

活性污泥-人工湿地组合处理系统中污染物的去除^{*}

万丽娟 王 皓 王 方 黄玉明^{**}

(西南大学化学化工学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆, 400715)

摘 要 通过 12 个月的现场监测试验, 研究了活性污泥法与四个串联潜流人工湿地构成的组合处理系统对农村生活污水的处理效果及其影响因素. 结果表明, 当平均处理量为 $82 \text{ T} \cdot \text{d}^{-1}$ ($36\text{--}132 \text{ T} \cdot \text{d}^{-1}$), 湿地系统水力负荷为 $0.52\text{--}1.88 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, 组合处理系统对 TSS、AN、TP、COD 和 BOD_5 的去除率分别为 75%, 71%, 38%, 81% 和 88%; 湿地系统对 COD、 BOD_5 、SS、AN 和 TP 的去除率分别为 39%, 55%, 48%, 5% 和 18%. 方差分析表明, 影响组合系统处理效果的主要因素是水力负荷及处理单元; 湿地系统中有机污染物 (COD、 BOD_5 、SS) 的去除主要是由第一块湿地完成的, 而 AN 及 TP 的去除却呈现“累积”的特点; 结合电子受体 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NO_2^- 在湿地系统中的浓度变化趋势, 推测湿地系统中有机污染物的生物去除主要是通过反硝化脱氮进行的, 而通过硫酸盐还原 (在硫酸盐还原菌的作用下) 却是次要过程.

关键词 活性污泥, 人工湿地, 废水处理.

目前, 人工湿地废水处理存在的主要问题是占地面积大, 水力负荷小, 在一定程度上限制了其推广应用. 对工艺设计而言, 利用人工湿地处理单元之间的组合处理^[1-4], 用人工湿地处理单元与其它水处理单元之间的组合^[5-8], 以及高水力负荷下 ($1.57\text{--}1.95 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$)^[1] 表面流人工湿地与潜流人工湿地组合处理, 其占地面积大的问题并未完全解决, 因此, 研究高效并且占地面积小的人工湿地水处理组合系统是解决其实用性的关键.

本文研究高水力负荷下活性污泥法与潜流人工湿地组合系统对农村生活污水的处理效果及其影响因素. 将传统的活性污泥处理系统与人工湿地串联, 利用活性污泥曝气出水中大量的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 提高潜流湿地对有机污染物的去除及抗冲击能力, 为农村生活污水及面源污水的治理提供理论及技术支持.

1 实验方法

试验系统建于重庆市永川来仪镇, 整个污水处理系统占地约 150 m^2 , 其中湿地部分 94.5 m^2 . 废水先进入格栅池拦截水中粗大的悬浮物和漂浮物, 流入调节池, 进行水质和水量调节, 然后进入活性污泥曝气池, 最后通过控制流量进入湿地系统进行进一步处理. 湿地系统由 A、B、C、D 四块串联的潜流湿地组成, 每块湿地长 7 m, 宽 2.5 m, 水深 1 m, 依次种植水草及水花生; 各湿地之间有一长 7 m, 宽 0.7 m 的水池, 主要用于将上一块湿地处理后的出水导入下一块湿地; 湿地填料底部为砾石 (30 cm), 中层为碳渣 (30 cm), 上层为泥土 (40 cm), 湿地填料孔隙率约 40%.

通过调整湿地的水力负荷进行试验, 同一水力负荷下运行至少 7 d. 整个潜流湿地系统的水力负荷设计为 $0.55 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $0.80 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $1.25 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 及 $1.60 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$, 实际测定的流量在 $36\text{--}132 \text{ T} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间; 试验废水为农村化粪池废水, 以生活污水为主, 水温 $7.5\text{--}30^\circ\text{C}$, pH 值在 7.04—8.13 之间, 呈中性至略偏碱性. 采用连续进水方式, 分别在调节池出口及四块湿地的进出口采集水样.

监测项目为 pH 值, TSS (总悬浮物), T ($^\circ\text{C}$), AN (氨氮), TP (溶解态总磷), COD 和 BOD_5 . pH 值, TSS, T , AN, TP, COD 和 BOD_5 的测定详见《水和废水监测分析方法》^[9], 其中 pH 值及 T 在现场测定; 离子色谱法测定硫酸盐、硝酸盐及亚硝酸盐. 利用 Systat 10 软件进行试验数据统计分析.

试验自 2004 年 12 月至 2005 年 12 月连续进行 12 个月, 每月采样 3—4 次, 共采集水样 43 批, 其中, 水力负荷 $0.55 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 进行 5 个批次试验, $0.80 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 进行 12 个批次试验, $1.25 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 进行 11

2007 年 1 月 29 日收稿.

* 国家自然科学基金项目 (2477033); 重庆市自然科学基金重点项目 (CSTC2004BA 7019).

** 通讯联系人. E-mail yuminghuang2000@yahoo.com 或 ymhuang@swu.edu.cn

个批次试验， $1.60\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 进行 15 个批次试验。

2 组合系统的处理效果

组合处理系统中各处理单元的水质参数和曝气池、各湿地单元及组合系统的处理效果列于表 1。从表 1 可以看出，进口水样的主要指标如 TSS、AN、TP、COD 及 BOD₅ 的浓度变化幅度均超过 100%，说明进口水质变化大；当水流量为 $36\text{—}132\text{T}\cdot\text{d}^{-1}$ 时（相应的水力负荷为 $0.52\text{—}1.88\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ），整个系统对 TSS、AN、TP、COD 和 BOD₅ 的去除率分别为 75%、71%、38%、81% 和 88%；湿地系统对 COD、BOD₅、TSS、AN、TP 的去除率分别为 39%、55%、48%、5%、18%。其中出水 AN、COD 和 BOD₅ 等指标已达到 GB8978-1996 一级排放标准，TSS 达到 GB8978-1996 二级排放标准，说明在高水力负荷下，组合系统能够有效地处理农村生活污水。另外，表 1 的数据表明，与曝气池相比，串联湿地对各污染物的去除率相对较低，但对于经曝气处理后的低浓度废水而言，仍具有明显的去除效果。

表 1 组合处理系统中各处理单元的水质参数平均值、标准偏差及百分去除率（括号内的数据）

Table 1 Overall averages and standard deviations of the water quality parameters in the each treatment unit of the combined system (Average percentage removals of the treatment unit are shown in parenthesis)									
参数	样品数	曝气池 进口水	曝气池 出口水	A	B	C	D	湿地系统 去除率 %	组合系统 去除率 %
pH	43	7.65±0.21	7.49±0.20	7.50±0.18	7.49±0.16	7.53±0.16	7.54±0.19	—	—
T/℃	43	18.1±6.5	19.1±6.5	18.9±6.6	18.8±6.7	18.8±6.6	18.8±6.6	—	—
TSS/mg·L ⁻¹	43	142±199	70±117 (5%)	41±50 (41%)	39±50 (5%)	40±5 (—)	36±43 (10%)	48.4	74.6
AN/mg N·L ⁻¹	42	27.3±35.0	8.3±9.8 (70%)	8.7±9.8 (—)	8.2±10.1 (6%)	7.9±9.6 (4%)	7.9±9.3 (0)	5.3	71.1
TP/mg P·L ⁻¹	43	2.99±4.16	2.26±2.23 (25%)	2.22±1.73 (2%)	2.13±1.93 (4%)	2.04±2.06 (4%)	1.84±1.80 (10%)	18.3	38.3
COD/mg·L ⁻¹	43	184±263	59±43 (68%)	44±21 (25%)	42±24 (5%)	40±22 (3%)	36±20 (10%)	39.1	80.6
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	43	65.4±77.3	17.9±20.4 (73%)	12.0±10.1 (33%)	11.2±10.0 (7%)	10.1±9.7 (10%)	8.1±7.3 (20%)	54.6	87.6

从表 1 还可以看出，湿地系统中有机污染物 (COD、BOD₅、SS) 的去除主要是由第一块湿地完成的，方差分析表明，第一块湿地进出口的 COD 及 BOD₅ 浓度之间存在显著性差异 ($p < 0.05$)，其余湿地进出口的 COD 及 BOD₅ 浓度之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)；所有湿地进出口的 AN 及 TP 浓度之间不存在显著性差异 ($p > 0.05$)，但 AN 及 TP 的去除却呈现“累积”的特点，其中 AN 在经过第一块湿地处理后浓度反而升高，其原因可能是潜流湿地内部，特别是非根际区处于厌氧状态，从而限制了硝化菌的增长及硝化反应的发生。而氨氮的去除与硝化细菌和反硝化细菌的数量密切相关^[10]，曝气池与湿地 A 的距离很近 (2.5m)，污水从富氧环境突然进入厌氧的潜流湿地，使微生物生存环境发生变化，此时有机氮化合物在氨化菌的作用下，发生氨化反应分解转化为氨态氮从而使 AN 浓度升高。

3 水力负荷对湿地处理系统的影响

图 1 显示了水力负荷对各湿地单元出口 COD、BOD₅、AN 及 TP 浓度的影响，从图 1 可以看出，除去水力负荷为 $0.55\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 外，随着水力负荷的增加，各湿地单元出口中 COD、BOD₅、AN 及 TP 浓度也增加，在水力负荷为 $0.55\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 下，各湿地单元出口中污染物浓度偏高可能是实验次数较少所致（在此条件下只进行了 5 轮实验）。方差分析表明，水力负荷对各湿地单元出口 COD、AN 及 TP 浓度呈显著性影响，而对 BOD₅ 的浓度没有显著性影响 ($p > 0.05$)。对于 COD 而言， $p < 0.005$ ，显著性差异来源于水力负荷 $0.80\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 与 $1.60\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间；对于 AN 而言， $p < 0.05$ ，显著性差异来源于水力负荷 $0.55\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 与其余水力负荷之间，水力负荷 $0.80\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 与水力负荷 $1.25\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 和水力负

荷 $1.60\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间; 对于 TP, $p<0.05$ 显著性差异来源于水力负荷 $0.55\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 与其余水力负荷之间和水力负荷 $0.80\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 与水力负荷 $1.60\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间.

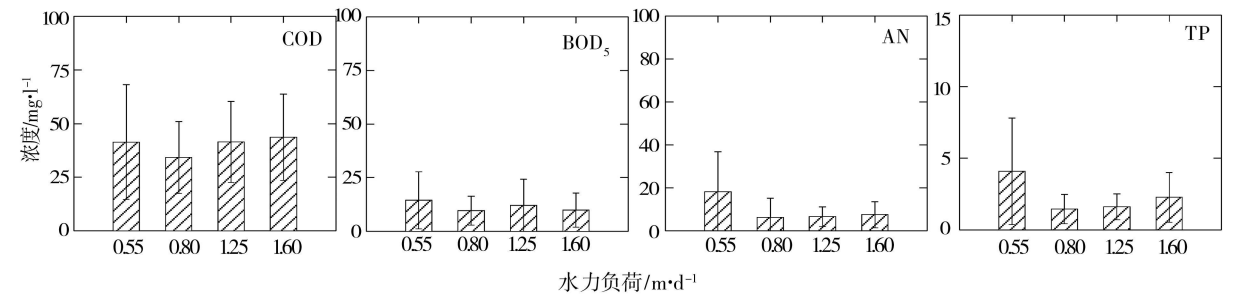


图 1 水力负荷对湿地出口 COD, BOD₅, AN 及 TP 浓度的影响

Fig 1 Effect of HLR on effluent COD, BOD₅, AN, and TP concentrations

4 组合处理系统沿程 SO_4^{2-} , $\text{NO}_2\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 电子受体浓度的变化趋势

组合处理系统沿程 SO_4^{2-} , $\text{NO}_2\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 电子受体浓度列于表 2 从表 2 可知, 除曝气池外, 系统中几乎检测不出亚硝酸盐, 进口水中硝酸盐的量也很少, 但经过曝气池后, 硝酸盐含量大大增加, 经过湿地系统后可去除 52% 的硝酸盐, 像 COD, BOD₅ 及 SS 一样, 硝酸盐的去除主要是由第一块湿地完成; 整个湿地系统对硫酸盐几乎没有去除作用.

表 2 组合处理系统沿程 SO_4^{2-} , $\text{NO}_2\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度平均值、标准偏差及去除率 (括号内的数据)

Table 2 Averages and standard deviations of sulfate nitrate and nitrite in the each treatment unit of the combined system. Average percentage removals of the treatment unit are shown in parenthesis

参数	样品数	曝气池进口水	曝气池出口水	A	B	C	D
$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	14	41±18	45±13	42±15	42±15	48±18	43±16
$\text{NO}_3^{-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	14	< 0.1	7.7±8.4	4.2±2.8(46%)	4.6±3.9(—)	3.9±3.0(15%)	3.7±2.8(6%)
$\text{NO}_2^{-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	14	< 0.1	0.25	< 0.1	0.10	0.12	< 0.1

5 潜流湿地中 COD 及 BOD₅ 的动力学模拟

用一级推流反应动力学方程来描述人工湿地中有机污染物的降解转化过程^[11],

$$\ln(C_i/C_o) = k/HLR$$

其中, C_i 和 C_o 分别为湿地进水、出水中有机的浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), k 为一级反应面积动力学常数 ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$), HLR 为水力负荷 ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$).

根据公式对四块潜流湿地去除有机污染物进行模拟, k 值拟合结果列于表 3. 从表 3 可以看出, 第一块潜流湿地的反应速率高于其余潜流湿地.

表 3 各潜流湿地中 COD 及 BOD₅ 去除动力学模拟

Table 3 Modelization of wastewater evolution in the each constructed wetlands in terms of COD and BOD₅

	A		B		C		D	
	$k/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	r^2	$k/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	r^2	$k/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	r^2	$k/\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$	r^2
COD	1.36	0.68	1.24	0.50	0.93	0.53	0.82	0.70
BOD ₅	4.04	0.66	2.41	0.57	1.54	0.86	1.50	0.57

6 结论

(1) 高水力负荷下活性污泥法与潜流人工湿地构成的组合处理系统能够有效地除去废水中的污染物, 当平均处理量为 $82\text{T}\cdot\text{d}^{-1}$, 湿地系统水力负荷为 $0.52\text{—}1.88\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 时, 组合处理系统对 TSS, AN, TP, COD 和 BOD₅ 的去除率分别为 73%, 71%, 38%, 81% 和 88%.

- (2) 影响组合系统处理效果的主要因素是水力负荷及处理单元；湿地系统中有机污染物的去除主要是由第一块湿地完成的，AN及TP的去除呈现“累积”的特点。
- (3) 湿地系统中有机污染物的生物去除主要是通过反硝化脱氮，硫酸盐还原是次要过程。

致谢：本工作得到了重庆创景公司、来仪污水处理厂的大力支持及莫苹、甘莉、尚芳红、王化杰等课题组成员的大力帮助，在此一并感谢。

参 考 文 献

[1] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y et al., Performance of a Constructed Wetland Treating Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater under High Hydraulic Loading Rate [J] . *Environ. Pollution*, 2005, **134** (3) : 411—421

[2] Shuh-Ren Jing, Ying-Feng Lin. Seasonal Effect on Ammonia Nitrogen Removal by Constructed Wetlands Treating Polluted River Water in Southern Taiwan [J] . *Environ. Pollution*, 2004, **127** (2) : 291—301

[3] 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 [J] . 环境科学, 2001, **22** (5) : 45—49

[4] 贺锋, 吴振斌, 陶菁等, 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用 [J] . 环境科学, 2005, **26** (1) : 47—50

[5] Murray-Gibbe C, Heatley J E, Karanfil T et al., Performance of a Hybrid Reverse Osmosis-Constructed Wetland Treatment System for Brackish Oil Field Produced Water [J] . *Water Res.*, 2003, **37** (3) : 705—713

[6] Steinhann C R, Weinhart S, Meizer A. A Combined System of Lagoon and Constructed Wetland for an Effective Wastewater Treatment [J] . *Water Res.*, 2003, **37** (9) : 2035—2042

[7] Green M, Shaul N, Belavskii M et al., Minimizing Land Requirement and Evaporation in Small Wastewater Treatment Systems [J] *Ecol. Eng.*, 2006, **26** (3) : 266—271

[8] 吴振斌, 吴晓辉, 付贵萍等, 不同生态工程及其组合系统除藻效率的比较研究 [J] . 环境科学, 2006, **27** (2) : 241—245

[9] 国家环保局水和废水监测分析方法编委会编, 水和废水监测分析方法 (第三版) [M] . 北京: 中国环境科学出版社, 1989

[10] 梁威, 胡洪营, 人工湿地净化污水过程中的生物作用 [J] . 中国给水排水, 2003, **19** (10) : 28—31

[11] Kadlec R H, Knight R L, Treatment Wetlands [M] . Boca Raton: CRC Press LLC, 1996

PERFORMANCE OF THE COMBINED ACTIVATED SLUDGE-
CONSTRUCTED WETLAND SYSTEM FOR POLLUTANT REMOVAL

WAN Li-juan WANG Hao WANG Fang HUANG Yu-ming
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest University, Key Laboratory of Eco-Environments
in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China)

ABSTRACT

A pilot scale wastewater treatment system combined by activated sludge and four subsurface constructed wetlands in series was sampled for one year to study the system performance for common contaminants in countryside wastewater. Yearly average results showed that when the average wastewater flow was $82\text{ T}\cdot\text{d}^{-1}$ ($36\text{--}132\text{ T}\cdot\text{d}^{-1}$) corresponding to hydraulic loading rate of $0.52\text{--}1.88\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$, the combined system removed 75% of the TSS, 71% of the AN (ammonium), 38% of the TP, 81% of the COD, and 88% of the BOD₅, respectively. The constructed wetlands system removed 39%, 55%, 5%, 18% and 48%, of COD, BOD₅, AN, TP and SS, respectively. ANOVA statistical analysis performed on the data set of 12 months of operation showed that the hydraulic loading rate (HLR) and the treatment unit were major factors that control the performance of combined system for the target pollutants. Significant removal of organic matter such as COD, BOD₅ and SS in the constructed wetlands system was found in the first constructed wetland, however, a accumulative removal was found for nutrient matter such as AN and TP. A survey of electron acceptors such as SO_4^{2-} , NO_3^- and NO_2^- in the constructed wetlands system indicated that denitrification was estimated to be significant for organic matter removal in constructed wetland beds, in contrast, the organic matter removal by sulfate reduction was minor.

Keywords activated sludge subsurface constructed wetland wastewater treatment