

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 颜金培,陈立奇,林奇,赵淑惠,李磊,朱大勇(2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 赵仕伟,高晓清(2637)

秋冬季节华北背景地区 PM₁ 污染特征及来源 张周祥,张养梅,张小曳,王亚强,沈小静,孙俊英,周怀刚(2647)

杭州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 吴丹,蔺少龙,杨焕强,杜荣光,夏俊荣,齐冰,刘刚,李凤英,杨孟,盖鑫磊(2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 谢丹丹,祁建华,张瑞峰(2667)

西安市重污染与清洁天 PM_{2.5} 组分及其活性氧物质对比 王莹,韩永明,何世恒,张婷,刘随心,曹军骥(2679)

黄山 PM₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 孟静静,侯战方,张二勋,董杰,刘晓迪,邢继钊,刘加珍(2688)

泉州市大气 PM_{2.5} 镧系元素组成特征及来源解析 张云峰,于瑞莲,胡恭任,孙境蔚,许文质,张棕巍(2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 许亚宣,李小敏,于华通,董林艳,赵玉婷,姚懿函,邹广迅,张新民(2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 张磷,张祥志,秦玮,茅晶晶,秦艳红,谢卫平,史文科,陈文泰(2718)

四川省 2005 ~2014 年农业源氨排放清单及分布特征 冯小琼,陈军辉,姜涛,钱骏,叶宏(2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 鲁君,黄成,胡馨遥,杨强,井宝莉,夏阳,卢滨,唐伟,楼晟荣,陶士康,李莉(2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 张秋秋,潘申龄,张昱,杨敏,安伟(2747)

地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析 赵鹏,何江涛,王曼丽,崔亚丰(2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 张倩,宋金明,彭全材,李学刚,袁华茂,李宁,段雨琴,曲宝晓,王启栋(2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO₂ 脱气的空间变化及其影响因素 张陶,李建鸿,蒲俊兵,吴飞红,李丽,袁道先(2773)

都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 宁增平,肖青相,蓝小龙,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 陈政宏,郭敏,徐怀洲,刘丹,程杰,李江,张圣虎,石利利(2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 李文章,张莉,王圣瑞,肖尚斌,钱伟斌,席银,许可宸,史玲珑(2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 孙清清,陈敬安,王敬富,杨海全,计永雷,兰晨,王箫(2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 张艳,张婷婷,陈卫平,郭昌胜,花镇东,张远,徐建(2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 陈莹,王昭,吴亚刚,赵剑强,杨文娟(2828)

CaO₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 徐焱,李大鹏,韩菲尔,宋小君,李鑫,周婧,黄勇(2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 鲜青松,唐翔宇,朱波(2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 陈友媛,吴亚东,孙萍,吴丹(2850)

氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 王彬斌,林景东,万顺利,何锋(2859)

Pd/Fe⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 张环,傅敏,魏俊富,王一冰,安慧颖,沈书怡(2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 孔殿超,周跃飞,陈天虎,王进,李碧(2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 韩慧慧,缪恒峰,张雅晶,陆敏峰,黄振兴,阮文权(2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 孙靖云,范梦婕,陈英文,祝社民,沈树宝(2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 苏文,陈洁,张胜鹏,孔繁翔(2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 蔡小波,郁强强,刘锐,赵远,陈吕军(2910)

K⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 吴国栋,于德爽,李津,周同,王晓静(2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 于濛雨,刘毅,田玉斌,石欢,徐富,杨宏(2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 李惠娟,彭党聪,陈国燕,姚倩,卓杨,王彬斌(2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 李祥,林兴,王凡,袁砚,黄勇,袁怡,毕贞,刘忻,杨朋兵(2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 林兴,王凡,袁砚,李祥,黄勇,袁澄伟(2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 沈庆然,李田,曹熠,潘舆(2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 高景峰,孙丽欣,樊晓燕,潘凯玲,李定昌(2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 周贵忠,许硕,姚倩,银钗(2972)

CO₂-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 王博强,李晨阳,卢伟,樊昊,张冬至,汪治,吕聪,沈福东(2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 田冬,高明,黄容,吕盛,徐畅(2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 腾昌运,沈建国,王忠,王行,李鸿毅,张志剑(3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 杜璨,许晨阳,王强,张帆,马武功,和文祥,侯琳,耿增超(3010)

微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响 贾钦,朱雪梅,王琪,傅海辉,郝亚琼,何洁,杨子良(3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 方至萍,廖敏,张楠,吕婷,黄小辉(3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 刘伟,孟昭福,任爽,李文斌(3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 李芬,王训,罗辑,袁巍,喻子恒,商立海(3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 朱光旭,肖化云,郭庆军,张忠义,杨曦,孔静(3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 周莉娜,蔡函臻,李荣华,王美净,赵军超,王权,张增强(3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 郭香麟,左剑恶,史绪川,王凯军,李静(3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 晏卓逸,岳波,高红,李志龙,黄启飞,聂小琴,汪群慧(3078)

甲烷催化还原 NO_x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 潘华,建艳飞,陈宁娜,刘红霞,何焯,贺亚飞(3085)

《环境科学》征稿简则(2737) 《环境科学》征订启事(2809) 信息(2867, 2971, 3027)

CaO₂不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用

徐焱, 李大鹏*, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 以 S 市某黑臭河道底泥和上覆水为研究材料, 研究了 CaO₂ 在 3 种不同投加方式下对内源磷释放的抑制效果. 结果表明 CaO₂ 在 3 种投加方式下, 均导致上覆水中 pH 和 DO 有所增加. 注射条件下, 上覆水 DO 浓度明显低于覆盖, 说明注射确实延缓了 CaO₂ 的氧化速度, 有利于创造底泥微氧化环境. CaO₂ 覆盖和注射条件下, 上覆水中 TP 和 DIP 浓度以及变化趋势基本一致, 均明显低于混匀条件. 但是, 覆盖条件下, 间隙水中 DIP 浓度最高, 达到注射条件下的 120.33 ~ 142.18 倍. 相反, 注射条件下, 间隙水中 DIP 浓度最低, 并且上覆水中 DIP 浓度也较低, 说明注射条件下 CaO₂ 对内源磷的释放确有抑制作用, 这与其创造的微氧化环境密切相关. 底泥中不同形态磷数量分布也证实了这一点. 投加 CaO₂ 加快了有机磷的矿化速度, 铁铝结合态磷和钙结合态磷也明显增加, 使得内源磷持留能力增强.

关键词: 过氧化钙; 富营养化; 底泥; 磷形态

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2836-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201612251

Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO₂

XU Yao, LI Da-peng*, HAN Fei-er, SONG Xiao-jun, LI Xin, ZHOU Jing, HUANG Yong

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

Abstract: The inhibition of sedimentary phosphorus (P) was investigated under the CaO₂ with 3 addition ways. The overlying water and sediments came from a black-odor channel in S City. The results showed that the value of pH and DO in the overlying water increased under the 3 addition ways of CaO₂. Under the condition of injection, the DO concentration of the overlying water was lower than that of the covering condition, which indicated that the injection could delay the oxidation of CaO₂ and be favor of creating the micro-oxidation environment in the sediment. The concentrations and the trend of TP and DIP in the overlying water were similar under the injection and covering, which were lower than that in the mixing condition. However, under the covering condition, the DIP concentration in the pore water was the highest, reaching up to 120.33-142.18 times, compared with the injection condition. Noticeably, the DIP in the pore water and the overlying water was lower, indicating that the addition of CaO₂ could inhibit the release of sedimentary P. This was attributed to the micro-oxidation environment. The sedimentary P fractions also confirmed this. The explanation may be that the addition of CaO₂ accelerated the mineralization of organophosphate and the formation of Fe-Al/P and Ca-P, which enhanced the retention of sedimentary P.

Key words: calcium peroxide; eutrophication; sediment; phosphorus fractions

磷元素是水体富营养化的重要限制因子之一^[1,2]. 随着我国对水体富营养化问题的日益重视, 进入水体中的外源磷已得到有效遏制^[3-7], 但是水体富营养化问题并没有随之得到预期的解决. 有研究表明, 湖泊及河道底泥沉积物中磷的特征及形态在一定条件下是水体富营养化的重要影响因素之一^[8-12]. 如何控制沉积物中内源磷向水体释放成为众多学者关注的热点^[13-16].

近年来, CaO₂ 因其作为一种兼具释氧性和氧化性的环境友好型材料已被应用在诸多环境领域^[17-25]. 如 CaO₂ 投加到河道底泥中, 可很大程度提高周围环境介质中的溶解氧并改善泥水两相中各形态磷比例, 以抑制底泥中磷向水相的释

放^[21,22]. 张亚雷等^[21]对比了 CaO₂ 在混匀与覆盖条件下对磷在泥水两相间迁移转化的影响, 其主要关注了上覆水和底泥中磷的变化规律, 而忽视了间隙水中磷含量的变化. 实际上, 间隙水中磷含量的变化可能是导致覆盖、混匀对磷释放长期抑制能力的关键因素. 朱培颖等^[26]研究证实, 以灼烧后净水污泥作为抑磷材料, 混匀条件下间隙水中磷含量明显低于覆盖. 这暗示了 2 个问题:

收稿日期: 2016-12-29; 修订日期: 2017-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278523); 江苏省“六大人才高峰”项目(2013-JNHB-022); 水处理技术与材料协同创新中心项目

作者简介: 徐焱(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: sustxuyao@163.com

* 通信作者, E-mail: ustslp@163.com

① CaO₂混匀条件下,由于反应迅速,导致有机磷被转化成无机磷释放,致使间隙水中磷含量肯定很低.如果可以延缓 CaO₂ 反应速度,对磷抑制效果应该明显增强;② CaO₂ 覆盖条件下,间隙水中磷含量一定很高,一旦环境条件改变导致其爆发性释放的机会更大.因此,如果能够降低 CaO₂ 的反应速度,在底泥内部形成微氧化环境,有可能改变底泥中不同形态磷的数量分布,进而降低间隙水中磷含量,并抑制内源磷向上覆水释放.本研究提出了采用注射的方式,将 CaO₂ 注入底泥深处,延缓 CaO₂ 的反应速度.但是这种投加方式对内源磷在上覆水、间隙水以及不同形态磷数量分布有何影响还不得而知.基于此,本研究对比了 CaO₂

在覆盖、混匀、注射条件下,对磷在上覆水、间隙水以及底泥中的分布影响,并分析了不同投加方式对内源磷释放的抑制机制,以期为水体修复提供数据支持和理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究地点与采样

2016年10月11日利用大口径重力采样器(Rigo Co. 直径90 mm 高500 mm)在S市某黑臭河道采样点(N31°31'30.10", E120°56'29.7")采集表层10 cm底泥,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.采样点底泥及上覆水的理化性质见表1.

表1 采样点底泥和上覆水的理化性质

Table 1 Physico-chemical properties of sediments and overlying water from the sampling point

上覆水								底泥		
DO /mg·L ⁻¹	pH	TP /mg·L ⁻¹	DTP /mg·L ⁻¹	DIP /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	TOC /mg·L ⁻¹	高锰酸盐指数 /mg·L ⁻¹	含水率 /%	烧失量 /%	Tot-P /g·kg ⁻¹
3.84	6.89	0.721	0.457	0.422	10.74	70.32	61.26	67.01	8.55	7.170

1.2 实验方法

实验用管构造见图1,材料为有机玻璃(长20.5 cm,内径8.4 cm),底端用橡胶塞密封;管壁留有安装 Rhizon 间隙水采样器(Rhizon core solution sampler)的小孔,使用前用疏水胶带密封.将如图1所示实验用管中平铺10 cm的底泥,再以虹吸方式缓慢加入5 cm上覆水,避免因底泥再悬浮引起的误差.按3种投加方式将4.00 g CaO₂ 投加在底泥中.实验设对照实验和点注射投加、覆盖、混匀3种投加方式共4个实验组,每组设置3个平行样,共计12个.具体实验分组、投加方式说明及编号见表2.实验过程温度为室温(15~20℃).待泥水体系稳定24 h后,经过1、3、5、10、15和20 d,取各样的上覆

水及间隙水,分析上覆水中TP、DIP、间隙水DIP及实验始末底泥磷形态变化.每次取水样结束后,立即以虹吸方式补入等量原上覆水.

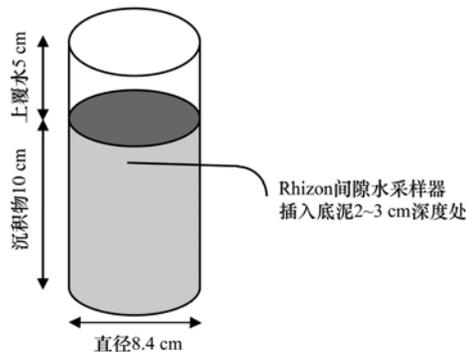


图1 实验装置示意

Fig. 1 Experimental device

表2 实验分组、投加方式说明及编号情况¹⁾

Table 2 Addition modes of the experimental groups and serial numbers

分组	CaO ₂ 点注射	CaO ₂ 覆盖	CaO ₂ 混匀	对照实验组
投加方式说明	以梅花散点分布将4.00 g 糊状 CaO ₂ 注射到2~3 cm厚底泥中.	将4.00 g 粉末状 CaO ₂ 均匀覆盖在底泥表面.	将4.00 g 粉末状 CaO ₂ 与3 cm厚的底泥混匀	静置

1)表中 CaO₂ 质量均以干重计,有效质量为75%

1.3 分析方法

在所有测定指标中,pH、溶解氧均采用 WTW Multi 9420 在线监测;间隙水采用 Rhizon 间隙水采样器(Rhizon core solution sampler)提取;

TP是将水样用过硫酸钾消解后用钼锑抗分光

光度法测定;DIP含量是将水样过0.45 μm滤膜后直接测定;

磷的形态分析方法:参考 Hietjes 和 Lijklema (1980)提出的四步连续提取法^[26],各操作步骤提取液的P含量分析均采用钼锑抗分光光度法,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)、残渣磷(Res-P)。沉积物上总磷(Tot-P) 以上述 4 种形态磷之和表示。

2 结果与讨论

2.1 不同 CaO_2 投加方式对上覆水 pH 的影响

从图 2 可以看出,不同 CaO_2 投加方式对上覆水 pH 的影响差异较大。其中 CaO_2 覆盖处理底泥时,上覆水 pH 由原来的 6.89 迅速上升到第 1 d 的 10.42,第 3 d 达到最大值 10.94,接着缓慢下降到第 20 d 的 10.00。同时不难发现, CaO_2 注射和混匀处理底泥时,对上覆水 pH 的影响则明显小于覆盖方式,但从整个周期来看,仍将 pH 控制在偏碱性。

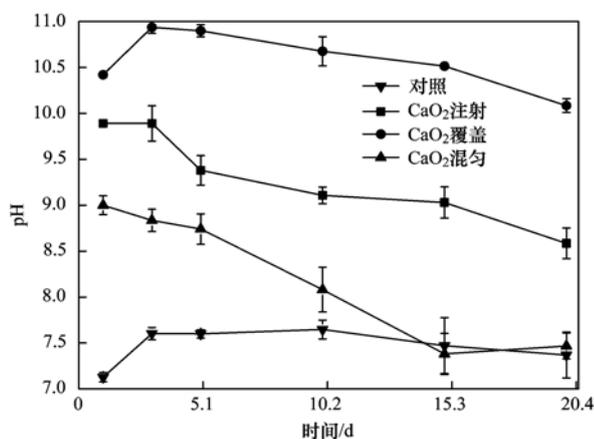
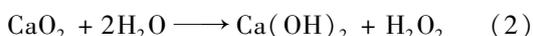


图 2 不同 CaO_2 投加方式对上覆水 pH 的影响

Fig. 2 Changes of pH in overlying water under different adding options of calcium peroxide

本实验结果表明, CaO_2 投加时,上覆水 pH 较对照实验组均有升高,这是由于 CaO_2 在泥水两相中发生的反应引起的,反应方程式如下:



CaO_2 注射和混匀条件下,由于其投加到底泥更深处,增加了与底泥中有机物、 Fe^{2+} 的接触几率,反应(2)中生成的 H_2O_2 在 Fe^{2+} 催化作用下持续氧化底泥有机物,使得反应(2)不断向右进行,同时部分 Fe^{2+} 又与反应(1)生成的 O_2 反应生成 Fe^{3+} ,进而与 OH^- 结合成氢氧化铁,所以对 pH 的影响不如以反应(1)为主的覆盖方式。但必须指出的是,在反应(2)中 Fe^{2+} 仅作为催化剂,其来源是底泥,因此,生成 Fe^{3+} 及其他铁氧化物含量取决于底泥中所含 Fe^{2+} 。在自然水体底泥中, Fe^{2+} 含量通常较小。

2.2 不同 CaO_2 投加方式对上覆水 DO 的影响

从图 3 可以看出, CaO_2 覆盖和注射条件下,上覆水 DO 浓度较大程度地提高,混匀无此效果。 CaO_2 覆盖条件下,上覆水中溶解氧浓度由初始的缺氧条件($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)增加到第 1 d 的 $11.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在第 3 d 的时候,达到最大值 $15.35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,然后逐渐缓慢减小,在第 20 d 的时候,溶解氧浓度为 $12.36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; CaO_2 注射条件下,上覆水中溶解氧浓度在第 1 d 达到平衡,浓度为 $9.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,接着缓慢降至第 5 d 的 $9.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在第 5 d 到第 10 d 中,降幅增大,第 10 d 溶解氧浓度为 $6.04 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,之后直到实验结束,变化幅度极小; CaO_2 混匀条件下,第 1 d 至第 5 d,上覆水溶解氧浓度和对照实验组很相近,第 5 d 分别为 $3.64 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在接下来的 15 d 中, CaO_2 混匀条件下的上覆水溶解氧浓度始终低于同期对照实验组约 $0.8 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

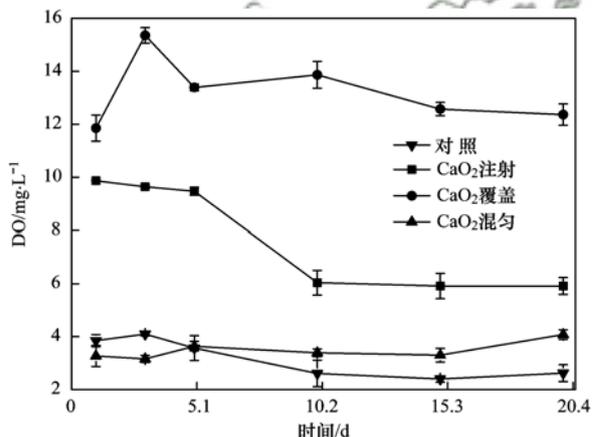


图 3 不同 CaO_2 投加方式对上覆水 DO 的影响

Fig. 3 Changes of DO in overlying water under different adding options of calcium peroxide

结果表明, CaO_2 注射和覆盖条件,均大幅提高了上覆水中 DO 浓度,但两者间差距明显, CaO_2 混匀条件则对上覆水 DO 无明显影响,这是由三者到底泥中作用机制的差异造成的。注射方式在实验前期,反应(1)、(2)同时发生,接着随着注射点周围有机物被全部氧化,消耗了大部分 CaO_2 ,在实验后期剩余的 CaO_2 参与反应(2),持续缓慢释放 O_2 ;覆盖方式由于仅接触了底泥最表层的少量有机物, CaO_2 参与反应(1),可以在第 1 d 将其全部氧化,在接下来的实验过程中,绝大部分 CaO_2 参与反应(2),持续缓慢释放 O_2 ;因此从整个实验周期来看, CaO_2 覆盖条件下,上覆水 DO 远高于注射条件。在 CaO_2 混匀条件下,由于接触了底泥中大量有机物及催化离子 Fe^{2+} ,绝大部分 CaO_2 由反应(2)快速消耗,所以

前 5 d, 上覆水 DO 浓度与空白对照组持平, 随着 CaO₂ 的完全消耗, 实验后期, 溶解氧又由于混匀的缘故接触到表层残余的有机物, 成为电子受体, 继续消耗, 所以混匀条件下的上覆水溶解氧浓度始终低于同期对照实验组约 0.8 ~ 1.0 mg·L⁻¹.

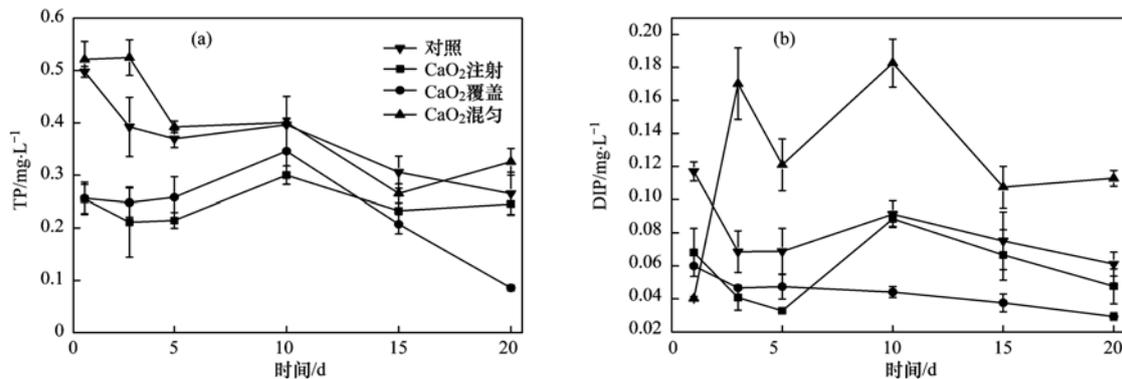


图 4 不同 CaO₂ 投加方式对上覆水总磷和溶解性正磷酸盐的影响

Fig. 4 Changes of TP and DIP concentration in overlying water under different adding options of calcium peroxide

从图 4(a) 中可以看出, 3 种 CaO₂ 投加方式引起了上覆水 TP 的变化趋势不同. CaO₂ 注射及覆盖条件下, 上覆水中 TP 随时间变化趋势相似, 第 1 d 时几乎同时由 0.72 mg·L⁻¹ 降至 0.25 mg·L⁻¹ 左右, 在第 3 d 至第 10 d 又缓慢增加, 分别至 0.30 mg·L⁻¹ 和 0.35 mg·L⁻¹, 然后缓慢降低. CaO₂ 混匀条件下, 在前 10 d, 上覆水中 TP 高于同期对照实验, 在第 3 d 尤其明显, 差值高达 0.13 mg·L⁻¹, 在第 10 ~ 15 d, 略低于同期对照实验, 接下来 5 d 又出现上升趋势, 最终第 20 d 测得上覆水 TP 浓度为 0.33 mg·L⁻¹ (同期对照实验为 0.26 mg·L⁻¹). 从实验结果可以看出, CaO₂ 注射及覆盖条件下, 上覆水 TP 浓度明显降低, 其中覆盖方式效果更明显; 而 CaO₂ 混匀方式却使得上覆水 TP 浓度基本高于同期对照实验. 相关研究表明, 河道及湖泊中的总磷绝大部分为有机磷 (>90%), 其中 70% 以上是悬浮态颗粒有机磷, 另外作为能被生物直接利用的无机态的溶解正磷酸盐比例极小, 不足 5% [27~29]. CaO₂ 注射及覆盖条件下, 对上覆水 TP 的去除主要依靠其吸附性、强氧化性及生成的 Ca²⁺ 对磷酸根的捕捉效应. 首先 CaO₂ 利用其吸附性, 吸附上覆水中占比很大的悬浮态颗粒有机磷, 然后将其氧化成磷酸根, 反应过程中产生的 Ca²⁺ 又进一步捕捉磷酸根, 生成稳定的羟基磷酸钙. 由于覆盖方式将所有的 CaO₂ 平铺于底泥表层, 其接触上覆水中悬浮态颗粒有机磷的可能性远高于注射方式, 所以其降低上覆水 TP 的水平优于注射方式; CaO₂ 混匀方式短期内就将投加的

2.3 不同 CaO₂ 投加方式对上覆水总磷和溶解性正磷酸盐的影响

CaO₂ 投加对上覆水总磷和溶解性正磷酸盐影响显著, 且不同投加方式的影响存在明显差异 (图 4).

CaO₂ 全部耗尽, 且在底泥中主要以反应 (2) 为主, 生成了大量的磷酸根, 然后释放到上覆水中, 导致上覆水 TP 升高. 另外混匀投加方式本身也限制了 CaO₂ 对于上覆水中磷的吸附效果.

从图 4(b) 中可以看出, 对照实验组第 3 d 进入较为稳定的状态; 与对照实验相比, CaO₂ 注射及覆盖条件下, 上覆水中 DIP 有明显的去除效果, 均低于对照实验; 然而 CaO₂ 混匀条件下, 上覆水中 DIP 浓度从第 0 d 的 0.12 mg·L⁻¹ 迅速降低至第 1 d 的 0.04 mg·L⁻¹ (此时对照实验 DIP 浓度为 0.12 mg·L⁻¹), 接着增加至第 3 d 的 0.17 mg·L⁻¹ (此时对照实验 DIP 浓度为 0.07 mg·L⁻¹), 在第 3 d 至第 10 d 短暂减小然后增加至最大值 0.18 mg·L⁻¹ (此时对照实验 DIP 浓度为 0.09 mg·L⁻¹), 接着降低至第 20 d 的 0.11 mg·L⁻¹, 仍远高于此时对照实验的 0.04 mg·L⁻¹. 实验结果表明, CaO₂ 注射及覆盖方式对上覆水中 DIP 有明显的去除效果, 在其过程中, 底泥成为整个磷迁移过程中的“汇”, 使得上覆水中的 DIP 持续迁移到泥相中, 这是因为这两种 CaO₂ 投加方式极大提高了底泥的氧化还原电位, 同时 CaO₂ 本身又是一种良好的磷吸附剂. 相反, CaO₂ 混匀方式却引起了截然不同的结果, 在此条件下, 底泥成为整个磷迁移过程中的“源”, 使得上覆水 DIP 浓度远高于对照实验, 这是出乎意料的, 在张亚雷 [21] 的研究中也出现过类似的现象. 笔者推测, 由于以混匀方式投加的 CaO₂ 在很短时间内氧化了底泥中大量的有机磷, 而伴随产生的 Ca²⁺ 的量不足以完全捕捉生成

的磷酸根离子,致使上覆水中 DIP 浓度远高于对照实验.

2.4 不同 CaO_2 投加方式对间隙水溶解性正磷酸盐影响

图 5 描述的是不同 CaO_2 投加方式对间隙水中 DIP 的影响. 实验过程中,对照实验间隙水中 DIP 变化幅度不大,浓度在 $0.28 \sim 0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;其中 CaO_2 注射及混匀条件下,上覆水中 DIP 在第 5 d 均达到最小值,分别为 $0.024 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.023 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,之后保持稳定,直至实验结束; CaO_2 覆盖条件下,上覆水中 DIP 由第 0 d 的 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 迅速增加至第 1 d 的 $2.06 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后近似线性上升至第 5 d 的最大值 $3.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (为同时期注射组间隙水 DIP 浓度的 142.18 倍),接着缓慢减小,第 20 d 测定 DIP 浓度为 $1.70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (为同时期注射组间隙水 DIP 浓度的 120.33 倍).

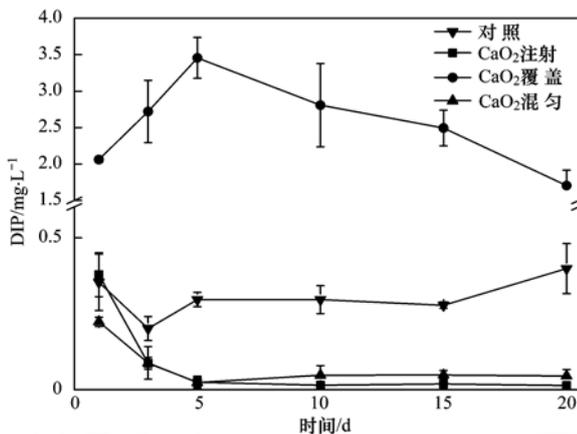


图 5 不同 CaO_2 投加方式对间隙水中溶解性正磷酸盐的影响

Fig. 5 Changes of DIP concentration in the pore water under different adding options of calcium peroxide

结果表明,实验期间对照实验间隙水中 DIP 浓度在 $0.28 \sim 0.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CaO_2 注射及混匀条件,对间隙水 DIP 有明显的去除效果,实验前 5 d 使得其迅速降低,在第 5 d 以后均保持在 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,这是由于 CaO_2 本身就是良好的磷吸附剂,且会释放 Ca^{2+} ,注射及混匀方式使得 CaO_2 深入到 3 cm 底泥中,从而与间隙水中的 DIP 充分接触,通过吸附、共沉淀及化学沉淀作用将其去除. 然而 CaO_2 覆盖方式对间隙水 DIP 非但无任何去除效果,反而使得其浓度与对照实验相比呈暴发式增长. 在本研究实验模拟情况下,通过估算可知,底泥表层 3 cm 中间隙水 DIP 总量为 0.56 mg ,若假设其全部向上覆水中释放,则会使上覆水 DIP 浓度增加 $2.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 相比于混匀和注射条件,间隙水中蕴含的

DIP 含量明显低于覆盖条件. 由于 CaO_2 覆盖层未受外部条件破坏,所以间隙水 DIP 与上覆水中磷迁移较为平稳,但在河道真正自然环境下, CaO_2 覆盖层一旦遇到外部因素如风浪、底栖生物等的破坏,那么无疑增加了间隙水 DIP 向上覆水体暴发式释放的巨大风险. 因此将此类原位覆盖技术用于实际河道治理修复中值得商榷.

2.5 不同 CaO_2 投加方式对底泥磷形态的影响

图 6 描述了不同 CaO_2 投加方式对底泥磷形态的影响. 从中可知,与对照实验相比,3 种不同 CaO_2 投加方式明显增加了表层底泥中 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 、 Fe/Al-P 和 Ca-P 含量,大大降低了 Res-P 含量. 其中 3 种不同 CaO_2 投加方式增加的 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量差异不明显;增加 Fe/Al-P 含量最明显的是 CaO_2 覆盖方式 (80.72%), 其次分别是注射和混匀 (70.02%、30.17%);对于 Ca-P 增加量贡献最明显的是覆盖 (104.69%), 其余两者差距不大 (混匀 48.86%、注射 38.00%);使得 Res-P 含量减小最显著的同样是 CaO_2 覆盖方式 (97.21%), 其余两者相近 (混匀 86.36%、注射 85.64%).

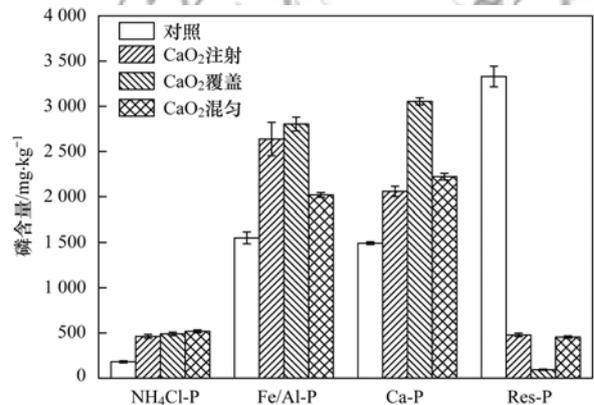


图 6 不同 CaO_2 投加方式对底泥磷形态的影响

Fig. 6 Changes of the concentration of various phosphorus fractions in the sediment under different adding options of calcium peroxide

累加 4 种不同磷形态含量,可得出实验结束后此黑臭河道表层底泥对照组磷含量为 $6.554 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (本底为 $7.170 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),其含量远远大于普通富营养化湖泊及河流,这表明在黑臭水体中存在较大的内源磷释放风险. 王国祥^[30]等也在其研究中测定太湖流域农村黑臭河道最表层沉积物磷含量高达 $4.387 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 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 投加到底泥表层能够释放出 O_2 ,使得泥水两相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+} ,使得底泥中铁磷增加,

其中以释氧水平最高、持续时间最久的覆盖方式最显著;Ca-P 不受氧化还原电位的影响,CaO₂ 投加对底泥中 Ca-P 含量产生的直接影响是 Ca²⁺ 的加入及底泥环境 pH 的提高,前者捕捉磷酸根离子,生成羟基磷酸钙。另外有大量研究表明,pH > 8 时有利于羟基磷酸钙产生^[24],而 3 种投加方式中对 Ca-P 增加量贡献最明显的是覆盖方式。这是由于最表层泥样在覆盖条件下充分与 CaO₂ 接触,生成的羟基磷酸钙主要集中在表面,而其它如混匀和注射条件下生成的羟基磷酸钙则比较分散,另外,采集底泥样品时,也会对实验结果产生影响。即实验结束后,实验采集了表层底泥样品,则更多的羟基磷酸钙集中于此,导致覆盖条件下 Ca-P 含量远高于混匀和注射。CaO₂ 投加对 Res-P 含量影响最大,投加到底泥中的 CaO₂ 以 Fe²⁺ 作为催化剂,将 Res-P 中大量的有机磷氧化成无机磷形态,在这个过程中,由于底泥中含有大量的有机物,此时起决定性作用的是单位质量底泥有效 CaO₂ 投加量,3 种投加方式投加 CaO₂ 有效质量均为 3 g,估算得表层 3 cm 泥柱质量约 0.3 kg,假设注射和混匀方式作用深度为 3 cm,覆盖为 1 cm,则单位质量底泥有效 CaO₂ 投加量分别为 10、10 和 30 g·kg⁻¹,即在各方式作用的底泥中,对 Res-P 的去除效果依次为:注射 = 混匀 < 覆盖,所以实验结果和理论值还是较为吻合的。

值得指出的是,尽管实验结果表明,覆盖对内源磷形态数量分布的改造作用最强,而注射条件则与混匀不相上下,但是,相比于覆盖和混匀 2 种投加方式,注射条件下,CaO₂ 的反应速度大大延缓,因此,可以推测,如果再继续延长实验时间,则注射条件下不同形态磷的数量分布还会发生改变。

3 结论

(1) CaO₂ 不同投加方式导致上覆水 pH 和 DO 变化。覆盖条件下,上覆水 pH 和 DO 明显高于混匀和注射,并均高于对照实验。

(2) CaO₂ 混匀条件下,上覆水中 TP 和 DIP 浓度增加,并且 DIP 浓度明显高于对照实验以及覆盖和注射条件;CaO₂ 覆盖条件下,间隙水中 DIP 浓度最高,且依次明显高于对照、混匀和注射。说明注射 CaO₂ 能够有效抑制底泥内源磷释放。

(3) 投加 CaO₂ 将底泥中有机磷矿化,且覆盖下,Fe/Al-P 和 Ca-P 的增加幅度均明显高于注射和混匀,而 Res-P 的降低幅度则最大。且投加 CaO₂ 条件下,不同形态磷变化幅度均明显高于对照实验。

参考文献:

- [1] 杨露,平倩,李咏梅. 低磷浓度下鸟粪石结晶成粒及反应器流态模拟[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(4): 1017-1026.
Yang L, Ping Q, Li Y M. Struvite pellet crystallization at low phosphorus concentration and fluidization simulation of the reactor [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(4): 1017-1026.
- [2] Jing L D, Liu X L, Bai S, *et al.* Effects of sediment dredging on internal phosphorus: a comparative field study focused on iron and phosphorus forms in sediments[J]. Ecological Engineering, 2015, **82**: 267-271.
- [3] Ellison M E, Brett M T. Particulate phosphorus bioavailability as a function of stream flow and land cover[J]. Water Research, 2006, **40**(6): 1258-1268.
- [4] 孔明,尹洪斌,晁建颖,等. 凹凸棒黏土覆盖对沉积物磷赋存形态的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(7): 2192-2199.
Kong M, Yin H B, Chao J Y, *et al.* Influence of attapulgite clay capping on phosphorus forms in the sediment [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(7): 2192-2199.
- [5] 武晓飞,李大鹏,汪明,等. 反复扰动下加藻对不同形态磷相互转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(4): 1187-1196.
Wu X F, Li D P, Wang M, *et al.* Migration and transformation of phosphorus forms under dual effect of sediment resuspension and the addition of algae [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(4): 1187-1196.
- [6] 李大鹏,黄勇,李祥. 底泥加入铁盐对水体磷的吸收和固定[J]. 环境化学, 2013, **32**(5): 797-802.
Li D P, Huang Y, Li X. Phosphorus adsorption and immobility by sediments with ferric salt addition [J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(5): 797-802.
- [7] 李大鹏,黄勇. 太湖梅梁湾和月亮湾春夏两季沉积物扰动下 BAPP 的转化规律[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(10): 2766-2773.
Li D P, Huang Y. Transformation of BAPP under sediment disturbance of Meiliang Bay and Moon Bay in Lake Tai during spring and summer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(10): 2766-2773.
- [8] 李飞鹏,张海平,陈玲. 小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3854-3861.
Li F P, Zhang H P, Chen L. Temporal and spatial distribution of environmental factors and chlorophyll-a and their correlation analysis in a small enclosed lake [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3854-3861.
- [9] 李大鹏,黄勇,袁砚,等. 城市重污染河道底泥对外源磷的吸附和固定机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 96-101.
Li D P, Huang Y, Yuan Y, *et al.* Mechanism of phosphorus adsorption and immobility by sediments in inner-city heavily polluted canal [J]. Environmental Science, 2011, **32**(1): 96-101.
- [10] O'Neal J A, Boyer T H. Phosphorus recovery from urine and anaerobic digester filtrate: comparison of adsorption-precipitation with direct precipitation [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2015, **1**(4): 481-492.
- [11] 王忍,李大鹏,黄勇,等. 物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4112-4120.

- Wang R, Li D P, Huang Y, *et al.* Development of sediment micro-interface under physical and *Chironomus plumosus* combination disturbance[J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (11): 4112-4120.
- [12] 史晓丹, 李勇, 李大鹏, 等. 摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应[J]. *环境科学*, 2015, **36** (5): 1622-1629.
- Shi X D, Li Y, Li D P, *et al.* Response of sediment micro environment and micro interface to physical disturbance intensity under the disturbance of *Chironomus plumosus* [J]. *Environmental Science*, 2015, **36** (5): 1622-1629.
- [13] 李大鹏, 黄勇. 底泥扰动在水体富营养化发展进程中的作用[J]. *中国给水排水*, 2009, **25** (14): 10-16.
- Li D P, Huang Y. Effect of sediment disturbance on development of water eutrophication[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, **25** (14): 10-16.
- [14] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 底泥预处理对磷等温吸附特征及磷形态的影响[J]. *中国环境科学*, 2007, **27** (3): 346-351.
- Li D P, Huang Y, Li W G. Influence of different sediments pretreatment on phosphorus adsorption characteristics and phosphorus forms[J]. *China Environmental Science*, 2007, **27** (3): 346-351.
- [15] Ditrlich M, Chesnyuk A, Gudimov A, *et al.* Phosphorus retention in a mesotrophic lake under transient loading conditions: insights from a sediment phosphorus binding form study[J]. *Water Research*, 2013, **47** (3): 1433-1447.
- [16] 李大鹏, 黄勇, 李伟光. 河道底泥再悬浮状态对磷平衡浓度的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, **28** (5): 476-480.
- Li D P, Huang Y, Li W G. Influence of sediment re-suspension on the equilibrium phosphate concentration (EPC₀) of river course sediments [J]. *China Environmental Science*, 2008, **28** (5): 476-480.
- [17] Zhang A, Wang J, Li Y M. Performance of calcium peroxide for removal of endocrine-disrupting compounds in waste activated sludge and promotion of sludge solubilization [J]. *Water Research*, 2015, **71**: 125-139.
- [18] Qian Y J, Zhou X F, Zhang Y L, *et al.* Performance and properties of nanoscale calcium peroxide for toluene removal[J]. *Chemosphere*, 2013, **91** (5): 717-723.
- [19] Khodaveisi J, Banejad H, Afkhami A, *et al.* Synthesis of calcium peroxide nanoparticles as an innovative reagent for in situ chemical oxidation [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **192** (3): 1437-1440.
- [20] Olyae E, Banejad H, Afkhami A, *et al.* Development of a cost-effective technique to remove the arsenic contamination from aqueous solutions by calcium peroxide nanoparticles [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, **95**: 10-15.
- [21] 张亚雷, 章明, 李建华, 等. CaO₂ 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.
- [22] 张静, 周雪飞, 钱雅洁. 过氧化钙在环境修复应用中的研究进展[J]. *环境化学*, 2014, **33** (2): 321-326.
- Zhang J, Zhou X F, Qian Y J. Research progress of the application of calcium peroxide in environmental remediation[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33** (2): 321-326.
- [23] 张丹. CaO₂ 对控制河道底泥磷释放效果的研究[J]. *环境工程*, 2012, **30** (S2): 532-534.
- Zhang D. Research on the effect of calcium peroxide on control of sediment phosphorus release [J]. *Environmental Engineering*, 2012, **30** (S2): 532-534.
- [24] 熊鑫, 柯凡, 李勇, 等. 过氧化钙对水中低浓度磷的去除性能[J]. *湖泊科学*, 2015, **27** (3): 493-501.
- Xiong X, Ke F, Li Y, *et al.* Low concentration of phosphorus removal in waters with CaO₂ [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2015, **27** (3): 493-501.
- [25] 吴昊, 孙丽娜, 王辉, 等. CaO₂/Fe²⁺ 活化过硫酸钠对石油类污染土壤的修复效果[J]. *环境化学*, 2016, **35** (4): 623-628.
- Wu H, Sun L N, Wang H, *et al.* Remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils by CaO₂/Fe²⁺ activated persulfate [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35** (4): 623-628.
- [26] 朱培颖, 李大鹏, 于胜楠. 灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响[J]. *环境科学*, 2017, doi: 10.13227/j.hjxx.201610120. (in Press)
- Zhu P Y, Li D P, Yu S N. Effect of different adding means of ignited water purification sludge on phosphorus adsorption and forms [J]. *Environmental Science*, 2017, doi: 10.13227/j.hjxx.201610120. (in Press)
- [27] 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 等. 太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2014, **35** (3): 951-957.
- Chuai X M, Yang L Y, Cheng S B, *et al.* Characteristics and influencing factors of phosphorus adsorption on sediment in Lake Taihu and Lake Hulun [J]. *Environmental Science*, 2014, **35** (3): 951-957.
- [28] 李安定, 张义, 周北海, 等. 富营养化湖泊沉积物磷原位控制技术[J]. *水生生物学报*, 2014, **38** (2): 370-374.
- Li A D, Zhang Y, Zhou B H, *et al.* In-situ control technology of phosphorus in sediment of eutrophic lake [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2014, **38** (2): 370-374.
- [29] 李思敏, 白苏媛, 张炜. 浅水湖泊表层沉积物磷素赋存形态及其相关性分析[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36** (5): 9-12.
- Li S M, Bai S Y, Zhang W. Phosphorus forms in surface sediments of shallow lake and their correlation analysis [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2014, **36** (5): 9-12.
- [30] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流沉积物中磷形态的垂向分布特征[J]. *环境科学学报*, 2016, **36** (1): 55-63.
- Ji F, Wang G X, Han R M, *et al.* Vertical distribution characteristics of phosphorus fractions in the sediments of a rural malodorous black River in Taihu Lake Area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36** (1): 55-63.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)