

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.12
第41卷 第12期

目次(卷终)

我国地级及以上城市臭氧污染来源及控制区划分	闫慧, 张维, 侯墨, 李银松, 高平, 夏青, 孟晓艳, 范丽雅, 叶代启 (5215)
2015~2018年我国PM _{2.5} 健康损害价值的动态评估	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (5225)
2011~2017年中国PM _{2.5} 多尺度时空分异特征分析	杨文涛, 谯鹏, 刘贤赵, 雷雨亮 (5236)
关中地区PM _{2.5} 时空演化及人口暴露风险	黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 王森, 黄馨 (5245)
中原城市冬季两次重污染形成机制及来源	贾佳, 丛怡, 高清敏, 王玲玲, 杨静静, 张国辉 (5256)
西北工业城市冬季PM _{2.5} 污染特征及理化性质	杨燕萍, 陈强, 王莉娜, 杨丽丽 (5267)
基于PMF模型的PM _{2.5} 中金属元素污染及来源的区域特征分析	邓林俐, 张凯山, 殷子渊, 李欣悦, 武文琪, 向梓鹏 (5276)
重庆主城区降尘中重金属污染特征及评价	张夏, 刘斌, 肖柏林, 王佳, 万达 (5288)
鄂尔多斯市夏秋季气溶胶新粒子生成过程影响因素分析	孔祥晨, 王红磊, 张连霞, 呼群, 李瑞峰, 许彩琴 (5295)
杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 王倩, 彭亚荣, 李英杰, 王红丽 (5306)
成都市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王波, 李英杰, 王成辉, 刘政, 钱骏 (5316)
石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析	王帅, 崔建升, 冯亚平, 刘大喜, 陈静, 田亮, 冯超, 王梦璇, 王学臣, 王婷婷 (5325)
厦门市工业源VOCs排放清单及控制对策分析	吴冬阳, 庄马展, 吴艳聪, 金磊, 吴义诚, 高攀峰, 刘建福, 金月正, 潘亚雷, 傅海燕 (5336)
建筑胶黏剂使用VOCs排放系数与排放清单	梁小明, 孙西勃, 苏燕花, 黄礼海, 陈锋, 任璐, 卢清, 赖君怡, 陈朋龙, 陈来国 (5345)
我国西北工业城市大气多氯联苯来源及健康风险	毛潇萱, 李子璇, 宋世杰, 章晓冬, 高宏, 李春新, 黄韬, 马建民 (5352)
基于广州塔观测的城市近地面甲醛垂直分布特征	黄山, 裴成磊, 张莹, 宋奇聪, 齐吉朋, 赵一鸣, 王鸣, 邵敏 (5362)
新水沙条件下长江中下游干流水体总磷时空变化分析	卓海华, 姜保峰, 吴云丽, 王瑞琳, 陈杰, 兰静 (5371)
三峡库区汉丰湖水体氮磷及化学计量比季节变化特征	钱田, 黄祺, 何丙辉, 李天阳, 刘淑婧, 付适, 曾荣昌, 向可翠 (5381)
衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价	张嘉雯, 魏健, 刘利, 王俭, 朱元荣, 段亮 (5389)
宜兴市横山水库底泥内源污染及释放特征	崔会芳, 陈淑云, 杨春晖, 唐婉莹, 殷鹏, 尹洪斌 (5400)
梅江流域清凉山水库沉积物重金属污染、生态风险评价及来源解析	江涛, 林伟稳, 曹英杰, 黎坤, 翟映雪, 李睿, 陈建耀 (5410)
汉江流域金水河与淇河潜在硝化速率及硝化功能基因的影响因子	赵彬洁, 王旭, 张健, 谭香, 何睿, 周全, 史航, 张全发 (5419)
山东省滨海旅游度假区水体环境典型全氟化合物污染特征及潜在生态风险	王世亮, 曹雪稚 (5428)
太湖重点区域多介质水体中有机磷酸酯的分布特征及来源解析	吕佳佩, 张振飞, 刘杨, 张恒, 王春英, 罗莹, 郭昌胜, 徐建 (5438)
岩溶地下水水体中有机氯农药和多氯联苯的残留特征及健康风险评价	叶凯, 孙玉川, 贾亚男, 朱琳跃, 徐昕 (5448)
澜沧江硅藻的地理分布模式与关键驱动因素	孙胜浩, 陈娟, 王沛芳, 王超, 王洵, 苗令占, 刘胜, 袁秋生 (5458)
白洋淀优势鱼类中喹诺酮类抗生素的生物累积特征及其与环境因子相关性	申立娜, 付雨, 张璐璐, 秦珊, 剧泽佳, 姚波, 崔建升 (5470)
生物炭粒径对负载MgO生物炭吸附水体中磷的影响	王鹏飞, 甄蒙蒙, 储昭升, 崔冠楠 (5480)
Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ 异质结光催化降解四环素-铜复合物	黄文鑫, 魏虎, 蒋彩云, 王玉萍 (5488)
超滤膜负载UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66强化PPCPs去除和膜污染控制	尹越, 吴道文, 孙梦瑶, 吕路, 张炜铭 (5500)
低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理中试	廖雪珂, 严晗璐, 王智源, 陈诚, 何东, 吴月龙, 陈求稳 (5509)
盐度渐增对水解微生物群落结构与功能的影响	高京, 张少华, 王锐, 金鹏康 (5518)
限NH ₄ ⁺ 和限NO ₂ ⁻ 厌氧氨氧化系统的运行特性及微生物种群特征	宋家俊, 朱明奕, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良 (5527)
厌氧氨氧化菌富集培养过程微生物群落结构及多样性	闫冰, 夏嵩, 桂双林, 付嘉琦, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (5535)
二价铁活化过氧化钙提高剩余活性污泥的脱水性能	毕薇薇, 阮书瑜, 陈昊傲啸, 梁方艺, 陈智文, 谢松儒, 唐晶, 邓靖 (5544)
中国北方某城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析	赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫 (5552)
我国南方水稻产地镉环境质量类别划分技术	窦韦强, 安毅, 秦莉, 林大松, 董明明 (5562)
晒在土壤-农作物系统中的分布特征及富硒土壤阈值	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周皎, 何忠庠, 梁绍标, 董金秀, 苏黎明 (5571)
广东鼻咽癌高发区土壤-作物系统重金属迁移特征及健康风险评价	叶脉, 张景茹, 张路路, 李朝晖, 李兴远, 周永章 (5579)
胺鲜酯与螯合剂GLDA联合强化柳枝稷吸收积累镉效果	王正, 孙兆军, SAMEH Mohamed, 王珍, 何俊, 韩磊 (5589)
毛竹遗态Fe/C复合材料对As(V)污染土壤的钝化修复性能	赵宁宁, 何豪, 冯国杰, 朱宗强, 方雅莉, 李超, 朱义年, 张立浩 (5600)
大麦虫幼虫肠道菌群对聚苯乙烯泡沫塑料降解	杨莉, 刘颖, 高婕, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮 (5609)
1株耐油甲醛降解菌的分离鉴定及降解特性	韩茜, 王蓉蓉, 史纯珍 (5617)
铜尾矿白羊草叶际和根际细菌群落特征	贾彤, 姚玉珊, 王瑞宏 (5628)
生物炭施用对再生水灌溉空心菜根际微生物群落结构及多样性的影响	崔丙健, 崔二革, 胡超, 樊向阳, 高峰 (5636)
废弃物基水热炭改良对水稻产量及氮素吸收的影响	侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余嫻, 杨林章 (5648)
基于GIS和PMF模型的石嘴山市土壤多环芳烃空间分布及来源解析	夏子书, 王玉玉, 钟艳霞, 白一茹, 王幼奇, 杨帆, 李鸣骥 (5656)
氮肥和秸秆还田方式对麦玉轮作土壤N ₂ O排放的影响	许宏伟, 李娜, 冯永忠, 任广鑫, 谢呈辉, 吕宏菲, 马星霞, 郝嘉琪 (5668)
《环境科学》第41卷(2020年)总目录	(5677)
《环境科学》征订启事(5344)	
《环境科学》征稿简则(5361)	
信息(5287, 5499, 5508)	

低温季节水平潜流和垂直潜流人工湿地尾水深度处理 中试

廖雪珂^{1,2}, 严晗璐^{2*}, 王智源², 陈诚², 何东³, 吴月龙³, 陈求稳^{2*}

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院生态环境研究所, 南京 210029; 3. 南京瑞迪建设科技有限公司, 南京 210029)

摘要: 人工湿地工作效率和作用机制在低温环境下与在适温条件下存在较大差别, 为探究水平潜流人工湿地与垂直潜流人工湿地在低温季节进行污水深度处理的效用与机制差异, 构建了两组潜流人工湿地, 分析其在不同碳氮比(C/N)条件下对有机物、总氮(TN)和总磷(TP)的净化效果, 考察了湿地基质表面、植物根际微生物分布差异。结果表明, 当进水COD浓度在37.50~80.00 mg·L⁻¹之间, 总氮和总磷浓度在《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级A标准内, 以2 m³·d⁻¹流量连续运行工况下: ①水平潜流和垂直潜流人工湿地均表现出稳定的有机物降解能力, 且对有机负荷有较强的抗冲击能力; ②补充碳源可显著提升潜流人工湿地的去氮效率, 添加碳源后, 水平潜流人工湿地TN平均去除率高达76.01%, 垂直潜流人工湿地TN平均去除率达到71.69%, 但碳源的添加对磷的去除无明显影响, 并且对水平潜流人工湿地污染物净化效果提升更显著; ③分析两种类型湿地基质和植物根际的微生物群落结构发现, 变形菌门、厚壁菌门和疣微菌门在两类湿地样品中均表现为优势菌门, 两种湿地基质表面样品微生物群落结构组成差异大于植物根际样品, 嗜氢菌属(*Hydrogenophaga*)、丹毒丝菌属(*Erysipelothrix*)和戴沃斯菌属(*Devosia*)对微生物群落差异贡献度最高; 整体而言, 垂直潜流人工湿地基质和植物根际微生物群落的物种多样性及丰富度高于水平潜流人工湿地。

关键词: 人工湿地; 低温; 尾水; 深度处理; 外加碳源; 微生物群落

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)12-5509-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202005183

Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons

LIAO Xue-ke^{1,2}, YAN Han-lu^{2*}, WANG Zhi-yuan², CHEN Cheng², HE Dong³, WU Yue-long³, CHEN Qiu-wen^{2*}

(1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Center for Eco-Environmental Research, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Nanjing R&D Tech Group Co., Ltd., Nanjing 210029, China)

Abstract: There were significant differences in the working efficiency and mechanism of constructed wetlands between low temperature and suitable temperature conditions. This study designed a horizontal subsurface flow constructed wetland (HFCW) and a vertical subsurface flow constructed wetland (VFCW) to explore their performance differences in advanced treatment of sewage based on contaminant degradation analysis including the removal of organic matters, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP), as well as the analysis of microbial community structure. The results showed that when the COD concentration of influent was between 37.50 to 80.00 mg·L⁻¹, the concentration of total nitrogen and total phosphorus were within the first level A criteria specified in the discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant at the continuous flow of 2 m³·d⁻¹: ①Both HFCW and VFCW showed stable degradation ability of organic matter in influent and good resistance to high organic load. ②Supplementation of the carbon source significantly improved the nitrogen removal efficiency of two subsurface flow constructed wetlands. HFCW achieved the average removal rate of TN at 76.01%, and the average removal rate of TN by VFCW reached 71.69% after the carbon addition. In contrast, dosage of an external carbon source showed limited effect on phosphorus removal. Furthermore, it worked more effectively for performance improvement of HFCW than that of VFCW. ③The analysis of microbial community structure in wetland substrate and plant rhizosphere samples revealed that Proteobacteria, Firmicutes, and Verrucomicrobia were the dominant phylum in two series of wetland samples. For the dominant microbiota at the genus level, there were more significant differences in microbial community structure in wetland substrate samples than that in plant rhizosphere samples. *Hydrogenophaga*, *Erysipelothrix*, and *Devosia* contributed the most to the differences between the microbial communities of HFCW and VFCW. Overall, the species diversity and abundance of microbial samples from VFCW was higher than those from HFCW.

Key words: constructed wetland; low temperature; tail water; advanced treatment; external carbon source; microbial community

收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-06-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809179); 江苏省水利科技项目(2017001ZB)

作者简介: 廖雪珂(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土资源与生态安全, E-mail: lxx155209@163.com

* 通信作者, E-mail: hlyan@nhri.cn; qwchen@nhri.cn

我国每年产生近亿吨污水处理厂尾水,若直接排放环境,不但向河湖输入大量氮磷负荷,易引起水体富营养化,而且是对潜在再生水资源的浪费^[1,2]. 人工湿地因工艺简单、缓冲容量大和抗冲击负荷能力强等优势,近年来在污水处理领域特别是污水处理厂尾水深度处理中得到广泛应用^[3,4]. 潜流人工湿地是指水流从湿地床体内部流过,主要类型包括水平潜流人工湿地(horizontal subsurface flow constructed wetland, HFCW)和垂直潜流人工湿地(vertical subsurface flow constructed wetland, VFCW). 相比于表面流人工湿地,潜流人工湿地与污水接触更充分,污染物去除率高且出水水质稳定,因此在污水深度处理中具有良好的推广应用前景,已广泛应用于生活污水、工业废水和养殖废水治理等领域^[5~7]. 但目前对二者的研究主要集中于湿地运行参数包括运行方式和水力条件的对比与优化方面^[8,9],对低温环境下水平潜流和垂直潜流人工湿地深度处理污水的效果和机制差别则鲜见报道. 而潜流湿地作为室外构筑物,存在运行效果易受低温影响的缺陷,在低于 15℃ 的环境下,人工湿地对于各种污染物,尤其是含氮污染物的去除效果将明显受到抑制^[10].

低温不仅造成湿地植物在生态和形态上的变化,导致植物对污染物吸收效果减弱,还会降低填料间氧传递效率,限制湿地对有机污染物的降解,甚至引起湿地堵塞等问题^[11]. 过低的环境温度还会影响湿地内部微生物群落结构与功能,从而影响其对污染物的代谢速率^[12]. 目前关于人工湿地微生物的研究大多局限于单个系统,缺乏多个系统之间的

对比,难以发掘人工湿地系统中共有菌属和功能菌^[13],尤其是低温下脱氮微生物环境行为亟需进一步研究.

本研究构建了两组人工潜流湿地,以湖北省某污水处理厂尾水为试验进水,并以相同进水流量连续运行. 本试验开展于 2019 年 10~12 月,进行 1~34 d 内温度变化范围为 15~22℃,34 d 后,温度变化范围为 8~15℃. 通过分析两种类型人工湿地中有机物、氮磷负荷去除效果,并从湿地填料、植物和微生物角度,进一步探讨水平潜流和垂直潜流湿地对污水处理厂尾水净化的作用机制差异,以期为低温环境下人工湿地污水深度处理的选择、运行和维护提供理论基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 试验装置设计

本试验装置池体采用经防腐处理的碳钢材料,水平潜流人工湿地反应器设计尺寸为长×宽×高=5 m×1.4 m×1.5 m,设计水深 1.1 m. 垂直潜流人工湿地反应器设计尺寸为长×宽×高=2.5 m×2 m×1.5 m,设计水深 1.1 m,具体装置结构如图 1.

本试验中水平潜流人工湿地填料选用砾石、火山岩和陶粒. 垂直潜流人工湿地填料选用砾石、生物炭、石灰石和沸石. 两湿地具体填料组成见表 1 和表 2.

综合考虑植物对关键污染物去除效果、对试验地气候的适应性等因素,本试验从待选湿地植物中优选出风车草和水葱,以 16 株·m⁻² 的密度种植于水平潜流湿地与垂直潜流湿地基质表层.

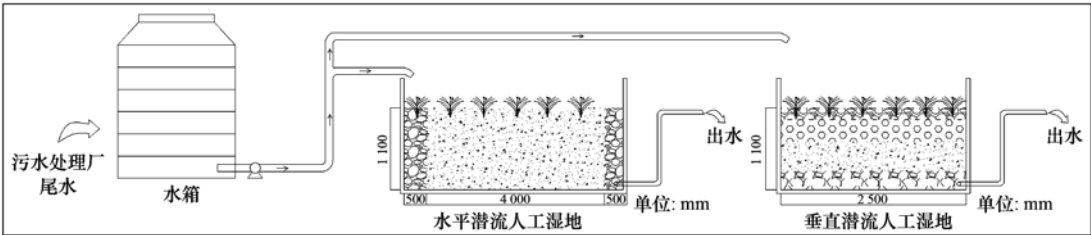


图 1 人工湿地试验装置示意

Fig. 1 Schematic of the experimental device of constructed wetlands

表 1 水平潜流人工湿地填料组成

Table 1 Composition of substrates of the horizontal subsurface flow constructed wetland

分区	粒径/mm	长度/mm	材料
进水区	16~32	500	砾石
滤料区	5~15	4 000	火山岩+陶粒+砾石
出水区	16~32	500	砾石

1.2 试验方案与监测分析

试验进水为污水处理厂尾水,尾水执行《城镇

表 2 垂直潜流人工湿地填料组成

Table 2 Composition of substrates of the vertical subsurface flow constructed wetland

分层	粒径/mm	厚度/mm	材料
覆盖层	8~16	150	砾石
滤料层	5~15	300	生物炭
	5~15	400	石灰石+沸石
过渡层	8~16	100	砾石
排水层	16~32	100	砾石
	50~60	50	砾石

污水处理厂污染物排放标准(GB 18918-2002)》中的一级 A 标准,湿地系统均以 $2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 的流量 24 h 连续进水. 对湿地进出水中化学需氧量(COD)、总氮(TN)和总磷(TP)指标参照文献[14]的方法进行监测,COD 测定使用重铬酸钾法(HJ/T 399-2007),总氮浓度测定使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012),总磷浓度测定使用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(GB 11893-1989). 进水主要水质指标情况如表 3 所示,基本稳定在一级 A 标准内.

表 3 湿地进水主要水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Major water quality indicators of wetland inflow/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$			
主要水质指标	COD	TN	TP
最低值	37.50	5.70	0.18
最高值	80.00	18.65	1.00
平均值	61.16	11.29	0.43

为研究投加碳源对湿地系统运行效果的影响,本研究于试验中期施行碳源投加措施,考察在较低碳氮比($\text{COD}/\text{TN} < 12$)和较高碳氮比($\text{COD}/\text{TN} \geq 12$)两种工况下两种类型人工湿地的净化效果. 将蔗糖作为外加碳源,在湿地运行 34 d 后以 $72 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的平均浓度向进水中投加. 投加碳源前试验进水 COD/TN 均值约为 6:1,投加碳源后 COD/TN 均值约为 19:1.

在湿地稳定运行中后期,分别于 HFCW 与 VFCW 表层下 20 cm 处,进出水口及中间 3 个位置采集基质样品,并对 3 个基质样品进行混合. 选取 HFCW 与 VFCW 中长势较好的风车草和水葱,取根际微生物样品,每种植物根际表面取两个平行样. 样品储存在聚乙烯袋中,随后立即转移至实验室进行后续分析.

2 结果与分析

2.1 温度对湿地主要污染物去除效果的影响

人工湿地运行效果易受环境温度的影响,图 2 对比分析了两种类型潜流湿地添加碳源前 COD、TN 和 TP 去除率随着温度的变化. 从中可知,温度变化对湿地去除 COD 和 TN 的影响显著($P < 0.05$),HFCW 与 VFCW 出水 COD 和 TN 去除率随温度降低而下降,但温度降低对除磷效果的影响并不明显($P > 0.05$).

2.2 主要水质指标改善效果分析

2.2.1 不同工况下 COD 去除效果

本试验期间持续监测 HFCW 和 VFCW 的进出水 COD 值,并计算相应的去除率,结果如图 3 所示. 从中可知,投加碳源前 HFCW 和 VFCW 出水 COD

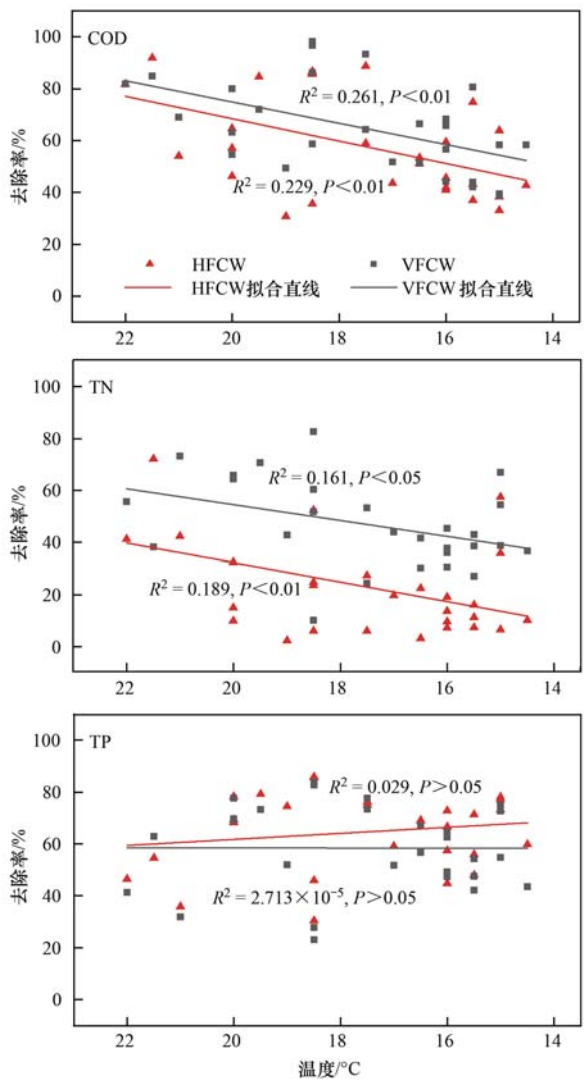


图 2 添加碳源前 COD、TN 和 TP 去除率随着温度的变化
Fig. 2 Change in removal ratios of COD, TN, and TP versus temperature without addition of a carbon source

浓度随试验时间逐渐上升,相应地 COD 去除率逐渐下降,由图 2 可知这主要是由于温度的降低. 投加碳源后约 10 d 内出水 COD 浓度发生较大波动,但之后逐渐趋于稳定,整体 COD 去除率上升. 添加碳源前后,HFCW 的 COD 平均去除率由 57.04% 上升至 66.58%,VFCW 的 COD 平均去除率由 64.17% 提升至 73.10%,整体来说投加碳源增加进水有机负荷后,HFCW 和 VFCW 都表现出稳定的有机物降解能力,出水 COD 浓度可以稳定在较低水平.

HFCW 和 VFCW 在试验初期基质表面尚未形成成熟的生物膜,此时 COD 的去除主要依靠湿地填料作用,随着填料表面生物膜的形成,微生物的分解作用逐渐成为有机物去除的主要途径^[15]. HFCW 和 VFCW 的 COD 去除率在 20 ~ 30 d 内逐渐下降,原因在于低温条件对微生物的生物活动和活性有抑制作用,同时也影响着植物的生长和对系统的供氧^[16],为提升湿地低温运行下污染物净化效果,在

试验中期对 HFCW 和 VFCW 进行碳源投加,投加碳源后,进水 COD 浓度上升, HFCW, VFCW 出水 COD 浓度在波动一周左右之后保持稳定,表明 HFCW 和 VFCW 均对 COD 变化具有一定的抗冲击负荷能力。

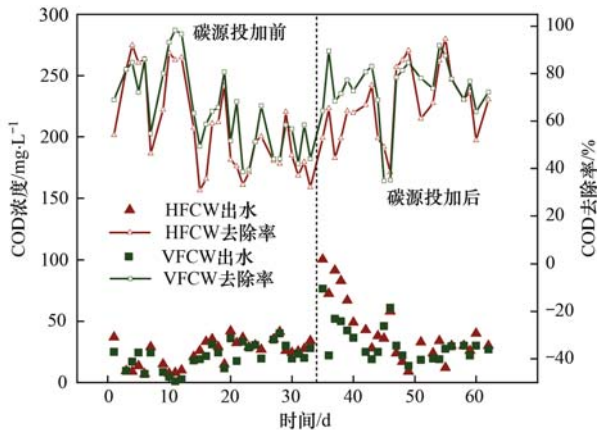


图3 碳源投加前后 HFCW 和 VFCW 中 COD 的去除效果

Fig. 3 COD removal efficiencies in HFCW and VFCW before and after carbon source addition

2.2.2 不同工况下 TN 去除效果

温度降低导致微生物尤其是反硝化细菌代谢速率明显下降,从而影响湿地脱氮效率. 并且污水处理厂尾水碳氮比较低,不能为微生物反硝化作用提供充足的电子供体,因此,本试验选择添加碳源以提高湿地脱氮效率. HFCW 和 VFCW 对 TN 的去除率变化趋势如图4所示,投加碳源前, HFCW 出水 TN 浓度在 $1.90 \sim 13.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动, TN 去除率低且波动大; VFCW 出水 TN 浓度变化趋势与 HFCW 基本一致,范围为 $1.55 \sim 9.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 添加碳源后4 d内, HFCW 出水 TN 浓度显著下降,相应去除率由3.05%上升至84.93%, VFCW 的 TN 去除率也由24.37%大幅增长至86.30%. 整体来看,添加碳源后, HFCW 的 TN 平均去除率由22.86%上升至76.01%, VFCW 的 TN 平均去除率由46.73%上升至71.69%. 由此可见,投加碳源对湿地 TN 的去除效果提升有明显作用. 图5总结了不同碳氮比下两种类型湿地 TN 的平均去除率,其变化曲线整体呈“S”形,当 COD/TN 值由4增加至12时, HFCW 与 VFCW 对 TN 的去除率显著升高,而当 COD/TN 超过12后,湿地脱氮率增幅则明显减缓,并且 HFCW 脱氮效果在 COD/TN 值为18时达到峰值. 整体来看,本试验中进水 COD/TN 值保持在12~18间时,湿地能够达到尾水脱氮最优效果.

随着湿地的稳定运行,基质及植物根际生物膜逐渐成熟,脱氮微生物的硝化-反硝化反应成为人工湿地削减 TN 的主要途径,有研究表明通过微生物

反硝化去除的氮量占投配总氮量的47%~48%^[17]. 我国污水处理厂尾水中氮大多以硝态氮形态存在^[4,18],因此 TN 的去除主要依赖于硝态氮反硝化为氮气从系统中逸出^[17]. 本试验结果表明碳源投加前, HFCW 与 VFCW 脱氮效果受低温影响整体较差. 投加碳源后, HFCW 和 VFCW 的 TN 去除率明显上升,其中, HFCW 的 TN 平均去除率相比于投加前上升了53.15%, VFCW 提高了24.96%. 由此可见补充碳源可缓解低温对反硝化的抑制作用,且外加碳源对于 HFCW 中 TN 去除率的提升具有更优的效果.

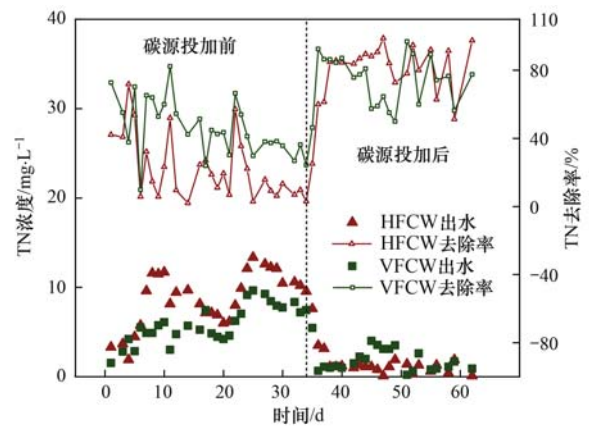


图4 碳源投加前后 HFCW 和 VFCW 中 TN 的去除效果

Fig. 4 TN removal efficiencies of HFCW and VFCW before and after carbon source addition

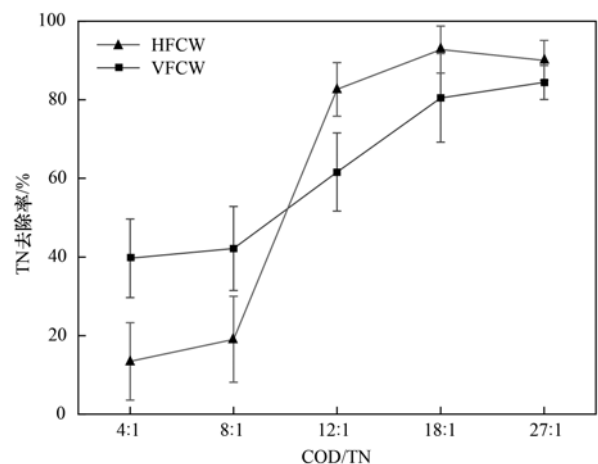


图5 不同 COD/TN 下 TN 的去除效果

Fig. 5 TN removal efficiencies under different COD/TN

2.2.3 不同工况下 TP 去除效果

湿地通过水生植物、基质和微生物的共同作用来完成对磷的去除,其中,基质吸附通常是除磷的最主要途径,湿地中生物膜长势较好时微生物对磷的去除也有一定作用^[19]. 图6展示了试验中 TP 的去除率变化. 从中可知,碳源投加前, HFCW 的 TP 去除率在试验初期存在一定程度的波动,但之后逐渐上升并趋于稳定, HFCW 出水 TP 的浓度变化范围为 0.09

~0.21 mg·L⁻¹; VFCW 中 TP 去除率的变化趋势与 HFCW 基本一致,出水 TP 浓度范围为 0.08 ~ 0.25 mg·L⁻¹. 投加碳源后,两种类型湿地的除磷效果在出现一段时间波动后均趋于稳定. 投加碳源前,HFCW 对 TP 的平均去除率为 64.72%,VFCW 为 58.51%;投加碳源后,HFCW 对 TP 的平均去除率达到 75.93%,VFCW 对 TP 的平均去除率为 56.12%.

整体而言,湿地 TP 的去除受温度和进水碳氮比的影响有限,且外加碳源对 HFCW 除磷效果有一定程度提升,这可能是由于有机碳源的丰富促进了湿地中生物膜的生长,也有助于湿地基质中除磷菌的繁殖和富集. 此外,HFCW 基质(陶粒和火山岩)中富含 Ca²⁺、Mg²⁺、Al³⁺和 Fe³⁺,有研究表明溶性磷酸盐易与这些离子发生沉淀反应,生成难溶性磷酸盐从而被固定^[20],因此本试验中 HFCW 比 VFCW

表现出更优的除磷效果.

2.3 主要水质指标改善机制分析

2.3.1 湿地微生物多样性分析

微生物是人工湿地中处理污水、进行有机质降解和氮磷转化的化学、物理和生物共同作用的主要驱动者^[21],其群落结构直接影响湿地的污染物净化能力^[22]. 为明确不同系统间微生物群落的分布规律及特点,分别对 HFCW 与 VFCW 中采集的基质和植物根际样品进行微生物群落对比分析,将两种类型湿地的多样性(Shannon 指数、Simpson 指数)、丰富度(Chao1 指数和 ACE 指数)和覆盖度(Coverage 指数)列于表 4. 从中可知,所有样品 Coverage 指数均达到 0.99,表明测得的 OTUs (operational taxonomic units)代表每个样本中微生物的真实情况. VFCW 与 HFCW 植物根际物种 Shannon 指数存在一定差异,其中 HFCW 水葱根际微生物 Shannon 指数显著高于 VFCW. 此外,HFCW 与 VFCW 样品的 Chao1 和 ACE 指数也存在明显差异,VFCW 基质及风车草样品的 Chao1 和 ACE 指数均大于 HFCW,但水葱根际样品则表现出相反的结果,HFCW 的 Chao1 和 ACE 指数高于 VFCW.

从物种多样性来看,HFCW 中的基质与植物根际微生物物种多样性与 VFCW 整体相差不大,其中植物根际样品物种多样性差异相比于基质更大,这可能是由于同一种植物在两种类型湿地中根际效应存在不同. 在物种丰富度方面,湿地中植物根际样品物种丰富度整体高于基质. 此外,VFCW 基质和风车草根际样品的物种丰富度较 HFCW 高,但 HFCW 水葱根际样品物种丰富度比 VFCW 高.

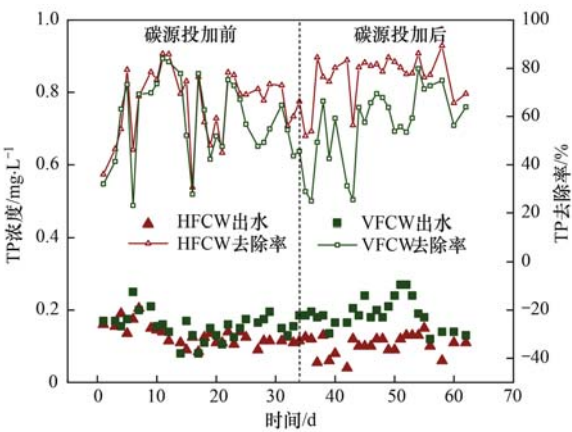


图6 碳源投加前后 HFCW 和 VFCW 中 TP 的去除效果

Fig. 6 TP removal efficiencies of HFCW and VFCW before and after carbon source addition

表4 HFCW 和 VFCW 在基质和植物根际表面的物种多样性、丰富度和覆盖度指数比较¹⁾

Table 4 Comparison of community diversity, abundance, and coverage index between HFCW and VFCW on substrates and plant rhizosphere surfaces

样品名称	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao1 指数	ACE 指数	Coverage 指数
H-J	7.82	0.99	1 990.90	1 659.22	0.99
V-J	7.83	0.98	2 866.30	2 215.33	0.99
H-F	6.88	0.98	2 444.28	1 895.17	0.99
V-F	7.22	0.98	3 015.31	2 271.86	0.99
H-S	8.90	0.99	6 265.00	3 237.36	0.99
V-S	7.58	0.98	3 090.58	2 426.05	0.99

1) H 表示水平潜流人工湿地,V 表示垂直潜流人工湿地,J 表示基质,F 表示风车草根际,S 表示水葱根际

2.3.2 微生物群落结构分析

为了对两种类型湿地微生物样品的群落结构进行进一步比较. 以 Unweighted Unifrac 距离矩阵做 UPGMA 聚类分析,并将聚类结果与各样本在门水平上的物种相对丰度整合,结果如图 7 所示. 从中可知,变形菌门(Proteobacteria)是所有样品中相对丰度最高的菌门,植物根际变形菌门相对丰度整体高于基质,VFCW 基质样品中变形菌门相对丰度

(63.17%)高于 HFCW 基质样品(44.91%). 对于植物根际样品,HFCW 和 VFCW 风车草根际样品中变形菌门丰度类似,但二者的水葱样品变形菌门丰度差异显著,VFCW 分析结果(80.60%)远高于 HFCW(59.04%). 除变形菌门外,HFCW 与 VFCW 样品中还聚集了丰富的厚壁菌门(Firmicutes),其在 HFCW 基质表面(18.36%)的相对丰度最高. 另外,疣微菌门(Verrucomicrobia)在 HFCW 和 VFCW 样品

中也占一定比例,其在 HFCW 水葱根际(10.09%)的相对丰度最高.通过门水平样本间聚类分析构建的聚类树可以看出,湿地的基质和植物根际微生物群落结构存在显著差异,就植物而言,同一种类型湿地中的根际样品微生物群落结构更相似.

变形菌门、厚壁菌门和疣微菌门相对丰度之和在 HFCW 与 VFCW 所有样品中都达到 70% 以上,为

优势菌门. 本研究中优势菌门类型与祝志超等^[23]在组合湿地污水处理厂二级出水处理研究中得到的菌门种类相似. 其中,变形菌门多为专性或兼性厌氧代谢,其中包含硝化菌属和绝大多数的反硝化菌属^[24],对湿地脱氮具有重要作用;厚壁菌门常见于一些与人工湿地类似的厌氧消化反应器中,其中存在能够降解大分子有机物的功能细菌^[25].

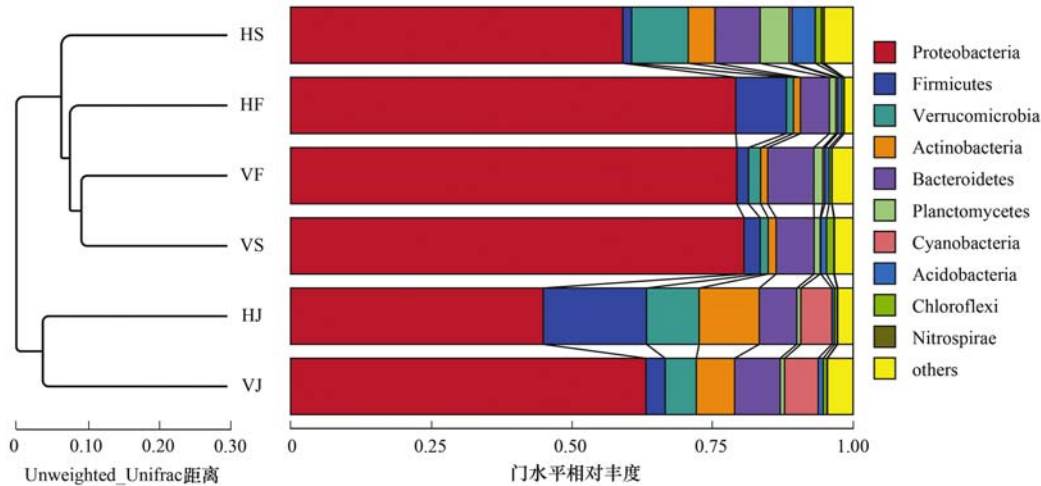


图7 基于 Unweighted Unifrac 距离的 UPGMA 聚类树

Fig. 7 UPGMA clustering tree based on Unweighted Unifrac distance

2.3.3 优势菌门属水平分析

为进一步揭示两湿地在尾水处理中的效果差异和作用机制,对样品中相对丰度最高且与污染物去除效果联系密切的优势菌门进行属水平上的主成分分析,结果如图 8 所示. 从中可知,HFCW 与 VFCW 的优势菌属组成差异主要在基质样品,因此推测基质表面生物膜的微生物群落结构差异是造成 HFCW 和 VFCW 污染物去除效果不同的主要原因之一. 通过分解 Bray-Curtis 差异指数,量化每个物种对两组之间差异的贡献度,得到 Simper 指数差异贡献度,

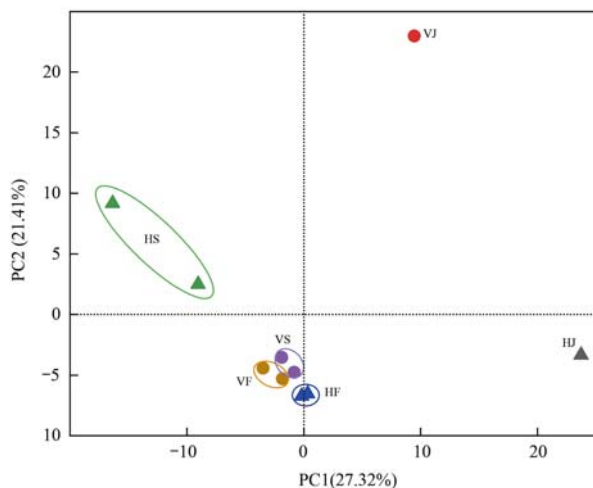


图8 优势菌门属水平主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of dominant phylum at the genus level

如图 9 所示,其中展示了对 HFCW 和 VFCW 两组样品间差异贡献度排名前 20 的物种及其丰度. 其结果显示嗜氢菌属 (*Hydrogenophaga*)、丹毒丝菌属 (*Erysipelothrix*)、戴沃斯菌属 (*Devosia*)、*Terrimicrobium* 和脱硫微杆菌属 (*Desulfomicrobium*) 是 HFCW 与 VFCW 微生物群落差异贡献度较高的 5 个菌属,累积贡献率超过 30%. 其中嗜氢菌属、丹毒丝菌属和戴沃斯菌属均与湿地脱氮作用有关,如嗜氢菌属可将硝态氮作为氮源进行呼吸,主要在氨化和氨氧化过程中起作用^[26]. 丹毒丝菌属能够将硝酸盐还原成氮气,实现 TN 的脱除^[27]. 分别对嗜氢菌属、丹毒丝菌属、戴沃斯菌属在 HFCW 与 VFCW 中的相对丰度进行比较,发现嗜氢菌属在 HFCW 基质表面相对丰度 (7.27%) 高于 VFCW 基质 (2.72%),而在 VFCW 风车草 (13.73%) 和水葱根际 (11.48%) 的相对丰度高于 HFCW 风车草 (7.16%) 和水葱 (2.03%). HFCW 基质和风车草根际的丹毒丝菌属相对丰度较高,而 VFCW 基质、风车草表面的戴沃斯菌属相对丰度较高. HFCW 与 VFCW 基质优势菌属分布差异可能与湿地复氧效果有关,与 VFCW 相比,HFCW 的构造条件决定了其内部整体处于厌氧环境,更利于大部分反硝化菌属的聚集,因此 HFCW 中存在相对丰度更高的反硝化菌属.

整体来看,HFCW 与 VFCW 植物根际嗜氢菌

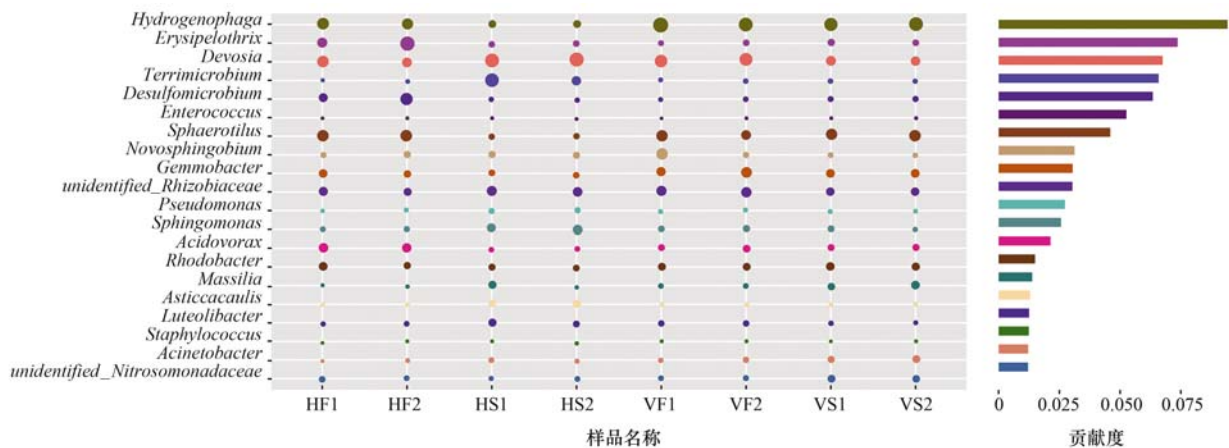


图9 属水平 Simper 差异贡献度

Fig. 9 Difference contribution of Simper at the genus level

属、丹毒丝菌属和戴沃斯菌属相对丰度之和较基质高,其中风车草最高,水葱次之,基质最低,这可能是由于植物通过根际分泌有机碳,为反硝化菌群的富集提供了有利条件^[28]。嗜氢菌属、丹毒丝菌属、戴沃斯菌属相对丰度之和在 HFCW 与 VFCW 植物根际样品间相差不大,但它们在 HFCW 基质表面的相对丰度之和(12.13%)远高于在 VFCW 基质表面样品的丰度(5.58%)。这可能是试验后期 HFCW 具有较好脱氮效果的原因。除上述主要反硝化菌属外,湿地中还存在多种异养反硝化菌属。

有研究表明,湿地系统中微生物的种类和数量随季节的改变而变化,一般情况,夏秋季数量最高,冬季最少,当季节温度小于 15℃ 时反硝化作用会受到明显限制^[29]。但本试验在温度低于 15℃ 的条件下,HFCW 与 VFCW 中仍存在相对丰度较高的反硝化菌属,且具有良好的脱氮效果,表明在试验期间的温度范围内,外加碳源能够维持低温下湿地中反硝化微生物的生物量,从而改善温度对湿地 TN 去除效果的影响。

3 讨论

人工湿地作为室外构筑物,其运行效果受到环境温度的显著影响。研究发现环境温度对有机物和氮的去除效果影响较大,对磷的去除影响微乎其微,这可能是由于湿地中磷的去除主要依赖基质的吸附,生物作用除磷所占比例较小。而潜流人工湿地对有机物的降解和氮的去除在低温条件下则明显受到抑制。此外,对两种类型湿地出水长期监测溶解氧浓度(DO)发现,垂直 VFCW 出水平均值(8.39 ± 2.19) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高于 HFCW 出水平均值(5.98 ± 1.71) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。较高的 DO 浓度有利于提高有机物降解细菌活性,提升其异化和同化作用效率^[30],因此 VFCW 表现出较优的 COD 去除效果。基于对湿

地基质和植物根际微生物群落结构分析,发现 HFCW 基质表面反硝化菌属丰度高于 VFCW,而 VFCW 植物根际反硝化菌属丰度高于 HFCW,但水质指标结果显示添加碳源后 HFCW 的脱氮效果更好,表明湿地基质表面生物膜对系统脱氮的影响更大。植物根际虽然微生物相对丰度较高,但植物根际微生物对湿地整体污染物去除效果影响有限,这可能是由于低温季节下植物枯萎,根际活力下降。图 4 结果显示投加碳源后 HFCW 的去除氮效率明显提升,结合 DO 浓度监测结果,揭示 HFCW 内部具有较充分的厌氧环境,外加碳源为基质表面的反硝化微生物群落如嗜氢菌属(*Hydrogenophaga*)和丹毒丝菌属(*Erysipelothrix*)等提供了充足的电子供体,缓解了低温对脱氮微生物活性的影响,因此 HFCW 脱氮效果大幅上升,去除率超过了 VFCW。VFCW 具备良好的好氧-厌氧交替环境,为硝化-反硝化反应顺利进行提供了充分条件,但我国污水处理厂尾水中氮大多以硝态氮形态存在,因此在尾水深度处理中反硝化作用是决定脱氮效果的关键。Wang 等^[31]的研究显示较高溶解氧水平($> 6.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)会造成湿地反硝化作用下降,这可能是本试验中 VFCW 脱氮效果受限的原因,此外,进水碳氮比与湿地脱氮效果也存在相关性,因此,在处理以硝态氮为主的污水处理厂尾水时,建议结合碳氮比来选择湿地类型。

4 结论

(1) 两组潜流人工湿地均表现出稳定的有机物降解能力和较强的有机负荷抗冲击能力,但低温下湿地中反硝化菌活动受到抑制,添加碳源可显著改善湿地脱氮效果。碳源添加前,HFCW 和 VFCW 对 TN 的平均去除率分别为 22.86% 和 46.73%;碳源添加后,HFCW 和 VFCW 的 TN 平均去除率则达到 76.01% 和 71.69%,表明外加碳源对 HFCW 中 TN

去除率提升具有更优的效果,而温度变化和碳源投加对湿地除磷效果影响有限。

(2)分析 HFCW 与 VFCW 中基质与植物根际微生物样品物种多样性和丰富度,发现两种试验湿地样品的物种多样性指数相似,而 VFCW 基质和凤车草根际样品的物种丰富度指数均高于 HFCW。变形菌门、厚壁菌门和疣微菌门是 HFCW 与 VFCW 基质和植物根际样品中共有的优势菌门,其中变形菌门是 HFCW 和 VFCW 中相对丰度最高的菌门。

(3)对优势菌门进行属水平上的主成分分析,结果显示 HFCW 与 VFCW 的优势菌属组成差异主要在基质样品,而结合水质数据分析发现污染物净化效果与湿地基质表面微生物群落结构更相关。

(4)从两种类型湿地优势菌门属水平差异度来看,嗜氢菌属、丹毒丝菌属和戴沃斯菌属是 HFCW 与 VFCW 微生物群落差异贡献度最高的 3 个菌属,而这 3 个菌属均被报道与湿地的反硝化作用密切相关,这可能是造成 HFCW 与 VFCW 脱氮效率不同的主要原因之一。

参考文献:

- [1] 凌子微,全欣楠,李亚红,等. 处理低污染水的复合人工湿地脱氮过程[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 320-325.
Ling Z W, Tong X N, Li Y H, *et al.* Study on nitrogen removal process of treatments for slightly contaminated water on hybrid constructed wetlands[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(3): 320-325.
- [2] Wang C H, He R, Wu Y, *et al.* Bioavailable phosphorus (P) reduction is less than mobile P immobilization in lake sediment for eutrophication control by inactivating agents [J]. Water Research, 2017, **109**: 196-206.
- [3] 李娟,张龙庄,段亮,等. 人工湿地废水处理技术的研究现状及展望[J]. 南方农业学报, 2011, **42**(1): 69-73.
Li J, Zhang L Z, Duan L, *et al.* Research advances and prospects of wastewater treatment technology using constructed wetlands[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2011, **42**(1): 69-73.
- [4] 王楠,王晓昌,熊家晴,等. 人工湿地在工业园区污水厂尾水处理中的工程应用[J]. 环境工程, 2017, **35**(12): 11-14, 44.
Wang N, Wang X C, Xiong J Q, *et al.* Engineering application of constructed wetland for tertiary treatment of tail water from wastewater treatment plants in industrial zone[J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(12): 11-14, 44.
- [5] 刘伟豪,王永敏,樊宇飞,等. 多功能型城市人工湿地水体采分布特征及其量变分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2219-2225.
Liu W H, Wang Y M, Fan Y F, *et al.* Mercury distribution characteristics and its mass balance in a multifunctional urban wetland[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2219-2225.
- [6] 蒋倩文,刘锋,彭英湘,等. 生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2194-2201.
Jiang Q W, Liu F, Peng Y X, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal by integrated ecological engineering treatment system in a small agricultural watershed[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2194-2201.
- [7] 汪海波,马丁,岳正波,等. 处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4215-4221.
Wang H B, Ma D, Yue Z B, *et al.* Transformation of ammonia in wetland sediments for treatment of mining wastewater [J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4215-4221.
- [8] Liikanen A, Puustinen M, Koskiahio J, *et al.* Phosphorus removal in a wetland constructed on former arable land [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(3): 1124-1132.
- [9] Mander Ü, Lohmus K, Teiter S, *et al.* Gaseous fluxes from subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2005, **40**(6-7): 1215-1226.
- [10] Werker A G, Dougherty J M, McHenry J L, *et al.* Treatment variability for wetland wastewater treatment design in cold climates[J]. Ecological Engineering, 2002, **19**(1): 1-11.
- [11] 黄翔峰,谢良林,陆丽君,等. 人工湿地在冬季低温地区的应用研究进展[J]. 环境污染与防治, 2008, **30**(11): 84-89.
Huang X F, Xie L L, Lu L J, *et al.* Literature review of winter performance of the constructed wetlands located in low-temperate areas[J]. Environmental Pollution and Control, 2008, **30**(11): 84-89.
- [12] 殷峻,闻岳,周琪. 人工湿地中微生物生态的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(1): 108-110.
Yin J, Wen Y, Zhou Q. Microbial characteristics of constructed wetlands[J]. Environmental Science & Technology, 2007, **30**(1): 108-110.
- [13] 成水平,王月圆,吴娟. 人工湿地研究现状与展望[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1489-1498.
Cheng S P, Wang Y Y, Wu J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(6): 1489-1498.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 熊佐芳. 垂直流人工湿地基质堵塞问题及解决方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2011.
Xiong Z F. The study of substrate clogging problem and solutions in vertical-flow constructed wetland [D]. Nanning: Guangxi University, 2011.
- [16] 王世和,王薇,俞燕,等. 潜流式人工湿地的运行特性研究[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(4): 9-11.
Wang S H, Wang W, Yu Y, *et al.* Study on the operating characteristics of subsurface flow constructed wetland[J]. China Water & Wastewater, 2003, **19**(4): 9-11.
- [17] 丁怡,宋新山,严登华. 补充碳源提取液对人工湿地脱氮作用的影响[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(7): 1646-1652.
Ding Y, Song X S, Yan D H. Effect of adding carbon source extracts on nitrogen removal in constructed wetland [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(7): 1646-1652.
- [18] 陈云峰,文辉,张彦辉. 不同固态碳源用于反硝化去除污水处理厂尾水中硝态氮的研究[J]. 给水排水, 2010, **36**(11): 140-143.
Chen Y F, Wen H, Zhang Y H. Different carbon sources of denitrification for wastewater treatment plant effluent[J]. Water & Wastewater Engineering, 2010, **36**(11): 140-143.
- [19] 李志杰,孙井梅,刘宝山. 人工湿地脱氮除磷机理及其研究进展[J]. 工业水处理, 2012, **32**(4): 1-5.
Li Z J, Sun J M, Liu B S. Mechanisms of denitrification and dephosphorization by constructed wetland and its research

- progress[J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, **32**(4): 1-5.
- [20] 杨子, 汪家权. 5 种人工湿地基质对磷的吸附特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2012, **35**(7): 981-986.
Yang Z, Wang J Q. Study of adsorption properties of phosphorus by five constructed wetland matrixes [J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2012, **35**(7): 981-986.
- [21] 周元清, 李秀珍, 李淑英, 等. 不同类型人工湿地微生物群落的研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(6): 1251-1257.
Zhou Y Q, Li X Z, Li S Y, *et al.* A review on soil microbial community in different type constructed wetlands [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(6): 1251-1257.
- [22] 黄德锋, 李田, 陆斌. 复合垂直流人工湿地污染物去除及微生物群落结构的 PCR-DGGE 分析[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(6): 137-141.
Huang D F, Li T, Lu B. Pollutants removal and analysis of structure changes of microbial community in integrated vertical-flow constructed wetland [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(6): 137-141.
- [23] 祝志超, 缪恒锋, 崔健, 等. 组合人工湿地系统对污水处理厂二级出水的深度处理效果[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(12): 2028-2036.
Zhu Z C, Miao H F, Cui J, *et al.* Advanced treatment performance of combined constructed wetland system on secondary effluent from wastewater treatment plant [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, **31**(12): 2028-2036.
- [24] 李振灵, 丁彦礼, 白少元, 等. 潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性[J]. 环境科学, 2017, **38**(9): 3713-3720.
Li Z L, Ding Y L, Bai S Y, *et al.* Correlations between substrate structure and microbial community in subsurface flow constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(9): 3713-3720.
- [25] Chouari R, Le Paslier D, Daegelen P, *et al.* Novel predominant archaeal and bacterial groups revealed by molecular analysis of an anaerobic sludge digester [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(8): 1104-1105.
- [26] 黄倩茹, 陈洲洋, 黄振山, 等. 基于硝化反硝化的膜生物反应器烟气脱硝研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2016, **48**(2): 13-18.
Huang Q R, Chen Z Y, Huang Z S, *et al.* Membrane biofilm reactor based on nitrification/denitrification for nitrogen oxides removal [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, **48**(2): 13-18.
- [27] 张若晨, 陈川, 邵博, 等. 微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4128-4135.
Zhang R C, Chen C, Shao B, *et al.* Electron equilibrium analysis of integrated autotrophic and heterotrophic denitrification process under micro-aerobic conditions [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4128-4135.
- [28] 陈亮, 刘锋, 肖润林, 等. 人工湿地氮去除关键功能微生物生态学研究进展[J]. 生态学报, 2017, **37**(18): 6265-6274.
Chen L, Liu F, Xiao R L, *et al.* Research advances in microbial ecology for N-removal in constructed wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(18): 6265-6274.
- [29] Kusch P, Wiessner A, Kappelmeyer U, *et al.* Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate [J]. *Water Research*, 2003, **37**(17): 4236-4242.
- [30] 冯琳. 潜流人工湿地中有机污染物降解机理研究综述[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(5): 2006-2010.
Feng L. Progress of study on the degradation mechanism of organic pollutants in subsurface flow constructed wetland [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(5): 2006-2010.
- [31] Wang J, Hou J, Xia L, *et al.* The combined effect of dissolved oxygen and COD/N on nitrogen removal and the corresponding mechanisms in intermittent aeration constructed wetlands [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2020, **153**: 107400.

CONTENTS

Sources and Control Area Division of Ozone Pollution in Cities at Prefecture Level and Above in China	YAN Hui, ZHANG Wei, HOU Mo, <i>et al.</i> (5215)
Dynamic Assessment of PM _{2.5} Health Damage Value in China from 2015 to 2018	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (5225)
Analysis of Multi-scale Spatio-temporal Differentiation Characteristics of PM _{2.5} in China from 2011 to 2017	YANG Wen-tao, QIAO Peng, LIU Xian-zhao, <i>et al.</i> (5236)
Spatio-temporal Evolution and Population Exposure Risk to PM _{2.5} in the Guanzhong Area	HUANG Xiao-jun, QI Ming-yue, LI Yan-yu, <i>et al.</i> (5245)
Formation Mechanism and Source Analysis of Two Heavy Pollution Periods in Winter in a Central Plains City	JIA Jia, CONG Yi, GAO Qing-min, <i>et al.</i> (5256)
Winter Pollution Characteristics and Physicochemical Properties of PM _{2.5} in a Northwest Industrial City	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, WANG Li-na, <i>et al.</i> (5267)
Characterization of Metal Pollution of Regional Atmospheric PM _{2.5} and Its Sources Based on the PMF Model	DENG Lin-li, ZHANG Kai-shan, YIN Zi-yuan, <i>et al.</i> (5276)
Pollution Characteristics and Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in Core Urban Areas, Chongqing	ZHANG Xia, LIU Bin, XIAO Bo-lin, <i>et al.</i> (5288)
Factors Influencing New Atmospheric Particle Formation in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, WANG Hong-lei, ZHANG Lian-xia, <i>et al.</i> (5295)
Characteristics and Reactivity of Ambient VOCs in Urban Hangzhou, China	JING Sheng-ao, GAO Ya-qin, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (5306)
Characteristics and Sources of Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution in Summer in Chengdu	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (5316)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs and O ₃ in Shijiazhuang	WANG Shuai, CUI Jian-sheng, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (5325)
Analysis of Industrial VOCs Emission Inventory and Countermeasures in Xiamen	WU Dong-yang, ZHUANG Ma-zhan, WU Yan-cong, <i>et al.</i> (5336)
Emission Inventory and Emission Factors of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Architectural Adhesives	LIANG Xiao-ming, SUN Xi-bo, SU Yan-hua, <i>et al.</i> (5345)
Sources and Health Risks of Atmospheric Polychlorinated Biphenyls in an Urban/Industrial Areas, Northwest China	MAO Xiao-xuan, LI Zi-xuan, SONG Shi-jie, <i>et al.</i> (5352)
Vertical Distribution of Surface Formaldehyde in the Pearl River Delta Urban Area Based on Observations at the Canton Tower	HUANG Shan, PEI Cheng-lei, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5362)
Temporal and Spatial Characteristics of Total Phosphorus in the Middle and Lower Yangtze River Mainstem Under New Water and Sediment Conditions	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, WU Yun-li, <i>et al.</i> (5371)
Seasonal Variations in Nitrogen and Phosphorus Concentration and Stoichiometry of Hanfeng Lake in the Three Gorges Reservoir Area	QIAN Tian, HUANG Qi, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5381)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients in Hengshui Lake Sediments	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LIU Li, <i>et al.</i> (5389)
Endogenous Pollution and Release Characteristics of Bottom Sediments of Hengshan Reservoir in Yixing City	CUI Hui-fang, CHEN Shu-yun, YANG Chun-hui, <i>et al.</i> (5400)
Pollution and Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Sediments of Qingliangshan Reservoir in the Meijiang Basin	JIANG Tao, LIN Wei-wen, CAO Ying-jie, <i>et al.</i> (5410)
Influence Factors of Potential Nitrification Rates and Functional Genes Abundance in the Jinshui River and the Qihe River of the Hanjiang River Basin	ZHAO Bin-jie, WANG Xu, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (5419)
Contamination Characteristics and Potential Ecological Risks of Typical Perfluoroalkyl Substances in the Water and Sediment of Coastal Tourism Resorts in Shandong Province	WANG Shi-liang, CAO Xue-zhi (5428)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organophosphate Esters in Key Waters Areas of Taihu Lake	LÜ Jia-pei, ZHANG Zhen-fei, LIU Yang, <i>et al.</i> (5438)
Residual Characteristics and Health Assessment Analysis of OCPs and PCBs in Karst Groundwater	YE Kai, SUN Yu-chuan, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5448)
Biogeographic Distribution Patterns of Diatoms in Lancang River and Their Key Drivers	SUN Sheng-hao, CHEN Juan, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (5458)
Bioaccumulation Characteristics of Quinolones (QNs) in Dominant Fish Species and Their Correlation with Environmental Factors in Baiyangdian Lake	SHEN Li-na, FU Yu, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5470)
Effect of Biomass Particle Size on the Adsorption of Phosphorus from Aqueous Solution by MgO-loaded Biochar	WANG Peng-fei, ZHI Meng-meng, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (5480)
Photocatalytic Degradation of Tetracycline and Copper Complex by Bi ₂ MoO ₆ /Bi ₂ S ₃ Heterojunction	HUANG Wen-xin, WEI Hu, JIANG Cai-yun, <i>et al.</i> (5488)
Enhancing PPCPs Removal and Membrane Fouling Control of Ultrafiltration Membrane by UiO-66@Fe ₃ O ₄ @UiO-66	YIN Yue, WU Dao-wen, SUN Meng-yao, <i>et al.</i> (5500)
Advanced Treatment of Tail Water Using Pilot-scale Horizontal and Vertical Subsurface Flow Constructed Wetlands in Low-temperature Seasons	LIAO Xue-ke, YAN Han-lu, WANG Zhi-yuan, <i>et al.</i> (5509)
Metagenomic Insights into Salinity Build-up in Microbial Communities and Metabolism of Hydrolytic Bioreactor Treating High-color PDWW	GAO Jing, ZHANG Shao-hua, WANG Rui, <i>et al.</i> (5518)
Performance and Microbial Characteristics of Ammonium-limited and Nitrite-limited ANAMMOX Systems	SONG Jia-jun, ZHU Ming-yi, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (5527)
Microbial Community Structure and Diversity During the Enrichment of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	YAN Bing, XIA Song, GUI Shuang-lin, <i>et al.</i> (5535)
Enhanced Dewaterability of Waste-Activated Sludge in Presence of Fe(II)-Activated Calcium Peroxide	BI Wei-wei, RUAN Shu-yu, CHEN Wu-ao-xiao, <i>et al.</i> (5544)
Spatial Distribution, Contamination Assessment, and Sources of Heavy Metals in the Urban Green Space Soils of a City in North China	ZHAO Liang, LIANG Yun-ping, CHEN Qian, <i>et al.</i> (5552)
Technological Classification of Cadmium Quality in the Rice Producing Areas of South China	DOU Wei-qiang, AN Yi, QIN Li, <i>et al.</i> (5562)
Distribution Characteristics of Selenium in a Soil-Crop System and the Threshold of Selenium-Rich Soils	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (5571)
Transfer Factor and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Crop System in a High Incidence Area of Nasopharyngeal Carcinoma, Guangdong	YE Mai, ZHANG Jing-ru, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (5579)
DA-6 and GLDA Enhanced <i>Panicum virgatum</i> L. to Phytoextract Cd from Contaminated Soils	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh Mohamed, <i>et al.</i> (5589)
Remediation Performance via the Passivation of a Porous Biomorph Genetic Composite of α -Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄ /C Using a Bamboo Template on As(V) Contaminated Soils	ZHAO Ning-ning, HE Hao, FENG Guo-jie, <i>et al.</i> (5600)
Biodegradation of Expanded Polystyrene Foams in <i>Zophobas morio</i> : Effects of Gut Microbiota	YANG Li, LIU Ying, GAO Jie, <i>et al.</i> (5609)
Isolation, Identification, and Degrading Characteristics of an Oil Resistant Formaldehyde-Degrading Bacterium	HAN Xi, WANG Rong-rong, SHI Chun-zhen (5617)
Characteristics of Phyllosphere and Rhizosphere Bacterial Communities in <i>Bothriochloa ischaemum</i> in Copper Tailings	JIA Tong, YAO Yu-shan, WANG Rui-hong (5628)
Effects of Selected Biochars Application on the Microbial Community Structures and Diversities in the Rhizosphere of Water Spinach (<i>Ipomoea aquatica</i> Forssk.) Irrigated with Reclaimed Water	CUI Bing-jian, CUI Er-ping, HU Chao, <i>et al.</i> (5636)
Effects of Modified Biowaste-based Hydrochar on Rice Yield and Nitrogen Uptake	HOU Peng-fu, XUE Li-hong, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (5648)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil PAHs in Shizuishan City Based on GIS and PMF Model	XIA Zi-shu, WANG Yu-yu, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5656)
Effects of Nitrogen Fertilizer and Straw Returning Methods on N ₂ O Emissions in Wheat-Maize Rotational Soils	XU Hong-wei, LI Na, FENG Yong-zhong, <i>et al.</i> (5668)