

响应面法在复合垂直流人工湿地对村镇污水脱氮优化设计中的应用*

李 丽 王全金 胡常福 刘占孟 聂发辉

(华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要 构建复合垂直流人工湿地系统处理村镇污水,获得了不同流程、水力负荷、C/N 条件下湿地系统对污水 TN 的净化效果数据,并进行分析。利用响应面分析法与遗传优化算法对主要工艺参数进行优化设计,找到正交试验以外的最优点和最差点。结果表明,复合垂直流人工湿地 TN 去除率随流程的增加呈上升趋势,TN 主要在下行池中去除;随水力负荷增加,TN 去除率呈现下降趋势;在所研究的范围内,C/N 为 15.00 时 TN 去除效果最佳。基于正交试验设计的响应面回归方程,可作为垂直流人工湿地的 TN 去除率计算函数,相对误差基本控制在 10% 以内;使用遗传算法对响应面回归方程进行全局优化分析,对不同植物床湿地的最优点和最差点进行对比分析,这些点与湿地种植的植物相关关系不大,不同植物床湿地呈现相似的参数条件。

关键词 响应面法 复合垂直流人工湿地 脱氮 参数优化

Denitrification orthogonal analysis of integrated vertical-flow constructed wetland based on response surface methodology

LI Li, WANG Quanjin, HU Changfu, LIU Zhanmeng, NIE Fahui. (School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013)

Abstract: The integrated vertical-flow constructed wetland (IVCW) was established to treat village wastewater. The TN removal efficiency of IVCW operated under different aqueous flow distance, hydraulic loading and C/N was obtained and analyzed. Response surface methodology (RSM) was utilized to explore the main parameters influencing TN removal efficiency of IVCW. The results indicated that TN removal efficiency was increased with increasing the flow distance, and most of TN was removed in down-flow system; the removal rate of TN decreased with the increasing of hydraulic loading. The optimal C/N for TN removal was 15.00. The orthogonal analysis based response surface model could be used for calculating TN removal rate of IVCW, the relative error was less than 10%. Optimization analysis of RSM base on genetic algorithm can get the optimal and worst point for TN removal. The optimal and worst point of TN removal was uncorrelated with plant of wetland, the wetland with different plant bed showed similar parameters condition.

Keywords: response surface methodology; integrated vertical-flow constructed wetland; denitrification; parameters optimization

当前,农村水污染问题逐渐显现并呈恶化趋势^[1-2],治理村镇污染问题迫在眉睫。村镇污水中含大量有机物、氮、磷、有毒有害物质,造成受纳水体污染涉及范围广,发生机制复杂,治理难度大^[3]。人工湿地作为污水处理的一种设施,可有效去除废水中的各种污染物质。大量研究成果表明,人工湿地在处理农村污水方面具有独特的优势和潜力^[4-5],为处理农村污水中的有机物、氮、磷和农药等提供了一种新的选择。

合理选择设计参数是保证人工湿地除氮效果的重要因素。孔庆玲^[6]监测了不同水力负荷下人工湿地对污染物的去除效果,拟合了水力负荷与污染物

去除率、出水水质、水力停留时间的线性关系,得到最优的水力负荷。黄逸群等^[7]在相同进水水质和水力负荷条件下,调节了人工湿地中不同填料的混合体积比,测试其对污染物去除效果的影响,得出最优基质材料体积比。陶敏等^[8]针对复合垂直流人工湿地曝气位置、曝气速率、曝气机运行/停止时间、开始曝气时刻进行正交试验,得出各参数对人工湿地处理效果的影响。然而,上述研究基本以单因素试验为主,而人工湿地对氮的去除效果受 DO、流程、水力负荷、C/N、pH 等诸多因素影响,只对单因素影响分析是不够的,需进一步探索多因素情况下最优工艺参数的选择方法并进行条件优化。

第一作者:李 丽,女,1979 年生,硕士,讲师,研究方向为水污染治理与控制。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 51169006);江西省教育厅科技项目(No. GJJ12313);江西省道路与铁道工程重点实验室资助项目。

本研究基于响应面方法^[9-11]的基本原理,对复合垂直流人工湿地进行流程、水力负荷、C/N、pH的4因素3水平正交试验,研究美人蕉和风车草湿地床对TN的去除效果,使用最小二乘法构造多项式响应面,基于遗传算法得到全局最优解下流程、水力负荷、C/N、pH的工艺参数。通过对试验结果的分析,确定各因素及其交互作用对试验指标影响的主次关系,找出对试验指标的最优工艺条件或最佳搭配方案。建立复合垂直流人工湿地脱氮效果与各影响因素的函数关系,减少试验次数。在此基础上,使用优化算法求解最佳处理效果下各影响因素的参数组合。

1 垂直流人工湿地系统及水质测试

1.1 复合垂直流人工湿地的构建与构造

试验构建的复合垂直流人工湿地系统平面图见图1。两组湿地系统并联而成,湿地底部按0.5%坡度设计并联通。每组湿地系统均由下行池(0.90 m×0.90 m×0.60 m)和上行池(0.90 m×0.90 m×0.55 m)串联构成,池内分别装6~10 mm本地砾石作为基质,表层为50 mm当地混合土(Ca质量分数为2.0%~2.5%),以强化氮的去除效果。下行池表层上方,采用直径20 mm布水管布水,侧孔出水,

上行池底层铺设穿孔集水管收集污水,表层种植景观植物美人蕉和风车草,种植密度6~8株/m²。沿水流走向(见图2),在两组湿地系统的不同流程处分别设6个取样点,取样点1、2、3位于下行池,水流流程分别为350、550、650 mm,取样点4、5、6位于上行池,水流流程分别为850、1 050、1 100 mm。

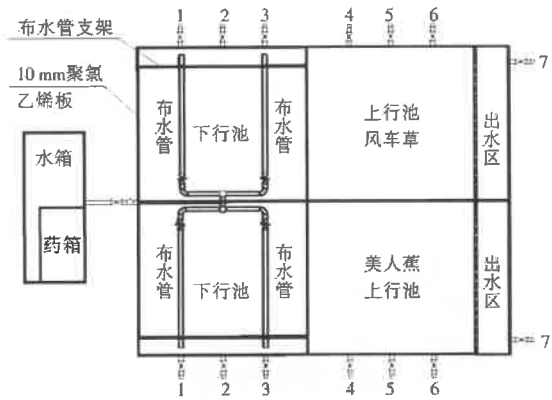


图1 复合垂直流人工湿地平面布置图
Fig.1 Plane diagram of integrated vertical flow constructed wetlands

1.2 试验水样及测试方法

试验用水由南昌市昌北区双港村某生活区生活污水添加适量的药品配置而成,截留下来的污水经潜污泵提升至高位水箱再与药箱中的配水按一定比例混合后,先后进入湿地床的下行池、上行池,

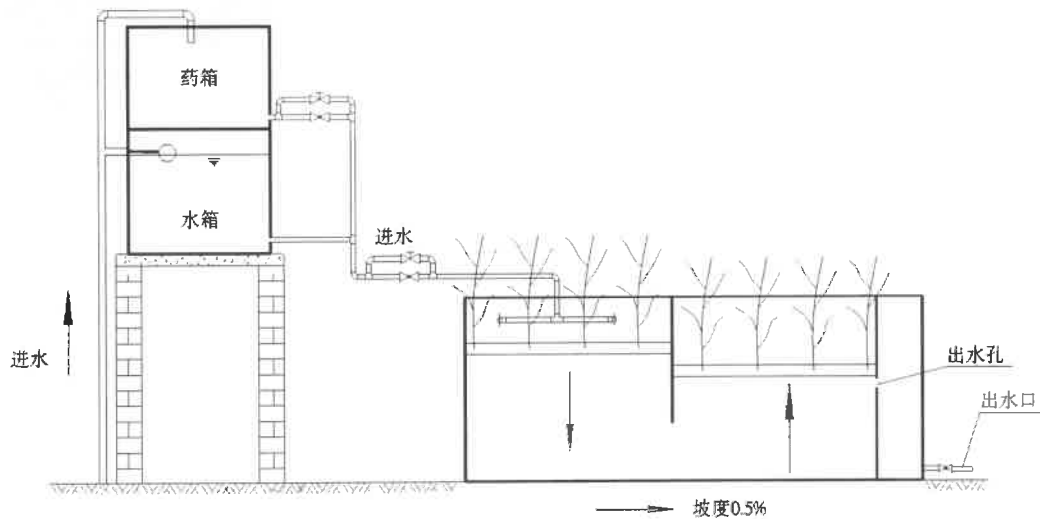


图2 复合垂直流人工湿地水流走向
Fig.2 Flow direction of integrated vertical flow constructed wetlands

表1 不同流程下TN的出水水质和去除率
Table 1 TN concentration of effluent at different flow distance and TN removal rate

流程/mm		0	350	550	650	850	1 050	1 100
美人蕉湿地床	TN/(mg·L ⁻¹)	21.89	11.58	9.64	8.54	6.79	6.22	6.06
	TN去除率/%	0	47.09	55.96	60.99	68.98	71.59	72.32
风车草湿地床	TN/(mg·L ⁻¹)	21.89	11.55	9.38	8.65	6.81	6.21	6.20
	TN去除率/%	0	47.24	57.15	60.48	68.89	71.63	71.68

表 2 不同水力负荷下 TN 的进出水浓度及 TN 去除率
Table 2 TN concentration of inlet and outlet of construct wetland and TN removal rate under different hydraulic loading

水力负荷 $/(m^3 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1})$	进水 TN $/(mg \cdot L^{-1})$	美人蕉湿地床		风车草湿地床	
		出水 TN/ $(mg \cdot L^{-1})$	去除率/%	出水 TN/ $(mg \cdot L^{-1})$	去除率/%
120.83	22.10	6.20	71.95	6.91	68.73
181.25	21.43	6.91	67.76	7.35	65.70
241.50	19.91	7.80	60.82	8.97	54.95
362.50	20.35	8.24	59.51	9.22	54.69
483.00	19.85	10.63	46.45	12.07	39.19
725.00	22.37	12.01	46.31	12.73	43.09

最后进入出水渠出水。于不同取样点处取样,分析水样中的 COD、TN、pH 等指标,各分析指标的测定采用国标法^[12]。

2 单因素分析

2.1 流程对 TN 去除效果的影响

试验考察了水力负荷为 $362.50 m^3/(m^2 \cdot d)$ 、 $C/N=8.00$ 、 $pH=7$ 时,复合垂直流人工湿地不同流程下的 TN 去除效果,结果如表 1 所示。

由表 1 可见,复合垂直流人工湿地在不同流程对 TN 的净化效果有明显区别,随流程增加,去除率呈现上升趋势,而在整个流程区间并非简单的线性增长关系。当污水由下行池流入上行池时,大部分 TN 已去除,美人蕉和风车草湿地床在下行池对 TN 的去除率分别为 60.99%、60.48%,出水 TN 分别为 8.54、8.65 mg/L。TN 主要通过硝化反硝化、植物吸收以及基质的吸附作用逐渐去除^[13],两种湿地床对 TN 去除效果差异不大。复合垂直流人工湿地中,污水随流程增加交替流过下行池和上行池的表层好氧区和底层厌氧区,利于含氮污染物硝化、反硝化反应,为脱氮创造了良好条件^[14-17]。

2.2 水力负荷对 TN 去除效果的影响

调节进水 $C/N=8.00$ 、 $pH=7$,不同水力负荷下,复合垂直流人工湿地系统进出水 TN 质量浓度及 TN 去除率见表 2。由表 2 可见,复合垂直流人工湿地对 TN 的净化效果与水力负荷关系密切,TN 去除率随水力负荷的增大而减小。水力负荷为 $120.83 m^3/(m^2 \cdot d)$ 时,美人蕉湿地床对 TN 的去除率达到 70% 以上,水力负荷为 $362.50 m^3/(m^2 \cdot d)$ 时,美人蕉湿地床对 TN 去除率为 59.51%,风车草湿地床对 TN 的去除率为 54.69%。在除氮的过程中,反硝化作用由于反应速率慢,是制约脱氮效率的关键过程。湿地运行的水力负荷低时,填料和植物根系表面的微生物膜与污水中的氮充分接触,反硝化细菌有充足的时间能够将硝态氮和亚硝态氮转化

为氮气^[18]。

2.3 C/N 对 TN 去除效果的影响

当水流流程为 1 100 mm,水力负荷为 241.50 $m^3/(m^2 \cdot d)$ 时,调节进水 C/N 分别为 6.80、10.00、15.00、20.00,则复合垂直流人工湿地对 TN 的去除效果见表 3。

表 3 C/N 对 TN 去除效果的影响
Table 3 TN removal rate under different C/N

C/N	美人蕉湿地床/%	风车草湿地床/%
6.80	54.70	50.98
10.00	59.33	56.76
15.00	66.10	62.88
20.00	62.35	60.57

从表 3 以看出,进水 C/N 较低时,美人蕉湿地床和风车草湿地床中 TN 去除效果均随 C/N 的增加呈现提高的趋势,当 C/N 为 15.00 时出现转折点。这是因为在湿地系统中,氮主要依靠微生物的反硝化作用转化为气体逸出系统而去除,碳源的增加为微生物提供更多养分,微生物大量繁殖,消耗氧气,分解有机物,碳源是反硝化作用主要的电子供体。当 C/N 较低时,碳源不足是制约反硝化的关键因素。随着碳源的补充,TN 去除率呈提高的趋势,但继续增加碳源至 C/N 大于 15.00,TN 去除效率并没明显增加,说明此时碳源已不再是限制系统反硝化的主要因素^[19-20]。

3 响应面法优化分析

3.1 响应面模型

综合单因素试验分析结果,对复合垂直流人工湿地系统进行 $C/N(x_1)$ 、 $pH(x_2)$ 、流程(x_3)、水力负荷(x_4)的 4 因素 3 水平正交试验设计,每次试验均作 3 个平行样,取 3 次试验 TN 去除率的平均值为响应值(Y)。考虑温度的影响,试验在夏季进行,正交试验设计与结果见表 4。

采用 MATLAB 软件平台,编制最小二乘法程序对响应值与各因素进行回归,拟合后得到美人蕉湿地床与风车草湿地床 TN 去除率与各影响因素的

表4 正交试验设计方案与结果
Table 4 Orthogonal experimental design and experiment results

序号	C/N	pH	流程/mm	水力负荷 /(m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	TN去除率/%	
					美人蕉湿地床	风车草湿地床
1	6.90	6	550	362.50	28.54	28.33
2	6.90	7	850	241.50	55.66	55.41
3	6.90	8	1100	181.25	70.69	65.80
4	9.13	6	850	181.25	69.19	68.95
5	9.13	7	1100	362.50	58.13	57.91
6	9.13	8	550	241.50	37.25	37.05
7	18.25	6	1100	241.50	68.45	68.02
8	18.25	7	550	181.25	41.17	40.96
9	18.25	8	850	362.50	61.84	63.00

表5 响应面模型验证
Table 5 Modelling verification of response surface

编号	试验条件				美人蕉湿地床			风车草湿地床		
	C/N	pH	流程/mm	水力负荷 /(m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	试验 TN 去除率/%	理论 TN 去除率/%	相对误差/%	试验 TN 去除率/%	理论 TN 去除率/%	相对误差/%
1	8.00	5	550	400.00	76.09	80.46	5.74	72.34	71.19	-1.59
2	8.00	9	1100	200.00	81.50	83.67	2.66	76.23	77.94	2.24
3	8.00	7	850	600.00	72.67	79.24	9.04	69.45	71.91	3.54

函数关系,结果如式(5)、式(6)所示。

美人蕉湿地床:

$$Y=152.959+3.1348x_1-60.16x_2+0.2782x_3-0.2805x_4-0.11053x_1^2+4.34x_2^2-0.00014x_3^2+0.00041x_4^2 \quad (5)$$

风车草湿地床:

$$Y=99.2819+4.7651x_1-52.6183x_2+0.3043x_3-0.2086x_4-0.1633x_1^2+3.765x_2^2-0.00015x_3^2+0.00029x_4^2 \quad (6)$$

3.2 模型的验证

为验证响应面回归模型的有效性和不同试验水平下的精确性,进行了不同参数水平的验证试验,结果如表5所示。由表5可见,美人蕉湿地床TN去除率的模型预测值与试验值的最大相对误差为9.04%,风车草湿地床的最大相对误差为3.54%,说明该模型可作为美人蕉及风车草湿地床的TN去除率计算函数。

3.3 响应面模型优化

为寻找人工湿地TN最优去除率的参数点,基于式(5)、式(6)所示的响应面函数关系,在C/N为5.00~20.00、pH为5.00~9.00、流程为450~1200mm、水力负荷为150~500m³/(m²·d)的设计空间范围内,使用遗传算法求解在试验参数范围内各影响因素对于TN去除率的最优点和最差点,结果如表6所示。

表6 人工湿地系统优化分析
Table 6 Optimality analysis of constructed wetlands

参数	美人蕉湿地床		风车草湿地床	
	最优点	最差点	最优点	最差点
C/N	15.00	5.00	15.00	5.00
pH	9.00	6.78	9.00	6.78
流程/mm	1033	450	1033	450
水力负荷 /(m ³ ·m ⁻² ·d ⁻¹)	150.00	344.44	188.89	344.44
TN去除率/%	90.35	6.36	94.93	4.66

由表6看出,经过响应面与遗传算法优化分析,美人蕉湿地床在全局最优点的TN去除率为90.35%,比验证试验中的最高TN去除率(81.50%)提高了8.85个百分点,风车草湿地床在全局最优点的TN去除率为94.93%,比验证试验中最高TN去除率(76.23%)提高了18.70个百分点;美人蕉湿地床在全局最差点的TN去除率为6.36%,比正交试验中的最低TN去除率(28.54%)减少了22.18个百分点,风车草湿地床在全局最差点的TN去除率为4.66%,比正交试验中的最低TN去除率(28.33%)降低了23.67个百分点,表明遗传算法在复合垂直流湿地系统优化中有较好的适用性。由表6还可看出,全局最优点与最差点与湿地种植的植物相关性不大,最优点C/N为15.00、pH为9.00、流程为1033mm、水力负荷在170m³/(m²·d)左右,最差点C/N为5.00、pH为6.78、流程为450mm、水力负荷为344.44m³/(m²·d),表明复合垂直流

人工湿地工作效率与外在条件明显相关。

4 结 论

基于单因素分析和正交试验响应面优化分析,分别考察了水力负荷、流程、C/N、pH 对复合垂直流人工湿地脱氮效果的影响,得到以下结论:

(1) 复合垂直流人工湿地随流程增加,TN 去除率呈现上升趋势,而在整个流程区间并非简单的线性增长关系。当污水由下行池流入上行池时,大部分 TN 已去除;复合垂直流人工湿地对 TN 的净化效果与水力负荷关系密切,随水力负荷增大而减小。水力负荷为 $362.50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,美人蕉湿地床 TN 去除率为 59.51%,风车草湿地床 TN 去除率为 54.69%;美人蕉和风车草湿地床中 TN 去除效果随 C/N 增加出现升高的趋势,在 C/N 为 15.00 时出现转折点,继续增加碳源至 $\text{C/N} > 15.00$,TN 去除效率并没增加,此时碳源已不再是限制系统脱氮效果的主要因素。

(2) 基于正交试验设计的响应面回归方程,可作为垂直流人工湿地总氮去除率试验的替代函数,相对误差基本控制在 10% 以内。

(3) 使用遗传算法对响应面方程进行全局优化分析,可找到正交试验以外的最优点和最差点,全局最优点与最差点与植物相关性不大,最优点 C/N 为 15.00、pH 为 9.00、流程为 1 033 mm、水力负荷为 $170 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右,最差点 C/N 为 5.00、pH 为 6.78、流程为 450 mm、水力负荷为 $344.44 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,表明复合垂直流人工湿地工作效率与外在条件明显相关。

参考文献:

- [1] 李远,王晓霞.我国农业面源污染的环境管理:背景及演变[J].环境保护,2005(4):23-27.
- [2] 陈勇,冯永忠,杨改河.农业非点源污染研究进展[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(8):173-178.
- [3] ZHANG Ting, XU Dong, HE Feng, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990—2010[J]. Ecological Engineering, 2012, 47(10): 189-197.
- [4] 杨旭,万鲁河,王继富,等.潜流人工湿地基质因素对农业径流净化作用的研究[J].中国农学通报,2010,26(14):336-338.
- [5] HUETT D O, MORRIS S G, SMITH G, et al. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. Water Research, 2005, 39(14):3259-3272.
- [6] 孔庆玲.人工湿地水力条件优化设计[D].长沙:中南林业科技大学,2012.
- [7] 黄逸群,张民,徐玉新.人工湿地填料净化生活污水级配优化研究[J].环境科学与技术,2009,32(3):130-138.
- [8] 陶敏,付贵萍,贺锋,等.复合垂直流人工湿地氧调控条件优化研究[J].水处理技术,2010,36(10):57-60.
- [9] BOX G E P, WILSON K B. On the experimental attainment of optimum conditions (with discussions)[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 1951, 13(1):1-45.
- [10] 任伟新,陈华斌.基于响应面的桥梁有限元模型修正[J].土木工程学报,2008,41(12):73-78.
- [11] 曾晓岚,李作鑫,丁文川,等.响应面法优化吹脱处理垃圾渗滤液[J].土木工程学报,2011,37(3):61-64.
- [12] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
- [13] 黄德锋,李田.复合垂直流人工湿地污染物去除及微生物群落结构的 PCR—DGGE 分析[J].环境科学研究,2007,20(6):137-141.
- [14] 刘艳,陈海波,邹林.复合垂直流人工湿地填料高度对污染物去除率的影响[J].供水技术,2010,4(3):17-19.
- [15] 李芳,王全金.复合垂直流人工湿地对 TN 去除效果的正交试验[J].湖北农业科学,2011,50(14):2859-2863.
- [16] LAVROVA S, KOUMANOVA B. Influence of recirculation in a lab-scale vertical flow constructed wetland on the treatment efficiency of landfill leachate[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6):1756-1761.
- [17] CRISTINA S C, CALHEIROS A F, DUQUE A M, et al. Changes in the bacterial community structure in two-stage constructed wetlands with different plants for industrial wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13):3228-3235.
- [18] 余志敏,袁晓燕,刘胜利,等.水力条件对复合人工湿地处理城市受污染河水效果的影响[J].环境工程学报,2011,5(4):757-762.
- [19] 贾文林,吴娟,武爱国,等.碳氮比对人工湿地污水处理效果的影响[J].环境工程学报,2010,4(4):767-770.
- [20] 朱文玲,郑离妮,崔理华,等.不同碳氮比条件下 4 种可控因素对垂直流人工湿地总氮去除的影响[J].农业环境科学学报,2010,29(6):1187-1192.

编辑:丁 怀 (修改稿收到日期:2013-09-12)

(上接第 26 页)

- [12] 逯明辉,宋慧,李晓明,等.冷害过程中黄瓜叶片 SOD、CAT 和 POD 活性的变化[J].西北植物学报,2005,25(8):1570-1573.
- [13] 郑世英,商学芳,王景平.可见分光光度法测定盐胁迫下玉米幼苗抗氧化酶活性及丙二醛含量[J].生物技术通报,2010(7):106-109.
- [14] 马成仓. Hg 对油菜叶细胞膜的损伤及细胞的自身保护作用[J].应用生态学报,1998,9(3):323-326.
- [15] PRASAD T K. Mechanism of chilling induce doxidative stress injury and to lerances; changes in antioxidant system, oxidation o f proteins and lipids and protease activities[J]. Plant Journal, 1996(10):1017-1026.

编辑:贺锋萍 (修改稿收到日期:2013-06-25)

