

生物炭添加对人工湿地中污染物去除和基质微生物活性的影响

许巧玲, 汪丽, 谭敏霞, 耿和军, 王晓蕾, 李佳杰

(安顺学院资源环境学院, 贵州 安顺 561000)

摘要: 为提高人工湿地除污能力, 探索利用生物炭强化人工湿地除污的可行性, 以垂直流人工湿地为研究对象, 通过单因素分析对比不添加生物炭系统(CW-1)和添加生物炭系统(CW-2)的垂直流人工湿地出水净化效果、微生物活性(基质酶活性、生物量、生物膜)大小, 探究生物炭对垂直流人工湿地污水系统中总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、总磷(TP)及化学需氧量(COD)去除效果的影响, 分析生物炭对垂直流湿地基质中酶活性、生物量和生物膜量的影响。结果表明, 通过添加生物炭, TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD的平均去除率分别提高3.0、1.1、2.7、0.1百分点, 添加生物炭湿地(CW-2)的去除率高于未添加生物炭湿地(CW-1); 生物炭添加促使湿地基质中磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶活性和生物量增加, 对0~10 cm基质层中酶活性的促进作用尤其显著, 0~10 cm基质层酶活性和生物量含量显著($P<0.05$)高于其他2层(10~20 cm和20~30 cm)。结果证明, 在人工湿地中添加生物炭可以提高氮、磷、化学需氧量的去除效果, 并可显著提高0~10 cm基质层中酶活性和生物量水平, 从基质酶和生物量角度看, 添加生物炭有助于提高人工湿地长效除污潜力, 但生物炭的添加也增加了20~30 cm层的生物堵塞风险。

关键词: 生物炭; 垂直流人工湿地; 净化效果; 酶活性; 生物量

中图分类号: X703

文献标志码: A

文章编号: 1001-1463(2022)01-0063-05

doi:10.3969/j.issn.1001-1463.2022.01.015

Effects of Biochar Addition on Pollutant Removal and Substrate Enzyme Activity in Vertical Flow Constructed Wetlands

XU Qiaoling, WANG Li, TAN Minxia, GENG Hejun, WANG Xiaolei, LI Jiajie

(Department of Resources & Environmental Engineering, Anshun University, Anshun Guizhou 561000, China)

Abstract: In order to improve the water quality using constructed wetland and explore the use of biochar strengthening constructed wetland decontamination feasibility, the vertical flow constructed wetland were taken as the research object in this experiment. Through the single factor analysis, the decontamination, substrate enzyme activity and biomass between the no addition biochar system (CW-1) and the addition biochar system (CW-2) were compared. The effects of biochar on the removal effect of total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD) in the sewage system of vertical flow constructed wetland were explored, and the effects of biochar on the enzyme activity, biomass and biofilm quantity in the vertical flow wetland were analyzed. The results showed that by adding biochar, the average removal rates of TN, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP and COD increased by 3.0%, 1.1%, 2.7% and 0.1%, respectively. The removal rate of CW-2 wetland was slightly higher than that of CW-1 wetland. Biochar supplementation increased the activities and biomass of phosphatase, urease and catalase in substrate, especially in 0-10 cm substrate layer, and the activities and biomass contents in 0-10 cm substrate layer were significantly higher than those in other two layers (10-20 cm and 20-30 cm) ($P<0.05$). The results showed that adding biochar to constructed wetland could improve the removal efficiency of nitrogen, phosphorus and chemical oxygen demand, and significantly increase the enzyme activity and biomass in 0-10 cm substrate layer. From the perspective of substrate enzyme and biomass, adding

收稿日期: 2021-11-25

基金项目: 贵州省普通高等学校科技拔尖人才支持计划项目(黔教合KY[2016]097); 贵州省科技计划项目(黔科合LH字[2016]7283); 博士启动基金(asubsjj201607)。

作者简介: 许巧玲(1985—), 女, 山东泰安人, 副教授, 博士, 主要从事水处理方向的研究工作。Email: amy.198510@163.com。

biochar could improve the long-term sewage removal potential of constructed wetland. However, the addition of biochar also increased the risk of biological blockage in 20~30 cm layer.

Key words: Biochar; Vertical flow constructed wetland; Purification effect; Enzyme activity; Biomass

人工湿地利用填料的吸附作用、微生物降解作用和植物吸收等作用去除水中的污染物,利用人工湿地除污是一种处理效果好、成本低、有前景的生态处理技术^[1-2]。很多研究证实植物吸收污染物所占比例较小^[2-4],填料吸附和微生物降解在湿地水质净化中占比较大^[5-6],因此,提高基质吸附能力和强化微生物活力可以有效提升人工湿地系统的除污效果。生物炭是废弃生物质在厌氧条件下热解得到的富碳产物^[7-8],作为一种多功能环保材料,具有较大的比表面积、高的多孔结构和较强的阳离子交换能力,为微生物的生长提供巨大的空间,同时具有良好的吸附特性,可以有效地去除废水中的污染物。有研究证明生物炭的添加可以改变微生物群落结构,从而提高氮的去除效果^[9]。近些年,生物炭被广泛用于固碳减排、含氮废水处理及土壤修复改良等方面的研究与实践^[10-12]。人工湿地根据其水流方式不同分为表面流湿地、潜流湿地和垂直流湿地3种类型。其中,垂直流人工湿地占地面积较小,有较强的输氧能力^[13],对污染物去除有较好的效果,因此被广泛应用于污水处理中。根据生物炭具有多孔和吸附能力的性质,我们在垂直流人工湿地中添加一定量生物炭强化湿地对污水中污染物的去除。首先模拟构建2个垂直流人工湿地,分别为未添加生物炭的湿地CW-1和添加生物炭的湿地CW-2,为排除植物对人工湿地系统的干扰,更直观地研究添加生物炭对人工湿地中基质酶活性和生物量的影响,同时监测2个系统中氮、磷和化学需氧量的去除变化,为人工湿地强化长效除污提供依据。

1 材料与方法

1.1 构建人工湿地

试验设置2个规模相同的垂直流人工湿地。人工湿地自下而上依次铺设15 cm厚的砾石块,30 cm厚的基质层,20 cm的布水区。CW-1为未

添加生物炭的对照系统(基质层为30 cm河砂),CW-2为添加生物炭的系统(基质层为29 cm河砂+1 cm生物炭)。系统在运行稳定后,于9月13日开始正式运行,采用计量水泵灌水,水力负荷为10 cm/d。每7 d检测水质指标1次。

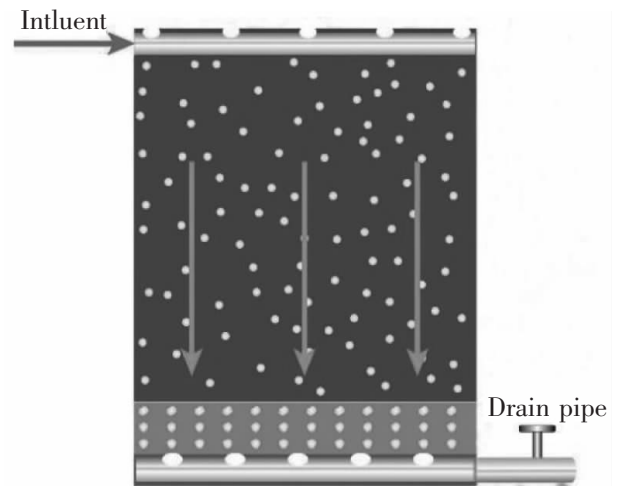


图1 垂直流人工湿地剖面

1.2 进水水质

试验污水为合成生活污水,参数值如下:溶解氧(DO)为4~6 mg/L, pH的变化范围为7.3~7.9。总氮(TN)为33.9~40.7 mg/L、氨氮(NH₄⁺-N)为22.1~30.5 mg/L、总磷(TP)为5.6~6.2 mg/L、化学需氧量(COD)为238.0~504.3 mg/L。

1.3 指标检测方法

水质指标: TN、NH₄⁺-N、TP、COD采用国标法测定^[14]。

酶活性指标: 脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性测定采用关松荫^[15]的方法。

1.4 数据分析

利用origin 9.0和SPSS(IBM)-26.0软件计算分析平均值和标准误差。本文的统计分析重复为绝对样品重复。

2 结果与讨论

2.1 添加生物炭对净化效果的影响

CW-2和CW-1中TN的平均去除率分别为

23.8%、20.8%， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别为 21.3%、20.2%，COD 的平均去除率分别为 77.9%、77.8%，TP 的平均去除率分别为 29.5%、26.8% (图 2)。可见试验中添加生物炭的 CW-2 系统对污染物的去除效果高于不添加生物炭基质的对照系统 CW-1。基质中添加生物炭，TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、COD 的平均去除率分别提高 3.0、1.1、2.7、0.1 百分点。添加生物炭对 COD 的去除几乎无影响，2 个系统的 COD 去除率都大于 77%，由于垂直流人工湿地有较好的输氧能力，对有机物去除能力较强^[16]；对磷的去除影响最大，试验结束时 CW-2 中 TP 去除率为 4.0%，CW-1 中 TP 去除率呈现负值，为 -9.8%，这也验证了人工湿地中除磷主要通过基质吸附^[5]。结果证明，从长远看，添加生物炭可以提高湿地系统的长效脱氮除磷能力。

2.2 添加生物炭对基质酶活性的影响

从图 3 可以看出，CW-1 和 CW-2 中的脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶基本都表现出一致规律，除 10~20 cm 层过氧化氢酶外，其他都表现出系统 CW-2 大于 CW-1。究其原因基质中添加生物炭有利于微生物在基质层附着繁殖，从而增加了相关酶活性，这种影响在 0~10 cm 基质层表现尤为突出。通过对不同基质层酶活性方差分析得知，0~10 cm 层的酶活性显著 ($P < 0.05$) 高于 10~20 cm 和 20~30 cm 层。CW-1 系统中 0~10 cm 基质层中的脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性分别为 6.3 mg/(100 g·24 h)、21.1 mg/(100 g·24 h)、0.110 mL/(g·20 min)；CW-2 系统中 0~10 cm 基质层中的脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性分别为 21.9 mg/(100 g·24 h)、56.9 mg/(100 g·24 h)、0.113 mL/(g·20 min)。

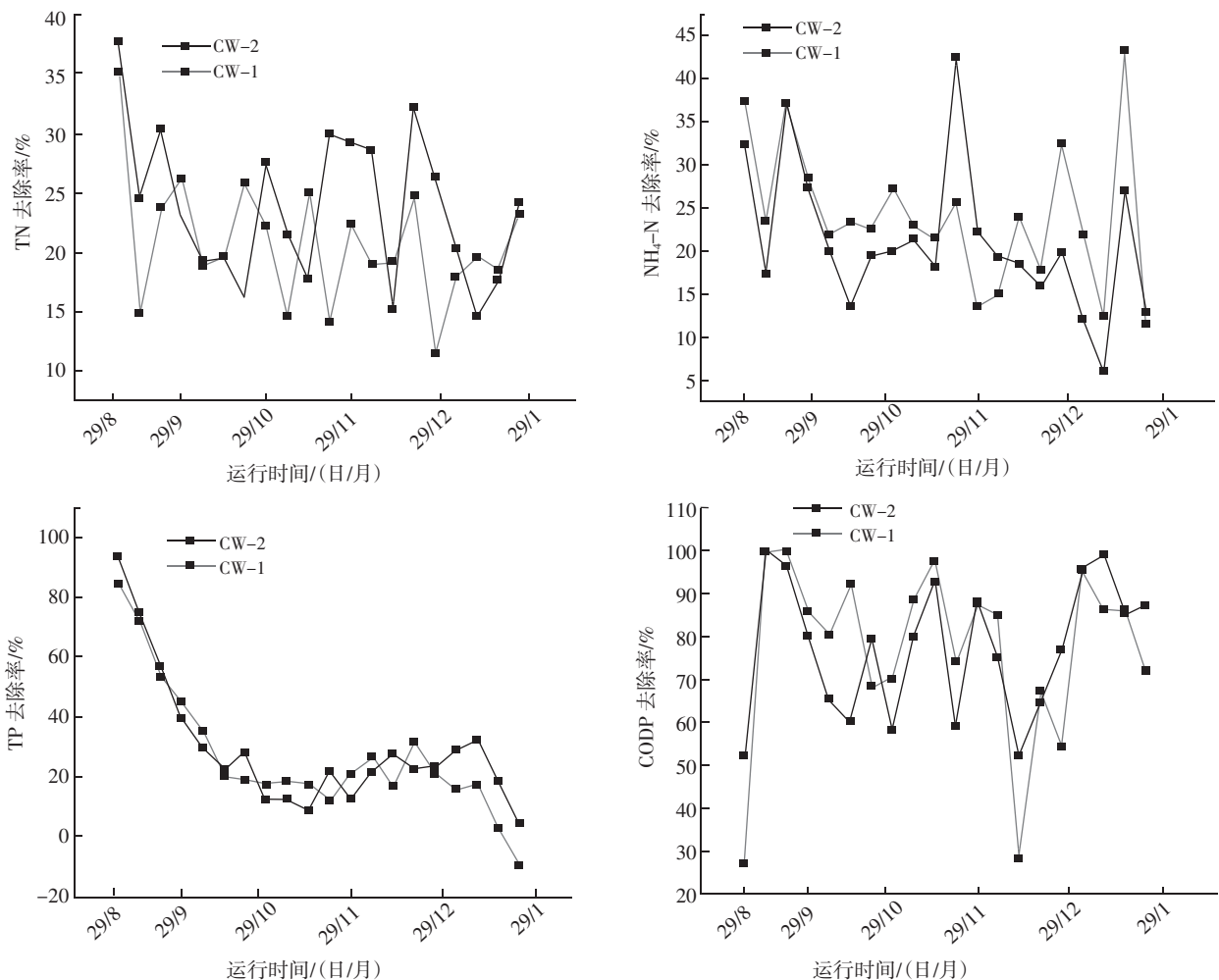


图 2 不同湿地系统净化效果变化

添加生物炭的 CW-2 系统中脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性比未添加生物炭的 CW-1 系统分别高出 3.5、2.7、1.03 倍, 大量研究已经证实人工湿地中酶活性与污染物去除有正相关关系^[17-19]。从酶活性角度看, 添加生物炭可以显著提高基质中微

生物活性, 随着系统运行, 基质吸附将趋于饱和, 提高微生物活性的优势会日益凸显, 从而实现长效除污的目标。

2.3 添加生物炭对基质中生物量和生物膜的影响

人工湿地属于生物过滤系统范畴, 主要依靠植物吸收、基质吸附和微生物作用除污, 湿地基质也被称为填料, 是微生物生长繁殖的主要载体^[20]。填料中生物量和生物膜的水平可以直接反映微生物状况。从生物量角度看, 添加生物炭的 CW-2 系统中生物量大于 CW-1, 2 个系统都呈现相同规律, 由大到小为 0~10、10~20、20~30 cm, 说明垂直流人工湿地中 0~10 cm 层是微生物活动最活跃区域, 这与之前的研究结果类似^[16]。通过对生物膜的监测发现生物膜在 2 个系统间的变化与生物量是一致的, 都是系统 CW-2 大于系统 CW-1, 但在基质垂向的变化与生物量不同, 呈现规律由大到小为 20~30、0~10、10~20 cm。究其原因是随着系统运行, 生物膜新旧更替, 脱落的生物膜会随水流方向往下迁移, 最终会在底层沉淀累积。从生物膜迁移和累积也说明垂直流人工湿地中合理分配基质粒径尤为重要, 随着生物膜的日益累积, 增加了 20~30 cm 层生物堵塞的风险。

3 结论

试验通过对添加生物炭 CW-2 和未添加生物炭 CW-1 2 组垂直流人工湿地进行为期 120 d 的监测, 研究这 2 个垂直流人工湿地对污染物的净化效果, 探究生物炭的添加与否对湿地除污效果、基质酶活性、生物量和生物膜的影响。结果表明, 生物炭的添加可以提高垂直流人工湿地的水质净化能力。添加生物炭湿地 CW-2 的污染物去除率高于未添加生物炭湿地 CW-1, TN、NH₄⁺-N、TP、COD 的平均去除率分别提高 3.0、1.1、2.7、0.1 百分点。生物炭的添加可以促使基质中磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶活性和生物量的增加。0~10 cm 基质层酶活性和生物量含量显著 ($P < 0.05$) 高于其他 2 层 (10~20 cm 和 20~30 cm), 说明生物炭与湿地系统契合良好, 且在垂直流人工湿地中 0~10 cm

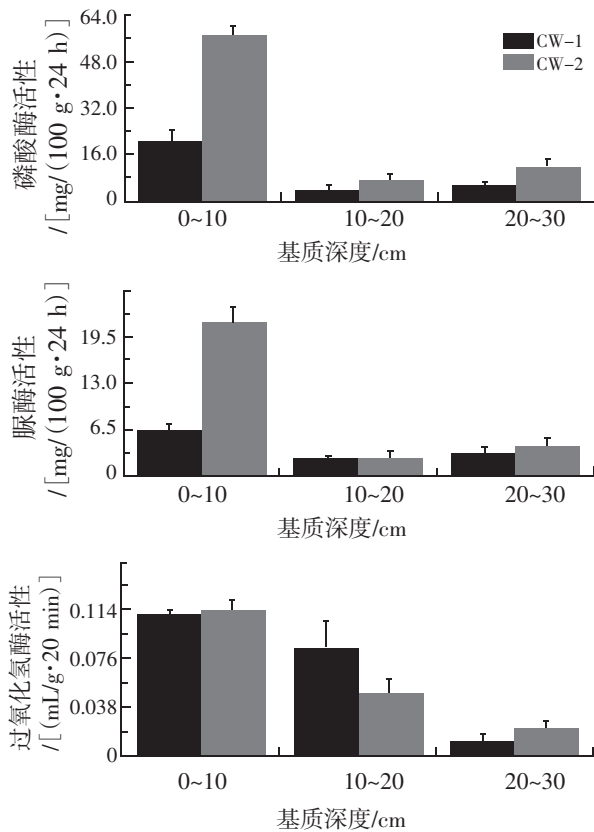


图 3 系统不同基质层中酶活性

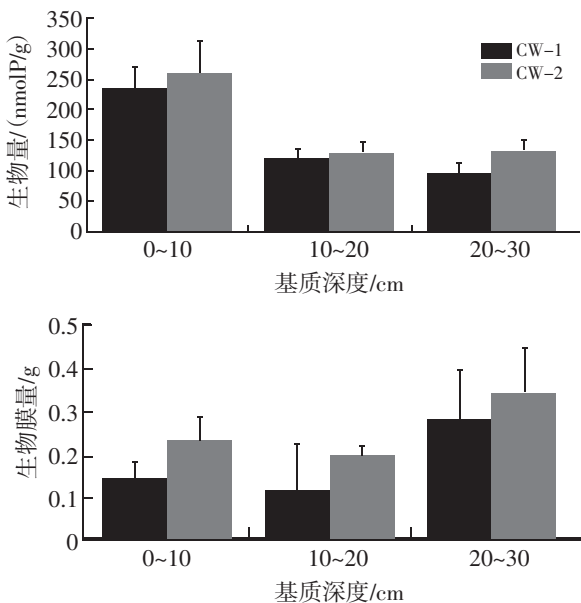


图 4 系统基质层中生物量和生物膜分布情况

层是微生物活跃区,也是降解污染物的主要场所。生物炭的添加增大了底层基质的生物堵塞风险。生物膜在基质垂向的变化由大到小为20~30、0~10、10~20 cm,因为垂直流人工湿地水流特点,脱落的生物膜会随水流方向往下迁移,最终在20~30 cm层沉淀累积,底层基质层(20~30 cm)有发生生物堵塞的风险。因此,在垂直流人工湿地中合理分配基质粒径,适度增大底层基质粒径显得尤为重要。

参考文献:

- [1] KNIGHT R L, PAYNE V W E, BORER R E. Constructed wetlands for livestock wastewater management [J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15: 41-45.
- [2] XU Q L, HUNAG Z J, WANG X M, et al. Pennisetum sinese Roxb and Pennisetum purpureum Schum. as vertical-flow constructed wetland vegetation for removal of N and P from domestic sewage [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83: 120-124.
- [3] 李林锋, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献 [J]. *环境科学研究*, 2009, 22(3): 337-342.
- [4] 尹 炜, 李培军, 裘巧俊, 等. 植物吸收在人工湿地去除氮、磷中的贡献 [J]. *生态学杂志*, 2006(2): 218-221.
- [5] 王 振, 刘超翔, 董 健, 等. 人工湿地中除磷填料的筛选及其除磷能力 [J]. *中国环境科学*, 2013(2): 1-7.
- [6] XU Q, LU S, YUAN T, et al. Influences of dimethyl phthalate on bacterial community and enzyme activity in vertical flow constructed wetland [J]. *Water*, 2021, 13(6): 788.
- [7] GUPTA P, ANN T W, LEE S M. Use of biochar to enhance constructed wetland performance in wastewater reclamation [J]. *Environmental Engineering Research*, 2015, 21: 36-44.
- [8] HOU J, HUANG L, YANG Z, et al. Adsorption of ammonium on biochar prepared from giant reed [J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2016, 23(19): 1-9.
- [9] DENG C R, HUANG L, LIANG Y K, et al. Response of microbes to biochar strengthen nitrogen removal in subsurface of constructed wetlands: Microbial community structure and metabolite characteristics [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 694: 133687.
- [10] FU D, CHEN Z, XIA D, et al. A novel solid digestate-derived biochar-Cu NP composite activating H₂O₂ system for simultaneous adsorption and degradation of tetracycline [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221: 301-310.
- [11] 陈志良, 袁志辉, 黄 玲, 等. 生物炭来源、性质及其在重金属污染土壤修复中的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(11): 1879-1884.
- [12] 朱小婕, 邵景安, 赵 培. 生物炭添加对潜流湿地污水净化效率的影响 [J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(2): 121-129.
- [13] DU X L, XU Z X, SHENG W, et al. Optimising the operating performance of vertical flow constructed wetland treating rural wastewater [C]. *The 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, 2009.
- [14] 国家环境保护局. 水、废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究方法 [M]. 北京: 北京农业出版社, 1986.
- [16] XU Q L, CUI L H. Removal of COD from synthetic wastewater in vertical flow constructed wetland [J]. *Water Environment Research*, 2019, 91: 1661-1668.
- [17] 黄 娟, 王世和, 鄢 璐, 等. 潜流型人工湿地的脲酶活性分布特性 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2008 (1): 170-173.
- [18] 岳春雷, 常 杰, 葛 滢, 等. 复合垂直流人工湿地基质酶活性及其与水质净化效果之间的相关性 [C]. *湖泊保护与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛*, 2014.
- [19] 许巧玲, 王小毛, 崔理华, 等. 垂直流湿地基质中酶的分布与氮磷及有机质的关系 [J]. *环境科学研究*, 2016(8): 1213-1217.
- [20] 高廷耀, 顾国维, 周 琪. 水污染控制工程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.