

波式潜流人工湿地对生活污水中磷的去除效果研究

蔡树美¹, 王娟娟², 蔡玉琪³, 钱晓晴¹, 谈 玲¹, 盛海君¹

(1.扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.莱登大学数学与自然科学系, 荷兰 莱登 9500; 3.环保部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210000)

摘 要:通过试验测定波式潜流人工湿地(W-SFCW)与潜流人工湿地(SFCW)中基质、介质填料、植物在污水处理中所截留的磷含量,分析湿地各组成部分对磷的吸收作用,并对各组成部分的去除效果进行比较研究。试验进一步明确了 W-SFCW 和 SFCW 对磷的净化机理,从而为优化设计提供了基础。结果表明,在相同试验条件下,W-SFCW 对 TP 的去除率比 SFCW 高。两种湿地系统中土壤和湿地植物截留吸附了较多的磷,石头填料对污水中的磷也有一定的吸附作用。其中,湿地植物芦苇比美人蕉对污水中磷的吸附作用更为明显。

关键词:波式潜流人工湿地;潜流人工湿地;污水处理

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1484-04

Treatment Efficiency of Wavy Subsurface Constructed Wetland for Removal of Phosphorous from Household Wastewater

CAI Shu-mei¹, WANG Juan-juan², CAI Yu-qi³, QIAN Xiao-qing¹, TAN Ling¹, SHENG Hai-jun¹

(1.Environmental Science & Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Department of Mathematics and Natural Science, Leiden University, Leiden 9500, Netherland; 3.Environment Protect Department of Nanjing Environment Science Research Institute, Nanjing 210000, China)

Abstract: Since Wavy Subsurface Constructed Wetland called W-SFCW was applied on the sewage purification research, a lot of research has been conducted and a great progress has been obtained in this field. It has been proved that W-SFCW works significantly better in eliminating pollutants than traditional Subsurface Constructed Wetland (SFCW). In this experiment, contents of phosphorus absorbed temporarily to substrate, padding and plant during the sewage treatment in both W-SFCW and SFCW were determined to analyze phosphorus absorption to compartment and to compare the removal efficiency. The experiment further clarified the mechanisms of phosphorus purification in W-SFCW and SFCW, namely wavy water flow inside W-SFCW contacted with the upper, lower and the middle soil level so frequently that its pollutant removal efficiency was significantly improved. This provides foundation for further optimization design. The result showed: Firstly, TP removal efficiency of W-SFCW was higher than that of SFCW under the same test condition. Secondly, in two types of wetland systems, soil and wetland plants adsorbed more phosphorus than stone padding. As far as wetland plants concerned, reed adsorbed more phosphorus from the sewage than canna did.

Keywords: W-SFCW; SFCW; Sewage treatment

自波式潜流人工湿地(Wavy Subsurface Constructed Wetland, 简称 W-SFCW)应用于污水净化的研究以来,许多学者对其进行了研究,并取得了有意的成果。研究表明,W-SFCW 在污染物去除方面明显优于传统潜流人工湿地(Subsurface Constructed Wet-

land, 简称 SFCW)^[1-4]。何成达等分析认为,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和底部,有效发挥了湿地降解污染物的潜力^[5]。

湿地去除磷主要是通过水生植物、基质和微生物的共同作用来完成的^[6-8]。但是 W-SFCW 中被截留的磷是如何分布的,如何提高这些部分对磷的去除率方面的研究却甚少。可见在污水流经湿地床的过程中,掌握 W-SFCW 对污水中磷的净化机理,了解污水中

收稿日期:2008-10-30

基金项目:江苏省教育厅高校科研项目(02KJB610004)

作者简介:蔡树美(1984—),女,江苏溧阳人,博士研究生,主要从事植物营养研究。E-mail: caishumei_1984@yahoo.com.cn

通讯作者:钱晓晴 E-mail: xiaqingqian@163.com

被截留的磷分布在湿地的各组成部分的含量大小并加以理论分析,同时将 W-SFCW 与 SFCW 各组成部分去除磷的效果进行内在分析,可以为掌握湿地设计构造、改进人工湿地磷去除优化提供可贵的资料。

1 材料与方法

1.1 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。

1.1.1 湿地

试验人工湿地分别是潜流人工湿地 SFCW(作为对照)和波式潜流人工湿地 W-SFCW。湿地平面设计为矩形,长 6.0 m,宽 2.0 m,总高 1.0 m。本次试验的 W-SFCW 在构造上与 SFCW 有所不同,将湿地床沿长度方向分为 3 大格,每格 2.0 m,每个大格又分 2 小格,间隔 1.0 m,水流下行格板距离池底 550 mm,水流上行格板距离池顶 550 mm,上下行格板间隔排列,强制湿地中的污水呈波形流动。试验的湿地地面以下深度 700 mm,坡度为 1%。

1.1.2 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 two wetlands

基质	规格	高度/mm
土壤	土壤 90%;石灰石(3~5 mm)10%	200
砾石	粒径 5~20 mm 砾石	500
豆石	粒径 30~50 mm 小豆石	50

1.1.3 湿地植物

湿地栽种的植物为芦苇和美人蕉,夏秋季种植芦苇,春冬季种植美人蕉。本试验为了提高处理效果,采用密植方式,芦苇种植密度为 6 株·m⁻²,每株 8~10 根^[9];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。

1.1.4 取样点布置

湿地床沿长度方向,间隔 1.0 m 布置一个取样点。从进水口到出水口方向,分别编号 1、2、3、4、5、6。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 土壤总磷含量——H₂SO₄-HClO₄ 消化-钼蓝比色法

将土壤样品风干,碾细,过筛。用 H₂SO₄-HClO₄ 消

化法消煮分解土样,定容混匀后吸取上清液,适当稀释后,用钼蓝比色法测定其中的磷^[10]。

1.2.2 石头酸溶性磷含量——浓 H₂SO₄ 浸提-钼黄比色法

先将石头按大小分为大、小两组,再分别称取石头样品 100 g 左右置于具塞塑料瓶中,加入浓 H₂SO₄ 100 mL,使之完全浸泡。2 h 后取上清液,稀释后,用钼黄比色法测定。

1.2.3 植物总磷含量——H₂SO₄-HClO₄ 消化-钼蓝比色法

先将芦苇和美人蕉磨碎过筛,再用 H₂SO₄-HClO₄ 消化法消煮分解,定容混匀后吸取消煮液,适当稀释后,用钼蓝比色法测定。

2 结果与分析

2.1 土壤中总磷含量

由表 2 可以看出,W-SFCW 表层土壤平均总磷含量比 SFCW 高 3.9%。两种湿地表层土壤总磷含量从进水口到出水口有先升高后降低的趋势。从表中可以发现,W-SFCW 从进水口到出水口表层土壤中总磷量有明显下降的趋势,说明前面的土壤截留了污水中部分磷,降低了污水中磷元素的含量,达到了降低污水中磷含量的目的。而 SFCW 从进水口到出水口表层土壤中总磷含量比较平稳,甚至还有略微上升的趋势,说明前面土壤除磷效果不明显。

W-SFCW 中层土壤平均总磷含量要高于 SFCW 11.3%。W-SFCW 到出水口时含量有明显升高,而 SFCW 总体上是趋于平稳的,并且在出水口附近中层土壤总磷含量有上升的趋势,说明刚开始时 SFCW 中层土壤除磷效果并不是很好。由统计分析得出,W-SFCW 中层土壤总磷含量极显著高于 SFCW,这说明 W-SFCW 中层土壤总磷去除率要优于 SFCW。

表 2 两种湿地土壤基质的磷沉积含量

Table 2 Total phosphate amounts of soil from two wetlands

取样点	表层土壤总磷 含量/mg·g ⁻¹		中层土壤总磷 含量/mg·g ⁻¹		底层土壤总磷 含量/mg·g ⁻¹	
	SFCW	W-SFCW	SFCW	W-SFCW	SFCW	W-SFCW
0	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57
1	0.98	1.07	0.90	1.07	0.78	1.14
2	0.92	0.99	0.95	1.01	0.95	1.08
3	1.03	1.05	1.01	1.08	0.90	1.02
4	1.03	0.93	1.03	1.04	0.98	1.09
5	0.99	1.15	0.89	1.00	0.88	1.13
6	0.88	0.89	0.92	1.14	0.81	1.13
平均值	0.97	1.01	0.95	1.06**	0.88	1.10**

注:“0”取样点位为原基质;“**”差异达到极显著水平($P<0.01$)。

W-SFCW 深层土壤各取样点总磷含量都明显高于 SFCW。两种湿地从进水口到出水口底层土壤总磷含量下降的趋势并不是很大,说明两种湿地土壤深层土壤除磷效果不是很好。由统计分析得出,W-SFCW 中层土壤总磷含量极显著高于 SFCW,这表示 W-SFCW 深层土壤总磷去除率要优于 SFCW。

2.2 石头中酸溶性磷含量

2.2.1 两种湿地砾石酸溶性磷含量

由表 3 看出,W-SFCW 中砾石截留的酸溶性磷含量在 $4.54\sim 8.67\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,SFCW 中砾石截留的酸溶性磷量在 $1.60\sim 2.43\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。两种湿地中的砾石对污水中的磷都有一定的吸附,W-SFCW 中的砾石基质对污水中磷的吸附量的平均值约为 SFCW 的 5 倍。由统计分析得出,W-SFCW 砾石基质总磷含量极显著高于 SFCW,对污水中的磷去除率显著高于 SFCW。

2.2.2 两种湿地豆石酸溶性磷含量

由表 3 还可以看出,W-SFCW 中豆石截留的酸溶性磷含量在 $3.12\sim 6.51\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,SFCW 中豆石截留的酸溶性磷含量在 $2.48\sim 3.54\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。从进水口到出水口,两种湿地中的豆石对污水中磷的吸附量总体呈上升趋势,对污水中磷的去除都有一定效果。但是 W-SFCW 与 SFCW 砾石基质总磷含量差异不显著。

2.3 植物中总磷含量

由表 4 可以发现,W-SFCW 芦苇中各取样点平均总磷含量要比 SFCW 芦苇中总磷含量高 17.5%。W-SFCW 芦苇中总磷含量和 SFCW 芦苇中总磷含量从进水点到出水点都有降低的趋势,说明两种湿地对污水中的磷都有了很好的去除效果。从表中还可以明显看出,W-SFCW 芦苇中总磷含量下降趋势比 SFCW 芦

苇中总磷含量下降趋势更明显,此外由统计分析得出,W-SFCW 芦苇中总磷含量极显著高于 SFCW,说明生长在 W-SFCW 中的芦苇去除磷的效果要好于 SFCW 中的。

W-SFCW 美人蕉中平均总磷含量比 SFCW 中高 13.2%,也就是说生长在 W-SFCW 中的美人蕉去除磷的效果要好于 SFCW 中的。在表 4 中还可以看出,SFCW 在出水口附近美人蕉中总磷含量有明显的上升趋势,说明 SFCW 在出水口附近美人蕉对污水中总磷的去除效果并不明显。

表 4 两种湿地植物的磷沉积含量

Table 4 Total phosphate amounts of plants from two wetlands

取样点	芦苇总磷含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$		美人蕉总磷含量/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	
	SFCW	W-SFCW	SFCW	W-SFCW
0	1.25	1.25	1.28	1.28
1	1.93	2.26	1.80	2.31
2	1.76	2.17	1.95	2.17
3	1.56	1.95	1.36	1.65
4	1.47	2.07	1.24	1.57
5	1.46	1.87	1.43	1.85
6	1.69	1.70	1.68	1.37
平均值	1.65	2.00*	1.58	1.82

注:“0”取样点位为原基质;“*”差异达到显著水平($P<0.05$)。

3 小结与讨论

3.1 土壤对污水中总磷的去除

W-SFCW 无论是表层、中层还是深层土壤,各取样点总磷含量都要高于 SFCW,W-SFCW 中土壤对总磷的去除明显优于 SFCW,并且 W-SFCW 中层和深层土壤对污水中磷的截流量极显著高于 SFCW。在 SFCW 中,由于没有任何导流板,污水流经床体时,其主要路径是通过大孔隙流运动和土表径流,而孔径相对较小的土壤基质因水流阻力较大,不可能成为污水流经的主要部位。与此完全不同的是,由于 W-SFCW 隔板的强制作用,水流路径发生明显变化,使中、下各层的土壤可以更多地接触被处理污水水体,从而为吸附、固定更多的磷创造了条件。

3.2 石头对污水中酸溶性磷的去除

石头在去除污水中磷上也起到一定的作用。W-SFCW 中砾石截留的酸溶性磷含量在 $4.54\sim 8.67\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,SFCW 中截留量在 $1.60\sim 2.43\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。W-SFCW 砾石对污水中磷的截留量极显著高于 SFCW。W-SFCW 中豆石截留的酸溶性磷含量在 $3.12\sim 6.51\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,

表 3 两种湿地石头基质层的磷沉积含量

Table 3 Total phosphate amounts of stone substrate from two wetlands

取样点	砾石酸溶性磷含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$		豆石酸溶性磷含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	
	SFCW	W-SFCW	SFCW	W-SFCW
0	0.21	0.21	0.03	0.03
1	1.60	5.67	2.53	3.44
2	1.65	4.54	2.68	3.12
3	2.25	7.53	2.48	3.19
4	2.43	7.58	2.52	3.58
5	1.99	8.67	3.54	6.51
6	1.64	7.83	3.48	6.16
平均值	1.93	6.97**	2.87	4.33

注:“0”取样点位为原基质;“**”差异达到极显著水平($P<0.01$)。

SFCW 中截留量在 $2.48\sim 3.54\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间。石头对污水中磷的吸附与固定主要有两个方面的作用,一是石头中溶出的钙、镁、铁、锰等元素对磷的化学固定,二是在石头表面由于化学沉淀及微生物活动而形成的有机-无机胶膜对磷的吸附与固定。W-SFCW 水流的上下运动,更多地将溶于水的空气带入中、下层。一方面更有利于铁、锰等易氧化元素对磷的固定,另一方面也有利于更多的好气微生物活动,加强微生物及其代谢产物在石头上的沉积,从而更多地吸附与固定污水中的磷。砾石层上方为土壤层,其间亦散落充满着一定数量的土壤,因粒间孔隙不及其下方的豆石层,亦不是引流的主要部位,因而 W-SFCW 对水流路径的强制改变,亦提高了该部分基质与磷的接触几率,增加其对污水磷的吸附固定数量。由于大孔隙率最高的豆石层无论是在 SFCW 还是在 W-SFCW 条件下都能成为污水流的主要引流部位,因而它们在除磷效果方面的差异不及砾石层和土壤层那么显著。

3.3 植物对污水中总磷的去除

W-SFCW 芦苇中各取样点平均总磷含量要比 SFCW 芦苇中总磷含量高 17.5%,W-SFCW 芦苇对污水中磷的截留量显著高于 SFCW。W-SFCW 美人蕉中平均总磷含量也要比 SFCW 中高 13.2% 左右。在 W-SFCW 系统中,两种植物对磷的吸收量均明显增加,这除了与植物根系能接触更多的含磷污水有关外,与根系氧化还原状况的改变可能也有一定联系。两种湿地系统中,芦苇和美人蕉相比,截流了污水中更多的磷。

4 结语

本文对 SFCW、W-SFCW 磷在各基质中的吸附、固定及植物吸收累积固持间的分布进行了初步研究,限于时间和条件,尚有一些科学与技术问题需进一步探讨。如两种类型湿地条件下流经不同基质水量的分配比例,剖面各基质层氧化-还原状况的差异,植物生长状况,微生物种类数量及区系改变,导流板高度、位置、数量与密度及其在湿地坡度之间的关系,湿地规格、寿命与污水数量及污染物浓度之间的关系等,都是值得深入研究的课题。

参考文献:

- [1] 何成达,季俊杰,葛丽英,等.厌氧悬浮床/潜流湿地处理生活污水[J]. 中国给水排水, 2004, 20(7): 11-15.
- HE Chen-da, JI Jun-jie, GE Li-ying, et al. Anaerobic suspended

- packed bed/wavy subsurface flow constructed wetland process for treatment of domestic sewage[J]. *China Water & Wastewater*, 2004, 20(7): 11-15.
- [2] 柏彦超,李 荣,倪梅娟,等.螺旋波式潜流人工湿地模型对去除生活污水中氮效果的初探[J]. 江苏环境科技, 2005, 18(3): 6-7, 11.
- BAI Yan-chao, LI Rong, NI Mei-juan, et al. Explore of the effect of HW-SFCW on nitrogen elimination in living sewage[J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2005, 18(3): 6-7, 11.
- [3] 郑天柱,何成达,谈 玲. W-SFCW 和 SFCW 的水流特性试验研究[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 18-21, 37.
- ZHENG Tian-zhu, HE Cheng-da, TAN Ling. Experimental study of flow characters of W-SFCW and SFCW[J]. *Water Resources Protection*, 2008, 24(2): 18-21, 37.
- [4] 葛丽英,谈 玲,何成达,等.波形潜流人工湿地污水处理技术研究[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2004, 7(4): 75-78.
- GE Li-ying, TAN Ling, HE Cheng-da, et al. Research on wastewater treatment using wavy subsurface flow constructed wetlands[J]. *Journal of Yangzhou University(Natural Science Edition)*, 2004, 7(4): 75-78.
- [5] 何成达,谈 玲,葛丽英,等.波式潜流人工湿地处理生活污水的试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 766-769.
- HE Cheng-da, TAN Ling, GE Li-ying, et al. Application of wavy subsurface constructed wetland in treating domestic sewage[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2004, 23(4): 766-769.
- [6] 缪绅裕,陈桂珠,黄玉山,等.人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环[J]. 生态学报, 1999, 19(2): 236-241.
- MIU Shen-yu, CHEN Gui-zhu, HUANG Yu-shan, et al. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(2): 236-241.
- [7] 袁东海,高士祥,任全进,等.几种挺水植物净化生活污水总氮和总磷效果的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(4): 77-80, 92.
- YUAN Dong-hai, GAO Shi-xiang, REN Quan-jin, et al. Land use structure and ecological processes[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 18(4): 77-80, 92.
- [8] 张志勇,王建国,杨林章,等.植物吸收对模拟污水净化系统去除氮、磷贡献的研究[J]. 土壤, 2008, 4(3): 412-419.
- ZHANG Zhi-yong, WANG Jian-guo, YANG Lin-zhang, et al. Contribution of plant uptake to nitrogen and phosphorus removal of four simulated wastewater treatment systems[J]. *Soils*, 2008, 4(3): 412-419.
- [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.
- ZHANG Bao-gui, LI Gui-tong. Roles of soil organisms on the enhancement of plant availability of soil phosphorus[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(1): 104-111.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M]. 第三版, 北京:中国农业出版社, 2000: 71-74.
- BAO Shi-dan. Soil Analysis in Agricultural Chemistry[M]. Third edition. Beijing: China Agriculture Publishers, 2000: 71-74.