

# 垂直潜流人工湿地 布水方式对水流运动影响探讨

尹海龙\* 徐祖信 李松

(同济大学环境科学与工程学院, 上海, 200092)

**摘要:** 通过建立三维人工湿地水流运动模型, 探讨了垂直潜流人工湿地布水方式对水流运动的影响, 以提出通过优化布水方式提高人工湿地处理负荷的方法。研究结论为: (1) 布水系统达不到均匀配水的情况下, 人工湿地内垂向上自上而下存在着不浸水的区域, 人工湿地得不到完全利用; (2) 进出水孔交错布置不会显著改变水力效率; (3) 长度(宽度)单方向增加布水孔数目, 长度(宽度)方向水流线扩展, 对应宽度(长度)方向水流线收缩, 但总体上湿地过水体积增加。

**关键词:** 人工湿地; 潜流; 水动力; 地下水

## 1 前言

长期以来, 人们一直开展人工湿地净化污水的机理及净化效果研究, 系统研究了基质、植物等对污染物的除污性能, 以及人工湿地中污染物迁移去除机理。但是, 对人工湿地水流运动特性与水力设计研究很少, 而这也是需要深入研究的问题: 人工湿地系统中, 由于基质孔隙分布不均匀、植物根系的延伸等作用, 水流出现短流、死流等流态。短流情况下, 水力停留时间过小, 有机物生化降解时间短, 净化效果差。死流情况下, 水力停留时间过大, 湿地系统易处于厌氧状态, 抑制好氧条件下的生物降解作用, 也使得净化效果差。因此, 人工湿地的水流运动特征研究, 对提高人工湿地的净化效果至关重要。

目前, 在人工湿地水流运动特征研究方面, 示踪剂试验技术是最常用的技术手段, 在国内外人工湿地水流特征研究中得到了广泛应用。其基本原理是: 在系统进水中加入一种示踪剂脉冲, 在系统出水中观测系统对此脉冲的反应, 绘出系统出水中示踪剂电导率随时间变化曲线(停留时间分布曲线, RTD 曲线)。基于 RTD 曲线, 判断湿地系统内部是否存在短流、死流以及短流、死流比例, 判断湿地流态(推流、完全混合流、介于两者之间)。我国学者吴振斌等针对所开发的下行流—上行流复合水流湿地系统(IVCW), 利用示踪剂试验技术对人工湿地水流流态进行了系统研究; 国外 Jeff F. Holland 等、Joan Garcia 等、Forrest F. Dierberg 等利用示踪剂试验技术, 分别研究了湿地水深和流速对水力效率影响、湿地长宽比和基质粒

\* E-mail: yinhailong@mail.tongji.edu.cn

径对水力效率影响、湿地植物对水力效率影响等。基于示踪剂试验，虽然可以分析湿地内短流、死流特征及短流、死流容积比例，但是难以分析出湿地内短流、死流的具体位置，以及湿地内各部位具体而明确的水流特征。要实现湿地内各部位水流特征的详细描述，需进一步借助于数学模型。目前，国外有学者（Graham A. Jenkins 等）利用平面二维水动力数学模型，研究了表面流湿地水动力特征，但目前尚无利用数学模型对潜流人工湿地水流运动特征进行研究的报道。为此，本研究基于地下水水流模型，开展了垂直潜流人工湿地水流运动特征研究。

## 2 模型控制方程

垂直潜流人工湿地中，水流通过基质孔隙的流动可用下面的三维偏微分方程进行描述（Rushton K. R., 1979）：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中， $K_x$ 、 $K_y$ 、 $K_z$  为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个坐标轴方向上的水力传导系数； $h$  为地下水水位； $W$  为源汇项，大于零表示流进，小于零表示流出； $S_s$  为储水系数。

对应的模型初始条件和边界条件为：

$$h(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = h_0(x, y, z, 0) \quad , \quad h(x, y, z, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_{\Gamma_1}(x, y, z, t) \quad (2)$$

## 2 垂直下行潜流人工湿地水力设计对水流特征影响

影响人工湿地水流特征的因素包括布水方式、基质组配、湿地尺寸、植物密度等。具体分析布水方式对湿地水流特征影响。

### 2.1 研究对象

研究对象为垂直下行潜流人工湿地反应器，其设计参数为：平面尺寸为  $1.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ ，池高  $1.4\text{m}$ ；反应器内由上至下全部填充粗砂（ $0 \sim 120\text{cm}$ ），距基质表面  $10\text{cm}$  以下布设布水系统，集水系统距单池底部  $2.5\text{cm}$ 。反应器基质表层种植芦苇，种植密度为  $4$  根茎/ $\text{m}^2$ 。采用有限差分网格对反应器装置进行剖分，计算区域网格划分如图 1 示。

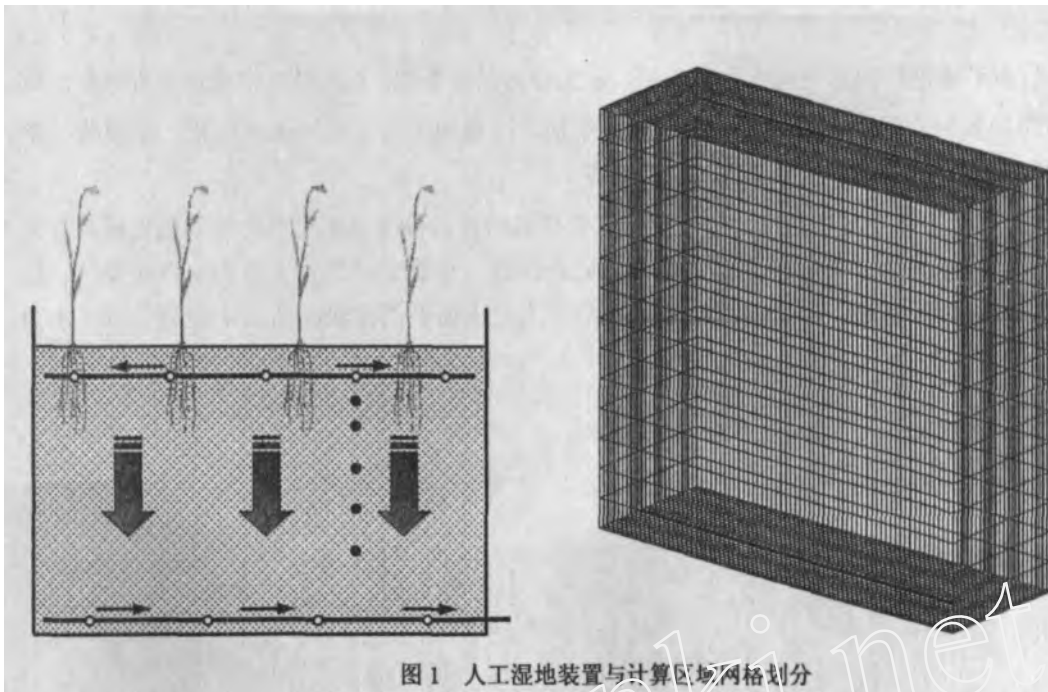


图1 人工湿地装置与计算区域网格划分

### 2.3 湿地布水方式对湿地水流运动影响

湿地布水系统设计方案见表1。

表1 湿地布水方式设计方案

设计方案	进水孔	出水孔	进水孔和出水孔布置方式	备注
1	8 (4×2)	10 (5×2)	交错布置	
2	8 (4×2)	8 (4×2)	非交错布置	
3	14 (7×2)	14 (7×2)	非交错布置	布水系统长度方向上进水孔间距减少 1/2
4	12 (4×3)	12 (4×3)	非交错布置	布水系统宽度方向上进水孔间距减少 1/2
5	21 (7×3)	21 (7×3)	非交错布置	布水系统在长度、宽度方向上进水孔间距减少 1/2

通过对5种不同的水力设计方案进行模拟，得出：

(1) 在湿地布水系统达不到均匀配水情况下，人工湿地自上而下处于非饱和流状态，湿地内自上而下存在着不浸水的区域，人工湿地容积得不到完全利用。这说明：尽量提高配水均匀性是提高人工湿地水力负荷的有效途径；根据不规则形状水力传导率计算公式（叶建锋）

$$k_t = \frac{\rho g \epsilon^{3.7} D^2}{127.5(1-\epsilon) \mu} \quad (3)$$

式中： $k_1$ 为不规则形状基质的水力传导率， $\mu$ 为动力黏滞系数， $\epsilon$ 为湿地中水体积百分率， $D$ 为基质颗粒直径。湿地布水系统布水均匀性增加，既增加了人工湿地过水容积，水质传导率也将同时提高，从而有助于提高湿地水力负荷。

(2) 方案1和方案2相比，进水管位置交错布置与否基本不对水力效率造成影响：进水管交错布置与否，不会改变过水体积；此外，进水管交错布置导致的水流线变化一般局限于出水管附近区域，不会造成水流线在垂向上自上而下的改变，从而不会显著改变水力效率。

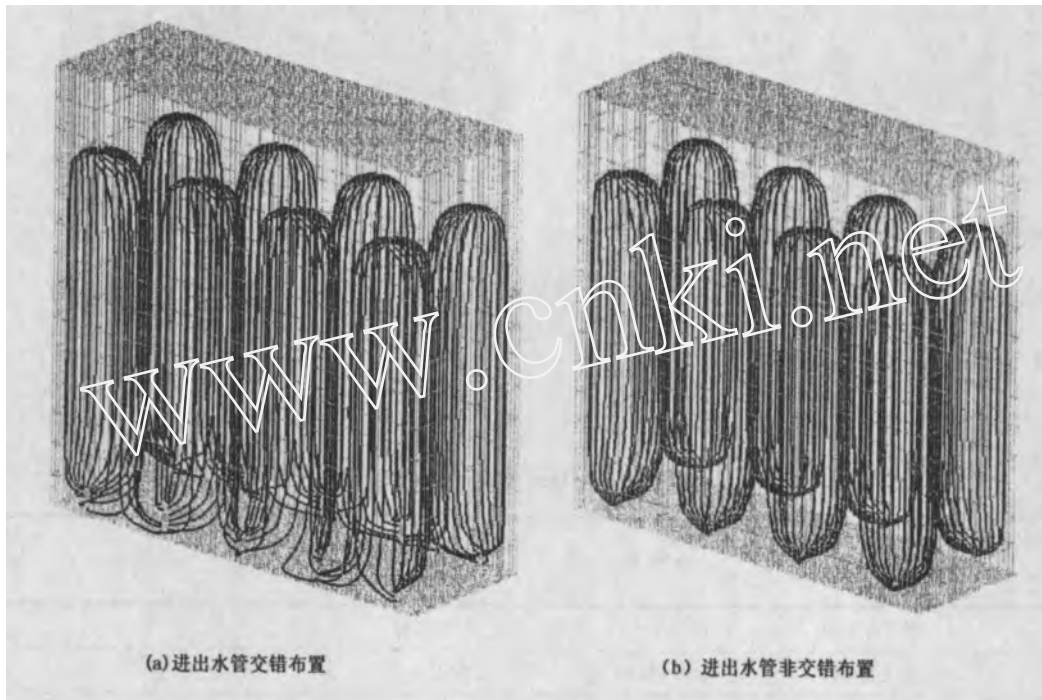


图2 进水管交错布置对湿地水流线影响

(3) 将方案2和方案3、4、5相比，在湿地的单方向上（长度/宽度方向）增加布水孔数目，相应长度/宽度方向上水流线扩展，对应宽度/长度方向上水流线收缩，但总体上湿地体积增加，提高了水力效率和水力负荷。

### 3 结论

本研究在总结分析国内外人工湿地水流运动特征研究方法的基础上，针对垂直下行潜流人工湿地，采用地下水三维水动力模型，研究了人工湿地布水方式对水流运动特征影响，包括进水管交错布置、单方向上（长度或宽度方向）缩小布水管间距、双方向（长度和宽度方向）上同时缩小布水管间距等。研究认为：进水管交错布置基本对人工湿地水力负荷不

造成影响，缩小布水管间距是提高人工湿地水力负荷的重要因素。

后续研究中，应进一步建立人工湿地过水体积与长度、宽度方向上布水间距的函数关系，以为人工湿地水力设计提供设计参数。

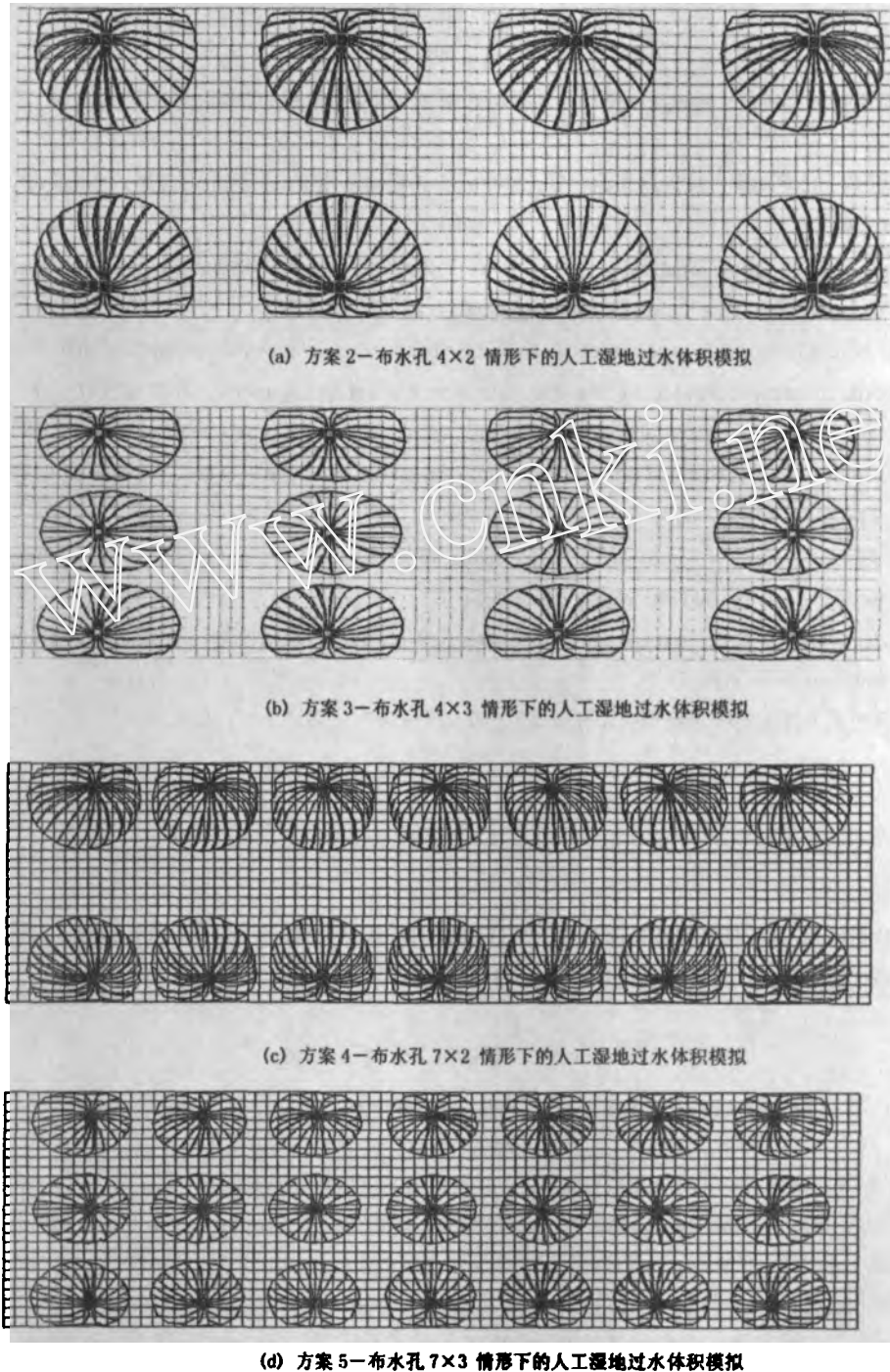


图 3 不同配水方案下的人工湿地过水体积模拟

## 参 考 文 献

- 1 吴振斌, 任明迅, 付贵萍等. 垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响. 环境科学, 2001, 22 (5): 45 - 49
- 2 付贵萍, 吴振斌, 任明迅等. 反应器理论在复合垂直流构建湿地水流流态研究中的应用. 环境科学, 2002, 23 (4): 76 - 80
- 3 Jeff F. Holland, Jay F. Martin, Timothy Granatab, et al. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics. Ecological Engineering, 2004, 23: 189 - 203
- 4 Joan Garcia, Jordi Chiva, Paula Aguirre, et al. Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size. Ecological Engineering, 2004,23:177-187.
- 5 Forrest F. Dierberg, John J. Juston, Thomas A. DeBusk, et al. Relationship between hydraulic efficiency and phosphorus removal in a submerged aquatic vegetation-dominated treatment wetland. Ecological Engineering, 2005, 25: 9-23.
- 6 Graham A. Jenkins, Margaret Greenway. The hydraulic efficiency of fringing versus banded vegetation in constructed wetlands. Ecological Engineering, 2005,25:61-72.
- 7 Rushton, K. R., Redshaw, S. C.. Seepage and groundwater flow-numerical analysis by analog and digital methods. John Wiley and Sons, New York, 1979.
- 8 叶建锋. 垂直潜流人工湿地中污染物去除机理研究:[博士学位论文]. 同济大学, 上海, 2006.

## The influence of wastewater distribution scheme on the hydrodynamic characteristics of vertical subsurface constructed wetland

YIN Hai-long XU Zu-xin LL Song

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

**Abstract:** To improve the hydraulic load of vertical constructed wetland (VCW) by optimizing wastewater distribution, the influence of wastewater distribution scheme on the hydrodynamic characteristics of VCW was analyzed based on three-dimensional groundwater model. The conclusion is presented as follows: (1) On condition of un-even water distribution over the VCW surface, the dry region appears from top to bottom, and the VCW can not be fully utilized; (2) the stagger layout of wastewater distribution and drain holes can't improve hydraulic efficiency obviously; (3) the increment of wastewater allocation holes in the long or wide direction leads to the



streamline spread in the long or wide direction and the streamline contraction in the opposite direction, as a whole, the percentage of dry region reduces.

**Key words:** Constructed wetland, subsurface flow, hydrodynamic, groundwater

www.cnki.net