

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

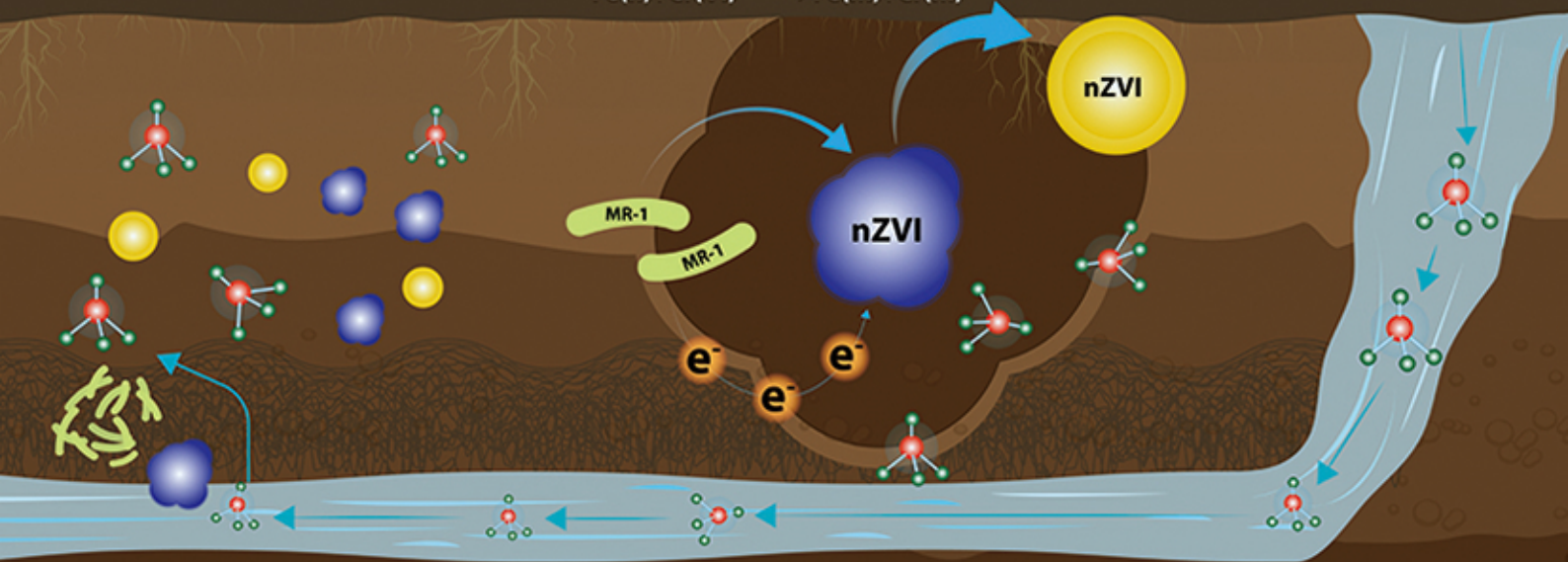
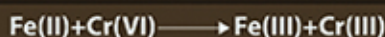
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

电活性微生物激活生物质炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制

廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年9月

第42卷 第9期
Vol.42 No.9

目次

北京市2014~2020年PM _{2.5} 和O ₃ 时空分布与健康效应评估	陈菁, 彭金龙, 徐彦森 (4071)
京津冀地区高分辨率PM _{2.5} 浓度时空变化模拟与分析	杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 张凌云, 魏强, 李夫星, 王丽艳, 王卫 (4083)
京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM _{2.5} 污染影响	邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 王瑞鹏 (4095)
太行山两侧污染物传输对横谷城市气溶胶的影响分析	王雁, 郭伟, 闫世明, 裴坤宁, 李明明, 陈二萍 (4104)
嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析	张颖龙, 李莉, 吴伟超, 吕升, 秦阳, 祝新明, 高晋徽, 唐倩, 夏峰 (4116)
基于机器学习算法的新冠疫情管控对河南省空气质量影响的模拟分析	魏煜, 徐起翔, 赵金帅, 张瑞芹 (4126)
新乡市大气PM _{2.5} 载带金属元素季节分布、来源特征与健康风险	刘恒嘉, 贾梦珂, 刘永丽, 赵艺洁, 郑爱华, 刘恒志, 徐肃阳, 肖晴晴, 苏晓燕, 任言 (4140)
黄渤海气溶胶中砷的分布特征和季节变化	袁帅, 王艳, 刘汝海, 种习习, 刘晓雨, 邵龙 (4151)
天津市2020年冬季重污染过程气溶胶消光特性及其来源	李立伟, 肖致美, 杨宁, 蔡子颖, 闫斌峰, 元洁, 白宇, 郑乃源, 唐邈 (4158)
中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素	何超, 慕航, 杨璐, 王丹璐, 邱彦峰, 叶志祥, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 洪松 (4168)
乌海市夏季臭氧污染特征及基于过程分析的成因探究	张瑞欣, 陈强, 夏佳琦, 刘晓, 郭文凯, 李光耀, 陈梅 (4180)
珠江三角洲海岸背景区大气VOCs污染特征与来源	云龙, 李成柳, 张明棣, 何龙, 郭键锋 (4191)
永定河上游地表水-地下水水化学特征及其成因分析	孔晓乐, 杨永辉, 曹博, 王艺璇, 裴宏伟, 沈彦军 (4202)
汉江中下游水质时空变异与驱动因素识别	程兵芬, 张远, 夏瑞, 张楠, 张新飞 (4211)
环境持久性药物在江苏省地表水中的污染水平、分布特征及生态风险评估	赵美美, 范德玲, 古文, 汪贞, 梁梦园, 刘济宁, 张志 (4222)
柳江流域河流溶解态重金属时空分布及污染评价	张婉军, 辛存林, 于爽, 刘齐, 曾鹏 (4234)
雷州半岛地下水重金属来源解析及健康风险评价	师环环, 潘羽杰, 曾敏, 黄长生, 侯清芹, 皮鹏程, 彭红霞 (4246)
龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评价	谢浩, 梁永平, 李军, 邹胜章, 申豪勇, 赵春红, 王志恒 (4257)
硫氧同位素解析典型岩溶地下河流域硫酸盐季节变化特征和来源	任坤, 潘晓东, 兰干江, 彭聪, 梁嘉鹏, 曾洁 (4267)
包头南海湿地磷形态及污染源定量识别	拜亚红, 钱晨歌, 袁思静, 谢子嫣, 来凌子, 张敏, 刘颖, 苗春林 (4275)
城市新城区公园沟塘沉积物磷释放风险及影响因素分析	李如忠, 宋敏, 杨继伟 (4287)
水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析	齐冉, 张灵, 杨帆, 颜昌宙 (4296)
锰砂人工湿地对污染物的强化去除	马权, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (4304)
4种典型沉水植物对去除磷污染底泥的应用效果	陶理, 王沛芳, 袁秋生, 王洵, 胡斌 (4311)
输水情景下白洋淀好氧反硝化菌群落对溶解性有机物的响应	周石磊, 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 于明会, 姚波, 崔建升, 罗晓 (4319)
木屑生物炭在雨水径流中的氮磷淋出和吸附特性	孟依柯, 王媛, 汪传跃 (4332)
海州湾潮间带沙蚕对沉积物微塑料的指示作用	王嘉旋, 宋可心, 孙一鑫, 方涛, 李瑾祯, 张涛, 冯志华 (4341)
纳米二氧化钛与镉对斜生栅藻(<i>Scenedesmus obliquus</i>)生长的拮抗效应及其作用机制	王璞, 赵丽红, 朱小山 (4350)
螺旋霉素废水处理过程中菌群结构、水质特征及抗性基因之间关系分析	武彩云, 李慧莉, 覃彩霞, 佟娟, 魏源送 (4358)
整合铁对厌氧铁氨氧化脱氮效能及微生物群落的影响	廖宏燕, 宋诚, 万柳杨, 时绍鹏, 王兴祖 (4366)
溶解氧对低碳源城市污水处理系统脱氮性能与微生物群落的影响	池玉蕾, 石烜, 任童, 王晓昌, 金鹏康 (4374)
间歇梯度曝气下短SRT强化短程SNEDPR系统脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张杰 (4383)
生物膜系统中部分反硝化实现特性	于莉芳, 张兴秀, 张琼, 王晓玉, 彭党聪, 张日霞 (4390)
厌氧推流进水对反硝化除磷好氧颗粒污泥系统的影响	李冬, 曹思雨, 王琪, 张杰 (4399)
不同好氧/缺氧时长联合分区排泥优化生活污水短程硝化反硝化除磷颗粒系统运行	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (4406)
中国西南地区金属矿开采对矿区土壤重金属影响的Meta分析	张健琳, 瞿明凯, 陈剑, 杨兰芳, 赵永存, 黄标 (4414)
青藏高原典型流域土壤重金属分布特征及其生态风险评价	杜昊霖, 王莺, 王劲松, 姚玉璧, 周悦, 刘晓云, 芦亚玲 (4422)
电子垃圾拆解区土壤-农作物系统中镉元素的空间分布特征及其风险评价	张璐瑶, 赵科理, 傅伟军 (4432)
改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响	王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 王佳锐, 张曦, 丁京涛, 周海宾, 李春燕, 程琼仪 (4441)
组配改良剂联合锌肥对土壤-水稻系统镉迁移转运的影响	周坤华, 周航, 王子钰, 刘雅, 刘佳伟, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4452)
不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响	魏玮, 李平, 郎漫 (4462)
1株草螺属植物内生菌R-13的分离鉴定及对龙葵吸收土壤镉的影响	鹿杰, 刘月敏, 黄永春, 王常荣, 刘斌, 刘仲齐, 黄益宗, 黄雁飞, 张长波 (4471)
不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应	李雨桐, 杨杉, 张艺, 范例, 刘坤, 张晟 (4481)
高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征	刘晓华, 魏天兴 (4489)
餐厨垃圾生物发酵液对黄土丘陵区土壤质量的影响试验	邵立明, 任俊达, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (4500)
秦岭不同海拔土壤团聚体稳定性及其与土壤酶活性的耦合关系	马震菲, 胡汗, 李益, 郭鑫鑫, 任成杰, 赵发珠 (4510)
电活性微生物激活生物炭/零价铁协同钝化Cr(VI)及机制	廖聪坚, 赵晓蕾, 刘凯, 钟松雄, 李芳柏, 方利平, 叶挺进, 石虎砚 (4520)
降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响	蒿康伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平 (4527)
氮肥分施次数及硝化抑制剂对盆栽玉米N ₂ O排放的影响	符佩娇, 吉恒宽, 何秋香, 汤水荣, 王鸿浩, 伍延正, 孟磊 (4538)
负载NH ₄ ⁺ -N生物炭对土壤N ₂ O-N排放和NH ₃ -N挥发的影响	马晓刚, 何建桥, 陈玉蓝, 李德天, 刘川, 董建新, 郑学博 (4548)
微塑料添加对橘园土壤有机碳矿化的影响	张秀玲, 鄢紫薇, 王峰, 王玺, 徐晗, 胡荣桂, 严昶, 林杉 (4558)
1985~2019年中国全氟辛酸酯基化合物的动态物质流分析	王佳钰, 陈景文, 唐伟豪, 崔蕴晗, 王中钰, 宋国宝, 陈伟强 (4566)
《环境科学》征订启事(4201)	
《环境科学》征稿简则(4340)	
信息(4382, 4537, 4565)	

水力停留时间对潜流湿地净化效果影响及脱氮途径解析

齐冉^{1,2,3}, 张灵^{1,2}, 杨帆¹, 颜昌宙^{1*}

(1. 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002)

摘要: 利用连续进水的垂直潜流人工湿地和水平潜流人工湿地, 比较分析了4种水力停留时间对常规污染物去除效果的影响, 在最佳水力停留时间下探究了两种湿地内部各基质层硝化、反硝化和氨氧化功能基因丰度以及硝化与反硝化作用强度; 通过对两种湿地脱氮影响因素的冗余分析和方差分解分析, 得出影响湿地氮去除的主要因素。结果表明, 当水力停留时间为24 h时, 两种湿地系统对常规污染物(COD、TP、TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)去除效果最佳, 去除率均大于70%, 此时湿地内部对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN的去除率以及硝化和反硝化强度皆表现出沿水流方向逐级递减的趋势; 3种功能基因中, 反硝化功能基因(*nirS*)丰度远高于硝化功能基因(*nirA*)和氨氧化功能基因(*AOB-amoA*)。在本研究中, 两种潜流人工湿地氮去除能力均受环境因素和微生物因素共同影响, 其中, 微生物因素对脱氮贡献率最高(55%和48%)。除此之外, TN和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率均与DO、基质比表面积、COD浓度和硝化功能基因及反硝化功能基因丰度呈正比, 与pH值成反比。因此, 为提高两种系统氮去除效果, 均可通过提高基质层溶解氧和碳源含量以及适当地降低pH值来实现, 水平潜流人工湿地还可通过更换比表面积较大的基质层来显著提高系统脱氮效果。本研究为人工湿地的设计以及最佳水力停留时间的选择提供了理论基础, 脱氮途径的定量化解析对深入理解人工湿地氮去除机制以及提高氮素去除率具有重要的指导意义。

关键词: 潜流人工湿地; 水力停留时间; 硝化-反硝化作用; 脱氮功能基因; 冗余分析; 方差分解分析

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)09-4296-08 DOI: 10.13227/j.hjks.202101100

Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism

QI Ran^{1,2,3}, ZHANG Ling^{1,2}, YANG Fan¹, YAN Chang-zhou^{1*}

(1. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This study used vertical and horizontal subsurface constructed wetlands with continuous inflow, to compare and analyze the effects of four hydraulic residence times on the removal efficiency of conventional pollutants. Using the optimal hydraulic retention time, the two types of wetlands were examined in terms of the stromal layer nitrification, denitrification, and ammonia oxidation abundance of functional genes, as well as the intensity of nitrification and denitrification. In addition, redundancy analysis and variance decomposition analysis were used to determine the main factors affecting nitrogen removal in the two kinds of wetlands, so that targeted improvement measures can be suggested. The best removal efficiency of conventional pollutants (COD, TP, TN, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$) was achieved with a hydraulic retention time of 24 h, resulting in a removal rate of more than 70%. With a 24 h retention time, the removal rate of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN and the intensity of nitrification and denitrification exhibited a gradually decreasing trend along the flow direction. Among the three functional genes, the abundance of denitrification functional genes (*nirS*) was much higher than that of nitrification functional genes (*nirA*) and ammonia oxidation functional genes (*AOB-amoA*). In this study, the nitrogen removal ability of the two subsurface flow constructed wetlands was jointly affected by environmental factors and microbial factors, among which microbial factors contributed the most to nitrogen removal (55% and 48%). In addition, the removal rates of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ were proportional to DO, specific surface area of substrate, COD concentration, as well as nitrification and denitrification functional genes, but inversely proportional to pH. Therefore, in order to improve the nitrogen removal efficiency of both systems, the amount of dissolved oxygen and carbon sources in the substrate layer should be increased, while the pH value should be appropriately reduced. Moreover, the horizontal subsurface constructed wetland significantly improves the nitrogen removal efficiency of the system, as the substrate layer has a larger specific surface area. This study provides a theoretical basis for the design of constructed wetlands and the selection of an optimal hydraulic residence time. Quantitative analysis of nitrogen removal pathways is of great significance for understanding the nitrogen removal mechanism and improving the nitrogen removal rate in constructed wetlands.

Key words: subsurface flow constructed wetland; hydraulic retention time; nitrification-denitrification; nitrogen removal function gene; redundancy analysis variance; decomposition analysis

收稿日期: 2021-01-12; 修订日期: 2021-03-02

基金项目: 美丽中国生态文明建设科技工程专项(XDA23030203); 国家重点研发计划项目(2018YFC0506904)

作者简介: 齐冉(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水环境, E-mail: rqi@iue.ac.cn

* 通信作者, E-mail: czyan@iue.ac.cn

为改善流域水生态环境质量,寻求一种运行成本低、易于管理且污染物去除效率高的污水处理工艺十分必要^[1]. 人工湿地是一种模拟天然湿地的功能与结构,利用植物吸收、基质吸附以及微生物降解实现对污水高效净化的系统^[2],通常分为表面流、垂直潜流和水平潜流这 3 种类型^[3]. 与表面流人工湿地相比,潜流人工湿地具有占地面积小、污染物去除效率高和保温效果好等优点^[4],在污水处理领域和生态修复方面有着非常广阔的应用前景^[5].

水力停留时间是影响人工湿地脱氮除磷的重要因素之一^[6~9],确定最佳水力停留时间对保证湿地持久稳定运行具有现实意义. 同时,微生物脱氮一直被认为是人工湿地氮去除的主要路径. 有研究表明,*amoA*、*nxrA* 以及 *nirS* 基因是微生物硝化-反硝化脱氮过程中的关键基因^[10~12]. 然而,除微生物作用外,溶解氧、pH、湿地基质以及碳源含量等环境因素都影响着系统整体的脱氮能力^[13],仅仅研究单一因素无法全面地分析人工湿地的脱氮机制. 因此,对人工湿地脱氮因素进行综合研究并对其定量化分析,有助于更好地了解氮去除路径,强化人工湿地脱氮的

薄弱环节.

本研究构建了垂直潜流和水平潜流两种类型的人工湿地,在连续运行 6 个月的基础上探究了不同水力停留时间下常规污染物的去除效果. 并且,通过对各基质层硝化反硝化速率测试以及硝化功能基因(*nxrA*)、反硝化功能基因(*nirS*)和氨氧化功能基因(*AOB-amoA*)的丰度检测探究了潜流型人工湿地微生物脱氮机制. 除此之外,通过对微生物和环境因素的冗余分析和方差分解分析,进一步揭示了湿地脱氮途径以及各途径的贡献率,从而针对性地提出改进措施,以期提高人工湿地氮去除效果和稳定性.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本实验选取水葱和黄花鸢尾作为供试植物. 选取 1:2 的河沙土壤混合物、生物陶粒和砾石作为供试基质. 实验用水取自中国科学院城市环境研究所内部河流,因河水常规污染物浓度较低,为模拟农村生活污水水质浓度,采取外加营养物质提高常规污染物浓度,所配水质如表 1 所示.

表 1 进水水质浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Water quality of domestic sewage nutrient/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

水质指标	COD	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
质量浓度	230 ~ 250	5 ~ 8	6 ~ 9	11 ~ 17	3.5 ~ 4.5

1.2 人工湿地的建立及运行

为了保证实验数据的可靠性,确保湿地规模化运行,本实验在厦门市城市环境研究所温室进行,模拟构建了两种人工湿地系统(垂直潜流和水平潜流). 如图 1 所示:主体装置皆由尺寸为 $120\text{ cm}\times 75\text{ cm}\times 65\text{ cm}$ 聚乙烯塑料容器制作而成,垂直潜流人工湿地采用顶部布水方式;水平潜流人工湿地两端填充 5 cm 左右的砾石层,布水管安装高度为 50 cm,两种反应器出水管均安装在底部. 基质填充高度为 50 cm,自上而下分别为 10 cm 河沙土壤混合层、20

cm 生物陶粒层以及 30 cm 砾石层,池体内部埋有 9 个 PVC 取样管,用于采集各基质层水样. 土壤层种植鸢尾和水葱,两者种植密度分别为 $16\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $12\text{ 丛}\cdot\text{m}^{-2}$.

本实验过程中共设置 4 种水力停留时间,分别为 48、36、24 h 以及 12 h;进水方式为连续进水,进水通过蠕动泵和布水装置均匀地流经人工湿地床体.

1.3 实验方法

1.3.1 水样采集及测试方法

本实验期间每个反应器内部设置 27 个水样采

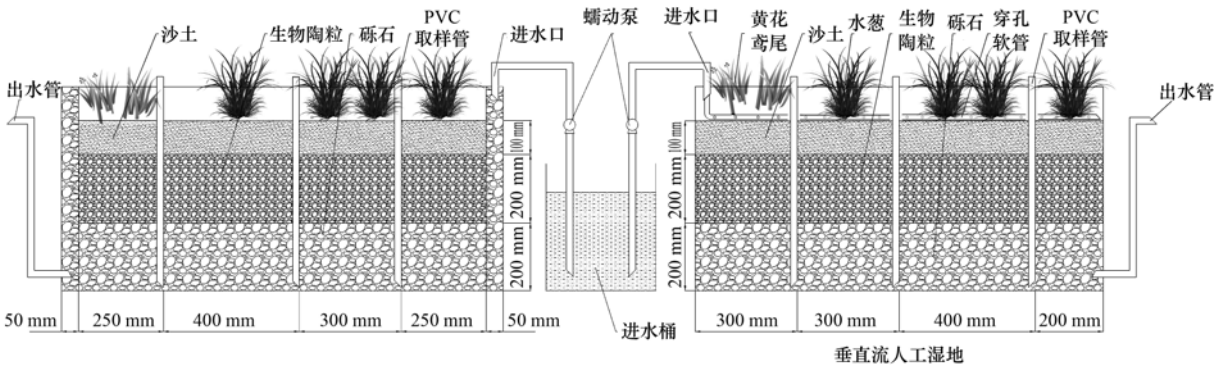


图 1 人工湿地装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of constructed wetland installation

样点,分别采集各层水样. 采样期间取垂直潜流土壤层、生物陶粒层和砾石层 30 cm 处各 3 个水样分别进行混合,混合样分别记为 CS-1、CZ-1 和 CD-1, 60 cm 处各 3 个水样分别进行混合,混合样分别记为 CS-2、CZ-2 和 CD-2; 100 cm 处各 3 个水样分别进行混合,混合样分别记为 CS-3、CZ-3 和 CD-3. 取水平潜流土壤层、生物陶粒层和砾石层 30 cm 处各 3 个水样分别进行混合,混合样分别记为 SS-1、SZ-1 和 SD-1, 60 cm 处各 3 个水样分别进行混合,混合样分别记为 SS-2、SZ-2 和 SD-2; 100 cm 处各 3 个水样分别进行混合,混合样分别记为 SS-3、SZ-3 和 SD-3. 水样主要测试指标有: 溶解氧(DO)、pH、化学需氧量(COD)、总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$),其中 DO 和 pH 用 HACH-HQ30d 快速测定仪测定,其余指标测定方法参照文献[14].

1.3.2 基质采集方法

在水力停留时间为 24 h 时,对湿地两端各基层质层取样,共计 12 个样品. 其中垂直潜流土壤层两端基质层样品记为 CS-1 和 CS-2,陶粒层样品记为 CZ-1 和 CZ-2,砾石层样品记为 CD-1 和 CD-2; 水平潜流进水端和出水端基质样品土壤层分别记为 SS-1 和 SS-2,陶粒层分别记为 SZ-1 和 SZ-2,砾石层分别记为 SD-1 和 SD-2. 为保证所取样品应具有代表性,各基质层两端均匀设置 3 个取样点进行混合均匀后装入无菌离心管中用于后续测试.

1.3.3 硝化速率测试方法

取各基质层混合样品 2.5 g,加入硫酸铵溶液(每瓶含 N 1 mg),调节水分,固定体积,封口,在 30℃ 培养 2 周. 培养完毕后,以土水比 1:5 加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液浸提,测定浸提液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,同时做不加硫酸铵的对照处理. 计算土样 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化率作为硝化作用强度^[15].

1.3.4 反硝化速率测试方法

取各基质层混合样品 2.5 g,加入硝酸钾溶液(每瓶含 N 1 mg),调节水分,固定体积,封口,在 30℃ 培养 40 h. 培养完毕后,以土水比 1:5 加入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ K_2SO_4 溶液浸提,测定浸提液 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,同时做不加硝酸钾的对照处理. 计算土样 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化率作为反硝化作用强度^[15].

1.3.5 基质样品种 DNA 的提取

利用土壤基因组 DNA 提取试剂盒(天根生化科技有限公司)提取土壤总 DNA. 称取 0.25 g 土壤样品,按试剂盒提供的操作说明进行,利用 NanoDrop 分光光度计(ND-2000, Thermo Fisher Scientific)和琼脂糖凝胶电泳检测提取 DNA 的浓度和纯度. 将提取的 DNA 保存于 -80℃ 冰箱用于后续

分析.

1.3.6 实时荧光定量 PCR

采用实时荧光定量 PCR 技术对人工湿地各基质样品中 3 种功能基因(*nirS*、*nxrA* 和 *AOB-amoA*)进行定量. 定量 PCR 过程在 ABI7500 定量 PCR 仪(Applied Biosystems)上进行. 本实验中所用引物如表 2 所示.

表 2 功能基因 qPCR 所用引物

Table 2 Primer of genes for qPCR

基因	引物	引物序列(5'-3')
<i>nirS</i>	上游	G TSAACGTSAAGGARACSGG
<i>nirS</i>	下游	GASTTCGGRTGSGTCTTGA
<i>AOB-amoA</i>	上游	GGGGTTTCTACTGTGCGT
<i>AOB-amoA</i>	下游	CCCCTCKGSAAGCCTTCTTC
<i>nxrA</i>	上游	CAGACCGACGTGTGCGAAAG
<i>nxrA</i>	下游	TCYACAAGGAACGGAAGGTC

1.4 数据处理与质量控制

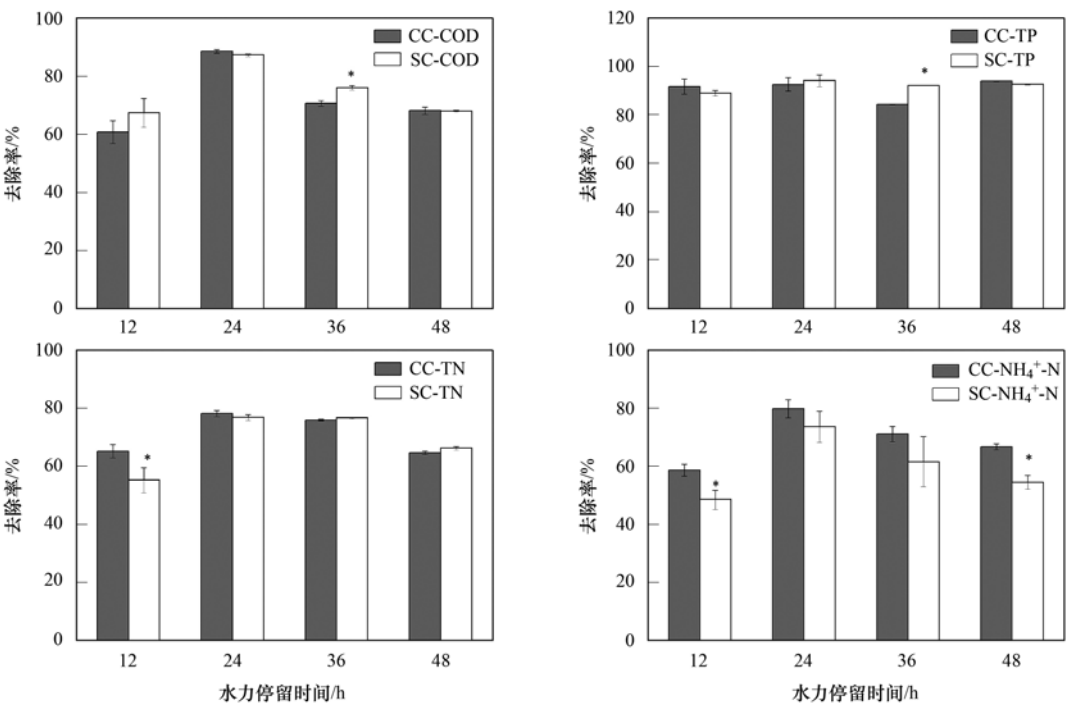
本实验过程中,每个水力停留时间运行两周左右的时间,对进水和出水进行取样,用于各常规污染物测试. 采用软件 Excel 2005 对实验数据进行分析,用 RStudio 3.6.3 对数据进行冗余分析和方差分解分析. 并使用 Orogen 2017 和 Microsoft PowerPoint 97-2003 绘制图形.

2 结果与讨论

2.1 不同水力停留时间下垂直潜流人工湿地以及水平潜流人工湿地污染物去除效果

由图 2 可知,4 种水力停留时间下,两种人工湿地对 COD、TP、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率存在转折点. 当水力停留时间为 24 h 时,4 种常规污染物的去除效果最好.

在湿地系统中, COD 主要通过微生物缺氧和好氧代谢过程被分解去除或利用^[16],而 TP 的去除主要依赖于填料的吸附和沉淀^[17]. 本研究中, COD 和 TP 的去除效果随着水力停留时间的延长先升高后降低,当水力停留时间为 24 h 时,两种湿地对 COD 和 TP 的去除率最高(垂直潜流人工湿地为 88.50% 和 92.49%; 水平潜流人工湿地为 87.15% 和 94.01%). 当水力停留时间过短时,污水中的 COD 还未来得及被系统充分降解或吸附,而当水力停留时间过长时,容易造成系统内部缺氧状态,并且基质中微生物长时间处于贫营养状态,从而削弱了微生物活性,导致去除率下降^[18]; 由于基质的吸附沉淀是去除磷的主要途径,基质内含的活性铁离子和交换性铝离子可短时间快速吸附除磷,当吸附位点饱和时,吸附作用不再发生,因此去除率也就不会随着水力停留时间的延长而提高^[19].



* 表示两种湿地类型对常规污染物去除率显著性 $P < 0.05$

图2 不同水力停留时间下潜流湿地常规污染物去除率

Fig. 2 Removal rate of conventional pollutants in subsurface flow wetlands with different hydraulic residence times

与 COD 和 TP 一样,不同水力停留时间下, TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果有明显的差异. 当水力停留时间为 24 h 时,脱氮效果最佳,其中垂直潜流人工湿地对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别为 78.03% 和 79.71%; 水平潜流人工湿地分别为 76.70% 和 73.50%. 在一定的水力停留时间范围内,随着时间的延长,氮的去除率明显增高^[20]; 但是当停留时间过长时,系统内部有机物含量降低,并且基质将处于严重的缺氧状态,

抑制了硝化作用^[21],此时反硝化作用的底物浓度降低,且反硝化过程所需碳源不足,从而导致湿地系统对 TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率明显降低.

2.2 两种人工湿地各基质层总氮和氨氮的去除率以及硝化和反硝化速率

由图 3 可知,垂直潜流人工湿地 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率以及硝化和反硝化强度表现出沿重力方向逐级递减的趋势. 其中,土壤层对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去

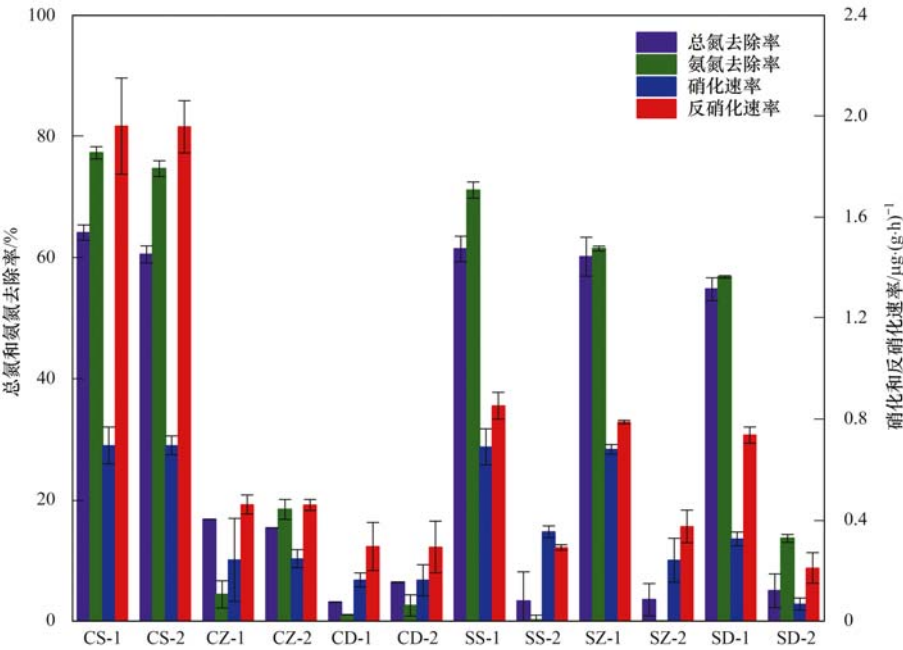


图3 各基质层总氮和氨氮去除率以及硝化和反硝化速率

Fig. 3 Total nitrogen (TN) and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) removal rates, as well as nitrification and denitrification rates of each substrate layer

除率范围分别为 74.64% ~ 77.26% 和 60.54% ~ 64.09%, 基质层两端硝化作用和反硝化作用最强, 可达 $0.697 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $1.960 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 水平潜流人工湿地内部各基质层 NH_4^+ -N 和 TN 的去除率以及硝化和反硝化强度均表现出进水端大于出水端, 其中进水端对 NH_4^+ -N 和 TN 的去除率范围分别为 56.82% ~ 71.09% 和 54.79% ~ 61.42%, 硝化和反硝化作用强度范围分别为: $0.328 \sim 0.692 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.738 \sim 0.853 \mu\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 有研究表明, 硝化-反硝化作用与碳源、TN 和 TP 含量呈显著正相关^[22,23]. 在本研究中, 垂直潜流人工湿地土壤层以及水平潜流人工湿地进水端因具有充足的营

养源, 为硝化和反硝化作用的发生提供了有利的条件, 从而导致硝化和反硝化作用最强, NH_4^+ -N 和 TN 的去除效果最好.

2.3 两种人工湿地各基质层功能基因数量

由图 4 可知, 除垂直潜流人工湿地 CS-1 采样点 *nirS* 和 AOB-*amoA* 数量较多, 分别为 2.23×10^8 平均拷贝数 $\cdot \text{g}^{-1}$ 和 9.24×10^5 平均拷贝数 $\cdot \text{g}^{-1}$ (以基质计), 两种湿地各基质层 *nirS* 和 AOB-*amoA* 数量波动范围较小. 相较于 *nirS* 和 AOB-*amoA* 而言, *nxrA* 数量相对较少. 并且, 垂直潜流和水平潜流两种人工湿地内部 *nxrA* 数量变化趋势均表现土壤层远高于生物陶粒层和砾石层.

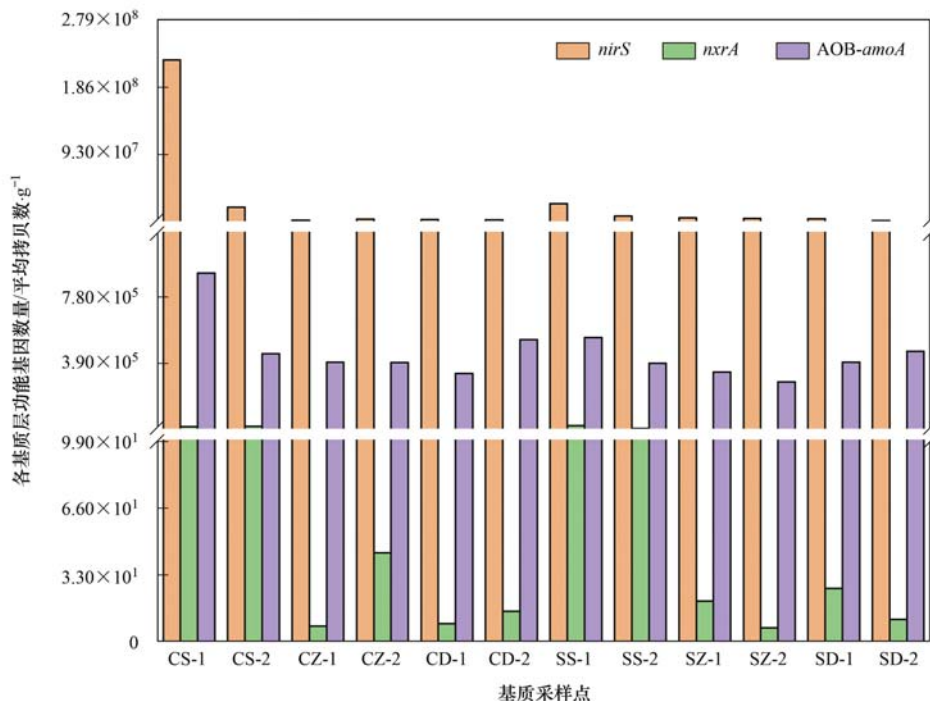


图 4 各基质层功能基因数量

Fig. 4 Number of functional genes in each stroma layer

溶解氧 (DO) 是脱氮功能基因数量的限制因素之一^[24], 在本研究中垂直潜流人工湿地土壤层 DO 变化范围为: $6.30 \sim 6.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物陶粒层 DO 变化范围为: $5.50 \sim 5.90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 砾石层 DO 变化范围为: $4.70 \sim 5.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 水平潜流人工湿地土壤层 DO 变化范围为: $3.84 \sim 5.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 生物陶粒层 DO 变化范围为: $2.50 \sim 4.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 砾石层 DO 变化范围为: $2.21 \sim 3.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 携带 *nirS* 的反硝化细菌为兼性厌氧菌, 通常, 氧的存在会抑制其活性^[25]. 值得注意的是, 尽管两种湿地土壤层 DO 处于较高水平, 然而该基质层反硝化功能基因数量却不低于陶粒层和砾石层, 甚至部分区域 (CS-1) 远高于陶粒层和砾石层. Wu 等^[26] 的研究表明, 由于反硝化细菌大多为异养, 植物根系分泌物中含有的低

分子量有机酸、糖、氨基酸和次级代谢产物可以为其提供碳源, 促进反硝化菌繁殖和活性提高^[27]. 结合两种湿地植物根系分布情况发现, 土壤层植物根系发达, 该基质层根系分泌物如蔗糖等含量相对偏高. 因此, 在本研究中土壤层 *nirS* 数量偏高, 推测其原因可能是土壤层中植物根系影响了根际周围碳源含量, 从而导致携带有 *nirS* 的反硝化细菌群落结构发生变化.

Randall 等^[28] 的研究认为当 DO 高于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 系统中的微生物可进行正常的硝化反应. 因此, 在本研究中, 各基质层的硝化细菌活性均未受到抑制. 随着基质层深度的提高, 溶解氧含量逐渐降低, *nxrA* 数量也呈现出逐渐降低的趋势, 这与贺峰等^[15] 的研究结论接近.

2.4 两种人工湿地环境因子、TN 和NH₄⁺-N的去除率与氮去除功能基因之间的关系

为了进一步确定潜流人工湿地内部氮去除机制,本研究将 3 种环境因子[DO、基质比表面积 (BB)、pH]、3 种功能基因 (*nxrA*、*nirS*、AOB-*amoA*) 和 3 种污染物去除率(TN、NH₄⁺-N、COD) 进行冗余分析和方差分解分析。

由图 5 和图 6 可知,垂直潜流人工湿地 RDA 图第一轴和第二轴可解释累计高达 98.56% 的变异; 水平潜流人工湿地 RDA 图第一轴和第二轴可解释累计 94.27% 的变异. 因此,均可选用第一轴和第二轴进行可视化. 结果显示,在垂直潜流人工湿地中 DO、pH 和 COD 这 3 个因子的箭头较长,说明基质层内 DO、COD 和 pH 是影响 *nxrA*、*nirS* 和 AOB-*amoA* 的主要因子; 其中 DO 和 COD 与 *nxrA* 和 *nirS* 呈正相关,而 pH 与这两种功能基因呈负相关关系. 在水平潜流人工湿地中除 DO、COD 和 pH 外, BB 也是影响功能基因的主要环境因子; 其中 DO 与 *nxrA* 呈正相关关系, BB 和 COD 与 *nirS* 呈正相关关系,而 pH 与两种功能基因均呈负相关关系。

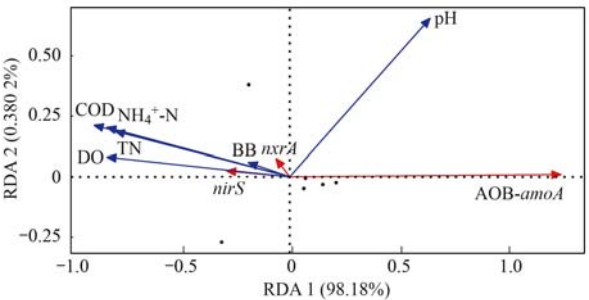


图5 垂直潜流人工湿地 RDA 约束排序分析
Fig. 5 Biplot of RDA constraint sequencing analysis of vertical subsurface flow constructed wetlands

有研究表明,湿地基质类型、溶解氧、pH 和 COD 在人工湿地氮去除过程中发挥着重要效应^[13]. 当湿地基质具有较大的比表面积时,可以为微生物提供更大的附着面积并且对氮的吸附效果也相应提高^[29]; 当湿地内部 DO 偏低或 pH 值偏大,硝化过程将会受到抑制,从而影响反硝化作用强度^[30,31]; 而各基质层 COD 浓度偏低时,微生物可利用碳源含

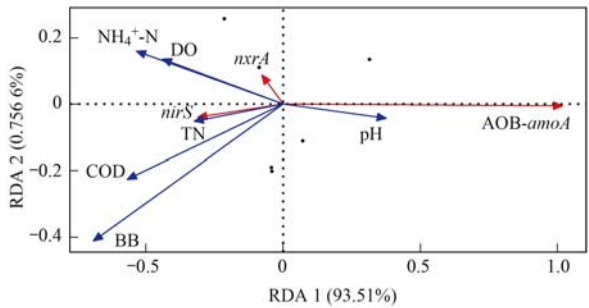


图6 水平潜流人工湿地 RDA 约束排序分析
Fig. 6 Biplot of RDA constraint sequencing analysis of horizontal subsurface flow constructed wetlands

量受到限制,微生物没有充足的营养源,其活性降低,导致湿地脱氮效果不佳^[32].

在本研究中,垂直潜流人工湿地 TN 和NH₄⁺-N 的去除率主要与 DO、BB、COD、*nxrA* 和 *nirS* 呈正相关. 水平潜流人工湿地 NH₄⁺-N 的去除率主要与 DO 和 *nxrA* 呈正相关; TN 去除率主要与 DO、BB、COD、*nxrA* 和 *nirS* 呈正相关. 此外,两种潜流型人工湿地 TN 和 NH₄⁺ 的去除率与 pH 均成反比。

为了对两种潜流湿地脱氮效果影响因素做进一步识别,根据冗余分析结果,提取出两种潜流湿地脱氮效果的影响因素对其进行方差分解分析. 由图 7 可知,在垂直潜流人工湿地中系统内参与氮转化的功能基因对脱氮的贡献率为 55%,其次是环境因素 (32%),微生物和环境因素的相互作用占 (4%),其他因素占 9%; 水平潜流人工湿地系统中微生物对脱氮贡献率为 48%,环境因素占 19%,其他因素占 35%。

明确人工湿地系统氮转化影响因素以及定量地分析各因素贡献率,对于人工湿地设计和改善十分有意义. 通过两种湿地冗余分析和方差分解分析发现,垂直潜流和水平潜流人工湿地都可以通过人工曝气和增加碳源含量来提高系统内部溶解氧和 COD 浓度以及适当地降低 pH 值从而促进微生物的硝化-反硝化强度. 除此之外,相较于垂直潜流人工湿地,水平潜流人工湿地系统中基质比表面积对脱氮效果影响更加显著,因此水平潜流人工湿地还可通过增加土壤层或生物陶粒层厚度来提高系统的脱

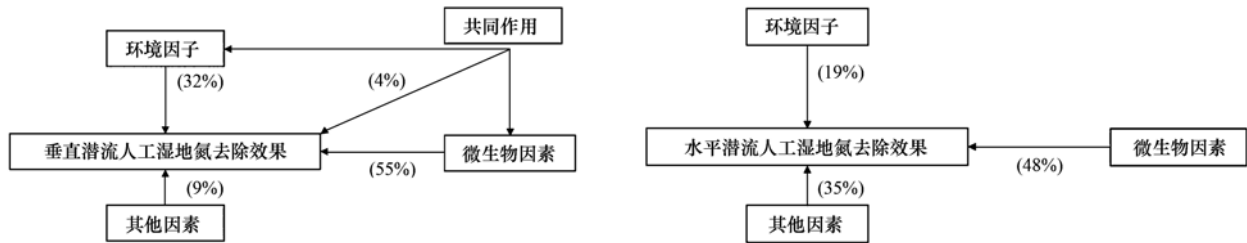


图7 两种潜流人工湿地 VPA 结果示意
Fig. 7 Diagram of VPA results for two subsurface flow constructed wetlands

氮能力。

3 结论

(1)当水力停留时间为 24 h 时,两种类型人工湿地对常规污染物(COD、TP、TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)去除效果最佳。此时,系统内部对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率以及硝化和反硝化强度皆表现出沿水流方向逐级递减趋势;各基质层中 *nirA* 数量明显低于 *nirS* 和 *AOB-amoA*。

(2)冗余分析结果表明,垂直潜流人工湿地参与氮转化的 3 种功能基因主要受溶解氧(DO)、pH 和 COD 影响,而水平潜流人工湿地除溶解氧(DO)、pH 和 COD 外,基质比表面积(BB)也是影响功能基因丰度的主要环境因素。

(3)冗余分析结合方差分解分析结果表明,垂直和水平潜流湿地系统氮去除效果均主要受微生物因素影响(分别为 55% 和 48%),其次是环境因素(32% 和 19%)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 廖雪珂,严晗璐,王智源,等.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[J].环境科学,2020,41(12): 5509-5517.
Liao X K, Yan H L, Wang Z Y, et al. Advanced treatment of tail water using pilot-scale horizontal and vertical subsurface flow constructed wetlands in low-temperature seasons [J]. Environmental Science, 2020, 41(12): 5509-5517.
- [3] 丁怡,王玮,宋新山,等.人工湿地在水质净化中的应用及研究进展[J].工业水处理,2017,37(3): 6-10.
Ding Y, Wang W, Song X S, et al. Application of constructed wetland to water purification and its research progress [J]. Industrial Water Treatment, 2014, 37(3): 6-10.
- [4] 丁怡,唐海燕,刘兴坡,等.不同类型人工湿地在污水脱氮中的研究进展[J].工业水处理,2019,39(7): 1-3, 9.
Ding Y, Tang H Y, Liu X P, et al. Research progress in different kinds of constructed wetlands for nitrogen removal from wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(7): 1-3, 9.
- [5] 王迪,李红芳,刘锋,等.亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究[J].环境科学,2016,37(5): 1717-1723.
Wang D, Li H F, Liu F, et al. Interception effect of ecological ditch on nitrogen transport in agricultural runoff in subtropical China[J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1717-1723.
- [6] 徐丽,葛大兵,谢小魁.水力停留时间对人工湿地运行的影响[J].中国农学通报,2014,30(31): 219-223.
Xu L, Ge D B, Xie X K. Impact of hydraulic retention time on wetland running [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(31): 219-223.
- [7] 熊佐芳,周云新,洗萍,等.水力负荷对垂直流人工湿地堵塞影响研究[J].水处理技术,2011,37(7): 34-36, 44.
Xiong Z F, Zhou Y X, Xian P, et al. The study for the influence of hydraulic load on clogging of the vertical-flow constructed wetland[J]. Technology of Water Treatment, 2011, 37(7): 34-36, 44.
- [8] 裴亮,孙莉英,梁晶,等.不同填料对阶梯式人工湿地降解农业废水的影响[J].水资源与水工程学报,2018,29(1): 232-235, 241.
Pei L, Sun L Y, Liang J, et al. Effect of different matrix in steps constructed wetland system for degradation of agricultural waste water[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 232-235, 241.
- [9] 王世和,王薇,俞燕.水力条件对人工湿地处理效果的影响[J].东南大学学报(自然科学版),2003,33(3): 359-362.
Wang S H, Wang W, Yu Y. Influence of hydraulic condition on treatment effect of constructed wetland[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(3): 359-362.
- [10] Gale P M, Redely K R, Graetz D A. Nitrogen removal from reclaimed water applied to constructed and natural wetland microcosms[J]. Water Environment Research, 1993, 65(2): 162-168.
- [11] Krishnani K K. Detection and diversity of nitrifying and denitrifying functional genes in coastal aquaculture [J]. Aquaculture, 2010, 302(1-2): 57-70.
- [12] Philippot L. Denitrifying genes in bacterial and archaeal genomes [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Gene Structure and Expression, 2002, 1577(3): 355-376.
- [13] 李旭东,张旭,薛玉,等.沸石芦苇床除氮中试研究[J].环境科学,2003,24(3): 158-160.
Li X D, Zhang X, Xue Y, et al. Nitrogen removal in a pilot-scale zeolite reed bed system[J]. Environmental Science, 2003, 24(3): 158-160.
- [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] 贺锋,吴振斌,陶菁,等.复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J].环境科学,2005,26(1): 47-50.
He F, Wu Z B, Tao J, et al. Nitrification and denitrification in the integrated vertical flow constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2005, 26(1): 47-50.
- [16] 庞长洵.组合型潜流人工湿地净化效能及微生物强化作用分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
Pang C L. Removal efficiency and microbial bioaugmentation analysis of the hybrid subsurface flow constructed wetland systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [17] Vymazal J, Kröpfelová L. Multistage hybrid constructed wetland for enhanced removal of nitrogen[J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 202-208.
- [18] 张弘毅,湛书,王彬,等.组合式人工湿地对分散型生活污水净化效果及其微生物群落结构特征[J].环境化学,2019,38(11): 2535-2545.
Zhang H T, Chen S, Wang B, et al. Purification effect of combined artificial wetlands on dispersed domestic sewage and analysis of microbial community structure [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(11): 2535-2545.
- [19] 张毓媛,曹晨亮,任丽君,等.不同基质组合及水力停留时间下垂直流人工湿地的除污效果[J].生态环境学报,2016,25(2): 292-299.
Zhang Y Y, Cao C L, Ren L J, et al. Research on pollutants removal effect of different combined substrate under different hydraulic retention time in vertical flow constructed wetlands[J].

- Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(2): 292-299.
- [20] Apel E C, Riemer D D, Hills A, *et al.* Measurement and interpretation of isoprene fluxes and isoprene, methacrolein, and methyl vinyl ketone mixing ratios at the prophet site during the 1998 Intensive[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, **107** (D3), doi: 10.1029/2000JD000225.
- [21] Ho K F, Lee S C, Louie P K K, *et al.* Seasonal variation of carbonyl compound concentrations in urban area of Hong Kong [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(8): 1259-1265.
- [22] Burgin A J, Groffman P M, Lewis D N. Factors regulating denitrification in a riparian wetland[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, **74**(5): 1826-1833.
- [23] 孙志高, 刘景双. 湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响因素[J]. 土壤通报, 2008, **39**(6): 1462-1467.
- Sun Z G, Liu J S. Nitrification-denitrification and its affecting factors in wetland soil—A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, **39**(6): 1462-1467.
- [24] Austin D, Nivala J. Energy requirements for nitrification and biological nitrogen removal in engineered wetlands [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(2): 184-192.
- [25] Coban O, Kuschik P, Kappelmeyer U, *et al.* Nitrogen transforming community in a horizontal subsurface-flow constructed wetland[J]. Water Research, 2015, **74**: 203-212.
- [26] Wu H L, Wang X Z, He X J, *et al.* Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland [J]. Science of the Total Environment, 2017, **598**: 697-703.
- [27] Coskun D, Britto D T, Shi W M, *et al.* How plant root exudates shape the nitrogen cycle[J]. Trends in Plant Science, 2017, **22** (8): 661-673.
- [28] Randall C W, Buth D. Nitrite build-up in activated sludge resulting from temperature effects[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1984, **56**(9): 1039-1044.
- [29] 黄逸群, 张民, 徐玉新. 人工湿地填料净化生活污水级配优化研究[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(3): 130-134, 138.
- Huang Y Q, Zhang M, Xu Y X. Optimizing substrate gradation for constructed wetland treating domestic wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(3): 130-134, 138.
- [30] Groeneweg J, Sellner B, Tappe W. Ammonia oxidation in nitrosomonas at NH_3 concentrations near k_m : effects of pH and temperature[J]. Water Research, 1994, **28**(12): 2561-2566.
- [31] Kearney M A, Zhu W X, Graney J. Inorganic nitrogen dynamics in an urban constructed wetland under base-flow and storm-flow conditions[J]. Ecological Engineering, 2013, **60**: 183-191.
- [32] 吕涛, 吴树彪, 柳明慧, 等. 潮汐流及水平潜流人工湿地污水处理效果比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32** (8): 1618-1624.
- Lv T, Wu S B, Liu M H, *et al.* Comparison of purification performance in tidal flow and horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(8): 1618-1624.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Health Impacts of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing, from 2014 to 2020	CHEN Jing, PENG Jin-long, XU Yan-sen (4071)
High-resolution Estimation of Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, FAN Li-hang, <i>et al.</i> (4083)
Impacts of Anthropogenic Emission Reduction and Meteorological Conditions on PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of Beijing-Tianjin-Hebei in Winter	SHAO Xuan-yi, WANG Xiao-qi, ZHONG Yi-sheng, <i>et al.</i> (4095)
Influence of Pollutant Transport from Both Sides of the Taihang Mountains on Cross-Valley Urban Aerosols	WANG Yan, GUO Wei, YAN Shi-ming, <i>et al.</i> (4104)
Variation Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in Winter in Jiashan	ZHANG Ying-long, LI Li, WU Wei-chao, <i>et al.</i> (4116)
Simulation Analysis of the Impact of COVID-19 Pandemic Control on Air Quality in Henan Province based on Machine Learning Algorithm	WEI Yu, XU Qi-xiang, ZHAO Jin-shuai, <i>et al.</i> (4126)
Seasonal Variation, Source Identification, and Health Risk of PM _{2.5} -bound Metals in Xinxiang	LIU Huan-jia, JIA Meng-ke, LIU Yong-li, <i>et al.</i> (4140)
Distribution Characteristics and Seasonal Variations of Arsenic in Atmospheric Aerosols over the Yellow Sea and Bohai Sea	YUAN Shuai, WANG Yan, LIU Ru-hai, <i>et al.</i> (4151)
Extinction Characteristics of Aerosols and the Contribution of Pollution Sources to Light Extinction During Three Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2020 in Tianjin	LI Li-wei, XIAO Zhi-mei, YANG Ning, <i>et al.</i> (4158)
Spatial Variation of Surface Ozone Concentration During the Warm Season and Its Meteorological Driving Factors in China	HE Chao, MU Hang, YANG Lu, <i>et al.</i> (4168)
Exploring Characteristics and Causes of Summer Ozone Pollution Based on Process Analysis in Wuhai	ZHANG Rui-xin, CHEN Qiang, XIA Jia-qi, <i>et al.</i> (4180)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric VOCs in the Coastal Background of the Pearl River Delta	YUN Long, LI Cheng-liu, ZHANG Ming-di, <i>et al.</i> (4191)
Hydrochemical Characteristics and Factors of Surface Water and Groundwater in the Upper Yongding River Basin	KONG Xiao-le, YANG Yong-hui, CAO Bo, <i>et al.</i> (4202)
Temporal and Spatial Variations in Water Quality of Hanjiang River and Its Influencing Factors in Recent Years	CHENG Bing-fen, ZHANG Yuan, XIA Rui, <i>et al.</i> (4211)
Pollution Level, Distribution Characteristic, and Ecological Risk Assessment of Environmentally Persistent Pharmaceutical Pollutants in Surface Water of Jiangsu Province	ZHAO Mei-mei, FAN De-ling, GU Wen, <i>et al.</i> (4222)
Spatial and Temporal Distribution and Pollution Evaluation of Soluble Heavy Metals in Liujiang River Basin	ZHANG Wan-jun, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4234)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater of Leizhou Peninsula	SHI Huan-huan, PAN Yu-jie, ZENG Min, <i>et al.</i> (4246)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements in Groundwater of Longzici Spring Area	XIE Hao, LIANG Yong-ping, LI Jun, <i>et al.</i> (4257)
Seasonal Variation and Sources Identification of Dissolved Sulfate in a Typical Karst Subterranean Stream Basin Using Sulfur and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LAN Gan-jiang, <i>et al.</i> (4267)
Phosphorus Fractions and Quantitative Identification of Pollution Sources in Nanhai Wetland, Baotou	BAI Ya-hong, QIAN Chen-ge, YUAN Si-jing, <i>et al.</i> (4275)
Release Risk of Phosphorus by Sediments and Its Influencing Factors in Ponds and Ditches of a New Urban District Park	LI Ru-zhong, SONG Min, YANG Ji-wei (4287)
Effect of Hydraulic Residence Time on Removal Efficiency of Pollutants in Subsurface Flow Constructed Wetlands and Analysis of Denitrification Mechanism	QI Ran, ZHANG Ling, YANG Fan, <i>et al.</i> (4296)
Enhanced Removal of Pollutants in Constructed Wetlands with Manganese Sands	MA Quan, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (4304)
Application Effect of Four Typical Submerged Macrophytes on Removing Cadmium from Polluted Sediment	TAO Li, WANG Pei-fang, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i> (4311)
Structure of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Response to Dissolved Organic Matter in Baiyangdian Lake During the Water Delivery Period	ZHOU Shi-lei, ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (4319)
Nitrogen and Phosphorus Leaching Characteristics and Adsorption Properties of Hardwood Biochar in Stormwater Runoff	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue (4332)
Indicator Function of Ragworm (<i>Nereididae</i>) on Sediment Microplastic in Haizhou Bay Intertidal Zone	WANG Jia-xuan, SONG Ke-xin, SUN Yi-xin, <i>et al.</i> (4341)
Antagonistic Effect and Mechanism of Nano Titanium Dioxide and Cadmium on the Growth of <i>Scenedesmus obliquus</i>	WANG Pu, ZHAO Li-hong, ZHU Xiao-shan (4350)
Mutual Influence Between Microbial Community, Wastewater Characteristics, and Antibiotic Resistance Genes During Spiramycin Production Wastewater Treatment	WU Cai-yun, LI Hui-li, QIN Cai-xia, <i>et al.</i> (4358)
Effect of Chelated Iron on Nitrogen Removal Efficiency and Microbial Community Structure in the Anaerobic Ferric Ammonium Oxidation	LIAO Hong-yan, SONG Cheng, WAN Liu-yang, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Dissolved Oxygen on Nutrient Removal Performance and Microbial Community in Low Carbon/Nitrogen Municipal Wastewater Treatment Process	CHI Yu-lei, SHI Xuan, REN Tong, <i>et al.</i> (4374)
Shortening SRT of Intermittent Gradient Aeration to Realize Nitrogen and Phosphorus Removal in Short-range SNEDPR System	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (4383)
Characteristics of Partial Denitrification in Biofilm System	YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, ZHANG Qiong, <i>et al.</i> (4390)
Effect of Anaerobic Plug-flow on Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Aerobic Granular Sludge with Intermittent Aeration	LI Dong, CAO Si-yu, WANG Qi, <i>et al.</i> (4399)
Combining Different Aerobic/Anoxic Durations with Zoned Sludge Discharge to Optimize Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules in Domestic Sewage	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (4406)
Meta-analysis of the Effects of Metal Mining on Soil Heavy Metal Concentrations in Southwest China	ZHANG Jian-lin, QU Ming-kai, CHEN Jian, <i>et al.</i> (4414)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Watersheds of the Qinghai-Tibet Plateau	DU Hao-lin, WANG Ying, WANG Jin-song, <i>et al.</i> (4422)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Cadmium Pollution in Soil-crops system of an E-waste Dismantling Area	ZHANG Lu-yao, ZHAO Ke-li, FU Wei-jun (4432)
Characteristics of Modified Biochars and Their Immobilization Effect on Cu and Cd in Polluted Farmland Soil Around Smelter	WANG Xin-yu, MENG Hai-bo, SHEN Yu-jun, <i>et al.</i> (4441)
Combined Effects of Soil Amendment and Zinc Fertilizer on Accumulation and Transportation of Cadmium in Soil-Rice System	ZHOU Kun-hua, ZHOU Hang, WANG Zi-yu, <i>et al.</i> (4452)
Effects of Different Soil Conditioners on Rice Growth and Heavy Metal Uptake in Soil Contaminated with Copper and Cadmium	WEI Wei, LI Ping, LANG Man (4462)
Isolation and Identification of the Plant Endophyte R-13 and Its Effect on Cadmium Accumulation in <i>Solanum nigrum</i> L.	PANG Jie, LIU Yue-min, HUANG Yong-chun, <i>et al.</i> (4471)
Response of Soil Archaeal Community to Heavy Metal Pollution in Different Typical Regions	LI Yu-tong, YANG Shan, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4481)
High-throughput Sequencing Analysis of Soil Bacterial Community in the Grain for Green Project Areas of the Loess Plateau	LIU Xiao-hua, WEI Tian-xing (4489)
Experimental Influence of Food Waste Fermentation Broth on the Soil Quality in a Loess Hilly Area	SHAO Li-ming, REN Jun-da, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4500)
Stability of Soil Aggregates at Different Altitudes in Qinling Mountains and Its Coupling Relationship with Soil Enzyme Activities	MA Huan-fei, HU Han, LI Yi, <i>et al.</i> (4510)
Reactivation of Passivated Biochar/Nanoscale Zero-Valent Iron by an Electroactive Microorganism for Cooperative Hexavalent Chromium Removal and Mechanisms	LIAO Cong-jian, ZHAO Xiao-lei, LIU Kai, <i>et al.</i> (4520)
Influence of Precipitation Change on Soil Respiration in Desert Grassland	HAO Lian-yi, ZHANG Li-hua, XIE Zhong-kui, <i>et al.</i> (4527)
Effects of Nitrogen Fertilizer Application Times and Nitrification Inhibitor on N ₂ O Emission from Potted Maize	FU Pei-jiao, JI Heng-kuan, HE Qiu-xiang, <i>et al.</i> (4538)
Gaseous Nitrogen Emission from Soil After Application of NH ₄ ⁺ -N Loaded Biochar	MA Xiao-gang, HE Jian-qiao, CHEN Yu-lan, <i>et al.</i> (4548)
Effects of Microplastics Addition on Soil Organic Carbon Mineralization in Citrus Orchard	ZHANG Xiu-ling, YAN Zi-wei, WANG Feng, <i>et al.</i> (4558)
Dynamic Material Flow Analysis of Perfluorooctane Sulfonate in China: 1985-2019	WANG Jia-yu, CHEN Jing-wen, TANG Wei-hao, <i>et al.</i> (4566)