

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王伟,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升革,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素去除及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时问对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697,2713,2811)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用

张帅, 李大鹏*, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇

(苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 以受污染水体及底泥为研究对象, 制备了2种过氧化钙复合片剂(CPCTs), 并考察了在混合投加方式下对上覆水的影响及控磷效果. 复合片剂由过氧化钙(CaO_2)、灼烧净水污泥、羟丙基甲基纤维素(HPMC)等粉末直压制成, 其中B片剂含硫酸亚铁(FeSO_4), A不含. 2种片剂吸附效果均较好地符合Langmuir和Freundlich等温模型, 对磷的理论最大吸附量分别达 $110.908 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $106.390 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 底泥模拟实验结果表明, 与对照组相比, A、B组上覆水pH提高, Chl-a浓度降低(42.75%和60.82%), DO浓度提高(53.73%和63.30%). A、B组上覆水DIP浓度变化均显著, 分别降低了54.93%和25.11%. 对于底泥间隙水DIP, A、B组I层(0~2 cm)变化均显著, 分别降低了74.81%和65.66%; B组II层(2~4 cm)变化显著, 平均浓度降低了46.23%, 而A组II层变化不显著; A、B组III层(4~6 cm)变化不显著. 对于底泥形态磷, A、B组 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占TP的比例显著提高(I层:16.87%和13.11%; II层:12.99%和11.02%), Al-P占TP的比例显著降低(I层:7.58%和13.91%; II层:9.86%和7.28%), 其余形态磷变化不显著. A、B组表层底泥微生物的活性均明显提高, A组较深层底泥微生物活性提高更明显.

关键词: 过氧化钙; 复合片剂; 水体; 底泥; 磷

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2706-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201911241

Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment

ZHANG Shuai, LI Da-peng*, DING Yu-qin, XU Chu-tian, XU Xin-peng, SUN Pei-rong, ZHAO Zhe-hao, HUANG Yong

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

Abstract: Two types of calcium peroxide composite tablets (CPCTs) were prepared, and the inhibition effect on the release of endogenous phosphorus and the influence on the overlying water by mixed-dosing were investigated. The CPCTs were made of calcium peroxide (CaO_2), calcined water purification sludge, and hydroxypropyl methylcellulose (HPMC), which were directly pressed into composite tablets, among which Tablet-B (T-B) contained ferrous sulfate (FeSO_4) and Tablet-A (T-A) did not. Both the tablets agreed well with the Langmuir and Freundlich isothermal models; the theoretical maximum adsorption capacities of T-A and T-B on phosphorus were $110.908 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and $106.390 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Compared with the control group, the pH of overlying water was increased, the concentration of Chl-a was decreased by 42.75% and 60.82%, and the DO was increased by 53.73% and 63.30% in group A and B, respectively. The DIP of the overlying water decreased significantly by 54.93% and 25.11% in group A and B, respectively. For the interstitial water in sediment, the DIP in layer I (0-2 cm) decreased significantly by 74.81% and 65.66% in group A and B, and the DIP in layer II (2-4 cm) decreased significantly by 46.23% in group B, but not obviously in group A. The DIP in layer III (4-6 cm) remained unchanged in group A and B. For phosphorus fractions in sediment, the proportion of $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ in TP was significantly increased (layer I: 16.87% and 13.11%; layer II: 12.99% and 11.02%, in group A and B, respectively), and the proportion of Al-P in TP was significantly decreased (layer I: 7.58% and 13.91%; layer II: 9.86% and 7.28%, in group A and B, respectively). The other phosphorus fractions did not change significantly. Both T-A and T-B dosing can improve the microbial activity of the surface sediment, though T-A can improve the microbial activity more significantly.

Key words: calcium peroxide; composite; water body; sediments; phosphorus

近年来,过氧化钙(CaO_2)被广泛应用于水体和土壤环境修复中^[1,2], 由于在水中能持续释放氧气, 常被用于水体增氧材料^[3]. 但 CaO_2 直接投加到水体中往往会与水快速反应, 导致其快速消耗, 一方面使得 CaO_2 未能得到有效利用, 另一方面使得供氧周期大大缩短. 有学者提出将其制成缓释氧剂可有效降低释氧速率^[4~7]. Kao等^[4]较早提出将 CaO_2 与水泥混合以降低其释氧速率; 刘涉江等^[5]和Zhou等^[6]分别采用水泥与 CaO_2 滚圆固化和混合造粒的方法以达到 CaO_2 缓释的目的; 董春华^[7]发明了以

CaO_2 为基质、凹凸棒土为包膜的缓释氧剂制备方法. 但是在材料制作过程中均有水的参与, 造成过氧化钙在制备过程中提前释氧. 因此, 尽量避免 CaO_2 过早消耗是制备过氧化钙缓释材料过程的关键控制因素.

收稿日期: 2019-11-26; 修订日期: 2019-12-25

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(SJCX18_0870)

作者简介: 张帅(1994~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体修复, E-mail: szhangshuai@126.com

* 通信作者, E-mail: ustslqp@163.com

此外, CaO_2 还可用于对底泥磷的控制. 张亚雷等^[8]的研究发现, CaO_2 在释氧同时对底泥磷有很好的抑制效果. 熊鑫等^[9]在研究中进一步发现 CaO_2 对磷酸盐有较强的吸附作用, 对磷酸盐的吸附过程符合 Langmuir 模型. Xu 等^[10]的研究发现在 CaO_2 点注射条件下对底泥内源磷有迁移转化作用. 但是对底泥内源磷控制效果的研究大多仅限于 CaO_2 单质粉末, 而制备兼具缓释氧和控磷功能的复合材料, 并探讨其对水体环境因子以及底泥微生物影响的研究甚少. 本研究以羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 为材料骨架, 采用干粉直压的方式制作了过氧化钙复合片剂 (calcium peroxide composite tablets, CPCTs), 通过分析其吸附性能以及对水体改善和内源磷的控制效果, 以期为城市黑臭水体原位处理材料的研究提供一条新思路.

1 材料与方法

1.1 片剂原材料

过氧化钙 (CaO_2)、羟丙基甲基纤维素 (HPMC)、硫酸亚铁 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 均为分析纯, 购自上海麦克林生化科技有限公司; 净水污泥原料取自某自来水厂, 经干燥、磨碎后过 100 目筛, 在 550°C 下灼烧 2.5 h, 作为实验用灼烧净水污泥.

1.2 实验材料

实验所用藻类为铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*), 购于中国科学院淡水藻种库. 实验前将藻种转接于 BG11 培养基, 在光照培养箱内培养. 培养条件为温度 25°C 、光照 2 000 lx、周期 12 h 昼 12 h 夜. 两周后二次接种, 继续培养约 15 d, 作为实验用藻液原液.

实验所用底泥于 2018 年 11 月在某校园河道 ($31^\circ 18' 12.2''\text{N}$, $120^\circ 33' 37.3''\text{E}$) 使用 Rigo 大口径重力柱状采泥器采集, 现场弃去表层 10 cm 以下部分, 将剩余部分充分混匀, 用冰袋避光冷藏; 使用直立式采水器采集同一采样点的上覆水 50 L. 采样结束后将样品立即运往实验室, 在 4°C 条件下保存待用.

1.3 实验方法

1.3.1 片剂制作

采用干粉直压法制备复合片剂, 工艺简单、成本低廉, 所得材料便于储存和运输, 并且可以避免原材料在制剂过程中遇水发生反应造成过早消耗的问题. HPMC 是一种环境友好, 生物可降解的纤维素混合醚, 遇水可溶胀成介于固液之间的一种三维网络状凝胶结构, 被广泛地用作缓释制剂控速^[11]. 净水污泥中含有大量的铁铝盐, 是一种理想的除磷材料, 并具有以废治污的双重作用^[12]. 经灼烧改性后的净水污泥, 对磷的吸附性能大大提高, 一些学者研究了其作为底泥覆盖材料控制底泥内源释放的作用^[13, 14], 效果良好. Northup 等^[15]的研究证实了在碱性条件下 CaO_2 类芬顿 (modified Fenton) 反应发生的可能性, 徐焱等^[16]的研究发现在 Fe^{2+} 存在的情况下可以显著提高 CaO_2 对磷的去除率. 为了进一步探究 Fe^{2+} 添加对 CaO_2 释氧控磷作用的影响, 分别制成 2 种不同配方的过氧化钙复合片剂, 其中 A 片剂不含 FeSO_4 , B 片剂中 FeSO_4 按照 CaO_2 含量等比例投加. 将复合片剂各粉末原料按表 1 所列比例均匀混合, 加入手摇压片机中一次性冲压成片. 成型片剂为灰黑色颗粒, 如图 1 所示. 片剂外形尺寸参数见表 1.

表 1 过氧化钙复合片剂主要成分质量比及基本数据

Table 1 Quality ratio of main composition and base data of CPCTs

片剂类别	主要成分质量分数/%				颗粒均值			
	CaO_2	灼烧净水污泥	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	HPMC	平均粒径/mm	平均厚度/mm	平均质量/g	平均硬度/N
A	46.67	23.33	—	30	6	5	0.24	158.5
B	42.60	21.30	6.10	30	6	5	0.24	158.5

1.3.2 片剂材料吸附性能表征

在一系列容量为 100 mL 的锥形瓶中, 分别加入 0.1 g A 片剂和 0.1 g B 片剂粉末和 50 mL 初始浓度为 0.00、30.00、50.00、80.00、100.00、150.00、250.00 和 400.00 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KH_2PO_4 溶液, 置于 25°C 恒温振荡器中, 以 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速振荡 24 h, 离心 ($3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 10 min) 后取上清液, 过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜后, 采用钼酸铵分光光度法测定剩余磷酸盐浓度, 用 Langmuir 和 Freundlich 吸附等温模型分别拟合 2 种片剂的吸附数据并绘制等温吸附曲

线. 拟合方程如下.

Langmuir 模型:

$$q = Q_m \cdot K_L \cdot c_e / (1 + K_L \cdot c_e) \quad (1)$$

Freundlich 模型:

$$q = K_F \cdot c_e^n \quad (2)$$

式中, q 为磷吸附量; c_e 为磷平衡浓度; Q_m 为理论最大吸附量; K_L 和 K_F 为平衡吸附系数; n 为常数.

1.3.3 底泥模拟实验

水体-底泥环境模拟实验装置如图 2 所示. 由有机玻璃管 ($\varphi 8.5 \text{ cm}$)、橡胶底塞和 Rhizon 采样管等



图 1 过氧化钙复合片剂

Fig. 1 Calcium peroxide composite tablets (CPCTs)

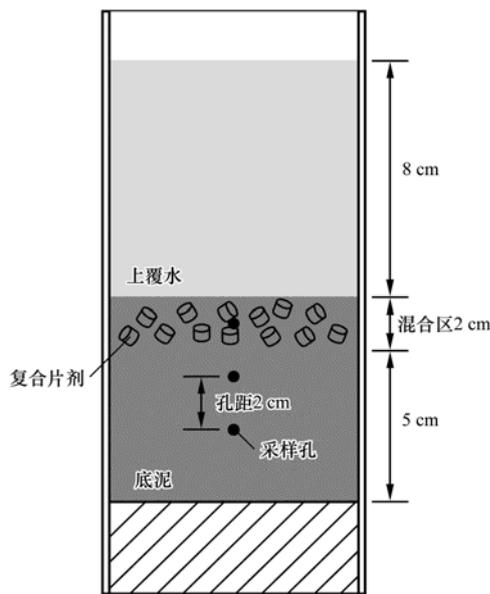


图 2 水体-底泥环境模拟实验装置示意

Fig. 2 Water-sediment environment simulated experimental device

组成。实验装置上部敞开与大气接触,底部用橡胶底塞密封。根据投加材料不同,本实验共设 3 个实验组 (A、B 组) 和 1 个对照组 (C 组), A 组装置混合投加 A 片剂, B 组装置混合投加 B 片剂。将采集的底泥原泥过 100 目筛后填至 5 cm 高 (对照组直接填至 7 cm), 振荡充实; A、B 实验组分别将 5 g 过氧化钙复合片剂与约 100 g 底泥混合均匀 (混合比 $\approx 1:20$), 覆盖于底泥上方, 形成厚度约 2 cm 的材料混合区域, 再次振荡充实至泥面平整。将原水过 0.45 μm 滤膜, 除去水中颗粒杂质; 将经培养的藻液原液加入滤后原水中, 配制至单位体积水样藻类数量为暴发状态 (约 $10^8 \text{ unit} \cdot \text{L}^{-1}$)^[17], 作为实验水体; 将配制好的实验水体沿着侧壁用虹吸管缓缓注入装置中, 至水深 8 cm 止, 在此过程中注意避免底泥悬浮。于泥水界面下 1 cm 起始设置 3 个间隙水采样孔, 孔距为 2 cm, 采样孔在实验前用防水胶带密封, 装入底泥和上覆水后插入 Rhizon 间隙水采样管。每天取样后向装置中及时用配制的实验水体补充消耗的上覆水至

刻度线。

本实验共进行 15 d, 每隔 1 d 测定上覆水 DIP 浓度以及底泥间隙水 DIP 和 Fe^{2+} 浓度, 每隔 2 d 测定底泥上覆水 pH、DO 和 Chl-a 浓度。实验结束后将底泥表层切分为 3 层 (I 层 0~2 cm、II 层 2~4 cm 和 III 层 4~6 cm), 分析各层的形态磷含量以及微生物活性。

1.4 分析方法

底泥上覆水 pH 和 DO 采用 WTW Multi3620 IDS 便携式多参数水质测定仪测定; Chl-a 浓度采用 PHYTO-PAM 浮游植物荧光仪测定; 过氧化钙复合片剂硬度采用 YHKC-2A 型颗粒强度测定仪测定。

本实验期间采集的水样经 0.45 μm 滤膜过滤, 滤后水样 DIP 浓度采用钼酸铵分光光度法测定; 底泥微生物活性采用 FDA 荧光分析法测定^[18]; 底泥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^[19,20]。

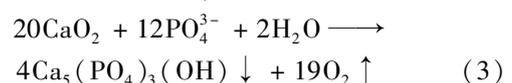
① $\text{NH}_4\text{Cl-P}$: 用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NH}_4\text{Cl}$ 提取, 包括 FeOOH 、 CaCO_3 结合态磷等弱吸附态磷; ② BD-P : 用 $0.11 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4/\text{NaHCO}_3$ 提取, 包括 Fe、Mn 结合态磷等对低氧化还原电位敏感的磷; ③ Al-P : 用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaOH}$ 提取, 包括 Al 结合态磷等易与 OH^- 交换的磷; ④ NaOH-nrP : 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, 包括微生物磷等有机形态磷; ⑤ Ca-P : 用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$ 提取, 包括磷灰石等对酸性环境敏感的磷; ⑥ Res-P : 底泥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, 包括难提取有机磷和低活性无机磷。各形态磷浓度采用钼酸铵分光光度法测定。

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 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 材料吸附性能

CaO_2 在常温下拥有很强的除磷能力, 对磷酸盐的吸附作用高度符合 Langmuir 模型, 除磷行为主要为单分子层化学吸附^[9], 测得理论最大吸附量为 $269.14 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。在碱性环境下, Ca^{2+} 与 PO_4^{3-} 反应生成稳定的羟基磷酸钙沉淀, 反应化学式如下^[21]:



灼烧净水污泥对磷酸盐的吸附作用较好地符合 Langmuir 和 Freundlich 两种模型, 除磷行为也以单

分子层化学吸附为主^[12],测得理论最大吸附量为 $6.31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. 灼烧净水污泥主要由其中的铁、铝元素起主要作用,吸附的磷主要以非磷灰石无机磷的形态存在^[12,13,22].

用 Langmuir 模型和 Freundlich 模型对 2 种片剂吸附数据的拟合结果如图 3 所示,各拟合参数见表 2. 从拟合参数 R^2 看,A 和 B 片剂对磷酸盐的吸附效果均很好地符合两种模型,从而可知复合片剂对磷酸盐的吸附可能受到诸多因素的影响,吸附行为和机制较为复杂^[23]. 根据 Langmuir 模型可以得出,A 和 B 两种片剂对磷具有良好的吸附能力,其理论最大吸附量分别为 $110.908 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $106.390 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$;可以肯定的是,这一数值远大于灼烧净水污泥对磷的理论最大吸附量 ($6.31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),按比例折算后,略低于纯 CaO_2 对磷的理论最大吸附量 ($269.14 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$),说明片剂对磷的吸附主要以 CaO_2 为主,灼烧净水污泥为辅. 根据 Freundlich 模型拟合数据 n 值可以得出,2 种片剂的吸附行为均较易发生 ($n < 0.5$).

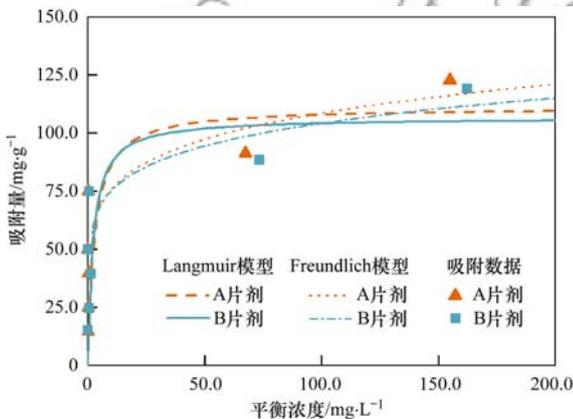


图 3 磷吸附等温模型拟合曲线

Fig. 3 Phosphorus isothermal adsorption model fitting curve

表 2 片剂对磷吸附等温模型拟合参数
Table 2 Phosphorus isothermal adsorption model fitting parameters of CPCTs

片剂	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	Q_m	K_L	R^2	K_F	n	R^2
A	110.908	0.346	0.986	52.614	0.157	0.994
B	106.390	0.446	0.987	53.980	0.143	0.993

2.2 上覆水 pH、DO 和 Chl-a 浓度的变化规律

图 4 描述了上覆水 pH 的变化情况. 所有组别上覆水在实验过程中均呈碱性 ($\text{pH} > 7.00$). 经检验,实验组和对照组上覆水 pH 值存在显著差异 ($P < 0.001$),与 C 组相比,A、B 组上覆水 pH 值均显著提高 ($P < 0.001$);A、B 组间相比,添加 FeSO_4 对上覆水 pH 值的变化影响不显著 ($P = 0.773$). A、B 组上覆水 pH 在实验伊始维持在一个较高水平 ($\text{pH} >$

9.50),在第 3~6 d 升至 $\text{pH} > 10$ 然后下降;与之相比,C 组 pH 在第 6 d 达到最高值 8.91,变化幅度相对平缓. 据此分析,导致 pH 上升的主要原因是 CaO_2 遇水反应生成强碱 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,溶于水电离出 OH^- ,从而导致水体呈碱性,与单独投加 CaO_2 产生的 pH 变化一致^[3,8,24].

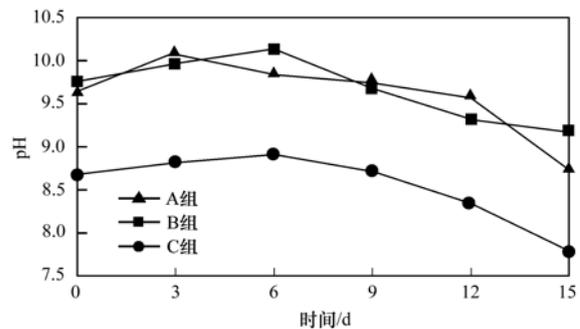


图 4 复合片剂投加对上覆水 pH 的影响

Fig. 4 Changes of pH in overlying water by adding CPCTs

图 5 描述了上覆水 Chl-a 的变化情况. 分析可知,从实验第 2 d 起,同 C 组相比,A、B 组 Chl-a 浓度均出现了显著下降 ($P = 0.026$ 和 0.003),分别降低了 42.75% 和 60.82%. B 组中 Chl-a 浓度降低得更快,表明添加 FeSO_4 对藻类的抑制作用更快. 这一方面是由于添加 CaO_2 吸附了水体中 P,导致藻类缺乏必要的营养元素,另一方面,对于 B 组,可能是由于 Fe^{2+} 作为触媒参与了 CaO_2 类芬顿反应,增强了氧化性从而更快地抑制了藻类生长^[21].

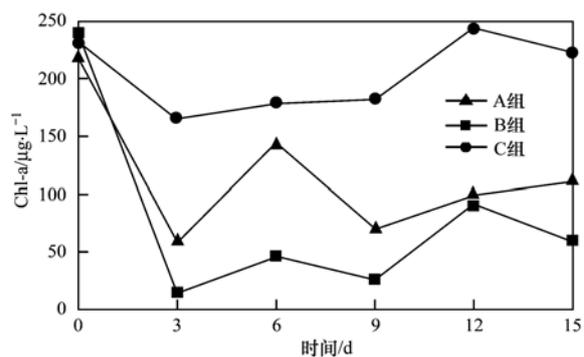


图 5 复合片剂投加对上覆水叶绿素 a 的影响

Fig. 5 Changes of Chl-a in overlying water by adding CPCTs

图 6 描述了上覆水 DO 的变化情况. 经分析,实验组和对照组上覆水 DO 值出现了显著差异 ($P = 0.014$). 与对照组相比,A、B 组上覆水溶解氧浓度显著提高 ($P = 0.018$ 和 0.007),分别提高了 53.73% 和 63.30%,A、B 组的组间 DO 差异不显著 ($P = 0.641$).

2.3 上覆水和间隙水 DIP 的变化规律

复合片剂投加对底泥上覆水和间隙水的影响变化如图 7 所示,A、B 组上覆水 DIP 浓度发生显著变

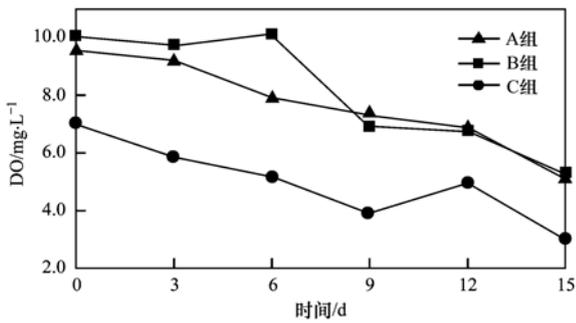


图6 复合片剂投加对上覆水 DO 的影响

Fig. 6 Changes of DO in overlying water by adding CPCTs

化($P = 0.031$), 分别降低了 54.93% 和 25.11%, A 组 DIP 下降更明显. 对于底泥间隙水来说, 2 组浅表层(I 和 II 层, 0~4 cm) DIP 产生了显著变化($P < 0.001$ 和 $P = 0.004$). 对 I 层来说, DIP 浓度分别显著降低了 74.81% 和 65.66%; 对 II 层来说, B 组 DIP 的变化显著($P = 0.002$), 与 C 组相比, 其 DIP 平均浓度从 $3.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降至 $2.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 相对降低了 46.23%, 而 A 组 DIP 变化不显著($P = 0.986$), 仅为 4.89%. 对 III 层来说, 2 组 DIP 变化均不显著($P = 0.778$).

结合本文 2.1 节对材料吸附性能的分析, 可知复合片剂对 DIP 作用的原理至少有 3 个方面: ① CaO_2 对水中磷酸盐的化学吸附作用[化学式(3)]; ② CaO_2 氧化底泥, 改善了底泥本身的吸附能力, 促进底泥对磷的吸附^[25]; ③ 片剂中的 Fe、Al 化合物对磷的吸附^[12,13]. 在上覆水, A 组对 DIP 控制效果较好, 但 B 组对 DIP 的控制作用有限; 在 II 层间隙水则相反, B 组的控制效果非常明显, 而 A 组控制作用微弱. 一个较合理的推测是: 在好氧环境下,

金属离子易被氧化为金属氧化物, 与水中 DIP 结合成相应的结合态磷, 从而固定了水中 DIP. CaO_2 兼具释氧性和氧化性^[1,2,26], 在单纯 CaO_2 的作用下, 其与水反应释放出氧气向上覆水迁移, 使得混合层及混合层以上的厌氧条件得以改善, 转变为好氧环境, 从而达到去除上覆水和 I 层间隙水 DIP 的目的^[8]. 而在 FeSO_4 的作用下, CaO_2 的释氧性被削弱, 使得向上迁移的氧气减少, 从而对上覆水 DIP 的控制能力减弱, CaO_2 更多地通过 $\text{CaO}_2/\text{Fe}^{2+}$ 反应体系, 一方面通过类芬顿反应为下层底泥提供了更强的氧化环境^[15,27], 另一方面通过形成更多的 Ca、Fe 络合物^[16], 从而对 II 层 DIP 控制能力大大增强.

2.4 底泥形态磷及微生物活性的变化规律

本实验结束后分层底泥磷形态分析结果如图 8 所示. 在底泥磷的各种形态中, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 和 Al-P 在 I 和 II 层之间的变化最为显著. 与 C 组相比, 对于 I 层, A、B 组 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 含量占总形态磷的比值分别升高了 16.87% 和 13.11% ($P < 0.001$ 和 $P < 0.001$), Al-P 占总形态磷的比值分别下降了 7.58% 和 13.91% ($P = 0.012$ 和 $P = 0.006$); 另外, NaOH-nrP 分别增加了 -3.98% 和 2.18%, Ca-P 分别增加了 3.05% 和 1.54%. 对于 II 层, A、B 组 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 相应占比分别提高了 12.99% 和 11.02% ($P < 0.001$ 和 $P = 0.002$), Al-P 相应占比分别下降了 9.86% 和 7.28% ($P = 0.004$ 和 $P = 0.058$), NaOH-nrP 分别增加了 -2.99% 和 1.55%, Ca-P 占比分别增加了 -0.30% 和 -1.74%. 对于 III 层, 实验组和对照组各形态磷占比无显著差异.

结果表明, A、B 组的 I 和 II 层 Al-P 占 TP 比例

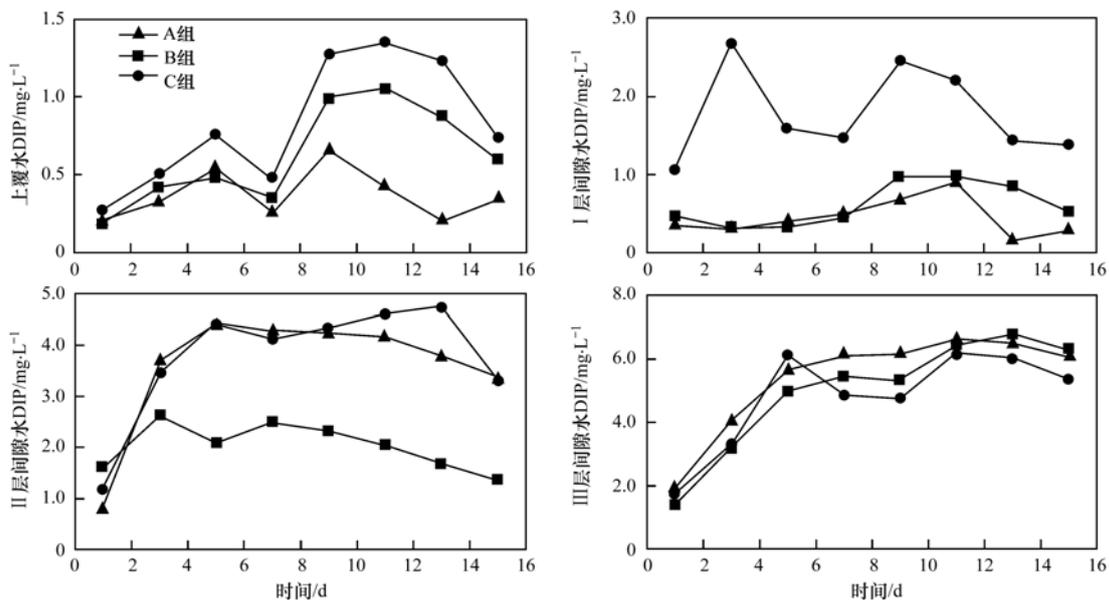


图7 复合片剂投加对上覆水和间隙水 DIP 的影响

Fig. 7 Changes of DIP in overlying water and interstitial water by adding CPCTs

大大降低, I 层 BD-P 也有所降低, 这是因为 BD-P 和 Al-P 对 pH 较为敏感. 片剂投加后使得周围形成碱性环境, OH^- 同 BD-P 和 Al-P 中的磷酸盐阴离子具有竞争作用, 从而诱使磷酸盐释放^[28], 而之后又与片剂中 FeOOH 以及 CaCO_3 等结合, 形成弱吸附态磷^[20], 表现为 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占比大大提高. 另一方面, 据间隙水 DIP 变化可以推测, $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 中除了一部分被重新结合的“BD-P”和“Al-P”之外, 还应该包含一部分与间隙水 DIP 结合形成的结合态磷. NaOH-nrP 的变化趋势表明, 相较于 A 组来说, B 组 I 和 II 层底泥中有机磷含量提高, 具体机制尚不明确, 但由于 NaOH-nrP 主要包含微生物磷, 可以肯定的是, B 片剂对微生物磷的形成起了一定的积极作用. I 层 Ca-P 在不同组别之间有明显变化, 而在 II、III 层变化不明显, 推测是由于 I 层作为片剂与底泥的紧密接触层, 片剂中更多的 CaO_2 参与对磷的化学吸附作用, 形成了稳定的 Ca-P ^[20].

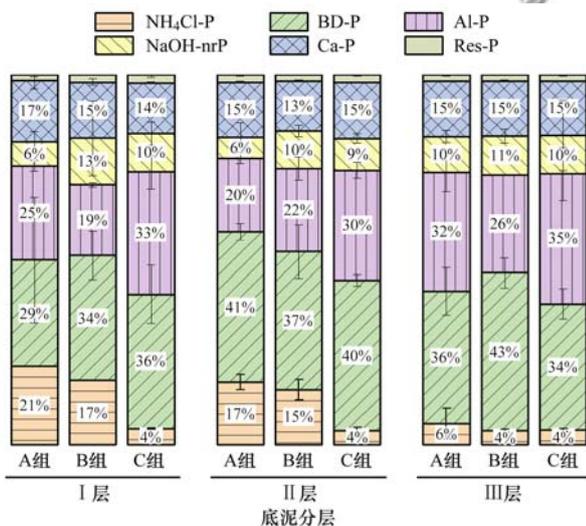


图 8 复合片剂投加对底泥形态磷影响

Fig. 8 Changes of concentration of various phosphorus fractions in sediment by adding CPCTs

图 9 显示 A、B 组底泥微生物活性均有所提高, 这与之前一些研究结果一致^[29-31]. 在 I 层, 相较于 C 组, A、B 组的微生物活性均显著提高了 6 倍以上. 随着底泥深度的增加, 实验组和对照组底泥微生物活性的差异逐渐减小, 在 II 层, A 组微生物活性提高了 4.74 倍, 而 B 组仅提高了 1.84 倍, 究其原因, 是因为对底泥微生物活性的提高起作用的是 CaO_2 的释氧性^[32], 而在 II 层, 由于 O_2 大多上浮, 很难向下渗透; 另一方面, B 组微生物活性提高程度低于 A 组, 是由于 Fe^{2+} 存在增强了 CaO_2 氧化性, 从而在一定程度上削弱了 CaO_2 释氧性. 另外, 值得指出的是, 片剂投加均未使各层微生物活性降低, 即未对微生物活性产生负面影响.

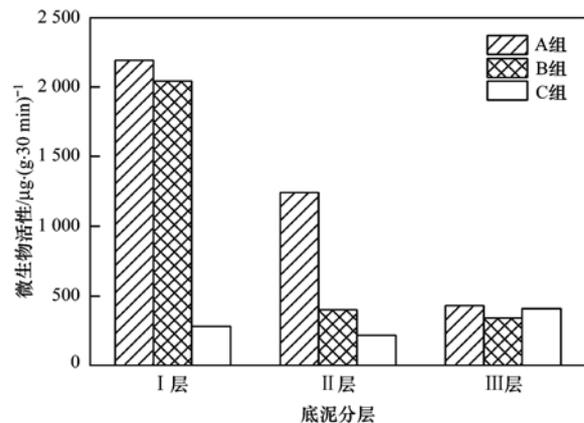


图 9 复合片剂投加对底泥微生物活性的影响

Fig. 9 Changes of microbial activity in sediments by adding CPCTs

3 结论

(1) 2 种片剂均可有效吸附水中磷酸盐, 其理论最大吸附量分别为 $110.908 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $106.390 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

(2) A、B 组上覆水 DO 分别增加了 53.73% 和 63.30%, Chl-a 浓度分别降低了 42.75% 和 60.82%, 说明 2 种片剂投加均显著提高了上覆水溶解氧, 抑制了藻类生长, 但也一定程度上提高了覆水 pH (均值由 8.36 提至 9.20 左右).

(3) A 组上覆水 DIP 降低了 54.93%, 明显优于 B 组的 25.11%; A、B 组 I 层 DIP 降低了 74.81% 和 65.66%; B 组 II 层间隙水 DIP 降低了 46.23%, 明显优于 A 组的 4.89%, 说明 A、B 片剂投加均可有效降低间隙水中 DIP, 并且 B 片剂对较深层 DIP 控制效果更好.

(4) A、B 组 I 层底泥 $\text{NH}_4\text{Cl-P}$ 占 TP 比例分别显著提高了 16.87% 和 13.11%, Al-P 占 TP 比例分别显著下降了 7.58% 和 13.91%, Ca-P 比例增加了 3.05% 和 1.54%; B 组 NaOH-nrP 比例增加了 2.18%. 说明 2 种片剂投加有助于弱吸附态磷和钙磷的形成, 并且 B 片剂还有利于有机磷的形成.

(5) A、B 组 I 层底泥微生物活性提高了 6 倍以上, A 组 II 层仍提高了 4.74 倍, B 组 II 层仅提高了 1.84 倍, 说明 2 种片剂均可显著提高底泥微生物活性, 并且 A 片剂对较深层底泥微生物活性提高更显著.

参考文献:

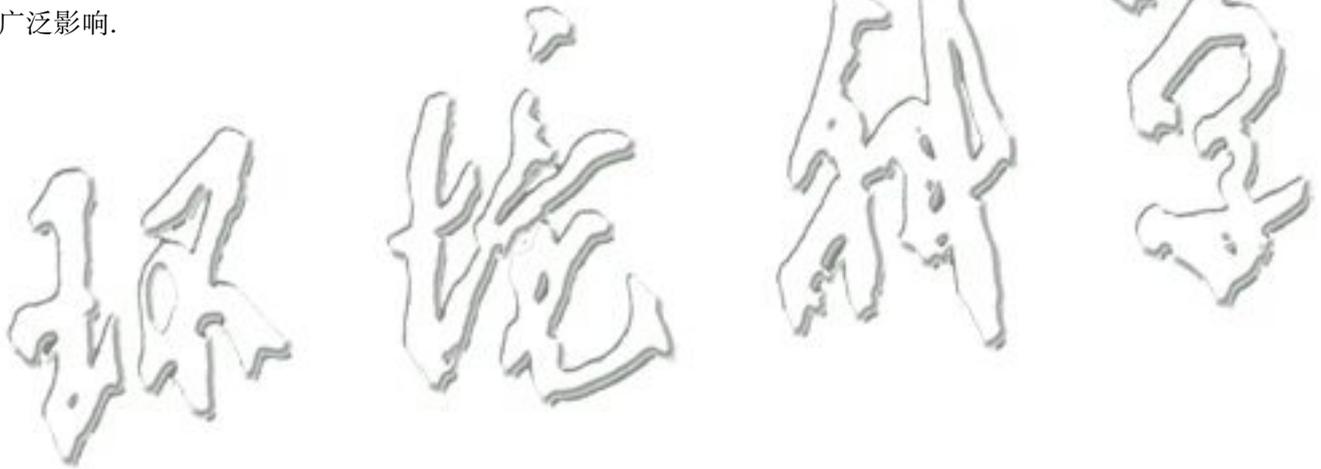
- [1] Lu S G, Zhang X, Xue Y F. Application of calcium peroxide in water and soil treatment: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 337: 163-177.
- [2] 李亮, 武成辉, 陈涛, 等. 过氧化钙在城镇黑臭水体修复中的作用 [J]. 化工进展, 2016, 35(S2): 340-346.
- Li L, Wu C H, Chen T, et al. Effect of calcium peroxide on the restoration of black and odorous water in towns [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(S2): 340-346.

- [3] Nykänen A, Kontio H, Klutas O, *et al.* Increasing lake water and sediment oxygen levels using slow release peroxide [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **429**: 317-324.
- [4] Kao C M, Chen S C, Wang J Y, *et al.* Remediation of PCE-contaminated aquifer by an in situ two-layer biobarrier: laboratory batch and column studies[J]. *Water Research*, 2003, **37**(1): 27-38.
- [5] 刘涉江, 刘秀丽, 王少博. CPC/CaO₂ 氧缓释复合材料的制备及其释氧性能探讨[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(5): 971-974.
Liu S J, Liu X L, Wang S B. Preparation and oxygen release properties of an oxygen slow-release composite (CPC/CaO₂) [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(5): 971-974.
- [6] 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.
- [7] 董春华, 罗尊长, 苏以荣, 等. 一种以过氧化钙为基质凹凸棒土为包膜的缓释氧化剂及制备方法[P]. 中国专利: CN201610228634.1, 2016-08-03.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Xu Y, Han F E, Li D P, *et al.* Transformation of internal sedimentary phosphorus fractions by point injection of CaO₂[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **343**: 408-415.
- [11] 吴军虎, 任敏. 羟丙甲基纤维素对土壤水分入渗特性及水稳性团聚体的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, **32**(6): 66-71, 235.
Wu J H, Ren M. Effect of Hydroxypropyl Methyl Cellulose on soil water movement and water stable aggregate [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(6): 66-71, 235.
- [12] 刘启迪, 周真明, 张红忠, 等. 煅烧改性净水厂污泥的除磷特性[J]. *环境化学*, 2019, **38**(2): 325-333.
Liu Q D, Zhou Z M, Zhang H Z, *et al.* Phosphorus removal characteristics of calcined water treatment plant sludge [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(2): 325-333.
- [13] 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, **38**(5): 1957-1964.
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, **38**(5): 1957-1964.
- [14] 杨志敏. 净水厂污泥资源化制备底泥覆盖材料[D]. 泉州: 华侨大学, 2016. 39-42.
- [15] Northup A, Cassidy D. Calcium peroxide (CaO₂) for use in modified Fenton chemistry[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 1164-1170.
- [16] 徐垚, 李大鹏, 韩菲尔. CaO₂ 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 CaO₂ synchronously oxidation Fe(II) for phosphate removal[J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, **38**(3): 21-24.
- [17] 张远, 郑丙辉, 富国, 等. 河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(6): 1016-1021.
Zhang Y, Zheng B H, Fu G, *et al.* On the assessment methodology and standards for nutrition status in channel type reservoirs based on zoning of eutrophication sensitivity[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(6): 1016-1021.
- [18] 王佳佳, 周桦, 张进, 等. 土壤样品中微生物活性的荧光分析方法[J]. *环境化学*, 2012, **31**(10): 1637-1644.
Wang J J, Zhou H, Zhang J, *et al.* Fluorescence determination of microbial activity in soil sample [J]. *Environmental Chemistry*, 2012, **31**(10): 1637-1644.
- [19] Psenner V R, Pucsko R, Sager M. Die fraktionierung organischer und anorganischer phosphorverbindungen von sedimenten [J]. *Archiv Für Hydrobiologie, Supplement*, 1984, **70**(1): 111-155.
- [20] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [21] Cho I, Lee K. Effect of calcium peroxide on the growth and proliferation of *Microcystis aeruginosa*, a water-blooming cyanobacterium[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2002, **7**(4): 231-233.
- [22] 李书文, 周真明, 杨思明, 等. 煅烧改性净水厂污泥对底泥内源磷释放的控制效果[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(4): 961-968.
Li S W, Zhou Z M, Yang S M, *et al.* The efficiency of controlling the phosphorus release from the sediment using calcined modified water purification plant sludge (C-WTPS) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(4): 961-968.
- [23] 庞燕, 金相灿, 王圣瑞, 等. 长江中下游浅水湖沉积物对磷的吸附特征——吸附等温线和吸附/解吸平衡质量浓度[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(S1): 18-23.
Pang Y, Jin X C, Wang S R, *et al.* Characters of phosphorus sorption in sediment of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: sorption isotherms and adsorption-desorption equilibrium mass concentration [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(S1): 18-23.
- [24] 徐垚, 李大鹏, 韩菲尔, 等. CaO₂ 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 CaO₂ [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2836-2842.
- [25] 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*, 2010, **247**: 119135.
- [26] 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.
- [27] Pan Y, Su H R, Zhu Y T, *et al.* CaO₂ based Fenton-like reaction at neutral pH: accelerated reduction of ferric species and production of superoxide radicals[J]. *Water Research*, 2018, **145**: 731-740.
- [28] 高湘, 李妍, 何怡. 湖泊底泥磷释放及磷形态变化[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(7): 3350-3354.
Gao X, Li Y, He Y. Phosphorus release and phosphorus form change in lake sediments[J]. *Chinese Journal of Environmental*

- Engineering, 2015, **9**(7): 3350-3354.
- [29] Li Y M, Wang J, Zhang A, *et al.* Enhancing the quantity and quality of short-chain fatty acids production from waste activated sludge using CaO_2 as an additive[J]. *Water Research*, 2015, **83**: 84-93.
- [30] Liu S J, Jiang B, Huang G Q, *et al.* Laboratory column study for remediation of MTBE-contaminated groundwater using a biological two-layer permeable barrier [J]. *Water Research*, 2006, **40**(18): 3401-3408.
- [31] Cassidy D P, Irvine R L. Use of calcium peroxide to provide oxygen for contaminant biodegradation in a saturated soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, **69**(1): 25-39.
- [32] 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.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2019年11月19日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续18次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.



CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Han, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)