

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析	钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)
基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素	高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)
餐饮源有机颗粒物排放特征	李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)
华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM _{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析	陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程铖, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)
艾比湖地区气溶胶光学特性分析	张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)
天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势	徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟赞, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)
郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析	李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)
长江三角洲 2010 ~ 2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单	朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)
北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性	许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)
广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子	高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)
泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析	李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)
有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价	冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)
西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析	樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)
超低排放高湿度气总颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试	胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)
厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征	王坚, 黄压, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)
基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立	潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)
基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演	黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨垠晖, 杜晓晨 (3591)
不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例	刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)
城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为	赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱奔, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)
上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析	许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)
过氧化钙 (CaO ₂) 联合生物炭对河道底泥的修复	李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)
基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}$ -NO ₃ ⁻ , $\delta^{18}\text{O}$ -NO ₃ ⁻) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪	徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)
三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷	严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)
高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算	高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)
Fe@GOCS 的制备及其对水中 As (III) 的吸附	赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)
微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为	薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)
多孔填料特性对生物膜形成影响	江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)
硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS	李韧, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)
单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮	方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)
间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)
基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性	张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)
基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策	刘晓蕾, 李安婕 (3725)
零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响	刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)
基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能	戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝辉, 张瑞良, 何欣昱 (3740)
亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移	袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)
四环素胁迫对 <i>Shigella flexneri</i> 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程	高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)
羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择	乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)
高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响	侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)
微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用	宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)
三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率	罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)
臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响	方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)
改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响	邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)
有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N ₂ O 排放的影响	周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)
原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素	葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)
羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力	黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)
滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响	蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)
棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响	刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)
不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响	魏宾斌, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)
螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响	覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)
种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测	俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)
《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)	

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复

李雨平^{1,2}, 姜莹莹^{1,2}, 刘宝明^{1,2}, 阮文权^{1,2,3}, 缪恒锋^{1,2,4*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 无锡 214122; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 4. 江苏省生物质能与减碳技术工程实验室, 无锡 214122)

摘要: 底泥内源污染是导致河道黑臭反复的主要因素。为防止河道黑臭现象反复, 以无锡市滨湖区某一河道为实验地点, 采用CaO₂联合生物炭原位覆盖技术修复黑臭河道底泥, 研究了该技术对泥水水质、底泥酸挥发性硫化物(AVS)和磷形态以及微生物的影响, 探究该技术对黑臭底泥修复效果。结果表明, CaO₂联合生物炭覆盖可显著提高泥水体系溶解氧(DO)浓度和氧化还原电位(ORP), 其中上覆水DO浓度和ORP分别保持在2 mg·L⁻¹和50 mV以上。间隙水氨氮(NH₄⁺-N)、化学需氧量(COD)和总磷(TP)去除率分别达到了43.40%、41.18%和50.97%。底泥AVS去除率达到了37.03%, 高通量测序表明, 底泥厌氧微生物相对丰度明显降低, 出现热单胞菌属(*Thermomonas*)、*Dechloromonas*、变形菌属(*Proteus hauser*)、脱硫微菌属(*Desulfomicrobium*)和硫杆菌属(*Thiobacillus*)等脱氮除硫菌群。底泥中磷转化为稳定的铁铝结合态磷和钙结合态磷。因此, CaO₂联合生物炭原位覆盖对黑臭底泥具有良好的修复作用。

关键词: 底泥; 过氧化钙; 生物炭; 微生物; 覆盖

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3629-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912207

Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO₂) Combined with Biochar

LI Yu-ping^{1,2}, JIANG Ying-ying^{1,2}, LIU Bao-ming^{1,2}, RUAN Wen-quan^{1,2,3}, MIAO Heng-feng^{1,2,4*}

(1. School of Environmental & Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 4. Jiangsu Engineering Laboratory of Biomass Energy and Carbon Reduction Technology, Wuxi 214122, China)

Abstract: The internal source pollution of sediment is the main factor leading to the repetition of black-odorous river channels. In order to prevent this situation, a river channel in the Binhu District of Wuxi City was used as an experimental site. In-situ CaO₂ combined with a biochar covering technology was used to repair the black odorous river sediment in this channel. The effects of this technology on the quality of mud water, sedimentary volatile sulfide (AVS) and phosphorus forms, microorganisms, and restoration of black odorous sediment were investigated. The results showed that CaO₂ combined with biochar coverage could significantly increase the dissolved oxygen (DO) concentration and redox potential (ORP) of the muddy water system. The DO concentration and ORP in the overlying water were maintained above 2 mg·L⁻¹ and 50 mV, respectively. The removal rates of interstitial water ammonia-nitrogen (NH₄⁺-N), chemical oxygen demand (COD), and total phosphorus (TP) reached 43.40%, 41.18%, and 50.97%, respectively. The removal rate of AVS in the sediment reached 37.03%. The high-throughput sequencing showed that the relative abundance of anaerobic microorganisms in the sediment was significantly reduced, and that nitrogen and sulfur removal microorganisms appeared (e.g., *Thermomonas*, *Dechloromonas*, *Proteus hauser*, *Desulfomicrobium*, and *Thiobacillus*). Phosphorus in the sediment was converted into Fe/Al-P and Ca-P. Therefore, in-situ CaO₂ combined with biochar coverage had a good repairing effect on black odorous sediment.

Key words: sediment; calcium peroxide; biochar; microorganism; cover

“黑臭”主要是由外源性污染和内源性释放导致的^[1]。随着水污染管理的加强,黑臭河道的外源性污染已大大减少,但是内源性污染已成为河道返黑返臭的主要原因^[2]。这是因为底泥是河流生态系统中营养物质交换的重要场所,是水体氮、磷、有机物主要的存储库^[3]。在厌氧条件下,底泥中的有机质以及营养盐易被厌氧微生物分解产生大量的氨氮(NH₄⁺-N)、硫化氢(H₂S)和挥发性有机物(VOCs)等恶臭气体;同时,水体中高还原性的铁(Fe²⁺)和锰(Mn²⁺)等离子与硫离子(S²⁻)结合,生成黑色沉淀或悬浮物质(FeS或MnS),导致水体从表观上体

现为变黑和发臭^[4]。因此,底泥污染的治理是防止黑臭水体返黑返臭的关键之一^[5]。

目前,原位添加修复剂的底泥修复技术受到广泛关注。其中CaO₂作为底泥修复材料,一方面通过化学作用抑制底泥中的营养盐和黑臭组分的释放,另一方面通过其释氧性提高底泥的溶解氧(DO)浓

收稿日期: 2019-12-25; 修订日期: 2020-02-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-003)

作者简介: 李雨平(1994~),男,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制工程, E-mail: 2223007941@qq.com

* 通信作者, E-mail: hfmiao@jiangnan.edu.cn

度和 ORP 水平,增强底泥特征微生物对污染物的同化和降解速率^[6~8]. 但是过量 CaO_2 会导致水体 pH 值急剧上升,从而可能对微生物产生抑制作用^[9]. 生物炭是生物质在隔绝氧气的条件下,高温裂解得到的富碳产物,其表面含有丰富的羧基和羰基等含氧官能团,阳离子交换量高^[10]. 有研究表明生物炭原位覆盖可有效减少底泥中氮(尤其是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$)和磷的释放,同时可吸附氮磷、 H_2S 和重金属等,其多孔结构可作为微生物生长繁殖的场所,是一种非常具有潜力的底泥原位修复的材料^[11~16],但是对水体 DO 和 ORP 的提升能力有限. 而针对 CaO_2 联合生物炭原位修复底泥的研究仍鲜有报道.

基于此,本研究将 CaO_2 联合生物炭原位覆盖修复底泥,探讨该技术对实际河道泥水体系理化性质以及底泥酸挥发性硫化物(AVS)等指标的影响,结合底泥微生物和磷形态的变化,明确该技术方法在底泥修复过程中的作用效果,以期在黑臭底泥修复工程提供有价值的现场案例以供参考.

1 材料与方法

1.1 实验地点及实验设计

本实验地点位于无锡市滨湖区某一河道($\text{N}31^\circ33'20.08''$, $\text{E}120^\circ16'36.52''$),该河道为断头浜,流速慢,长约 0.32 km,平均宽度约为 12 m,水深约为 2~2.5 m,底泥均匀覆盖在河道表面,厚度约为 0.75 m,内源性污染是该河道黑臭的主要原因.

根据预实验,确定生物炭和 CaO_2 质量比以及覆盖量. 将生物炭和 CaO_2 按质量比为 1:2 加水润湿,混合均匀成浆液,按照 $0.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ [以 (CaO_2 + 生物炭) 计] 均匀铺撒在该河道. 该河道(每隔 50 m)共设置 6 个采样点(图 1),并将该 6 个采样点视为平行. 粉末生物炭(碘值: $400 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 比表面积: $900 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$; 氮氮最大吸附量: $0.99 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)和粉末 CaO_2 (66.3%) 购自无锡市伯雅化工有限公司.



图 1 黑臭河道采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in a black odorous river

1.2 采样及样品分析

利用抓斗式重力采样器收集 6 个采样点表层底泥(0~10 cm 深),通过冷冻离心机离心底泥获得间隙水. 在实验前 1 个月,约隔 7 d 采集水样和底泥进

行指标测定,作为参照, CaO_2 联合生物炭覆盖后,采集水样和底泥进行指标测定,实验周期为 2 个月.

1.3 分析方法

上覆水和泥水界面 pH、DO 和 ORP 采用多参数水质测定仪(YSI pro1020, 美国)现场测定. 根据文献[17]进行常规指标测定. TN 采用碱性过硫酸钾法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定, TP 采用过硫酸钾消解后钼锑抗分光光度法测定, DIP 采用钼锑抗分光光度法测定, COD 采用重铬酸钾法测定.

底泥 AVS 采用酸化-吹气法测定^[18,19]. 将底泥的磷形态分为 4 类:弱吸附态磷 ($\text{NH}_4\text{Cl-P}$)、铁/铝结合态磷 (Fe/Al-P)、钙结合态磷 (Ca-P) 和残渣磷 (Res-P),采用四步连续提取法测定^[20]. 底泥总磷 (Tot-P) 为上述 4 种形态磷之和.

底泥中微生物菌株的鉴定和分析由上海美吉生物医药科技有限公司完成. 微生物原始序列预处理获得优化序列后,利用 UPARSE 7.0 软件平台将相似度为 97% 的操作分类单位(OTU)进行分类,运用 Mothur 软件进行生物多样性指数的计算,并结合 Origin 8.5 等软件进行绘图分析,以完成微生物多样性分析.

2 结果与讨论

2.1 泥水体系 pH、DO 和 ORP 的变化

上覆水和泥水界面 pH、DO 和 ORP 的变化如图 2 所示. 由图 2(a) 可知,在实验前上覆水和泥水界面 pH 均值分别为 7.4 和 7.0. CaO_2 联合生物炭覆盖后,上覆水和泥水界面 pH 会急剧上升,在第 1 d 达到最大值,分别为 8.52 和 8.21,然后就呈现下降趋势,最终上覆水和泥水界面 pH 均值为 7.7 和 7.16,略高于实验前. 这表明 CaO_2 对泥水体系的 pH 影响不大.

图 2(b) 为实验前后上覆水和泥水界面 DO 浓度变化. 在实验前期上覆水和泥水界面 DO 浓度均值分别为 $1.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,处于严重缺氧状态. CaO_2 联合生物炭覆盖后,可以明显提高上覆水和泥水界面 DO 浓度,在整个实验期,上覆水 DO 浓度均大于 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时底泥厌氧环境也发生了改变(大于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

如图 2(c) 所示,在实验前上覆水和泥水界面 ORP 变化较小,均值分别为 31 mV 和 -253 mV. CaO_2 联合生物炭覆盖后,在前 4 d 泥水体系 ORP 快速上升,然后变化幅度较小,在实验结束时,上覆水和泥水界面 ORP 分别升至 58 mV 和 -222 mV,这表明 CaO_2 可以显著提高泥水体系 ORP.

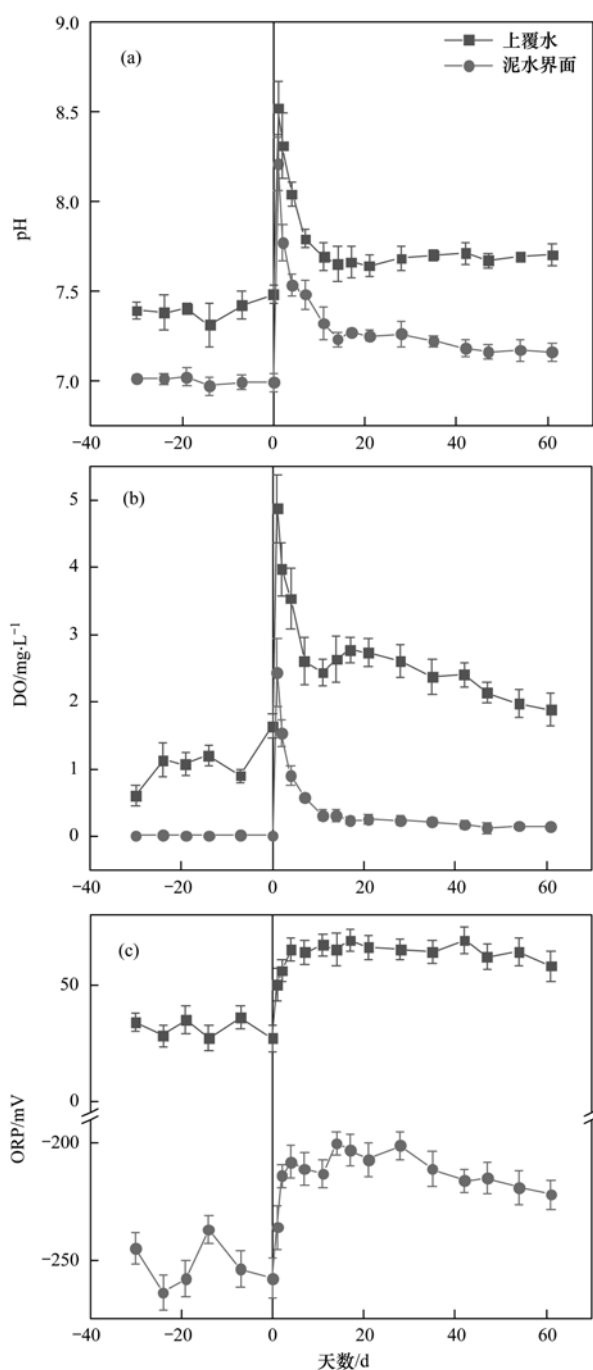


图2 泥水体系 pH、DO 和 ORP 变化

Fig. 2 Variations of the pH, DO, and ORP concentration in sediment-overlying water

CaO_2 溶解过程中会产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 会导致水体 pH 急剧升高, 这被认为使用 CaO_2 修复水体的主要缺陷. 但是有研究表明实际河道中底泥的存在以及水域的流动和开放, 对由 CaO_2 引起的 pH 值变化具有良好的缓冲能力^[21]; 同时控制实际 CaO_2 的用量, 就不会导致 pH 值过高. CaO_2 在溶解过程中会持续释放 O_2 和 H_2O_2 , H_2O_2 进一步分解产生 O_2 ^[22]. O_2 的产生和 H_2O_2 的释放使得实验后泥水体系 DO 浓度和 ORP 明显高于实验前. 综上, CaO_2 联合生物炭可以有效改变泥水体系的基本环境, 增加泥水体

系 DO 浓度和 ORP 水平, 不会引起泥水体系 pH 明显增加.

2.2 间隙水 TN 、 NH_4^+-N 和 COD 浓度变化

间隙水 TN 和 NH_4^+-N 浓度变化如图 3 所示, 在整个实验周期, TN 和 NH_4^+-N 的变化趋势非常相似. 实验前, TN 和 NH_4^+-N 浓度均值分别为 $46.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $40.96 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. CaO_2 联合生物炭覆盖后, 间隙水呈现快速下降趋势, 在第 11 d 达到最低值, 分别为 $20.52 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $15.45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 然后变化波动较小. 这是由于生物炭具有良好的吸附性能, 吸附了部分 NH_4^+-N ; 其次, 生物炭覆盖可抑制 N 从底泥中释放以及 CaO_2 可通过激活生物作用促进 N 的同化和去除^[8,11]. 与实验前相比, 在实验结束时间隙水 TN 和 NH_4^+-N 去除率分别达到了 36.41% 和 43.40%. 这表明 CaO_2 联合生物炭可以有效降低间隙水 TN 和 NH_4^+-N 浓度.

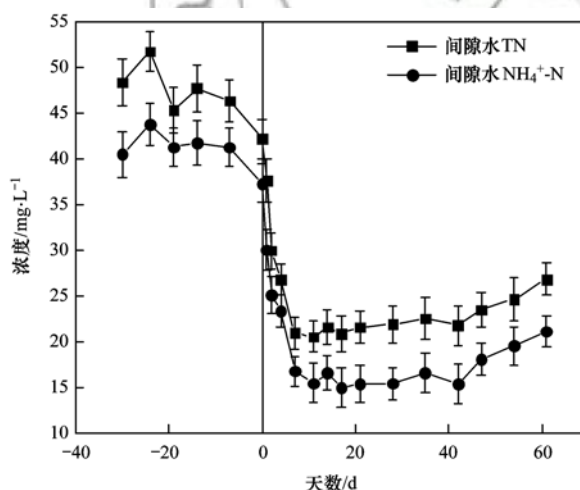
图3 间隙水 TN 和 NH_4^+-N 变化

Fig. 3 Variations of the TN and NH_4^+-N concentrations in the interstitial water

图 4 为实验前后间隙水 COD 浓度变化, 实验前间隙水 COD 均值为 $102 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在 CaO_2 联合生物炭覆盖后, 间隙水 COD 快速下降, 在 28 d 达到最低值为 $42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在实验后期, COD 均值约为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率达到 41.18%. 这是因为生物炭可以吸附污染物质, 其次是 CaO_2 的生化反应和氧化作用增强所致. 结合图 2 泥水体系 DO 浓度和 ORP 水平得到有效提高, 这不仅可以防止污染物从底泥中释放出来, 而且可增加上覆水-底泥体系电子受体, 增强泥水界面处兼性菌群的活性, 从而提高泥水体系的自净能力^[23]. 生物炭表面多孔的结构在吸附大量污染物质的同时也可以作为微生物附着的载体, 协同 CaO_2 促进特征微生物利用间隙水中氮源(图 3)和碳源, 降解污染物, 同时达到降低 NH_4^+-N 和

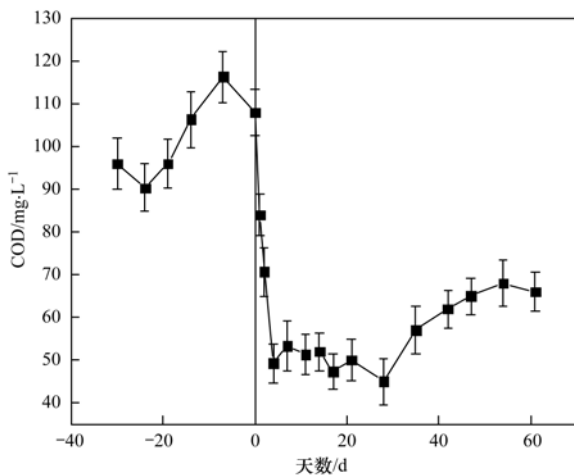


图4 间隙水 COD 变化

Fig. 4 Variations of the COD concentration in the interstitial water

COD 浓度的目的.

2.3 间隙水 TP 和 DIP 浓度变化

图5为间隙水TP和DIP浓度在整个实验周期的变化情况.有研究表明,水体的氧化还原状态可能影响底泥中磷的释放强度和浓度,缺氧环境会促进底泥中P释放到上覆水中,较高的DO浓度会抑制底泥P释放出来^[24].结合图2(b)和2(c)可知,在CaO₂联合生物炭原位覆盖前,底泥的DO浓度和ORP分别为0 mg·L⁻¹和-253 mV,这说明底泥中磷会逐渐释放出来,而间隙水TP和DIP浓度均值分别达到3.53 mg·L⁻¹和3.18 mg·L⁻¹(图5),若受到外界的扰动,会导致上覆水磷浓度上升. CaO₂联合生物炭覆盖后,间隙水TP和DIP浓度快速下降,在第4 d达到最低值,分别为1.15 mg·L⁻¹和0.44 mg·L⁻¹,在实验结束时去除率分别达到了50.97%和62.76%.一方面这是因为底泥缺氧环境的改善,另一方面钙离子可以与磷酸根离子结合,生成磷酸钙和羟基磷灰石等,达到固定磷的目的^[25];其次, CaO₂可将底泥中Fe²⁺氧化为与磷结合能力更强的Fe³⁺^[26],而生物炭也具有吸附磷酸盐的能力.综上, CaO₂联合生物炭原位覆盖可有效控制间隙水TP和DIP浓度,减小底泥中磷释放的风险.

2.4 底泥 AVS 的去除

AVS是指底泥中通过酸处理所挥发释放出的H₂S硫化物,可被视为含硫气味(H₂S)的来源,是衡量底泥黑臭程度的重要指标^[27].图6为底泥AVS在整个实验期的变化.在实验前,底泥中AVS的含量均值为8.5 mg·g⁻¹,CaO₂联合生物炭覆盖后,底泥AVS呈现下降趋势,在第28 d时AVS去除率达到最大为44.81%,实验结束时AVS去除率为37.03%.有研究表明,DO可作为电子受体更易被底泥好氧或兼性菌群利用,从而实现了底泥中

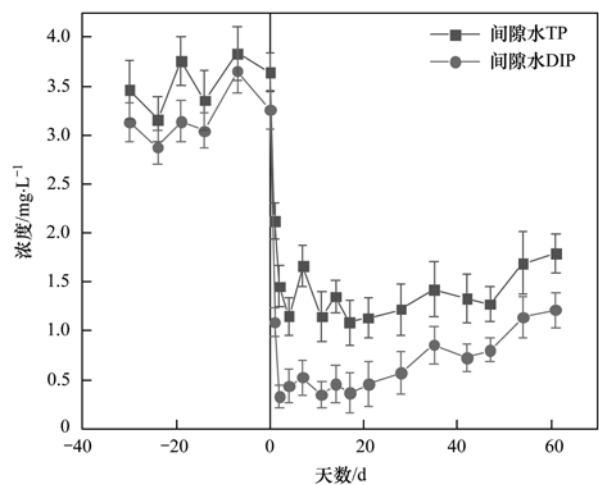


图5 间隙水 TP 和 DIP 变化

Fig. 5 Variations of the TP and DIP concentration in the interstitial water

AVS的氧化去除^[23].Wang等^[8]的研究发现CaO₂原位覆盖后可促进硫杆菌属丰度,将S²⁻氧化成SO₄²⁻实现生物脱硫.而生物炭覆盖后的环境有利于底栖微生物繁殖生长,有助于长期修复^[28].该结果表明, CaO₂联合生物炭覆盖可有效降低底泥AVS含量.

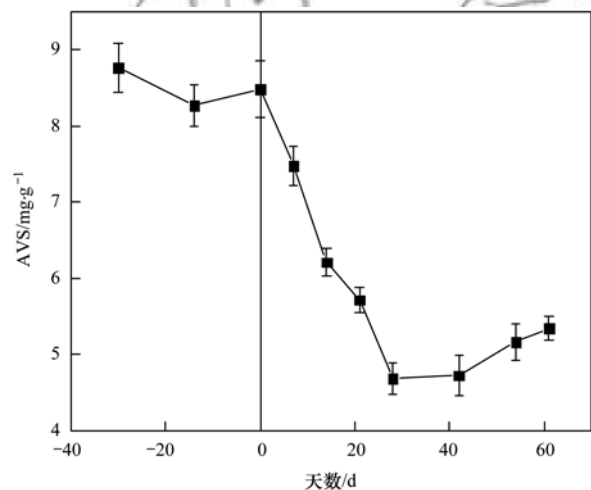


图6 底泥 AVS 变化

Fig. 6 Variations of the AVS in the sediment

2.5 底泥微生物的变化

由上述分析可知,间隙水氮和COD以及底泥AVS的降低与底泥功能性微生物有关,为了验证底泥中特征微生物的变化规律,在第0、28和61 d采集底泥进行微生物高通量测序.

表1为第0、28和61 d底泥微生物序列数和多样性指数.有效序列数量范围41 019 ~ 44 809,样品的覆盖率大于99%,表明微生物测序的结果可以表达底泥中微生物的多样性. Chao和ACE指数可以反映微生物群落的丰富度,3个样品Chao和ACE指数分别为802 ~ 868和792 ~ 861,说明底泥中微

生物群落的丰度相似. Shannon 指数和 Simpson 指数可以反映物种的多样性, Shannon 指数越高和 Simpson 指数越低, 群落多样性越好. 由表 1 可知,

表 1 底泥中微生物样本多样性指数

Table 1 Diversity data of the microbial community in sediments						
天数/d	有效序列数	Chao 指数	ACE 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖值/%
0	41 019	868	850	4. 65	0. 03	99. 91
28	44 809	852	861	5. 08	0. 01	99. 91
61	43 862	802	792	4. 81	0. 02	99. 92

图 7 为第 0、28 和 61 d 底泥中微生物在属水平上的相对丰度. CaO₂ 联合生物炭覆盖前,底泥中主要菌属为 *norank_f_Bacteroidetes_vadinHA17* (15. 26%)、*norank_f_Anaerolineaceae* (4. 76%)、*Caldisericum* (4. 65%)、*Lactivibrio* (4. 37%)、*Romboutsia* (2. 08%) 和 *Syntrophorhabdus* (1. 83%). 其中 *norank_f_Anaerolineaceae* 属于厌氧菌属,在厌氧条件下分解含氮有机物,增加水体 NH₄⁺-N 浓度^[29]; *Caldisericum* 在厌氧条件下可将硫酸盐还原为 H₂S^[30],而 *Romboutsia* 和 *Syntrophorhabdus* 均是在厌氧产酸中的主要菌属^[31,32]. CaO₂ 联合生物炭覆盖后,以上厌氧菌相对丰度明显下降,第 28 d 分别降至 1. 35%、0. 3%、0. 1% 和 0. 23%; 在第 61 d 变为 2. 22%、1. 96%、1. 43% 和 1. 1%. 这表明 CaO₂ 联合生物炭覆盖可以明显降低底泥中厌氧菌群的相对丰度,减小 NH₄⁺-N 和 H₂S 释放的风险,防止底泥酸化. 研究表明热单胞菌属 (*Thermomonas*)、*Dechloromonas* 和变形菌属 (*Proteus hauser*) 是污水中生物脱氮和降解 COD 的常见菌属^[8,33]. 第 28 d 底泥中热单胞菌属、*Dechloromonas* 和变形菌属的相对丰度分别达到了 4. 19%、2. 69% 和 2. 65%, 这表明

CaO₂ 联合生物炭覆盖后, Shannon 指数升高, Simpson 指数降低,说明 CaO₂ 联合生物炭覆盖可以促进底泥中微生物群落的多样性.

CaO₂ 联合生物炭覆盖可以促进底泥中功能性微生物的相对丰度,明显降低间隙水中的 NH₄⁺-N 和 COD 浓度(图 3 和图 4). 脱硫微生物属 (*Desulfomicrobium*) 和硫杆菌属 (*Thiobacillus*) 可氧化 H₂S、S₂O₃ 等物质并有效阻断 AVS 的生成,实现生物脱硫^[34]. 第 28 和 61 d 脱硫微生物属和硫杆菌属的相对丰度分别达到了 4. 65%、5. 07% 和 2. 13%、2. 76%,底泥 AVS 的去除(图 6)归结于 CaO₂ 联合生物炭覆盖后微氧环境的形成有利于脱硫微生物的生长繁殖. 综上, CaO₂ 联合生物炭覆盖后缺氧环境的改善,有利于降低厌氧微生物相对丰度、激活脱氮除硫微生物,促进了间隙水 NH₄⁺-N 和 COD 的降解以及底泥 AVS 的去除.

2.6 底泥磷形态的变化

由 2.3 节可知 CaO₂ 联合生物炭覆盖后可明显降低间隙水中 TP 和 DIP 浓度,为了进一步分析 CaO₂ 联合生物炭覆盖对底泥磷形态的影响,对底泥磷形态进行测定.

图 8 为底泥不同磷形态在实验周期所占比例 (质量分数) 的变化. 在实验前,底泥中 NH₄Cl-P (21% ~ 24%)、Fe/Al-P (13% ~ 19%)、Ca-P (11% ~

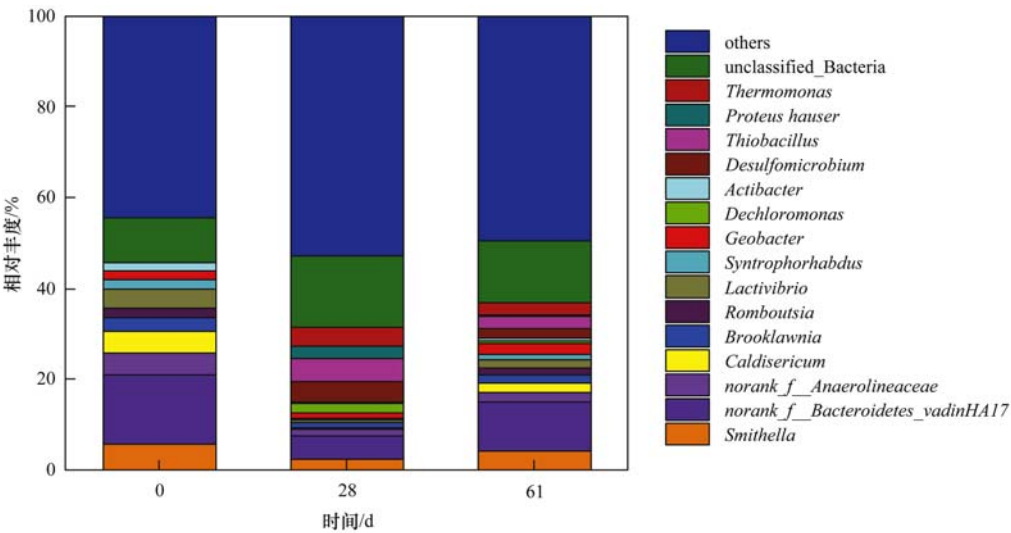


图 7 底泥中微生物在属水平上的相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of bacteria (at the genera level) in sediments

13%) 和 Res-P(47%~51%) 所占比例都很接近,其中 Res-P 占主要部分. CaO_2 和生物炭覆盖后, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Res-P 所占比例均呈现下降趋势,而 Fe/Al-P 和 Ca-P 所占比例明显上升,在第 21 d 时,Fe/Al-P 和 Ca-P 占比达到最大分别为 28% 和 40%,可以看出 Res-P 中大量的有机磷被矿化,转化为 Fe/Al-P 和 Ca-P. 研究表明 CaO_2 投加到底泥表层,不受氧化还原电位影响的铝磷变化较小,Fe/Al-P 中变化的绝大多数是铁磷, CaO_2 在底泥表层能够释放出 O_2 ,使得泥水体系中原来厌氧状态下的 Fe^{2+}

被氧化成与磷结合能力更强的 Fe^{3+} ,使得底泥中铁磷含量增加^[25]. Ca-P 含量的升高归结于溶解的钙离子会捕捉磷酸根离子,生成磷酸钙、羟基磷灰石等,这也解释了间隙水 TP 和 DIP 浓度(图 5)减少的原因. 由于生物炭的吸附和 CaO_2 化学作用,同时底泥厌氧的改善(图 2),有利于磷从间隙水向底泥迁移以及抑制内源磷的释放,所以在 CaO_2 联合生物炭覆盖后导致底泥 TP 含量增加(表 2),这也进一步证实了间隙水 DIP 被固定在底泥中,减小了底泥磷释放的风险.

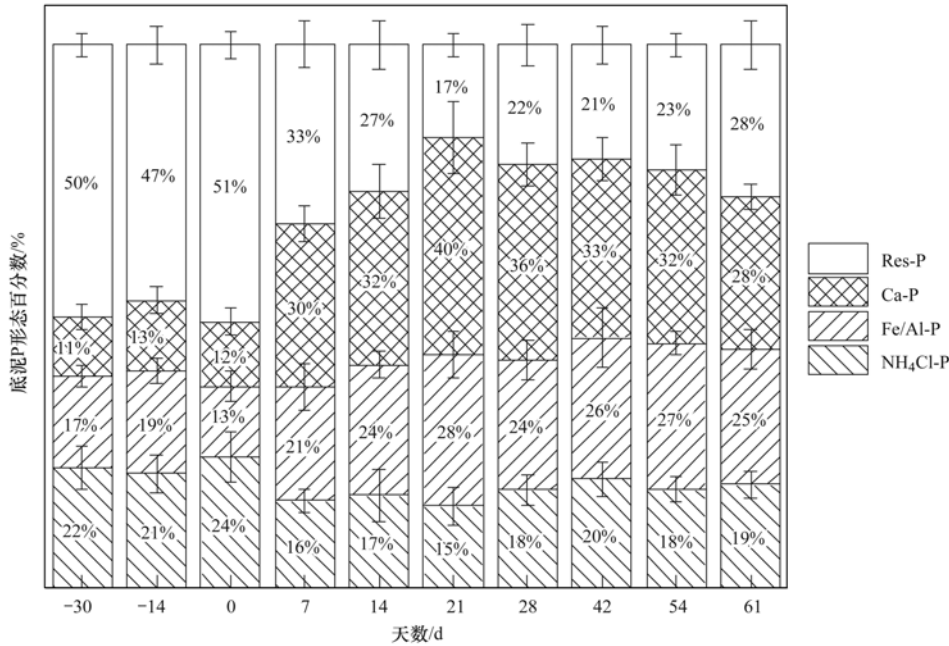


图 8 底泥磷形态变化

Fig. 8 Variations of the concentration of various phosphorus fractions in the sediment

表 2 底泥 TP 变化

Table 2 Changes of TP in the sediment

项目	天数/d									
	-30 ¹⁾	-14	0	7	14	21	28	42	54	61
TP/mg·g ⁻¹	8.135±0.125	7.895±0.173	8.012±0.127	8.321±0.155	8.289±0.191	8.453±0.201	8.218±0.159	8.311±0.183	8.219±0.125	8.198±0.138

1) 表中负值表示覆盖前的天数

3 结论

(1) CaO_2 联合生物炭覆盖可有效提高泥水体系 DO 浓度和 ORP,其中上覆水 DO 浓度和 ORP 分别保持在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 50 mV 以上,不会引起泥水体系 pH 明显增加.

(2) CaO_2 联合生物炭覆盖后缺氧环境的改善,有利于降低厌氧微生物相对丰度,出现脱氮除硫微生物,如热单胞菌属(*Thermomonas*)、*Dechloromonas*、变形菌属(*Proteus hauser*)、脱硫微生物属(*Desulfomicrobium*)和硫杆菌属(*Thiobacillus*),促进了间隙水 NH_4^+-N 和 COD 的降解以及底泥 AVS 的去

除,最终 NH_4^+-N 、COD 和 AVS 的去除率分别达到了 43.40%、41.18% 和 37.03%.

(3) CaO_2 联合生物炭覆盖后间隙水 TP 和 DIP 的去除率分别为 50.97% 和 62.76%,可抑制底泥磷的释放,将底泥中有机磷矿化,转化为稳定的 Fe/Al-P 和 Ca-P.

参考文献:

[1] 顾鹏飞. 城市黑臭河流的原位化学修复研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
[2] Tang Y Q, Li M, Zou Y N, et al. Mechanism of aerobic denitrifiers and calcium nitrate on urban river sediment remediation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 126: 119-130.

- [3] He Z H, Long X X, Li L Y, *et al.* Temperature response of sulfide/ferrous oxidation and microbial community in anoxic sediments treated with calcium nitrate addition[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **191**: 209-218.
- [4] Sun Y M, Wang S W, Niu J F. Microbial community evolution of black and stinking rivers during *in situ* remediation through micro-nano bubble and submerged resin floating bed technology[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **258**: 187-194.
- [5] Zhong J C, Fan C X, Zhang L, *et al.* Significance of dredging on sediment denitrification in Meiliang Bay, China; a year long simulation study[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(1): 68-75.
- [6] Wang W H, Wang Y, Li J J, *et al.* Dose effects of calcium peroxide on harmful gases emissions in the anoxic/anaerobic landscape water system[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**: 112989.
- [7] Wang Y, Wang W H, Yan F L, *et al.* Effects and mechanisms of calcium peroxide on purification of severely eutrophic water[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2796-2806.
- [8] Wang W H, Wang Y, Fan P, *et al.* Effect of calcium peroxide on the water quality and bacterium community of sediment in black-odor water[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **248**: 18-27.
- [9] 李亮, 武成辉, 陈涛, 等. 过氧化钙在城镇黑臭水体修复中的作用[J]. *化工进展*, 2016, **35**(S2): 340-346.
- Li L, Wu C H, Chen T, *et al.* Effect of calcium peroxide on the restoration of black and odorous water in towns[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, **35**(S2): 340-346.
- [10] Kambo H S, Dutta A. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, **45**: 359-378.
- [11] Zhu Y Y, Tang W Z, Jin X, *et al.* Using biochar capping to reduce nitrogen release from sediments in eutrophic lakes[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 93-104.
- [12] Li H X, Li Y X, Xu Y, *et al.* Biochar phosphorus fertilizer effects on soil phosphorus availability[J]. *Chemosphere*, 2020, **244**: 125471.
- [13] Han X, Chen H, Liu Y X, *et al.* Study on removal of gaseous hydrogen sulfide based on macroalgae biochars[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, **73**: 103068.
- [14] Zhang C, Shan B Q, Tang W Z, *et al.* Comparison of cadmium and lead sorption by *Phyllostachys pubescens* biochar produced under a low-oxygen pyrolysis atmosphere[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **238**: 352-360.
- [15] 邝蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 等. NH_4^+ 对镁改性生物炭除磷效果的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(2): 669-676.
- Zhi M M, Wang P F, Hou Z Y, *et al.* Effect of nitrogen on magnesium modified biochar adsorption to phosphorus[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(2): 669-676.
- [16] 李扬, 李锋民, 张修稳, 等. 生物炭覆盖对底泥污染物释放的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3071-3078.
- Li Y, Li F M, Zhang X W, *et al.* Effects of biochar covering on the release of pollutants from sediment[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3071-3078.
- [17] 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.
- [18] 刘树娟, 陈磊, 钟润生, 等. 硝酸钙对河流底泥中含硫化物臭味原位控制[J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(6): 691-698.
- Liu S J, Chen L, Zhong R S, *et al.* In situ control of odor in sulfide-containing compounds with calcium nitrate in river sediments[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(6): 691-698.
- [19] 林玉环, 郭明新, 庄岩. 底泥中酸性挥发硫及同步浸提金属的测定[J]. *环境科学学报*, 1997, **17**(3): 353-358.
- Lin Y H, Guo M X, Zhuang Y. Determination of acid volatile sulfide and simultaneously extracted metals in sediment[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, **17**(3): 353-358.
- [20] Xu Y, Han F E, Li D P, *et al.* Transformation of internal sedimentary phosphorus fractions by point injection of CaO_2 [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **343**: 408-415.
- [21] Nykänen A, Kontio H, Klutas O, *et al.* Increasing lake water and sediment oxygen levels using slow release peroxide[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **429**: 317-324.
- [22] Wang H F, Zhao Y S, Li T Y, *et al.* Properties of calcium peroxide for release of hydrogen peroxide and oxygen: a kinetics study[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **303**: 450-457.
- [23] Chang B V, Yuan S Y, Ren Y L. Aerobic degradation of tetrabromobisphenol-A by microbes in river sediment[J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(5): 535-541.
- [24] Wang J D, Xiang X, Yao X, *et al.* Efficient perovskite solar cells using trichlorosilanes as perovskite/PCBM interface modifiers[J]. *Organic Electronics*, 2016, **39**: 1-9.
- [25] 徐垚, 李大鹏, 韩菲尔, 等. CaO_2 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2836-2842.
- Xu Y, Li D P, Han F E, *et al.* Inhibition of internal phosphorus release in the black-odor channel under different adding methods of CaO_2 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2836-2842.
- [26] 张亚雷, 章明, 李建华, 等. CaO_2 不同投加方式对底泥磷释放的抑制效果分析[J]. *环境科学*, 2006, **27**(11): 2188-2193.
- Zhang Y L, Zhang M, Li J H, *et al.* Effect on different adding means of calcium peroxide to control phosphorus release from sediment[J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(11): 2188-2193.
- [27] Liu X N, Tao Y, Zhou K Y, *et al.* Effect of water quality improvement on the remediation of river sediment due to the addition of calcium nitrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 887-894.
- [28] Xu H J, Wang X H, Li H, *et al.* Biochar impacts soil microbial community composition and nitrogen cycling in an acidic soil planted with rape[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(16): 9391-9399.
- [29] Li W P, Zhang S K, Zhang L Y, *et al.* In-situ remediation of sediment by calcium nitrate combined with composite microorganisms under low-DO regulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **697**: 134109.
- [30] Shivaji S, Kumari K, Kishore K H, *et al.* Vertical distribution of bacteria in a lake sediment from Antarctica by culture-independent and culture-dependent approaches[J]. *Research in Microbiology*, 2011, **162**(2): 191-203.
- [31] Li X K, Ma K L, Meng L W, *et al.* Performance and microbial community profiles in an anaerobic reactor treating with simulated PTA wastewater: from mesophilic to thermophilic temperature[J]. *Water Research*, 2014, **61**: 57-66.
- [32] 鲁帅领, 朱慧, 符波, 等. 高温条件下混菌发酵合成气产乙酸及其群落结构[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, **25**(1): 164-169.
- Lu S L, Zhu H, Fu B, *et al.* Thermophilic fermentation of

- syngas to acetate by mixed cultures and their microbial community [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2019, **25**(1): 164-169.
- [33] 马思佳, 顾卓江, 丁丽丽, 等. 碳源对活性污泥微生物细胞膜特性和群落结构影响[J]. 微生物学通报, 2017, **44**(3): 561-573.
- Ma S J, Gu Z J, Ding L L, *et al.* Effects of carbon sources on cell membrane properties and microbial community of activated sludge[J]. Microbiology China, 2017, **44**(3): 561-573.
- [34] Gu W J, Sun W, Lu Y S, *et al.* Effect of *Thiobacillus thioparus* 1904 and sulphur addition on odour emission during aerobic composting[J]. Bioresource Technology, 2018, **249**: 254-260.

欢迎订阅 2020 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebirur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)