

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



2019

Vol.40 No.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性质对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年) 总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性

刘冰^{1,2,3}, 郑煜铭², 李清飞^{1,3}, 赵承美^{1,3}, 魏巍^{1,3}, 张凯^{1,3}

(1. 信阳师范学院地理科学学院, 信阳 464000; 2. 中国科学院城市环境研究所, 厦门 361021; 3. 信阳师范学院河南省水土环境污染协同防治重点实验室, 信阳 464000)

摘要: 将2套潮汐流人工湿地(T-A和T-B)构建为复合人工湿地(HCW), 研究了HCW中反硝化除磷作用的发生及其稳定性。结果表明, 当HCW按照两段进水潮汐流方式连续运行时, T-A的反硝化除磷性能和T-B的硝化性能均可得以强化, HCW随之具有理想的同步脱氮除磷效果; 周期性补充碳源的磷移除操作可缓解T-A中磷素的过量积累, 同时可提高反硝化聚磷菌(DPAOs)胞内聚β-羟基丁酸(PHB)的合成量, 有助于HCW反硝化除磷效果的高效与稳定; 当磷移除周期为30 d时, T-A在反硝化除磷过程中对TP与NO_x⁻-N的去除率分别为(97.86 ± 0.70)%和(98.29 ± 2.62)%, 在磷移除过程中的磷素释放量、PHB合成量(以C/填料计)及补充碳源利用率分别为(1486.29 ± 123.25) mg、(4.43 ± 0.57) mmol·g⁻¹和(94.65 ± 2.66)%, HCW的磷素回收效率则为63.97%。本研究为人工湿地同步脱氮除磷提供了新的思路, 又进一步拓展了磷回收技术的研发和应用范围。

关键词: 复合人工湿地(HCW); 反硝化除磷; 磷移除; 反硝化聚磷菌(DPAOs); 碳源

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5401-10 DOI: 10.13227/j.hjks.201906016

Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability

LIU Bing^{1,2,3}, ZHENG Yu-ming², LI Qing-fei^{1,3}, ZHAO Cheng-mei^{1,3}, WEI Wei^{1,3}, ZHANG Kai^{1,3}

(1. School of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China; 2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 3. Key Laboratory for Synergistic Prevention of Water and Soil Environmental Pollution, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: This study was conducted to explore the startup characteristics and stability of a hybrid constructed wetland (HCW) system with a denitrifying dephosphatation process, which was composed of two tidal flow-constructed wetlands (termed T-A and T-B). As the system was operated according to the two-time feeding tidal flow operation mode, denitrifying dephosphatation and nitrification could be respectively enhanced in T-A and T-B, and the HCW achieved ideal simultaneous denitrification and phosphorus removal effects when treating domestic sewage. The introduction of periodical carbon source supplements for phosphorus harvesting alleviated excessive phosphorus accumulation in T-A and increased the storage of PHB within denitrifying phosphate-accumulating organisms (DPAOs). Subsequently, a stable and efficient denitrifying phosphorus removal effect could be guaranteed to some extent as the HCW system was operated during the test. As the phosphorus harvesting cycle length was 30 d, the mean phosphorus recovery efficiency of the HCW system was 63.97% throughout the experiment. Regarding the typical cycle, the mean TP and NO_x⁻-N removal efficiencies of T-A could respectively achieve (97.86 ± 0.70)% and (98.29 ± 2.62)% during the denitrifying dephosphatation process, and the amounts of phosphorus release and PHB synthesis in T-A could also reach up to (1486.29 ± 123.25) mg and (4.43 ± 0.57) mmol·g⁻¹, respectively, during the phosphorus harvesting process. Meanwhile, the utilization rate of the supplementary carbon in the system was (94.65 ± 2.66)%. To summarize, this study offers a new method for simultaneous denitrification and phosphorus removal in constructed wetlands, and expands the development and application range of phosphorus recovery processes.

Key words: hybrid constructed wetland (HCW); denitrifying dephosphatation; phosphorus harvesting; denitrifying phosphate accumulating organisms (DPAOs); carbon source

潮汐流人工湿地(TFCW)在污水脱氮除磷方面存在以下不足^[1,2]:①TFCW具有良好的硝化性能, 但其反硝化能力较差, 导致其出水中NO_x⁻-N浓度过高, TN去除率偏低;②TFCW的除磷性能主要取决于所用填料除磷能力的高低, 当填料的磷素吸附容量趋于饱和时, TFCW的除磷效果便会受到影响。为突破上述“瓶颈”, 有必要探寻相关措施, 以期既能提高TFCW的脱氮能力, 又能确保其除磷效能的高效与稳定。

Li等^[3]的研究证实, 除磷菌(PAOs)对磷的超

量吸收作用在一定条件下可成为TFCW除磷的重要途径。后续相关研究亦通过TFCW运行方式的优化与磷移除操作的设置成功构建了生物蓄磷/磷移除型TFCW^[4,5]。该系统具有良好且稳定的除磷性

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51208448); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划项目(2015GGJS-136); 河南省科技厅科技攻关项目(162102310498); 河南省教育厅科学技术研究重点项目(14A610004); 信阳师范学院“南湖学者”奖励计划青年项目

作者简介: 刘冰(1978~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水处理原理与技术, E-mail: liubing_982002@163.com

能,并可“除磷”以回收目标产物方式予以实现.众所周知,反硝化除磷作用可使有机碳源发挥“一碳两用”的作用,将除磷和反硝化这两个独立的过程仅在缺氧环境下就可同时完成^[6,7],如能在TFCW中强化该作用,则不但可弥补TFCW在污水脱氮除磷方面存在的不足,亦有助于磷的资源化回收.

为此,本研究将2套TFCW组合为复合人工湿地(HCW),开展了HCW中反硝化除磷作用的发生及其稳定性分析,以期为人造湿地同步脱氮除磷技术提供新的思路,并进一步拓展磷回收技术的研发和应用范围.

1 材料与方法

1.1 试验装置

HCW位于温室内($T \approx 25^\circ\text{C}$),由1个中间水箱和2套TFCW(标记为T-A和T-B)组成. T-A和T-B的尺寸($\varphi \times H = 10\text{ cm} \times 100\text{ cm}$)相同,填料层厚度亦均为90 cm;下层(80~90 cm)填充砾石(粒径20~30 mm);上层(0~80 cm)填充火山岩(粒径2~5 mm),其中种植2~3株芦苇. T-A的进水管和排水管均设置于距其底部5 cm的侧壁处;T-B的进水管和排水管分别设置于距其顶部和底部5 cm的侧壁处. 试验开始之前,将一定体积的污水处理厂二沉池污泥($\text{MLSS} \approx 5000\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)作为种泥加入各TFCW中,而后HCW进入试验阶段.

1.2 运行模式

HCW每天运行3个周期,每个周期8 h. 典型

周期内HCW按照两段进水潮汐流方式运行(图1):首先将3 L进水(一段进水)泵入T-A中反应,期间T-B处于闲置期;随后将一段进水泵入T-B中进一步处理;当T-A排出一段进水后,随即将中间水箱中上一周期的T-B出水作为二段进水再次泵入T-A中反应;周期末,T-A将二段出水排出,T-B出水则排入中间水箱用作下一个周期中T-A的二段进水. T-A在一个周期内的运行过程可分为进水期 A_1 ($t = 10\text{ min}$)、反应期 A_1 ($t = 180\text{ min}$)、中间排水期 A ($t = 20\text{ min}$)、进水期 A_2 ($t = 10\text{ min}$)、反应期 A_2 ($t = 240\text{ min}$)和排水期 A ($t = 20\text{ min}$)这6个阶段,T-B的运行过程可分为闲置期 B ($t = 190\text{ min}$)、进水期 B ($t = 20\text{ min}$)、反应期 B ($t = 250\text{ min}$)和排水期 B ($t = 20\text{ min}$)4个阶段. 试验过程中HCW的水力负荷(HLR)为 $0.57\text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,进水在该系统中的水力停留时间(HRT)约为0.67 d.

1.3 磷移除过程

将T-A在运行过程中积累的磷定期移出并清除其填料层中老化生物膜的过程称为磷移除过程,期间产生的厌氧富磷液由磷浓缩池收集,磷移除过程参照文献[8]. 在HCW的驯化阶段($t = 45\text{ d}$),不设置针对T-A的磷移除过程;而当T-A中的反硝化除磷作用得以强化后,对其定期进行磷移除操作,该过程中HCW的HLR为 $1.15\text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 本试验设置了3组HCW(即HCW₂₀、HCW₃₀和HCW₄₀),将其磷移除周期分别设为20、30和40 d,则HCW₂₀、HCW₃₀和HCW₄₀在一个磷移除周期内的污水处理量与厌氧富磷液的体积比分别为171:18、

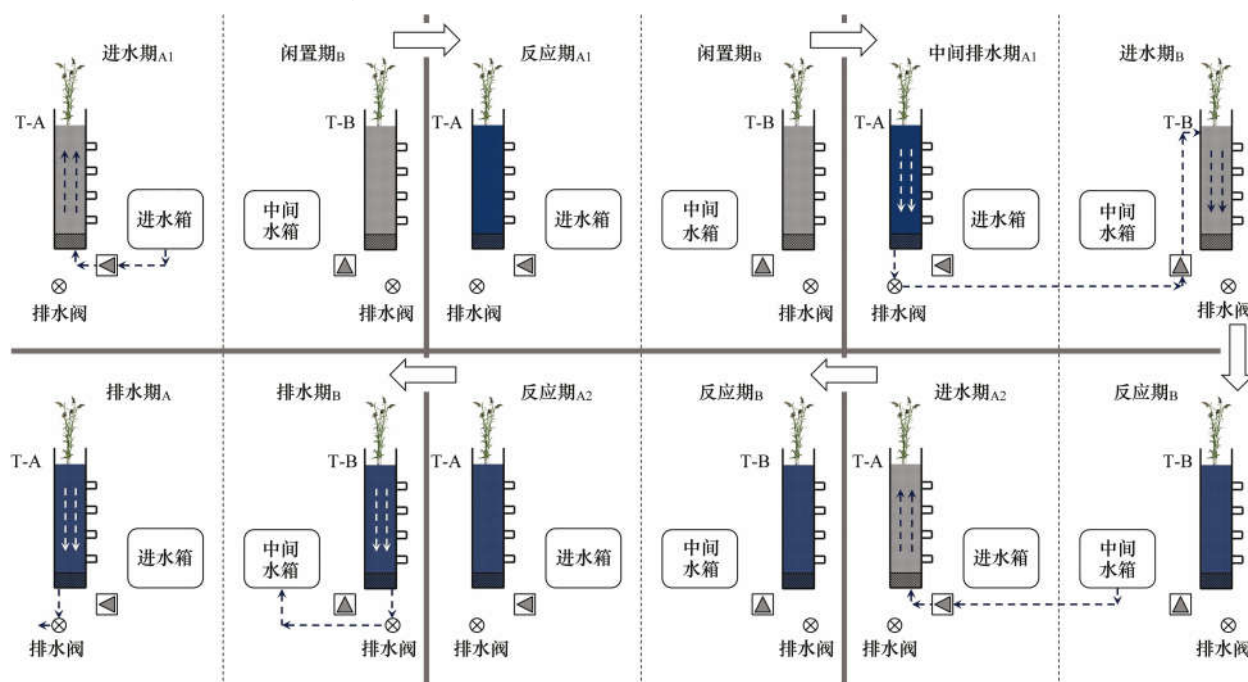


图1 典型周期内HCW运行示意

Fig. 1 Operation schematic of the HCW during a typical cycle duration

261:18 和 351:18. 稳定运行阶段 HCW₂₀、HCW₃₀ 和 HCW₄₀ 分别经历了 12、8 和 6 个磷移除过程.

1.4 进水水质

将某园区内生活污水经沉淀处理后,取上清液作为 HCW 的进水和磷移除过程中的用水. 进水中 COD、BOD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 TP 的质量浓度分别为 (279.40 ± 37.72)、(128.13 ± 32.57)、(42.97 ± 2.85)、(35.54 ± 1.80)、(1.72 ± 0.18)、(2.80 ± 0.57) 和 (8.64 ± 2.39) mg·L⁻¹, 进水 pH 值为 7.74 ± 0.58.

1.5 分析方法

1.5.1 水样采集及分析方法

定期采集 T-A 和 T-B 的进出水水样进行分析,待 HCW 运行稳定后,在典型周期内每隔 30 min 分别采集 T-A 和 T-B 中的水样进行分析. 水样中 COD、BOD、TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 TP 的测定方法均参照文献[9]. 典型周期内 T-A 和 T-B 中 DO 浓度和 ORP 值的变化采用多功能水质分析仪 (Multi 340i, WTW) 进行原位测定.

1.5.2 生物膜样品采集及分析方法

采用“超声+化学剥落法”^[10] 获取填料表面的生物膜,而后通过重量法计算单位质量填料中生物膜的含量. 生物膜中 PHB 和 TP 含量的测定均参照文献[11].

1.5.3 荧光原位杂交(FISH)分析

采用 FISH 技术分别分析 T-A 生物膜中 PAOs 的含量和 T-B 生物膜中硝化细菌的含量,试验所用寡核苷酸探针种类如表 1 所示. 其中, EUB338 探针用来检测全菌, PAO(462、651、846) 探针用来检测 *β*-Proteobacteria 中红环菌属 (*Rhodocyclus*) 相关的 PAOs, GAMA42a 探针用来检测 *γ*-Proteobacteria 中假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 相关的 PAOs, GB 探针用来检测聚糖菌 (GAO), NSO190 探针用来检测好氧氨氧化菌 (AOB), NIT3 则用来检测亚硝酸盐氧化菌 (NOB). 杂交后样品用激光共聚焦显微镜 LSM 510META (Zeiss, Germany) 观察, FISH 图片则用 Image-Pro Plus 6.0 (Media Cybernetics, America) 软件分析生物膜样品中相关功能菌所占比例.

表 1 试验中所用寡核苷酸探针

Table 1 Oligonucleotide probes used in this study

探针	序列 (5'-3')	指示菌群
EUB 338-I	GCTGCCTCCCGTAGGACT	多数细菌 (bacteria) ^[12]
PAO462	CCGTCATCTACWCAGGGTATTAAC	PAO ^[12]
PAO651	CCCTCTGCCAACTCCAG	PAO ^[12]
PAO846	GTTAGCTACGGCACTAAAAGG	PAO ^[12]
GAMA42a	GCCTTCCGACTTCGTTT	<i>γ</i> -Proteobacteria ^[13]
GB	CGATCCTCTAGCCCACT	GAO ^[12]
NSO190	CGATCCCCTGCTTTTCTCC	AOB ^[14]
NIT3	CCTGTGCTCCATGCTCCG	NOB ^[15]

1.5.4 植物和填料中全磷的测定

植物和填料中全磷含量的测定分别采用硫酸/H₂O₂ 消解-钼锑抗分光光度法^[16] 和硫酸-高氯酸消解-钼锑抗分光光度法^[17].

2 结果与讨论

2.1 反硝化除磷作用的强化

2.1.1 运行性能

图 2(a) 表明,驯化阶段 HCW 对进水中有机物的去除效果较为稳定,其对 COD 和 BOD 的去除率分别维持在 (87.44 ± 2.18)% 和 (89.68 ± 2.04)%. 许多研究表明,人工湿地对有机物有着良好的去除效果^[18],上述试验结果与此结论一致.

如前所述, TFCW 的 TN 去除率通常偏低,而其除磷性能的好坏与稳定性则主要取决于所选填料的磷素吸附容量. Wang 等^[19] 的研究表明,火山岩对磷素的理论饱和吸附量约为 0.22 mg·g⁻¹,则由计

算可知, HCW 经约 51 个周期的连续运行后,其填料对磷素的吸附量便应达到饱和. 而图 3 也证实, T-A 和 T-B 中火山岩的磷素截留量自试验初始的 0.31 mg·g⁻¹ 和 0.29 mg·g⁻¹ 分别增至第 52 个周期的 0.54 mg·g⁻¹ 和 0.55 mg·g⁻¹, 而后便稳定在 0.54 mg·g⁻¹ 左右. 鉴于此,随着运行时间的延长, HCW 的脱氮除磷性能应不甚理想. 然而,图 2(b)~2(c) 却表明, HCW 的脱氮除磷性能与上述推断显著不同:系统出水中 TP、NH₄⁺-N 和 TN 的质量浓度首先分别由初始的 (0.79 ± 0.26)、(2.92 ± 1.11) 和 (7.23 ± 3.93) mg·L⁻¹ 骤增至第 16 个周期的 (8.06 ± 0.67)、(10.89 ± 1.01) 和 (34.87 ± 2.51) mg·L⁻¹, 而后随着运行时间的延长复又同步下降. 自第 124 个周期起, HCW 的运行性能趋于稳定并达到了理想的脱氮除磷效果,出水中 TP、TN、NH₄⁺-N 和 NO_x⁻-N 的质量浓度分别为 (0.12 ± 0.01)、(2.08 ± 0.79)、(1.15 ± 0.37) 和 (0.93 ± 0.26) mg·L⁻¹,

系统对 TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率分别可达 $(98.53 \pm 1.69)\%$ 、 $(96.70 \pm 3.68)\%$ 和 $(94.85 \pm 3.08)\%$ 。由此可知,在两段进水潮汐流运行模式下,HCW 运行稳定后其脱氮除磷能力得到了同步增强。

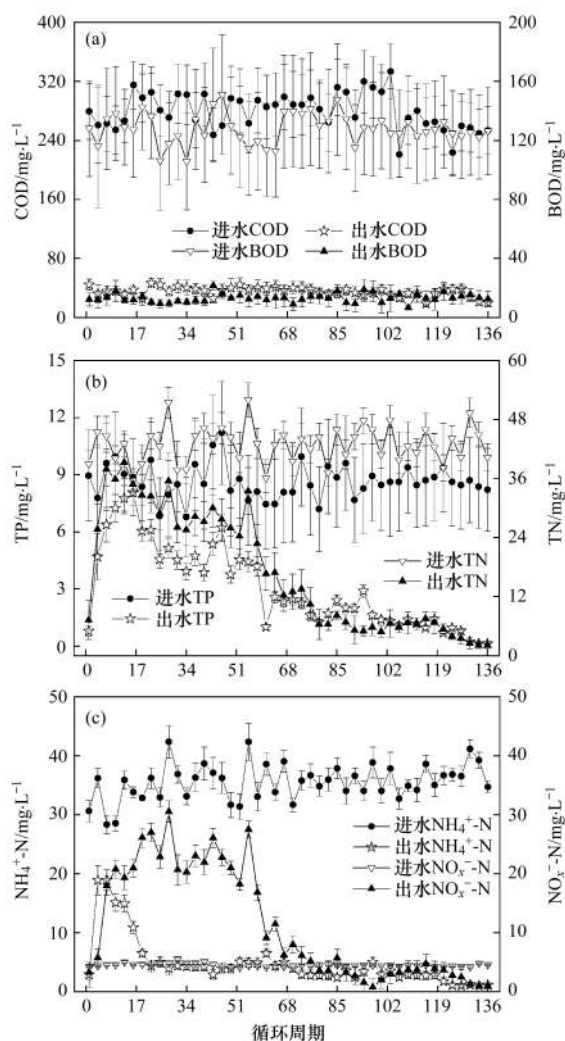


图2 驯化阶段 HCW 的运行性能

Fig. 2 Contaminant removal of HCW during the domestication stage

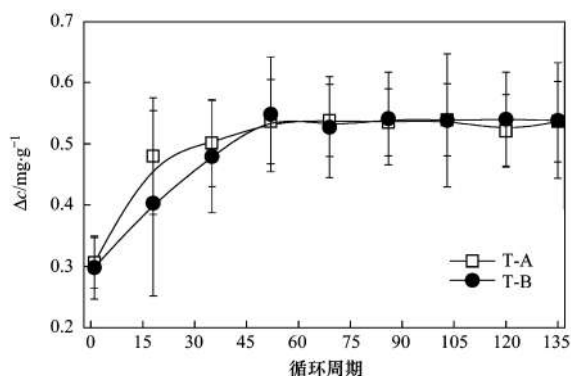
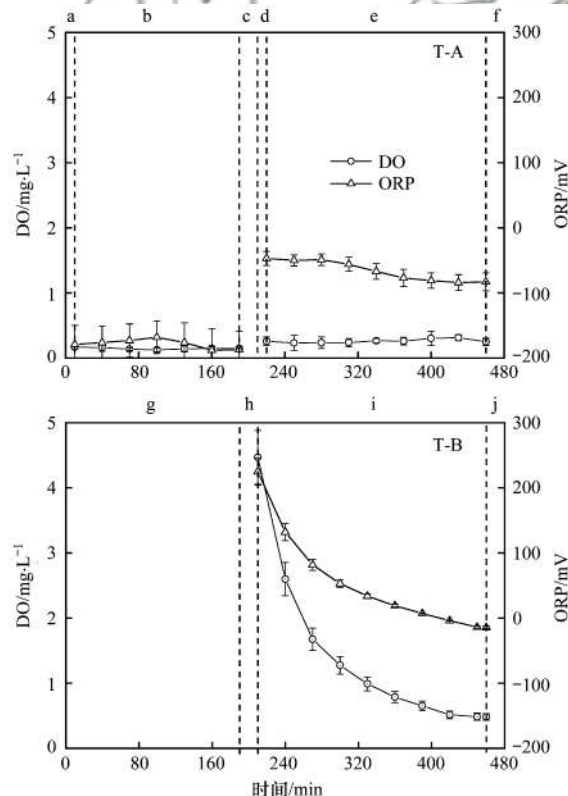


图3 驯化阶段 HCW 中填料的磷素截留量变化

Fig. 3 Phosphorus retained in the substrates of HCW during the domestication stage

驯化阶段结束后,典型周期内 HCW 的运行性能如图4和图5所示。由于一段进水水质和上向流进水模式的设置^[20],T-A 在反应期 A_1 处于厌氧状态,其中 DO 质量浓度和 ORP 值分别维持在 $(0.15 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $-(178 \pm 27) \text{ mV}$ 。期间 COD 质量浓度由 $(279.40 \pm 37.72) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 骤降至 $(46.61 \pm 6.60) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (即进水中约 83.32% 的有机物在厌氧条件下被 T-A 去除),TP 及生物膜内 PHB 的含量则显著升高,TN 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的质量浓度仅略有下降。反应期 A_1 末,一段出水中 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_x\text{-N}$ 和 TP 的质量浓度分别为 (46.61 ± 6.60) 、 (39.10 ± 3.45) 、 (31.20 ± 2.76) 、 (1.87 ± 0.14) 和 $(23.60 \pm 2.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,T-A 生物膜内 PHB 含量增至 $(0.78 \pm 0.07) \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。T-A 中的 DO 质量浓度在反应期 A_2 仍因上向流进水模式的缘故稳定在 $(0.26 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,但 ORP 值此时却增至 $-(66 \pm 15) \text{ mV}$ 。考虑到 T-A 的二段进水属低碳、高 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、高磷废水,此时该湿地单元应处于缺氧状态^[21]。随着反应期 A_2 的进行,T-A 中 COD、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 TP 的质量浓度分别降至 (35.09 ± 7.25) 、 (2.08 ± 0.79) 、 (1.15 ± 0.37) 、 (0.78 ± 0.09) 和 $(0.12 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。



a:进水期 A_1 ;b:反应期 A_1 ;c:中间排水期 A ;d:进水期 A_2 ;
e:反应期 A_2 ;f:排水期 A ;g:闲置期 B ;
h:进水期 B ;i:反应期 B ;j:排水期 B ,下同

图4 典型周期内 HCW 中的 DO 浓度和 ORP 值变化

Fig. 4 Variations of DO concentrations and ORP values in HCW during a typical cycle

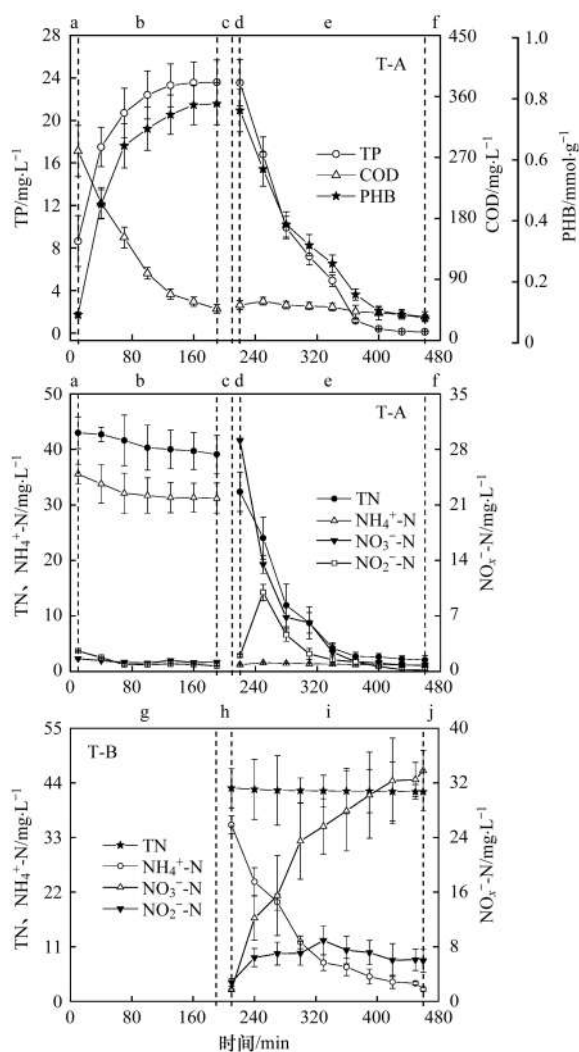


图5 典型周期内 HCW 中的污染物变化

Fig. 5 Concentration curves of contaminants in HCW during a typical cycle

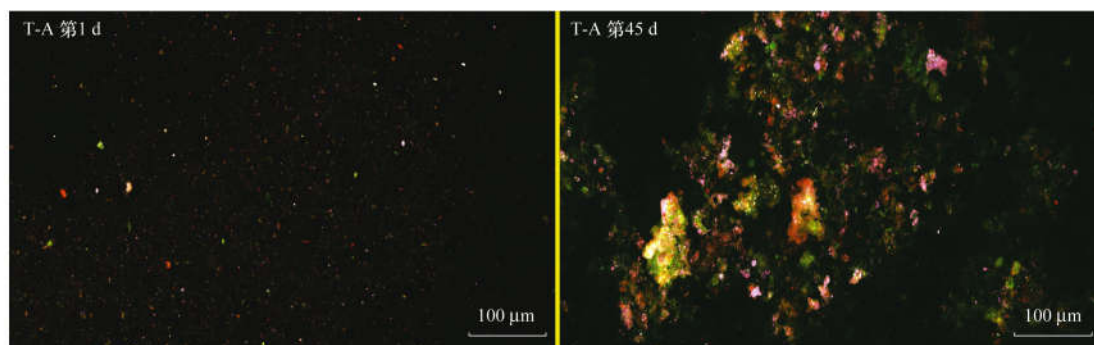
0.01) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NO}_2^{-}\text{-N}$ 质量浓度在前 30 min 内累积至 $(9.96 \pm 1.03) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后, 最终降至 $(0.18 \pm 0.08) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 生物膜中的 PHB 含量由 $(0.76 \pm 0.07) \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$ 逐步降至 $(0.08 \pm 0.01) \text{ mmol}\cdot\text{g}^{-1}$. 本试验结果表明, T-A 在典型周期内表现出明显的反硝化除磷现象. 由此推断, 在两段进水潮汐流运

行模式下, 由于 T-A 中厌氧/缺氧的交替环境以及电子供体(有机碳源)和电子受体($\text{NO}_x^{-}\text{-N}$)的分开, 促使 DPAOs 在填料层中得以富集, T-A 随之达到了良好的反硝化除磷效果.

下向流进水模式的设置和适宜的闲置时长可强化 TFCW 的复氧能力, 甚至可使其复氧效果优于曝气型人工湿地^[22]. 鉴于此, T-B 中的 DO 质量浓度与 ORP 值在反应期_B 伊始分别高达 $(4.47 \pm 0.41) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $(225 \pm 21) \text{ mV}$. 待经过 T-A 处理的一段进水再次泵入 T-B 后, 其中 93.05% 的 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 被氧化为 $\text{NO}_x^{-}\text{-N}$. 反应期_B 末, T-B 出水中 TN、 $\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ 和 $\text{NO}_x^{-}\text{-N}$ 的质量浓度分别为 (42.23 ± 3.87) 、 (2.47 ± 0.45) 和 $(39.76 \pm 2.98) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由此断定, T-B 较强的复氧能力及其进水水质有助于填料层中硝化细菌的富集^[22,23], 从而保证了 T-B 良好的硝化性能. 然而, T-B 对 TP 的去除效果较差, 去除率仅为 $(4.91 \pm 0.86)\%$, 出水中 TP 质量浓度高达 $(22.44 \pm 1.06) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (数据未显示). 该结果应与 T-B 的运行方式及火山岩较弱的磷素吸附沉淀能力有关^[2,19].

2.1.2 生物膜样品分析结果

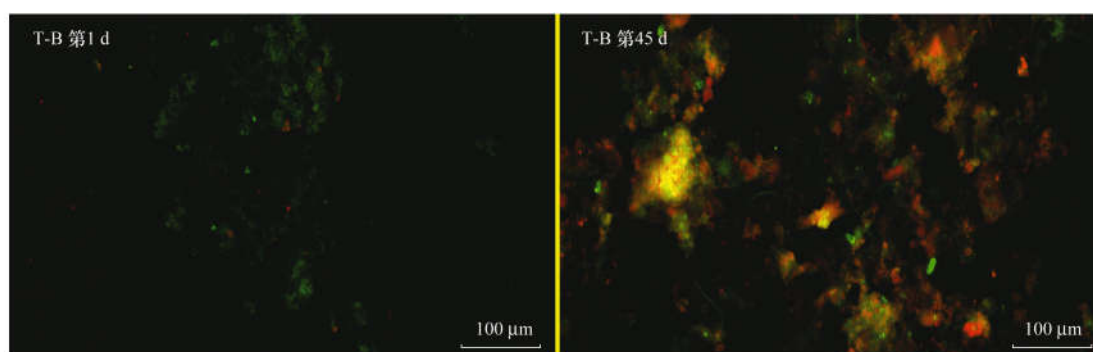
在驯化阶段的第 1 d 和第 45 d 分别对 T-A 和 T-B 的填料层取样, 其生物膜样品的 FISH 分析结果如图 6 和图 7 所示. 由图 6 可知, 运行之初 T-A 生物膜中 PAOs 所占的比例仅为 8.63%, 即此时系统中虽存在 PAOs, 但其丰度较低. 经过 135 个周期的驯化后, T-A 生物膜中 PAOs 所占比例逐渐增至 50.24%. 在两段进水潮汐流运行模式下, 随着 HCW 的连续运行, T-A 中的微生物量不断增加, 其中 PAOs 所占比例亦不断提高, 进而有利于 T-A 中生物除磷作用的强化, 该结果与 2.1.1 节中结果相符. 由图 7 和 2.1.1 节中的结果可知, T-B 在运行之初的硝化能力相对较弱, 其生物膜中 (AOB + NOB) 所占的比例约为 5.30%. 而在驯化阶段末, T-B 生物膜中 (AOB + NOB) 所占的比例增至 44.71%, 其



红色荧光信号代表全菌, 绿色信号代表 PAOs, 粉色信号代表 GAOs

图6 T-A 中生物膜样品的 FISH 图

Fig. 6 FISH images of biofilm samples in T-A



绿色荧光信号代表全菌,红色信号代表 AOB + NOB

图 7 T-B 中生物膜样品的 FISH 图

Fig. 7 FISH images of biofilm samples in T-B

对进水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率随之增加,硝化性能有了显著改善.此外,强化阶段末 T-B 生物膜中 AOB 所占的比例(24.24%)与 NOB(20.47%)并无显著差异,故而 T-B 中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积率较低,此结果应归因于 T-B 较强的复氧能力.

在两段进水潮汐流运行模式下,HCW 类似于一套 $\text{A}_2\text{N-SBR}^{[24]}$,T-A 和 T-B 分别相当于其中的 $\text{A}^2\text{-SBR}$ 和 N-SBR .在典型周期内,T-A 中的 DPAOs 在反应期 A_1 内摄取进水中的有机物合成 PHB 贮存于胞内,同时进行厌氧释磷;反应期 A_1 结束后,T-A 的一段出水进入 T-B 继续进行处理,而中间水箱中上一个周期的 T-B 出水作为二段进水随之泵入 T-A 并使其进入反应期 A_2 ,T-A 的 DPAOs 在该阶段会以二段进水中的 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 为电子受体进行反硝化除磷作用,从而实现其对污水中 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 与 TP 的同步去除.对于 T-B,其在反应期 B 对 T-A 的一段出水进行处理,将其中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通过硝化作用氧化为 $\text{NO}_x^- - \text{N}$,而后将得到的低碳、高 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 、高磷出水排入中间水箱以用作下一个周期中 T-A 的二段进水.同时,植物的吸收作用、填料的吸附沉淀作用等均会进一步提高 HCW 的脱氮除磷效果 $^{[25]}$.

2.2 反硝化除磷作用的稳定性

2.2.1 T-A 的反硝化除磷性能

在稳定运行阶段,着重考察了各 HCW 中 T-A 的运行性能,同时于反应期 A_1 末测定了 T-A 生物膜中的 PHB 含量(C_{PHB}),结果如图 8 和图 9 所示.不同磷移除周期下 T-A 对进水中 COD 的消耗量并无显著差异($\approx 0.74 \text{ g} \cdot \text{周期}^{-1}$),但不同的磷移除周期却可造成 T-A 脱氮除磷效果的不同:当磷移除周期时长分别为 20 d 和 30 d 时,T-A₂₀和 T-A₃₀的反硝化除磷效果无显著差异,其对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 和 TP 的去除率分别高于 98% 和 97%;随着磷移除周期时长增至 40 d,T-A₄₀对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 和 TP 的去除率在磷移除过程后的前 90 个周期内亦分别可达 $(97.01 \pm 2.71) \%$

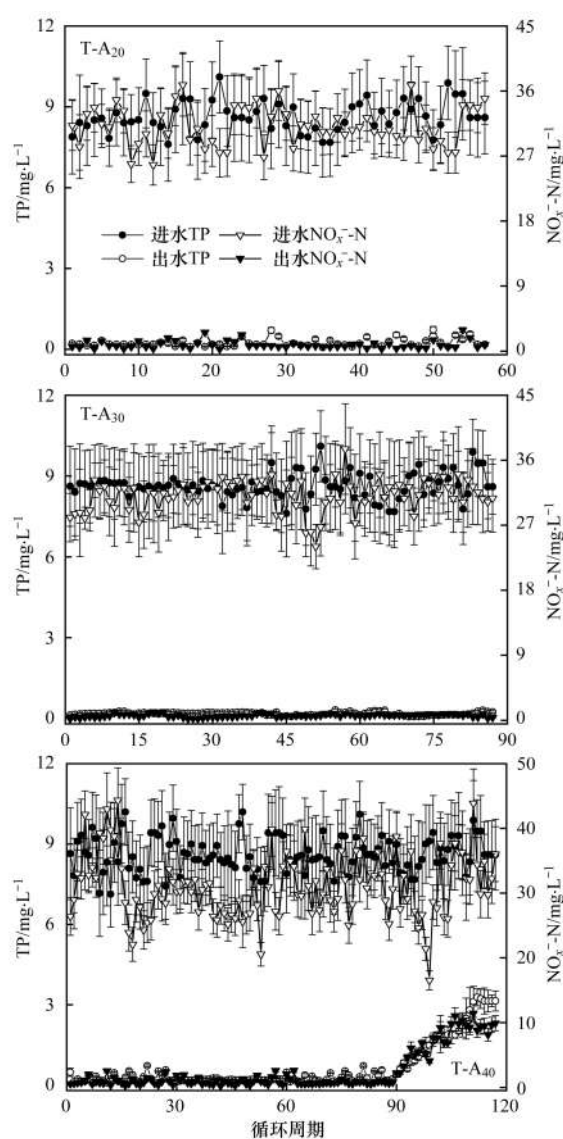


图 8 3 种磷移除周期下 T-A 的脱氮除磷效果

Fig. 8 TP and $\text{NO}_x^- - \text{N}$ removal of T-As during the denitrifying dephosphatation processes under three different phosphorus harvesting cycle lengths

和 $(97.04 \pm 1.68) \%$,但自第 91 个周期之后,T-A₄₀的反硝化除磷效果开始恶化,下一个磷移除操作前夕,T-A₄₀对 $\text{NO}_x^- - \text{N}$ 和 TP 的去除率分别降至(72.51

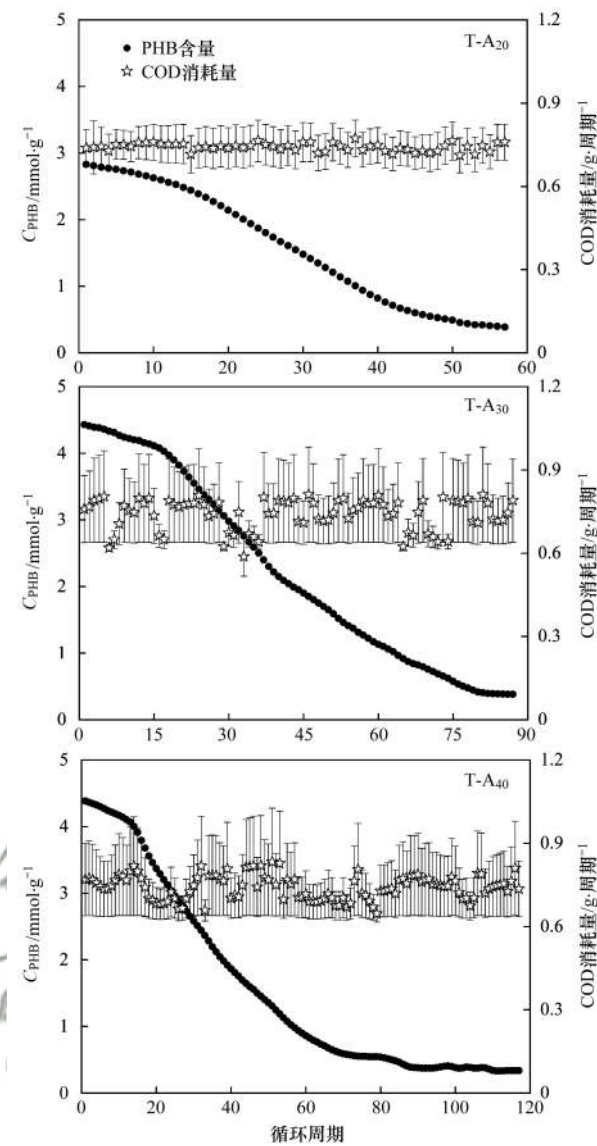


图9 3种磷移除周期下T-A的COD消耗量及其中的 C_{PHB} 变化

Fig. 9 Variations of COD consumptions and PHB contents of T-As under three different phosphorus harvesting cycle lengths

$\pm 4.60\%$ 和 $(63.43 \pm 3.19)\%$. T-A₂₀、T-A₃₀和T-A₄₀中的 C_{PHB} 在磷移除操作后的第一个周期的反应期_{A1}末分别为2.83、4.43和4.38 mmol·g⁻¹.之后,T-A₂₀和T-A₃₀在反应期_{A1}末的 C_{PHB} 均随运行时间的延长持续降至0.39 mmol·g⁻¹和0.38 mmol·g⁻¹;而T-A₄₀在磷移除操作后的第90个周期,

其在反应期_{A1}末的 C_{PHB} 便一直维持在0.37 mmol·g⁻¹左右.

2.2.2 T-A的磷移除性能

T-A₂₀、T-A₃₀和T-A₄₀分别经历了12、8和6次磷移除过程.由表2可知,不同磷移除周期下T-A在单次磷移除过程中的碳源消耗量(ΔCOD)、磷素释放量(ΔP)及其生物膜中的PHB合成量(ΔPHB)各不相同.当磷移除周期为20 d时,T-A₂₀在PH过程中的 ΔCOD 、 ΔP 和 ΔPHB 分别为 $(3\,371.95 \pm 217.10)$ mg、 $(1\,010.96 \pm 86.72)$ mg和 (2.83 ± 0.71) mmol·g⁻¹,此时T-A₂₀对补充碳源的利用率仅为 $(63.52 \pm 8.57)\%$;相较于T-A₂₀,T-A₃₀在磷移除过程中的 ΔCOD 、 ΔP 与 ΔPHB 均得以显著提高,分别可达 $(5\,032.04 \pm 305.41)$ mg、 $(1\,486.29 \pm 123.25)$ mg和 (4.43 ± 0.57) mmol·g⁻¹,其对补充碳源利用率亦提高至 $(94.65 \pm 2.66)\%$;随着磷移除周期进一步延长至40 d,T-A₄₀在磷移除过程中的 ΔCOD 、 ΔP 与 ΔPHB 较于T-A₃₀均无明显变化,其对补充碳源的利用率进一步增至 $(97.31 \pm 10.37)\%$.表2也表明,T-A₂₀、T-A₃₀和T-A₄₀在单次磷移除过程中均可产生约18 L的厌氧富磷液,其TP质量浓度分别为 (56.16 ± 4.75) 、 (82.57 ± 9.34) 和 (82.06 ± 10.13) mg·L⁻¹.T-A₂₀产生的厌氧富磷液中的TP浓度相对较低,但上述3种厌氧富磷液均可满足磷素回收试验的要求^[26].结合2.2.1节中相关的试验结果,若磷结晶试验时磷素的沉淀效率按95.0%计算,可推算出不同DD/PH周期下3组HCWs的磷素回收率分别约为66.93%、63.97%和50.05%.

在稳定运行阶段,需对T-A进行周期性补充有机碳源的磷移除操作,以便将其中蓄积的过量磷素通过厌氧富磷液的形式移除,并对其填料层中老化的生物膜进行清理,进而保障其反硝化除磷性能的稳定性.另一方面,该措施还可增加DPAOs胞内的PHB含量,有助于T-A中反硝化除磷效果的进一步强化.研究发现,3种磷移除周期下,T-A的填料层均无堵塞现象发生,但不同的磷移除周期可显著影

表2 3种磷移除周期下T-A的磷移除性能

Table 2 Phosphorus harvesting performances of the T-As under three different phosphorus harvesting cycle lengths			
项目	T-A ₂₀	T-A ₃₀	T-A ₄₀
补充碳源量(以COD计)/mg	5 308.47 ± 76.83	5 316.22 ± 101.07	5 311.03 ± 91.41
ΔCOD/mg	3 371.95 ± 217.10	5 032.04 ± 305.41	5 168.24 ± 168.7
ΔP/mg	1 010.96 ± 86.72	1 486.29 ± 123.25	1 477.18 ± 97.84
ΔPHB/mmol·g ⁻¹	2.83 ± 0.71	4.43 ± 0.57	4.39 ± 0.39
补充碳源利用率/%	63.52 ± 8.57	94.65 ± 2.66	97.31 ± 10.37
厌氧富磷液总体积/L	18 ± 0.5	18 ± 0.8	18 ± 0.4
厌氧富磷液中TP质量浓度/mg·L ⁻¹	56.16 ± 4.75	82.57 ± 9.34	82.06 ± 10.13

响 T-A 的磷移除性能,进而会影响 HCW 对污水的处理效果. 当磷移除周期为 20 d 时,使得 T-A₂₀在连续运行过程中的磷素截留量(ΔP_r)偏少,由此导致其在磷移除过程中的 ΔP 和 ΔPHB 均相对偏少^[27],亦造成 T-A₂₀在该过程中对补充碳源的利用率较低,使得补充碳源相对过剩. 而将磷移除周期分别延长至 30 和 40 d 后,T-A₃₀和 T-A₄₀的 ΔP_r 均得到不同程度的增加,两者在各自的磷移除过程中亦均能对补充碳源进行较为充分的利用,且同时分别获得了相对较高的 ΔP 和 ΔPHB . 由于进水中有机碳源不足及其他异养微生物(如聚糖菌)的竞争作用等原因,T-A₂₀、T-A₃₀和 T-A₄₀中的 DPAOs 在反应期_{A1}合成的 PHB 量均相对不足. 为此,各 T-A 中的 DPAOs 均在反应期_{A2}不断消耗其在先前磷移除过程中蓄积的 PHB,以便完成 NO_x^- -N 的还原与磷的超量吸收. 随着运行时间的延长,当 DPAOs 将其在磷移除过程中贮存的 PHB 耗尽后,其在后续反应期_{A1}末的 PHB 含量趋于稳定,此条件下用于合成 DPAOs 胞内 PHB 的碳源主要源自系统进水. 若继续延长运行进程,T-A 的反硝化除磷效果便主要取决于进水碳源浓度、进水 C/P 及生物膜内的磷素蓄积量. 当磷移除周期为 20 d 时,虽然 T-A₂₀中的 C_{PHB} 在经过磷移除操作之后显著低于 T-A₃₀和 T-A₄₀,但由于 HCW₂₀的磷移除周期相对较短,对 T-A₂₀进行周期性有机碳源补充的频率较高,使得 T-A₂₀在后续运行过程中始终保持着良好的反硝化除磷效果. 当磷移除周期增至 30 d 时,T-A₃₀中的 C_{PHB} 在经过磷移除过程后较 T-A₂₀显著增加,其中的 DPAOs 在其胞内贮存了相对充足的 PHB,进而使 T-A₃₀的反硝化除磷效果仍较为

理想. 将磷移除周期进一步延至 40 d 后,对 T-A₄₀进行周期性有机碳源补充的频率降至 1 次·(117 周期)⁻¹,此时补充的有机碳源量却并未增加,由此导致 T-A₄₀中的 C_{PHB} 在经过磷移除过程后较 T-A₃₀并无显著提高. 当 T-A₄₀中的 C_{PHB} 在其磷移除操作后的 90 个周期内逐渐下降并趋于稳定后,下一个磷移除操作仍未到来. 在反硝化除磷系统中,厌氧阶段 DPAOs 胞内的 PHB 含量通常与其在缺氧阶段的 DD 效果密切相关^[28]. 由于进水中有限的有机碳源不足以支持 DPAOs 在胞内贮存足量的 PHB 用以后续的反硝化除磷,从而导致 T-A₄₀的反硝化除磷效果在连续运行 90 个周期后出现显著恶化. 由此可知,磷移除操作的设置与适宜的磷移除周期有助于最大限度地提高 T-A 在磷移除过程中的磷素移除量、碳源利用率及其 DPAOs 胞内的 PHB 合成量,进而有助于其后续的反硝化除磷性能更加高效与稳定.

2.2.3 稳定运行期间 HCW 中被截留磷素的去除途径

稳定运行期间 HCW₂₀、HCW₃₀和 HCW₄₀对污水中磷素的去除量及被去除磷素在各系统中的分布见表 3. 从中可知,试验期间各系统对进水中磷素的总去除量分别为 17 220.12、17 657.20 和 16 824.41 mg. 其中,3 组系统虽磷移除周期不同,但其通过 DPAOs 的过量吸磷作用及其他微生物的吸收转化作用去除的磷素均可占系统磷去除总量的 95% 以上,由此可进一步证实,辅以磷移除操作的两段进水潮汐流运行方式可使 DPAOs 的反硝化除磷作用成为 HCW 脱氮除磷的主要途径,且本研究中磷移除周期的差异并未使各系统中除磷的主要途径发生改变.

表 3 3 种磷移除周期下 HCW 中的磷素去除途径分析

Table 3 Phosphorus removal pathways of HCW under three different phosphorus harvesting cycle lengths

项目	植物吸收 磷量/mg	填料吸附沉淀 磷总量/mg	微生物作用吸收 磷总量/mg	系统磷去除 总量/mg	植物吸收 作用/%	填料吸附沉淀 作用/%	微生物 作用/%
HCW ₂₀	194.77	365.43	16 659.92	17 220.12	1.13	2.12	96.75
HCW ₃₀	188.26	340.19	17 128.75	17 657.20	1.07	1.93	97.00
HCW ₄₀	201.32	339.26	16 283.83	16 824.41	1.20	2.02	96.78

值得注意的是,芦苇对磷的吸收去除作用分别仅占 HCW₂₀、HCW₃₀和 HCW₄₀磷去除总量的 1.13%、1.07%和 1.20%. 普遍认为,在人工湿地中,植物的泌氧作用可直接影响微生物的生命活动,进而影响湿地的除磷效果,但依靠植物直接吸收和存贮去除的磷量却并不显著^[29]. 另一方面,HCW 有限的表面积也在一定程度上弱化了湿地植物在 HCW 脱氮除磷过程中所起的作用. 考虑到在实际工程中植物对于人工湿地中氮磷营养盐的去除贡献^[30],笔者后续会进一步探究湿地植物对此 HCW

同步脱氮除磷性能及相关微生物特性的影响,明确其与系统脱氮除磷之间的内在联系. 另外,HCW 运行方式和构型的复杂性降低了其本身的实用价值,后续研究需对两段进水潮汐流运行方式和磷移除操作进行优化,以期促进该工艺的工程化应用进程. 总体而言,本研究的尝试弥补了 TFCW 在污水脱氮除磷方面存在的不足,又使人工湿地同步脱氮除磷与磷素回收从技术上一并考虑,实现了水体防治与磷素可持续利用的合二为一,促进了基于人工湿地技术的 EBPR-PR 工艺的发展与应用.

3 结论

(1) 对于由 2 套 TFCW (即 T-A 和 T-B) 构建而成的 HCW, 当其按照两段进水潮汐流方式连续运行时, 反硝化除磷作用和硝化作用分别在 T-A 和 T-B 中得以强化, HCW 随之可具备良好的同步脱氮除磷能力, 此时系统对 COD、TN、 NH_4^+ -N 和 TP 的去除率分别可达 $(87.44 \pm 2.18)\%$ 、 $(94.85 \pm 3.08)\%$ 、 $(96.70 \pm 3.68)\%$ 和 $(98.53 \pm 1.69)\%$ 。

(2) 周期性补充碳源的磷移除操作可缓解 T-A 中磷素的过量积累, 同时可提高 DPAOs 胞内 PHB 的合成量, 可有效保障 HCW 反硝化除磷效果的高效与稳定。

(3) 当磷移除周期为 30 d 时, 典型周期内 T-A 对 TP 与 NO_3^- -N 的去除率分别为 $(97.86 \pm 0.70)\%$ 和 $(98.29 \pm 2.62)\%$, 在磷移除过程中的 ΔP 、 ΔPHB 及补充碳源利用率分别为 $(1486.29 \pm 123.25) \text{ mg}$ 、 $(4.43 \pm 0.57) \text{ mmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(94.65 \pm 2.66)\%$, HCW 的磷素回收效率则为 63.97%。

参考文献:

- [1] 柳明慧, 吴树彪, 鞠鑫鑫, 等. 潮汐流人工湿地污水强化处理研究进展[J]. 水处理技术, 2014, 40(5): 10-15.
- [2] Ju X X, Wu S B, Zhang Y S, et al. Intensified nitrogen and phosphorus removal in a novel electrolysis-integrated tidal flow constructed wetland system[J]. Water Research, 2014, 59: 37-45.
- [3] Li C Y, Wu S B, Dong R J. Dynamics of organic matter, nitrogen and phosphorus removal and their interactions in a tidal operated constructed wetland[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 151: 310-316.
- [4] 王振, 齐冉, 李莹莹, 等. 潮汐流人工湿地中生物蓄磷的强化及其稳定性[J]. 中国环境科学, 2017, 37(2): 534-542.
- [5] 乔子涵, 齐冉, 王振, 等. 碳源补充方式对潮汐流人工湿地生物蓄磷/磷移除的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2753-2762.
- [6] Tian W D, Ma C, Lin Y, et al. Effect of Mg/Ca molar ratios on characteristics of anaerobic-anoxic denitrifying dephosphatation[J]. Bioresource Technology, 2017, 240: 94-97.
- [7] Dai H L, Wu Y F, Peng L H, et al. Effects of calcium on the performance, bacterial population and microbial metabolism of a denitrifying phosphorus removal system[J]. Bioresource Technology, 2017, 243: 828-835.
- [8] 张顺, 田晴, 汤曼琳, 等. 磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 979-986.
- [9] 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. 227-285.
- [10] 傅威, 叶建锋, 顾虹, 等. 垂直潜流人工湿地有机物积累及去向初步分析[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(3): 55-59.
- [11] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, et al. Optimisation of poly- β -hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems[J]. Journal of Chromatography A, 2005, 1070(1-2): 131-136.
- [12] Crocetti G R, Hugenholtz P, Bond P L, et al. Identification of polyphosphate-accumulating organisms and design of 16S rRNA-directed probes for their detection and quantitation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(3): 1175-1182.
- [13] Kong Y H, Xia Y, Nielsen J L, et al. Structure and function of the microbial community in a full-scale enhanced biological phosphorus removal plant[J]. Microbiology, 2007, 153(12): 4061-4073.
- [14] 刘涛. 基于亚硝化的全程自养脱氮工艺(CANON)效能及微生物特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [15] 张肖静. 基于MBR的全程自养脱氮工艺(CANON)性能及微生物特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [16] 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 等. 废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4373-4379.
- [17] 南京农业大学. 土壤农化分析[M]. (第二版). 北京: 中国农业出版社, 1986. 66-70.
- [18] Wu S B, Kusch P, Brix H, et al. Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: A nitrogen and organic matter targeted review[J]. Water Research, 2014, 57: 40-55.
- [19] Wang Z, Dong J, Liu L, et al. Screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetlands treating swine wastewater[J]. Ecological Engineering, 2013, 54: 57-65.
- [20] 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 等. 浸润线高度对垂直潜流湿地处理效果的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1823-1828.
- [21] 陶敏, 贺锋, 胡晗, 等. 碳氧调控下人工湿地净化效果的协同与拮抗研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(12): 3646-3652.

- Tao M, He F, Hu H, *et al.* Synergistic and antagonistic effect of treatment performance of constructed wetlands under artificial aeration and external carbon source [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3646-3652.
- [22] Wu S B, Zhang D X, Austin D, *et al.* Evaluation of a lab-scale tidal flow constructed wetland performance: oxygen transfer capacity, organic matter and ammonium removal [J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(11): 1789-1795.
- [23] Wang Z, Liu C X, Liao J, *et al.* Nitrogen removal and N_2O emission in subsurface vertical flow constructed wetland treating swine wastewater: effect of shunt ratio [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 446-453.
- [24] 张耀斌, 邢亚彬, 秦四飞, 等. A_2N 系统中低碳污水的反硝化除磷优化及运行稳定性 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1020-1026.
- Zhang Y B, Xing Y B, Qin S F, *et al.* Optimization and stability of denitrifying phosphorus removal in a two-sludge system for treating wastewater with low carbon source [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1020-1026.
- [25] Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment: five decades of experience [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(1): 61-69.
- [26] 俞小军, 李杰, 周猛, 等. 长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4274-4280.
- Yu X J, Li J, Zhou M, *et al.* Effects of long-term side stream extracton on phosphorus removal and recovery performance of EBPR system [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4274-4280.
- [27] 赵智超, 黄剑明, 李健, 等. 间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 799-807.
- Zhao Z C, Huang J M, Li J, *et al.* Simultaneous nitrification and denitrifying phosphorus removal in continuous flow reactor with intermittent aeration [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 799-807.
- [28] 王梅香, 赵伟华, 王淑莹, 等. A_2N_2 系统反硝化除磷性能的优化及稳定运行 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3311-3320.
- Wang M X, Zhao W H, Wang S Y, *et al.* Denitrifying phosphorus removal performance optimization and stable operation of A_2N_2 system [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3311-3320.
- [29] 张翔凌, 黄华玲, 郭露, 等. Zn 系 LDHs 覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3058-3066.
- Zhang X L, Huang H L, Guo L, *et al.* Mechanisms of phosphorus removal by modified zeolites substrates coated with Zn-LDHs in laboratory-scale vertical-flow constructed wetlands [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3058-3066.
- [30] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **112**: 429-448.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)