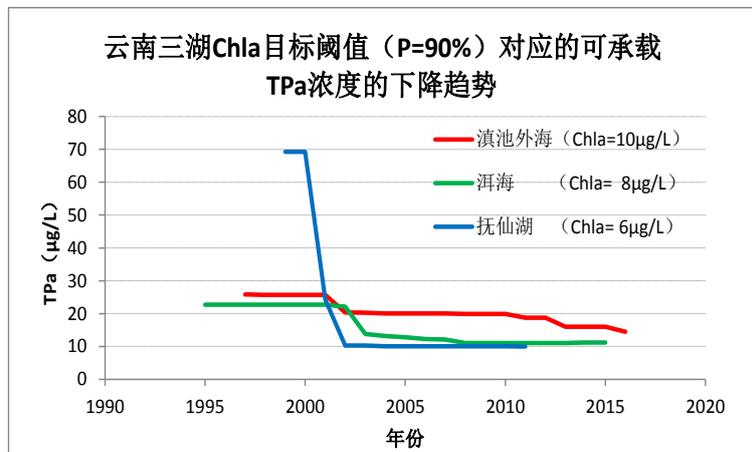


图9-15 云南三湖的总磷承载浓度TPa的变化过程

依托课题:

太湖流域水质目标管理示范效果评估与湖泊型流域技术集成推广（2012ZX07506-008）



10 水环境经济政策体系

10.1 水环境质量管理经济政策集成技术

10.1.1 流域水污染防治规划投入效益测算技术

技术就绪产评价等级：7级

适用范围：流域水环境规划及其他水环境管理

主要技术指标和参数：

（1）基本原理

从理论和实践的角度来说，增加水污染治理投入和基础设施建设投资在改善环境质量的同时，会刺激经济启动和拉动经济增长，这种经济效益既表现在对地方经济的带动上同样表现在减少污染排放的虚拟货币化收益上。本研究基于松花江流域环境经济投入产出表和环境效益测算系数库，构建规划投入对经济发展和环境改善的贡献作用模型，以“十三五”期间松花江流域水污染治理投入为数据基础，定量化测算分析“十三五”期间松花江流域污染治理投入措施对流域经济发展以及污染减排的贡献作用，从而为松花江流域“十三五”污染防治规划提供科学借鉴意义。

（2）测算流程

流域主要污染防治规划投入效益测算技术主要分为数据收集、模型构建、结果测算等三个步骤：

①对流域内的规划投入措施数据进行整理收集。本章节中所指规划投入措施主要包括工程减排（治理投资、治理运行费）和结构减排（淘汰落后产能）两个方面；

②基于环境—经济投入产出表以及其它外部相关参数和系数，构建规划投入对经济贡献作用测算模型。其中环境—经济投入产出表需在流域投入产出表基础上加入废水和废气治理部门以及规划投入投资等内容，从而能够反映规划投入措施对经济发展及结构的影响，并结合劳动力占用系数、行业劳动平均报酬以及边际居民消费倾向等参数，构建规划投入经济作用测算模型；

③测算规划投入对松花江流域经济发展（总产出、GDP、居民收入、就业）的贡献效应。

(3) 技术创新点及主要技术经济指标

流域水环境经济投入产出表的建立。

(4) 技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

应用单位：环境保护部水环境管理司、松辽流域水资源保护局、黑龙江省环境保护厅、环境保护部环境规划院

课题以松花江流域为示范研究对象，基于松花江流域环境经济投入产出表，构建规划投入对经济发展和环境改善的贡献作用模型，并以“十三五”期间松花江流域水污染治理投入为数据基础，定量化测算分析“十三五”期间松花江流域污染治理投入措施对流域经济发展以及污染减排的贡献作用，从而为松花江流域“十三五”污染防治规划提供科学借鉴意义。该项成果对于提高流域规划的科学水平和决策管理能力具有重要指导意义，建议下一步进行推广应用。

依托课题：

流域水污染防治规划决策支持平台研究（2012ZX07601-002）

10.2 工业源污染防治的管理经济政策集成技术

10.2.1 排污权核定技术研究

技术就绪度评价等级：6级

适用范围：全国开展排污权使用和交易的试点地区

主要技术指标和参数：

(1) 主要内容

排污权核定一直缺乏国家层面统一的技术方法指导。课题研究明确了排污权核定的原则，充分结合排污许可制度与总量控制制度改革内容，提出排污权核定的二步方法。首先测算各类污染源排污权，进而将现有排污单位核定的排污权之和与区域内可用于排污权核定的污染物总量进行比对。当前者超过后者时，各地应根据区域环境质量改善需求、污染削减要求以及行业污染治理技术水平等，按照等比例削减或重污染行业重点削减等方式重新核定排污权。

(2) 技术方法



首先，造纸、纺织、化学制品、农副食品加工等重污染行业现有排污单位主要污染物排污权采用绩效方法核定；其他行业依照国家或地方污染物排放标准以及单位产品基准排水量（行业最高允许排水量）等予以核定；新、改、扩建项目排污权根据环境影响评价文件核定。排入集中式污水处理厂的，还要考虑按照污水处理厂执行的排放浓度标准和单位产品基准排水量核定。其次，核定了具体排污单位的排污权后，要与区域的污染物排放总量情况进行比对，扣除移动源、分散式生活源、非规模化畜禽养殖农业源等排放总量，明确本行政区域内可以用于排污权核定的污染物总量。当现有排污单位核定的排污权之和超过区域内可用于排污权核定的污染物总量时，应当调整并重新核定排污权。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

本技术梳理了造纸、纺织、化学制品等若干重点行业的排污权核定方法，将以排放标准为基础的标准定额法与区域的总量控制制度衔接，首次形成两步核定方法。该技术方法可以在现有排污单位核定排污权之和超过区域内可用于固定源排污权核定的污染物总量时，有效地采取等比例削减、或重污染行业优先削减等方法调整、重新核定排污权。该研究成果对完善排污权有偿使用和交易试点工作起到了积极意义，已被环境保护部采纳，纳入《主要无任务排污权核定技术方法》（征求意见稿），为完善排污权有偿使用政策技术框架提供了很好的支撑。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

实际应用案例：

案例1

应用单位：环境保护部

环境保护部发布《涉水重点行业主要污染物排污权核定技术方法》（征求意见稿）（环办函〔2015〕1120号），但为与排污许可制度改革衔接，该核定方法暂未公开发布。

案例2

应用单位：河南省

河南省委托开展了钢铁、有色、化肥、焦化、皮革行业的排污权核定研究，并编制相应的排污权核算手册，目前这些手册已经形成初稿。在编制的过程中，河南省的排污权核定方法参考了两步方法作为编制的原则，同时在排污单位的初次核定过程中以标准定额法为基础依据，在此基础上根据行业排放特征确定排放绩效，核定各行业排污权。

依托课题：

水污染物排污权有偿使用关键技术与示范研究（2013ZX07603-004）

10.3 城镇源污染防治的管理经济政策集成技术

10.3.1 流域污水厂群优化调控经济评估与补偿技术

技术就绪度评价等级：3级

适用范围：松花江流域污水厂群

主要技术指标和参数：

（1）技术背景

根据文献调研可知，国内外污水处理经济评估方法主要包括投资费用分析法、运行费用分析法、费用效益分析法与费用效果分析法。其中费用效果分析方法适用于有明确排放或水质标准的分析对象，在达到环境目标的基础上，对不同方案的费用和效果进行分析。对于有些技术方案，其效益难以用货币单位进行衡量，但有明确的定量标准，如有明确的排放指标要求等，这时通常采取费用和效果分开研究的方法。

相对于费用效益方法而言，费用效果分析方法克服了费用效益分析方法中某些项目的效益难于用货币计量的困难，直接用恰当的物理指标代表项目的目标及其实现的程度，与费用相比较就可以进行方案比较。在流域污水厂群优化调控方案经济评估的处理使用中，用货币的定量指标度量费用，用水质指标衡量效果，然后对各种方案的费用和效果进行比较。

（2）技术概况

针对流域污水厂群优化调控方案的污水处理目标明确、指标和要求清晰的特点，采用费用分析法与费用效果分析方法相结合的方式开展经济评估。具体分析步骤如下：

第一步，确定不同流域污水厂群优化调控方案投资和运行费用。按照方案工艺和设计要
求，分析投资和运行费用构成情况，确定不同方案投资和运行费用，对不同方案费用进行分析；

第二步，分析不同流域污水厂群优化调控方案水质指标，对方案实施前后水质指标变化进行分析；

第三步，建立方案的费用效果分析评价指标。

（3）技术创新点及主要技术经济指标

基于经典费用矩阵方法，比较不同方法的适用条件和特点，统计回归出最优化费用函数模型，为污水处理厂群水质调配不同技术方案的经济评估奠定方法基础。开展污水处理厂群



水质调配不同技术方案经济分析数据需求分析，完成相关数据采集和整理工作。运用所确定的费用分析方法和费用效果分析方法对不同方案实施前后的经济和环境变化进行评估和分析。根据典型流域补偿主/客体主体、补偿标准、补偿方式和补偿政策的实践做法和成功经验，提出松花江流域污水厂群优化调控补偿主客体的确定原则和建议、补偿标准确定方法、补偿方式和补偿政策。

（4）技术来源及知识产权概况

优化集成。

依托课题：

松花江流域污水处理智能化集群调控技术与示范（2014ZX07201012）

10.4 以生态补偿、水生态环境资产核算为核心的“三水合一”管理经济政策集成技术

10.4.1 跨省重点流域生态补偿模拟技术

技术就绪度评价等级：5级

适用范围：跨省重点流域生态补偿

主要技术指标和参数：

按照“有入有出、有补有罚”的思路，搭建跨省流域生态补偿核算平台，建立以质量改善为导向的激励机制，明确共同但有区别的责任，实现流域上下游合作共治。

（1）主要内容

标准设计。课题首先从生态服务效益、水质水量、水资源价值、水生态环境与社会经济的响应、支付意愿等5方面构建了流域生态补偿标准核算方法。然后，结合跨省重点流域迫切需要解决的水环境问题，以水环境质量改善为目标导向，以累进梯度合理补偿为原则，综合考虑断面水质、断面水污染控制单元水质目标、断面水量、跨境断面的多年平均径流量、污染物治理成本、水资源购买成本、各省人均GDP的支付能力、投资收益水平等因素，构建了跨省重点流域生态补偿标准核算标准模型，以跨省断面为基本单元，包括水质部分和水量部分，某省的流域生态补偿资金为区域内所有跨境断面的生态补偿资金之和。若出境断面考核指标显示上游水体的水质或水量未达到目标要求，则上游省份应向下游地区补偿经社会经济因素调整后的相应污染物治理成本或水资源补偿资金；反之，下游省份应对上游地区进行

补偿。

$$CF_j = [B + \sum E_k] \times \Phi_1 \times \Phi_2 = [(V_j - PV_j) \times P + \sum (M_{jk} - M_{jko}) \times V_j \times C_k] \times \Phi_1 \times \Phi_2,$$

其中, CF_j : 针对跨境断面 j 核算的生态补偿资金; B : 水量生态补偿资金; E_k : 水质指标 k 的生态补偿资金; V_j : 断面 j 当年径流量; PV_j : 断面 j 多年平均径流量; P : 购水成本; M_{jk} : 水质指标 k 在断面 j 的水量加权平均值; M_{jko} : 水质指标 k 在断面 j 的目标值; C_k : 污染物 k 的超标处理单位成本; Φ_1 : 支付能力修正系数; Φ_2 : 效益修正系数。支付能力修正系数 Φ_1 主要是根据支付方省份的人均GDP与全国人均GDP比值确定; 效益修正系数 Φ_2 主要是为了促进投资积极性; 一般取值为1.2。

建立核算平台。依托上述补偿标准, 对全国31省市区或按照338个地级以上城市进行跨界断面补偿资金核算, 运用地理信息系统(GIS)技术, 将流域跨界生态补偿信息转换为可视化图形, 用不同颜色与色度直观表征水体实施生态补偿的资金流向、规模与分布, 构造一个广泛适用又因地制宜、原理科学又操作方便的信息化平台。

资金分配机制。以国家向各省纵向转移支付的水污染防治专项资金、清洁水专项资金等流域保护资金为基础, 以地方政府自筹资金以及社会资金为补充, 由国家财政部和环境保护部依据跨省流域生态补偿核算平台核算的跨省流域补偿资金流向和规模调整各省纵向转移支付初始资金分配, 使得各省的流域保护绩效与转移支付资金规模相挂钩。地方获得的财政资金原则上用于流域保护。

(2) 技术创新点

坚持水环境质量改善为目标导向, 引导各省以流域水环境保护责任目标以及水资源产品供给为考核范围建立横向转移支付机制, 基于各跨省断面的上下游关系、水质水量数据, 综合考虑上下游省域支付能力等因素, 明确一个省对一个省、一个省对多个省、多个省对一个省等多种上下游关系形式的权责关系, 核算补偿金额, 建立以水质水量为抓手的流域生态补偿与经济责任机制。

(3) 技术来源及知识产权概况

自主研发。

获得软件著作权。

依托课题:

跨省重点流域生态补偿与经济责任机制示范研究(2013ZX07603-003)

绿水青山

ENVIRONMENTAL PROTECTION

就是金山银山

