

人工湿地沸石填充方式研究

卢少勇^{1,2}, 张彭义¹, 余 刚¹

1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084

2. 中国环境科学研究院 湖泊生态环境创新基地 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012

摘要: 针对传统的沸石湿地系统中沸石用量大, 与沸石相关的费用高的缺点, 提出采用前置沸石和表铺沸石填充方式来改善湿地中的污染物去除效果. 对比研究了人工湿地中 3 种沸石填充方式(底铺、前置和表铺)对农田排灌水中污染物的去除效果. 结果表明: 茭白 - 土壤湿地的污染物去除效果优于无植物的土壤湿地系统. 沸石 - 土壤 - 植物系统比传统的土壤 - 植物系统有更好的 COD_G , 总氮和氨氮去除效果. 3 种不同沸石填充方式中, 底铺沸石的总氮和总磷去除效果最好; 表铺沸石的总氮、总磷和 COD_G 去除效果比前置沸石的好, 有植物和土壤的湿地系统增加前置沸石段后 COD_G 的去除率升高 3.4%, 增加表铺沸石后 COD_G 去除率提高 12.3%.

关键词: 人工湿地; 沸石; 填充方式

中图分类号: X701.3

文献标识码: A

文章编号: 1001 - 6929(2006)03 - 0091 - 05

Research of Zeolite Filled Modes in Constructed Wetland

LU Shao-yong^{1,2}, ZHANG Peng-yi¹, YU Gang¹

1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Research Center of Lake Eco-environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: Aimed at the defect of large consumption of zeolites in traditional zeolites filled wetland systems, top zeolite (TZ) mode and preposition zeolite (PZ) mode were put forward for the contaminants removal in constructed wetland. Three kinds of zeolites filled modes, including bottom zeolite (BZ), TZ and PZ, were studied in constructed wetland for agricultural drainage and irrigation wastewater treatment. Constructed wetland including *Zizania caduciflora* and soil had better pollutant removal effect than the control system without helophyte. Constructed wetland with zeolite had better chemical oxygen demand (COD_G), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) removal rate than constructed wetland without zeolite. Among three kinds of zeolite filled modes, BZ mode system has best TN and TP removal rate, TZ system has better TN, TP and COD_G removal rate than PZ. COD_G removal rate increased 3.4% while PZ was added to the constructed wetland with hydrophyte and soil. COD_G removal rate increased 12.3% while TZ was added to the constructed wetland with hydrophyte and soil.

Key words: constructed wetland; zeolite; filled mode

自德国于 20 世纪 70 年代构建首座人工湿地污水处理工程起^[1], 人工湿地在不同国家和不同类型污水处理中得到了广泛应用. 人工湿地一般包括土壤(或人工填料, 如碎石、沸石等)和生长在其上的水生植物, 是独特的土壤 - 植物 - 微生物生态系统. 合

理选用人工填料能有效改善湿地的污染物去除效果. 占地通常大于传统二级活性污泥工艺的人工湿地系统最具吸引力之处在于其氮、磷去除效果好, 投资低, 运行费低和维护管理简便, 而且湿地系统常有产出(植物收割部分带来的直接经济效益和植物绿化等改善生态环境而带来的间接经济效益), 合理设计和管理可实现湿地工程的自负盈亏甚至创利运行, 为污水处理工程的长期发挥效益提供有利保证.

收稿日期: 2005 - 08 - 11

基金项目: 国家重大科技专项(K99 - 05 - 35 - 02)

作者简介: 卢少勇(1976 -), 男, 湖南郴州人, 助理研究员, 博士.

运行费用高一直是国内污水处理系统大规模连续运行的主要限制条件. 因此在人工湿地系统中探索出运行费用低而处理效果好的工艺具有重要的现实意义. 沸石不仅是良好的氮氮吸附材料而且还可吸附磷^[2-3], 现有以沸石为填料的湿地系统的研究中主要采用潜流沸石^[4-7], 有的与植物(生长在沸石层中)组合, 有的在沸石层上填充土壤(文中为底铺沸石). 这些系统的共同特点是沸石层厚度达 50 cm 以上, 沸石用量大, 因此与沸石相关的采购、运输、填充和人工再生等的费用高. 目前关于填料对氮、磷的作用的研究要么局限于实验室中的吸附解吸实验; 要么未涉及人工湿地常见植物与表铺沸石及微生物

的协同效应, 而且关于沸石在农田排灌水中的处理的报道不多见. 因此笔者针对湿地中采用沸石用量少和易再生的前置沸石(沸石段置于植物段之前)、表铺沸石(沸石层置于湿地植物段的表面)和底铺沸石(沸石表面为土壤)3 种填充方式^[8], 研究不同沸石填充方式及不同优势植物的湿地系统对污染物的去除效果.

1 材料和方法

中试系统位于云南省昆明市呈贡县大渔乡新村下游滇池东岸(中试系统的西南侧为排涝泵站, 二者之间仅隔一条宽 4 m 的马路和一条宽 2.5 m 的沟渠), 如图 1 所示.

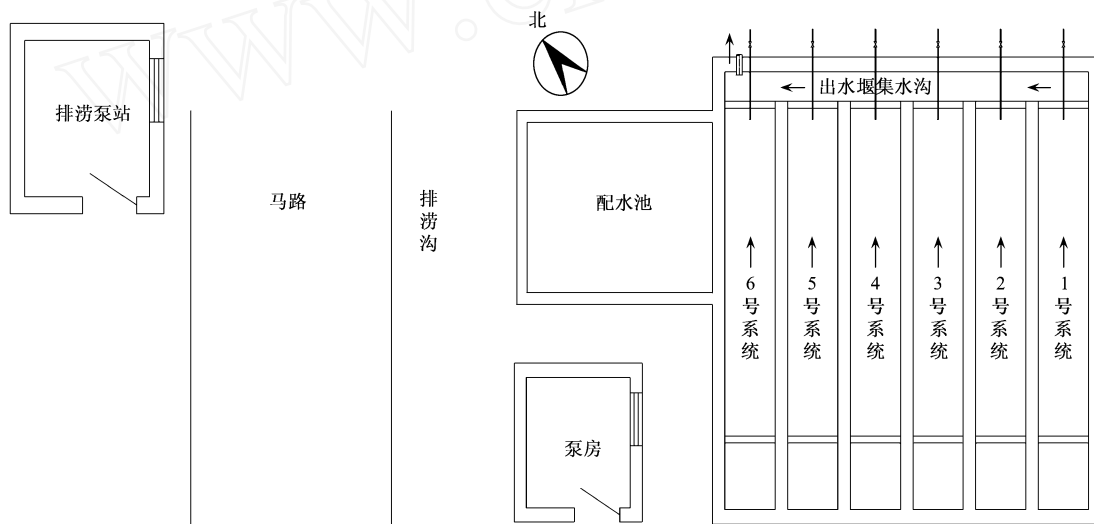


图 1 中试湿地示意图

Fig. 1 Location schematic diagram of the pilot wetland

实验系统构建于 2001 年 3 月, 实验在 2002 年 10 月 17 日—11 月 23 日进行, 共运行 38 d, 水力负荷为 10 cm/d.

所采水样的总氮、氨氮、总磷和 COD_{Cr} 分别采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, 纳氏试剂光度法, 钼锑抗分光光度法和重铬酸钾法测定^[9]. 温度、pH 和溶解氧采用 HACH 探头测定. 在实验结束后, 从有植物的湿地中采取芦苇 (*phragmite australis*) 和茭白 (*zizania caduciflora*) 各 0.1 m², 仅取地上部分(割后植物残留高度为 30 cm), 洗净, 擦干植株表面的水分, 测定质量和含水率, 方法见文献[10].

中试各系统的沸石填充和植物栽种情况见表 1. 设置 2 号系统、3 号系统和 5 号系统, 以考察前置、底铺与表铺沸石的污染物去除效果; 设置 1 号系统和 4 号系统, 以考察前置沸石的污染物去除效果.

设置 4 号(茭白)系统和 6 号(空白)系统, 以考察污染物去除效果. 进水水质见表 2. 进水 15 d 后(11 月 1 日)开始采样, 该阶段气温为 16.3~21.0, 平均气温为 18.1.

2 结果和讨论

进水和出水中的 $\rho(\text{总氮})$, $\rho(\text{氨氮})$, $\rho(\text{总磷})$ 和 $\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})$ 如图 2 所示, 其平均去除率见图 3.

由表 2 和图 2 可见, 系统的进水水质波动较大. 这是因为这些系统的进水来自周边沟渠, 沟渠径流由村民生活排水、农田排水以及灌溉余水组成, 实验期间属于当地的旱季, 降雨很少, 因此不考虑雨水径流. 生活排水与人的生活习惯密切相关, 饭前和饭后的洗刷、衣物洗涤、洗澡时生活排水量大; 田间耕作时农田排水和灌溉余水水量较大; 灌溉余水、农田排水和生活排水中的碳、氮和磷的含量具有一定的差

表 1 湿地系统中沸石填充、植物栽种和生长情况

Table 1 Zeolite filling , hydrophytes planting and hydrophytes growth in wetland beds

项目	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号
沸石填充方式	前置	前置	底铺	—	表铺	—
栽种植物	茭白	芦苇	芦苇	茭白	芦苇	空白
植物含水率/ %	51.3	54.2	40.4	52.3	55.5	—
植物生物量/(kg m ⁻²)	1.46	1.56	1.00	1.46	1.69	—
沸石填充区尺寸/cm	90 ×110 ×100	90 ×110 ×100	500 ×100 ×40	—	500 ×100 ×2	—
沸石体积/m ³	0.10	0.10	2.00	—	0.10	—
沸石质量/kg	109	109	2180	—	109	—

表 2 进水水质

Table 2 Inflow water qualities

指标	$\rho(\text{总氮})/(\text{mg L}^{-1})$	$\rho(\text{氨氮})/(\text{mg L}^{-1})$	$\rho(\text{总磷})/(\text{mg L}^{-1})$	$\rho(\text{COD}_{\text{Cr}})/(\text{mg L}^{-1})$	pH	$\rho(\text{DO})/(\text{mg L}^{-1})$	水温/
最高值	11.5	3.61	1.61	117	7.66	1.30	17.4
最低值	6.15	0.88	0.29	55.7	7.26	0.55	14.1
平均值	9.04	2.28	1.00	99.5	7.55	1.03	15.7

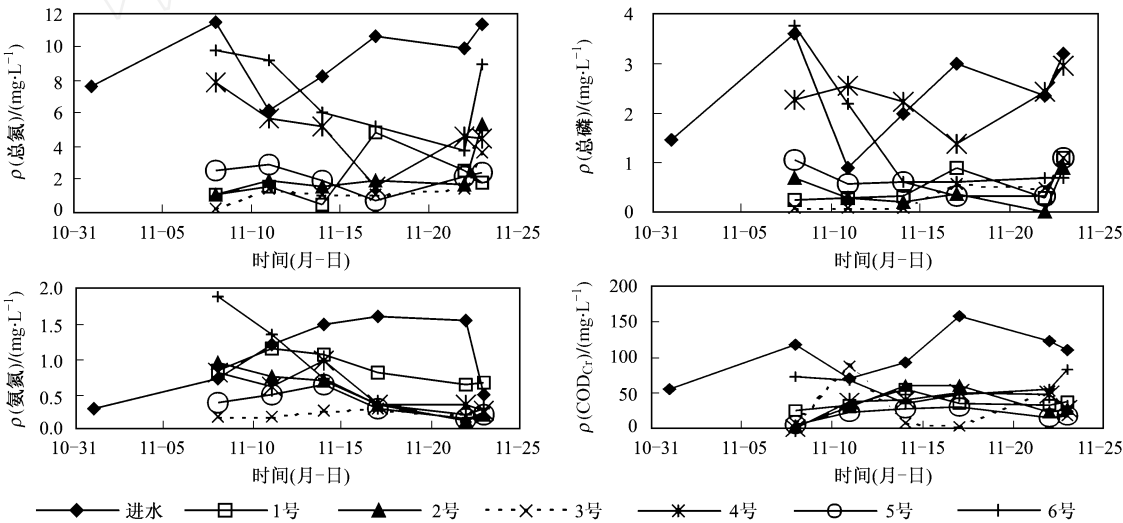


图 2 进水和出水水质情况

Fig. 2 Water quality of influent and effluent

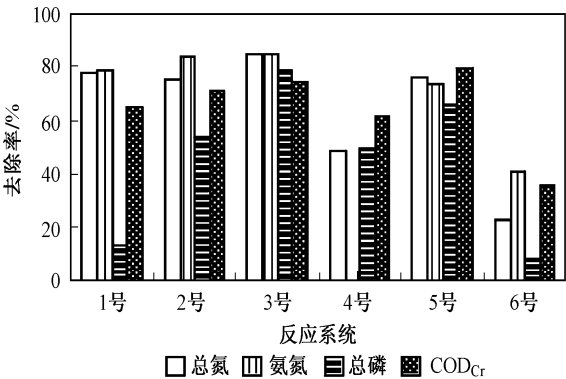


图 3 总氮、氨氮、总磷和 COD_{Cr} 平均去除率

Fig. 3 Average removal rate of total nitrogen , ammonia , total phosphorus and COD_{Cr}

异性. 因此沟渠径流的水量和水质差异较大, 呈现一定的波动性.

鉴于稳态系统中亚硝氮的含量较低, 因此有机氮为总氮扣除硝氮和氨氮, 以总氮为 100 % 计, 可得到进水和出水中的氮形态如图 4 所示.

由图 2 和图 4 可见, 进水氮中, 以有机氮(平均占总氮的 74.1 %)为主, 其次为氨氮(平均占总氮的 25.2 %), 而硝氮的比例很低. 这可能是因为实验期间为植物衰亡期, 在沟渠径流的流动过程中, 汇集部分生物残体并携带到下游.

在各个系统的出水中, 有机氮占总氮的比例为 48.7 % ~ 79.3 %, 4 号系统最低, 6 号系统最高; 氨氮占总氮的比例为 17.5 % ~ 47.1 %, 2 号系统最低, 4

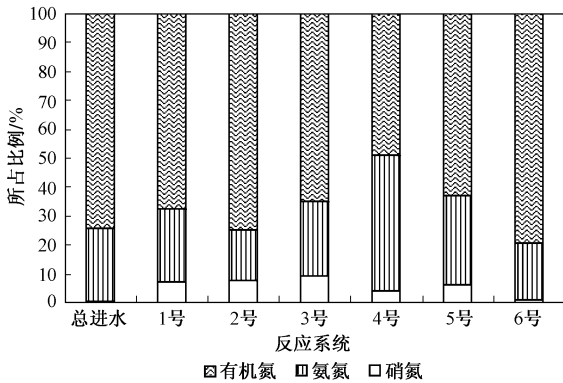


图 4 进水和出水中的氮形态

Fig. 4 Nitrogen forms of Influent and Effluent

号系统最高;硝氮占总氮的比例为 1.0%~9.0%,6 号系统最低,3 号系统最高。

由图 2 可见,自 11 月 8 日起,各系统的出水水质相对稳定。

由图 2,3 可得到以下因素对污染物去除效果的影响:

2.1 芦苇湿地中 3 种沸石填充方式

2 号系统、3 号系统和 5 号系统均种植芦苇,沸石填充方式分别为前置、底铺和表铺。这三者之中,3 号系统去除氮和磷的能力最强,这是因为 3 号系统的沸石用量远大于其他系统。5 号系统的 COD_G 去除效果最好,这可能是由于沸石和芦苇根围环境的有效结合促进了 COD_G 的降解,而且表铺沸石的铺设增强了保温作用,增加了表土层的孔隙度而起到优化水流的作用;5 号系统对总氮的去除效果略高于 2 号系统,对总磷的去除效果优于 2 号系统。5 号系统和 2 号系统的芦苇生物量相近,且沸石投量相同,这表明沸石填放在湿地表面比前置于湿地进水口好,而比种植相同植物的无沸石湿地有更好的处理效果。

5 号系统的处理效果也远好于未放置沸石而种植茭白的 4 号系统,这更进一步证明表铺沸石的作用。

2.2 表铺和前置沸石填充方式

1 号系统和 4 号系统的优势植物种类相同,长势相当,但 1 号系统对总氮、氨氮和 COD_G 的去除效果优于 4 号系统。这主要是因为前置沸石段的作用,可能是因为沸石表面上有生物膜形成。不过 1 号系统的总磷去除效果比 4 号系统差,这可能是该实验阶段之前的前置沸石所吸附的磷被释放。

1 号系统和 4 号系统相比,可知增加前置沸石

段导致 COD_G 的去除率提高 3.4%,而 2 号系统和 5 号系统相比,可得出表铺沸石的 COD_G 去除率比前置沸石的提高 8.9%,因此可近似得出加表铺沸石后可比原植物系统提高 12.3%。

2.3 有无植物及植物类型

4 号系统和 6 号系统相比,总氮、总磷和 COD_G 的去除率均是含茭白的系统高,足见植物对湿地系统运行效果的改善作用,这主要是因为:植物光合作用为湿地充氧;植物为湿地中的微生物等提供良好的环境;植物水下部分具有很好的水流分布功能;植物本身因生长需要而吸收营养物。

1 号系统和 2 号系统均铺设前置沸石,所种植物分别为茭白和芦苇,两者的生物量相当,如前所叙,1 号系统的磷去除率低是前置沸石的释放而造成的,那么 1 号系统和 2 号系统对总氮、总磷和 COD_G 的去除效果相近,这说明在秋季中后期,以芦苇为优势种的湿地和以茭草为优势种的湿地去除总氮、总磷和 COD_G 的能力相当。

2.4 应用前景

从运行成本考虑,沸石用量仅为底铺沸石的 1/9 的表铺沸石比底铺沸石具有更好的经济性,更适用于大规模湿地工程的应用。

3 结论

a. 沸石 - 土壤 - 植物系统比传统的土壤 - 植物系统具有更好的 COD_G 、总氮和氨氮去除效果。

b. 3 种不同沸石填充方式中,底铺沸石的总氮和总磷去除效果最好;表铺沸石的总氮、总磷和 COD_G 去除效果比前置沸石的好,而比种植相同类型植物的无沸石湿地有更好的处理效果。含植物和土壤的湿地系统在增加前置沸石段后 COD_G 的去除率升高 3.4%,增加表铺沸石后 COD_G 的去除率提高 12.3%。

参考文献:

- [1] Office of Water, US EPA. Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment: a technology assessment [M]. Washington D C: USEPA, 1993.
- [2] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems [J]. Water Res, 1998, 32(2): 393—399.
- [3] Drizo A, Frost C A, Grace J, et al. Physico-chemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems [J]. Water Res, 1999, 33(17): 3595—3602.
- [4] 杨敦,徐丽花,周琪. 潜流式人工湿地在暴雨径流污染控制中应用 [J]. 农业环境保护, 2002, 21(4): 334—336.

- Yang Dun, Xu Lihua, Zhou Qi. Application of subsurface flow constructed wetlands in controlling storm runoff pollution [J]. Agro-environmental Protection, 2002, 21(4): 334—336.
- [5] 李旭东. 农田降雨径流氮磷污染控制沸石湿地研究 [D]. 北京:中国地质大学, 2003.
- Li Xudong. Nitrogen and phosphorus pollution control of farm rainfall runoff in zeolite media subsurface constructed wetland system [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2003.
- [6] 张荣社. 人工湿地去除农业区暴雨径流中氮磷的研究 [D]. 上海:同济大学, 2003.
- Zhang Rongshe. The study on nitrogen and phosphorous removal in constructed wetland treating agriculture areas stormwater runoff [D]. Shanghai: Tongji University, 2003.
- [7] 唐崇鹏, 张旭, 李广贺. 沸石-茭白复合床技术脱氮中试研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(2): 52—55.
- Tang Chongpeng, Zhang Xu, Li Guanghe. Pilot study on nitrogen removal by zeolite and zizania caduuciflora combined bed technology [J], Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004, 5(2): 52—55.
- [8] 卢少勇. 农田排灌水的人工湿地处理技术及工程示范研究 [D]. 北京:清华大学, 2004.
- Lu Shaoyong. Technological and engineering demonstration research on constructed wetland for agricultural irrigation and drainage wastewater treatment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [9] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 第4版. 北京:中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration of China. Monitoring and analytical method of water and wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- Lu Rukun. Analytic method of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: Agricultural Scientific and Technical Press of China, 2000.
- (责任编辑:孔 欣)