ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第10期
2016年10月15日

目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用 …… 孙兆彬,廖晓农,王占山,李梓铭,赵秀娟,花丛(3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 …… 董群,赵普生,陈一娜(3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 …… 刘丹,解强,张鑫,王海林,闫志勇,杨宏伟,郝郑平(3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 …… 徐志荣,姚轶,蔡卫丹,李嫣,许明珠,王浙明(3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究 … 郭茜,邵龙义,王文华,侯聪,赵承美,幸娇萍,马施民(3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 …… 孙焰,祁士华,张莉,邢新丽,杨丹,胡天鹏,瞿程凯(3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性 …… 王振,余益军,徐圃青,李艳萍,夏京,殷磊(3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 …… 杨懂艳,刘保献,石爱军,张大伟,丁萌萌,周健楠,富佳明,景宽(3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 …… 刘刚,黄柯,李久海,徐慧(3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 …… 樊筱筱,蒋靖坤,张强,李振华,何立强,吴烨,胡京南,郝吉明(3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 …… 邢辉,段树林,黄连忠,韩志涛,刘勤安(3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 …… 张文娟,王利军,王丽,史兴民,卢新卫(3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 …… 段振亚,苏海涛,王凤阳,李智坚,李韶璞,王书肖(3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 …… 陈瑞,陈华,王定勇,向玉萍,申鸿(3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 …… 廖昱,孙玉川,沈立成,梁作兵,王尊波(3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 …… 王成龙,邹欣庆,赵一飞,李宝杰(3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 …… 何晓丽,吴艳宏,周俊,邴海健(3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 …… 钱锋,吴婕赟,于会彬,宋永会,张美,孔令昊,何孟常(3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 …… 何小松,张慧,黄彩红,李敏,高如泰,李丹,席北斗(3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 …… 常海东,金鹏康,付博文,李雪兵,贾锐珂(3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 …… 丁帅,王圣瑞,张蕊,肖焱波,焦立新,李乐,王忠诚,尹诗诗(3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 …… 黄雪娇,石纹豪,倪九派,李振轮(3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 …… 焦平金,许迪,朱建强,于颖多(3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 …… 李洁,肖琳(3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 …… 王文东,刘荟,马翠,韩雨,常妮妮(3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性 …… 宣雍祺,周丽,邓慧萍,蔡宙,李大鹏,刘刚(3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 …… 赵园园,张玥,李素英,石宝友,李贵伟,孙改清(3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 …… 刘伟,蔡广强,卢小艳,刘丽君,张金松,刘嘉祺,曲莹(3877)
O_3/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 …… 陈傲蕾,常凤民,汪翠萍,徐恒,吴静,左剑恶,王凯军(3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 …… 胡金梅,虞磊,黄天寅(3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 …… 孙秀梅,宋广清,席宏波,周岳溪,牛远方(3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 …… 王晓玲,员东丹,白莉,李紫棋,余勇,秦旭东,张晓旭,赵可(3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 …… 付璐璐,甄毓,贺惠,张玉,米铁柱(3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 …… 蒙小俊,李海波,曹宏斌,盛宇星(3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 …… 刘洋,黄懿梅,曾全超(3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 …… 胡小兵,饶强,唐素兰,姜晶,谢瑞桃,郝文静,钟梅英(3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 …… 黄福义,李虎,安新丽,欧阳纬莹,苏建强(3949)
菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 …… 谢柄柯,张玉,王晓伟,孙超越,周集体(3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 …… 徐珊珊,侯朋福,范立慧,薛利红,杨林章,王绍华,李刚华(3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 …… 曾清苹,何丙辉,李源,夏力文,杨龙龙,邓雪梅,李川(3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 …… 张文娟,佘冬立,Gamareldawla H. D. Agbna,夏永秋(3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 …… 王群艳,吴小红,祝贞科,袁红朝,隋方功,葛体达,吴金水(3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 …… 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 …… 王英杰,邹佳玲,杨文弢,周航,廖柏寒(4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 …… 周贵宇,姜慧敏,杨俊诚,张建峰,张水勤,梁雷(4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 …… 宋贤威,赵秀兰,张进忠,胡梦坤,徐艳昭,王明禹(4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 …… 秦余丽,熊仕娟,徐卫红,赵婉伊,王卫中,陈永勤,迟荪琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 …… 董冰冰,陈友媛,惠红霞,陆维佳,杨秀卿,刘逸凡(4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 …… 黎敏丹,郑国贸,万祎,胡建英(4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 …… 宿程远,郑鹏,阮祁华,覃菁菁,卢宇翔,李俊兵(4062)
《环境科学》征订启事(3827) 《环境科学》征稿简则(4053) 信息(3736, 3930, 4043)

紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制

黄雪娇,石纹豪,倪九派,李振轮*

(西南大学资源与环境学院,土壤多尺度界面过程与调控重点实验室,重庆 400715)

摘要: 选取重庆地区分布面积较广的 3 种紫色母岩(飞仙关组、蓬莱镇组和遂宁组),和 2 种经众多研究证明可有效控制底泥污染物释放的岩石(石灰石和方解石)作为活性覆盖材料,进行底泥覆盖模拟实验,研究紫色母岩覆盖层对底泥磷素释放的控制效果及机制. 结果表明, 3 种紫色母岩覆盖层对底泥总磷向上覆水体释放的抑制作用较强,远好于方解石与石灰石 ($P < 0.05$). 其中,飞仙关组紫色母岩覆盖层对底泥总磷向上覆水体释放的抑制效果最好,抑制率为 94.4%. 5 种覆盖材料均可促进底泥总磷的释放与转化,显著促进底泥 OP 原位转化为 Ca-P,而 3 种紫色母岩覆盖层更有利于底泥释放出的磷转化为无机磷和有机磷. 同时,5 种覆盖材料均会改变底泥及上覆水体微生物的群落结构,其中 PLFA16:0 标记的细菌数量与上覆水体的总磷含量呈显著负相关.

关键词:底泥; 紫色母岩; 覆盖; 磷释放; 抑制

中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)10-3835-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.10.022

Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments

HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun*

(Key Laboratory of Soil Multiscale Interface Process and Control, College of Resources and Environment, Southwestern University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In order to study the efficiency and mechanism of capping with purple parent rocks to control phosphorus release from sediments, three kinds of purple parent rocks (Fei-xian-guan Formation, Peng-lai-zhen Formation and Sui-ning Formation) which distribute widely in Chongqing, and two types of rock (limestone and calcite) which have been found to effectively control the release of phosphorus from sediments, were selected as active covering materials to cap the sediments to conduct simulation experiment. The results indicated that: all three kinds of purple parent rocks showed strong inhibition of total phosphorus release from sediments to the overlying water, far better than limestone and calcite ($P < 0.05$), and the highest removal rate of total phosphorus was 94.4% in the disposal of Fei-xian-guan Formation. Those five kinds of covering materials could promote the release and transformation of total phosphorus in sediments, which could significantly promote the in situ conversion of OP to Ca-P, while the three kinds of purple parent rocks were more conducive to convert the released phosphorus into inorganic phosphorus and organic phosphorus. At the same time, those five kinds of covering materials could also change the microbial community structure in sediments and overlying water, and the numbers of bacteria (labeled as PLFA16:0) were significantly negatively correlated with the content of total phosphorus in the overlying water.

Key words: sediments; purple parent rocks; capping; phosphorus release; inhibition

磷是生物体生长最基本的营养元素之一,也是造成地表水体富营养化的主要营养元素[1]. 水体磷含量过高会导致水生植物以及藻类大量生长繁殖,严重破坏水体生态平衡,导致水体富营养化. 因此,为防止水体富营养化首先要控制水体磷元素的含量. 而随着外源污染的控制,底泥中磷的释放已成为导致水体磷含量过高的最主要因素[2]. 所以,只有采取合理技术抑制底泥磷的释放才能从根本上解决水体磷元素超标问题,防治水体富营养化.

现有的治理技术主要分为原位控制技术及异位控制技术. 原位处理技术包括化学控制技术[3,4]、生物控制技术[5~7]及原位覆盖技术[8~11]; 异位控制技术为底泥疏浚处理技术[12,13]. 异位控制技术费用较高,疏浚效果不确定; 化学控制技术对生态系统存在潜在威胁,且技术要求较高,易受到气候、底泥中微生物及水生动物的影响; 生物控制技术具有投资小、操作简便、无二次污染等优点,但生物修复需要周期较长,且易受环境因素影响; 原位覆盖技术具有控制效果好、有效性长等优点,已成为底泥污染物治理的主要方法之一. 而选择低成本、易操作的高效活性覆盖材料将决定原位覆盖的实际效用.

紫色母岩是广泛分布于西南地区的一种沉积

收稿日期: 2016-03-02; **修订日期**: 2016-05-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAJ11B03); 重庆市科研创新项目(CYS16080)

作者简介: 黄雪娇(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤微生物,E-mail: 1548217611@qq.com

* 通讯联系人,E-mail: lizhlun4740@sina.com

岩,其矿物成分比砾石复杂,含有较多的黏粒矿物,风化形成的紫色土磷含量低且相对不易淋失[14],能吸附水体中的磷素[15],且已有研究表明利用紫色母岩作为基质,可有效去除微污染景观水体中的总磷[16]. 因此,本研究选择西南地区普遍存在的飞仙关组、蓬莱镇组、遂宁组这3种紫色母岩,和2种经众多研究证明可有效控制底泥磷释放的岩石——石灰石和方解石[17~19]作为活性覆盖材料,室内模拟底泥生态环境,研究3种紫色母岩和2种常用岩石覆盖层对底泥总磷释放的控制效果及机制,以期获得一种可高效抑制底泥污染物释放的廉价紫色母岩,解决富营养化问题.

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

活性覆盖材料包括石灰石、方解石、以及3种紫色母岩(蓬莱镇组、飞仙关组、遂宁组). 石灰石采自四川省泸州市泸县境内,方解石采自四川省泸州市境内方解石场. 飞仙关组紫色母岩采自重庆市北碚区鸡公山,遂宁组和蓬莱镇组紫色母岩采自重庆市巴南区界石镇与南岸区长生镇之间的倒置低山区. 紫色母岩均采集自地表10 cm以下地区. 各活性覆盖材料均置于阴凉通风处干燥后,研磨,过60目筛备用. 覆盖材料的基本理化性状包括全氮、全磷、有机质及pH,主要化学成分包括SiO_2、Al_2O_3、CaO等,所有指标均参照文献[20]进行测定,结果分别见表1、表2. 底泥采自四川省玉龙湖中心部位,水底6~7m处. 样品在实验当天采集,密封保存送往实验室进行底质分析和底泥总磷模拟释放控制实验. 供试底泥的初始pH、总氮、总磷、有机质分别为7.0、2.53 $g\cdot kg^{-1}$、1.29 $g\cdot kg^{-1}$、212.95 $g\cdot kg^{-1}$.

表1 活性覆盖材料的基本性状

Table 1 Basic properties of the active barrier material

活性覆盖材料	采样地点	全氮/$g\cdot kg^{-1}$	全磷/$g\cdot kg^{-1}$	有机质/$g\cdot kg^{-1}$	pH
石灰石	四川泸州	0.121	0.490	0.061	8.4
方解石	四川泸州	0.098	0.481	0.052	9.3
飞仙关组	重庆北碚	0.147	0.483	0.079	7.8
蓬莱镇组	重庆巴南	0.215	0.572	0.080	8.0
遂宁组	重庆巴南	0.236	0.502	0.077	8.1

表2 活性覆盖材料的主要化学成分/%

Table 2 Chemical composition of the active barrier material/%

活性覆盖材料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO
石灰石	4.02	0.97	0.21	52.42	0.96
方解石	3.18	0.40	0.12	56.03	0.35
飞仙关组	54.40	15.10	4.80	6.32	1.83
蓬莱镇组	65.36	13.81	2.01	2.73	0.58
遂宁组	60.34	14.59	2.05	3.51	0.56

1.2 活性覆盖材料原位覆盖模拟实验

实验分为对照组(CK)、方解石覆盖组(P1)、石灰石覆盖组(P2)、飞仙关覆盖组(P3)、蓬莱镇覆盖组(P4)、遂宁覆盖组(P5). 采用15 L广口玻璃瓶(内径20 cm)作为底泥覆盖模拟实验的反应器,将1 L完全混合均匀(将采集到的底泥放入干燥的50 L广口塑料桶中,并用干净木棒搅拌均匀)的新鲜底泥自反应器口部用漏斗管道直接导入底部,使底泥层厚度保持约为4 cm. 空白组加入底泥后通过虹吸式加入10 L去离子水,各活性材料覆盖组分别添加500 g对应覆盖材料,再通过虹吸式向各覆盖组中加入10 L去离子水,密封后放入恒温培养箱中(20±1)℃黑暗培养,每个处理3次重复. 并定期于水面下5 cm处采用虹吸法取样测定上覆水体总磷及pH,模拟期间上覆水体保持厌氧状态(采用氮气吹脱实现).

实验结束后,通过虹吸式吸取各实验组上覆水体,用于上覆水体微生物磷脂脂肪酸(PLFA)分析. 吸取完上覆水体后,去掉上部覆盖层,收集底泥进行底泥微生物群落磷脂脂肪酸(PLFA)分析. 覆盖层及剩余底泥于通风阴凉处晾干,用于各种磷形态测定.

1.3 分析方法

1.3.1 水质理化指标测定

上覆水体pH及总磷(TP)均按照国家标准进行测定[21].

1.3.2　底泥及母岩中磷形态测定

实验前后底泥以及 3 种紫色母岩中总磷的含量参照文献[20]进行测定. 实验前后 3 种紫色母岩以及底泥中铁/铝/锰结合态磷(NaOH-P)、钙结合态磷(Ca-P)、无机磷(IP)以及有机磷(OP)的含量均采用 SMT 法[22]测定.

底泥中 NaOH-P 含量($mg \cdot g^{-1}$) 计算公式:

$$c = \frac{SV}{1\,000\ m}$$

底泥中 Ca-P、IP、OP 含量($mg \cdot g^{-1}$) 计算公式:

$$c = \frac{S \times 14 \times V}{1\,000} \times 10 \times m$$

式中,S 为提取液提取的磷浓度($mg \cdot g^{-1}$); V 为所加提取液的体积(20 mL); m 为底泥干重.

1.3.3　磷脂脂肪酸(PLFA) 分析微生物群落结构

每个处理组分别取 2 L 水样及 50 g 底泥进行微生物群落结构分析. 水样用醋酸纤维滤膜(0.22 μm) 抽滤,将抽滤后的滤膜进行提取、皂化、甲基化、萃取及碱洗涤后获得上机样品. 将底泥直接进行提取、皂化、甲基化、萃取及碱洗涤后获得上机样品. 用 Agilent 6850 气相色谱仪(FID 检测器)分析磷脂脂肪酸(PLFA)的成分. 色谱条件为: HP-5 柱(25.0 m × 200 μm × 0.33 μm),进样量 1 μL,分流比 10∶1,载气(H_2),尾吹气高纯 N_2,助燃气空气,流速 0.8 $mL \cdot min^{-1}$; 汽化室温度 250℃、检测器温度 300℃,柱前压 10.0 psi (1 psi = 6.895 kPa),质谱全扫描范围 30 ~ 600 *m/z*; 二阶程序柱温 170℃(5 min)→260℃→310℃,维持 1.5 min. 各成分脂肪酸通过 MIDI Sherlock 微生物鉴定系统(Version 6.1, MIDI, Inc., Newark, DE)进行. 标准品购于美国 MIDI 公司的 C9-C20 的脂肪酸甲酯,PLFA 用 C19∶0 做内标换算 PLFA 的绝对含量.

1.4　数据处理与分析

采用 Excel、SPSS Statistics 17.0 和 Origin 8.6 软件对实验结果进行统计分析与作图.

2　结果与讨论

2.1　不同活性覆盖材料覆盖后上覆水体中 pH 值的变化

已有研究表明水体 pH 对底泥磷释放具有重大影响[23,24]. 本实验测定了不同活性覆盖材料覆盖后上覆水体中 pH 值的变化, 发现各覆盖组上覆水体中 pH 值在前 5 d 均呈较显著下降,显弱酸性. 5 d 后均有所上升,在 5 ~ 32 d 时均为中性,32 ~ 46 d 时上升幅度较大,由中性逐渐转变为弱碱性. 而对照组上覆水体中 pH 值在整个实验区间内变化不大,均为中性(图 1). 相比于对照组,本实验各覆盖组水体均呈弱碱性,说明利用 5 种活性覆盖材料覆盖均会提高上覆水体 pH 值,这是由于 5 种活性覆盖材料均呈碱性(见表 1),其内碱性物质会溶解进入上覆水体,从而使水体 pH 升高.

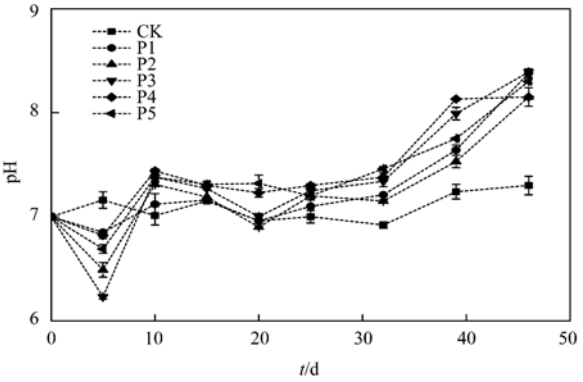

图 1　不同覆盖材料下上覆水体中 pH 随时间变化

Fig. 1　Variation of pH of the overlying water with different covering materials

2.2　不同活性覆盖材料对底泥总磷向上覆水体释放的影响

图 2 为不同活性覆盖材料层对底泥 TP 向上覆水体释放的影响. 各实验组上覆水体 TP 质量浓度在整个实验过程均呈上升趋势,其中对照组上覆水体中 TP 的增长趋势最显著. 46 d 时,以对照组为参照,各活性覆盖材料层对底泥 TP 向上覆水体释放的抑制率由高到低依次为 P3 (94.4%) > P5 (91.3%) > P4 (88.8%) > P2 (68.9%) > P1 (57.8%). 说明 3 种紫色母岩作为活性覆盖材料对底泥 TP 向上覆水体释放具有很好的抑制效果. 其中 P3 组覆盖层对底泥 TP 向上覆水体释放的抑制作用最强. 许多研究表明石灰石和方解石可有效抑制底泥 TP 释放[25,26],而本研究发现在同一实验条件下,3 种紫色母岩对 TP 释放的抑制效果均比石灰石和方解石好. 而且优于众多别的活性覆盖材料,如 Kim 等[27]研究发现铁石膏覆盖对底泥磷释放的抑制率仅为 40%,颗粒石膏与砂子联合覆盖对底泥磷释放的抑制率有所提高,超过 50% 以上,远远低于紫色母岩对底泥磷释放的抑制率. Meis 等[28]研究发现锁磷剂 Phoslock® 对底泥磷释放的最高抑制率为 61%,也明显低于紫色母岩对底泥磷释放的抑制率,说明紫色母岩可有效抑制景观水体底泥污染

物释放,在景观水体治理中具有很好的应用前景.

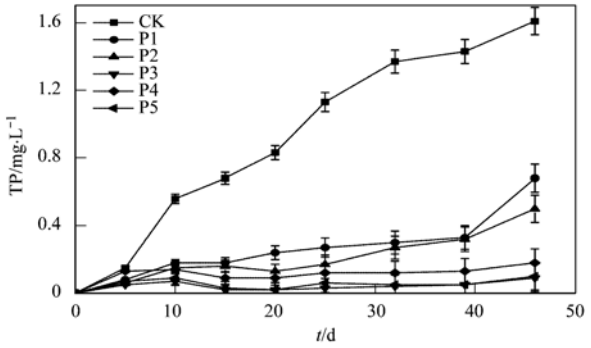

图 2 不同覆盖材料下上覆水体中 TP 随时间变化

Fig. 2 Variation of TP of the overlying water with different covering materials

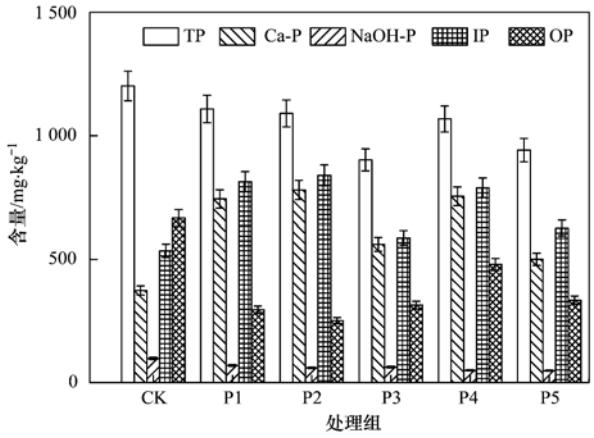

图 3 5 种覆盖材料覆盖后底泥中不同形态磷含量

Fig. 3 Contents of different phosphorus forms in sediment after capped with the five kinds of covering materials

2.3 覆盖前后底泥中不同磷形态含量的变化

本研究发现在同一实验条件下 3 种紫色母岩覆盖层对底泥 TP 向上覆水体释放的抑制效果均比石灰石和方解石覆盖层好(见图 2),但紫色母岩覆盖层对底泥 TP 向上覆水体释放的抑制机制并不清楚. 为此,测定了覆盖前后底泥及 5 种覆盖材料中不同磷形态的含量,结果如图 3、图 4 所示. 从图 3 中可看出,46 d 后,与初始底泥 TP 含量相比,各处理组底泥中 TP 含量均降低,降低量为 P3(300.27 $mg\cdot kg^{-1}$) > P5 (260.53 $mg\cdot kg^{-1}$) > P4 (134.08 $mg\cdot kg^{-1}$) > P2 (111.65 $mg\cdot kg^{-1}$) > P1 (93.49 $mg\cdot kg^{-1}$). 说明通过 5 种活性覆盖材料覆盖均会促进底泥 TP 的释放,其中 P3 组覆盖层的效果最强,而 P1 组覆盖层最弱. 实验结束后,不同形态磷含量所占 TP 含量的比例也发生改变. 5 种活性材料覆盖组底泥中 NaOH-P 含量均减少,而已有研究表明水体碱性条件有助于底泥中 NaOH-P 的释放[29],这与 5 种活性材料覆盖后水体 pH 值升高(图 1),同时底泥中 NaOH-P 含量减少的结果一致. 相对于对照组底泥中 OP 含量,覆盖组中底泥 OP 含量明显下降,IP 含量显著上升,Ca-P 含量明显增加. 说明 5 种覆盖材料有促进底泥中 OP 分解直接在原位转化成 Ca-P,导致底泥中 Ca-P 含量明显增加,其中 P1、P2 处理组促进 OP 原位形成 Ca-P 能力更强,这与两种覆盖材料中 CaO 含量高成正相关,详细机制需进一步研究.

2.4 覆盖前后覆盖材料中不同形态磷含量的变化

图 4 所示为 5 种活性材料覆盖前后不同形态磷含量的变化. 覆盖后,5 种活性覆盖材料中 TP 及其他形态磷的含量都明显增加. TP 的增加量分别为 P3(185.69 $mg\cdot kg^{-1}$) > P5 (181.11 $mg\cdot kg^{-1}$) > P4 (127.16 $mg\cdot kg^{-1}$) > P2 (70.27 $mg\cdot kg^{-1}$) > P1 (58.33 $mg\cdot kg^{-1}$), IP 的增加量分别为 P3(134.24 $mg\cdot kg^{-1}$) > P5 (131.26 $mg\cdot kg^{-1}$) > P4 (83.34 $mg\cdot kg^{-1}$) > P2 (58.49 $mg\cdot kg^{-1}$) > P1 (53.72 $mg\cdot kg^{-1}$), OP 的增加量分别为 P3 (51.45 $mg\cdot kg^{-1}$) > P5 (49.85 $mg\cdot kg^{-1}$) > P4 (43.82 $mg\cdot kg^{-1}$) > P2 (11.78 $mg\cdot kg^{-1}$) > P1 (4.61 $mg\cdot kg^{-1}$). 可见 IP 的增加是导致 5 种覆盖材料中 TP 增加的主要原因,而 IP 中 Ca-P 的增加量较大,且覆盖层中 OP 含量也明显增加,说明 5 种覆盖材料通过机械拦截、物理吸附或者化学吸收将底泥中释放出来的各种形态的磷以 Ca-P 和 OP 形态保留在覆盖层中,从而减少底泥中 TP 含量. 覆盖后蓬莱镇组和遂宁组母岩中 Ca-P 增加量比飞仙关组母岩、方解石和石灰石中 Ca-P 增加量大,说明蓬莱镇组和遂宁组母岩有利于底泥释放扩散到覆盖层的正磷酸盐形成 Ca-P 的磷结晶. 覆盖后飞仙关组母岩中 Ca-P 和 NaOH-P 增加量总和远低于 IP 增加量,而其余各覆盖材料中 Ca-P 和 NaOH-P 增加量总和与 IP 增加量基本一致,表明飞仙关组中增加的 IP 除 Ca-P 和 NaOH-P 外还有其他形态磷,如闭蓄态磷. 覆盖后 3 种紫色母岩中 OP 的增加量也明显高于方解石和石灰石,这可能与 3 种紫色母岩组成成分复杂,有利于覆盖层中微生物的生长与积累有关.

2.5 覆盖后底泥及上覆水体中微生物群落结构

微生物是影响底泥磷释放的主要因素之一[30]. 为确定活性覆盖材料覆盖层是否会改变底泥或上覆水体中微生物的群落结构,从而影响底泥磷素的释放,本研究测定了 5 种覆盖材料覆盖后底泥及上覆水体中微生物的磷脂脂肪酸,结果如表 3、表 4 所

示. 从中可看到,与对照组相比,P2 组底泥中细菌含量减少,而其他各处理组底泥中细菌含量均增加;P5 组底泥中未检测到真菌,P4 组底泥中真菌含量降低,而其余各处理组底泥中真菌含量无太大变化;5 个处理组上覆水体中细菌含量均大大增加;除 P5 组上覆水体中未检测到革兰氏阴性菌外,其余处理组上覆水体中革兰氏阴性菌的数量均有较大增加;P1、P2 组上覆水体中未检测到真菌,P3 组上覆水体中真菌含量无明显变化,而 P4、P5 组上覆水体中真菌含量增加较多. 这说明使用 5 种活性覆盖材料进行底泥覆盖后均会影响底泥及上覆水体中的微生物群落结构及数量,有可能会影响底泥污染物的释放. 将底泥及上覆水体中均能检测到,且含量较高的 6 种磷脂脂肪酸标记与上覆水体 TP 含量进行相关性分析(表 5),结果发现底泥及上覆水体中 PLFA 16:0 标记的细菌含量均与上覆水体 TP 含量呈显著负相关($P < 0.05$),说明底泥或上覆水体 PLFA 16:0 标记的细菌增加均会降低上覆水体 TP 含量. 从检测结果发现 P3 及 P5 组上覆水体及底泥中的 PLFA 16:0 标记含量比其他覆盖组高,其中 P3 组最高,可见 P3 组对底泥 TP 向上覆水体释放的抑制作用最强,与图 2 结果一致. 说明 P3 和 P5 组除通过机械拦截、物理吸附或者化学吸收及覆盖层微生物作用降低底泥 TP 含量外,还通过改变底泥及上覆水体微生物的群落结构,使底泥释放出的部分磷素与微生物作用形成絮体等降低上覆水体 TP 的含量.

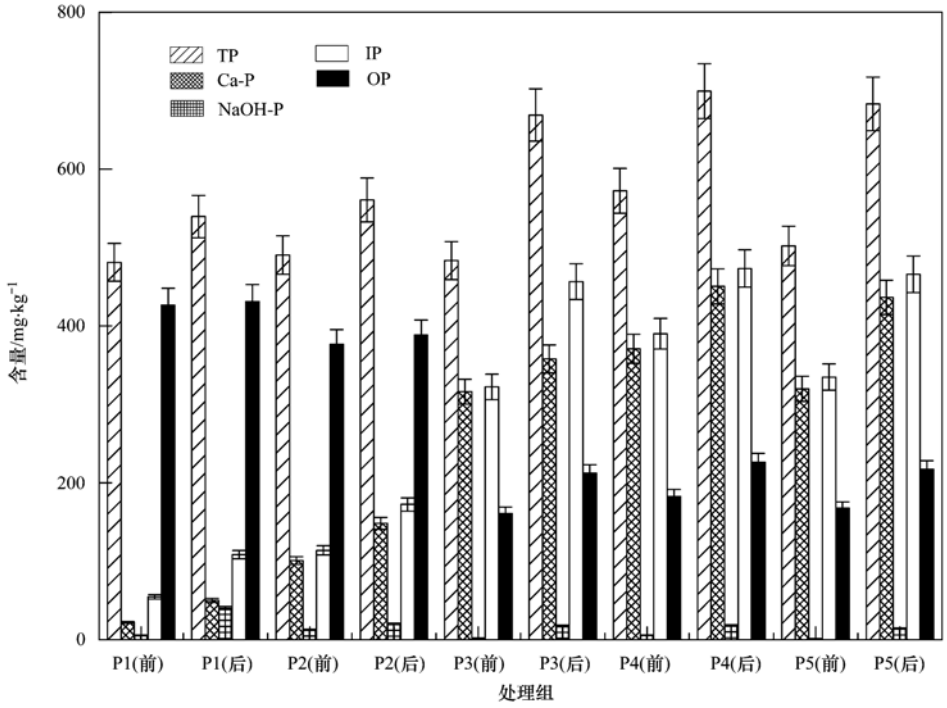

图 4　覆盖前后 5 种覆盖材料中不同形态磷含量的变化

Fig. 4　Variation in the contents of different phosphorus forms before and after capped with the five kinds of covering materials

表 3　覆盖后底泥中 PLFA 标记组群的分布/nmol·g^{-1}

Table 3　Distribution of PLFA groups in sediments after capped with the five kinds of covering materials/nmol·g^{-1}

脂肪酸标记组成	预期代表群落	CK	P1	P2	P3	P4	P5
11:0,12:0,12:02OH,12:03OH,i14:0, i15:0,a15:0,i16:0,i17:0, 17:0,a17:0	细菌	43.06	49.71	38.58	63.90	61.51	62.03
16:1ω5c, i17:0 3OH,18:1ω9c	革兰氏阴性菌	11.30	11.15	6.51	10.89	8.29	6.30
i17:0; a17:0,i16:0,a15:0,i15:0, i14:0	革兰氏阳性菌	21.92	20.37	13.62	21.29	22.27	20.83
18:1ω9c	真菌	5.56	5.86	4.57	5.46	2.76	0.00

3　结论

(1)在投加量相同时,紫色母岩对底泥中磷的抑制效果优于方解石和石灰石. 其中飞仙关组紫色母岩覆盖层对底泥总磷向上覆水体释放的抑制效果最好,抑制率为 94.4%. 因此,可选用紫色母岩做为

表 4 紫色母岩覆盖后上覆水体中 PLFA 标记组群的分布/nmol·g^{-1}

Table 4 Distribution of PLFA groups in the overlying water after capped with the five kinds of covering materials/nmol·g^{-1}

脂肪酸标记组成	预期代表群落	CK	P1	P2	P3	P4	P5
14:0,16:0,18:0,19:0,a15:0, i15:0, 16:0 N alcohol	细菌	64.08	72.95	71.13	86.93	73.68	80.82
a15:0,i15:0	好氧菌	4.01	5.62	5.61	3.44	4.34	4.48
16:0 N alcohol	革兰氏阴性菌	0	4.32	2.47	4.25	3.85	0
18:00	硫酸盐还原菌	12.95	12.32	13.4	17.14	9.19	7.48
18:3ω6c(6,9,12)	真菌	2.31	0	0	1.97	3.86	4.17

表 5 微生物与上覆水体中总磷含量的相关性分析[1)]

Table 5 Correlation between microbes and TP content in the overlying water

底泥 PLFA 生物标记	与上覆水体总磷含量的相关性	上覆水体 PLFA 生物标记	与上覆水体总磷含量的相关性
16:0	−0.912*	16:0	−0.842*
18:00	−0.054	18:0	0.172
a15:0	0.093	a15:0	0.728
i15:0	−0.046	i15:0	−0.534
18:3ω6c(6,9,12)	0.523	18:3ω6c(6,9,12)	−0.281
16:0 N alcohol	−0.011	16:0 N alcohol	−0.439

1) * 为 $P<0.05$

活性覆盖材料,抑制底泥总磷向上覆水体释放.

(2)5 种覆盖材料均可促进底泥总磷的释放与转化,显著促进底泥 OP 原位转化为 Ca-P,同时 3 种紫色母岩覆盖层更有利于底泥释放出的磷转化为无机磷和有机磷.

(3)5 种覆盖材料均会改变底泥及上覆水体微生物的群落结构,其中 PLFA16:0 标记的细菌数量与上覆水体的总磷含量呈显著负相关.

参考文献:

[1] 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 等. 合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1718-1726.
Li R Z, Liu K F, Qian J, *et al*. Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei city [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1718-1726.

[2] Dittrich M, Gabriel O, Rutzen C, *et al*. Lake restoration by hypolimnetic Ca(OH)$_2$ treatment: impact on phosphorus sedimentation and release from sediment[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(8): 1504-1515.

[3] 李静, 朱广伟, 张晓松, 等. 锁磷剂及覆盖技术对长广溪不同污染类型河段底泥磷释放的控制效果[J]. 环境化学, 2015, **34**(2): 358-366.
Li J, Zhu G W, Zhang X S, *et al*. Control effect of phoslock and sand-capping on sediment phosphorus release in different polluted sections of Changguangxi River[J]. Environmental Chemistry, 2015, **34**(2): 358-366.

[4] 吴应珠, 刘嘉裕, 蒋晓军, 等. 曝气加氢氧化钙复合技术抑制底泥磷释放及对底泥微生物多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(10): 2526-2533.
Wu Y Z, Liu J Y, Jiang X J, *et al*. Effects of the aeration with calcium hydroxide reaction technology on the inhibition of sediment phosphorus releasing and the benthic microbial diversities in the sediment[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(10): 2526-2533.

[5] 孔祥龙, 叶春, 李春华, 等. 苦草对水-底泥-沉水植物系统中氮素迁移转化的影响[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 539-549.
Kong X L, Ye C, Li C H, *et al*. Effect on nitrogen transfer and migration by *Vallisneria natans* (Lour.) Hara in water-sediment-submerged macrophytes system [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 539-549.

[6] Chun C L, Payne R B, Sowers K R, *et al*. Electrical stimulation of microbial PCB degradation in sediment[J]. Water Research, 2013, **47**(1): 141-152.

[7] Wang P, Yuan Y Z, Li Q, *et al*. Isolation and immobilization of new aerobic denitrifying bacteria [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, **76**: 12-17.

[8] Zamparas M, Deligiannakis Y, Zacharias I. Phosphate adsorption from natural waters and evaluation of sediment capping using modified clays[J]. Desalination and Water Treatment, 2013, **51**(13-15): 2895-2902.

[9] Yin H B, Kong M, Fan C X. Batch investigations on P immobilization from wastewaters and sediment using natural calcium rich sepiolite as a reactive material[J]. Water Research, 2013, **47**(13): 4247-4258.

[10] 杨海燕, 师路远, 卢少勇, 等. 不同覆盖材料对沉积物 P、N 释放的抑制效果[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2084-2090.
Yang H Y, Shi L Y, Lu S Y, *et al*. Effect of various inactivation agents on phosphorus and nitrogen release from sediments[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(5): 2084-2090.

[11] 李佳, 林建伟, 詹艳慧. 镧改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4266-4274.

Li J, Lin J W, Zhan Y H. Evaluation of in situ capping with lanthanum-modified zeolite to control phosphate and ammonium release from sediments in heavily polluted river [J]. Environmental Science, 2013, **34**(11): 4266-4274.

[12] Liu C, Shen Q S, Zhou Q L, *et al*. Precontrol of algae-induced black blooms through sediment dredging at appropriate depth in a typical eutrophic shallow lake [J]. Ecological Engineering, 2015, **77**: 139-145.

[13] 陈超, 钟继承, 范成新, 等. 湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3872-3878.
Chen C, Zhong J C, Fan C X, *et al*. Simulation research on the release of internal nutrients affected by different dredging methods in lake [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3872-3878.

[14] 张丹, 陈安强, 苏友波, 等. 水热环境对不同紫色母岩崩解特性的影响[J]. 土壤学报, 2013, **50**(4): 643-651.
Zhang D, Chen A Q, Su Y B, *et al*. Effect of hydrothermal environment on disintegration of different purple parent rocks [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50**(4): 643-651.

[15] 王振华, 朱波, 何敏, 等. 紫色土泥沙沉积物对磷的吸附-解吸动力学特征[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(1): 154-160.
Wang Z H, Zhu B, He M, *et al*. Characteristics of phosphorus adsorption and desorption kinetics of sediments from purple soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, **30**(1): 154-160.

[16] 黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 等. 不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1639-1647.
Huang X J, Liu X C, Li Z L, *et al*. Effect of different purple parent rock on removal rates of nitrogen, phosphorus and organics in landscape water[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1639-1647.

[17] 林建伟, 朱志良, 赵建夫, 等. 方解石活性覆盖系统抑制底泥磷释放的影响因素研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 121-126.
Lin J W, Zhu Z L. Zhao J F, *et al*. Influencing factors of calcite active barrier system to control phosphorus release from sediments [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 121-126.

[18] Hart B T, Roberts S, James R, *et al*. Active barriers to reduce phosphorus release from sediments: effectiveness of three forms of $CaCO_3$ [J]. Australian Journal of Chemistry, 2003, **56**(3): 207-217.

[19] Berg U, Donnert D, Ehbrecht A, *et al*. "Active filtration" for the elimination and recovery of phosphorus from waste water[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **265**(1-3): 141-148.

[20] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008. 26-61.

[21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 102-418.

[22] Ruban V, López-Sánchez J F, Pardo P, *et al*. Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-a synthesis of recent works [J]. Fresenius' Journal of Analytical Chemistry, 2001, **370**(2-3): 224-228.

[23] Wu Y H, Wen Y J, Zhou J X, *et al*. Phosphorus release from lake sediments: effects of pH, temperature and dissolved oxygen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, **18**(1): 323-329.

[24] 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.

[25] Berg U, Neumann T, Donnert D, *et al*. Sediment capping in eutrophic lakes-efficiency of undisturbed calcite barriers to immobilize phosphorus [J]. Applied Geochemistry, 2004, **19**(11): 1759-1771.

[26] Lin J W, Zhan Y H, Zhu Z L. Evaluation of sediment capping with active barrier systems (ABS) using calcite/zeolite mixtures to simultaneously manage phosphorus and ammonium release[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(3): 638-646.

[27] Kim S K, Yun S L. Analysis on the reduction of phosphorus release in river and lake sediments through application of capping technology [J]. Journal of Korean Society of Environmental Engineers, 2014, **36**(11): 781-790.

[28] Meis S, Spears B M, Maberly S C, *et al*. Assessing the mode of action of Phoslock® in the control of phosphorus release from the bed sediments in a shallow lake (Loch Flemington, UK) [J]. Water Research, 2013, **47**(13): 4460-4473.

[29] Gaoa L. Phosphorus release from the sediments in Rongcheng Swan Lake under different pH conditions [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012, **13**: 2077-2084.

[30] 黄廷林, 周瑞媛, 夏超, 等. 氧化还原电位及微生物对水库底泥释磷的影响[J]. 环境化学, 2014, **33**(6): 930-936.
Huang T L, Zhou R Y, Xia C, *et al*. Effects of oxidation-reduction potential and microorganism on the release of phosphorus from sediments[J]. Environmental Chemistry, 2014, **33**(6): 930-936.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 10

Oct. 15, 2016

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on $PM_{2.5}$ Under Air Heavy Pollution in Beijing ····· SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, *et al.* (3679)

Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes ····· DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)

Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing ····· LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, *et al.* (3693)

Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province ····· XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, *et al.* (3702)

Oxidative Capacity of the PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Beijing During 2014 APEC ····· GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, *et al.* (3708)

Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of $PM_{2.5}$ During Summer in Hongshan District, Wuhan ····· SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, *et al.* (3714)

Statistical Characteristics of Urban Changzhou $PM_{2.5}$ Based on *k*-means Analysis ····· WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, *et al.* (3723)

Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for $PM_{2.5}$ ····· YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, *et al.* (3730)

Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion ····· LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, *et al.* (3737)

Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles ····· FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, *et al.* (3743)

Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China ····· XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, *et al.* (3750)

Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China ····· ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, *et al.* (3758)

Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants ····· DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, *et al.* (3766)

Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area ····· CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, *et al.* (3774)

Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved *n*-alkane in Underground River ····· LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, *et al.* (3781)

Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China: Based on PMF Model ····· WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, *et al.* (3789)

Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region ····· HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, *et al.* (3798)

UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis ····· QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, *et al.* (3806)

Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause ····· HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, *et al.* (3813)

Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming ····· CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, *et al.* (3821)

Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake ····· DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, *et al.* (3828)

Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments ····· HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, *et al.* (3835)

Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water ····· JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, *et al.* (3842)

GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of *M. Aeruginosa* ····· LI Jie, XIAO Lin (3850)

Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies ····· WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, *et al.* (3858)

Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process ····· XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, *et al.* (3864)

Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species ····· ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, *et al.* (3870)

Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China ····· LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, *et al.* (3877)

Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O_3/UV ····· CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, *et al.* (3884)

Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 with Sucrose ····· HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)

Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater ····· SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, *et al.* (3899)

Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow ····· WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, *et al.* (3906)

Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary ····· FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, *et al.* (3914)

Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater ····· MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, *et al.* (3923)

Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau ····· LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)

Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge ····· HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, *et al.* (3939)

Comparative Investigation of Antibotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate ····· HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, *et al.* (3949)

Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain *Desulfovibrio* sp. CMX ····· XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, *et al.* (3955)

Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields ····· XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, *et al.* (3963)

Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China ····· ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, *et al.* (3971)

Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields ····· ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, *et al.* (3979)

Effects of Soil Texture on Autotrophic CO_2 Fixation Bacterial Communities and Their CO_2 Assimilation Contents ····· WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, *et al.* (3987)

Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System ····· SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, *et al.* (3996)

Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments ····· WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, *et al.* (4004)

Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil ····· ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, *et al.* (4011)

Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer ····· SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (4020)

Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels ····· QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, *et al.* (4030)

Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt ····· DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, *et al.* (4044)

In vitro Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes ····· LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, *et al.* (4054)

Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues ····· SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, *et al.* (4062)

《环境科学》第 6 届编辑委员会

主　编：赵进才

副主编：赵景柱　郝吉明　田　刚

编　委：（按姓氏笔画排序）

万国江　王华聪　王凯军　王绪绪　田　刚　田　静　史培军

朱永官　刘志培　刘　毅　汤鸿霄　孟　伟　周宗灿　林金明

赵进才　赵景柱　姜　林　郝郑平　郝吉明　聂永丰　黄　霞

黄　耀　鲍　强　潘　纲　潘　涛　魏复盛

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2016 年 10 月 15 日　第 37 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 10　Oct. 15, 2016

主　　管	中国科学院	**Superintended** by	Chinese Academy of Sciences
主　　办	中国科学院生态环境研究中心	**Sponsored** by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协　　办	（以参加先后为序） 北京市环境保护科学研究院 清 华 大 学 环 境 学 院	**Co-Sponsored** by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主　　编	赵进才	**Editor-in -Chief**	ZHAO Jin-cai
编　　辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085） 电话：010-62941102，010-62849343 传真：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	**Edited** by	The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE） P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343 E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出　　版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717	**Published** by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	**Printed** by	Beijing Bei Lin Printing House
发　　行	科 学 出 版 社 电话：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com	**Distributed** by	Science Press Tel：010-64017032 E-mail：journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	**Domestic**	All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 （北京 399 信箱）	**Foreign**	China International Book Trading Corporation（Guoji Shudian）, P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号：ISSN 0250-3301 / CN 11-1895/X　　**国内邮发代号**：2-821

国 内 定 价：120.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行