

人工湿地污水处理系统优化设计模型

刘汉湖,张红振,白向玉

(中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州 221008)

摘要 针对污水处理厂进水水质和水量的不确定性,考虑进水水量、TSS、BOD₅、TN、TP 的区间变化,以出水时 TSS、BOD₅、TN、TP 的质量浓度标准为约束条件,单元面积为决策目标,以费用最小为目标函数,建立基于一级动力学污染物去除模型的人工湿地污水处理系统区间数优化设计模型。该模型包含初沉池、人工湿地床(表面流和潜流式)两个单元,考虑了设计中的不确定性因素。实例计算表明,模型适用性较好。

关键词 人工湿地 优化设计 区间数模型

中图分类号 X703 文献标识码 A 文章编号 1004-6933(2008)03-0035-04

A model for the optimal design of a wastewater treatment system for constructed wetlands

LIU Han-hu, ZHANG Hong-zhen, BAI Xiang-yu

(School of Environmental Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract Considering the uncertain water quality and quantity of inflow to a sewage treatment plant and the variation interval of inflow water quantity, TSS, BOD₅, TN and TP, an optimal wastewater treatment system for constructed wetlands was developed based on first-order kinetics. The constraint conditions of the model are effluent standards for TSS, BOD₅, TN and TP. The objective function of the model is minimum cost, and the decision-making goals are the area of the primary sedimentation tank and the constructed wetland bed (SFCW or SSFCW). Uncertainties in the system are considered. A case study shows that the model has high applicability.

Key words constructed wetland; optimal design; a model of interval value

人工湿地作为一种高效、低耗、生态的污水处理技术,在世界范围内得到了广泛应用,但其设计目前仍停留在经验阶段。虽然前人已经建立一些描述人工湿地污水处理系统的数学模型,但各种模型都具有明显的缺陷,且不同学者给出的参数差别较大,模型通用性较差^[1]。

本文在人工湿地一级动力学污染物去除模型基础上,考虑水质、水量变化引起的不确定性,将水量、TSS、BOD₅、TN、TP 等变量区间化,建立人工湿地的区间数优化设计模型,希望能对人工湿地污水处理技术的优化设计提供帮助。

1 模型建立

模型包括初沉池、人工湿地床两部分(图 1)。表征各控制点污水特征的状态变量有: $Q_0^\pm$ 为初沉池进水流量, m³/d; $Q_{in}^\pm$ 为初沉池出水、人工湿地进水流量, m³/d; $Q_{out}^\pm$ 为人工湿地出水流量, m³/d; Q_e 为

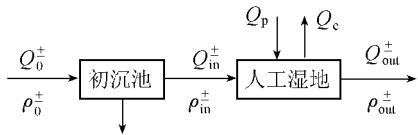


图 1 人工湿地区间数优化设计模型

蒸发量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; Q_p 为降雨量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; $\rho^\pm$ 为 TSS、BOD₅、TN、TP 的质量浓度, mg/L , 上标“ $\pm$ ”表示状态变量有一个变化区间。

1.1 初沉池

为保证进入湿地系统的污水各项指标符合湿地设计要求, 保证系统在设计条件下正常运行, 必须对污水进行预处理。预处理通常为物理性的, 其目的在于尽量去除性质或粒径不利于后续处理过程的物质, 减少湿地床的阻塞, 加速污染物的降解等^[2]。目前最常用的预处理设施是初沉池。本模型采用初沉池为预处理设施, 并借鉴林玉鹏等^[3]的 Voshel-Sak 初沉池区间数模型。假设污水中水量、TN、TP 不受初沉池的影响, 初沉池出水的悬浮固体中的微生物种类与进水相同, 认为初沉池的主要作用是去除污水中的 TSS 和 BOD₅。用 Voshel-Sak 模型推算初沉池出水 TSS 质量浓度:

$$\frac{\rho(\text{TSS})_{\text{in}}^\pm}{1\,000} = \frac{\rho(\text{TSS})_0^\pm}{1\,000} - v_1 \left(\frac{\rho(\text{TSS})_0^\pm}{1\,000} \right)^{v_2} (q_p^\pm)^{-v_3}$$
$$v_1 = 0.897 \quad v_2 = 1.27 \quad v_3 = 0.22$$
$$q_p^\pm = Q_{\text{in}}^\pm / A_p^\pm$$

式中: v_1 、 v_2 、 v_3 为模型参数; $q_p^\pm$ 为初沉池表面负荷(模型的决策变量, 取值 $1.5 \sim 3.0 \text{ m/d}$ ^[4]) ; $A_p^\pm$ 为初沉池的表面积, m^2 。

与式(1)类似, 初沉池出水 BOD₅ 质量浓度 $\rho(\text{BOD})_{\text{in}}^\pm$ 为

$$\frac{\rho(\text{BOD})_{\text{in}}^\pm}{1\,000} = \frac{\rho(\text{BOD})_0^\pm}{1\,000} - v'_1 \left(\frac{\rho(\text{BOD})_0^\pm}{1\,000} \right)^{v'_2} (q_p^\pm)^{-v'_3}$$
$$v'_1 = 0.621 \quad v'_2 = 1.25 \quad v'_3 = 0.20$$

1.2 人工湿地床

目前用于描述人工湿地污染物去除的数学模型主要有衰减方程、一级动力学模型、Monod 模型和生态动力学模型^[5]。本文主要以应用广泛的一级动力学模型为基础来描述人工湿地中 TSS、BOD₅、TP、TN 的降解过程。

1.2.1 表面流人工湿地

假定湿地中的水流为稳定的柱塞流, 对于表面流人工湿地, 建立污染物去除的一阶动力学区间数模型为

$$\ln \left(\frac{\rho_{\text{out}}^\pm - \rho^*}{\rho_{\text{in}}^\pm - \rho^*} \right) = - \frac{k_A}{q^\pm}$$
$$k_A = k_{20, A} \theta^{(T-20)}$$

式中: ρ^* 为背景质量浓度, mg/L ; k_A 为面积去除速率常数, m/d ; $q^\pm$ 为水力负荷, $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 取值 $2 \sim$

20 cm/d ; T 为温度, $^\circ\text{C}$; θ 为温度系数; $k_{20, A}$ 为 20°C 时的面积去除速率常数, m/d 。具体数值参考表 1。

表 1 表面流人工湿地一级动力学方程参数^[6]

参数	$K_{20, A}/(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$	$\rho^*/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	θ
BOD ₅	0.093	$3.5 + 0.05\rho_{\text{in}}$	1.00
TSS	8.220	$5 + 0.16\rho_{\text{in}}$	1.00
TN	0.061	1.5	1.05
TP	0.033	0.02	1.00

湿地表面积

$$A_s^\pm = \frac{Q_{\text{in}}^\pm - Q_e A_s^\pm + Q_p A_s^\pm}{q^\pm} \tag{5}$$

式中: $A_s^\pm$ 为湿地表面积, m^2 ; $Q_{\text{in}}^\pm$ 为进水流量, m^3/d ; Q_e 为蒸发量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; Q_p 为降雨量, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

1.2.2 潜流式人工湿地

用一级动力学模型模拟潜流式人工湿地对 BOD₅、TP、TN 的去除。

$$\ln \left(\frac{\rho_{\text{out}}^\pm - \rho^*}{\rho_{\text{in}}^\pm - \rho^*} \right) = - k_v t^\pm \tag{6}$$

$$t^\pm = \frac{V^\pm}{Q_{\text{in}}^\pm} = \frac{A_s^\pm d \epsilon}{Q_{\text{in}}^\pm} \tag{7}$$

$$\epsilon = 0.039 D_p^{-0.51} \tag{8}$$

$$k_v = k_{20, v} \theta^{(T-20)} \tag{9}$$

式中: k_v 为体积去除速率常数, $1/\text{d}$; $t^\pm$ 为水力停留时间, d , 取值 $0.5 \sim 10 \text{ d}$; $V^\pm$ 为湿地有效体积, m^3 ; d 为湿地床体深度, m , 对于芦苇床 d 取值 $0.6 \sim 0.7 \text{ m}$; ϵ 为湿地床体孔隙度; D_p 为湿地床介质粒径, 取 $5 \sim 50 \text{ mm}$; $k_{20, v}$ 为 20°C 时体积去除速率常数, $1/\text{d}$; θ 为温度系数。

潜流式人工湿地一些参数的取值见表 2 和表 3。对于 BOD₅, 一般要求负荷在 $80 \sim 110 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 以下^[11]。TSS 的去除一般采用衰减方程

$$\rho_{\text{out}}^\pm = (0.063 \times \rho_{\text{in}}^\pm) + 7.8 \tag{10}$$

式(10)适用范围: $0.1 \text{ mg/L} < \rho_{\text{in}}^\pm < 253 \text{ mg/L}$; $0.1 \text{ mg/L} < \rho_{\text{out}}^\pm < 160 \text{ mg/L}$; $1.9 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{d}) < q^\pm < 44.2 \text{ m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。

表 2 潜流式人工湿地系统的介质特征^[7]

介质类型	占 10% 的最大介质 粒径/mm	孔隙度 ϵ	$k_{20, v}(\text{BOD})/\text{d}^{-1}$
细砂	1	0.42	1.84
粗砂	2	0.39	1.35
砂砾	8	0.35	0.86

表 3 潜流式人工湿地一级动力学方程参数

参数	$k_{20, v}/\text{d}^{-1}$	$\rho^*/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	θ
BOD ₅	[1.84, 1.35, 0.86]	0	1.06 ^[9]
TN	0.16 ^[8]	0	1.05 ^[10]
TP	0.14 ^[8]	0	1.00

1.3 费用函数

将人工湿地的设计问题组合成一个优化模型，目标是在出水达标的基础上总费用最小。总费用包括投资费用、操作费用和维修费用减去湿地收获植物收益,这些费用或收益同各处理单元(初沉池和人工湿地床)容量(体积或面积)相关。费用函数如下^[12]

C = \alpha X^\beta \tag{11}

式中 :C 为初沉池或人工湿地床的总投资,或总的操作和维修费用,或人工湿地收获植物的收益 ;X 为给定单元对费用或收益影响最大的设计参数 ;\alpha、\beta 是估计参数。

各操作单元对费用函数影响最大的设计参数见表 4。

操作单元	影响最大的参数		
	投资费用	操作和维修费用	湿地收获植物收益
初沉池	A _p	A _p	
表面流人工湿地	A _s	A _s	A _s
潜流式人工湿地	A _s	A _s	A _s

人工湿地系统总费用

C_T = \sum_{k=1}^N C_{C_k} + \tau \sum_{k=1}^N C_{O_k} = \frac{1}{n} [(\alpha_1 A_p^{\beta_1} + \alpha_2 A_s^{\beta_2}) + \tau (\alpha'_1 A_p^{\beta'_1} + \alpha'_2 A_s^{\beta'_2} - \alpha''_2 A_s^{\beta''_2})] \tag{12}

\tau = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+i)^j} = \frac{1 - (1+i)^{-n}}{i} \tag{13}

式中 :C_{C_k}为投资费用 ;C_{O_k}为每年的操作费用和维护费用或每年的植物收益 ;N 为处理单元个数 ;i 为折旧率(一般取 5% ~ 10%) ;n 为污水处理系统的预期使用年限(假设 n = 25) ;下标 1 为初沉池,2 为人工湿地。

在调查部分人工湿地污水处理厂投资、运行和维护费用的基础上,费用估计参数值 \alpha 和 \beta 见表 5。

操作单元	\alpha	\beta	\alpha'	\beta'	\alpha''	\beta''
初沉池	18.20	0.32	4.20	0.30	—	—
表面流人工湿地	1.21	0.38	1.02	0.15	1.09	0.40
潜流式人工湿地	1.83	0.66	1.81	0.19	1.10	0.69

整个人工湿地系统模型可归结为区间型非线性规划模型：

\min C_T^\pm = \begin{cases} F(x^\pm, y^\pm, z) \\ x^\pm, y^\pm \end{cases}

约束条件：

f^\pm(x^\pm, y^\pm, z) = 0 \\ \rho(BOD_5)_{out}^\pm(x^\pm, y^\pm, z) \leq \rho(BOD)_{std}

\rho(TSS)_{out}^\pm(x^\pm, y^\pm, z) \leq \rho(TSS)_{std} \\ \rho(TN)_{out}^\pm(x^\pm, y^\pm, z) \leq \rho(TN)_{std} \\ \rho(TP)_{out}^\pm(x^\pm, y^\pm, z) \leq \rho(TP)_{std}

式中 :x^\pm 为状态变量,包括 Q_0^\pm、\rho(BOD_5)_0^\pm、\rho(TSS)_0^\pm、\rho(TN)_0^\pm、\rho(TP)_0^\pm ;y^\pm 为决策变量(设计变量),如初沉池表面负荷、人工湿地面积负荷、水力停留时间等 ;z 为模型中的一些参数 ;\rho(TSS)_{std}、\rho(TP)_{std} 等为水质标准。由于设计参数 X 是个区间变量,因此,C_T 也是一个区间变量。

2 模型求解

模型求解分为两步。首先,构建并求解区间数优化模型。其次,在原模型的基础上,分别构建目标函数的最优区间上限和下限子模型,对其求解可得到最优解和最优区间上限和下限^[13]。由此根据决策变量的约束区间(表 6)可得到相应的最优决策变量数值区间。

表 6 模型决策变量的约束区间			
区间	初沉池表面负荷 q _p /(m ³ ·h ⁻¹)	表面流人工湿地水力负荷 q/(cm ³ ·d ⁻¹)	潜流式人工湿地水力停留时间 t/d
下限	0.5	2.0	0.5
上限	6.0	20.0	10.0

在人工湿地系统模型的进水状态变量中,取其上限(水量和水质各指标的最大值),结合原模型,构造目标函数上限的子模型。

\min C_T^+ = \begin{cases} F(x^+, y^+, z) \\ x^+, y^+ \end{cases}

约束条件：

f^+(x^+, y^+, z) = 0 \\ \rho(BOD_5)_{out}^+(x^+, y^+, z) \leq \rho(BOD)_{std} \\ \rho(TSS)_{out}^+(x^+, y^+, z) \leq \rho(TSS)_{std} \\ \rho(TN)_{out}^+(x^+, y^+, z) \leq \rho(TN)_{std} \\ \rho(TP)_{out}^+(x^+, y^+, z) \leq \rho(TP)_{std}

式中 :x^+ 为状态变量的上限 ;y^+ 为决策变量的上限。以进水的水质和水量的最大值为起点,在决策变量可能取值区间内,将所有的决策变量以一定的步长取值迭代,求满足排放标准的所有可能解,然后以费用函数为标准,找出使费用函数取最小值的解。在本模型中,将此解作为 x^+ 所对应的目标函数最优解的上限。

同理,可构造对应于目标函数最优解下限的子模型,确定决策变量的下限。

求解两个子模型,就确定了整个模型的最优区间解。需要说明的是,对于区间非线性规划模型的求解

没有确定的解法,所得的解也不是严格意义上的最优解区间,最多只能称其为在一定条件下的较优区间解^[14]。在本模型中,采用直接迭代搜索法求解。

3 应用实例

以某人工湿地污水处理厂优化设计为例。表 7 给出了该污水处理厂 2000 年的进水水质和水量统计情况。

表 7 某污水处理厂进水水质、水量及波动区间

月份	$Q/(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$\rho(\text{BOD}_5)/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TSS})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TN})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{TP})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
2	10 027	242	302	33.7	1.30
4	12 500	150	243	25.8	1.15
6	13 021	93	210	28.2	1.20
8	15 375	65	106	19.3	1.05
10	14 023	119	191	30.1	1.20
12	11 450	232	281	22.3	1.10
波动区间[10 027,15 375] [65,242] [106,302] [19.3,33.7] [1.05,1.30]					

从表 7 可以看出,该城镇污水的水量和水质全年在一定范围内波动。夏天水量大,水质相对较好,冬天水量小,水质相对较差。出水水质标准见表 8。

表 8 污水处理厂出水水质标准

指标	$\rho(\text{BOD}_5)$	$\rho(\text{TSS})$	$\rho(\text{TN})$	$\rho(\text{TP})$
标准值	30	20	20	1.0

采用基于区间数的人工湿地污水处理系统优化设计模型计算,优化结果见表 9、表 10。

表 9 各操作单元容量

设计参数	表面流人工湿地系统		潜流式人工湿地系统	
	A_p	A_s	A_p	A_s
数值区间	[139,842]	[50 135,253 378]	[256,1 274]	[21 832,168 369]

表 10 模型决策变量计算结果

决策变量	表面流人工湿地系统			潜流式人工湿地系统		
	$q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$q/(\text{cm}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$C_T/(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$	$q_p/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	$q/(\text{cm}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	$C_T/(\text{万元} \cdot \text{a}^{-1})$
约束区间	[0.5,3.0]	[2,20]		[0.5,3.0]	[0.5,10]	
数值区间	[0.76,3.0]	[6,20]	[45,83]	[0.5,1.63]	[0.51,2.56]	[70,233]

对于人工湿地污水处理厂而言,如果参数已经确定,其基本设计也就定了。当然还有许多具体细节尚未确定,比如格栅选择、初沉池池型、人工湿地植物的选择和长宽比等。从表 7 给定的参数区间中每取一组值,都可以求得对应某一进水水质、水量的最优设计值(表 9、表 10),设计决策者可根据实际情况在以上区间内做出选择。如果经费有限,可选择区间值下限,如果经费充足,可选择区间值上限。

4 结 论

本文在应用一级动力学污染物去除模型的基础

上,引入区间数理论,建立了以初沉池和人工湿地床为主体的污水处理系统优化设计模型。结果表明:①优化模型考虑了进水水质水量的区间范围,提高了污水处理厂优化设计结果的适用性,可对人工湿地污水处理厂的设计或方案评估提供决策参考。②优化模型求解采用步长搜索法,得到的区间解是在一定条件下的较优区间解。③应用实例表明,模型对一般的城市污水、中小城镇的生活污水、普通的二级污水处理适用性较好,若用于工业废水或其他特种废水处理的人工湿地系统建模时,则必须调整模型参数。

参考文献:

[1] DIEDERIK P L,PETER A V,NIELS D P. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands : A review[J]. Water Research,2004,38(2) :1484-1493.

[2] 国家环境保护局科技标准司. 城市污水土地处理技术指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社,1997 91-114.

[3] 林玉鹏,曾光明. 考虑不确定性因素影响的城市污水处理厂优化设计模型研究(I)[J]. 湖南大学学报 :自然科学版,2000,27(4) 94-100.

[4] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社,2000 77-93.

[5] 张军,周琪,何蓉. 人工湿地污染物去除的数学模型[J]. 韶关学院学报 :自然科学版,2003,24(12) 63-67.

[6] ROBERT H K. Overview : Surface flow constructed wetlands [J]. Wat Sci,1995,32(3) 1-12.

[7] 高拯民,李宪法. 城市污水土地利用设计手册[M]. 北京: 中国标准出版社,1991 225-250.

[8] TANNER C C, CLAYTON J S, UPSDELL M P. Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewater in constructed wetlands—II. Removal of nitrogen and phosphorus[J]. Water Research,1995,29(1) 27-34.

[9] REED S C, BROWN D. Subsurface flow wetlands—A performance evaluation[J]. Water Environ Res,1995,67(2) : 244-248.

[10] KADLEC R H, KNIGHT R L. Treatment wetlands[M]. Boca Raton, FL :CRC Press,1996 893.

[11] 崔玉波,宋铁红,王翠兰. 潜流式人工湿地设计与经济分析[J]. 吉林建筑工程学院院报,2002,19(3) 9-11.

[12] UBER J G,PFETTER J T,BRILL E D,et al. Optimal design for wastewater treatment I :general approach [J]. Journal of the Environmental Engineering Division,1991,117(4) :425-437.

[13] 林玉鹏,曾光明. 考虑不确定性因素影响的城市污水处理厂优化设计模型研究(II)[J]. 湖南大学学报 :自然科学版,2000(S1) 77-82.

[14] 蒋茹. 不确定性理论与方法在城市污水处理厂优化设计中的应用研究[D]. 长沙: 湖南大学,2004.

(收稿日期:2007-01-29 编辑:舒建)