

百方知库
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



2019

Vol.40 No.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响 李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)

珠三角地区利用 PM_{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法 李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)

广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性 范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)

扬州市 PM_{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估 董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)

聊城市冬季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)

博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源 宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)

某集约化肉鸡饲养场 PM_{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征 刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)

水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响 胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)

滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献 任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)

基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析 吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)

湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响 余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)

异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险 李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 林祺, 王荣, 沈吉 (614)

珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素 杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)

北运河粪源微生物分布特征及健康风险评估 陈磊, 李蕾芳, 郅晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)

氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律 郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)

磁性铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响 王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)

钙预处理对磁性铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响 赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)

NH₄⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响 郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)

3种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较 吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)

硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制 代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 郅超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)

ZnTiO₂-TiO₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)

高指数晶面 TiO₂ 对铬的吸附及光催化去除 钟德健, 张健峰, 李尧, 谢晓丹 (701)

Fe⁰/海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B 张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)

不同滤料滤池启动期内对铁锰离子的去除机制 蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何睿, 董杨, 王海港 (717)

SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能 张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)

一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制 薛文清, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)

臭氧-CNT 膜改性联用工艺通量及膜污染分析 王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕红, 栾桂荣, 郭瑾 (738)

多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除 刘淑惠, 田伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)

微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程 刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)

从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水 袁文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法 宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)

硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性 于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)

乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性 毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)

DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性 杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建园, 张帆, 吕廷廷 (791)

间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷 赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)

ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行 韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)

进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响 都叶奇, 于德爽, 甄建园, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)

ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性 李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)

不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响 李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)

调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响 张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)

基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性 王杨, 朱斌, 董俊, 白晓慧 (853)

黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征 姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)

基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化 祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)

硝化作用对盐碱湿地 N₂O 排放的影响及其环境因子分析 杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)

长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N₂O 和 NO 排放的影响 聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)

地膜覆盖和施肥对菜地 N₂O 排放的影响 倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)

双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系 肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)

多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响 李亚森, 丁松爽, 殷金玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)

桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征 丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)

工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析 李锋, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)

膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响 林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)

缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征 陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)

复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献 张彦军, 郭胜利 (961)

不同水平外源碳在稻田土壤转化与分配的微生物响应特征 王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓悟悟, 葛东达, 吴金水 (970)

宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评估 张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)

生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响 周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)

污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响 袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)

热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜粪混合物料及其甲烷高值化条件 卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

《环境科学》征订启事(547) 《环境科学》征稿简则(828) 信息(581, 933, 952)

磁性锆铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响

王艳¹, 林建伟^{1*}, 詹艳慧¹, 张宏华^{2*}, 张志斌³, 何思琪¹, 赵钰颖¹, 吴小龙¹, 俞阳¹

(1. 上海海洋大学海洋生态与环境学院, 上海 201306; 2. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310032; 3. 山东建筑大学市政与环境工程学院, 济南 250101)

摘要: 首先采用 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、溶解性锆盐、膨润土和碱液作为原料制备得到了一种磁性锆铁改性膨润土, 再通过底泥培养实验考察了磁性锆铁改性膨润土添加对底泥中磷迁移与形态转化的影响。结果表明, 在缺氧条件下, 河道底泥中磷会被释放进入间隙水中, 继而会被释放进入上覆水中, 而磁性锆铁改性膨润土添加可以极大地降低底泥中磷向间隙水的迁移通量, 最终导致了上覆水中磷数量的显著下降。此外, 添加磁性锆铁改性膨润土不仅促使底泥中弱吸附态磷(Labile-P)和氧化还原敏感态磷(BD-P)这2种容易释放态磷向较为稳定的金属氧化物结合态磷(NaOH-rP)和非常稳定的残渣态磷(Res-P)转变, 而且降低了底泥中水溶性磷(WSP)、易解吸磷(RDP)、 NaHCO_3 可提取磷(Olsen-P)、藻类可利用磷(AAP)和铁氧化物-滤纸提取磷(FeO-P)这5种不同类型生物有效态磷(BAP)含量, 从而降低了底泥中磷的释放风险。从底泥中分离出来的磁性锆铁改性膨润土中潜在活性磷($\text{NH}_4\text{Cl-P} + \text{BD-P}$)占总磷的26%左右, 且含一定数量的FeO-P和Olsen-P(含量分别为 $161 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $127 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。因此, 及时采用磁分离的方式从底泥中将吸附磷后的磁性锆铁改性膨润土回收是非常必要的。磁性锆铁改性膨润土添加控制河道底泥中磷释放的机制是: 改良剂通过对底泥中潜在活性磷和生物有效态磷的钝化作用, 以及对间隙水中磷的吸附作用, 降低了底泥中磷向间隙水的释放风险, 导致间隙水中磷浓度的下降, 进而降低了底泥-上覆水界面磷的扩散通量, 最终导致上覆水中磷浓度的下降。以上结果说明, 磁性锆铁改性膨润土是一种非常有希望的用于控制河道底泥中磷释放的改良剂。

关键词: 磁性锆铁改性膨润土; 河道底泥; 磷; 钝化; 改良

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0649-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201806220

Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments

WANG Yan¹, LIN Jian-wei^{1*}, ZHAN Yan-hui¹, ZHANG Hong-hua^{2*}, ZHANG Zhi-bin³, HE Si-qi¹, ZHAO Yu-ying¹, WU Xiao-long¹, YU Yang¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 3. College of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

Abstract: A magnetic zirconium/iron-modified bentonite (ZrFeBT) was prepared, and the effect of ZrFeBT addition on the mobilization and species transformation of P in river sediments was investigated using incubation sediment core experiments. The results showed that, under anoxic conditions, P could be released from river sediments into the pore water, and then P in the pore water could be released into the overlying water. The addition of ZrFeBT into river sediments could greatly suppress the release of P from river sediments into the pore water under anoxic conditions. Therefore, the release of P from the pore water into the overlying water could be significantly suppressed by the addition of ZrFeBT. After the addition of ZrFeBT into river sediments, the transformation of loosely sorbed P (Labile-P) and BD extractable P (BD-P) to NaOH extractable P (NaOH-rP) and residual P (Res-P) in the sediments was observed. The decrease of bioavailable P (BAP) including water soluble P (WSP), readily desorbable P (RDP), NaHCO_3 extractable P (Olsen-P), algal available P (AAP), and Fe oxide-paper extractable P (FeO-P) in the sediments was also observed. A certain amount of P in the ZrFeBT after the incubation experiment was present in the form of mobile P (Labile-P and BD-P), Olsen-P, and FeO-P, which could be re-released into the pore water and overlying water when the environmental conditions change in the future. The control of P release from river sediment into the overlying water by the addition of ZrFeBT could be mainly attributed to the reduction of P in the pore water as well as the reduction of mobile P and BAP in the sediments after ZrFeBT amendment. The results of this study indicated that ZrFeBT is a promising amendment for the regulation of P release from river sediments into the overlying water.

Key words: magnetic zirconium/iron-modified bentonite; river sediment; phosphorus; immobilization; amendment

收稿日期: 2018-06-27; 修订日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408354, 50908142); 上海市自然科学基金项目(15ZR1420700); 上海海洋大学优秀本科生进实验室项目; 上海海洋大学本研一体化教学团队项目

作者简介: 王艳(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水域生态环境修复理论与技术, E-mail: 949791290@qq.com

* 通信作者, E-mail: jwlin@shou.edu.cn; zhh124@zjut.edu.cn

磷(P)是水生生物生长和繁殖的关键营养素^[1]。当外源磷得到有效控制后,底泥中磷的释放被认为是引起水体富营养化和藻类暴发的重要因素^[2~4]。目前,底泥磷释放控制技术分为原位控制技术和异位控制技术。其中,原位控制技术可以避免疏浚过程中引起的底泥磷释放以及运输过程中的二次污染等问题,因此该技术近年来得到国内外学者的广泛关注^[5]。原位控制技术包括原位覆盖技术^[6]、人工曝气^[7]、硝酸盐原位处理^[8]、化学药剂钝化^[9]、生态修复^[10]以及吸附剂原位改良技术^[11]等。其中,吸附剂原位改良技术,即向底泥中添加固态吸附剂材料,被认为是一种非常有希望的底泥内源磷释放原位控制技术^[11~13]。

常见的用于控制水体底泥磷释放的固态改良剂材料,包括给水处理厂废弃铁铝污泥^[11~13]、镧改性膨润土^[14]、热改性富钙黏土^[15~17]、水合硅酸钙^[18]以及锆基钝化剂^[19~23]等。最近,关于利用锆基钝化剂控制底泥磷释放的研究,已经引起了越来越多学者的关注^[19~23]。这是因为:锆基钝化剂由化学性质稳定、对磷吸附能力卓越且无毒的锆氧化物(作为活性组分)和来源广泛、价格低廉且比表面积大的多孔性固体材料(作为活性组分的载体)构建而成,锆基钝化剂预计不仅钝化底泥-水系统中磷的性能良好,而且成本划算,并且将锆基钝化剂应用到水体中后预计不会对水体产生负面影响^[19~23]。

锆基钝化剂目前仍然存在的一个缺陷是:将锆基钝化剂添加到底泥中后难以回收,从而导致改良剂会长时间存在于底泥中,而被锆基钝化剂所吸附的磷中一部分磷会以潜在活性磷形式存在^[20,22],一旦外界环境条件发生改变时,被吸附到锆基钝化剂表面上的磷可能会重新释放出来,进入间隙水或上覆水中。最近研究发现,采用磁性的底泥钝化剂有望克服传统的非磁性底泥钝化剂的缺点^[24,25]。因此,如果将锆基钝化剂赋予磁性,所制备得到的磁性锆基钝化剂有望可以克服传统非磁性锆基钝化剂的不足之处。将磁性锆基钝化剂添加底泥中,不仅可以利用改良剂的吸磷能力控制底泥磷的释放,而且可以采用外加磁场的作用将吸附饱和后的改良剂从底泥中回收回来,降低改良剂中磷再次释放的风险。先前的研究已经考察了锆改性膨润土(一种锆基钝化剂)添加对河道底泥中磷向上覆水体中释放的影响^[22]。但是,目前国内外关于磁性锆铁改性膨润土(一种磁性锆基钝化剂)添加对河道底泥中磷迁移和形态转化的影响研究,还鲜见报道。

为此,本研究首先采用 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、溶解性锆盐、膨润土和碱液作为原料制备得到了一种磁性锆

基钝化剂,即锆铁改性膨润土,再通过底泥培养实验考察了磁性锆铁改性膨润土添加对底泥中磷迁移与形态转化的影响规律,并探讨了相关的影响机制,以期应用磁性锆铁改性膨润土作为底泥改良剂控制河道内源磷提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究所用的底泥来自于上海市金山区某重污染河道。所采集的底泥样品经自然风干、破碎、过100目筛后存贮于自封袋中备用。实验所用的 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 KH_2PO_4 、 NaOH 、 HCl 、 NH_4Cl 、 NaHCO_3 、 NaCl 、 CaCl_2 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 、抗坏血酸、钼酸铵和酒石酸锑氧钾等化学试剂采购自中国国药集团化学试剂有限公司。实验所用的膨润土是从上海试四赫维化工有限公司处购买。实验所用的溶液均是采用去离子水进行配制。

1.2 磁性锆铁改性膨润土的制备

称取10g膨润土和100mL CaCl_2 ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)溶液进行振荡反应($150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 298 K),24h后离心分离,收集得到钙预处理膨润土。利用100mL去离子水转移钙预处理膨润土至1L锥形瓶中,再将100mL六水合氯化铁溶液($0.43 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)和100mL七水合硫酸亚铁溶液($0.215 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)加入到该锥形瓶中。然后采用可控温磁力搅拌器使该锥形瓶内溶液处于悬浮状态,并使该锥形瓶内悬浮液的温度达到 343 K 。随后向该锥形瓶中滴加 NaOH 溶液($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$),直至悬浮液pH值达到10.0,之后再稳定1h后冷却。然后,再向冷却后的锥形瓶中加入锆溶液(5g八水合氧氯化锆溶于100mL去离子水中),随后向锥形瓶中滴加 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaOH 溶液,直至悬浮液pH值达到10.0。待锆溶液全部加入到锥形瓶中并调节pH值后,再稳定1h。稳定好之后,采用磁分离的方式获得固体材料,然后采用去离子水清洗10遍、自然风干、研磨后即得磁性锆铁改性膨润土。

1.3 吸附实验

采用吸附实验考察磁性锆铁改性膨润土对水中磷酸盐的吸附能力,具体步骤为:称取25mg吸附剂置于锥形瓶中,并加入25mL磷酸盐溶液(浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以磷计);再将锥形瓶置于恒温水浴振荡器(298 K 和 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)中反应24h;随后通过磁分离方式获得上清液,并采用钼锑抗比色法测定上清液中磷浓度。

1.4 磁分离特性检验

通过以下检验磁性锆铁改性膨润土的磁分离特

性: 取一定质量的吸附剂置于样品瓶中, 并加入一定体积的去离子水, 通过摇晃方式使样品瓶中吸附剂和去离子水完全混合; 然后取一块永磁铁放于样品旁边, 再观察样品瓶中吸附剂和去离子水的分离现象。

1.5 底泥培养实验

分别称取 50 g 干底泥置于 2 个 250 mL 棕色试剂瓶中, 并对这 2 个棕色试剂瓶中底泥分别进行以下处理: ①底泥不进行任何处理(对照组); ②将 5 g 磁性锆铁改性膨润土加入底泥中, 并混合均匀(添加组)。配制模拟上覆水, 它的 NaCl、NaHCO₃ 和 CaCl₂ 浓度分别为 10、1 和 1 mmol·L⁻¹, pH 值为 7.0, 并对模拟上覆水中溶解氧(DO)进行去除(采用亚硫酸钠氧化法去除水中的 DO^[20]), 使 DO 浓度低于 0.5 mg·L⁻¹。将配制好的模拟上覆水加入到锥形瓶中, 直至上覆水位到达锥形瓶的瓶口, 然后塞上橡胶塞, 创造缺氧环境。每间隔一段时间采用便携式溶氧仪测定上覆水中 DO 浓度, 采用便携式 pH 计测定上覆水的 pH 值, 并采用钼锑抗比色法测定上覆水中溶解性活性磷(SRP)浓度。培养 35 d 后, 取出锥形瓶中的湿底泥, 通过离心分离的方式获得间隙水, 再采用钼锑抗比色法测定间隙水中 SRP 浓度。将获得的对照组底泥进行自然风干、研磨后装入自封袋中备用。将所获得的添加组底泥分为 2 部分, 一部分底泥经自然风干、研磨后装入自封袋中备用, 另一部分底泥则进行以下处理: 采用吸铁石从底泥中分离出磁性锆铁改性膨润土。

1.6 底泥和改良剂磷形态分级提取

本研究将底泥和改良剂中磷分为 5 种形态, 分别为: 弱吸附态磷(Liable-P)、氧化还原态敏感态磷(BD-P)、金属氧化物结合态磷(NaOH-rP)、钙结合态磷(HCl-P)及残渣态磷(Res-P)。具体的提取步骤为: 称取一定质量的底泥(0.2 g)或改良剂(0.05 g)置于离心管中, 依次采用 NH₄Cl 溶液(1 mol·L⁻¹)、NaHCO₃/Na₂S₂O₄ 溶液(0.11 mol·L⁻¹)、NaOH 溶液(1 mol·L⁻¹, 常温) HCl 溶液(0.5 mol·L⁻¹)和 NaOH 溶液(1 mol·L⁻¹, 358 K)进行提取, 提取液的体积均为 25 mL, 每步提取液中磷浓度均采用钼锑抗比色法进行测定^[26-28]。实验设置 3 个平行。上述 5 种形态磷之和称为总可提取磷(TEP)^[28]。Liable-P 和 BD-P 之和称为潜在活性磷(P_m)^[13]。

1.7 底泥和改良剂生物有效磷提取

分别采用铁氧化物-滤纸、去离子水、CaCl₂ 溶液(0.01 mol·L⁻¹)、NaOH(0.1 mol·L⁻¹)以及 NaHCO₃ 溶液(0.5 mol·L⁻¹)提取底泥或改良剂中

铁氧化物-滤纸提取磷(FeO-P)、水溶性磷(WSP)、易解吸磷(RDP)、藻类可利用磷(AAP)和 NaHCO₃ 可提取磷(Olsen-P)这 5 种生物有效磷(BAP)含量^[28-31]。FeO-P 含量的测定方法参见文献^[28]。WSP、RDP、AAP 和 Olsen-P 含量的测定方法参见^[31]。本实验设置 3 个平行。

2 结果与讨论

2.1 磁性锆铁改性膨润土的吸磷能力和磁分离能力

改良剂是否具备良好的吸附水中磷酸盐的能力, 是原位改良技术能否有效控制底泥磷释放的关键。为此, 本研究首先考察了磁性锆铁改性膨润土对水中磷酸盐的吸附能力。结果发现, 本研究实验条件下磁性锆铁改性膨润土对水中磷酸盐的单位吸附量为 11.1 mg·g⁻¹(以磷计), 高于文献^[20]所报道的锆改性沸石对水中磷酸盐的最大吸附容量(10.2 mg·g⁻¹)和文献^[22]所报道的锆改性膨润土对水中磷酸盐的最大吸附容量(6.46 mg·g⁻¹)。这说明本研究所制备的磁性锆铁改性膨润土对水中磷酸盐的吸附性能良好。

改良剂是否具备良好的磁分离能力, 是改良剂应用后能否成功地采用外加磁场作用对其进行回收的关键。为此, 本研究通过实验还考察了磁性锆铁改性膨润土的磁分离能力, 结果见图 1。从中可见, 将外加磁场施加于磁性锆铁改性膨润土悬浮液时, 原先悬浮于水中的磁性锆铁改性膨润土快速地移动到吸铁石的旁边, 原本处于混浊状态的悬浮液[图 1(a)]很快就变为澄清[图 1(b)], 并且浊度由 684 NTU 下降至 5 NTU, 下降了 99.3%, 这说明本研究所制备的磁性锆铁改性膨润土具有良好的磁分离能力。



图 1 磁性锆铁改性膨润土的磁分离效果

Fig. 1 Magnetic separation efficiency of magnetic zirconium/iron-modified bentonite under external magnetic field

2.2 磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水理化性质的影响

表 1 为磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水 DO 浓度、pH 值和 SRP 浓度的影响. 从中可见, 对照组反应器上覆水中 DO 浓度位于 $0.31 \sim 0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 浓度处于较低的水平. 这说明对照组反应器中底泥处于缺氧状态. 对于添加组反应器而言, 上覆水中 DO 浓度同样处于较低的水平, DO 浓度位于 $0.25 \sim 2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这说明添加组反应器中底泥同样是处于缺氧状态. 另外, 添加组反应器中上覆水 DO 浓度除第 14 d 外, 与对照组相比没有明显地区别. 这说明, 经过一段时间的缺氧培养后, 磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水中 DO 浓度不会产生显著的影响. 由表 1 还可见, 对照组反应器上覆水的 pH 值位于 $7.37 \sim 7.84$, 而添加组反应器上覆水的 pH 值则位于 $7.45 \sim 7.94$, 从总体上看磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水 pH 值的影响较小, 仅仅只是略微增加了上覆水的 pH 值.

对于对照组反应器而言, 上覆水中 SRP 浓度随培养时间的增加而逐渐上升. 当培养时间由 0 增加到 35 d 时, 对照组反应器上覆水中 SRP 浓度由 0 逐渐增加到 $0.229 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 采用以下公式计算模拟期间底泥向上覆水释放 SRP 的平均速率 [J_D , $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]^[32]:

$$J_D = \frac{\Delta c \times V}{A \times t} \quad (1)$$

式中, V 是指上覆水体积(L); t 是指底泥培养的时间(d); Δc 是指 t 时刻与初始时刻之间上覆水中 SRP 浓度的变化值($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); A 是指底泥与上覆水之间的接触面积(m^2). 根据公式(1)计算得到的模拟期间底泥向上覆水的磷平均释放速率为 $0.48 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 许多因素可以影响底泥中固相磷向水相的迁移, 其中 2 个重要的影响因素是 DO 和 pH 值^[11,33]. 通常情况下, 铁铝结合态磷和钙结合态磷是底泥中磷的 2 种主要存在形式^[11]. 在酸性条件

下铁铝结合态磷容易释放, 在碱性条件下钙结合态磷容易释放, 而在中性条件下二者均很难释放^[11]. 对照组反应器上覆水的 pH 值仅仅只是比中性略高, 因此笔者推测对照组底泥中磷释放主要不是由 pH 值变化所引起的. 在好氧条件下, 底泥中铁主要以 Fe^{3+} 形式存在, 磷会被铁氢氧化物所吸附, 很难被释放进入水中; 而在缺氧条件下, 铁氢氧化物会发生溶解, 从而导致与铁结合的磷容易被释放出来^[11]. 对照组反应器上覆水中 DO 浓度处于非常低的水平. 因此, 笔者推测铁磷同步释放是对照组反应器中底泥磷释放的主要机制.

对于添加组反应器而言, 当培养时间由 0 增加到 14 d 时, 上覆水中 SRP 浓度由 0 增加到 $0.018 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 当培养时间继续增加到 28 d 时, 上覆水中 SRP 浓度基本保持不变; 当培养时间由 28 d 增加到 35 d 时, 上覆水中 SRP 浓度则出现了一个较为明显地增加. 根据公式(1)计算得到的模拟期间底泥向上覆水释放磷的平均速率为 $0.19 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 这些结果说明, 在缺氧条件下磁性锆铁改性膨润土改良底泥仍然会释放出一定数量的磷进入上覆水中. 进一步通过对比对照组和添加组上覆水中 SRP 浓度和底泥平均磷释放速率发现, 磁性锆铁改性膨润土添加导致上覆水中 SRP 浓度下降了 60% ~ 91%, 底泥磷平均释放速率下降了 60%. 这说明, 磁性锆铁改性膨润土添加显著地降低了底泥中磷向上覆水体的释放通量, 导致上覆水中磷浓度急剧下降. 考虑到磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水的 DO 浓度和 pH 值影响较小, 所以上覆水 DO 浓度和 pH 值的变化不是磁性锆铁改性膨润土控制底泥磷释放的主要原因. 考虑到磁性锆铁改性膨润土对水中磷酸盐具有卓越的吸附能力, 因此磁性锆铁改性膨润土添加控制底泥磷向上覆水的释放, 主要归功于改良剂对水中和底泥中磷的钝化作用. 这可以从下文的实验数据中得到证实.

表 1 磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水 DO 浓度、pH 值和 SRP 浓度的影响

Table 1 Effect of magnetic zirconium/iron-modified bentonite addition on DO concentration, pH value, and SRP concentration in overlying water

培养天数/d	DO 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		pH 值		SRP 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	
	对照	添加	对照	添加	对照	添加
14	0.92	2.15	7.37	7.45	0.092	0.018
21	0.83	0.97	7.84	7.94	0.101	0.009
28	0.31	0.25	7.52	7.90	0.174	0.018
35	0.61	0.59	7.55	7.80	0.229	0.092

2.3 磁性锆铁改性膨润土添加对间隙水中磷的影响

底泥中磷向上覆水释放的过程通常是: 磷首先从底泥中释放出来进入间隙水中, 而后磷再通过间隙水和上覆水之间的扩散作用从间隙水中向上覆水

中迁移^[34]. 因此, 弄清改良剂对间隙水中磷的影响规律, 对于揭示磁性锆铁改性膨润土添加控制底泥中磷向上覆水体中释放的机制, 是非常重要的. 为此, 本研究对比分析了对照组和添加组间隙水中磷

浓度, 结果发现, 当培养时间为第 35 d 时, 对照组和添加组间隙水中 SRP 浓度分别为 $0.503 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.082 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 改良剂导致间隙水中 SRP 浓度下降了 84%. 这说明, 磁性锆铁改性膨润土添加可以极大地抑制底泥中磷向间隙水中的释放. 进一步采用公式 (2) 对底泥-水界面 SRP 扩散通量 [F , $\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$] 进行计算^[34,35]:

$$F = \varphi D \left. \frac{\partial c}{\partial Z} \right|_{Z=0} \quad (2)$$

式中, φ 表示底泥的孔隙率 (%); D 表示底泥中 SRP 的扩散系数 ($\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$); $\left. \frac{\partial c}{\partial Z} \right|_{Z=0}$ 表示底泥-水界面的浓度梯度 [$\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{cm})^{-1}$]. D 采用以下公式进行计算^[34]:

$$D = \varphi D_0 \quad (\varphi \leq 0.7) \quad (3)$$

$$D = \varphi^2 D_0 \quad (\varphi > 0.7) \quad (4)$$

式中, D_0 是无限稀溶液的理想扩散系数, 本研究中 D_0 取 $7.34 \times 10^{-6} \text{ cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$. 本研究计算得到的对照组和添加组中底泥-水界面磷扩散通量分别为 $0.890 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $-0.031 \text{ mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$. 由此可见, 磁性锆铁改性膨润土添加极大地降低了底泥-水界面磷扩散通量. 考虑到磁性锆铁改性膨润土添加对上覆水 SRP 浓度、间隙水 SRP 浓度和底泥-水界面 SRP 扩散通量的影响趋势是一致的, 因此磁性锆铁改性膨润土对间隙水中磷的削减作用, 是其控制底泥中磷向上覆水体中释放的主要原因. 而磁性锆铁改性膨润土之所以能对间隙水中磷产生削减作用, 一个重要原因是: 磁性锆铁改性膨润土对水中磷酸盐具有卓越的吸附能力, 从底泥中释放进入间隙水中的磷会被磁性锆铁改性膨润土所吸附, 从而降低了间隙水中磷的浓度.

2.4 磁性锆铁改性膨润土添加对底泥磷形态的影响

图 2 为磁性锆铁改性膨润土改良前后底泥的磷形态分布特征. 从中可见, 未改良底泥和磁性锆铁改性膨润土改良后底泥中各形态磷 (Liabile-P、BD-P、NaOH-rP、HCl-P 和 Res-P) 存在显著差异. 磁性锆铁改性膨润土的添加, 导致底泥中 Liabile-P 含量由 $19.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $4.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 下降幅度达到 77.7%; BD-P 含量由 $236 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $148 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 下降幅度达到 37.2%; HCl-P 含量由 $460 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $23.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 下降幅度达 95.0%. 这说明, 磁性锆铁改性膨润土添加可以显著降低底泥中 Liabile-P、BD-P 和 HCl-P 含量. 与 Liabile-P 和 BD-P 相反的是, 磁性锆铁改性膨润土的添加, 导致底泥中 NaOH-rP 含量由 $69.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至 $264 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅达 2.80 倍, 并且导致

Res-P 含量由 $32.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 上升至 $452 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 增幅达 13.0 倍. 这说明, 磁性锆铁改性膨润土添加可以显著增加底泥中 NaOH-rP 和 Res-P 含量. 从图 2 还可以看出, 磁性锆铁改性膨润土添加促使底泥中不同形态磷发生了相互转化, 促使底泥中 Liabile-P、BD-P 和 HCl-P 向 NaOH-rP 和 Res-P 转变.

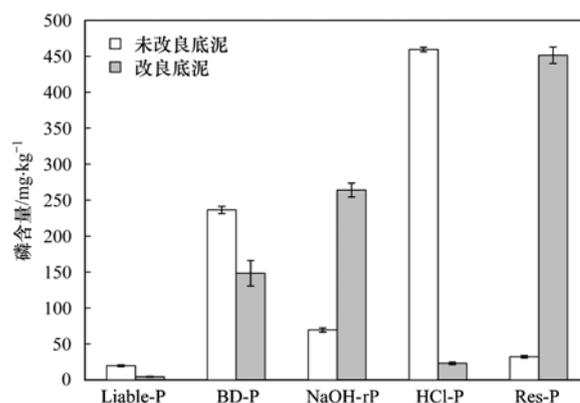


图 2 磁性锆铁改性膨润土改良前后底泥的磷形态分布特征

Fig. 2 Phosphorus fractionation of unamended and magnetic zirconium/iron-modified bentonite-amended sediments

对于底泥而言, 不同形态磷的释放风险是不同的. Liabile-P 是底泥中最容易释放的磷^[36]. BD-P 主要是指底泥中与铁锰氧化物/氢氧化物结合的磷, 当氧化还原电位发生改变时, 底泥中 BD-P 很容易被释放出来^[36]. Liabile-P 和 BD-P 是潜在活性磷的组成部分^[36]. NaOH-rP 是指被铝氧化物所吸附的磷和被固定到铁氧化物内部的磷^[36]. HCl-P 是指被钙镁矿物所固定的磷^[36]. NaOH-rP 和 HCl-P 相对比较稳定, 不容易被释放出来^[36]. Res-P 是最为稳定的磷形态, 很难被释放出来^[30]. 添加组中 Liabile-P 和 BD-P 含量明显低于对照组, 这说明磁性锆铁改性膨润土添加可以极大地降低底泥中磷的释放风险. 与对照组相比, 添加组中潜在活性磷 (Liabile-P + BD-P) 下降了 40.3%. 这进一步说明了磁性锆铁改性膨润土添加可以显著地降低了底泥中磷的释放风险. 而底泥中磷释放风险的降低, 反过来会导致间隙水中磷浓度的降低. 因此, 磁性锆铁改性膨润土添加后, 底泥中潜在活性的 Liabile-P 和 BD-P 含量的降低, 同样是间隙水中磷浓度下降的一个重要原因. 磁性锆铁改性膨润土添加降低底泥中 Liabile-P 和 BD-P 的原因预计是: 底泥中 Liabile-P 和 BD-P 被释放进入间隙水中, 进入间隙水中磷则会被磁性锆铁改性膨润土所吸附, 而间隙水中磷浓度的下降反过来又会促进底泥中 Liabile-P 和 BD-P 的释放, 最终导致了底泥中 Liabile-P 和 BD-P 含量的下降.

Yang 等^[20]考察了锆改性沸石添加对底泥中磷形态的影响, 结果发现, 锆改性沸石添加导致底泥

中 Liable-P、BD-P 和 HCl-P 含量的下降,同时导致底泥中 NaOH-rP 和 Res-P 含量的增加,即锆改性沸石添加促使底泥中 Liable-P、BD-P 和 HCl-P 向 NaOH-rP 和 Res-P 转变. Wang 等^[12,36]考察了给水处理厂废弃铁铝污泥(WTRs)和镧改性膨润土(Phoslock[®])对底泥中磷形态的影响,结果发现,WTRs 添加会导致底泥中 BD-P 向 NaOH-rP 的转变,而 Phoslock[®] 添加会使底泥中 BD-P 向 HCl-P 转变.由此可见,与锆改性沸石、WTRs 和 Phoslock[®] 等钝化剂相同的是,磁性锆铁改性膨润土添加同样可以降低底泥中 BD-P 的含量,这是有利于底泥中磷释放控制的.不过,需要特别指出的是,磁性锆铁改性膨润土添加对底泥中磷形态的具体影响规律,与锆改性沸石是类似的,而与 WTRs 和 Phoslock[®] 是不同的.本研究中,磁性锆铁改性膨润土添加导致底泥中部分较为稳定的磷形态——HCl-P 转化为非常稳定的磷形态——Res-P,这同样是有利于底泥中磷释放的控制.

2.5 磁性锆铁改性膨润土添加对底泥磷生物有效性的影响

生物有效磷是指能够直接或间接被藻类所利用的磷^[29].通常,生物有效磷含量越高,底泥中磷发生释放并为藻类生长所利用的可能性越大^[32].为此,弄清磁性锆铁改性膨润土添加对底泥中生物有效磷含量的影响,对于阐明磁性锆铁改性膨润土添加控制底泥磷释放的机制,是非常必要的.图3为磁性锆铁改性膨润土改良前后底泥中各种类型生物有效态含量.从中可见,未改良底泥中含量最高的生物有效态磷为 FeO-P,其次为 Olsen-P 和 AAP,含量最小的为 WSP 和 RDP.由图3还可见,磁性锆铁改性膨润土改良底泥中 WSP、RDP、Olsen-P、AAP 和 FeO-P 含量均低于未改良底泥.添加磁性锆铁改性膨润土后,底泥中 WSP 含量由 $17.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $2.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下降幅度达到 86.3%; RDP 含量由 $3.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.72 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,下降幅度达到 81.8%; Olsen-P 含量由 $128 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $97.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低了 24.1%; AAP 含量由 $121 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $76.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低了 37.1%; FeO-P 含量由 $145 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $55.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降低了 61.7%. RDP 代表容易解吸的磷和被认为是藻类可以利用的磷^[37]. WSP 被认为是底泥中直接可以利用磷的最好评估指标^[37]. Olsen-P 被认为是藻类可以利用磷的定量指标^[37]. AAP 被认为是可以被藻类生长所利用的生物有效磷含量的最好评估指标^[37].采用铁氧化物-滤纸可以较好地模拟藻类对底泥中磷的吸收,因此 FeO-P 可以较好地代表

底泥中生物有效磷含量^[29].图3的实验结果说明了,磁性锆铁改性膨润土添加极大地降低了底泥中磷的生物有效性,显著地降低了底泥中磷发生释放的风险.而底泥磷释放风险的降低,反过来会降低间隙水中磷的浓度.因此,磁性锆铁改性膨润土添加后,底泥中磷生物有效性的降低,同样是间隙水中磷浓度下降的一个重要原因.

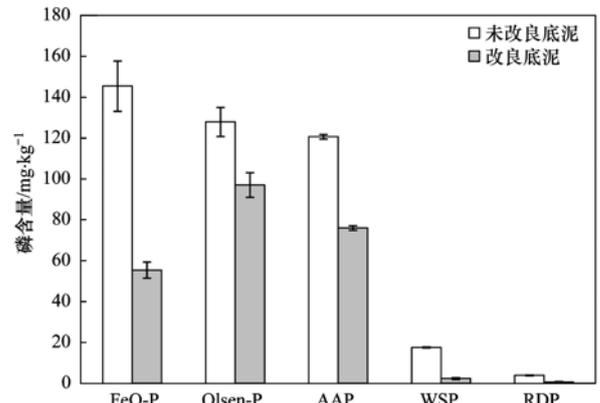


图3 磁性锆铁改性膨润土改良前后底泥的磷生物有效性
Fig. 3 Phosphorus bioavailability of unamended and magnetic zirconium/iron-modified bentonite-amended sediments

2.6 被磁性锆铁改性膨润土所吸附磷的形态分布特征和生物有效性

如果被磁性锆铁改性膨润土所吸附磷处于不稳定的状态,那么这部分磷容易被重新释放出来,从而降低了磁性锆铁改性膨润土控制底泥磷释放的效率.因此,弄清被磁性锆铁改性膨润土所吸附磷的形态分布特征和生物有效性,对于该改良剂的应用是非常重要的.图4为通过磁分离得到的磁性锆铁改性膨润土中各形态磷的分布特征.从中可见,从底泥中回收回来的磁性锆铁改性膨润土含有一定数量的 BD-P、NaOH-rP、HCl-P 和 Res-P,这说明磁性锆铁改性膨润土可以吸附从底泥中释放出来的磷.进一步计算确定,底泥中 Liable-P、BD-P、NaOH-rP、HCl-P 和 Res-P 分别占总可提取态磷的 0.8%、24.7%、47.4%、7.1% 和 20.0%.这说明被磁性锆铁改性膨润土所吸附的磷中含量最多的磷形态是 NaOH-rP(47.4%),其次为 BD-P(24.7%),紧接着依次为 Res-P(20.0%) 和 HCl-P(7.1%),含量最少的是 Liable-P(0.8%).由此可见,被磁性锆铁改性膨润土所吸附的磷中多数会以较为稳定和最为稳定的磷形态存在,磁性锆铁改性膨润土可以有效钝化底泥中潜在活性磷.这进一步证实了,底泥中潜在活性磷逐渐被磁性锆铁改性膨润土所吸附,转化为更为稳定的磷形态,是磁性锆铁改性膨润土添加后底泥中磷形态发生相互转化的主要原因.虽然较为

稳定和非常稳定的各形态磷之和占总可提取态磷的比例达到了 74.5%，但是仍然还有 25.5% 的磷以潜在活性磷形式存在。因此，及时采用外加磁场作用将吸附饱和后的磁性锆铁改性膨润土从底泥中回收回来，以消除改良剂中潜在活性磷再次释放的负面影响，是非常必要的。

图 5 为通过磁分离得到的磁性锆铁改性膨润土中不同类型生物有效磷含量。从中可见，吸附磷后的磁性锆铁改性膨润土含一定数量的生物有效磷，且不同类型生物有效磷含量从大小的排序依次为： FeO-P ($161 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > Olsen-P ($127 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > WSP ($9.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > RDP ($3.74 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。进一步计算得到， FeO-P 、 Olsen-P 、 WSP 和 RDP 占总可提取态磷的比例分别为 11.8%、9.3%、0.7% 和 0.3%。这说明，被磁性锆铁改性膨润土所吸附的磷中仍然存在一部分磷会以生物有效磷形式存在，这部分磷存在较大的再释放风险。因此，及时采用外加磁场作用将吸附饱和后的磁性锆铁改性膨润土从底泥中移除出去，以消除改良剂中生物有效磷的重新释放风险，是非常重要的。

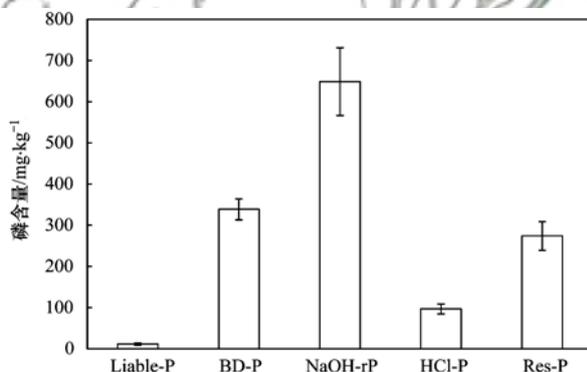


图 4 被磁性锆铁改性膨润土所吸附磷的形态分布特征

Fig. 4 Phosphorus fractionation of magnetic zirconium/iron-modified bentonite after incubation with sediment

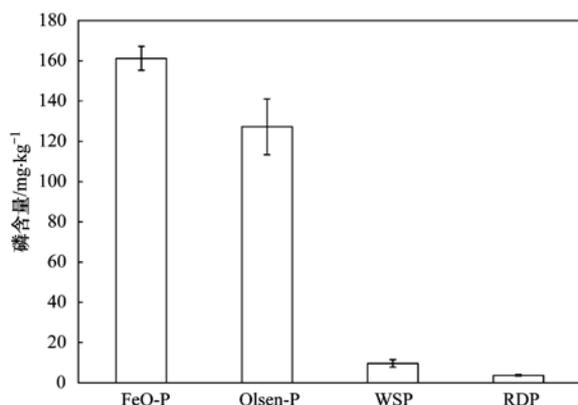


图 5 被磁性锆铁改性膨润土所吸附磷的生物有效性

Fig. 5 Phosphorus bioavailability of magnetic zirconium/iron-modified bentonite after incubation with sediment

2.7 磁性锆铁改性膨润土添加控制底泥磷释放的机制

综合以上分析，本文得出磁性锆铁改性膨润土添加控制底泥磷释放的机制主要为：改良剂进入底泥中后，一方面利用其钝磷能力促使底泥中潜在活性磷向较为稳定或最为稳定形态磷的转化，并且促使底泥中生物有效磷向非生物有效磷转变，降低底泥中磷向间隙水中的释放，从而导致间隙水中磷浓度的下降；另一方面，位于底泥中的改良剂利用其吸磷能力吸附被释放进入间隙水中磷，进一步降低了间隙水中磷的浓度；而间隙水中磷浓度的降低，可以降低底泥-水界面磷的扩散通量，导致进入上覆水中磷数量的下降，最终使得上覆水中的磷浓度处于较低的水平。

3 结论

(1) 磁性锆铁改性膨润土添加不仅可以降低间隙水中 SRP 浓度，而且可以降低底泥-水界面 SRP 扩散通量，最终降低了从底泥中迁移进入上覆水体中的磷数量。

(2) 磁性锆铁改性膨润土添加不仅可以促使底泥中不稳定的 Liable-P 和 BD-P 向较为稳定的 NaOH-rP 和非常稳定的 Res-P 转变，降低了底泥中潜在活性磷含量，而且降低了底泥中 WSP 、 RDP 、 Olsen-P 、 AAP 和 Res-P 这 5 种 BAP 含量，最终降低了底泥中磷向间隙水中迁移的风险。

(3) 被磁性锆铁改性膨润土所吸附的磷中大部分是以较为稳定的 NaOH-rP 和非常稳定的 Res-P 形式存在，并且所吸附的磷中大部分是以非生物有效磷形式存在。但仍存在一部分磷是以潜在活性磷形式和生物有效磷形式存在，这部分磷存在重新释放的风险，因此通过外加磁场的作用将吸附饱和后的磁性锆铁改性膨润土进行回收是非常必要的。

(4) 磁性锆铁改性膨润土添加控制底泥中磷向上覆水体中释放主要归功于底泥中潜在活性磷和生物有效磷的下降，以及间隙水中磷浓度的下降。

参考文献:

- [1] Smith V H, Tilman G D, Nekola J C. Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems[J]. *Environmental Pollution*, 1999, **100** (1-3): 179-196.
 - [2] Chen M S, Ding S M, Chen X, et al. Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments[J]. *Water Research*, 2018, **133**: 153-164.
 - [3] 张志斌, 周光军, 魏垒垒, 等. 主要理化因子对南四湖底泥磷释放的影响[J]. *山东建筑大学学报*, 2010, **25** (6): 637-641.
- Zhang Z B, Zhou G J, Wei L L, et al. Effect of main

- physicochemical factors on the release of phosphorus from Nansi Lake sediment [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2010, **25**(6): 637-641.
- [4] 王一茹, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2336-2344. Wang Y R, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of nitrogen and phosphorus in sediment pore water and overlying water of Dianchi Caohai Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2336-2344.
- [5] 刘子森, 张义, 王川, 等. 改性膨润土和沉水植物联合作用处理沉积物磷[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 665-674. Liu Z S, Zhang Y, Wang C, *et al.* Synergistic removal of sediment P by combining the modified bentonite and *Vallisneria spiralis*[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 665-674.
- [6] 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.
- [7] 汪建华, 王文浩, 何岩, 等. 原位曝气修复黑臭河道底泥内源营养盐的示范工程效能分析[J]. *环境工程学报*, 2016, **10**(9): 5301-5307. Wang J H, Wang W H, He Y, *et al.* Analysis of performances of pilot-scale in-situ aeration remediation for endogenous nutrients in malodorous river sediments [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, **10**(9): 5301-5307.
- [8] Liu X N, Tao Y, Zhou K Y, *et al.* Effect of water quality improvement on the remediation of river sediment due to the addition of calcium nitrate [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 887-894.
- [9] Lin J, Sun Q, Ding S M, *et al.* Mobile phosphorus stratification in sediments by aluminum immobilization [J]. *Chemosphere*, 2017, **186**: 644-651.
- [10] 丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 等. 滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3828-3834. Ding S, Wang S R, Zhang R, *et al.* Concentration of phosphorus in sediments interstitial water as affected by distribution of aquatic plants in Dianchi Lake [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3828-3834.
- [11] Wang C H, Bai L L, Pei Y S. Assessing the stability of phosphorus in lake sediments amended with water treatment residuals [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **122**: 31-36.
- [12] Wang C H, He R, Wu Y, *et al.* Bioavailable phosphorus (P) reduction is less than mobile P immobilization in lake sediment for eutrophication control by inactivating agents [J]. *Water Research*, 2017, **109**: 196-206.
- [13] Wang C H, Liang J C, Pei Y S, *et al.* A method for determining the treatment dosage of drinking water treatment residuals for effective phosphorus immobilization in sediments [J]. *Ecological Engineering*, 2013, **60**: 421-427.
- [14] Meis S, Spears B M, Maberly S C, *et al.* Sediment amendment with Phoslock® in Clatto Reservoir (Dundee, UK): Investigating changes in sediment elemental composition and phosphorus fractionation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **93**(1): 185-193.
- [15] 刘新, 王秀, 赵珍, 等. 风浪扰动对底泥内源磷钝化效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(8): 3064-3071. Liu X, Wang X, Zhao Z, *et al.* Effect of wind and wave disturbance on passivation of internal phosphorus in sediment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(8): 3064-3071.
- [16] Yin H B, Han M X, Tang W Y. Phosphorus sorption and supply from eutrophic lake sediment amended with thermally-treated calcium-rich attapulgite and a safety evaluation [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **285**: 671-678.
- [17] Yin H B, Kong M, Han M X, *et al.* Influence of sediment resuspension on the efficacy of geoenvironmental materials in the control of internal phosphorus loading from shallow eutrophic lakes [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 568-579.
- [18] Li C J, Yu H X, Tabassum S, *et al.* Effect of calcium silicate hydrates (CSH) on phosphorus immobilization and speciation in shallow lake sediment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, **317**: 844-853.
- [19] 杨孟娟, 林建伟, 詹艳慧, 等. 铝和锆改性沸石对太湖底泥-水系统中溶解性磷酸盐的固定作用[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(11): 1351-1359. Yang M J, Lin J W, Zhan Y H, *et al.* Immobilization of phosphate in Taihu Lake sediment-water systems using aluminum-modified zeolites and zirconium-modified zeolites as amendments [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(11): 1351-1359.
- [20] Yang M J, Lin J W, Zhan Y H, *et al.* Immobilization of phosphorus from water and sediment using zirconium-modified zeolites [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(5): 3606-3619.
- [21] Yang M J, Lin J W, Zhan Y H, *et al.* Adsorption of phosphate from water on lake sediments amended with zirconium-modified zeolites in batch mode [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **71**: 223-233.
- [22] Lin J W, Wang H, Zhan Y H, *et al.* Evaluation of sediment amendment with zirconium-reacted bentonite to control phosphorus release [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, **75**(11): 942.
- [23] Fan Y, Li Y W, Wu D Y, *et al.* Application of zeolite/hydrous zirconia composite as a novel sediment capping material to immobilize phosphorus [J]. *Water Research*, 2017, **123**: 1-11.
- [24] Funes A, de Vicente J, Cruz-Pizarro L, *et al.* Magnetic microparticles as a new tool for lake restoration: a microcosm experiment for evaluating the impact on phosphorus fluxes and sedimentary phosphorus pools [J]. *Water Research*, 2016, **89**: 366-374.
- [25] Funes A, del Arco A, Álvarez-Manzaneda I, *et al.* A microcosm experiment to determine the consequences of magnetic microparticles application on water quality and sediment phosphorus pools [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 245-253.
- [26] Rydin E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment [J]. *Water Research*, 2000, **34**(7): 2037-2042.
- [27] Wang C H, Bai L L, Jiang H L, *et al.* Algal bloom sedimentation induces variable control of lake eutrophication by phosphorus inactivating agents [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 479-488.
- [28] 何思琪, 张薇, 林建伟, 等. 锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 215-224. HE S Q, Zhang W, Lin J W, *et al.* Effect of zirconium-modified zeolite addition on phosphorus release and immobilization in heavily polluted river sediment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 215-224.
- [29] 黄清辉, 王子健. 淡水环境磷的生物有效性评估方法的发展

- 动态[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(3): 132-136.
- Huang Q H, Wang Z J. Review on the development trend of the methods assessing phosphorus bioavailability in freshwater environment[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(3): 132-136.
- [30] 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 等. 滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3384-3393.
- Li L, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Vertical variation of phosphorus forms in lake dianchi and contribution to Release[J]. Environmental Science, 2016, 37(9): 3384-3393.
- [31] Soliman N F, El Zokm G M, Okbah M A. Evaluation of phosphorus bioavailability in El Mex Bay and Lake Mariut sediments [J]. International Journal of Sediment Research, 2017, 32(3): 432-441.
- [32] Gu B W, Lee C G, Lee T G, *et al.* Evaluation of sediment capping with activated carbon and nonwoven fabric mat to interrupt nutrient release from lake sediments[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599-600: 413-421.
- [33] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China [J]. Water Research, 2008, 42(8-9): 2251-2259.
- [34] Yu J H, Ding S M, Zhong J C, *et al.* Evaluation of simulated dredging to control internal phosphorus release from sediments; Focused on phosphorus transfer and resupply across the sediment-water interface[J]. Science of The Total Environment, 2017, 592: 662-673.
- [35] 望雪, 程豹, 杨正健, 等. 澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2126-2134.
- Wang X, Cheng B, Yang Z J, *et al.* Differences in diffusive fluxes of nutrients from sediment between the natural river areas and reservoirs in the Lancang River Basin [J]. Environmental Science, 2018, 39(5): 2126-2134.
- [36] Wang C H, Qi Y, Pei Y S. Laboratory investigation of phosphorus immobilization in lake sediments using water treatment residuals [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 209: 379-385.
- [37] Wang C H, Pei Y S. Effects of light, microbial activity, and sediment resuspension on the phosphorus immobilization capability of drinking water treatment residuals in lake sediment [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(12): 8900-8908.



CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i>	(525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i>	(532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i>	(540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i>	(548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i>	(558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i>	(567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i>	(590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i>	(603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i>	(614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i>	(625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i>	(633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i>	(640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i>	(658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i>	(669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i>	(677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>	(693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i>	(701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i>	(708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i>	(724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Jian, <i>et al.</i>	(730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i>	(738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i>	(747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i>	(754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i>	(761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i>	(768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i>	(774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i>	(783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i>	(791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i>	(799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i>	(816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i>	(823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i>	(845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i>	(853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i>	(859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i>	(869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i>	(876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i>	(885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i>	(893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i>	(904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i>	(915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i>	(924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i>	(934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i>	(945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i>	(953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i>	(961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>	(970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i>	(978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i>	(987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i>	(994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i>	(1003)