

文章编号: 1007-6301 (2002) 02-180-09

# 关于水资源承载力理论与方法的研究

朱一中, 夏 军, 谈 戈

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 本文首先明确了水资源承载力的基本概念, 指出可持续发展理论、水-生态-社会经济复合系统理论、二元模式下的水文循环机制和过程是水资源承载力研究的理论基础, 对水资源承载力研究的基本内容、评价指标体系的建立和评价方法进行了较全面的概括和总结。认为水资源承载力的进一步研究应加强学科综合研究, 促进 RS、GIS 等信息技术和现有模型方法的结合, 并考虑区域分异与空间配置问题。

**关键词:** 水资源承载力; 评价方法; 研究趋势

**中图分类号:** F323.213 **文献标识码:** A

“承载力”一词源于生态学, 原用以衡量特定区域在某一环境条件下可维持某一物种个体的最大数量<sup>[1]</sup>。在对资源短缺和环境污染问题的研究中, “承载力”概念得到延伸发展并广泛用于说明环境或生态系统承受发展和特定活动能力的限度<sup>[2]</sup>。

承载力概念的演化与发展是对发展中出现问题的反应与变化结果。在不同的发展阶段, 产生了不同的承载力概念和相应的承载力理论。如针对环境问题, 人们提出了环境承载力的概念与理论, 针对土地资源短缺问题, 人们提出了土地资源承载力的概念与理论<sup>[3]</sup>。而“水资源承载力”则是随水问题的日益突出由我国学者在 80 年代末提出来的。水资源承载力是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分, 且往往是水资源紧缺和贫水地区制约人类社会发展的“瓶颈”因素, 它对一个国家或地区综合发展和发展规模有至关重要的影响<sup>[4]</sup>。作为可持续发展研究和水资源安全战略研究中的一个基础课题, 水资源承载力研究已引起学术界高度关注并成为当前水资源科学中的一个重点和热点研究问题<sup>[5, 6]</sup>。

## 1 水资源承载力概念辨析

### 1.1 水资源承载力定义

目前我国对水资源承载力的定义有多种表述, 如惠泱河认为水资源承载力可理解为某一区域的水资源条件在自然-人工二元模式影响下, 以可预见的技术、经济、社会发展水平及水资源的动态变化为依据, 以可持续发展为原则, 以维护生态良性循环发展为条件, 经

收稿日期: 2002-01; 修订日期: 2002-02

基金项目: 中科院知识创新工程项目课题“西北干旱区水循环与水资源承载力研究”(KZCX1-10-03)资助; 中科院“百人计划”项目资助

作者简介: 朱一中(1969-), 女, 湖南人, 讲师, 中国科学院地理科学与资源研究所博士研究生。研究方向为 GIS 在水文学与水资源管理中的应用。E-mail: zhuyz@igsnr.ac.cn

过合理优化配置, 对该地区社会经济发展所能提供的最大支撑能力<sup>[7]</sup> (2001)。该定义充分考虑了人类活动影响对水资源系统的干预和水文循环过程的影响作用, 并强调了动态发展的观念。何希吾将水资源承载力定义为一个流域、一个地区、一个国家, 在不同阶段的社会经济和技术条件下, 在水资源合理开发利用的前提下, 当地水资源能够维系和支撑的人口、经济和环境规模总量<sup>[8]</sup> (2000)。这一定义将环境规模和社会经济发展规模一并纳入水资源承载力的范畴, 从理论上而言是正确的, 然而对环境规模进行界定和度量却较为困难。考虑到水资源承载力研究的现实与长远意义, 对它的理解和界定, 要遵循下列的事实: 第一, 必须把它置于可持续发展战略构架下进行讨论; 第二, 要从水资源系统- 自然生态系统- 社会经济系统耦合机理上综合考虑水资源对地区人口、资源、环境和经济协调发展的支撑能力; 第三, 要识别水资源与其它资源不同的特点, 它既是可再生、流动的、不可浓缩的资源, 又是可耗竭、可污染、利害并存和不确定性的资源; 最后, 水资源承载能力受自然资源影响外, 还受到许多社会因素如社会经济状况、国家方针政策包括水政策、管理水平和社会协调发展机制的影响和制约<sup>[9]</sup>。因此, 水资源承载力是一个动态、变化的概念, 在此我们认为可将水资源承载力定义为: 指某一区域在特定历史阶段的特定技术和社会经济发展水平条件下, 以维护生态良性循环和可持续发展为前提, 当地水资源系统可支撑的社会经济活动规模和具有一定生活水平的人口数量。

## 1.2 水资源承载力的特性与影响因素

水资源承载能力的大小是随空间、时间和条件变化而变化, 具有动态性、地区性、相对极限性、模糊性等特点。影响水资源承载力大小的因素可概括为以下方面:

(1) 水资源数量、质量及开发利用程度。当地水资源总量及根据法律规定分配给当地可利用过境水量, 水资源的矿化度、埋深条件等质量情况, 以及当前水资源开发利用方式和程度;

(2) 生态环境状态。生态环境不但自身需要一定的水资源量得以维持, 并通过对水文循环的影响在相当程度上决定了水资源总量的大小;

(3) 社会经济条件。在不同阶段一定社会经济与技术条件决定了可开发控制的可利用水量和水资源利用效率;

(4) 社会生产力水平。不同历史时期或同一历史时期的不同地区具有不同的生产力水平, 决定了水资源可承载社会经济发展规模的差异;

(5) 社会消费水平与结构。在社会生产能力确定的条件下, 社会消费水平和结构将决定水资源承载力的大小;

(6) 区际交流。劳动区域分工与产品交换也将间接影响水资源承载力的大小。

## 2 水资源承载力的理论基础与研究内容体系

### 2.1 水资源承载力研究的理论基础

#### (1) 可持续发展理论

可持续发展强调三个主题: 代际公平、区域公平以及社会经济发展与人口、资源、环境间的协调性。在可持续发展理论的指导下, 资源的可持续利用、人与环境的协调发展取代了以前片面追求经济增长的发展观念。可持续发展是一种哲学观, 是关于自然界和人类

社会发展的哲学观,可作为水资源承载力研究的指导思想和理论基础,而水资源承载力研究则是可持续发展理论在水资源管理领域的具体体现和应用。

### (2) 水-生态-社会经济复合系统理论

区域(流域)是具有层次结构和整体功能的复合系统,由社会经济系统、生态环境系统和水资源系统组成。水资源既是该复合系统的基本组成要素,又是社会经济系统和自然生态系统存在和发展的支持条件。水资源的承载力状况对地区的发展起着重要的作用,水资源状况的变化往往导致区域环境的变化、土地利用和土地覆被的改变、社会经济发展方式的变化等。水-生态-社会经济复合系统理论也是水资源承载力研究的基础,应将水资源作为生态经济系统的一员,从水资源系统-自然生态系统-社会经济系统耦合机理上综合考虑水资源对地区人口、资源、环境和经济协调发展的支撑能力。

### (3) 自然-人工二元模式下的水文循环过程与机制

随着人类活动的加强,原有的一元流域天然水循环模式受到严重挑战,人类活动不仅改变了流域降水、蒸发、入渗、产流、汇流特性,而且在原有的天然水循环内产生了人工侧支循环,形成了天然循环与人工循环此消彼长的二元动态水循环过程。具有二元结构的流域水资源演化不仅构成了社会经济发展的基础,是生态环境的控制因素,同时也是诸多水问题的共同症结所在,因此它也是进行水资源承载力研究的一个基石<sup>[10]</sup>。

## 2.2 水资源承载力的研究内容体系

### 2.2.1 水资源系统构成

(1) 水资源数量与质量、来源与组成,水资源的开发利用方式及开发利用潜力,水利工程可控制面积、水量等,这些条件构成了天然水循环通量和人工水循环通量的比例;

(2) 水量转化规律与水流系统(大气降水、地表水、地下水、土壤水和植物生态水)模拟研究。

### 2.2.2 生态系统

(1) 生态系统的组成要素、规模及各要素平衡匹配关系,生态系统平衡阈值;

(2) 生态系统的需水和耗水规律研究。

### 2.2.3 社会经济系统

(1) 国民经济发展规模及内部结构,社会消费水平及结构,区际交流;

(2) 人口与社会经济发展的规模、速度和方向。

### 2.2.4 水资源系统-生态系统-社会经济系统耦合机制

(1) 水资源系统、生态系统和社会经济系统的相互作用和影响,相互依赖和制约关系的机理和量化研究;

(2) 二元模式下的水文循环规律。

### 2.2.5 水资源承载力评价指标体系的建立及计算方法

### 2.2.6 水资源系统-生态系统-社会经济系统耦合下的水资源承载力评价模型及其应用

## 3 水资源承载力评价指标及计算方法

### 3.1 水资源承载力的组成

从承载媒体(水资源系统)对被承载对象(社会经济系统)的客观承载力本身来考察

水资源承载力应主要由水环境容量(纳污能力)和水资源供给能力(指可为人类社会经济活动所利用的部分)两部分组成(如图 1 所示)。

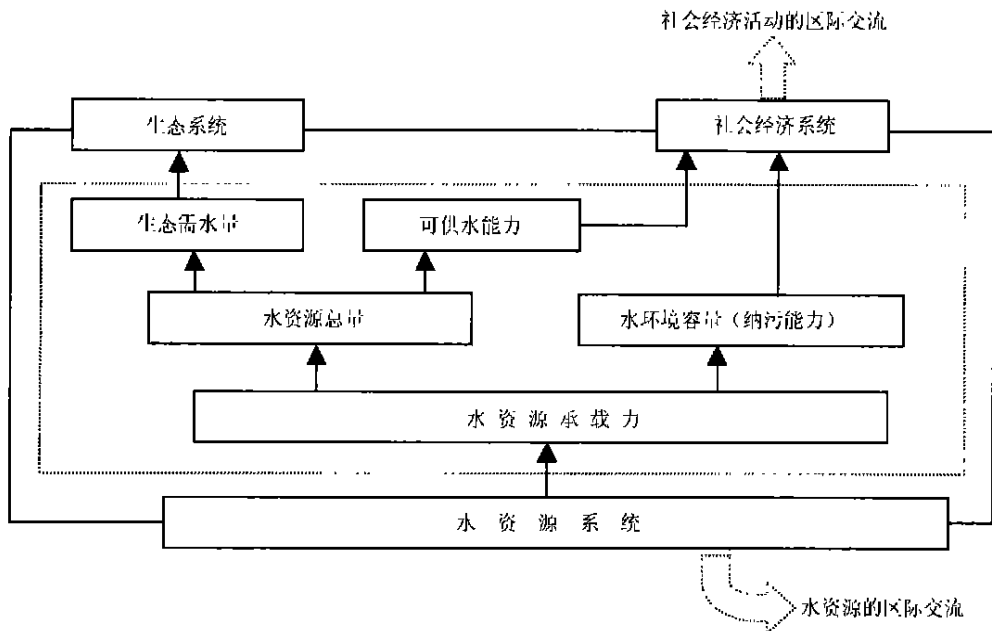


图 1 区域水资源-生态-社会经济系统耦合与水资源承载力组成示意图

Fig. 1 Coupling of water resources- environment- sociaecomny system and Compose of water resources carrying capacity

### 3.1.1 水资源供给能力

将维护生态平衡和维持相当的生态环境质量作为社会经济可持续发展和水资源可持续利用的前提条件,则水资源可供水能力的大小必须考虑生态需水量的问题。关于水资源总量的计算已有较成熟的方法,一般以多年平均产出量——水量表示,其量基本上是个常数,也是区域水资源承载能力的理论极限值。因此水资源可供水量的问题实际上转化为生态需水量的确定问题,而这正是水资源承载力研究中的重点和难点问题之一。对生态需水量进行计算,必须明确两个基本前提,第一是生态环境用水的界定,不同的生态系统范围界定直接影响到生态需水量的不同;第二是生态保护准则的确定,例如应当保持怎样的生态环境规模和质量<sup>[11,12]</sup>。虽然在国内生态需水的研究已引起广泛关注,但目前对生态需水量的估算还缺乏较成熟精确的方法。限于篇幅,本文对该问题不作更深入的探讨。

### 3.1.2 水环境容量

水环境容量是指在一定的水质或环境目标下,某水域能够允许容纳的污染物的最大数量;这个环境容量对人类活动的支持能力同样影响到水资源承载力的大小。区域某时期的水环境容量分析需要通过水质调查分析、水质规划、供水工程与污水处理回收等措施的优化组合才能进行<sup>[13]</sup>。

### 3.2 水资源承载力评价指标体系

水资源承载力评价指标体系的建立应注意两点:第一,影响水资源承载力的因素是多

样的, 要从众多要素中选取能反映问题本质的因素、并除去重复性因素的作用, 目前多应用主成分分析法、均方差法避免要素选取重复和遗漏<sup>[14]</sup>。第二, 指示区域水资源承载力大小的指标有两类, 一是水资源承载力绝对指标, 即从定义出发直接根据可供给水量和水环境容量计算其可支撑的人口和社会经济发展规模; 二是水资源承载力相对指标, 即用水资源承载力指数来衡量水资源承载力的高低, 确定水资源承载力是否在合理阈值范围内和进行区域间或时间段上的比较。根据水资源承载主体和客体的关系、水资源-生态系统-社会经济系统的耦合关系以及区际交流影响, 可拟订水资源承载力评价指标体系(如图2)。

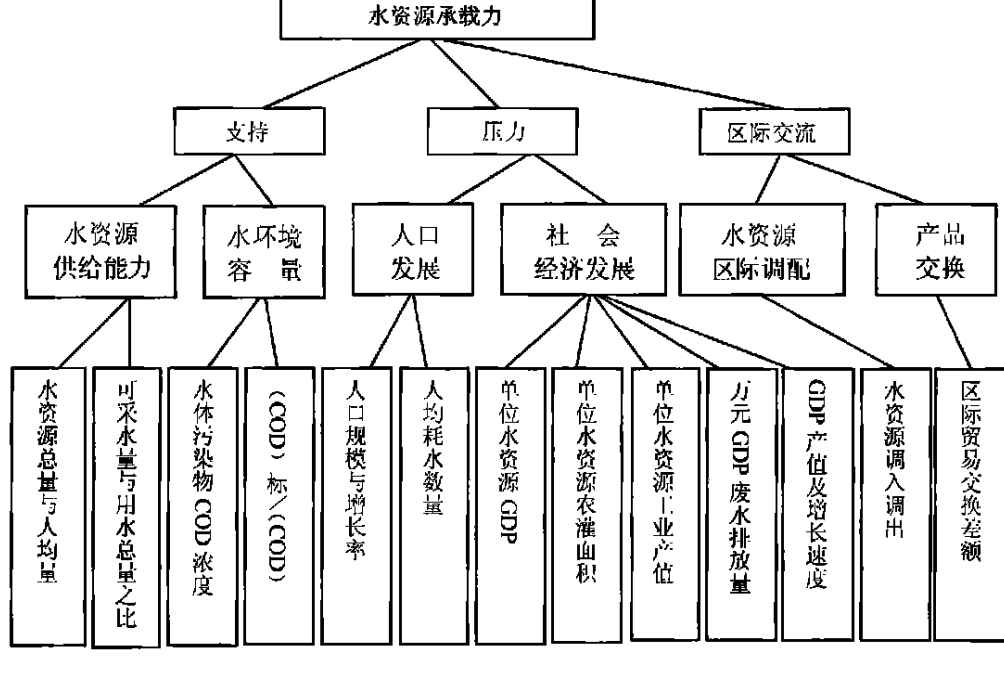


图2 水资源承载力评价指标体系

Fig. 2 Evaluation index system of water resources carrying capacity

## 4 水资源承载力评价方法

水资源承载力分析关系到地区环境、人口和经济发展规模和代际持续发展的前景, 涉及面广、内容复杂, 目前国内外尚无统一和成熟的方法。在已有的研究成果基础上, 设想解决问题的方法可以有以下几类:

### 4.1 水资源供需平衡法与多目标分析模型

采用水资源供需平衡法进行水资源承载力评估与预测与水资源的合理配置有密切关系, 它首先以维护生态平衡和生态环境质量以及可持续发展为前提, 将水资源在生态系统和社会经济系统之间进行平衡分析和配置, 然后以对社会经济系统可供给水量为约束条件, 通过多目标分析模型确定社会发展模式(经济结构、农业种植结构等)、供水组成(节水、污水回流、开发当地水、外流域调水等)及供水分配状况, 最后在上述水资源供需平衡及水资源合理配置的基础上计算水资源承载力的大小(绝对指标)——包括人口发展规模和

社会经济发展规模<sup>[15]</sup>。本方法中主要采用的模型包括:

### (1) 生态环境模拟模型

以生态保护与环境保护约束关系作为模型框架建立模型, 揭示生态系统平衡与生态系统耗水关系、生态系统平衡与社会经济活动方式和强度关系的规律, 从天然植被面积指标、绿洲面积指标、水环境指标等方面提出生态环境重点保护对象和生态环境保护规模, 确定生态需水量, 作为水资源供需平衡的参考依据。

### (2) 多目标分析模型

以对社会经济系统可供给水量为约束条件, 建立描述水资源在社会经济系统内部各子系统之间的分配关系以及这种关系是怎样决定社会发展模式的模型, 通过经济发展目标、结构优化目标、资源约束与利用效益目标等多目标之间的权衡来确定社会发展模式(经济结构、农业种植结构等)、供水组成(节水、污水回流、开发当地水、外流域调水等)及供水在国民经济各部门之间的分配状况。

## 4.2 多指标综合评价法与综合评判模型

该方法通过水资源系统支持力和水资源系统压力来共同反映水资源承载状况。水资源系统支持力代表了承载媒体的客观承载能力大小, 其分值越大, 表示水资源现实承载力越高; 水资源系统压力代表了被承载对象的压力大小, 其分值越大, 表示系统所受压力越大, 水资源承载力越低; 通过两值相比得到水资源承载力指数(相对指标)并进行分级, 可指示水资源承载状况。

### (1) 评价指标的标准化处理

在多指标综合评价问题中, 通常评价指标有“效益型”和“成本型”两大类。“效益型”为指标指属性值越大越好的指标, “成本型”指标为属性值越小越好的指标, 应分别对这两类指标进行无量纲化处理。在水资源系统支持力和水资源系统承受压力指标体系中, 有人均水资源数量、可采水量与用水总量之比, (COD) 标/(COD), 人口规模与增长率, GDP 产值及增长速度, 万元 GDP 废水排放量属于“效益型”指标, 其余属于“成本型”指标。对于区际交流指标, 可将产品调入调出量折算成水资源调入调出量计入支持力指标(差额为正时)或压力指标(差额为负时)。

### (2) 评价因子权重的确定

多指标的综合评价因子权重的确定是整个评价过程中的关键一环, 根据计算权数时原始数据来源的不同, 权数的确定方法大体上可分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法主要是由专家根据经验主观判断得到, 如古林法、Delphi 法、AHP 法等, 这种方法研究较早, 也较为成熟, 但客观性较差。客观赋权法的原始数据是由各指标在评价单位中的实际数据形成, 它不依赖于人的主观判断, 因而客观性较强, 如主成分分析法、均方差法等。

### (3) 综合评价值的计算

对于支持力和压力指标, 分别依公式多因子综合评价公式进行计算。

## 4.3 系统分析方法——动态模拟递推算法

动态模拟递推法主要是通过水的动态供需平衡计算来显示水资源承载力的状况和支持人口与经济最终发展的最终规模, 其实质是模拟法, 将动态模拟和数学经济分析相结合, 利用计算机模拟程序, 仿造地区水资源供需真实系统运动行为进行模拟预测, 根据逐年运行的

实际结果,有目的地改变模拟参数或结构,使其与真实系统尽可能一致。当水资源供应能力达到“零增长”(对水资源紧缺地区)或地区人口增长,或经济增长达到“零增长”(对水资源丰裕地区)时,水资源承载力按定义已达最大<sup>[2]</sup>。

#### (1) 地区水资源承载力分析系统描述

水资源供需系统一般由供水子系统、用水子系统、排水子系统和水资源子系统组成。

#### (2) 分析步骤

第一步:对区域水资源进行评价和开发利用条件分析。

第二步:根据地区社会经济发展计划,预测未来各项用水的需求量和总量。

第三步:根据地区拥有的水资源量和开采利用条件,预测满足用水需要的新增供水工程的可供水量和相应措施。

第四步:通过逐年或一定时期的水资源供需平衡计算,采用动态模拟递推算法,进行水资源的现时承载力和承载过程的计算和分析,直到找到可供水量达到零增长时的水资源极限承载力或人口增长、经济发展达到零增长时的最大水资源承载力限度。

### 4.4 系统动力学方法与系统动力学仿真模型

系统动力学(SD)模型是一种定性与定量相结合,系统、分析、综合与推理集成的方法,并配有专门的DYNAMO软件,给模型的仿真、政策模拟带来很大方便,可以较好地把握系统的各种反馈关系,适合于进行具有高阶次、非线性、多变量、多反馈、机理复杂和时变特征的承载力研究。用SD模型计算的水资源承载力不是简单地给出区域所能养活人口的上限,而是通过各种决策在模型上模拟,清晰地反映人口、资源、环境和发展之间的关系,可操作性较强<sup>[16]</sup>。

#### (1) 系统流图设计

系统流图是系统动力学的基本变量和表示符号的有机组合。根据水-生态-社会经济复合系统内部各因素之间的关系设计系统流图,其目的主要是反映系统各因素因果关系中所没能反映出来的不同变量的性质和特点,使系统内部的作用机制更加清晰明了,然后通过流图中关系的进一步量化,实现政策仿真的目的。流图中一般包含两种重要变量:状态变量和变化率。

#### (2) 主要状态方程描述与模型构建

根据水资源承载力及承载状况的反馈关系,建立描述各类变量的数学方程,以模型用计算机进行仿真。这些描述方程通常包括状态方程、常数方程、速率方程、表函数、辅助方程等。系统模型正是由这一组动态方程有机组合而成。

#### (3) 模型的仿真计算

对不同(提高水资源承载力的)方案确定不同的变量输入值,通过仿真操作运算,得到不同发展方案下的水资源承载力仿真运算结果,包括GDP、人口数、农业产值、COD含量及可供水量等各种具体的水资源承载指标,通过对比分析来进行方案的比较择优。

## 5 水资源承载力研究趋势

水资源承载力研究在我国目前还处于初期阶段,还没有形成水资源承载力研究的成熟的理论、内容和方法体系,笔者在前文中已就该问题进行了一个较粗浅的论述。为使水资

源承载力研究进一步深入, 取得更精确和实用的成果, 近期主要研究方向应包括以下方面:

### 5.1 加强学科交叉融合的研究

水资源承载力研究涵盖了从理论到实证; 从水-生态-社会经济复合系统下的二元模式水文循环和水量平衡等宏观领域到水环境容量、植被耗水机理等微观领域; 从水文水资源科学到社会经济科学、规划科学等不同层次、不同学科的研究范围, 并以多目标决策分析方法、系统动力学方法、遥感与地理信息系统方法等作为技术手段, 属于典型的交叉学科研究领域。迫切需要加强学科交叉融合的研究<sup>[17, 18]</sup>。

### 5.2 技术方法的创新

目前制约水资源承载力研究的一个重要因素就是数据的获取与分析处理。GIS 在支持与水文和水环境有关的地理空间数据的获取、管理、分析、模拟和显示, 以解决复杂的水资源、水环境规划和管理问题方面显示了其强大的功能<sup>[19]</sup>。水资源承载力研究必须突破陈旧的数据获取与分析手段, 充分利用现代先进技术, 将地面水文观测与空中遥感信息相结合, 利用地理信息系统进行数值计算和模拟, 并将现有水资源承载力数学模型方法与 GIS 集成, 这是水资源承载力研究取得突破性进展的一个关键所在。

### 5.3 研究领域的拓展

地域分异和空间配置历来是地理学最重要的优势研究领域。现有的水资源承载力研究着重研究了水资源可承载人口和社会经济发展总量规模和结构, 这只是表征水资源承载力大小的一个面上的宏观指标, 事实上水土资源与社会经济活动的空间配置状况对水资源承载力有着极为重要的影响, 因此有必要加强空间差异与区域组合研究, 以进一步增强水资源承载力研究成果的适应性。与水资源承载力密切相关的区域合理配置研究内容包括水土资源空间配置, 上、中、下游的城市与产业合理布局, 水源保护区区域范围内的人口、产业布局等, 在水资源承载力研究中考虑区域分异与空间配置问题, 不但是水资源承载力研究的一个重要方面- 水资源承载力区域差异研究的需要, 也必将使水资源承载力研究成果对社会实践具有更明确的指导作用。

## 参考文献:

- [1] 孙鸿烈 主编. 中国资源科学百科全书[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 石油出版社, 2000.
- [2] 冯尚友 著. 水资源可持续利用导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] 高吉喜 著. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [4] 汤奇成, 张捷斌. 西北干旱地区水资源与生态环境保护[J]. 地理科学进展, 2001(3).
- [5] Daily G C, Ehrlich P R. Socioeconomic equity, sustainability, and earth' carrying capacity[J]. Ecological Application, 1996, 6(4): 991-1001.
- [6] Sagoff M. Carrying capacity and ecological economics[J]. BioScience, 45(9): 610-619.
- [7] 李令跃 等. 试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J]. 水科学进展, 2000(9).
- [8] 刘燕华 主编. 柴达木盆地水资源合理利用与生态环境保护[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 夏军. 可持续水资源系统管理研究与展望[J]. 水科学进展, 1998, 4(3).
- [10] “九五”国家重点科技攻关项目. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[J], 2000.
- [11] 沈国舫 主编. 中国生态环境建设与水资源保护利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001/10/15.
- [12] 李丽娟 等. 海滦河流域河流系统生态环境需水量研究[J]. 地理学报, 2000(4).
- [13] 惠泱河 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001(2).
- [14] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报, 1998(1).



- [16] 惠泱河等. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J]. 地理研究, 2001(5).
- [17] 夏军. 区域水环境及生态质量评价[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
- [18] 夏军, 许新宜等. 可持续水资源管理研究与实践[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1999.
- [19] 王劲峰等. 区域发展和水资源利用透明交互决策系统[J]. 地理科学进展, 2000(1).

## A Primary Study on the Theories and Process of Water Resources Carrying Capacity

ZHU Yi-zhong, XIA Jun, TAN Ge

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101 China)

**Abstract:** As a principle index to measure water resources security, water resources carrying capacity relates with the problem of water resources security closely and becomes an emphases of water resources study which has important effect on the recognition and construction of water resources security system. Based on the definition of water resources carrying capacity, this paper brings forward the theories about the study of water resources carrying capacity, concerning with the sustainable development, water resources- socialeconomy- environment coupling system and water cycle in duality mode. After a overall review of the contents and evaluation index system, the paper summarizes the evaluation methods of water resources carrying capacity study, including the imitate model with system dynamics theory, the decision model of multiple- purpose planning etc. . Finally, the paper points out that the further study of water resources carrying capacity should strengthen integration study of different subject, apply the new technology of GIS and RS actively and pay more attention to the study of region diversity.

**Key words:** water resources carrying capacity; evaluation methods; study direction