

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期

Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM<sub>2.5</sub>污染防治的健康效益评估 ..... 张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震(513)

区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估 ..... 武文琪, 张凯山(523)

2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估 ..... 姚森, 张晗宇, 王晓琦, 杨书申(534)

广州市2020年春节烟花爆竹燃放对空气质量的影响 ..... 裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅(546)

长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性 ..... 夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青(556)

南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析 ..... 张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗(564)

天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 ..... 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂(574)

输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析 ..... 张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖(584)

洛阳市秋冬季PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价 ..... 齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青(595)

郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析 ..... 王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩(604)

基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 ..... 李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦(616)

汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析 ..... 叶露, 邵菁菁, 俞华明(624)

兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估 ..... 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强(634)

2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析 ..... 李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政(643)

珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价 ..... 王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩(653)

乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险 ..... 史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新(663)

乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系 ..... 王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴(673)

张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响 ..... 王维, 李叙勇(681)

三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因 ..... 杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷(688)

巢湖沉积物氮磷分布及污染评价 ..... 王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平(699)

巢湖南淝河口底泥污染特征及疏浚决策 ..... 杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌(712)

氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响 ..... 徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇(723)

降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响 ..... 陈敏, 许浩霆, 王雪竹, 肖尚斌(732)

典型喀斯特河流气-水界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素 ..... 刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜(740)

江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状 ..... 王龙飞, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶(749)

尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征 ..... 黄福义, 朱永官, 苏建强(761)

涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析 ..... 郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生(766)

天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析 ..... 何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良(776)

秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响 ..... 张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏(786)

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性 ..... 张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟(796)

浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响 ..... 黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强(808)

松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应 ..... 于宗良, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟(819)

汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测 ..... 韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅(831)

两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物 ..... 李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建(842)

人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除 ..... 周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕(850)

紫外氯胺组合消毒供水系统中病毒微生物的分布特征 ..... 韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧(860)

高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素的去除 ..... 孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江(867)

胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性 ..... 汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靓, 祝建中(874)

电凝聚臭氧氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析 ..... 谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康(883)

微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制 ..... 陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒(891)

河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价 ..... 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌(900)

南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价 ..... 陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗(909)

复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果 ..... 丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江(917)

石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田 ..... 李光辉, 成晴, 陈宏(925)

叶面喷施纳米MnO<sub>2</sub>对水稻富集镉的影响机制 ..... 周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣(932)

典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价 ..... 王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞(941)

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较 ..... 邵晓庆, 贺章味, 徐卫红(952)

4种草本植物对镉的富集特征 ..... 陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄(960)

不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征 ..... 熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王莹燕, 王子芳, 高明(967)

降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响 ..... 高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎(977)

水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征 ..... 林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水(988)

铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 ..... 葛艺, 徐国民, 徐绍辉, 徐艳(996)

臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物化合物的影响 ..... 李品, 周慧敏, 冯兆忠(1004)

颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述 ..... 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸷(1013)

《环境科学》征订启事(522) 《环境科学》征稿简则(722) 信息(748, 899, 924)

# 氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响

徐楚天, 李大鹏\*, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇

(苏州科技大学环境与工程学院, 苏州 215009)

**摘要:** 将氢氧化钙[Ca(OH)<sub>2</sub>]和过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)以梅花散点的方式注射到底泥中,考察两者联用对内源磷的控制效果. 结果表明,单独投加Ca(OH)<sub>2</sub>可以有效固定沉积物-水界面(SWI)以下约20 mm沉积物中约90%的内源磷,但同时会加剧20 mm以下沉积物的厌氧环境,导致沉积物中稳定态磷向易释放态磷转化,造成潜在活性磷的累积;而H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的加入极大地降低了Ca(OH)<sub>2</sub>投加后深层沉积物潜在活性磷富集的风险,并明显提高了Ca(OH)<sub>2</sub>在沉积物中的纵向扩散深度,其影响范围可以达到SWI以下0~40 mm;但40 mm以下沉积物影响并不明显;这主要归因于氧化剂的投加导致氧化还原电位提高了近18倍. 底泥内源磷形态变化也证实了氧化剂投加对磷的良好固定效果. 与对照实验相比,SWI以下0~20 mm沉积物中易释放态磷含量明显降低,同时沉积物中Ca-P含量增加了约10%. 但随着底泥深度增加,易释放态磷减少量逐渐降低,Ca-P的增加也逐渐变缓.

**关键词:** 原位固定技术; 内源磷; 氧化; 固定; 强化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0723-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.202007114

## Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide

XU Chu-tian, LI Da-peng\*, YUE Wei, WU Yu-han, SUN Pei-rong, TANG Yao-yu, HUANG Yong

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

**Abstract:** In this research, calcium hydroxide [Ca(OH)<sub>2</sub>] and hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) were injected into the bottom mud in the form of plum blossom scatterers to investigate the effect on the control of endogenous phosphorus. The results showed that Ca(OH)<sub>2</sub> used singly effectively immobilized in the order of 90% of endogenous phosphorus approximately 20 mm below the sediment-water interface (SWI); however, at the same time, the anaerobic environment was enhanced, resulting in the transformation of stable phosphorus to easily released phosphorus and the accumulation of potential active phosphorus. Nevertheless, the addition of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> greatly reduced the amount of potential active phosphorus in deep sediments after adding Ca(OH)<sub>2</sub>. The vertical diffusion depth of Ca(OH)<sub>2</sub> in the sediments was significantly increased, having an influence across the depth range of 0-40mm below the SWI; the improvement at depths greater than 40 mm was not notable, which was mainly attributed to an 18-fold increase of redox potential due to the addition of the oxidant. The change of phosphorus forms in the sediment also demonstrated the excellent immobilization effect of the oxidant on phosphorus. In the 0-20 mm layer, the content of readily released phosphorus decreased significantly, while compared with a control test, Ca-P increased by approximately 10%. However, at greater depths, the amount of easily released phosphorus decreased and the rate of Ca-P increase gradually slowed.

**Key words:** In-situ immobilization technique; internal phosphorus; oxidation; immobilization; strengthening

湖泊富营养化已经成为全球性的环境问题<sup>[1,2]</sup>. 磷(P)作为引起水体富营养化的限制性因素,控制磷污染物进入水体便成为了水体富营养化控制的关键<sup>[3,4]</sup>. 水体磷污染物的来源可分为外源输入和内源输入<sup>[5]</sup>. 近年来,随着政府对环境保护的重视以及民众环保意识的不断加强,外源磷污染已经被有效地遏制,但水体的富营养化状况并未得到有效地解决<sup>[6]</sup>,这主要是因为沉积物与上覆水之间的磷循环(内源磷负荷)仍会不断释放内源磷长达数十年<sup>[7,8]</sup>. 因此,近年的研究提出许多方法来减少内源磷负荷,包括底泥疏浚<sup>[9]</sup>、底泥曝气<sup>[10]</sup>和原位固定<sup>[11]</sup>等.

原位固定技术是控制富营养化湖泊内源磷释放的有效方法<sup>[12]</sup>,其原理是向沉积物中添加磷固定剂,通过化学吸附、絮凝、沉淀或化学物质与沉积物中各种形态磷发生化学反应而稳定固化,将沉积物

中的潜在活性磷(PMP)转化为更稳定的磷<sup>[13,14]</sup>. 然而,有研究发现,原位固定技术虽然对内源磷具有良好的控制效果,但效果仅限于沉积物表层,难以影响深层沉积物<sup>[15]</sup>;另外,磷固定剂会阻止溶解氧渗透到沉积物中,加剧沉积物厌氧环境,从而导致深层沉积物中磷的积累. 因此,利用原位固磷技术对深层内源磷进行有效控制是当前原位修复研究的重点和热点<sup>[16]</sup>.

本研究通过原位模拟实验,以氢氧化钙[Ca(OH)<sub>2</sub>]为磷固定剂,过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)为氧化剂,以梅花散点注射的方式,考察氧化剂对磷固定剂

收稿日期: 2020-07-11; 修订日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778393); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJGX20\_1115)

作者简介: 徐楚天(1996~),男,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: xctdj@163.com

\* 通信作者,E-mail: ustslp@163.com

原位固磷效果的影响. 本研究采用薄膜扩散梯度 (DGT) 和微电极高分辨率采样技术, 分析了不同处理下沉积物中溶解性磷酸盐的细微变化; 通过比较不同处理下沉积物中氮、磷的影响变化, 考察氧化剂存在下固磷材料的纵向影响变化; 探讨不同处理方法对沉积物形态磷变化影响, 以期对原位固磷技术的发展和改良提供数据支持和理论参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

本实验所用的氢氧化钙 [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ]、双氧水 (30%)、浓硫酸、浓盐酸、钼酸铵和抗坏血酸等药剂均为分析纯, 购自中国国药化学试剂有限公司. Rhizon 孔隙水采样器和薄膜扩散 DGT 均由 Easysensor Ltd. (中国南京) 提供. DGT 在使用前用氮气去氧 16 h.

### 1.2 研究地点及采样

原位模拟沉积物利用抓斗式沉积物采样器 (张口面积约  $625 \text{ cm}^2$ ) 在苏州市某典型富营养化河道采样点 ( $\text{N}31^\circ 31' 30.10''$ ,  $\text{E}120^\circ 56' 29.7''$ ) 采集表层约 8 cm 沉积物, 同时采集上覆水 50 L. 采样结束迅速运回实验室, 运输过程中冷藏, 避光, 尽量不扰动. 将收集到的沉积物进行混合均匀化, 然后通过 0.6 mm 孔径的网筛去除大颗粒和大型动物群,  $4^\circ\text{C}$  阴暗保存. 取一定量的沉淀物, 经冻干、压碎, 再通过 100 目筛网,  $4^\circ\text{C}$  阴暗保存, 直到进一步分析.

### 1.3 实验方法

沉积物样品置于有机玻璃管中 (直径 84 cm, 高度 20 cm), 形成一个 15 cm 厚度的沉积物层. 水样经 0.45  $\mu\text{m}$  硝酸纤维素滤膜 (Millipore) 过滤后, 虹吸入原位装置内, 避免因沉积物悬浮而造成的误差. 水层厚度约为 10 cm. 每个原位装置均插入 6 根 Rhizon 孔隙水采样器收集孔隙水. 采样器安装在沉积物-水界面以下深度为 0 (沉积物-水界面)、10、20、30、40、50 和 60 mm 的预成型孔中.

将沉积物岩心分为 3 组, 每组按不添加任何药剂的对照 (Control 组)、单一注射氢氧化钙 [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组] 和氢氧化钙与双氧水混合注射 [OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组].  $\text{Ca}^{2+}$  的注射剂量为  $50 \text{ Ca}^{2+} / \text{P}_{\text{mobile}}$  ( $\text{Ca}^{2+}$  用量与表层 60 mm 沉积物中流动 P 的摩尔比);  $\text{H}_2\text{O}_2$  的施用剂量为  $50 \text{ H}_2\text{O}_2 / \text{P}_{\text{mobile}}$  ( $\text{H}_2\text{O}_2$  用量与表层 60 mm 沉积物中流动 P 的摩尔比). 药剂均与过滤后的上覆水混合后, 缓慢注入沉积物深度 20 mm 处. 每隔数小时采集沉积物孔隙水 (添加处理剂后一次, 0 h), 每个时间点用 Rhizon 孔隙水采样器收集孔隙水约 1 mL, 采集后立即测定 SRP. 每

次取水样结束后, 立即以虹吸方式补入等量原上覆水. Zr-oxide DGT 被用于二维测量沉积物-水剖面中的不稳定磷. 所有 DGT 在原位模拟结束后垂直插入到沉积物中, 24 h 后取出. DGT 表面用去离子水冲洗, 然后放入干净的自密封袋中等待分析. 本实验结束后将沉积物表层切分为 3 层 (I 层 0 ~ 20 mm、II 层 20 ~ 40 mm 和 III 层 40 ~ 60 mm), 分析各层的形态磷含量. 沉积物剖面 ORP 采用微电极系统 (Unisense, 丹麦), 用尖端细至 100  $\mu\text{m}$  的克拉克电极测定.

### 1.4 分析方法

上覆水和间隙水中的 SRP 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  分别采用钼锑抗分光光度法和纳氏试剂分光光度法测定. 沉积物形态磷分为易交换态磷 (或弱吸附态磷) ( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ )、铁结合态磷 (BD-P)、铝结合态磷 (Al-P)、有机磷 (Org-P)、钙结合态磷 (Ca-P) 以及残渣磷 (Res-P), 沉积物无机磷形态分析方法采用 Rydin 改进的 Psenner 法, 各形态磷经不同提取剂连续分步提取获得<sup>[17,18]</sup>. ①  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  (用  $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$  提取); ② BD-P (用  $0.11 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_4 / \text{NaHCO}_3$  提取); ③ Al-P (用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$  提取); ④ Org-P (用  $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$  提取并消解后除 Al-P 之外的部分); ⑤ Ca-P (用  $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ HCl}$  提取); ⑥ Res-P (沉积物经高温灼烧并用提取得到的 TP 值减去上述 ① ~ ⑤ 步提取磷的总和). 各形态磷浓度采用钼酸铵分光光度法测定. 从 Zr-oxide DGT 中取出的 Zr-oxide 固定膜在混合钼酸盐试剂中  $35^\circ\text{C}$  着色 45 min, 然后利用平板扫描仪获得膜表面着色后的图像, 经过计算机成像密度测定 (CID) 技术转换为灰度测定 DGT 不稳定 P (DGT-labile P) 的浓度<sup>[19]</sup>.

### 1.5 数据分析

实验数据处理及作图采用 Origin Pro 2018 软件; 数据统计分析采用 SPSS 20.0.0 软件; 使用方差分析和 LSD 最小显著性差异法检验实验组之间以及与实验组与对照组之间各特征指标差异的显著性, 显著性水平  $\alpha = 0.05$ .

依据预先建立的膜表面着色灰度与 P 积累量 ( $M$ ) 之间的定量关系, 得到待处理样品膜上 P 积累量. 根据公式 (1) 计算不稳定 P 的通量<sup>[20]</sup>.

$$F_{\text{DGT}} = M / At \quad (1)$$

式中,  $M$  为 P 的积累量,  $\mu\text{g}$ ;  $A$  为固定膜暴露面积,  $\text{cm}^2$ ;  $t$  为 DGT 装置在沉积物中的时间,  $\text{s}$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 沉积物中磷固定效果

沉积物中注射磷固定剂是为了增大材料与沉积

物的接触面积,利用固定剂的磷吸附性,使表层沉积物成为一种活性屏障,既能吸附水体中的营养物质,又能阻止沉积物中营养物质的释放<sup>[21]</sup>。图 1 展示了不同方式处理后沉积物间隙水中 SRP 浓度变化。

结果表明,实验初期 24 h 内 Control 组的 SRP 浓度范围为 1.31 ~ 3.31 mg·L<sup>-1</sup>,最大值和最小值分别出现在 25 mm 和 0 mm 深度处。而注入 Ca(OH)<sub>2</sub> 后,0 ~ 20 mm 深度的 SRP 短时间内便降至 0.3

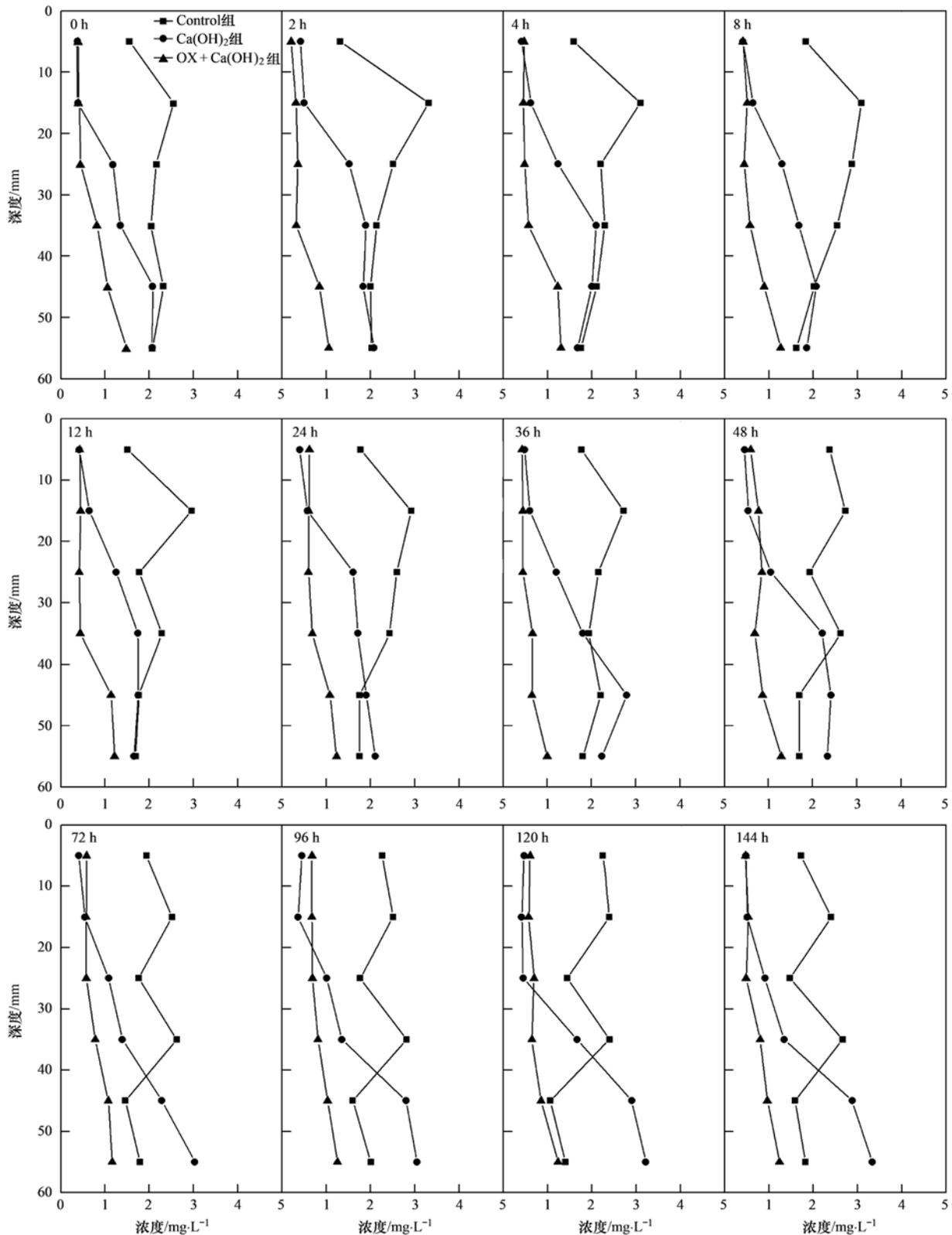


图 1 沉积物-水剖面中 SRP 浓度随时间的变化

Fig. 1 Changes in the concentrations of SRP in porewater over time in sediment-water profiles

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,且整个实验过程中并未有明显增加,与 Control 组相比,添加磷固定剂减少了 0~20 mm 沉积物中 90% 以上的磷酸盐. 20~40 mm 沉积物中的 SRP 浓度在短时间内也有明显下降( $P < 0.05$ ),但下降效果并没有 0~20 mm 深度沉积物明显,与 Control 组相比,磷固定剂减少了 20~40 mm 沉积物中 50%~60% 的磷酸盐. 而在 40 mm 以下深度的 SRP 浓度在注入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后 12h 内并未有明显变化( $P = 0.85$ ),且在 12 h 后,40 mm 以下深度 SRP 浓度发生明显增加,第 144 h 时 45 mm 和 55 mm 深度 SRP 浓度分别为  $2.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $3.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,相比于同时期 Control 组相同深度 SRP 浓度上升 81.6% 和 82.9%. 这一结果表明,单纯投加磷固定剂仅能对 SWI 以下约 40 mm 左右范围进行有效控制,且控制效果会随着深度的增加而大幅度削弱. 而且,磷固定剂的加入会导致 40 mm 深度以下 SRP 浓度明显增加. 推测出现这一现象的原因:首先当表层沉积物中磷被有效固定后,因浓度梯度的影响,深层沉积物中内源磷会形成向表层沉积物迁移的趋势,因而磷酸盐会在固磷材料影响较弱的区域富集. 此外,固体材料会在沉积物中形成隔离层,阻碍氧向深层沉积物中的渗透,从而导致沉积物微环境的厌氧状态加剧<sup>[22]</sup>,进一步诱发内源磷释放.

氧化剂和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  以及 [OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组] 混合投加后,0~60 mm 深度沉积物中 SRP 浓度都得到了有效控制. 与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组相比,OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组对 SWI 以下 0~20 mm 深度的 SRP 控制

效果并不优于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组,甚至有时略逊色于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组,这主要归因于易释放态磷因氧化作用短期内大量释放<sup>[23]</sup>,磷固定剂难以完全控制溶解性磷酸盐随间隙水迁移. 随着  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  固磷效果因沉积物深度的增加而迅速削弱, $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组 20 mm 以下深度 SRP 浓度明显高于 OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组,这表明氧化剂的加入的确可以提高磷固定剂在沉积物中的纵向影响力. 对于 40 mm 深度以下沉积物,相较于对 0~40 mm 间隙水中 SRP 71.89% 的控制效果,其对 40 mm 以下间隙水中 SRP 的控制效果仅为 35.58%,这说明 OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组对 SWI 下 40 mm 以下间隙水控制效果出现了明显削弱.

沉积物 DGT-labile P 通量的变化如图 2 所示,由 DGT-labile P 的水平平均通量得到 P 通量的一维图像,如图 3 所示. 经计算,Control 组 SWI 界面下 0~48 mm 沉积物 DGT-labile P 通量平均值为  $99.66 \text{ pg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,其于 SWI 界面下 0~20 mm 出现陡增,在 20 mm 深度处的通量约为  $121.70 \text{ pg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,20 mm 深度以下通量增长趋于平缓,于 30 mm 深度达到峰值  $136.77 \text{ pg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$  后缓慢降低. 单独注入  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后,DGT-labile P 通量在 SWI 界面下 0~30 mm 显著低于 Control 组,其 0~20 mm 深度 DGT-labile P 通量仅为 Control 组同深度通量的 10%,但  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组 DGT-labile P 通量在 SWI 界面下 20~40 mm 出现激增,DGT-labile P 通量由 SWI 界面下 20 mm 深度的  $23.18 \text{ pg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$  激增至 40 mm 深度的  $222.21 \text{ pg}\cdot(\text{cm}^2\cdot\text{s})^{-1}$ ,增长

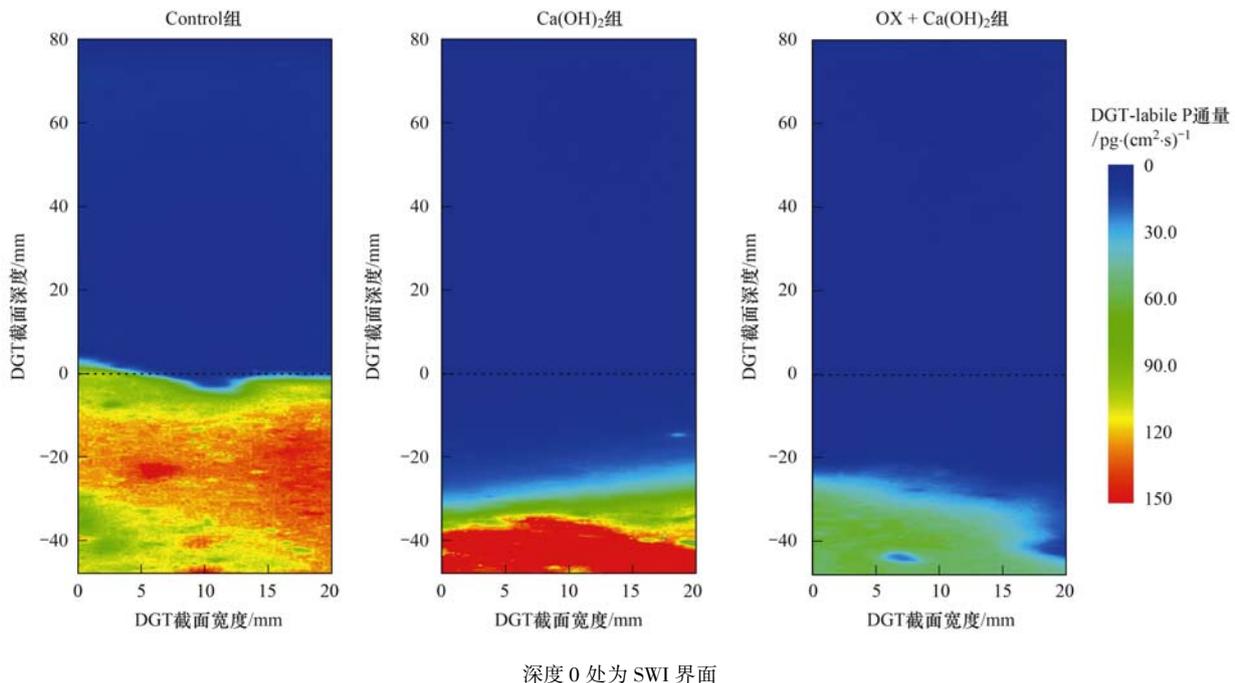


图 2 处理后沉积物中二维 DGT-labile P 通量的变化

Fig. 2 Variations in 2D DGT-labile P flux in the sediment after treatment

858.63%, 于 40 mm 深度左右达到峰值后迅速降低, 经计算  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组 SWI 界面下 0 ~ 48 mm 沉积物 DGT-labile P 通量平均值为  $86.05 \text{ pg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ; OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组处理后 DGT-labile P 通量均显著低于 Control 组, 其 SWI 界面下 0 ~ 48 mm 沉积物 DGT-labile P 通量平均值为  $32.71 \text{ pg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 同比于 Control 组分别降低了 67.18%, 而 OX +  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组 DGT-labile P 通量在 SWI 界面下 20 ~ 44 mm 深度出现迅速增长, 由 20 mm 处  $11.19 \text{ pg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$  增长至 44 mm 处  $60.85 \text{ pg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ , 增长约 443.79%.

由此可见, 氧化剂的确可以强化磷固定剂在沉积物中的纵向影响力. 而出现这种结果的原因可能有: ①首先氧化剂的加入使得沉积物中大量有机质分解, 加速沉积物的矿化, 从而使得固磷材料的影响效果更容易达到深层沉积物<sup>[24]</sup>; ②其次, 氧化剂使得沉积物中不稳定态磷分解释放, 并立刻被与氧化剂一同注射的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  所固定转化为稳定态磷, 从而达到短时间内固定内源磷的效果; ③另外氧化剂大幅度提高了沉积物中的氧化还原电位, 将还原态的 FeS 氧化为铁氧(氢氧)化合物( $\text{FeOOH}$ ), 吸收间隙水中的磷酸盐<sup>[25]</sup>.

## 2.2 氧化还原环境影响

为探究氧化剂是否是利用其氧化性从而促进了

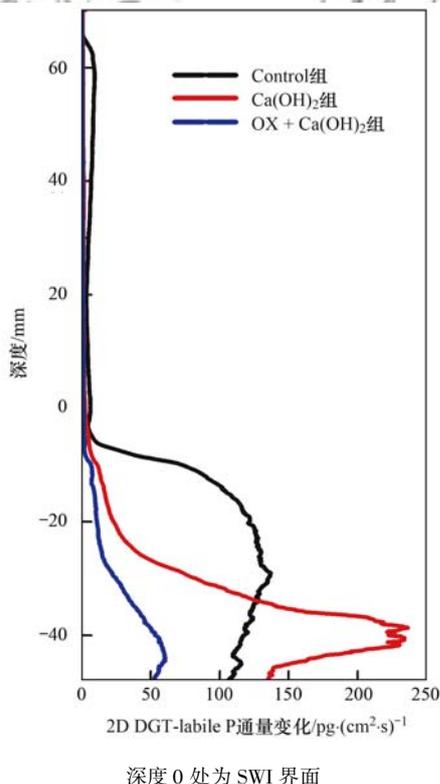


图3 处理后沉积物中二维 DGT-labile P 通量水平平均值的变化

Fig. 3 Variations in the horizontal average 2D DGT-labile P flux in the sediment after treatment

磷固定材料的纵向作用深度, 本研究运用微电极技术考察氧化剂对沉积物纵向微环境的影响, 研究对象为氧化剂影响最为显著的 ORP. 投加氧化剂前后沉积物中 ORP 变化如图 4 所示.

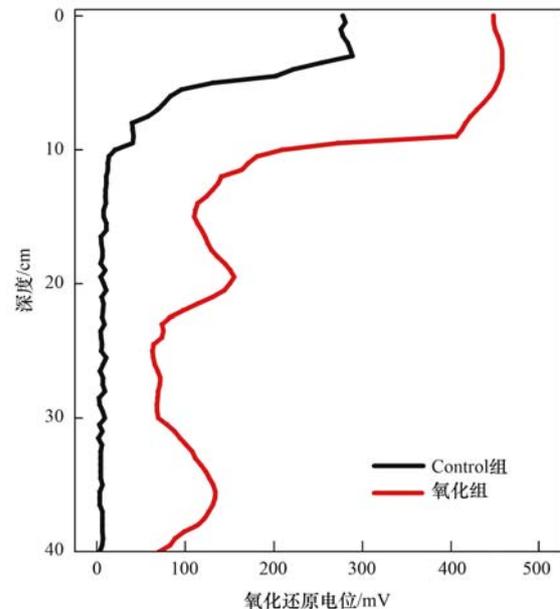


图4 投加氧化剂前后间隙水中 ORP 的垂直分布  
Fig. 4 Vertical profiles of ORP in porewater before and after the addition of the oxidant

如图 4 所示, 在未做任何处理的情况下, ORP 在 SWI 以上保持在 281.78 mV 左右; 而在 SWI 以下 0 ~ 10 mm, ORP 随着沉积物深度的增加而迅速降低至 9.46 mV; 10 mm 深度以下 ORP 继续降低, 到 SWI 以下 40 mm 处, ORP 降至 2.90 mV. 向沉积物中投加氧化剂后, 沉积物中各层 ORP 都明显提高, SWI 以下 0 ~ 10 mm 维持在 442.02 mV 左右; SWI 以下 10 mm 后 ORP 出现陡降, 但仍明显高于空白组同层沉积物, 经计算投加氧化剂后 SWI 以下沉积物氧化还原电位提高了近 18.37 倍, 此外投加氧化剂后, SWI 以下 20 mm 和 35 mm 出现峰值, 造成这种现象的具体机制尚不明确, 但这表明氧化剂可以有效影响 SWI 以下超过 40 mm 深度沉积物中的氧化还原环境. 因此, 对于原位覆盖而言, 氧化剂的加入可以显著改善纵向影响不足的缺陷.

## 2.3 沉积物中氨氮变化

众所周知,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  作为沉积物中的还原物质, 其在不同深度间隙水中的浓度代表了该深度沉积物的氧化还原条件. 根据图 5 所示, Control 组在约为 20 mm 深度达到峰值, 这与先前的报道结果相似<sup>[26]</sup>. 单独投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  以后, 除 60 mm 深度, 各层  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  都有明显增加, 平均值浓度相比于 Control 组增加了约 56.71%, 且随着时间推移, 深层沉积物

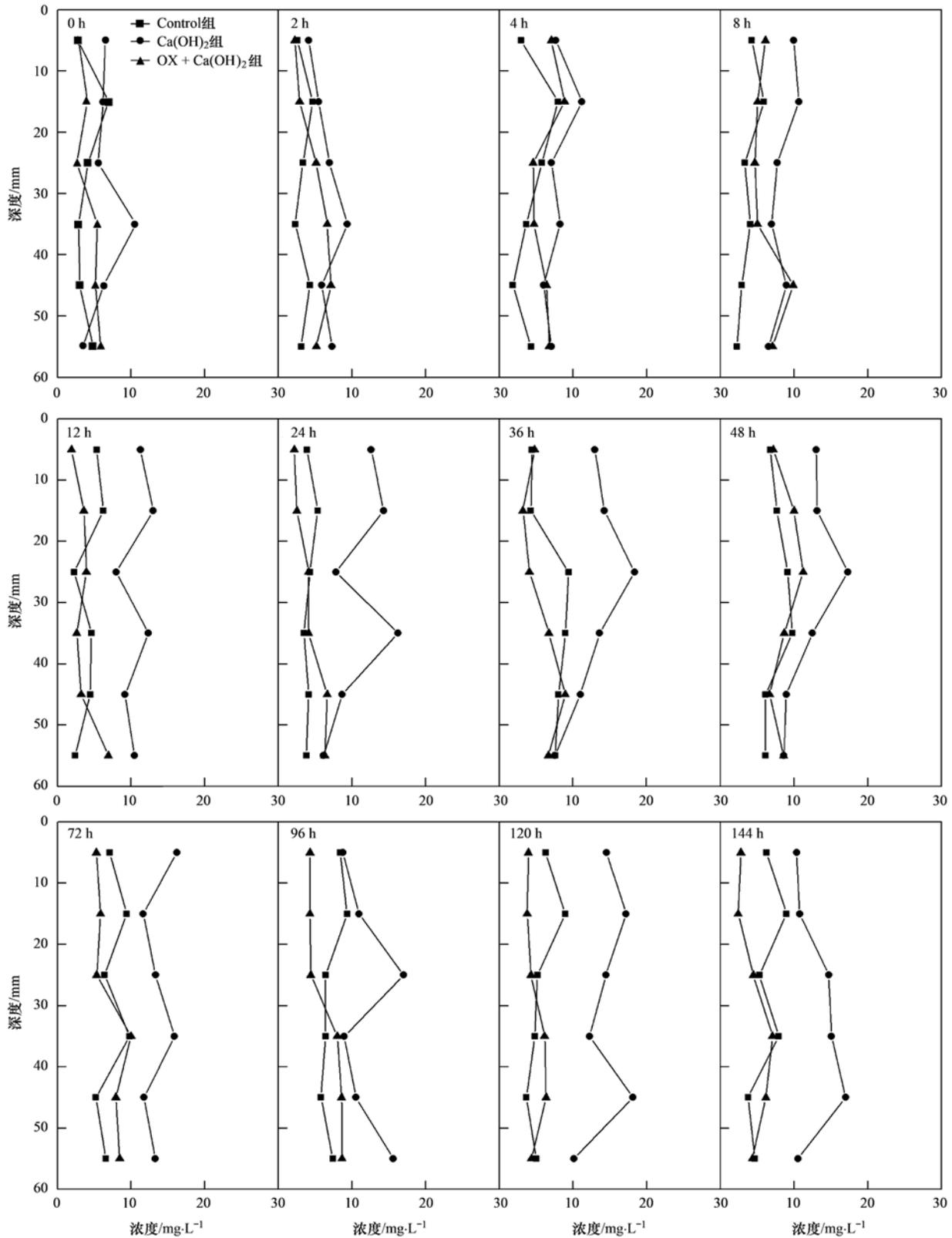


图 5 沉积物-水剖面中 $\text{NH}_4^+$ -N浓度随时间的变化

Fig. 5 Changes in the concentrations of  $\text{NH}_4^+$ -N in porewater over time in the sediment-water profiles

中 $\text{NH}_4^+$ -N浓度增加越发显著, 144 h时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 组 $\text{NH}_4^+$ -N平均值浓度比于Control组增加了约112.77%,这说明单独投加 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 会导致沉积物中 $\text{NH}_4^+$ -N增加,这一现象可能与以下原因有关:首

先是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 在沉积物中的隔离层阻碍了氧向深层沉积物中的渗透<sup>[27]</sup>;其次是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 造成沉积物环境碱性增大,加速氨氮中的分子氨的转化,从而加剧厌氧环境<sup>[28]</sup>。 $\text{OX} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ 组因为加入氧化

剂的缘故,其氨氮浓度明显小于  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组; 值得一提的是,在投加材料后的 48 h 内,相较于 Control 组,  $\text{OX} + \text{Ca}(\text{OH})_2$  组氨氮浓度出现剧烈波动, 48 h 后, 30 mm 以下  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度便不再被控制. 这种现象的出现可能是因为氧化剂在处理前期凭其强氧化性,可以控制沉积物中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,但随着时间推移,氧化剂的效果弱化,其对氨氮的控制效果减弱,转而  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的释放效果占据主导. 这也间接说明氧化剂可以短时间内影响控制深层沉积物.

#### 2.4 沉积物形态磷的变化

按照磷的迁移能力,沉积物中磷可以分为弱吸附态磷 ( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ )、铁结合态磷 ( $\text{BD-P}$ )、铝结合态磷 ( $\text{Al-P}$ )、有机磷 ( $\text{Org-P}$ )、钙结合态磷 ( $\text{Ca-P}$ ) 和残渣磷 ( $\text{Res-P}$ ). 根据沉积物中形态磷释放特性的不同,有研究将弱吸附态磷 ( $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ )、铁结合态磷 ( $\text{BD-P}$ ) 和有机磷 ( $\text{Org-P}$ ) 归为潜在活性磷<sup>[29]</sup>,即在合适的环境条件下易于释放的形态磷. 因此对内源磷的控制关键在于对潜在活性磷的控制.

图 6 为不同处理后沉积物各深度形态磷分布情况. 经计算,Control 组各层沉积物中潜在活性磷含量分别为 25.22%、25.53% 和 23.19%. 单独投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后,各层沉积物 TP 并未出现明显变化; 0~20 mm 沉积物中  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{Org-P}$  都出现明显减少,其中  $\text{Org-P}$  的减少最为显著,其减少了约 36.47%,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  处理后  $\text{Org-P}$  在形态磷中比例由处理前的 7.28% 减少到处理后的 4.63%,与之相对应,该层沉积物中  $\text{Ca-P}$  比例增加了 5.90%; 而在 20~40 mm 沉积物中,  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  和  $\text{Org-P}$  出现明显增加,其分别增加了 104.25% 和 46.32%,同时该层中相对稳定的  $\text{Al-P}$  减少了约 39.12%,而  $\text{Ca-P}$  也下降了约 1.83%; 40~60 mm 沉积物与 Control 组基本相似,唯一不同的是  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组相比较于 Control

组,  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  增加了约 78.73% 以及  $\text{Org-P}$  减少了约 52.01%; 经计算,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组各层沉积物中潜在活性磷含量分别为 21.38%、37.68% 和 25.27%,与 Control 组同层潜在活性磷相比分别变化了 -3.84%、12.16% 和 2.08%. 这说明单独投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  仅可以对表层沉积物中潜在活性磷进行有效固定,而对于 20 mm 以下沉积物,投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  会促进沉积物中潜在活性磷的增长,使原本相对稳定的  $\text{Al-P}$  和  $\text{Org-P}$  转化为更易释放的  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 $\text{BD-P}$  和  $\text{Org-P}$ .

投加氧化剂和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  后,  $\text{OX} + \text{Ca}(\text{OH})_2$  组 0~40 mm 沉积物 TP 出现明显减少,其减少了约 6.09% 的 TP,造成这一现象的主要原因是沉积物中潜在活性磷因氧化而短时间内分解释放,并随着间隙水向上覆水中迁移. 因为本研究磷固定剂的投加方式为点注射,难以短时间内将释放的磷吸收固定;  $\text{OX} + \text{Ca}(\text{OH})_2$  组 0~20 mm 沉积物中,  $\text{BD-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{Org-P}$  分别减少了约 24.81%、12.54% 和 86.53%,相对应的  $\text{Ca-P}$  增加了约 10.03%; 20~40 mm 沉积物与 0~20 mm 沉积物相似,  $\text{BD-P}$ 、 $\text{Al-P}$  和  $\text{Org-P}$  明显减少,其分别减少了约 37.89%、9.05% 和 50.90%,不同的是该层除  $\text{Ca-P}$  增加了约 4.50% 外,  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  也增加了约 95.69%; 与 0~40 mm 沉积物不同,  $\text{OX} + \text{Ca}(\text{OH})_2$  组 40~60 mm 沉积物 TP 比 Control 组同层沉积物 TP 增加了约 5.11%,分析该层形态磷分布可知,该层  $\text{BD-P}$ 、 $\text{Org-P}$  和  $\text{Ca-P}$  分别增加了约 42.01%、61.80% 和 3.44%,而  $\text{NH}_4\text{Cl-P}$  和  $\text{Al-P}$  分别减少了约 4.29% 和 13.32%; 经计算,  $\text{OX} + \text{Ca}(\text{OH})_2$  组各层沉积物中潜在活性磷含量分别为 18.00%、23.41% 和 29.49%,与 Control 组同层潜在活性磷相比分别变化了 -7.22%、-2.12% 和 6.29%. 因此可以看出,投加氧化剂虽然会导致一

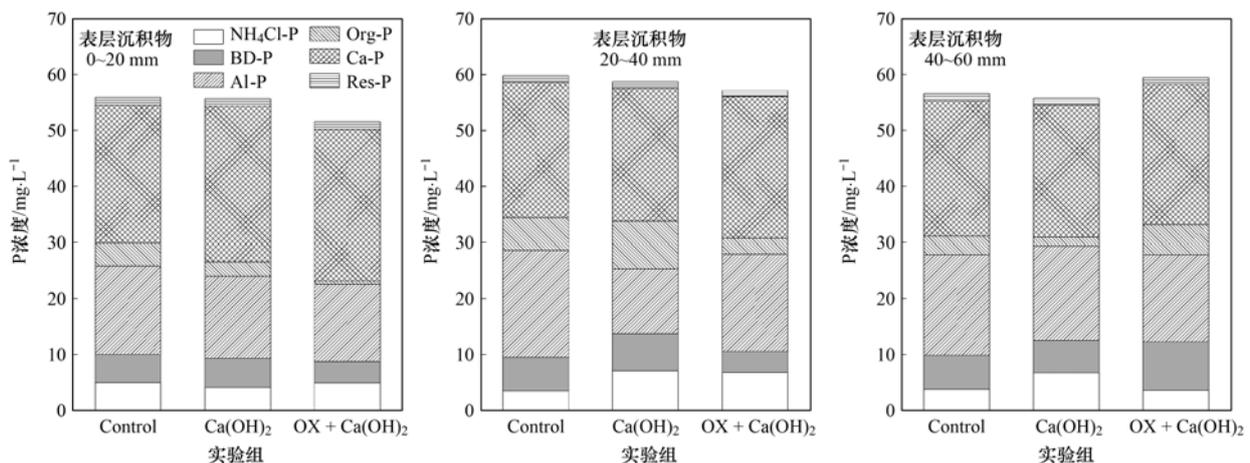


图 6 不同处理后沉积物各深度形态磷分布

Fig. 6 Content of forms of P at different sediment depths and at various times during the different treatments

部分磷随间隙水流入上覆水中,但其的确可以提高  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的固磷深度。

综上所述,单独投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的影响力仅能有效固定 SWI 以下约 20 mm 沉积物中的潜在活性磷,而 20 mm 深度以下的沉积物则难以影响到,甚至会造成长层沉积物中潜在活性磷的积增。投加氧化剂可以有效强化  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对沉积物中潜在活性磷的纵向影响力,具体体现在:①首先氧化剂有效减少沉积物中的潜在活性磷含量,同时使得同层沉积物中 Ca-P 含量明显增加,因此可以推测,氧化剂的加入使沉积物中不稳定态磷氧化分解,从而更易于被磷固定剂直接吸附固定;②其次与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  组相比,氧化剂的加入明显增加了各层中 Ca-P 含量,这说明氧化剂的确促进了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在沉积物纵向的扩散。但这种方法对 40mm 以下沉积物影响效果并不明显,且  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  造成的碱性环境加剧沉积物厌氧环境不利于潜在活性磷的固定。

### 2.5 指示意义

原位固定技术因其廉价且易操作的优势而成为控制富营养化湖泊内源磷负荷的常用方法<sup>[30]</sup>。然而粉末状固磷材料难以影响深层沉积物,且长期覆盖固磷材料会加剧深层沉积物厌氧环境等问题,一直以来都限制着原位固定技术的发展。根据本研究实验结果:氧化剂与磷固定剂混合注入沉积物中,可以显著提高材料对深层沉积物的控制效果,因此氧化剂与磷固定剂混合投加可以对深层沉积物内源磷的控制具有良好的应用前景。但本研究发现投加氧化剂会导致部分内源磷释放到水体中,因此该方法可与原位覆盖技术配合形成内源磷复合控制系统,克服其两者的弊端,从而达到多方位控制水体内源磷负荷的效果。

### 3 结论

(1)单独投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  可以有效固定 SWI 以下约 20 mm 沉积物中约 90% 内源磷,但同时会加剧 20 mm 以下沉积物的厌氧环境,造成潜在活性磷的累积。

(2)加入氧化剂可以短时间内有效削减沉积物内源磷负荷,处理后沉积物中 DGT-labile P 通量减少  $66.95 \text{ pg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,比单独投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  提高了  $12.61 \text{ pg} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ ,并明显提高了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  在沉积物中的纵向扩散深度,其影响范围可以达到 SWI 以下 0~40 mm。

(3)氧化剂与磷固定剂混合投加可以有效控制深层内源磷负荷,但其会导致部分内源磷释放到水体中,因此该方法可与原位覆盖技术配合形成内源

磷复合控制系统,克服其两者的弊端,从而达到多方位控制水体内源磷负荷的效果。

(4)氧化剂与  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  的混合投加极大改善了单一投加  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  时纵向固定效果不足的弊端,强化了  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  对底泥沉积物的纵向影响。

### 参考文献:

- [1] Gubelit Y I, Berezina N A. The causes and consequences of algal blooms: the *Cladophora glomerata* bloom and the Neva Estuary (eastern Baltic Sea) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, **61** (4-6): 183-188.
- [2] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **100** (1-3): 179-196.
- [3] Stow C A, Cha Y. Are chlorophyll *a*-total phosphorus correlations useful for inference and prediction? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(8): 3768-3773.
- [4] Liu T Z, Yuan J J, Dong W Y, et al. Effects on inorganic nitrogen compounds release of contaminated sediment treatment with in situ calcium nitrate injection [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(2): 1250-1260.
- [5] 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.
- [6] Nürnberg G K, Tarvainen M, Ventelä A M, et al. Internal phosphorus load estimation during biomanipulation in a large polymictic and mesotrophic lake [J]. *Inland Waters*, 2012, **2** (3): 147-162.
- [7] Malmaeus J M, Rydin E. A time-dynamic phosphorus model for the profundal sediments of Lake Erken, Sweden [J]. *Aquatic Sciences*, 2006, **68**(1): 16-27.
- [8] Søndergaard M, Jensen J P, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506-509**(1-3): 135-145.
- [9] Yu J H, Ding S M, Zhong J C, et al. Evaluation of simulated dredging to control internal phosphorus release from sediments: focused on phosphorus transfer and resupply across the sediment-water interface [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **592**: 662-673.
- [10] 林建伟, 朱志良, 赵建夫. 曝气复氧对富营养化水体底泥氮磷释放的影响 [J]. *生态环境*, 2005, **14**(6): 812-815.  
Li J W, Zhu Z L, Zhao J F. Effect of aeration on release of nitrogen and phosphorus from sediments in eutrophic waterbody [J]. *Ecology and Environment*, 2005, **14**(6): 812-815.
- [11] Fan Y, Li Y W, Wu D Y, et al. Application of zeolite/hydrous zirconia composite as a novel sediment capping material to immobilize phosphorus [J]. *Water Research*, 2017, **123**: 1-11.
- [12] Wang C H, Jiang H L, Yuan N N, et al. Tuning the adsorptive properties of drinking water treatment residue via oxygen-limited heat treatment for environmental recycle [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **284**: 571-581.
- [13] Wang L H, Li J G, Zhou Q, et al. Rare earth elements activate endocytosis in plant cells [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111** (35): 12936-12941.
- [14] Lürling M, Waajen G, Van Oosterhout F. Humic substances interfere with phosphate removal by lanthanum modified clay in

- controlling eutrophication[J]. *Water Research*, 2014, **54**: 78-88.
- [15] Wang Y, Ding S M, Wang D, *et al.* Static layer: A key to immobilization of phosphorus in sediments amended with lanthanum modified bentonite (Phoslock®) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **325**: 49-58.
- [16] Sun Q, Lin J, Cao J X, *et al.* A new method to overall immobilization of phosphorus in sediments through combined application of capping and oxidizing agents[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **694**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133770.
- [17] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [18] Psenner R, Pucsko R, Sager M. Fractionation of organic and inorganic phosphorus compounds in lake sediments [J]. *An Attempt to Characterize Ecologically Important Fractions*, 1984, **70**(1): 111-155.
- [19] Ding S M, Wang Y, Xu D, *et al.* Gel-based coloration technique for the submillimeter-scale imaging of labile phosphorus in sediments and soils with diffusive gradients in thin films [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(14): 7821-7829.
- [20] Li C, Ding S M, Yang L Y, *et al.* Diffusive gradients in thin films: devices, materials and applications [J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2019, **17**(2): 801-831.
- [21] Xu Y, Han F E, Li D P, *et al.* Transformation of internal sedimentary phosphorus fractions by point injection of CaO<sub>2</sub> [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **343**: 408-415.
- [22] 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.
- [23] Yamada T M, Sueitt A P E, Beraldo D A S, *et al.* Calcium nitrate addition to control the internal load of phosphorus from sediments of a tropical eutrophic reservoir: microcosm experiments [J]. *Water Research*, 2012, **46**(19): 6463-6475.
- [24] Lin J, Zhong Y F, Fan H, *et al.* Chemical treatment of contaminated sediment for phosphorus control and subsequent effects on ammonia-oxidizing and ammonia-denitrifying microorganisms and on submerged macrophyte revegetation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(1): 1007-1018.
- [25] Feibicke M. Impact of nitrate addition on phosphorus availability in sediment and water column and on plankton biomass — Experimental field study in the shallow brackish schlei Fjord (Western Baltic, Germany) [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1997, **99**(1-4): 445-456.
- [26] Inoue T, Sugahara S, Seike Y, *et al.* Short-term variation in benthic phosphorus transfer due to discontinuous aeration/oxygenation operation [J]. *Limnology*, 2017, **18**(2): 195-207.
- [27] 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.
- [28] 刘海伟, 刘云, 王海云, 等. pH 和共存阳离子对草莓茎吸附水体氨氮的影响 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(8): 1884-1889.
- Liu H W, Liu Y, Wang H Y, *et al.* Effects of pH and coexisting cations on ammonia adsorption from aqueous solution by strawberry stem Powder [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(8): 1884-1889.
- [29] 黄清辉, 王磊, 王子健. 中国湖泊水域中磷形态转化及其潜在生态效应研究动态 [J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 199-206.
- Huang Q H, Wang L, Wang Z J. Advance in the study on phosphorus speciation, transformation and its potential ecological effects in Chinese lakes [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(3): 199-206.
- [30] 徐垚, 李大鹏, 韩菲尔, 等. CaO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2836-2842.

## CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM <sub>2.5</sub> Pollution in China During 2013-2017 .....	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> ( 513 )
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement .....	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan ( 523 )
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016 .....	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> ( 534 )
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020 .....	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> ( 546 )
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta .....	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> ( 556 )
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing .....	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> ( 564 )
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin .....	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> ( 574 )
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling .....	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> ( 584 )
Characterization, Sources, and Health Risks of PM <sub>2.5</sub> -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City .....	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> ( 595 )
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City .....	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, WANG Jian, <i>et al.</i> ( 604 )
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods .....	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> ( 616 )
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai .....	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming ( 624 )
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou .....	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> ( 634 )
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017 .....	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> ( 643 )
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta .....	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> ( 653 )
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangshuai Watershed .....	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> ( 663 )
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangshuai .....	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 673 )
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City .....	WANG Wei, LI Xu-yong ( 681 )
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir .....	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> ( 688 )
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation .....	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> ( 699 )
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake .....	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> ( 712 )
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide .....	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> ( 723 )
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir .....	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> ( 732 )
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River .....	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> ( 740 )
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> ( 749 )
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds .....	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang ( 761 )
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin .....	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> ( 766 )
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin .....	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> ( 776 )
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution .....	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> ( 786 )
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes .....	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> ( 796 )
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties .....	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> ( 808 )
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019 .....	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> ( 819 )
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season .....	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> ( 831 )
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands .....	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> ( 842 )
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems .....	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> ( 850 )
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection .....	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> ( 860 )
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron .....	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> ( 867 )
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution .....	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> ( 874 )
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters .....	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> ( 883 )
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste .....	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> ( 891 )
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province .....	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> ( 900 )
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City .....	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> ( 909 )
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> ( 917 )
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter .....	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong ( 925 )
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO <sub>2</sub> on Cadmium Enrichment of Rice .....	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> ( 932 )
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area .....	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> ( 941 )
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells .....	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong ( 952 )
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs .....	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> ( 960 )
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments .....	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> ( 967 )
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China .....	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> ( 977 )
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils .....	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> ( 988 )
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems .....	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> ( 996 )
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar .....	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong ( 1004 )
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter .....	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> ( 1013 )