

波式潜流人工湿地处理生活污水的试验研究

何成达^{1,2}, 谈玲¹, 葛丽英¹, 季俊杰¹, 叶亚玲¹, 何莲¹, 王惠民²

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:提出了一种新型潜流构造湿地—波式潜流人工湿地(Wavy Subsurface Flow Constructed Wetland, 简称 W-SFCW) 并进行了在相同试验条件下与水平潜流人工湿地(Horizontal Subsurface flow Constructed Wetland, 简称 SFCW)进行对比试验。结果表明, W-SFCW 在污染物去除方面明显优于 SFCW, 在相同试验条件下 W-SFCW 出水 COD、NH₄⁺-N 和 TP 分别为 47.1、10.4 和 0.42 mg·L⁻¹, 去除率分别比 SFCW 提高 8.2%、13.1% 和 6.6%; 但 W-SFCW 系统水流阻力大于 SFCW 系统, 在本试验条件下 W-SFCW 的湿地床体的水头损失 220 mm, 而 SFCW 水头损失 70 mm; W-SFCW 及 SFCW 在冬季运行期间 COD、NH₄⁺-N 去除率受环境温度影响明显, 但未出现恶化现象; 磷去除在低温期间几乎不受影响。

关键词:波式潜流人工湿地; 潜流人工湿地; 污染物降解; 污水处理

中图分类号:X703 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2004)04-0766-04

Application of Wavy Subsurface Constructed Wetland in Treating Domestic Sewage

HE Cheng-da¹, TAN Ling¹, GE li-ying¹, JI Jun-jie¹, YE Ya-ling¹, HE Lian¹, WANG Hui-min²

(1. College of Environmental Science and Technology Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. College of Environmental Science and technology engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: With interception of biological films on surface of the fillings, abundant root system, topsoil and fillings, possessing good heat preservation and sanitation, horizontal subsurface flow constructed wetland has become a wetland system now mostly studied and applied. A new type of constructed wetland system for sewage treatment was studied in the present study, which called Wavy Subsurface Constructed Wetland (W-SFCW). By setting leading-flow plies regularly in the wetland in order to improve the flow condition in the traditional horizontal subsurface wetland (SFCW), the W-SFCW adopted wavy flow instead of horizontal flow, made the sewage pass through the different constructions in the vertical direction several times, consequently the removal effect was improved. The W-SFCW system and the SFCW were supplied with the same hydraulic loading rate of domestic sewage. The experiment lasted a year. The test water was from the cesspool, which had been disposed by two anaerobic reactors in short hydraulic residence time before pouring into the wetlands. The experiment results showed that, comparing with SFCW, for COD NH₄⁺ and TP, the effluent from W-SFCW were 47.1 mg·L⁻¹, 10.4 mg·L⁻¹ and 0.42 mg·L⁻¹, and the effluent from SFCW were 59.4 mg·L⁻¹, 14.8 mg·L⁻¹ and 0.70 mg·L⁻¹, as it could be seen that, the removal efficiency of W-SFCW on COD, NH₄⁺ and TP are higher 8.2%, 13.1% and 6.6% than SFCW in the same test condition; the mechanism analyses according to the test results considered that, the leading-flow instruments promoted the wavy flow, consequently the contamination could pass through the upper part and bottom part of the wetland system, so that it developed the potential of degrading contamination in wetland. What is more, W-SFCW made the soil adsorb NH₄⁺ adequately, which was benefit for nitrification. The flow conditions in traditional wetland determined partial NH₄⁺ unable to experience good aerobic state so that the nitrification was not through. While W-SFCW was a multilevel A/O technology, it assumed aerobic-facultative-anaerobic conditions from the surface to bottom of the system, so W-SFCW possessed better capability of removing NH₄⁺. However the flow resistance of W-SFCW system was bigger. In this test conditions, the hydraulic lose in W-SFCW wetland bed was 220 mm, while in SFCW was 70 mm; the removal efficiency of W-SFCW and SFCW were affected distinctly by the temperature. During the winter, since nitrification and denitrification activities fell, plants stopped growing, but there were not deteriorations. The removal efficiency on phosphorus was hardly affected by the temperature.

Keywords: wavy subsurface constructed wetland; subsurface constructed wetland; waste matters degradation; sewage treatment

水平潜流人工湿地 (Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland, 简称 SFCW) 已经成功地应用于生活污水、雨水和工业污水处理近 30 年^[1-3]。在潜流湿地系统中, 污水在湿地床的内部流动, 一方面可以充分利用填料表面生长的生物膜、丰富的根系及表层土和填料截流等的作用, 以提高其处理效果和治理能力; 另一方面由于水流在地表以下流动, 故具有保温性能好、处理效果受气候影响小、卫生条件较好的特点^[4], 是目前研究和应用比较多的一种湿地处理系统。但是潜流湿地内部污水几乎是水平流动的, 而湿地垂直方向上污染物去除的机制不同, 因此传统潜流

湿地处理污水的效能未能有效地发挥。本研究提出并初步试验研究了一种新型潜流构造湿地——波形潜流人工湿地 (Wavy Subsurface Constructed Wetland, 简称 W-SFCW), 取得了较好的研究成果。

1 W-SFCW 设计

W-SFCW 通过在湿地内部有规则地设置导流板对传统水平潜流湿地的水流条件加以改进, 以波形流态取代水平流态, 使污水在垂直方向上多次经过湿地内部具有不同处理特性的构造层, 以期达到增强污水处理效果的目的。W-SFCW 的设计示意图见图 1。

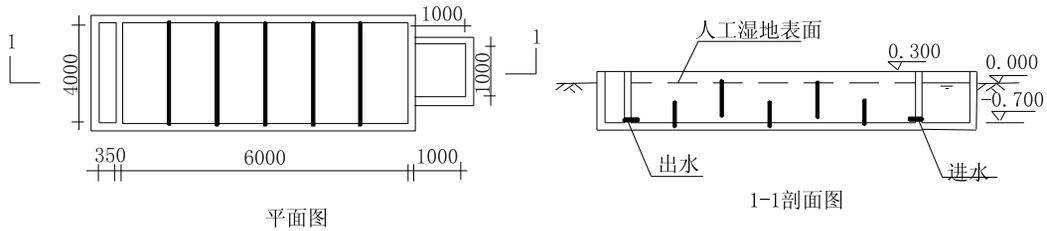


图 1 W-SFCW 示意图

Figure 1 Flow diagram of Wavy Subsurface Constructed Wetland (W-SFCW)

2 试验

2.1 试验装置

试验场地建设于扬州大学某校区的草坪上, 湿地主体建于地下, 占地面积 30 m²。试验开始于 2003 年 2 月, 至 2003 年底历时近 11 个月。

2.1.1 湿地

试验人工湿地分别是 W-SFCW 和 SFCW (作为对照)。湿地平面设计为矩形, 长 6.0 m, 宽 2.0 m, 总高 1.0 m。W-SFCW 沿长度方向, 均分为 3 格, 每格长 2.0 m, 格内中间位置设置隔墙, 形成上、下位隔墙的间隔排列, 强制进入湿地中的污水呈波形流动。试验湿地地面以下深度 700 mm, 底坡为 1%。

2.1.2 湿地基质

湿地中的填料由土壤和砾石组成, 填料床高度为 750 mm, 填料级配见表 1。通过试验测定, 床体平均孔隙率为 36%。

表 1 填料级配一览表

Table 1 List of filling materials from the W-SFCW

名称	规格	高度
土壤层	土壤 90%, 石灰石 (3~5mm) 10%	200mm
砾石层	粒径 5~20mm 砾石	500mm
豆石层	粒径 30~50 小豆石	50mm

2.1.3 取样管布置

在 2 个高度上设置采样管, 分别距离池底 250 和 600 mm, 在每个高度上等距离设置 6 个取样管。

2.1.4 湿地植物

采用芦苇和美人蕉间植, 芦苇种植密度为 6 株·m⁻², 每株 8~10 根; 美人蕉种植密度为 5 株·m⁻², 每株 3~6 根。芦苇为附近地区野生环境下的芦苇, 美人蕉从花卉公司购买, 为盆栽美人蕉。

2.1.5 湿地运行负荷

W-SFCW 和 SFCW 以同等水力负荷和质量负荷运行。水力负荷为 40~60 × 10⁻³ m³·m⁻²·d⁻¹, 质量负荷为 4.5~13.2 gCOD_{Cr}·m⁻²·d⁻¹。试验时间从 2003 年 2 月 15 日起, 3 月 15 日开始测定数据至 12 月底。

2.2 试验水质

试验水质为短时厌氧预处理过的生活污水, 湿地出水流入出水池, 计量排放。湿地进水质变化幅度较大, 各项水质指标极值及均值见表 2。

表 2 湿地进水水质

Table 2 Composition of water in infall port from W-SFCW

水质参数	COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	SS /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	水温 /°C	pH
最大值	231	131	55.1	7.8	38.3	7.2
最小值	97	52	19.2	3.8	8.7	6.5
平均值	162	85.2	35.6	5.31		
标准差	32.9	17.3	7.2	0.98		

2.3 分析项目和方法

水质分析项目有 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 TP 、 pH 、 SS 等,按照国家环保局《水和废水水质监测方法》^[5] 中的测定方法进行。

3 结果和讨论

3.1 COD_{Cr} 去除

图2是在2种湿地运行期间进出水 COD 浓度值。如图示,尽管试验期间进水浓度有较大的变幅,但两种人工湿地皆表现了出水水质的稳定性,这与人工湿地一般具有较好的耐冲击负荷能力有关^[6]。试验期间 W-SFCW 与 SFCW 的 COD 平均出水值分别为 47.1、59.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率分别为 70.5% 和 62.3%。 W-SFCW 的 COD 去除率比 SFCW 高 8.2%

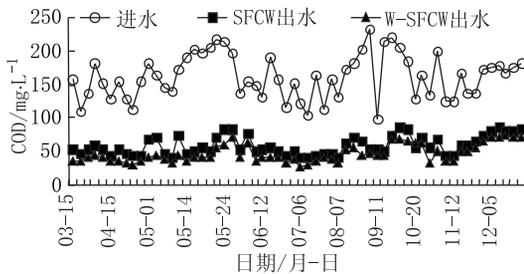


图2 W-SFCW 与 SFCW 进出水 COD 值

Figure 2 COD contents in infall and discharge ports from W-SFCW and SFCW

W-SFCW 对 COD 降解较 SFCW 效率高的初步分析是,湿地内部结构达到差异导致了污染物去除效果的差异。湿地系统在垂直方向上有机物降解的机理有较大差别。整体上湿地系统从表明到底层由好氧向兼氧-厌氧过渡。同时根据植物根系发育特点虽然植物根能够深入至较深的深度但大多数根发育于湿地表面的浅层。因此所谓根区方法 (Root Zone Method) 的作用主要发生于浅层。 W-SFCW 内的导流设施促进水流呈波形流动,使污染物数次经历湿地的上部及底部,有效地发挥了湿地降解污染物的潜力。

从试验数据可以看出,自11月中旬起进入冬季,处理效果受环境温度影响明显,但未出现恶化现象。

3.2 氨氮去除

图3是2种湿地运行期间进出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度值。2种湿地出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 都较为平稳。 W-SFCW 平均出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 10.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SFCW 平均出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 14.8 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2种湿地的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率分别为 69.6% 和 56.5%。 W-SFCW 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率比 SFCW 高 13.1%。

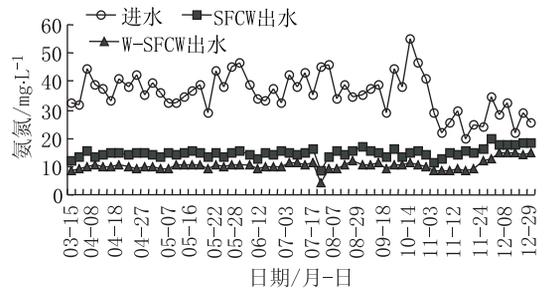


图3 W-SFCW 与 SFCW 进出水氨氮值

Figure 3 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ contents infall and discharge ports from W-SFCW and SFCW

经初步分析认为, W-SFCW 高效去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的机理至少有2种作用:

(1) 较好的土壤吸附。 W-SFCW 的波形流态使水流在床体内部依次经过土壤层、砾石层交替流动,这相当于水流经过一系列串联的土壤床-砾石床,使 W-SFCW 床比 SFCW 床水中的 NH_4^+ 离子较充分地 与土壤产生吸附,有利于 NH_4^+ 的去除。

(2) 较好的硝化作用。 SFCW 的流态决定了有相当部分的 NH_4^+ 未能经历良好的好氧状态使这部分 NH_4^+ 不能进行有效的硝化作用。而 W-SFCW 床中的污水反复进行好氧-兼氧-厌氧状态,是典型的 A/O 工艺,因此 W-SFCW 比 SFCW 具有更好的去除氨氮性能。

但在进入冬季以后,受环境温度显著。其间进水的氨氮浓度偏低约 11 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,但 W-SFCW 和 SFCW 出水氨氮分别比此前试验的平均数据高 2.0 和 2.6 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。分析其原因主要是人工湿地内微生物的硝化、反硝化活性下降及植物停止生长。

3.3 总磷去除

试验期间进水 TP 的变化范围为 2.5~6.3 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由图4可见,在 TP 的去除上 W-SFCW 与 SFCW 相比优势明显。 W-SFCW 与 SFCW 的 TP 出水值分别为 0.42 和 0.70 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TP 的平均去除率分别为 90.2% 和 83.6%。 W-SFCW 的 TP 去除率比 SFCW 高 6.6%。试验结果显示, W-SFCW 和 SFCW 对磷都具有较强的去除效果,2种湿地出水均保持在较低的水平,说明试验采用的土壤(含10%石灰石)-砾石基质除磷效果较好, W-SFCW 除磷效果更优。从试验结果分析,冬季低温对于人工湿地的磷去除影响较小。说明在人工湿地中磷去除主要不是生物作用。

文献报道人工湿地对磷的去除是通过基质、微生物和植物等协同作用完成的^[7]。为考察基质磷沉积情况,借鉴土壤学的研究方法^[8,9],于10月中旬进行了

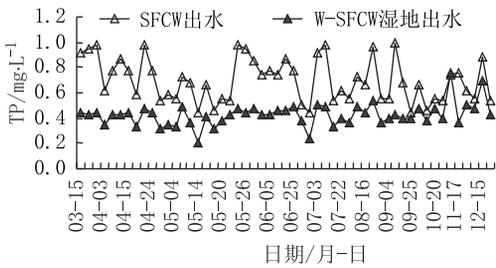


图 4 W-SFCW 与 SFCW 出水 TP 值

Figure 4 TP contents in discharge ports from W-SFCW and SFCW

基质磷沉积的试验。分别沿湿地水流方向等距离设 6 个取样点位,分别取土壤层、砾石层和豆石层基质进

行磷提取试验。试验结果见表 3。从试验结果中可以发现,2 种湿地在土壤层中磷吸附量几乎相同,但在砾石层和豆石层中两种湿地沉积的磷却有较大差别,说明 W-SFCW 在促进磷沉积方面具有显著的优势。其作用机理有待于进一步研究。

4 结论

(1) W-SFCW 床的主要特点是优化了传统潜流人工湿地的水流流态。污水在 W-SFCW 床内进行波形流动,使污水反复地与湿地系统中的上层、中层和下层的微生物、根系和基质接触,充分地发挥了湿地

表 3 2 种湿地基质的磷沉积量对比

Table 3 Comparison of TP amounts of substrate from 2 wetlands

取样点位	土壤吸附性磷含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		砾石酸溶性磷含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		豆石酸溶性磷含量/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
	SFCW	W-SFCW	SFCW	W-SFCW	SFCW	W-SFCW
0	1.21	1.21	4.79	4.79	0.22	0.22
1	35.36	44.56	34.45	47.54	36.31	50.03
2	35.36	37.68	34.45	37.99	36.31	28.25
3	32.45	32.37	31.95	45.24	34.07	32.73
4	32.45	25.66	31.95	88.17	34.07	60.53
5	20.63	17.13	30.72	88.13	31.91	39.10
6	20.63	24.18	30.72	66.74	31.91	45.92
平均值	29.48	30.26	32.37	62.30	34.10	42.76

注:“0”取样点位为原基质。

系统降解污染物的能力。

(2) 波形潜流人工湿地(W-SFCW)在污染物去除方面明显优于传统潜流人工湿地。在相同试验条件下,W-SFCW 对 COD、 NH_4^+ 和 TP 的去除率分别比 SFCW 提高 8.2%、13.1% 和 6.6%。

(3) W-SFCW 系统水流阻力大于 SFCW 系统。在本试验条件下,W-SFCW 的湿地床体的水头损失 220 mm,而 SFCW 水头损失 70 mm。

(4) W-SFCW 及 SFCW 在冬季运行期间 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率受环境温度影响明显,但未出现恶化现象;磷去除在低温期间几乎不受影响。

(5) 本试验研究是初步的,关于 W-SFCW 污染物降解机理、波形水流流态的优化等有待于进一步的研究。

参考文献:

[1] 白晓慧,王宝贞,余敏,聂梅生. 人工湿地污水处理技术及其发

展应用[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1999,32(6):88-92.

[2] Hans Brix. Use of constructed wetland in water pollution control: historical development present status, and future perspectives[J]. *Water Science Technology*, 1994, 30(8): 209-223.

[3] Vymazal J, Brix H, Cooper PF, et al. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe[M]. Leiden, The Netherlands: Backhuys Publishers, 1998.

[4] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率[J]. 生态学杂志, 2002, 21(4): 51-59.

[5] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会,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.

[6] 梁继东,周启星,孙铁珩. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析[J]. 生态学杂志,2003,22(2):49-55.

[7] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学,1995,16(3):83-86.

[8] 陈刚才,甘露,王仕禄,等. 土壤中元素磷的地球化学[J]. 地质地球化学,2001,29(2):78-81.

[9] 张宝贵,李贵桐. 土壤生物在土壤磷有效化中的作用[J]. 土壤学报,1998,35(1):104-111.