

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

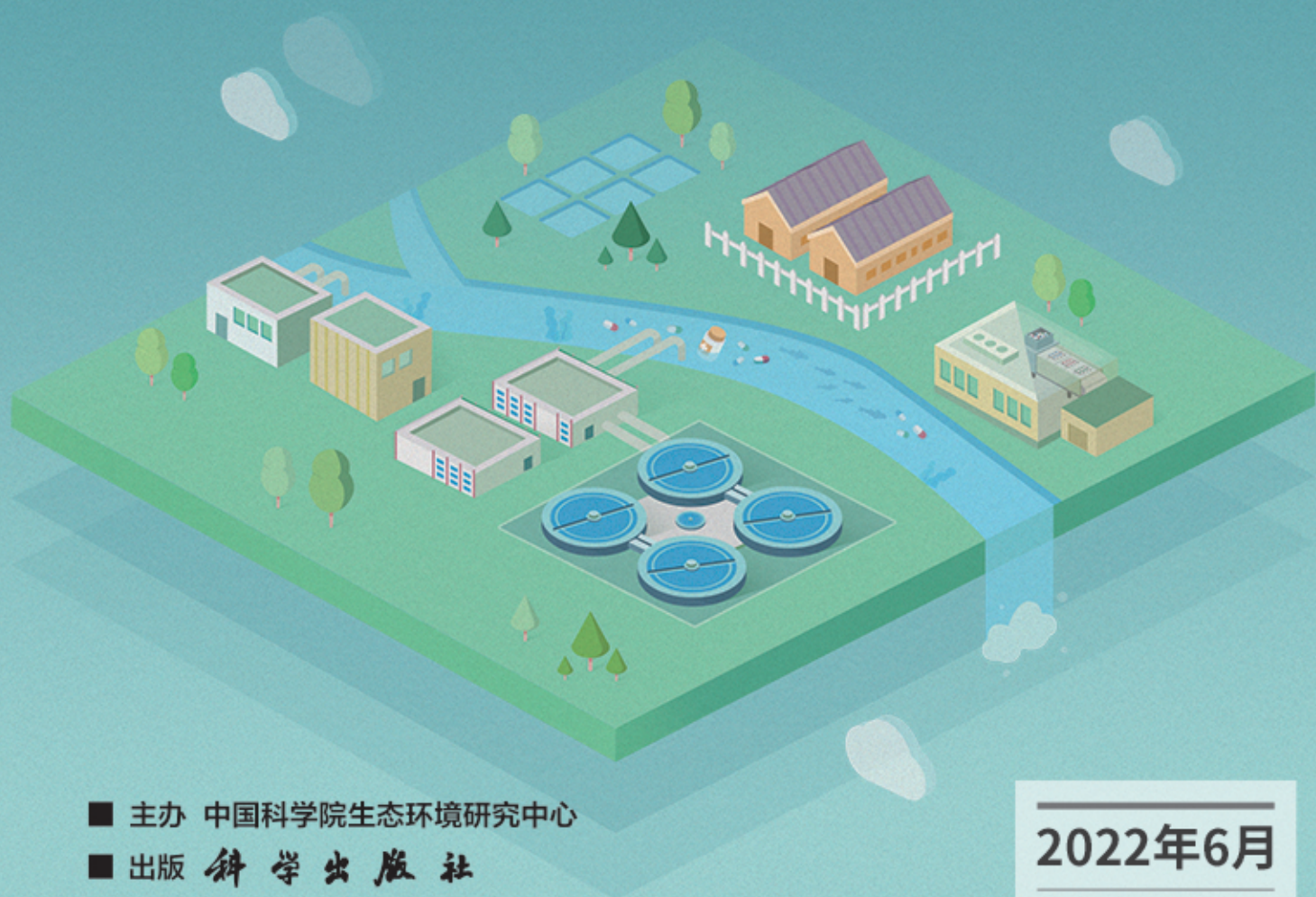
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染

石雷, 杨小丽*, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹

(东南大学土木工程学院, 南京 211189)

摘要: 生态沟渠和生物滞留池因其良好的径流污染控制能力和生态效益, 日益受到广泛关注和应用, 但单一的生态沟渠或生物滞留池在农村径流污染控制中常存在氮磷去除效果不稳定和基质易堵塞等问题. 将两者串联构建组合系统, 利用生态沟渠预处理去除部分污染物, 可降低生物滞留池污染负荷和减轻基质堵塞; 同时在生物滞留池中设置淹没区并添加天然载体碳源提升系统脱氮效果. 研究了载体碳源、降雨强度和干湿交替等条件对生态沟渠-生物滞留池组合系统控制农村径流污染的影响. 结果表明, 投加稻草和木屑两种天然载体碳源分别将生物滞留池段的 TN 去除率提升 19.9% 和 20.4%. 模拟降雨强度从小雨增至大雨时, 外加碳源组合系统 COD、 NH_4^+ -N、TN 和 TP 去除率平均下降 17.0%、16.8%、20.4% 和 17.2%, 其中生态沟渠段对 4 种污染物的去除贡献平均降低 16.3%、13.0%、24.2% 和 22.1%. 干湿交替运行可提高系统的污染物去除效果, 相较连续进水, 干旱 3 周后木屑组 TN 平均去除率提升 12.3%. 微生物群落分析结果显示, 木屑组和稻草组生物滞留池样品的 α 多样性高于对照组; 投加载体碳源的生物滞留池淹没区中硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 丰度显著高于对照组. 研究结果有望为组合系统在实际工程中的应用提供技术支撑.

关键词: 生态沟渠; 生物滞留池; 农村径流污染; 载体碳源; 干湿交替

中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)06-3160-08 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202108100

Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution

SHI Lei, YANG Xiao-li*, WU Qing-yu, WANG Yi-ming, XU Jia-ying

(School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: Ecological ditches and bioretention ponds have received widespread attention and application due to their runoff pollution control capabilities and ecological benefits. However, a single ecological ditch or bioretention pond often has problems, such as unstable nitrogen and phosphorus removal and substrate clogging in rural runoff pollution control. Thus, we connected the two facilities in a series to construct a combined system, using the ecological ditch to pretreat, therefore reducing the pollution load of the bioretention pond and mitigating substrate clogging. At the same time, the submerged area was set and an external natural carrier carbon source was added in the bioretention pond to improve the nitrogen removal. The effects of the carrier carbon source, rainfall intensity, and alternating wet and dry conditions on the control of rural runoff pollution by the combined system were explored. The results showed that adding straw and sawdust as carrier carbon sources could increase the TN removal of the bioretention pond by 19.9% and 20.4%, respectively. When the simulated rainfall intensity increased from light rain to heavy rain, the removal efficiencies of COD, NH_4^+ -N, TN, and TP in the combined system with external carbon source decreased by 17.0%, 16.8%, 20.4%, and 17.2% on average, respectively. The contribution of the ecological ditch to the removal of the four pollutants decreased by 16.3%, 13.0%, 24.2%, and 22.1% on average. Alternating dry and wet operation can improve the pollutant removal. Compared with continuous inflow, the average TN removal of the sawdust group increased by 12.3% after three weeks of drought. The results of microbial community analysis showed that the α -diversity of the bioretention pond in the sawdust group and the straw group was higher than that in control group. The abundance of *Thiobacillus* was significantly higher in the submerged area of bioretention ponds with carbon sources than that in the control group. These research results are expected to provide technical support for the practical application of the combined system.

Key words: ecological ditch; bioretention pond; rural runoff pollution; carrier carbon source; alternating wet and dry period

近年来,生态沟渠和生物滞留池在农村径流污染控制中得以广泛应用,并取得较好的污染物去除效果.王迪等^[1]研究了生态沟渠对农村径流污染物的去除效果,其 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 的平均去除率分别为 77.8%、58.3% 和 48.7%.Wang 等^[2]的研究对生物滞留池的污染物去除效果进行长期监测,其对初期雨水径流中 SS、TN 和 TP 的平均去除率分别为 53%、25% 和 46%.值得注意的是,生态沟渠作为转输设施,水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 一般较短,氮磷去除效果不稳定^[3];而生物滞留池常存在基质堵塞问题,需要对进水进行预处理以降低污染负荷^[4].此外,农村径流污染碳氮比较

低,传统硝化反硝化脱氮效果受限^[5].

本研究在生态沟渠末端设置生物滞留池,构建生态沟渠-生物滞留池组合系统.一方面,利用生态沟渠作为预处理设施,降低生物滞留池的污染负荷,改善基质堵塞现象;另一方面,通过在生物滞留池中设置淹没区并添加载体碳源强化氮磷去除.农业废弃物成本低廉且来源广泛,具有良好的碳源缓释性能,同时能为微生物提供附着生长的场所^[5],可作

收稿日期: 2021-08-10; 修订日期: 2021-10-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1100205)

作者简介: 石雷 (1998 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 1113421667@qq.com

* 通信作者, E-mail: yangxiaoli@seu.edu.cn

为天然载体碳源加入生物滞留池提升反硝化效果^[6]. 此外,降雨强度(直接影响 HRT)和干旱天数会影响生态沟渠和生物滞留池的污染物去除效果. 因此,本研究探讨了载体碳源、水力停留时间和干湿交替运行对组合系统中 COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 去除效果的影响,并分析了生态沟渠和生物滞留池对污染物的去除贡献,以期为组合系统在实际工程中的应用提供技术支撑.

1 材料与方法

1.1 载体碳源材料改性预处理

本研究选取稻草和木屑作为外加碳源,两种材料表面存在蜡质层,释碳速率慢,微生物难以附着^[7],需要进行碱性预处理以破坏表层蜡质、木质素-半纤维素共价结合和纤维素结晶,降低纤维素聚合度,提高材料纤维素含量^[7,8]. 碱性预处理方法为:取 10 g 烘干后的材料置于 500 mL 烧杯中,按固液比 1:20 添加 200 mL 质量分数为 2% 的 NaOH 溶液,浸没材料,浸泡 24 h 后取出,蒸馏水冲洗至中

性,置于 35℃ 干燥箱中烘干后密封备用.

1.2 试验装置与运行

图 1 为试验装置工艺流程示意,设置 5 组试验,采用连续进出水,生态沟渠和生物滞留池串联运行. 生态沟渠填料层长 1 m、宽 0.3 m 和高 0.2 m,生物滞留池填料层直径 0.3 m 和高 0.8 m,填料分层和种植植物见图 1. 填料中的砾石购自南京津龙雨花石厂,沸石购自浙江神石矿业有限公司,细砂购自南京市六合区高胜雨花石厂;各植物均处于生长期. 进水采用人工配水,水质如表 1 所示. 本研究分为 3 个阶段:第 I 阶段,在 HRT 为 10 h 条件下,研究生物滞留池添加载体碳源对污染物去除效果的影响,每 4 d 取样 1 次,为期 78 d;第 II 阶段,考察 HRT 分别为 10、5 和 2 h 时,稻草组和木屑组系统的污染物去除效果,每 4 d 取样 1 次,为期 60 d;第 III 阶段,研究木屑组系统在干湿交替运行条件下的污染物去除效果,设置 2 d、1 周和 3 周 3 种干旱期,干期不进水、湿期连续进水并保持 HRT 为 5 h,恢复进水后第 20 min、5、12、24 和 48 h 各取样 1 次.

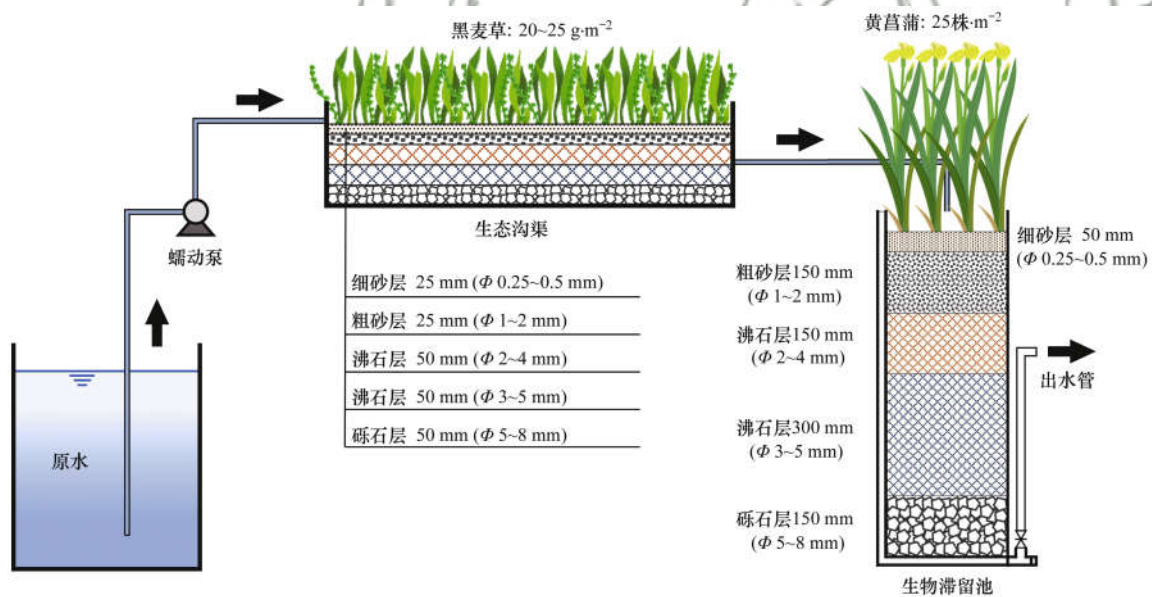


图 1 试验装置和工艺流程示意
Fig. 1 Experimental device and process

表 1 进水水质

Table 1 Influent water quality

测试指标	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
进水水质/mg·L ⁻¹	57.94 ± 2.89	7.22 ± 0.40	10.84 ± 0.71	1.01 ± 0.04

1.3 分析项目与方法

COD、NH₄⁺-N、TN 和 TP 的测定参考文献[9]的方法;DO 使用 Multi 3510 溶解氧测定仪进行测定;比表面积和孔隙率的测定采用 ASAP2020 比表面积及孔隙分析仪^[10]. 本研究对碱处理前后的纤维

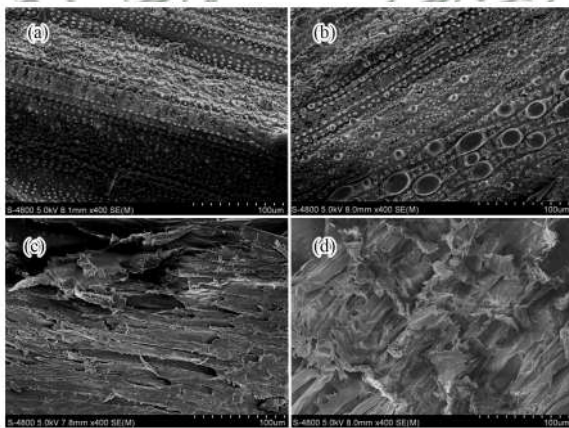
素材料、生态沟渠和生物滞留池上层砂土层及淹没区沸石层进行了 SEM 扫描电镜分析. 为探究各组合系统内微生物对污染物去除的作用机制,在试验运行稳定期(90 ~ 138 d),对对照组、稻草组和木屑组这 3 组系统的生态沟渠段和生物滞留池段进行取

样,样品组别分别为:F1(对照组滞留池沸石层)、F2(稻草组滞留池沸石层)、F3(木屑组滞留池沸石层)、F4(对照组沟渠沸石层)、F5(稻草组沟渠沸石层)、S1(对照组滞留池砂土层)、S2(稻草组滞留池砂土层)、S3(木屑组滞留池砂土层)、S4(对照组砂土层)和S5(稻草组砂土层).取样后对系统内微生物进行了高通量测序分析,包括目的片段的PCR扩增、Illumina高通量测序和生物信息分析,并基于其结果进行样品物种丰度和多样性分析^[11].

2 结果与讨论

2.1 改性载体碳源释碳性能

图2为稻草和木屑碱处理前后的扫描电镜照片.碱处理前,稻草表面纤维结构明显,纤维素被脂质层、果胶和木质素包裹,疏水性强;木屑表面光滑,基本没有突起结构,均不利于微生物附着生长^[12].碱处理后,由于水解皂化作用,稻草纤维发生溶胀、中间孔隙增大;木屑表面变得粗糙^[13~15].碱处理后稻草和木屑的比表面积均显著增加,分别由 $0.52 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.08 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 增至 $0.85 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.85 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$,为微生物提供了更多附着生长空间,是良好的微生物载体.



(a) 天然稻草, (b) 碱处理稻草, (c) 天然木屑, (d) 碱处理木屑

图2 不同纤维素材料碱处理前后的扫描电镜

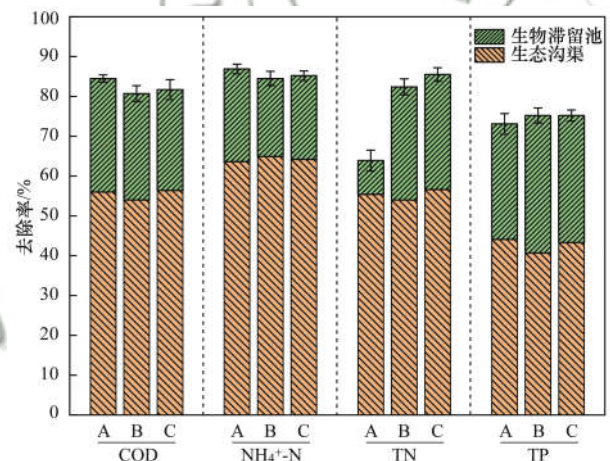
Fig. 2 SEM of different cellulose materials before and after alkali treatment

碱处理后稻草和木屑的释碳规律一致,前5 d释放较快,之后趋于平缓.碳源材料的有机物释放过程可分为两个阶段^[16,17]:初期,纤维素表面附着和随材料溶胀而脱出的内部小分子物质快速溶解,水体COD浓度升高;后期,随着材料内部物质进一步分解与释放,木质素等难分解物质不断积累,纤维素分解受抑制,释碳速率变缓并逐渐达到平衡.稻草和木屑稳定时的平均释碳速率分别为 $3.42 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.91 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$.本试验载体碳源投加量根据稳定后的平均释碳速率、进水流量、

COD和TN浓度,以及反硝化适宜碳氮比进行计算^[18],得到稻草和木屑的投加量分别为 $5.66 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $21.69 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.载体碳源释放有机物的同时也会释放氮磷等营养物质,其 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP的释放规律与COD相似:前7 d释放速率较快,随后降低并趋于平缓.稳定时碱处理稻草 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的平均释放速率分别为 $0.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.10 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,碱处理木屑的平均释放速率分别为 $0.06 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,两者TP释放速率几乎为零.载体碳源每日释放的氮磷浓度低于进水总量的10%,对系统氮磷去除影响较小^[19].

2.2 载体碳源对组合系统去除效果的影响

图3表示HRT为10 h条件下运行至出水稳定(30~78 d),在生物滞留池添加不同载体碳源时,组合系统对污染物的平均去除率,以及各系统生态沟渠和生物滞留池段对污染物的去除贡献.



A表示对照组, B表示稻草组, C表示木屑组

图3 各组污染物去除率以及生态沟渠和生物滞留池的去除贡献

Fig. 3 Pollutants removal in each group & contribution of ecological ditch and bioretention pond to pollutants removal

由图3可知,对照组、稻草组和木屑组COD的平均去除率分别为84.5%、80.7%和81.7%,添加碳源后COD去除效果略有下降,这是因为碳源释放的有机物未被完全利用.由于两种碳源的投加量均由理论计算所得,因此组间差异不显著($P > 0.05$). $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率分别为86.9%、84.5%和85.2%.TN平均去除率分别为63.9%、82.4%和85.5%,且差异主要发生在生物滞留池段,投加稻草和木屑的生物滞留池相较对照组TN去除率分别提高19.9%和20.4%,可见在生物滞留池中添载体碳源能有效增强其反硝化作用,进而提升组合系统的TN去除效果.3组系统TP平均去除率分别为73.1%、75.2%和75.2%,组间差异不显著($P > 0.05$).分析认为,TP主要通过基质吸附沉降去

除^[20],本研究各组基质层结构相同,外加碳源对 TP 的吸附去除影响较小.生态沟渠段和生物滞留池段对污染物的去除贡献分析表明,3 组系统中各污染物的去除主要发生在生态沟渠段,可见系统较长的 HRT 有利于生态沟渠对污染物的物理截留和生物降解,但同时降低了生物滞留池的进水负荷,使其处理效能未能充分发挥.

2.3 水力停留时间对组合系统去除效果的影响

实际降雨条件下的降雨强度会影响污染物在系统内的 HRT,进而影响污染物的去除效果.本研究通过控制 HRT 为 10、5 和 2 h,对应的 24 h 降雨量分别为 5.5、11.0 和 27.5 mm,根据中国气象局的降雨等级划分^[21],分别对应小雨、中雨和大雨这 3

种模拟降雨等级,以探讨不同降雨强度下稻草组和木屑组系统对各污染物的去除效果.

图 4 表示稻草组和木屑组系统在 HRT 为 10、5 和 2 h 这 3 种条件下运行至稳定后(90~138 d),各污染物的平均去除率以及生态沟渠段和生物滞留池段的去除贡献.两组系统的污染物去除率均随 HRT 的缩短而降低,当 HRT 由 10 h 降至 2 h 时,两组系统 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的平均去除率下降幅度为 17.0%、16.8%、20.4% 和 17.2%.系统中污染物的去除途径包括植物吸收、基质吸附和微生物作用^[4,22],随着 HRT 缩短,进水与基质的接触时间减少,降低吸附作用的同时也影响了植物和微生物对污染物的吸收和降解.

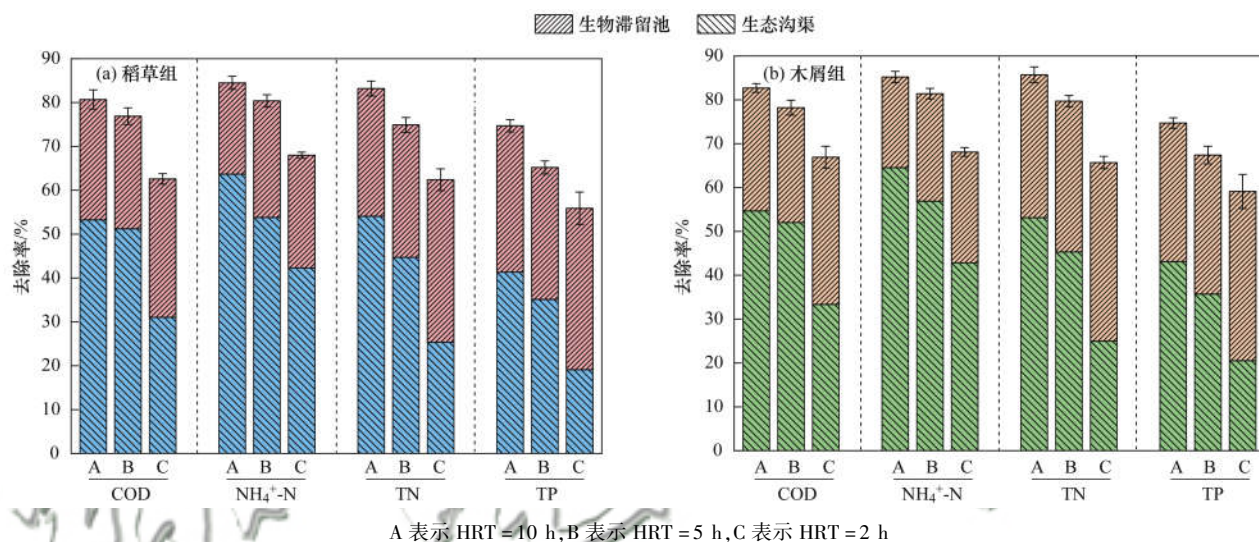


图 4 不同 HRT 下的污染物去除率以及生态沟渠和生物滞留池的去除贡献

Fig. 4 Pollutant removal under different HRTs & contribution of ecological ditch and bioretention pond to pollutant removal

由图 4 还可以看出,随着 HRT 的降低,系统冲击负荷明显增大,两组系统生态沟渠段对各污染物的去除效果和贡献均明显下降;当 HRT 由 10 h 降至 2 h 时,两组生态沟渠段对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的平均去除负荷分别降低 40.3%、33.6%、53.0% 和 53.0%,平均去除贡献分别降低 16.3%、13.0%、24.2% 和 22.1%.可见生态沟渠的去除效果受冲击负荷影响较大,HRT 较小时污染物与基质、植物根系和微生物接触不充分,吸附截留和生物降解作用减弱,出水浓度增加.而生物滞留池作为二级处理设施,冲击负荷对其影响减小;且其底部淹没区深度较大,水力负荷增强也不易破坏其内部缺氧环境,仍能取得较好的反硝化效果.当 HRT 由 10 h 降至 5 h 时,生物滞留池段的 TN 平均去除负荷提高了 4.6%,而当 HRT 由 5 h 降至 2 h 时提高了 20.5%.分析认为,生物滞留池的污染物去除能力会受进水负荷影响,进水负荷适当升高反而能增强微生物代谢,更有利于污染物降解^[23];同时可以看出,

本研究中 HRT 为 5~2 h 之间,对应水力负荷范围为 $0.21 \sim 0.52 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,生物滞留池段的脱氮能力最强.有研究^[24,25]表明,生物滞留池水力负荷在 $0.20 \sim 0.30 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时脱氮效果较好,与本研究结果相近.

2.4 干湿交替对组合系统去除效果的影响

实际工程中组合系统往往会因降雨而经历干湿交替的过程,有必要研究干湿交替运行条件下组合系统的污染物去除效果.图 5 表示木屑组系统在经历 2 d、1 周和 3 周这 3 个不同干旱期后恢复连续进水,保持 HRT=5 h 运行至稳定后的污染物平均去除率.可以看出,随着干旱期的延长,系统各污染物去除率均有所提高.相较于连续运行,干旱 3 周后系统 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的平均去除率分别提升 8.1%、5.2%、12.3% 和 3.0%.有研究表明,干湿交替可显著改善供氧条件,有利于上层填料的复氧过程^[26],增强了好氧微生物的代谢活性;干旱期间非生物固定的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被植物和微生物吸收转化,介质中的 NH_4^+ 吸

附点位被空出,恢复进水后 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 能重新被吸附^[27];干湿交替使系统各段垂直方向上形成了好氧和缺氧环境^[28],有利于硝化-反硝化脱氮的发生.

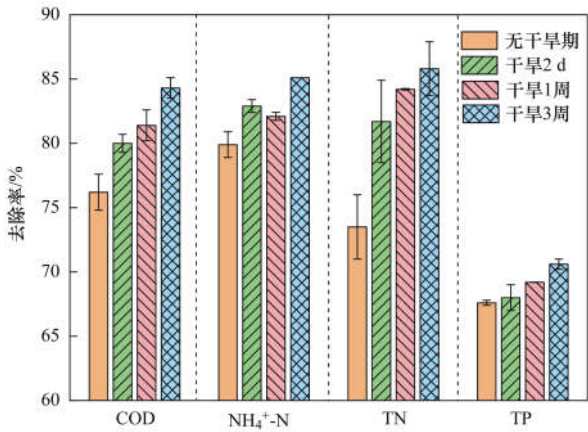


图5 不同干旱期条件下木屑组的污染物去除率
Fig. 5 Pollutants removal in sawdust group after different periods of drought

由图5还可以发现,干湿交替也有利于基质蓄磷能力的恢复. Ádám等^[29]的研究认为,基质落干

后磷吸附能力的提高可归因于成核效应, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 晶体核能扩大基质的比表面积,从而增强吸附效果,也能强化核化点位表面无定形 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 的成核与沉淀. 李阳等^[30]的研究则认为湿地在落干过程中,土壤与空气充分接触,促进了土壤中有有机磷化合物的降解转化,同时不定型态的 Fe^{2+} 被充分氧化为 Fe^{3+} ,其对游离 PO_4^{3-} 有较强的束缚能力.

2.5 微生物群落分析

2.5.1 α 多样性分析

α 多样性包含物种组成的丰富度和均匀度,计算参数包括 Observed Species 指数、Chao1 指数、Shannon 指数、Simpson 指数和 PD Whole Tree 等,其中 Observed Species 指数和 Chao1 指数反映样品中群落的丰富度,而 Shannon 指数、Simpson 指数和 PD whole tree 综合考虑群落中物种的丰富度和均匀度,相同物种丰富度的情况下,群落中各物种均匀度越大,则认为群落具有越大的多样性,群落也越稳定^[11]. 各样品 α 多样性分析结果如表2所示.

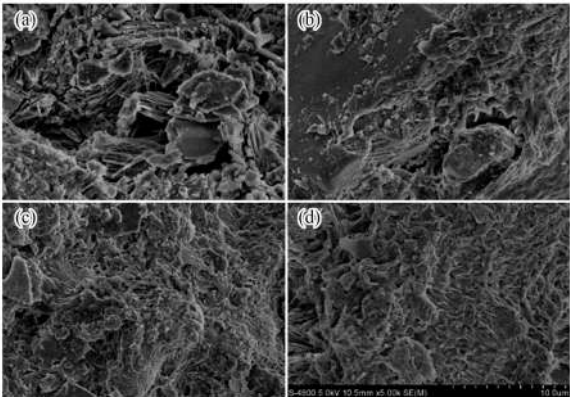
表2 α 生物多样性分析

Table 2 The α biodiversity analysis					
样品编号	PD Whole Tree	Chao1 指数	Observed Species 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
F1	132	1 708.56	1 339	7.02	0.94
F2	153	2 068.82	1 596	8.24	0.99
F3	142	1 822.47	1 426	8.12	0.99
F4	115	1 543.72	1 081	6.61	0.94
F5	109	1 376.08	1 032	6.35	0.93
S1	148	2 084.42	1 554	7.60	0.98
S2	145	2 013.74	1 496	7.17	0.95
S3	167	2 221.28	1 868	8.56	0.99
S4	107	1 444.40	1 046	5.44	0.85
S5	112	1 659.47	1 110	5.36	0.85

由表2可以看出,取自砂土层和沸石层的样品中,生态沟渠的生物多样性均小于生物滞留池. 分析认为有以下2点原因:第一,生物滞留池中的黄菖蒲相较生态沟渠中的黑麦草根系更发达,更有利于微生物附着生长;第二,生物滞留池深度更大,在垂直方向上形成的好氧-缺氧-厌氧环境,微生物种类更为多样.

图6为各组生物滞留池稳定运行后淹没区沸石样品的电镜扫描照片. 相比天然沸石,其他3组沸石表面均比较平整,有生物膜覆盖,且木屑组和稻草组滞留池沸石表面生物膜覆盖密度明显大于对照组. 已有研究表明^[31~33],碳源的投加不仅有利于生物膜形成,还能显著提高系统中的微生物、尤其是反硝化菌的丰度和活性,从而提高脱氮效果. 本研究稻草组和木屑组的 TN 去除率较对照组分别提高 29.0% 和 33.8%,分析认为,一方面是投加的稻草和木屑补充

了反硝化所需碳源,另一方面是因为两组滞留池淹没区的生物多样性均高于对照组,微生物脱氮效果更强.



(a)天然沸石,(b)对照组滞留池淹没区沸石,
(c)稻草组滞留池淹没区沸石,(d)木屑组滞留池淹没区沸石

图6 沸石表面结构扫描电镜

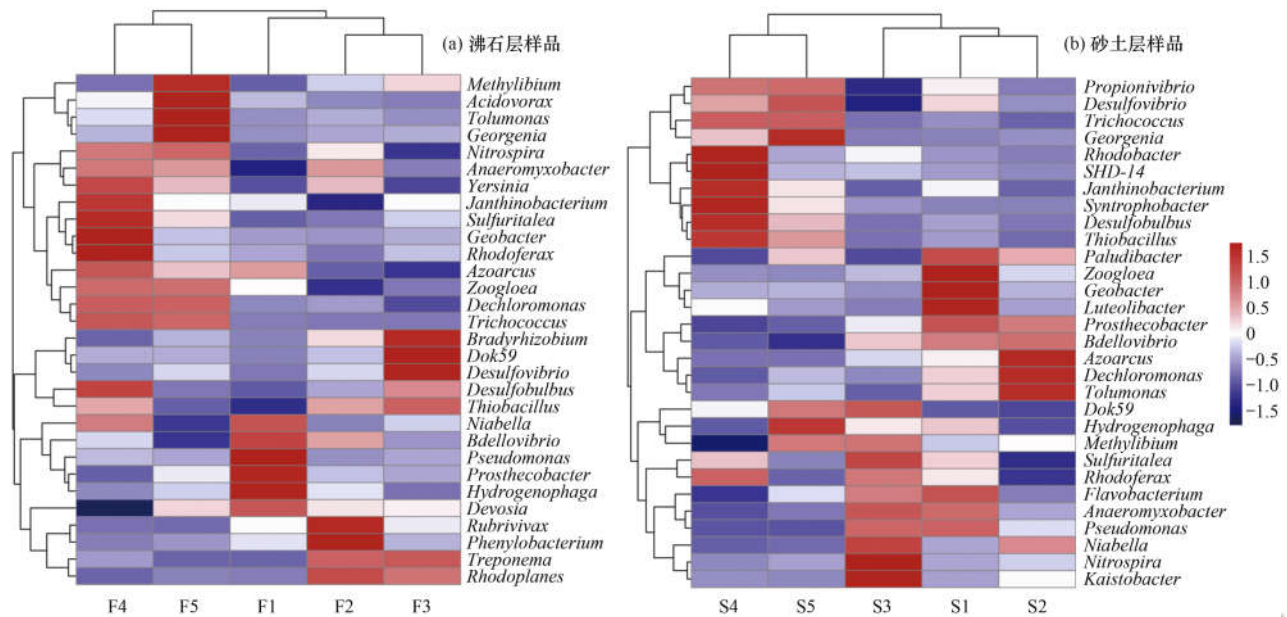
Fig. 6 SEM of surface structure of zeolite

2.5.2 物种丰度聚类分析

物种丰度聚类热图可以表示一组或多组样品在某一分类水平上的群落组成和丰度,同时反映物种

间或样品间的相似性^[34]. 对各样品相对丰度排前 30 的菌属进行聚类分析,结果如图 7 所示.

由图 7(a)可以看出,F2和F3菌属群落组成和



横向表示样品,纵向为物种;每图左侧为物种聚类树,上方为样品聚类树,距离越近,样品物种组成和丰度越相似

图 7 属水平物种丰度聚类热图

Fig. 7 Heat map of species abundance at genus level

丰度相似,与 F1 存在差异,这与投加载体碳源对滞留池污染物去除的差异性分析结果相符. F4 与 F5 相似,因为 F4 和 F5 均取自沟渠,两组沟渠填料组成和运行条件相同. F2 和 F3 中优势菌属有硫杆菌属 (*Thiobacillus*),其在两个样品中的相对丰度分别为 0.30% 和 0.33%,该属包含自养反硝化菌,厌氧条件下发生反硝化反应的同时参与硫循环^[35,36],但 F1 中该菌丰度较低. 分析原因,认为是对照组滞留池淹没区较高的 DO ($7.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 不利于其缺氧反硝化,而投加碳源能显著消耗水中的 DO. F1 中假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 相对丰度为 2.75%,属于好氧反硝化菌,是活性污泥中的主要菌属之一^[37,38]. 生态沟渠样品的优势菌属中含硝化螺菌属 (*Nitrospira*) 和动胶菌属 (*Zoogloea*),其中硝化螺菌属在 F4 和 F5 中的相对丰度分别为 2.97% 和 3.14%;动胶菌属的相对丰度分别为 0.85% 和 0.84%. 硝化螺菌属能将污染水体中的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 氧化成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,在水体氮循环中具有十分重要的作用^[39,40];动胶菌属对有机物具有良好的降解作用,并参与脱氮除磷过程^[41,42]. 由图 7(b)可知,样品 S1 和 S2 与 S3,S4 与 S5 较接近,S1、S2 和 S3 取自滞留池,S4 和 S5 取自沟渠,产生差异的主要原因可能是沟渠和滞留池种植植物以及进水负荷不同. 各滞留池上层砂土层样品中优势菌属也包含参与反硝化过程的假单胞菌属,其在 S1 ~

S3 中的相对丰度分别为 1.18%、0.77% 和 1.17%.

综上所述,对照组滞留池淹没区较高的 DO 更有利于好氧反硝化菌的富集,而稻草组和木屑组更有利于富集缺氧反硝化菌. 生态沟渠淹没区沸石层检测到较多硝化菌,说明其硝化作用较强. 滞留池上层砂土层和淹没区沸石层都检测到了较多反硝化菌,说明滞留池具有较大的反硝化潜力.

3 结论

(1)碱处理提高了木屑和稻草的释碳性能,同时为微生物提供了更多附着生长空间. 在生物滞留池中添加载体碳源能显著提高 TN 去除能力,稻草组和木屑组滞留池的 TN 去除率分别较对照组提高 19.9% 和 20.4%.

(2)HRT 越长,组合系统对污染物的去除效果越好. 随着 HRT 降低、降雨强度增加,生态沟渠段的污染物去除贡献显著降低,生物滞留池段去除贡献略有增加.

(3)随着干旱期的延长,系统各污染物去除率均有所提高;相较连续运行,干旱 3 周后木屑组系统的 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN 和 TP 去除率分别提高 8.1%、5.2%、12.3% 和 3.0%.

(4)微生物群落分析结果显示,生物滞留池的 α 多样性高于生态沟渠,稻草组和木屑组滞留池淹没区 α 多样性高于对照组. 稻草组和木屑组生物滞留

池淹没区的优势菌种有硫杆菌属(*Thiobacillus*), 3 组生态沟渠中均检测到硝化螺菌属(*Nitrospira*)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wang J, Chua L H C, Shanahan P. Evaluation of pollutant removal efficiency of a bioretention basin and implications for stormwater management in tropical cities [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2017, **3**(1): 78-91.
- [3] 吴青宇. 生态沟渠与生物滞留组合技术及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
Wu Q Y. Study on combination of ecological ditch and bioretention pool and its application [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [4] 李芬芬, 蔡志文, 冯萃敏, 等. 生物滞留池处理径流雨水的研究现状与展望[J]. 应用化工, 2021, **50**(2): 455-460.
Li F F, Cai Z W, Feng C M, *et al.* Research status and prospect of bioretention to treatment runoff rainwater [J]. Applied Chemical Industry, 2021, **50**(2): 455-460.
- [5] 凌宇, 赵远哲, 王海燕, 等. HRT 对 A/O-BF 处理低碳氮比农村生活污水脱氮的影响[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(4): 927-935.
Ling Y, Zhao Y Z, Wang H Y, *et al.* Effects of HRT on A/O-BF nitrogen removal of low C/N rural domestic sewage [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(4): 927-935.
- [6] Liang X Q, Lin L M, Ye Y S, *et al.* Nutrient removal efficiency in a rice-straw denitrifying bioreactor [J]. Bioresource Technology, 2015, **198**: 746-754.
- [7] 邵留, 徐祖信, 金伟, 等. 农业废物反硝化固体碳源的优选[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(5): 748-754.
Shao L, Xu Z X, Jin W, *et al.* Optimization of solid carbon source for denitrification of agriculture wastes [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(5): 748-754.
- [8] Silverstein R A, Chen Y, Sharma-Shivappa R R, *et al.* A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks [J]. Bioresource Technology, 2007, **98**(16): 3000-3011.
- [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.
- [10] 陈金妹, 张健. ASAP2020 比表面积及孔隙分析仪的应用[J]. 分析仪器, 2009, (3): 61-64.
Chen J M, Zhang J. Application of ASAP2020 specific surface area and porosity analyzer [J]. Analytical Instrumentation, 2009, (3): 61-64.
- [11] 韩文杰, 吴迪, 周家中, 等. 长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5037-5049.
Han W J, Wu D, Zhou J Z, *et al.* Microbial diversity analysis of WWTPs based on Hybrid-MBBR process in a low temperature season in the Yangtze River Delta [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5037-5049.
- [12] 吴佳骏. 纤维素载体预处理及其强化 MBR 脱氮效果研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
Wu J J. Research of the cellulose carriers with pretreatment and their enhanced nitrogen removal in MBR [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 付嘉琦, 夏嵩, 陈小平, 等. 碱预处理稻秆与猪粪混合厌氧发酵特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(6): 1255-1261.
Fu J Q, Xia S, Chen X P, *et al.* Anaerobic co-digestion of rice straw after alkali pretreatment with pig manure [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, **37**(6): 1255-1261.
- [14] Cordeiro N, Ornelas M, Ashori A, *et al.* Investigation on the surface properties of chemically modified natural fibers using inverse gas chromatography [J]. Carbohydrate Polymers, 2012, **87**(4): 2367-2375.
- [15] 吕顺, 吴志超, 王宏伟, 等. 碱预处理稻草补充反硝化碳源特性研究[J]. 水处理技术, 2012, **38**(12): 25-29.
Lv S, Wu Z C, Wang Z W, *et al.* Study on alkali-pretreatment of straw to provide carbon source for denitrification [J]. Technology of Water Treatment, 2012, **38**(12): 25-29.
- [16] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: nitrogen and phosphorus removal [J]. Water Environment Research, 2006, **78**(3): 284-293.
- [17] Hunt W F, Smith J T, Jadlocki S J, *et al.* Pollutant removal and peak flow mitigation by a bioretention cell in urban Charlotte, N. C. [J]. Journal of Environmental Engineering, 2008, **134**(5): 403-408.
- [18] Yang X L, Jiang Q, Song H L, *et al.* Selection and application of agricultural wastes as solid carbon sources and biofilm carriers in MBR [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **283**: 186-192.
- [19] 李斌, 郝瑞霞. 固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选[J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1428-1434.
Li B, Hao R X. Comparison and optimization of cellulose carbon source for denitrification filter [J]. Environmental Science, 2013, **34**(4): 1428-1434.
- [20] Lucas W C, Greenway M. Phosphorus retention by bioretention mesocosms using media formulated for phosphorus sorption: response to accelerated loads [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, **137**(3): 144-153.
- [21] 中国气象局. 降雨量等级 [EB/OL]. http://www.cma.gov.cn/2011xzt/2013zhuant/20130620_3/2013062002/201308/t20130816_223400.html, 2021-10-05.
- [22] 王丽莎, 李希, 李裕元, 等. 亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向[J]. 环境科学, 2021, **42**(3): 1433-1442.
Wang L S, Li X, Li Y Y, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal in surface flow constructed wetland planted with *Myriophyllum elatinoides* treating swine wastewater in subtropical central China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(3): 1433-1442.
- [23] Payne E G I, Fletcher T D, Cook P L M, *et al.* Processes and drivers of nitrogen removal in stormwater biofiltration [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, **44**(7): 796-846.
- [24] 关伟, 肖蕾, 周晓铁, 等. 人工湿地脱氮技术研究进展[J]. 环境科学导刊, 2009, **28**(4): 13-16.
Guan W, Xiao P, Zhou X T, *et al.* Progress on denitrification by constructed wetland [J]. Environmental Science Survey, 2009, **28**(4): 13-16.
- [25] 邓延慧, 王正文, 张弘. 生物滞留池处理化粪池出水的试验研究[J]. 绿色科技, 2021, **23**(4): 91-94.
Deng Y H, Wang Z W, Zhang H. Experimental study on treatment of septic tank effluent by biological retention tank [J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, **23**(4): 91-94.

- [26] 张冉, 徐红新. 垂直流人工湿地系统中植物对除磷效果的影响研究[J]. 环境工程, 2016, **34**(S1): 308-311.
Zhang R, Xu H X. Effect of plants on the removal of phosphorus in vertical flow constructed wetland system [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(S1): 308-311.
- [27] 陈垚, 李欣芮, 郑爽, 等. 前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 263-273.
Chen Y, Li X R, Zheng S, *et al.* Influence of antecedent dry days on nitrogen removal in bioretention systems [J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 263-273.
- [28] Minett D A, Cook P L M, Kessler A J, *et al.* Root effects on the spatial and temporal dynamics of oxygen in sand-based laboratory-scale constructed biofilters [J]. Ecological Engineering, 2013, **58**: 414-422.
- [29] Ádám K, Krogstad T, Suliman F R D, *et al.* Phosphorous sorption by filterlite P-small scale box experiment[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2005, **40**(6-7): 1239-1250.
- [30] 李阳, 何伟, 左倬, 等. 干湿交替对湿地土壤氮磷缓冲能力的影响[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(S2): 25-28, 32.
Li Y, He W, Zuo Z, *et al.* Effects of wet/dry cycle on nitrogen and phosphorus buffering capacity in the soil of wetland [J]. Environmental Science & Technology, 2014, **37**(S2): 25-28, 32.
- [31] 潘福霞, 来晓双, 李欣, 等. 不同湿地植物脱氮效果与根际土壤微生物群落功能多样性特征分析[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(6): 1497-1503.
Pan F X, Lai X S, Li X, *et al.* Nitrogen removal efficiencies and rhizosphere soil microbial community functional diversities of different plants in constructed wetlands [J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(6): 1497-1503.
- [32] 曹海芹. 人工湿地生物多样性—高效脱氮基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Cao H Q. Studies on biodiversity-high efficient nitrogen removal in constructed wetlands [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [33] 严子春, 唐瑞祥, 吴大冰. 有机物对厌氧氨氧化生物膜反应器脱氮效能及微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(4): 1303-1308.
Yan Z C, Tang R X, Wu D B. Effect of organic matter on nitrogen removal efficiency and microbial community of an anammox biofilm reactor [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(4): 1303-1308.
- [34] 彭柯, 董志, 邸琰茗, 等. 基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5424-5432.
Peng K, Dong Z, Di Y M, *et al.* Contrasting analysis of microbial community composition in the water and sediments of the North Canal based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5424-5432.
- [35] 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 等. 信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(9): 4177-4184.
Xu J L, Chen Z W, Zhang S F, *et al.* Effect of signal molecule combined with *Thiobacillus denitrificans* on simultaneous removal of nitrogen and sulfur [J]. Environmental Science, 2019, **40**(9): 4177-4184.
- [36] Zhao D D, Fu C, Bi X J, *et al.* Effects of coarse and fine bubble aeration on performances of membrane filtration and denitrification in moving bed membrane bioreactors [J]. Science of the Total Environment, 2021, **772**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145513.
- [37] 朱金山, 秦海兰, 孙启耀, 等. 冬季小流域水体微生物多样性及影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5016-5026.
Zhu J S, Qin H L, Sun Q Y, *et al.* Microbial diversity and influencing factors in a small watershed in winter [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5016-5026.
- [38] 李哲, 吕剑, 张宇轩, 等. 具有异养硝化-好氧反硝化功能的水产养殖生物絮团菌的分离鉴定及其性能研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, **49**(2): 127-133.
Li Z, Lyu J, Zhang Y X, *et al.* Separation, identification and performance of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacteria from bioflocs in aquacultural system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, **49**(2): 127-133.
- [39] Pester M, Maixner F, Berry D, *et al.* *NxrB* encoding the beta subunit of nitrite oxidoreductase as functional and phylogenetic marker for nitrite-oxidizing *Nitrospira* [J]. Environmental Microbiology, 2014, **16**(10): 3055-3071.
- [40] 史文燕, 张健. 硝化杆菌(*Nitrobacter*)和硝化螺菌(*Nitrospira*)在脱氮系统中的研究进展[J]. 应用化工, 2020, **49**(10): 2581-2585.
Shi W Y, Zhang J. Research progress of *Nitrobacter* and *Nitrospira* in the nitrogen removal system [J]. Applied Chemical Industry, 2020, **49**(10): 2581-2585.
- [41] Wu D L, Shen Y H, Ding A Q, *et al.* Effects of nanoscale zero-valent iron particles on biological nitrogen and phosphorus removal and microorganisms in activated sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, **262**: 649-655.
- [42] Chang Q, Ali A, Su J F, *et al.* Simultaneous removal of nitrate, manganese, and tetracycline by *Zoogloea* sp. MFQ7: adsorption mechanism of tetracycline by biological precipitation [J]. Bioresource Technology, 2021, **340**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125690.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)