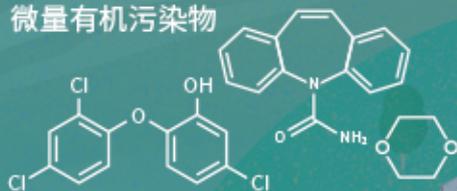


城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路  
王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪营

微量有机污染物



## 深度处理

- 污染物非靶向筛查
- 新型处理技术开发
- 处理效率替代性指标
- 工艺运行指南与排放标准

污水处理厂

深度处理

污水再生利用

湖泊湿地等

景观娱乐用水

污水达标排放

下游城市水源地

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



2021年6月

第42卷 第6期  
Vol.42 No.6

目次

综述与专论

- 城市环境生物安全研究的进展与挑战 ..... 苏建强, 安新丽, 胡安谊, 朱永官 (2565)  
城市污水再生处理中微量有机污染物控制的关键难题与解决思路 ..... 王文龙, 吴乾元, 杜焯, 黄南, 陆韻, 魏东斌, 胡洪莹 (2573)  
污泥 EPS 作为阻燃剂的机制归纳与潜力分析 ..... 郝晓地, 赵梓丞, 李季, 时琛, 吴远远 (2583)

研究报告

- 北京大气 PM<sub>2.5</sub> 载体金属浓度、来源及健康风险的城郊差异 ..... 周安琪, 刘建伟, 周旭, 毕思琪, 张博哈, 高越, 曹红斌 (2595)  
京津冀及周边 MAIAC AOD 和 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度特征及相关性分析 ..... 金国因, 杨兴川, 晏星, 赵文吉 (2604)  
天津市 PM<sub>2.5</sub> 中二次硝酸盐形成及防控 ..... 肖致美, 武婷, 卫昱婷, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 陈魁, 邓小文 (2616)  
南京市大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 ..... 傅银银, 文浩哲, 王向华, 于南洋, 李冰, 韦斯 (2626)  
汾渭平原吸收性气溶胶时空演化及潜在源区分析 ..... 刘旻霞, 李亮, 于瑞新, 宋佳颖, 张国娟, 穆若兰, 徐璐 (2634)  
西南典型区域夏季大气含氧挥发性有机化合物来源解析 .....  
..... 陈木兰, 王赛男, 陈天舒, 朱波, 彭超, 周佳维, 车汉雄, 黄汝辉, 杨复沫, 刘合凡, 谭钦文, 韩丽, 陈军辉, 陆克定, 陈阳 (2648)  
气溶胶中溶解性有机质 (DOM) 液相氧化 ..... 陶冶, 陈彦彤, 李楠旺, 张敬宇, 叶招莲, 盖鑫磊 (2659)  
基于 MERRA-2 再分析资料的上海市近 40 年大气黑碳浓度变化及潜在来源解析 .....  
..... 曹闪闪, 段玉森, 高婵婵, 苏玲, 杨怡萱, 张洋, 蔡超琳, 刘敏 (2668)  
石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析 ..... 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 崔建升, 陈静, 刘大喜, 石文雅 (2679)  
基于光化学指数的邯郸市臭氧生成敏感性 ..... 牛元, 程水源, 欧盛菊, 姚诗音, 沈泽亚, 关攀博 (2691)  
基于 Landsat 数据的关中盆地腹地 AOD 时空格局及城市化对其影响 ..... 郑玉蓉, 王旭红, 张秀, 胡贵贵, 梁秀娟, 牛林芝, 韩海青 (2699)  
基于卫星遥感和地面观测的人为源 VOCs 区域清单多维校验 ..... 王玥, 魏巍, 任云婷, 王晓琦, 陈赛赛, 程水源 (2713)  
中原城市群国家干线公路 SOA 生成潜势估算 ..... 王娜萍, 李海萍, 张帆 (2721)  
北京市“大气十条”实施的空气质量改善效益 ..... 卢亚灵, 范朝阳, 蒋洪强, 牛传真, 李勃 (2730)  
工业大气污染源排放绩效定量评价及应用 ..... 李廷昆, 冯银厂, 吴建会, 毕晓辉, 张裕芬 (2740)  
基于生态风险的我国水环境高风险抗生素筛选排序 ..... 周力, 刘珊, 郭家骅, 李琦 (2748)  
基于 RDA-REM 模型的我国再生水开发利用潜力 ..... 郑锦涛, 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 邓晰元, 郑皓 (2758)  
基于模型研究质量评价的 SWAT 模型参数取值特征分析 ..... 荣易, 秦成新, 杜鹏飞, 孙博 (2769)  
大型浅水湖泊水质模型边界负荷敏感性分析 ..... 王亚宁, 李一平, 程月, 唐春燕, 陈刚 (2778)  
不同流域水陆过渡带磷有效态的特征对比及环境意义 ..... 朱海, 袁旭音, 叶宏萌, 成瑾, 毛志强, 韩年, 周慧华 (2787)  
基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析 .....  
..... 李华林, 张建军, 张耀方, 常国梁, 时迪迪, 徐文静, 宋卓远, 于佩丹, 张守红 (2796)  
长期施肥和耕作下紫色土坡耕地径流 TN 和 TP 流失特征 ..... 吴小雨, 李天阳, 何丙辉 (2810)  
渭河和泾河流域浅层地下水水化学特征和控制因素 ..... 刘鑫, 向伟, 司炳成 (2817)  
太湖流域上游南苕溪水体夏季二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素 .....  
..... 梁佳辉, 田琳琳, 周钟昱, 张海阔, 张方方, 何圣嘉, 蔡廷江 (2826)  
低温期浅水湖泊氮的分布及无机氮扩散通量: 以白洋淀为例 ..... 文艳, 单保庆, 张文强 (2839)  
覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响 ..... 陈姝彤, 李大鹏, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇 (2848)  
圩区河道底泥腐殖酸对重金属和抗生素的共吸附 ..... 薛向东, 杨宸豪, 于荐麟, 庄海峰, 方程冉 (2856)  
两种 PPCPs 对雅鲁藏布江沉积物硝化作用的影响 ..... 凌欣, 徐慧平, 陆光华 (2868)  
铁碳微电解及沸石组合人工湿地的废水处理效果 ..... 赵仲婧, 郝庆菊, 张尧钰, 熊维霞, 曾唯, 陈俊江, 江长胜 (2875)  
CDs-BOC 复合催化剂可见光下活化过硫酸盐降解典型 PPCPs ..... 雷倩, 许路, 艾伟, 李志敏, 杨磊 (2885)  
pg-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/BiOBr/Ag 复合材料的制备及其光催化降解磺胺甲噁唑 ..... 杨利伟, 刘丽君, 夏训峰, 朱建超, 高生旺, 王洪良, 王书平 (2896)  
海藻酸钠负载硫化零价铁对水体中 Cr(VI) 的还原去除 ..... 王旭, 杨欣楠, 黄币娟, 刘壮, 牟诗萌, 程敏, 谢燕华 (2908)  
超顺磁性纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@SiO<sub>2</sub> 功能化材料对镉的吸附机制 ..... 张立志, 易平, 方丹丹, 王强 (2917)  
典型药物在医院废水和城市污水处理厂中的污染特征及去除情况 ..... 叶璞, 游文丹, 杨滨, 陈阳, 汪立高, 赵建亮, 应光国 (2928)  
印染废水循环利用抗生素抗性基因丰度变化特性 ..... 徐瑶瑶, 王锐, 金鑫, 石炬, 王岩, 金鹏康 (2937)  
短程硝化反硝化除磷颗粒污泥的同步驯化 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 刘博, 张杰 (2946)  
厌氧氨氧化颗粒污泥的长期保藏及快速活性恢复 ..... 李冬, 刘名扬, 张杰, 曾辉平 (2957)  
市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估 ..... 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 左宁, 陈芳媛 (2966)  
不同作物农田土壤抗生素抗性基因多样性 ..... 黄福义, 周曙仝, 王佳妮, 苏建强, 李虎 (2975)  
宁夏养牛场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征 ..... 张俊华, 陈睿华, 刘吉利, 尚天浩, 沈聪 (2981)  
温度和搅拌对牛粪厌氧消化系统抗生素抗性基因变化和微生物群落的影响 .....  
..... 许继飞, 张秋萍, 朱天骄, 秦帅, 朱文博, 庞小可, 赵吉 (2992)  
小麦秸秆生物质炭施用对不同耕作措施土壤碳含量变化的影响 ..... 刘振杰, 李鹏飞, 黄世威, 金相乐, 张阿凤 (3000)  
农牧交错带典型区土壤氮磷空间分布特征及其影响因素 ..... 张燕江, 王俊鹏, 王瑜, 张兴昌, 甄庆, 李鹏飞 (3010)  
汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 王佳彬, 余飞, 曾琴琴 (3018)  
调理剂对磷镉富集土壤中两种元素交互作用的影响 ..... 黄洋, 胡学玉, 曹坤坤, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (3028)  
S-烯丙基-L-半胱氨酸缓解水稻种子幼根和幼芽镉胁迫机制 ..... 程六龙, 黄永春, 王常荣, 刘仲齐, 黄益宗, 张长波, 王晓丽 (3037)  
连续 4 个生长季大气 CO<sub>2</sub> 升高与土壤铅 (Pb) 污染耦合下刺槐幼苗根际土壤微生物特征 .....  
..... 贾夏, Lkhagvajargal Khadkhurel, 赵永华, 张春燕, 张宁静, 高云峰, 王子威 (3046)  
嗜热脂肪地芽孢杆菌对聚苯乙烯的降解性能 ..... 邢睿智, 赵子强, 赵文琪, 陈志, 陈金凤, 周顺桂 (3056)  
冬青和女贞叶表面颗粒物微形态及叶际细菌群落结构 ..... 李慧娟, 徐爱玲, 乔凤祿, 蒋敏, 宋琪 (3063)  
罗红霉素对大型溛生殖生长及抗氧化系统的影响 ..... 张凌玉, 刘建超, 冷阳, 陆光华 (3074)  
中国粮食作物产量和木本植物生物量与地表臭氧污染的响应关系 ..... 冯兆忠, 彭金龙 (3084)  
《环境科学》征订启事 (2698) 《环境科学》征稿简则 (2712) 信息 (3027, 3055, 3073)

## 覆盖条件下底泥微环境对内源磷释放的影响

陈姝彤, 李大鹏\*, 徐楚天, 张帅, 丁玉琴, 孙培荣, 黄勇

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

**摘要:** 底泥微环境对内源磷释放有重要的影响. 本研究对比了2种不同的原位覆盖材料对底泥微环境的影响以及内源磷释放的控制效果, 沉积物微环境以间隙水中 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 浓度和微生物活性来表示. 结果表明,  $\text{CaO}_2$  改性材料(ACPM)覆盖条件下较锁磷剂(Phoslock®)组 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ 浓度均处于较低状态, 微生物活性值FDA增加了42.57%, 说明其微生物活性较高, 也显示了ACPM覆盖下其氧化还原电位高于Phoslock®, 且底泥微环境处于好氧状态. 与Phoslock®组相比, ACPM组上覆水和间隙水中DIP浓度均较高, 表明Phoslock®对磷酸盐的吸附能力优于ACPM, 也暗示了底泥微环境并不是磷吸附的唯一衡量标准. 在内源磷固定过程中, 2种覆盖材料均有利于内源磷的固定, Ca-P均显著增加. 然而, 具有氧化性的ACPM导致 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 增加, Fe/Al-P大量减少, 促进了活性磷的释放, 使得底泥中的磷向覆盖层迁移, 有利于清洁底泥.

**关键词:** 原位覆盖; 底泥; 微环境; 内源磷; 固定

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)06-2848-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009174

## Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping

CHEN Shu-tong, LI Da-peng\*, XU Chu-tian, ZHANG Shuai, DING Yu-qin, SUN Pei-rong, HUANG Yong

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** The sediment microenvironment has an important effect on the release of endogenous phosphorus. In this study, the influence of two different in-situ covering materials on the sediment microenvironment were compared, and the controlling effect of endogenous phosphorus release were studied. The sediment microenvironment was represented by the concentration of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  in interstitial water, and microbial activity. The results showed that the concentrations of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  were lower under ACPM coverage than those of the Phoslock® group, and the microbial activity was higher, indicating that the redox potential of ACPM coverage was higher than that of Phoslock®. Furthermore, the bottom sediment microenvironment was in an aerobic state. Compared with the Phoslock® group, the DIP concentrations in both the overcover water and porewater in the ACPM group were higher, indicating that Phoslock® was superior to ACPM with respect to the phosphate adsorption capacity, suggesting that the sediment microenvironment was not the only criterion for phosphorus adsorption. In the fixation process of endogenous phosphorus, both of the covering materials were conducive to the fixation of inter phosphorus, and Ca-P increased significantly. On the other hand, oxidizing ACPM led to an increase in  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  and a significant decrease in Fe/Al-P. This promotes the release of active phosphorus, which is conducive to the cleaning of the sediment and phosphorus release.

**Key words:** in situ capping; sediment; microenvironment; sedimentary phosphorus; fixation

覆盖法控磷是抑制或者消除水体富营养化的有效方法,其原理是通过覆盖材料与磷结合,从而有效提高沉积物中磷的结合能力<sup>[1,2]</sup>. 锁磷剂(Phoslock®)是一种常见的覆盖材料,其原理是通过将稀土镧与膨润土结合,投入水体后与磷酸盐结合生成难溶性的磷酸镧沉淀,从而达到降低水体中活性磷的效果. 然而, Vopel等<sup>[3]</sup>的研究发现,覆盖厚度大于2 mm会在底泥表层形成致密层,这会抑制上覆水中溶解氧向底泥中渗入,从而导致底泥内部厌氧环境加剧,致使氧化还原电位降低,使栖息在沉积物中的好氧微生物得到抑制.  $\text{CaO}_2$ 是一种兼具释氧性和氧化性的材料<sup>[4]</sup>,其可以改变沉积物的微环境,从而形成与Phoslock®完全不同的覆盖环境,但是由于 $\text{CaO}_2$ 与水反应迅速,持续效果短,破坏水生生态系统,基于此,绝大多数的 $\text{CaO}_2$ 材料均以缓

释为目标. Zhou等<sup>[5]</sup>将 $\text{CaO}_2$ 与净水污泥和水泥结合,制成ACPM材料,该材料可以显著降低 $\text{CaO}_2$ 与水的反应速度,并暗示可以避免形成厌氧的底泥环境. 由此可见,这2种覆盖材料通过改变底泥微环境(Phoslock®厌氧, ACPM好氧)可能对水体和底泥中磷的迁移转化产生完全不同的影响. 然而,目前有关此类对比性研究仍为数不多.

因此,本研究以Phoslock®和ACPM为覆盖材料,模拟实际水体深度 $\geq 1$  m,对比分析两者对底泥微环境的改善效果、磷释放的影响和形态磷转化的作用,以期阐明底泥微环境对内源磷固定机制提供理论参考,并为覆盖材料的实际应用提供技术

收稿日期: 2020-09-17; 修订日期: 2020-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778393)

作者简介: 陈姝彤(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为湖泊生态环境与污染修复, E-mail: 2297695923@qq.com

\* 通信作者, E-mail: ustslqp@163.com

支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

ACPM 的制备: 将过氧化钙, 净水污泥, 水泥以 5:3:2 比例混合造粒, 各颗粒质量保持在 0.5 g 左右, 具体操作步骤见文献[5]. Phoslock® (LMB) 由稀土镧(5%) 的化合物和改性黏土(膨润土) 组成, 购买于北京枫斯洛克生态工程有限公司.

沉积物采自苏州市某城市河道(31°18'1.02"N, 120°37'45.56"E), 该河道长期接受周围住宅区所排放的污水, 为典型的黑臭水体. 2019 年 12 月 8 日利用大口径重力采样器采集沉积物, 去除 10 cm 以下部分, 同时采集上覆水 250 L, 采集后迅速运回实验室, 在运输的过程中注意避光, 冷藏, 避免扰动.

将采集的底泥过 100 目筛, 去除杂质, 装入实验装置(图 1), 分析上覆水和底泥指标见表 1.

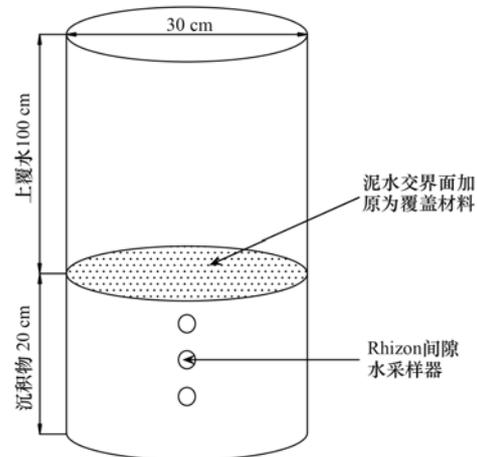


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental device

表 1 沉积物和上覆水的理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of sediment and overlying water

参数	上覆水					底泥		
	pH	DO /mg·L <sup>-1</sup>	TOC /mg·L <sup>-1</sup>	DIP /mg·L <sup>-1</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N /mg·L <sup>-1</sup>	含水率 /%	烧湿重 /%	Tot-P /mg·kg <sup>-1</sup>
数值	7.92	4.48	6.7	0.42	15.6	67.4	20.12	1 608.6

### 1.2 实验方法

实验装置如图 1 所示, 模拟实际黑臭河道水体, 高 130 cm, 内径 30 cm 的有机玻璃管圆柱, 管壁留有 Rhizon 间隙水采样孔. 在有机玻璃管柱中加入高 20 cm 过 100 目筛网的底泥, 实验设置 3 个实验组(E0、E1 和 E2), E0 为 Control 组, 不添加任何材料, E1 底泥表面覆盖 55 g Phoslock®, E2 表面覆盖 55 g ACPM(材料的投加量按材料与底泥表层 2 cm 的潜在活性磷量的 1:100 比例投加<sup>[6]</sup>, 约 770 g·m<sup>-2</sup>). 将从河道采集回来的上覆水通过虹吸法注入到实验装置中, 避免底泥扰动, 至水深 100 cm 止. 在泥水交接面下 1、2 和 3 cm 处插入 Rhizon 取样器, 每天取样结束后以虹吸法补充原水, 保持上覆水恒定. 实验在室外进行 40 d, 定期监测上覆水中 DIP 及间隙水中 DIP、Fe<sup>2+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量, 实验结束后分析底泥形态磷和微生物活性.

### 1.3 分析方法

每次采集的水样用 0.45 μm 滤膜过滤, 滤后水样采用钼酸铵分光光度法测定 DIP 浓度, Fe<sup>2+</sup> 采用邻菲罗啉分光光度法测定, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法测定. 微生物活性采用荧光素二乙酸酯(FDA)法. 底泥形态磷采用 SMT 法, 水溶性磷(WSP)采用去离子水振荡提取, 藻类可利用磷(AAP)使用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 浸提测定.

本实验结束后采用 SPSS 20.0.0 软件进行数据统计分析; 使用 LSD 最小显著性差异法和方差分析法检验实验组与对照组之间以及实验组之间各特征指标差异的显著性, 显著性水平  $\alpha = 0.05$ , 作图采用 Origin Pro 2018 软件

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同覆盖材料下底泥微环境的变化

#### 2.1.1 间隙水中 Fe<sup>2+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的变化

底泥中 Fe<sup>2+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度变化间接地反映了底泥的氧化还原环境<sup>[7]</sup>, 覆盖条件下, 底泥微环境的变化如图 2 所示.

各实验组间隙水中 Fe<sup>2+</sup> 的浓度大小为: Control 组 > Phoslock® 组 > ACPM 组. 与 Control 相比, Phoslock® 组底泥各层 Fe<sup>2+</sup> 浓度变化均不显著( $P > 0.05$ ), 而 ACPM 组与 Control 组相比, 底泥 I、II 层间隙水中 Fe<sup>2+</sup> 浓度均显著下降( $P < 0.001$ ), 平衡浓度维持在 0.1 mg·L<sup>-1</sup> 左右, 两种覆盖材料对 III 层间隙水中 Fe<sup>2+</sup> 浓度的影响均不大. 3 组实验 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度变化趋势相似, 均由高到低最终趋于稳定, 在 I 层间隙水中, 各实验组 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均浓度分别为 25.77、22.50 和 16.42 mg·L<sup>-1</sup>, Phoslock® 组与 Control 组相比变化并不明显, ACPM 组下降了 36.28%, 对 II 和 III 层间隙水而言, Phoslock® 与

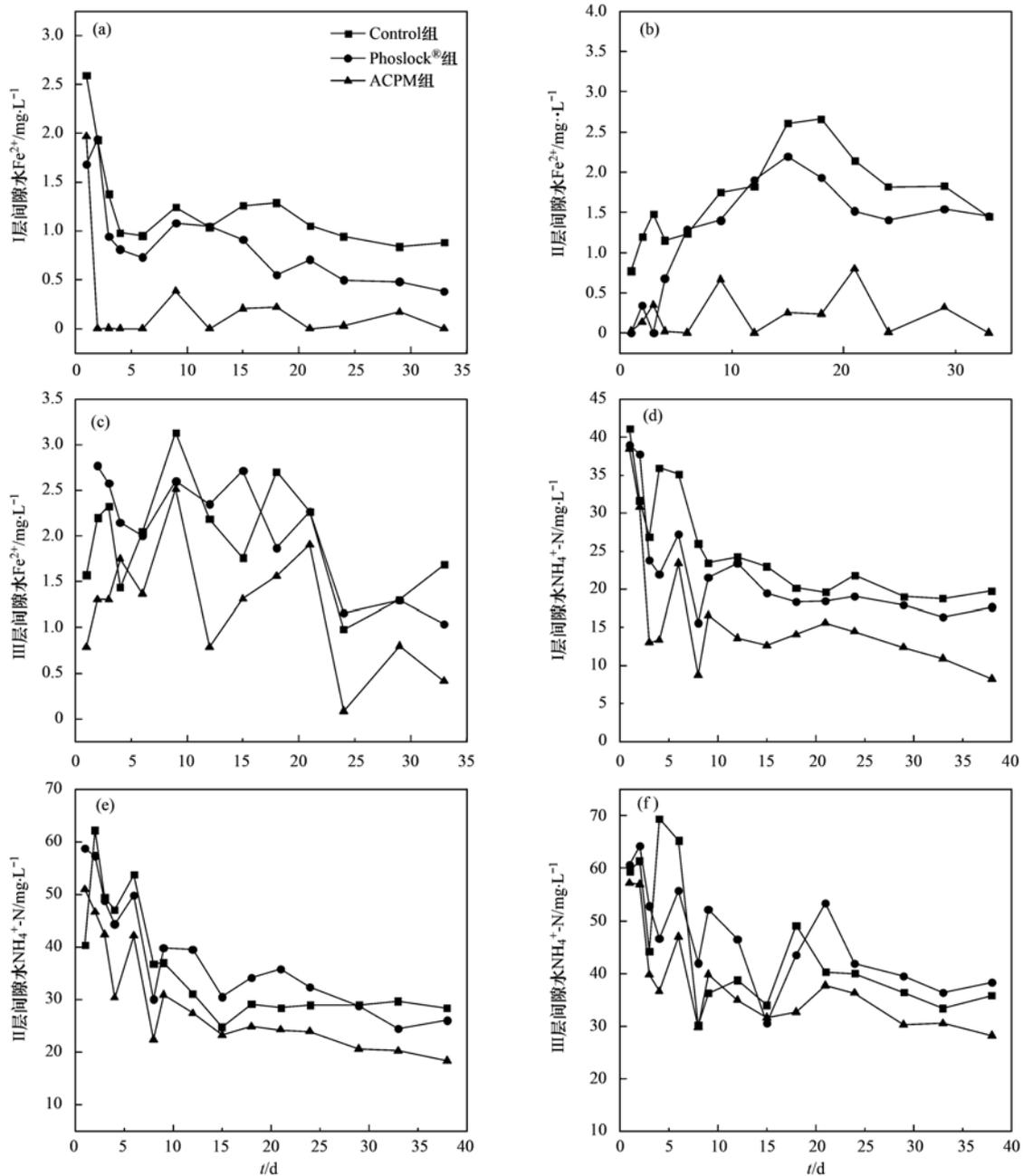


图2 原位覆盖材料下间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的变化

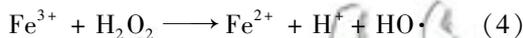
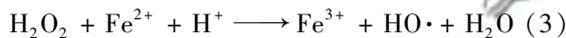
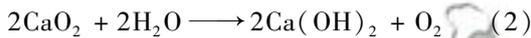
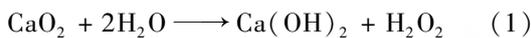
Fig. 2 Changes in  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in interstitial water with in-situ covering material

ACPM 组的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度变化均不显著 ( $P > 0.05$ )。随着底泥深度的加深,各实验组  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度均逐渐升高,且覆盖 ACPM 条件下的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度明显低于 Phoslock<sup>®</sup>,说明其氧化还原电位一定高于 Phoslock<sup>®</sup>。

分析底泥氧化还原条件的原因,在 I 层间隙中,Phoslock<sup>®</sup> 组的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度较对照组略低,Ding 等<sup>[8]</sup> 的研究认为覆盖 Phoslock<sup>®</sup> 对沉积物中  $\text{Fe}^{2+}$  具有络合作用,能够吸附间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$ ,对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除也有一定的作用。然而在 II 层间隙水中,Phoslock<sup>®</sup> 组  $\text{Fe}^{2+}$  的浓度持续上升后趋于稳定,

这是由于 Phoslock<sup>®</sup> 在泥水界面形成封闭的覆盖层,阻碍了氧气进入深层底泥,使得底泥微环境为厌氧状态,进而导致  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度的增加<sup>[9]</sup>。此外 Phoslock<sup>®</sup> 渗透缓慢,在深层底泥中未能与  $\text{Fe}^{2+}$  形成有效的协同试剂,对深层底泥中的  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除效果微乎其微。与 Control 组和 Phoslock<sup>®</sup> 组相比,ACPM 组底泥中  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的浓度均较低,这与 ACPM 产生的供氧环境有关<sup>[10]</sup>。ACPM 中  $\text{CaO}_2$  在反应式(1)中与水反应生成  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,还原性物质  $\text{Fe}^{2+}$  在  $\text{H}_2\text{O}_2$  的催化下氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,使得反应式(3)和(4)不断进行,此外,反应式(2)中  $\text{CaO}_2$  与水

反应生成的  $O_2$ , 使得底泥微环境从厌氧状态转变为好氧状态, 好氧条件下促使  $Fe^{2+}$  向  $Fe^{3+}$  的转化, 使得不稳定形态的磷  $Fe^{2+}$ -P 向稳定态磷  $Fe^{3+}$ -P 转化, 降低了  $Fe^{2+}$  浓度<sup>[11]</sup>. 另一方面,  $CaO_2$  易与富含有机物质的底泥充分接触, 产生好氧环境, 刺激微生物的有氧呼吸, 有利于好氧微生物大量增长, 底泥处于好氧状态有利于底泥内源磷固定, 对  $NH_4^+$ -N 的去除也有一定的作用<sup>[12]</sup>. 由反应式(5)可以看到, 水中游离态的  $NH_4^+$  生成氨气释放出来, 也有利于水中氨氮的去除. Oshiki 等<sup>[13]</sup> 的研究还发现, 过氧化钙能有效提高富营养化底泥中厌氧氨氧化典型菌的相对丰富度, 新衍生的硝化菌能够促进泥水交界面的硝化过程, 使得  $NO_3^-$ -N 升高,  $NH_4^+$ -N 降低. 结果表明, ACPM 覆盖条件改善了底泥微氧环境, 促使底泥氧化还原环境的改变.



### 2.1.2 底泥微生物活性的变化

微生物活性值 (FDA) 的含量变化如图 3 所示, 与对照组相比, Phoslock® 组与 ACPM 组均有所提高, 且随着底泥深度的加深, 底泥微生物活性的差值逐渐减小. 覆盖 Phoslock® 组 FDA 含量分别增加了 20.62% (0~2 cm) 和 23.88% (2~4 cm), ACPM 组增加了 44.97% (0~2 cm) 和 39.65% (2~4 cm), 由图 3 可知 ACPM 组优于 Phoslock® 组. 这是由于 ACPM 中的过氧化钙具有释氧性, 使得表层好氧微生物大量繁殖, 然而由于  $O_2$  向下渗透较弱, 大多向上上浮, 使得深层底泥微生物活性减弱<sup>[14]</sup>. 而 Phoslock® 是非释氧型材料<sup>[15]</sup>, 对各层底泥微环境

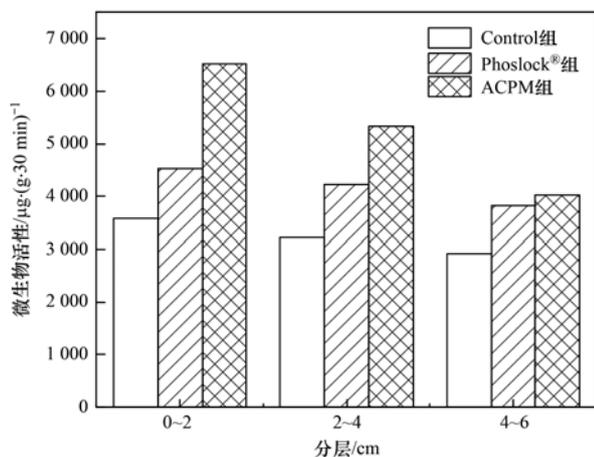


图 3 原位覆盖材料对底泥微生物活性的影响

Fig. 3 Effect of in-situ covering material on the microbial activity of sediment

的改善均较弱.

### 2.2 上覆水和间隙水中磷浓度的变化规律

不同的覆盖材料下上覆水和底泥中 DIP 浓度变化如图 4 所示. 与对照组相比, Phoslock® 覆盖下上覆水的 DIP 浓度显著下降 ( $P < 0.05$ ), 由  $0.47 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  下降到  $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  后趋于稳定, 这归结于 Phoslock® 中镧与水中  $PO_4^{3-}$  结合形成极不溶于水的磷酸镧 ( $LaPO_4 \cdot nH_2O$ ) 沉淀, 对水体磷具有吸附与固定作用, 此外当 Phoslock® 进入水体后, 在泥水界面 (SWI) 上形成一层覆盖层, 防止底泥中各种形态的磷转化为溶解态磷酸盐释放到上覆水中<sup>[16]</sup>. 对 ACPM 而言, 上覆水中 DIP 浓度变化并不显著 ( $P > 0.05$ ), 从实验第 20 d 开始, 与 Control 组相比虽有下降, 但仍高于 Phoslock® 组, 最终稳定在  $0.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

不同覆盖材料下 Chl-a 的变化情况如图 5 所示, 投加钙改性材料 ACPM 后, 上覆水中 Chl-a 出现明显下降, 相较于 Control 组, 投加 ACPM 在 30 d 内使得上覆水中 Chl-a 降低约 32.22%, Phoslock® 组藻类较多, 说明 Phoslock® 对藻类并没有太大的抑制作用, 有研究表明 Phoslock® 对磷的理论吸附量在  $10 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  左右<sup>[17]</sup>, 而 ACPM 则在  $28.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  左右, 这说明 ACPM 应具有更好的控磷效能, 但一旦藻类生长, 则可能导致 Phoslock® 组磷降得更低<sup>[18]</sup>. 且  $CaO_2$  中的  $Ca^{2+}$  与水反应会生成羟基磷酸钙和碳酸钙沉淀, 具有很好的固磷作用, 然而事实与此相悖, 推测可能因为底泥中内源磷释放, 且其因颗粒态而无法避免存在缝隙, 使得底泥中溶解性磷从缝隙中释放到上覆水中, 导致上覆水中 DIP 浓度增加.

两种覆盖材料对底泥间隙水中的 DIP 均有一定的抑制作用. 在 I 层间隙水中, 各实验组 DIP 的平均浓度分别为  $0.81$ 、 $0.22$  和  $0.43 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 与 Control 组相比, Phoslock® 组与 ACPM 组分别下降了 72.8% 和 46.9%. 对 II 层来说, 两种覆盖材料的 DIP 浓度均显著下降 ( $P = 0.0004$  和  $P = 0.005$ ), 锁磷剂组与 Control 组相比, DIP 的平均浓度由  $2.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降至  $1.32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 相对降低了 41.3%, ACPM 组 DIP 的浓度变化趋势与 Control 组相似, 由  $0.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  上升至第 9d 的  $1.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 最终稳定在  $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 与 Control 组相比下降了 36%, 对 III 层间隙水而言, 两种覆盖材料对 DIP 的处理效果均不理想, 说明深度的增加造成覆盖材料对底泥内源磷的控制效果极大地削弱.

对于 Phoslock® 组间隙水中 DIP 浓度均保持在较低水平, 是因为 Phoslock® 中膨润土具有极强的

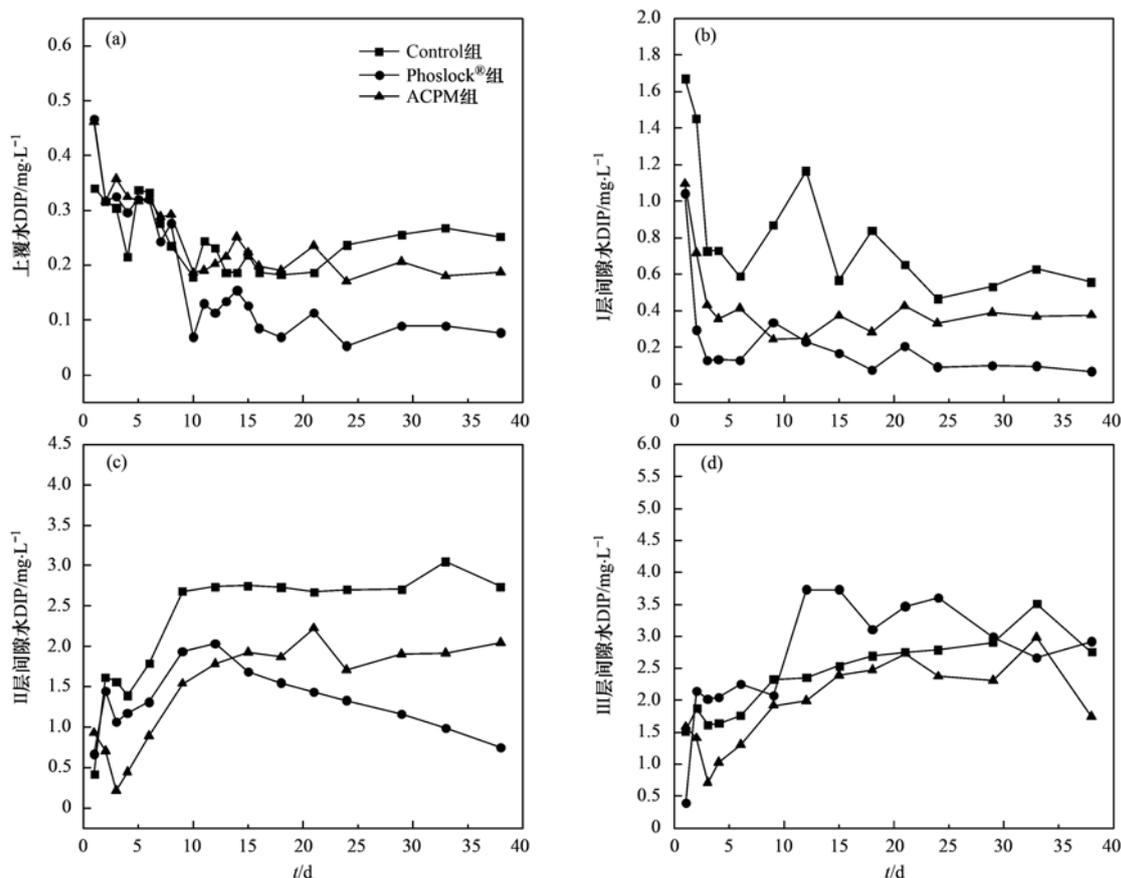


图4 原位覆盖材料对上覆水和间隙水中DIP的影响

Fig. 4 Effect of in-situ covering material on DIP in overlying water and interstitial water

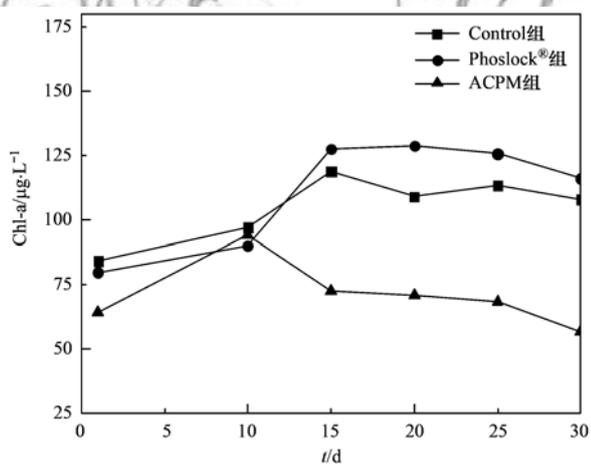


图5 原位覆盖材料对上覆水中Chl-a的影响

Fig. 5 Effect of in-situ covering material on Chl-a in overlying water

膨胀作用,投入水体后,材料得到极大地膨胀,在泥水交接面形成活性覆盖层,之后通过 Phoslock® 中有效成分“镧”将底泥中解析出来的溶解性磷整合成稳定态磷沉淀,从而对底泥中的内源磷进行高效的吸附<sup>[19]</sup>,由图4(c)可以看到 Phoslock® 组II层间隙水的DIP在实验前12d有上升趋势,从 $0.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之后又缓慢降至 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,因为 Phoslock® 是非释氧材料,底泥处于厌氧状态,导致内源磷释放,之后随着 $\text{La}^{3+}$ 的缓

慢渗透DIP浓度逐渐降低,有研究表明, $\text{La}^{3+}$ 能够渗入泥下10cm左右<sup>[20]</sup>,对磷具有很好的钝化效果,且钝化后性质稳定,还原条件下也不易溶解释放 $\text{PO}_4^{3-}$ . ACPM组的间隙水中DIP浓度下降一方面是因为 $\text{CaO}_2$ 具有释氧性,能够改变底泥的氧化还原电位,使得 $\text{Fe}^{2+}$ 向 $\text{Fe}^{3+}$ 转化(图2), $\text{Fe}^{3+}$ 可通过形成 $\text{Fe}(\text{OOH})$ 絮体或者羟基磷酸铁络合物,使得溶解态的磷向结合态磷转化,以沉淀的形式吸附间隙水中磷酸盐;其次ACPM中的 $\text{Ca}^{2+}$ 能与水中磷酸盐生成 $\text{Ca}_5\text{OH}(\text{PO}_4)_3$ 沉淀,抑制磷元素的释放;此外ACPM中的净水污泥含有Al等金属离子,在 $\text{CaO}_2$ 的氧化作用下, $\text{Al}^{3+}$ 可以转化为 $\text{Al}_{\text{ox}}$ ,对磷酸盐也有一定的吸附作用<sup>[21]</sup>.由上述的分析可知,ACPM组间隙水中DIP浓度随着深度的增加而增加,且均高于Phoslock®组,是因为ACPM氧化作用导致有机物分解释放磷,而ACPM是无法溶解的颗粒状态,内部的有效成分无法完全释放出来,表面所产生的金属离子不能完全捕获有机物所释放的磷酸根离子,另外除了Phoslock®本身的强吸附能力外,可能还与藻类的泵吸作用有关.陈俊等<sup>[22]</sup>的研究发现,藻类可以通过“泵吸作用”利用沉积物中的磷而改变上覆水中溶解性磷的形态,进而使得Phoslock®组

间隙水中 DIP 浓度更低, Phoslock® 组底泥中总磷含量(图 6) 的降低也证实了这一观点. 综上所述,  $\text{La}^{3+}$  的吸附能力优于  $\text{Ca}^{2+}$  的结合能力.

### 2.3 底泥形态磷的变化规律

在 Phoslock® 和 ACPM 覆盖材料下底泥形态磷发生了明显变化, 但由于覆盖材料本身的吸附和沉淀作用, 并非所有的外部磷都会进入沉积物中. 两种覆盖材料下底泥形态磷含量变化如图 7 所示, 在 0 ~ 2 cm 处, 与 Control 组相比,  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 $\text{Fe/Al-P}$ 、 $\text{Ca-P}$  变化明显 ( $P < 0.05$ ), Phoslock® 组分别降低了 49.45%、29.86% 和 -32.45%, ACPM 组分别增加了 70.09%、-43.06% 和 33.47%. 在底泥 2 ~ 4 cm 处, Phoslock® 组的  $\text{Fe/Al-P}$  和  $\text{Ca-P}$  分别增加了 -8.24% 和 22.11%, ACPM 组分别增加了 -26.34% 和 26.81%, 而  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  和  $\text{Org-P}$  在深层底泥中的变化均不显著 ( $P > 0.05$ ). 不同原位覆盖材料下沉积物中 TP 含量变化如图 6 所示, 与 Control 组相比, Phoslock® 组下降了 12.49% (0 ~ 2 cm) 和 3.8% (2 ~ 4 cm), 其原因与 Phoslock® 的强吸附能力有关. ACPM 组的 TP 含量从  $1656.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (0 ~ 2 cm) 增加到  $1968.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  (4 ~ 6 cm), 造成这一现象的原因可能与 ACPM 产生的底泥微氧环境有关, 有利于底泥磷向深层迁移.

$\text{NH}_4\text{Cl-P}$  主要是指沉积物中粘土矿物和微小颗粒表面吸附的可溶性磷, 具有不稳定性<sup>[23]</sup>, 与 Control 组相比, Phoslock® 组在表层底泥中  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  明显降低, 而在深层底泥中变化并不明显, 表明 Phoslock® 中的有效成分  $\text{La}^{3+}$  对表层沉积物中溶解性磷具有较强的吸附能力. 而 ACPM 组与 Control 相比在表层底泥中  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  明显增加, 在深层底泥中区别不大, 这种增加一部分来自底泥中溶解性磷的释放, 另一部分是好氧条件下黏土或其他小颗粒与间隙水中 DIP 形成的结合态磷<sup>[24]</sup>.

在本实验中, 与 Control 相比, 实验组的  $\text{Fe/Al-P}$

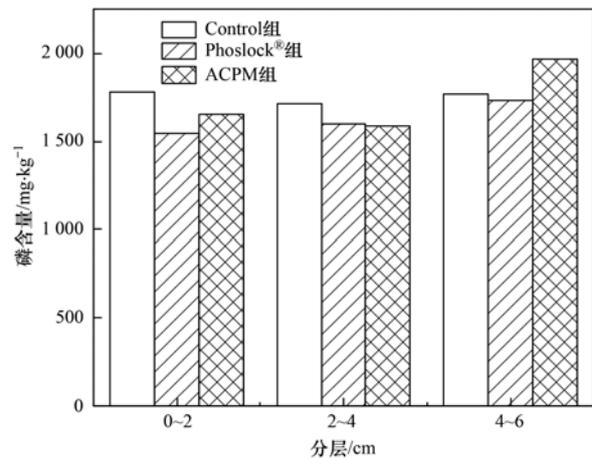


图 6 不同覆盖条件对底泥 TP 的影响

Fig. 6 Effect of in-situ covering materials on TP in sediment

均降低,  $\text{Ca-P}$  含量均升高.  $\text{Fe/Al}$  含量的变化与底泥内源磷的释放密切相关, 其分布模式比较复杂,  $\text{Ca-P}$  主要是指沉积物中各种难溶性的磷酸钙矿物, 不易被生物所利用<sup>[25]</sup>. Phoslock® 组  $\text{Fe/Al-P}$  降低的原因可能是其与  $\text{Fe}^{2+}$  构成的协同除磷机制有关, 在除磷的同时降低  $\text{Fe-P}$  的含量, Meis 等<sup>[26]</sup> 的研究认为 Phoslock® 可以吸附表层沉积物的  $\text{Fe/Al-P}$ , 将其转化为稳定态的磷. Wang 等<sup>[27]</sup> 的研究也发现, Phoslock® 的添加有利于底泥中  $\text{Fe-P}$  和  $\text{Org-P}$  含量的下降. ACPM 覆盖下底泥微环境处于好氧状态, 图 2 中  $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度变化情况可以证实. 好氧条件有利于间隙水中  $\text{Fe}^{2+}$  向  $\text{Fe}^{3+}$  的转化, 与底泥内源磷形成沉淀沉降下来, 然而氧环境使得  $\text{Ca}^{2+}$  的竞争性吸附能力更强, 导致  $\text{Fe/Al-P}$  向  $\text{Ca-P}$  转化, 另外部分溶解态的  $\text{Fe/Al-P}$  释放到上覆中, 导致水中 DIP 较高(图 4). 由于两种原位覆盖材料的有效成分  $\text{La}^{3+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  均有利于底泥内源磷从易释放态磷向难溶性磷转化, 使得  $\text{Ca-P}$  占比均较大.

### 2.4 底泥生物有效磷的变化规律

藻类可利用磷(AAP)可以表征沉积物或悬浮

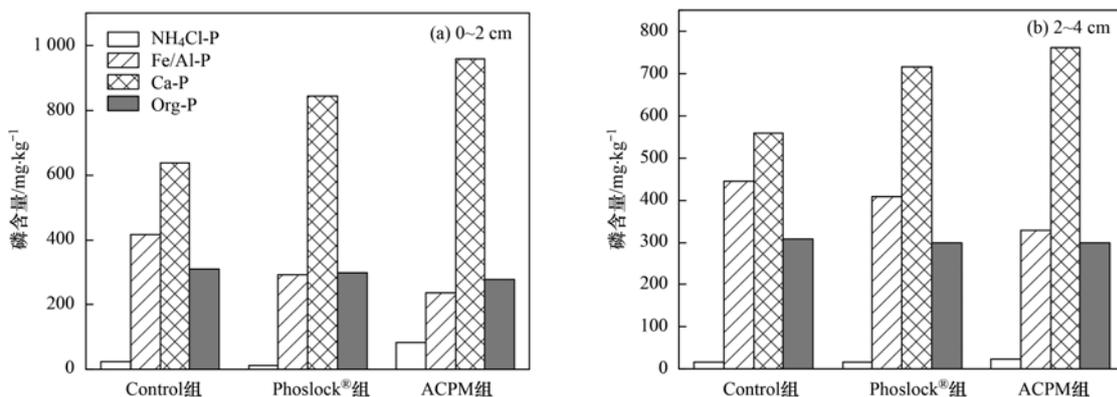


图 7 不同覆盖条件对底泥形态磷的影响

Fig. 7 Effect of in-situ covering materials on phosphorus forms in sediment

物中可被藻类利用磷的含量<sup>[28]</sup>. 在 Phoslock® 和 ACPM 覆盖材料处理下 AAP 的含量如图 8 所示, 与 Control 组相比, 两种覆盖材料 AAP 含量(0~4 cm) 分别减少了 267.4 mg·kg<sup>-1</sup> 和 496.5 mg·kg<sup>-1</sup>, 由此可见, 覆盖 ACPM 组的下降幅度大于 Phoslock® 组. 这可能与钙改性材料产生的微氧环境有关, 有利于底泥中铁锰等金属离子的氧化, 而铁氧化物对磷具有较强的吸附能力, 可以促进底泥中磷的沉积, 使得易释放态的 AAP 向难释放态磷转化<sup>[29]</sup>; 另外 ACPM 中 CaO<sub>2</sub> 具有氧化性, 对藻类具有抑制作用, 从而导致

AAP 含量的下降. 而 Phoslock® 作为一种非释氧材料, 其造成的厌氧环境会使得 AAP 释放, 含量增加, 仅靠 La<sup>3+</sup> 的吸附作用来控制磷含量, 作用效果略低于 ACPM. 另外有研究发现, AAP 属于非闭蓄态磷, 是 Fe/Al-P 中的一种, 由图 8 可知, 各实验组 AAP 含量变化趋势与 Fe/Al-P 相似, 各自占 Fe/Al-P(0~2cm) 的比例为 82.25%、61.3% 和 30.37%, 说明 ACPM 产生的微环境更有利于非闭蓄态磷 AAP 向闭蓄态的磷 Fe/Al-P 和 Ca-P 的转化, 但其含量的显著下降也不能排除其向间隙水释放的可能.

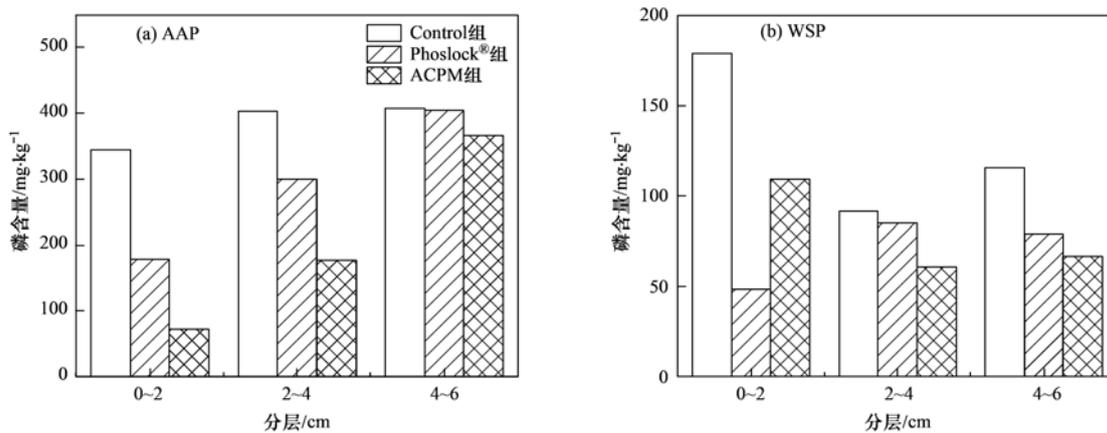


图 8 不同覆盖条件对底泥生物有效磷的影响

Fig. 8 Effect of different mulching conditions on bioavailable phosphorus in sediment

水溶性磷(WSP)有时被认为是生物有效磷的最佳估计值, 可以用来评价沉积物中可直接利用磷的重要指标, 其含量与沉积物中能与磷结合的黏土颗粒密切相关<sup>[30]</sup>. 与 Control 组相比, 各层实验组的 WSP 含量均低于 Control 组, 表明沉积物表面覆盖钙改性材料或镧材料均能有效降低沉积物中溶解性磷含量.

### 3 结论

(1) ACPM 促进了底泥好氧性微环境的形成, 微生物活性明显增加, 间隙水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 Fe<sup>2+</sup> 浓度分别降低了 81.6% 和 36.3%; Phoslock® 底泥各层 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 Fe<sup>2+</sup> 的浓度变化均不显著, 且微生物活性较弱.

(2) Phoslock® 和 ACPM 均能降低上覆水和间隙水中 DIP 浓度, Phoslock® 组上覆水和间隙水中 DIP 浓度分别降低了 25% 和 50%, ACPM 组上覆水 DIP 含量高于 Phoslock®, 间隙水中 DIP 降低了 39.21%.

(3) 2 种覆盖材料均有利于底泥内源磷的固定, Ca-P 均增加, ACPM 导致 NH<sub>4</sub>Cl-P 增加, Fe/Al-P 的大量减少, 这归因于 ACPM 的氧化性, 促进了活性磷的释放, 使得底泥中的磷向覆盖层迁移, 有利于清

洁底泥.

### 参考文献:

- [1] Li Y, Zhou Y B, Zhou Z H, *et al.* Effects of sustained-release composite on the oxygen levels and sediment phosphorus fractions of an urban river in Shanghai [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(17): 2176-2182.
- [2] 李菲菲, 褚淑祎, 崔灵周, 等. 沉水植物生长和腐解对富营养化水体氮磷的影响机制研究进展 [J]. *生态科学*, 2018, **37**(4): 225-230.  
Li F F, Chu S Y, Cui L Z, *et al.* Research advances on the influence mechanisms of submerged plants growth and decomposition on nitrogen and phosphorus in eutrophic water [J]. *Ecological Science*, 2018, **37**(4): 225-230.
- [3] Vopel K, Gibbs M, Hickey C W, *et al.* Modification of sediment-water solute exchange by sediment-capping materials: effects on O<sub>2</sub> and pH [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2008, **59**(12): 1101-1110.
- [4] 张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 等. 过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2706-2713.  
Zhang S, Li D P, Ding Y Q, *et al.* Effect of calcium peroxide composite tablets on water remediation and phosphorus control in sediment [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2706-2713.
- [5] Zhou J, Li D P, Chen S T, *et al.* Sedimentary phosphorus immobilization with the addition of amended calcium peroxide material [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, **357**: 288-297.
- [6] Reitzel K, Andersen F Ø, Egemose S, *et al.* Phosphate adsorption by lanthanum modified bentonite clay in fresh and

- brackish water [J]. *Water Research*, 2013, **47** (8): 2787-2796.
- [ 7 ] Zhou J, Li D P, Zhao Z H, *et al.* Phosphorus immobilization by the surface sediments under the capping with new calcium peroxide material [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **247**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119135.
- [ 8 ] Ding S M, Chen M S, Gong M D, *et al.* Internal phosphorus loading from sediments causes seasonal nitrogen limitation for harmful algal blooms [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **625**: 872-884.
- [ 9 ] 李清哲, 边德军, 聂泽兵, 等. 序批式 AOA 同步脱氮除磷工艺研究综述[J]. *净水技术*, 2020, **39**(11): 79-85, 129.  
Li Q Z, Bian D J, Nie Z B, *et al.* Research overview of sequencing batch AOA process on simultaneous nitrogen and phosphorus removal [J]. *Water Purification Technology*, 2020, **39**(11): 79-85, 129.
- [ 10 ] Song X J, Li D P, Zhao Z H, *et al.* The effect of microenvironment in the sediment on phosphorus immobilization under capping with ACPM and Phoslock® [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, **27**(13): 15440-15453.
- [ 11 ] 徐垚, 李大鹏, 韩菲尔. CaO<sub>2</sub> 同步氧化 Fe( II ) 除磷的研究 [J]. *工业水处理*, 2018, **38**(3): 21-24.  
Xu Y, Li D P, Han F E. Research on CaO<sub>2</sub> synchronously oxidation Fe( II ) for phosphate removal [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, **38**(3): 21-24.
- [ 12 ] 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 等. 镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1692-1699.  
Ding Y Q, Li D P, Zhang S, *et al.* Phosphate control effect and water body remediation of magnesium modified reed biochar [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1692-1699.
- [ 13 ] Oshiki M, Satoh H, Okabe S. Ecology and physiology of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2016, **18**(9): 2784-2796.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Ross G, Haghseresh F, Cloete T E. The effect of pH and anoxia on the performance of Phoslock®, a phosphorus binding clay [J]. *Harmful Algae*, 2008, **7**(4): 545-550.
- [ 16 ] Zamparas M, Gavril G, Coutelieres F A, *et al.* A theoretical and experimental study on the P-adsorption capacity of Phoslock™ [J]. *Applied Surface Science*, 2015, **335**: 147-152.
- [ 17 ] Kong M, Liu F F, Tao Y, *et al.* First attempt for in situ capping with lanthanum modified bentonite (LMB) on the immobilization and transformation of organic phosphorus at the sediment-water interface [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **741**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140342.
- [ 18 ] 张强, 刘正文. 附着藻类对太湖沉积物磷释放的影响 [J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(6): 930-934.  
Zhang Q, Liu Z W. Simulation on the effect of periphytic algae on phosphorus release from sediments of Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(6): 930-934.
- [ 19 ] 李静, 朱广伟, 张晓松, 等. 锁磷剂及覆盖技术对长广溪不同污染类型河段底泥磷释放的控制效果? [J]. *环境化学*, 2015, **34**(2): 358-366.  
Li J, Zhu G W, Zhang X S, *et al.* Control effect of phoslock and sand-capping on sediment phosphorus release in different polluted sections of Changguangxi River [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(2): 358-366.
- [ 20 ] Dithmer L, Nielsen U G, Lüring M, *et al.* Responses in sediment phosphorus and lanthanum concentrations and composition across 10 lakes following applications of lanthanum modified bentonite [J]. *Water Research*, 2016, **97**: 101-110.
- [ 21 ] 祝成成, 王涌涛, 李大鹏. 净水污泥制备陶粒及其对废水中磷酸盐的吸附试验研究 [J]. *苏州科技学院学报(工程技术版)*, 2011, **24**(4): 12-17.  
Zhu C C, Wang Y T, Li D P. Adsorption of phosphate from wastewater by ceramists from purified water's sludge [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology)*, 2011, **24**(4): 12-17.
- [ 22 ] 陈俊, 李勇, 李大鹏, 等. 藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1413-1421.  
Chen J, Li Y, Li D P, *et al.* Distribution of phosphorus forms in the overlying water under disturbance with the addition of algae [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1413-1421.
- [ 23 ] 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 等. 铈、铜和铜铈改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5411-5420.  
Liu T, Zhao Y Y, Lin J W, *et al.* Comparison of the control of sedimentary phosphorus release using zirconium-, lanthanum-, and lanthanum/zirconium-modified zeolites as sediment amendments [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5411-5420.
- [ 24 ] Yang M J, Lin J W, Zhan Y H, *et al.* Immobilization of phosphorus from water and sediment using zirconium-modified zeolites [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(5): 3606-3619.
- [ 25 ] 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 等. 利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内部磷的释放 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1296-1307.  
Bai X Y, Lin J W, Zhan Y H, *et al.* Use of iron-modified calcite as an active capping material to control phosphorus release from sediments in surface water bodies [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1296-1307.
- [ 26 ] Meis S, Spears B M, Maberly S C, *et al.* Assessing the mode of action of Phoslock® in the control of phosphorus release from the bed sediments in a shallow lake (Loch Flemington, UK) [J]. *Water Research*, 2013, **47**(13): 4460-4473.
- [ 27 ] Wang C H, He R, Wu Y, *et al.* Bioavailable phosphorus (P) reduction is less than mobile P immobilization in lake sediment for eutrophication control by inactivating agents [J]. *Water Research*, 2017, **109**: 196-206.
- [ 28 ] 王晶, 李大鹏, 李勇, 等. 沉积物高强度扰动下生物有效磷的变化规律 [J]. *环境污染与防治*, 2013, **35**(3): 10-14, 19.  
Wang J, Li D P, Li Y, *et al.* Variation of bioavailable phosphorus under sediment disturbance with high intensity [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2013, **35**(3): 10-14, 19.
- [ 29 ] 李大鹏, 黄勇, 范成新. 沉积物悬浮频率对水体颗粒态磷生物有效性的影响 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(10): 2217-2222.  
Li D P, Huang Y, Fan C X. Effect of sediment resuspension frequency on bio-availability of particulate phosphorus in overlying water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(10): 2217-2222.
- [ 30 ] 宋小君, 李大鹏, 黄勇. 易悬浮和外源输入下原位覆盖对生物有效磷形成的影响 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(1): 205-211.  
Song X J, Li D P, Huang Y. Effects of in situ capping on bioavailable phosphorus formation under sediment resuspension and external phosphorus input [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(1): 205-211.

## CONTENTS

Advances and Challenges in Biosafety Research for Urban Environments .....	SU Jian-qiang, AN Xin-li, HU An-yi, <i>et al.</i> (2565)
Key Problems and Novel Strategy of Controlling Emerging Trace Organic Contaminants During Municipal Wastewater Reclamation .....	WANG Wen-long, WU Qian-yuan, DU Ye, <i>et al.</i> (2573)
Mechanisms Summary and Potential Analysis of EPS as a Flame Retardant .....	HAO Xiao-di, ZHAO Zi-cheng, LI Ji, <i>et al.</i> (2583)
Concentrations, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> Carrier Metals in the Beijing Urban Area and Suburbs .....	ZHOU An-qi, LIU Jian-wei, ZHOU Xu, <i>et al.</i> (2595)
MAIAC AOD and PM <sub>2.5</sub> Mass Concentrations Characteristics and Correlation Analysis in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas .....	JIN Jian-nan, YANG Xing-chuan, YAN Xing, <i>et al.</i> (2604)
Formation and Prevention of Secondary Nitrate in PM <sub>2.5</sub> in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, WU Ting, WEI Yu-ting, <i>et al.</i> (2616)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitro Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> of Nanjing, China .....	FU Yin-yin, WEN Hao-zhe, WANG Xiang-hua, <i>et al.</i> (2626)
Spatio-temporal Patterns and Potential Sources of Absorbing Aerosols in the Fenwei Plain .....	LIU Min-xia, LI Liang, YU Rui-xin, <i>et al.</i> (2634)
Sources Apportionment of Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs) in a Typical Southwestern Region in China During Summer .....	CHEN Mu-lan, WANG Sai-nan, CHEN Tian-shu, <i>et al.</i> (2648)
Aqueous-phase Oxidation of Dissolved Organic Matter (DOM) from Extracts of Ambient Aerosols .....	TAO Ye, CHEN Yan-tong, LI Nan-wang, <i>et al.</i> (2659)
Changes and Potential Sources of Atmospheric Black Carbon Concentration in Shanghai over the Past 40 Years Based on MERRA-2 Reanalysis Data .....	CAO Shan-shan, DUAN Yu-sen, GAO Chan-chan, <i>et al.</i> (2668)
Spatio-Temporal Evolution Characteristics and Source Apportionment of O <sub>3</sub> and NO <sub>2</sub> in Shijiazhuang .....	WANG Shuai, NIE Sai-sai, FENG Ya-ping, <i>et al.</i> (2679)
Applying Photochemical Indicators to Analyze Ozone Sensitivity in Handan .....	NIU Yuan, CHENG Shui-yuan, OU Sheng-ju, <i>et al.</i> (2691)
Spatiotemporal Distribution of Aerosol Optical Depth Based on Landsat Data in the Hinterland of the Guanzhong Basin and Its Relationship with Urbanization .....	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, ZHANG Xiu, <i>et al.</i> (2699)
Multidimensional Verification of Anthropogenic VOCs Emissions Inventory Through Satellite Retrievals and Ground Observations .....	WANG Yue, WEI Wei, REN Yun-ting, <i>et al.</i> (2713)
Estimation of the SOA Formation Potential of the National Trunk Highway in Central Plains Urban Agglomeration .....	WANG Na-ping, LI Hai-ping, ZHANG Fan (2721)
Economic Benefit of Air Quality Improvement During Implementation of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in Beijing .....	LU Ya-ling, FAN Zhao-yang, JIANG Hong-qiang, <i>et al.</i> (2730)
Emission Performance Quantitative Evaluation and Application of Industrial Air Pollution Sources .....	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (2740)
Screening and Sequencing High-risk Antibiotics in China's Water Environment Based on Ecological Risks .....	ZHOU Li, LIU Shan, GUO Jia-hua, <i>et al.</i> (2748)
China's Reuse Water Development and Utilization Potential Based on the RDA-REM Model .....	ZHENG Jin-tao, MA Tao, LIU Jiu-fu, <i>et al.</i> (2758)
Characteristic Analysis of SWAT Model Parameter Values Based on Assessment of Model Research Quality .....	RONG Yi, QIN Cheng-xin, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (2769)
Sensitivity Analysis of Boundary Load Reduction in a Large Shallow Lake Water Quality Model .....	WANY Ya-ning, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (2778)
Comparison of Available Nitrogen and Phosphorus Characteristics in the Land-Water Transition Zone of Different Watersheds and Their Environmental Significance .....	ZHU Hai, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2787)
Analysis of Spatial-Temporal Variation Characteristics of Potential Non-point Source Pollution Risks in the Upper Beiyun River Basin Using Different Weighting Methods .....	LI Hua-lin, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yao-fang, <i>et al.</i> (2796)
Characteristics of Runoff-related Total Nitrogen and Phosphorus Losses Under Long-term Fertilization and Cultivation on Purple Soil Sloping Croplands .....	WU Xiao-yu, LI Tian-yang, HE Bing-hui (2810)
Hydrochemistry and Its Controlling Factors and Water Quality Assessment of Shallow Groundwater in the Weihe and Jinghe River Catchments .....	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (2817)
Characteristics and Drivers of Dissolved Carbon Dioxide and Methane Concentrations in the Nantiaoxi River System in the Upper Reaches of the Taihu Lake Basin During Summer-Autumn .....	LIANG Jia-hui, TIAN Lin-lin, ZHOU Zhong-yu, <i>et al.</i> (2826)
Nitrogen Distribution and Inorganic Nitrogen Diffusion Flux in a Shallow Lake During the Low Temperature Period: A Case Study of the Baiyangdian Lake .....	WEN Yan, SHAN Bao-qing, ZHANG Wen-qiang (2839)
Effects of Sediment Microenvironment on Sedimentary Phosphorus Release Under Capping .....	CHEN Shu-tong, LI Da-peng, XU Chu-tian, <i>et al.</i> (2848)
Coadsorption of Heavy Metal and Antibiotic onto Humic Acid from Polder River Sediment .....	XUE Xiang-dong, YANG Chen-hao, YU Jian-lin, <i>et al.</i> (2856)
Effects of Two PPCPs on Nitrification in Sediments in the Yarlung Zangbo River .....	LING Xin, XU Hui-ping, LU Guang-hua (2868)
Wastewater Treatment Effects of Ferric-carbon Micro-electrolysis and Zeolite in Constructed Wetlands .....	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, ZHANG Yao-yu, <i>et al.</i> (2875)
CDS-BOC Nanophotocatalyst Activating Persulfate Under Visible Light for the Efficient Degradation of Typical PPCPs .....	LEI Qian, XU Lu, AI Wei, <i>et al.</i> (2885)
Preparation of pg-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /BiOBr/Ag Composite and Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole .....	YANG Li-wei, LIU Li-jun, XIA Xun-feng, <i>et al.</i> (2896)
Sodium Alginate Loading of Zero-Valent Iron Sulfide for the Reduction of Cr(VI) in Water .....	WANG Xu, YANG Xin-nan, HUANG Bi-jian, <i>et al.</i> (2908)
Adsorption Mechanism of Cadmium by Superparamagnetic Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> Functionalized Materials .....	ZHANG Li-zhi, YI Ping, FANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2917)
Pollution Characteristics and Removal of Typical Pharmaceuticals in Hospital Wastewater and Municipal Wastewater Treatment Plants .....	YE Pu, YOU Wen-dan, YANG Bin, <i>et al.</i> (2928)
Abundance Change of Antibiotic Resistance Genes During PDWW Recycling and Correlations with Environmental Factors .....	XU Yao-yao, WANG Rui, JIN Xin, <i>et al.</i> (2937)
Simultaneous Domestication of Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (2946)
Long-term Storage and Rapid Activity Recovery of ANAMMOX Granular Sludge .....	LI Dong, LIU Ming-yang, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (2957)
Migration and Environmental Effects of Heavy Metals in the Pyrolysis of Municipal Sludge .....	JIANG Yuan-yuan, WANG Yan, DUAN Wen-yang, <i>et al.</i> (2966)
Profiling of Antibiotic Resistance Genes in Different Croplands .....	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (2975)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Cattle Farms in Ningxia .....	ZHANG Jun-hua, CHEN Rui-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (2981)
Effects of Temperature and Stirring on the Changes of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Anaerobic Digestion of Dairy Manure .....	XU Ji-fei, ZHANG Qiu-ping, ZHU Tian-jiao, <i>et al.</i> (2992)
Effects of Wheat Straw-derived Biochar Application on Soil Carbon Content Under Different Tillage Practices .....	LIU Zhen-jie, LI Peng-fei, HUANG Shi-wei, <i>et al.</i> (3000)
Spatial Patterns of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Their Influencing Factors in a Typical Agro-pastoral Ecotone .....	ZHANG Yan-jiang, WANG Jun-peng, WANG Yu, <i>et al.</i> (3010)
Spatial Distribution Characteristics, Pollution, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals Around Mercury Mining Areas .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (3018)
Interaction and Mechanism Between Conditioning Agents and Two Elements in the Soil Enriched with Phosphorus and Cadmium .....	HUANG Yang, HU Xue-yu, CAO Kun-kun, <i>et al.</i> (3028)
Mechanism of S-allyl-L-cysteine Alleviating Cadmium Stress in Seedling Roots and Buds of Rice Seedlings .....	CHENG Liu-long, HUANG Yong-chun, WANG Chang-rong, <i>et al.</i> (3037)
Consecutive 4-year Elevated Atmospheric CO <sub>2</sub> on Shaped Microbial Communities in the Rhizosphere Soil of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. Seedlings Grown in Pb-contaminated Soils .....	JIA Xia, Lkhagvajargal Khadkhurel, ZHAO Yong-hua, <i>et al.</i> (3046)
Biodegradation of Polystyrene by <i>Geobacillus stearothermophilus</i> .....	XING Rui-zhi, ZHAO Zi-qiang, ZHAO Wen-qi, <i>et al.</i> (3056)
Micro-morphological Characteristics of Particles on Holly and Ligustrum Leaf Surfaces and Seasonal Changes in Bacterial Communities .....	LI Hui-juan, XU Ai-ling, QIAO Feng-lu, <i>et al.</i> (3063)
Effects of Roxithromycin on Reproduction, Growth, and Anti-oxidation System of <i>Daphnia magna</i> .....	ZHANG Ling-yu, LIU Jian-chao, LENG Yang, <i>et al.</i> (3074)
Relationship Between Relative Crop Yield/Woody Plant Biomass and Ground-level Ozone Pollution in China .....	FENG Zhao-zhong, PENG Jin-long (3084)