

河道人工湿地的构建及其对河道水流的影响

陈 平^{1,2}, 韦余广¹, 罗 静¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要 提出了河道人工湿地的构建方法: 在河道两侧的滩地上, 每间隔一段距离设一弦长为 S 、弓高为 B 、高程在正常水位以下 0.5 m 的圆弧形扩展段, 且扩展段于河道两侧呈犬牙交错状布置, 洪没枯出形成旱湿交替的人工湿地场。采用三维湍流数值计算和分析方法, 优化确定河道人工湿地断面的主要参数 S 和 B , 使人工湿地内获得了最佳水流条件。算例模拟计算表明, 河道人工湿地床体主要构建参数的最优值为 $S = 2.0D$, $B = 0.7D$ (D 为河道口宽)。从河道流场、断面平均流速沿程分布及垂线平均流速横向分布 3 方面分析了人工湿地对河道水流的影响。分析结果表明: 人工湿地构成后, 整体河道会形成缓变与急变交错的流态; 人工湿地段断面平均流速明显衰减, 湿地与河道主槽内的水流流速差异较大。

关键词 河道人工湿地; 数值计算模型; 河道水流; 断面参数

中图分类号 X143 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2007)04-0374-05

随着社会经济的发展, 河道水质污染越来越严重, 特别是农业生产过程中输出的、以非点源形式存在的各种农业废水, 是造成水体富营养化的重要原因之一。而农业非点源污染来源于非特定的分散地区, 与土壤的侵蚀程度、化肥、农药的施用量、农业耕作方式以及地质地貌等密切相关, 与点源污染相比, 非点源污染危害大且难以控制^[1]。

治理河道水体污染须从削减与截留污染源、河道底泥修复、河道生态重建等方面考虑^[2]。河道生态建设中人工湿地的构建问题越来越受到人们的重视。人工湿地作为一种独特的生态系统, 能够通过植物吸收、生物降解等一系列作用, 降低河道水体中氮、磷化合物的含量。国外成功经验和试验^[3-4]表明, 河漫滩上的人工湿地是去除河道水体污染的一种简单而有效的工具。

目前, 河道人工湿地在我国的应用实例还不多, 有关河道湿地的机理研究才刚刚起步, 理论基础还很薄弱。一些学者^[5-6]在这方面虽做了一些探讨, 也提出了在干流两侧以及支流汇河口处构建人工湿地系统的设想, 但没有具体给出河道人工湿地的构建方法, 理论分析成果也不多。基于此, 本文提出了一种河道表面流人工湿地的构建方法, 并通过三维数值计算模型优化确定人工湿地断面的主要参数, 使人工湿地内获得最佳的水流条件。同时, 本文还分析了人工湿地对河道水流的影响。

1 河道人工湿地

1.1 构建方法

当进入河道的污染物负荷量大于河道的自净能力时, 河道水质就会下降。通过对现状河道的整治改造, 在河道两侧的滩地上进行局部扩展, 就可以建立一种能提高河道自净能力的人工湿地。人工湿地不仅可以对河道水体污染进行治理, 还可以美化环境, 保持河道的自然生态, 为水生动物与两栖动物提供栖息地。河道表面流人工湿地的构建方法是: (a) 在河道两侧的滩地上, 每间隔一段距离(L)设一圆弧形扩展段, 扩展段弦长为 S 、弓高为 B 、高程在正常水位下 0.5 m。这样, 扩展段就可以洪没枯出, 从而可形成旱湿交替的人工湿地场。(b) 圆弧形扩展段于河道两侧呈犬牙交错状, 既可形成部分弯曲水流, 又可减缓流速。这样, 河道呈急变与缓变交错状, 会增加水流掺气, 使水体复氧。(c) 在圆弧形扩展段内搭配栽植不同的沉水植物、挺水植物和浮

叶植物等水生植物,通过对不同植物的优化配置,构建河道污染物吸附降解长廊,使河道内污染物质的吸附利用和降解达到最大化.河道人工湿地的布置如图1所示.图中: d 为河道底宽; m 为边坡系数; h 为河道深度; D 为河道口宽, $D = d + 2mh$; h_c 为河道正常水深; S 为人工湿地圆弧段弦长; B 为人工湿地圆弧段弓高; h_f 为人工湿地深度, $h_f = h - h_c + 0.5\text{ m}$; R 为人工湿地圆弧段半径, $R = B/2 + S^2/(8B)$; L 为河道两侧人工湿地净间距.

由于河道人工湿地系统是陆地与水体之间的过渡系统,对水流变化特别敏感,水流条件可以直接改变湿地的物理化学性质,如营养的有效性、基质缺氧程度和 pH 值等,不良的水流流态(旋涡和死水区等)会大大降低湿地的净化效果,对湿地生产力具有很大的影响.付贵萍等^[7-8]的研究表明,人工湿地水流流态是维持系统正常运行和充分发挥净化效果的重要因素.由于人工湿地水流流态复杂,目前人工湿地的构建设计主要借助实践经验,使各地人工湿地净化效率出现很大差异^[7].因此,在人工湿地的设计中,如何优化其中的水流条件,避免出现一些不良的水流流态就显得十分重要.

本文在河道人工湿地构建方法的基础上,建立了人工湿地一般的三维数值计算模型.为了消除水流旋涡、死水区等一些不良水流流态,使人工湿地内获得最佳水流条件,本文通过三维湍流数值计算和分析^[9-12],优化确定了人工湿地断面的主要参数.

1.2 三维数值计算模型

选取湿地参数 S 和 B 作为主要优化因子,每个因子选定 6 个不同水平进行比较.将河道口宽 D 作为特征长度,将 S, B 因子转化为一组无因次数因子 $S/D, B/D$,得到因子水平表(表 1),并利用均匀试验表 U_6^6 安排了 6 组三维数值计算模型^[13-14](表 2).

1.2.1 控制方程

数学模型控制方程采用液体三维湍流流动的基本微分方程:连续方程、动量方程、湍动能 k 和耗散率 ϵ 输运方程.

连续方程

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0$$

(1)

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

(2)

湍动能 k 与耗散率 ϵ 输运方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j k - \left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \rho (P_k - \epsilon)$$

(3)

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \epsilon - \left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] = \rho \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon)$$

(4)

式中: ρ ——流体密度; x_i, x_j ——坐标轴($i, j = 1, 2, 3; i \neq j$); u_i, u_j ——时均速度; p ——压力; μ_{eff} ——有效黏性系数,为分子黏性系数 μ 与 Boussinesq 涡团黏性系数 μ_i 之和,即 $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_i$; $C_\mu, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}$ ——经验常数, $C_\mu = 0.09, C_{\epsilon 1} = 1.44, C_{\epsilon 2} = 1.92$; $\sigma_k, \sigma_\epsilon$ ——湍流普朗特数, $\sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$; μ_i ——涡团黏性系数, $\mu_i = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$; P_k ——湍水能生成项, $P_k = \frac{\mu_i}{\rho} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$.

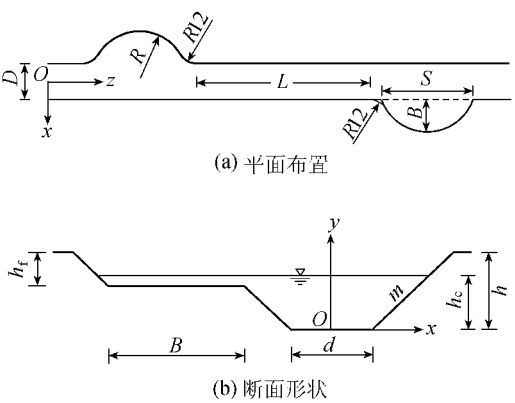


图 1 河道人工湿地布置

Fig.1 Constructed wetlands along river course

由于人工湿地水流流态复杂,目前人工湿地的构建设计主要借助实践经验,使各地人工湿地净化效率出现很大差异^[7].因此,在人工湿地的设计中,如何优化其中的水流条件,避免出现一些不良的水流流态就显得十分重要.

本文在河道人工湿地构建方法的基础上,建立了人工湿地一般的三维数值计算模型.为了消除水流旋涡、死水区等一些不良水流流态,使人工湿地内获得最佳水流条件,本文通过三维湍流数值计算和分析^[9-12],优化确定了人工湿地断面的主要参数.

表 1 因子水平表

Table 1 Levels of factors

水平											
1	2	3	4	5	6						
S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D
0.5	0.25	0.75	0.4	1	0.55	1.25	0.7	1.5	0.85	2	1

表 2 三维数值计算模型因子组合

Table 2 Factor combination of 3D numerical simulation model

第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组						
S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D	S/D	B/D
0.5	0.55	0.75	1.0	1.0	0.4	1.25	0.85	1.5	0.25	2.0	0.7

1.2.2 边界条件

a. 进口边界. 模型进口断面处的流动已是充分发展的湍流, 流速分布为

u = \frac{1}{\lambda} u_* \left[\ln\left(\frac{z}{\Delta}\right) + 4.3 \right] \tag{5}

式中: z——进口界面单元中心至河道底的距离; Δ——河道底绝对粗糙率; λ——卡门通用常数, λ ≈ 0.4;

u_*——河底摩擦流速, u_* = \frac{kq}{h \left(\ln \frac{h}{\Delta} + 2.4 \right)} (q 为进口单宽流量; h 为河道内水深).

b. 出口边界. 采用第二边界条件.

c. 自由水面. 河道一般断面流速较小, 水面基本平稳, 采用对称边界条件.

d. 固壁条件. 壁面水体无滑移, 近壁区采用壁面函数. 设近壁面距离为 γ_R, 则近壁流速 u_R 和近壁湍流动能 k 由下列函数确定:

u_R = \frac{1}{\lambda} \ln \left(E \frac{u_{**} \gamma_R}{\mu} \right) \quad k = \frac{u_{**}^2}{C_\mu^{0.5}} \quad u_{**} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{6}

式中: E——粗糙系数; u_{**}——壁面摩阻流速; τ_w——壁面剪切应力.

1.2.3 求解方法

采用雷诺平均纳维-斯托克斯方程(RANS)和标准 k-ε 湍流模型, 运用 SIMPLEC 算法. 三维网格实体造型采用 Fluent 的前处理软件 Gambit, 具体数值计算采用 Fluent 三维流体计算软件.

2 算 例

2.1 基本资料

选择宝应县境内待整治建设的一条青年排河为研究对象, 规划整治的河道段长 400 m, 底宽 10 m, 深 6.5 m, 边坡系数 1.0, 正常水深 3.5 m, 河道断面平均流速 0.5 m/s, 两侧人工湿地净间距 150 m. 具体工程平面布置和断面形状如图 1 所示. 根据表 1、2 构建了 6 组三维数值计算模型. 数值计算采用三维实体造型, 网格剖分为结构化四面体, 在河道长度与宽度方向取网格单元, 水深方向分 15 层, 河底和坡面附边界层网格. 三维网格实体造型如图 2 所示.

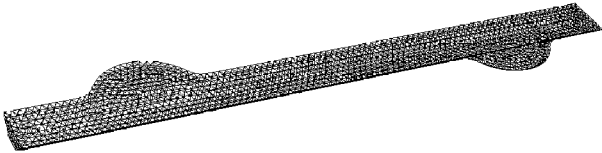


图 2 三维网格实体造型

Fig.2 Three-dimensional grids for numerical simulation

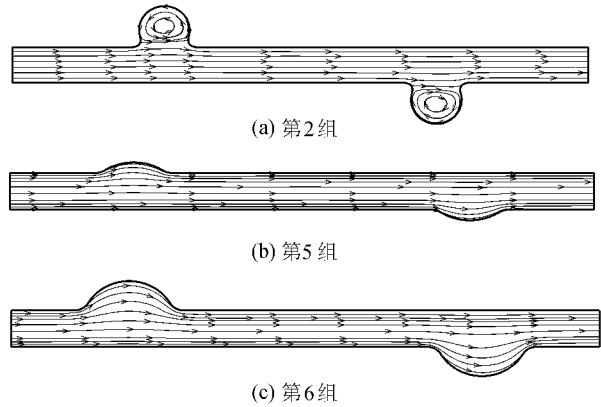


图 3 计算模型的流线

Fig.3 Streamline of computational model

水流交换的效果变差, 不利于人工湿地的正常运行. 相反, 第 5 组和第 6 组计算模型中人工湿地内部水流则较平顺, 不存在局部的漩涡和死水区, 与外界的水流交换效果较好, 计算模型的流线分别如图 3(b)(c) 所示.

2.2 计算结果与分析

2.2.1 各组人工湿地计算模型水力性能的比较

本文从人工湿地内部流场、断面过水量及水力停留时间 3 方面综合比较不同人工湿地计算模型的水力性能.

2.2.1.1 人工湿地的内部流场

对 6 组计算模型分别进行了三维湍流数值计算, 得出了各组计算模型的流线(水面下 10 cm). 计算结果表明, 前 4 组计算模型中人工湿地内部水流均存在不同程度的漩涡, 形成了局部的死水区, 其中第 2 组计算模型人工湿地内部存在的水流漩涡区最大(图 3(a)), 其余 3 组漩涡区大小不等, 漩涡区的存在使之与外界

2.2.1.2 人工湿地的断面过水量

取湿地中截面计算了各组计算模型中人工湿地断面过水量,计算结果如表 3 所示.由表 3 可以看出:由于前 4 组计算模型中存在着不同程度的水流旋涡,其断面平均流速和断面过水量均相对较小,第 5 组和第 6 组计算模型中人工湿地内部水流较平顺,不存在局部的旋涡和死水区,断面平均流速和断面过水量均相对较大,其中第 6 组计算模型的断面过水量最大.

2.2.1.3 水力停留时间

人工湿地的水力停留时间可按下式计算:

$$T = \frac{V}{Q} \tag{7}$$

式中: T ——水力停留时间; V ——人工湿地体积; Q ——人工湿地断面流量.

各组计算模型人工湿地水力停留时间的计算结果见表 4.由表 4 可以看出:前 4 组计算模型人工湿地内部存在着不同程度的水流旋涡,断面流量较小,其水力停留时间相对较大,第 5 组和第 6 组计算模型人工湿地水流较平顺,不存在水流旋涡,断面流量较大,其水力停留时间相对偏小.

综合分析上述 6 组人工湿地计算模型的内部流场、断面过水量及水力停留时间的结果可以得出,第 6 组计算模型的水力性能相对于其他计算模型较优,该模型为本算例的最优模型,即 $S = 2D$, $B = 0.7D$.

2.2.2 人工湿地对河道水流的影响

从河道流场、断面平均流速沿程分布及垂线平均流速横向分布 3 方面分析最优计算模型中人工湿地对河道水流的影响.

a. 对河道流场的影响.图 3(c)表明:水流在河道段较为平顺,而靠近河岸的水流进入人工湿地后发生了一些偏移,形成了部分弯曲水流,在人工湿地的进口及出口附近,水流流线相对较密,而在湿地内部和河道段,水流流线则相对较疏.整体河道形成了缓变与急变交错的流态.

b. 对河道断面平均流速沿程分布的影响.河道断面平均流速 V_f 沿程分布如图 4 所示.河道断面平均流速在人工湿地区域内出现最小值.分析表明:在人工湿地段,河道过流断面面积的突然增大使得断面平均流速明显衰减,而在河道正常段,河道断面平均流速基本保持不变.

c. 对河道垂线平均流速横向分布的影响.河道断面垂线平均流速 V 横向分布如图 5 所示.水流进入人工湿地后,河道断面垂线平均流速的横向分布很不均匀.人工湿地与河道主槽交界处流速梯度较大,主槽中流速分布则相对较均匀.湿地与河道主槽内的水流流速差异较大,在两者交界面附近产生了较大的剪切应力,引起了主槽中流速的降低和人工湿地中流速的增大.

表 3 各组计算模型人工湿地断面过水量
Table 3 Water flow for wetland cross-section in each group of computational model

组 次	断面平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	断面面 积/ m^2	断面过水 量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)
第 1 组	0.095	6.324	0.600
第 2 组	0.108	11.469	1.237
第 3 组	0.176	4.593	0.808
第 4 组	0.096	9.193	0.883
第 5 组	0.371	2.868	1.064
第 6 组	0.246	8.004	1.969

表 4 各组计算模型人工湿地水力停留时间
Table 4 Hydraulic retention time for constructed wetlands in each group of computational model

组 次	人工湿地 体积/ m^3	人湿地断面 流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	水力停留 时间/s
第 1 组	86.667	0.600	144.445
第 2 组	267.182	1.237	215.992
第 3 组	81.284	0.808	100.559
第 4 组	233.405	0.883	264.332
第 5 组	69.065	1.064	64.911
第 6 组	275.596	1.969	139.967

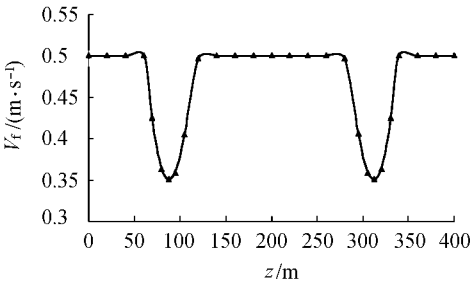


图 4 河道断面平均流速沿程分布
Fig.4 Cross-section average flow velocity distribution along river course

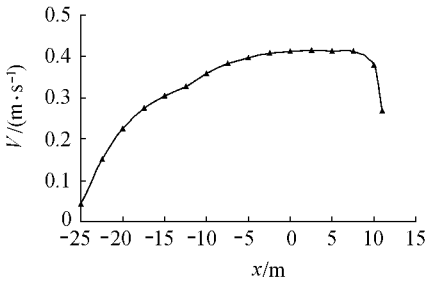


图 5 河道垂线平均流速横向分布($z = 87.5\text{ m}$)
Fig.5 Depth-averaged flow velocity in river cross-section for $z = 87.5\text{ m}$

3 结 语

本文首先提出了一种河道人工湿地的构建方法,然后通过三维湍流数值模拟计算优化确定了人工湿地断面的主要参数 S 和 B ,最后通过算例说明了该方法的合理性和可行性.

参考文献:

- [1] 姜翠玲,崔广柏.湿地对农业非点源污染的去除效应[J].农业环境保护,2002,21(5):471-473.
- [2] 董晓丹,周琪,周晓东.我国河流湖泊污染的防治技术及其发展趋势[J].地质与资源,2004,13(1):26-29.
- [3] MARTIN J P. Restoration of an urban river in Barcelona, Spain[J]. Environment Engineering and Policy, 2001, 2(3):113-119.
- [4] JING Shuh-ren, LIN Ying-feng. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan[J]. Environmental Pollution, 2004, 127(2):291-301.
- [5] 郝伏勤,高传德,黄锦辉,等.黄河下游河道湿地浅沱[J].人民黄河,2005,27(4):5-7.
- [6] 高鹏杰.构建温榆河人工湿地系统初步设想[J].北京水利,2002,20(4):43-44.
- [7] 付贵萍,吴振斌,任明迅,等.垂直流人工湿地系统中水流规律的研究[J].环境科学学报,2001,21(6):720-724.
- [8] 卢少勇,张彭义,余刚,等.农田排灌水人工湿地处理工程的设计[J].中国给水排水,2003,19(11):75-77.
- [9] 陈松山,屈磊飞,葛强,等.泵站枢纽三维湍流模拟计算[J].扬州大学学报:自然科学版,2005,8(2):70-73.
- [10] 刘超,成成立,汤方平.水泵站前池三维流动计算和试验[J].农业机械学报,2001,32(6):41-44.
- [11] 陆林广,周济人.泵站进水流道三维紊流数值模拟及水力优化设计[J].水利学报,1995,46(12):67-74.
- [12] 张贤明,吉庆丰.泵站前池流态的数值模拟[J].灌溉排水,2001,20(1):35-42.
- [13] 汪锡孝.试验研究方法[M].长沙:湖南科学技术出版社,1988.
- [14] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[K].北京:科学出版社,1994.

Wetland construction along river course and its effect on water flow

CHEN Ping^{1,2}, WEI Yu-guang¹, LUO-jing¹

(1. College of Hydraulic Science & Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The method for wetland construction was proposed, i. e. to construct circular expanding section at certain intervals along the beach of two sides of river course with the chord length S and the arc height B at the elevation of 0.5m below the normal water level. The staggered arrangement of the expanding section forms wetlands of wet-dry alternation. In the study, 3D numerical calculation and analysis method of turbulent flow was adopted for optimization of the main parameters S and B for the cross-section of wetlands so that the optimal river flow condition could be obtained, and the optimal values $S = 2.0D$ and $B = 0.7D$ (D : the width of river mouth) for the constructed wetlands were derived from case study. Then, the effects of wetland construction on river flow were analyzed from three aspects, i. e. the flow field of river the course, the cross-section average flow velocity distribution along river course, and the depth-averaged flow velocity distribution in river cross-section. The result shows that wetland construction leads to alternate flow patterns in the whole river course, that the mean flow velocity in cross-section of the wetland section decreases evidently, and that the difference of flow velocity between wetland section and main river channel is significant.

Key words: constructed wetland along river course; numerical calculation model; river flow; parameter for cross-section