

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.12

第40卷 第12期

目次(卷终)

研究报告

- 京津冀秋冬季 PM_{2.5} 污染概况和预报结果评估 朱媛媛, 高愈霄, 刘冰, 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 汪巍, 丁俊男, 李健军, 段小丽 (5191)
- 2016 ~ 2017 年采暖期华北平原东部 PM_{2.5} 组分特征及来源解析 张逸琴, 王杰, 高健, 徐仲均, 车飞, 马彤, 杨艳, 刘素, 闫璐璐 (5202)
- 霾不同发展阶段下污染气体和水溶性离子变化特征分析 王振彬, 刘安康, 卢文, 杨晓旻, 王红磊, 陈魁, 夏丽 (5213)
- 上海郊区家庭妇女 PM_{2.5} 重金属组分暴露水平、来源与健康风险 罗燃燃, 戴海夏, 张蕴晖, 乔利平, 马英歌, 周敏, 夏斌, 朱清扬, 赵迎亚, 黄成 (5224)
- 固定污染源可凝结颗粒物测量方法 蒋靖坤, 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 郝吉明 (5234)
- 家具企业挥发性有机物排放特征及其环境影响 张嘉妮, 曾春玲, 刘锐源, 姚懿娟, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (5240)
- 抗生素企业 VOCs 排放清单及影响范围模拟 竹涛, 吕怡蓉, 边文璟, 牛文凤, 袁前程, 段二红, 于洋, 林军 (5250)
- 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 孙玉静, 乔泓钦, 张子伟, 裴梦园, 张孟琼, 任明浩 (5258)
- 成都市道路积尘中全氟化合物的污染特征及暴露风险评估 方淑红, 朱和祥, 叶芝祥, 印红玲, 孙静 (5265)
- 祁连山北坡中段降水稳定同位素特征及水汽来源分析 张百娟, 李宗省, 王昱, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 桂娟 (5272)
- 长江南京段水源水中抗生素的赋存特征与风险评估 封梦娟, 张芹, 宋宁慧, 卜元卿, 杨正标, 刘艳华, 郭瑞昕, 陈建秋, 张圣虎 (5286)
- 夏秋季混凝剂对复合锰氧化膜去除地表水中氨氮和锰的影响 程丽杰, 黄廷林, 程亚, 张莎莎, 阮昭意, 卢磊 (5294)
- 浙江省 H 市供水系统消毒副产物及其健康风险评价 刘俊萍, 于建全, 李青松, 马晓雁, 杨玉龙, 贾佳 (5302)
- 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征 陈昭宇, 李思悦 (5309)
- 川西高原河流水体 CDOM 的光化学降解特性 刘堰杨, 孙辉, 刘琛, 王小沁 (5318)
- 三峡库区典型紫色土小流域径流及氮磷流失特征 曹瑞霞, 刘京, 邓开开, 先宇, 王伟, 方芳, 欧阳文娟, 郭劲松 (5330)
- 九龙江流域河流磷输出对土地利用模式及水文状况的响应 黄亚玲, 唐莉, 黄金良, 肖才荣 (5340)
- 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响 方娜, 刘玲玲, 游清徽, 田娜, 吴燕平, 阳文静 (5348)
- 太湖草藻型湖区磷赋存特征及其环境意义 耿雪, 文帅龙, 孙培荣, 徐楚天, 李大鹏, 黄勇 (5358)
- 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价 方家琪, 祁闯, 张新厚, 韩睿明, 黄和笑, 王卓森, 王国祥 (5367)
- 降雨强度对洱海流域凤羽河氮磷排放的影响 李晓虹, 雷秋良, 周脚根, 张亦涛, 李影, 胡万里, 武淑霞, 翟丽梅, 王洪媛, 刘宏斌 (5375)
- 外源 Ca²⁺ 和 K⁺ 作用下河口区碱蓬水质净化效果和耐盐碱提高机制 吴丹, 孙萍, 陈广琳, 陈友媛, 彭昌盛 (5384)
- 泽泻 (*Alisma orientale*) 对全氟化合物的吸收和传输特征-浓度的影响 王团团, 李贝贝, 王赛, 华佩, 陈军, 应光国 (5394)
- 复合人工湿地中反硝化除磷作用的发生及其稳定性 刘冰, 郑煜铭, 李清飞, 赵承美, 魏巍, 张凯 (5401)
- 铅、镉和铜改性沸石添加控制底泥磷释放的对比 刘婷, 赵钰颖, 林建伟, 詹艳慧, 秦琴 (5411)
- 生物炭结构性对氨氮的吸附特性影响 陈梅, 王芳, 张德俐, 易维明 (5421)
- 溶解氧对悬浮与附着生长系统短程硝化反应的影响机制 王嗣禹, 刘灵婕, 王芬, 季民 (5430)
- 间歇恒定/梯度曝气对 SNAD 工艺启动的影响 李冬, 刘志成, 徐贵达, 李帅, 张杰 (5438)
- 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 赵治国, 袁林江 (5446)
- 阶梯曝气对城市污水好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 魏子清, 劳会妹, 李帅, 张杰 (5456)
- 酵母菌降解胞外聚合物提升剩余活性污泥的脱水性能 俞心怡, 向金豪, 刘英, 龚天翼, 张彬辉, 吕文洲 (5465)
- 基于 GEE 的 1998 ~ 2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 闭璐, 马瑞雪, 唐廷元 (5473)
- 基于 MDS 与 TOPSIS 模型的滨海滩涂围垦区土壤质量评价 解雪峰, 濮励杰, 朱明, 吴涛, 许艳 (5484)
- 淹水增加对闽江河口淡水潮汐湿地孔隙水地球化学特征及 CO₂ 和 CH₄ 排放通量的影响 李敬, 黄佳芳, 罗敏, 刘育秀, 谭季, 朱爱菊, 王声钰, 仝川 (5493)
- 养殖塘 CH₄ 排放特征及其影响因素 王娇, 肖薇, 张秀芳, 张弥, 张文庆, 刘强, 陈争, 董保华, 李旭辉 (5503)
- 施肥对高梁地土壤呼吸及其温度敏感性的影响 严俊霞, 张媛, 焦晓燕 (5515)
- 高硒高镉区土地安全区划方法 王锐, 侯宛苓, 李雨潼, 余涛, 陈娟 (5524)
- 不同配比复合材料对农田镉污染土壤的修复效果 陈树兰, 许晨阳, 耿增超, 王强, 祝乐, 龚园, 拓卫卫 (5531)
- 水铝钙石对不同镉污染农田重金属的钝化效果及机制 吴秋梅, 刘刚, 王慧峰, 胡文友, 黄标 (5540)
- 狮子山矿区不同土地利用类型对土壤微生物群落多样性的影响 黄健, 朱旭炎, 陆金, 孙雨, 赵兴青 (5550)
- 林地转型耕地对东北丘陵区白浆土 *cbbL* 细菌群落丰度和结构的影响 王蕊, 吴宪, 李刚, 修伟明, 王丽丽, 张贵龙 (5561)
- 粤港澳大湾区场地污染特征、治理修复与环境管理研究专辑
- 粤港澳大湾区污染场地土壤风险管控制度体系建设与思考 常春英, 董敏刚, 邓一荣, 肖荣波, 刘丽丽 (5570)
- 粤港澳大湾区土壤污染问题计量及可视化分析 张宁, 张盛, 杨海超, 张建通 (5581)
- 城市生活垃圾填埋场的物质存量特征及其环境影响: 以粤港澳大湾区为例 马仕君, 周传斌, 杨光, 赵志岚, 刘懿颀 (5593)
- 粤港澳大湾区丘陵区带某电镀场地重金属污染特征与迁移规律分析 侯文隽, 龚星, 詹泽波, 刘锋, 黄子航, 杨立宏, 林晓琛 (5604)
- 粤港澳大湾区典型化工场地苯系物污染特征及迁移规律 邓一荣, 陆海建, 董敏刚, 程洲, 庄长伟, 肖荣波, 钟音, 彭平安 (5615)
- 针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能 刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨 (5623)
- 广东大宝山矿区土壤植物体系重金属迁移过程及风险评价 陈洁宜, 刘广波, 崔金立, 肖唐付 (5629)
- Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 林挺, 罗飞, 朱艳, 杨坤, 郝秀平 (5640)
- 《环境科学》第 40 卷(2019 年)总目录 (5649)
- 《环境科学》征订启事(5233) 《环境科学》征稿简则(5285) 信息(5357, 5420, 5429)

针铁矿-富里酸复合材料对铅镉污染土壤的钝化修复性能

刘千钧, 李想, 周阳媚, 唐杰鹏, 林亲铁, 姚琨

(广东省工业污染场地修复技术与装备工程技术研究中心, 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 珠三角地区作为粤港澳大湾区的重要经济区域, 工矿企业多, 土壤重金属污染状况较为严重, 且多以铅镉复合污染为主, 研发安全高效的重金属修复材料与技术对保障区域环境质量和人居安全具有重要意义. 本文拟采用钝化修复技术, 以南方红壤中典型矿物针铁矿为主体, 制备了针铁矿-富里酸复合材料, 并将其应用于铅镉复合污染土壤的钝化修复. 结果表明, 复合材料中富里酸所占的质量分数越高, 对铅镉钝化作用效果越好; 土壤中铅镉的钝化率(IE)随钝化时间的延长而增加, 并趋于稳定; 钝化修复后可交换态及碳酸盐结合态 Pb 含量降低, 残渣态 Pb 含量增加, 土壤中 Cd 可交换态含量降低, 铁锰氧化态及残渣态含量显著增加; 钝化修复后土壤 CEC、速效钾及铵态氮含量均有所提高; 综合评价认为针铁矿-富里酸复合材料应用于红壤铅镉钝化修复有效可行.

关键词: 针铁矿; 富里酸; 铅; 镉; 钝化

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)12-5623-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906152

Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil

LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, TANG Jie-peng, LIN Qin-tie, YAO Kun

(Guangdong Industrial Contaminated Site Remediation Technology and Equipment, Engineering Research Center, School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: The Pearl River Delta region is the major economic zone of the Greater Bay Area; it presents a large number of industrial-mining enterprises and is interested by severe heavy metal pollution (mainly caused by Pb and Cd). The research and development of safe and efficient heavy metal remediation materials and technologies is fundamental in order to guarantee regional environmental quality and habitat safety. Goethite-fulvic acid composites were prepared using goethite minerals present in the red soils of the Pearl River Delta region by passivation repair, and were applied to immobilize Pb and Cd in a co-contaminated soil. The results showed that a higher ratio of fulvic acid in the composites enhanced the immobilization effect on Pb and Cd; the immobilization efficiency (IE) of Pb and Cd increased with the passivation time, and then stabilized. Additionally, the exchangeable and carbonate-bound fractions of Pb and Cd in the soil decreased, while the Fe-Mn oxide-bound and residual fractions increased. The cation exchange capacity (CEC), as well as the available K and NH_4^+ -N in the soil increased after the application of the composite materials. We conclude that goethite-fulvic acid composites can be effectively applied to the remediation of Pb-Cd contaminated soil.

Key words: goethite; fulvic acid; Pb; Cd; immobilization

近年来,随着工农业生产的飞速发展,矿产资源、工业废水和农药等不合理地使用与排放,造成土壤中重金属污染^[1],因其移动性差、滞留时间长和不能被微生物降解等特点,对环境产生极大危害. 珠三角地区作为粤港澳大湾区的重要经济区域,工矿企业多,土壤重金属污染状况较为严重,且多以铅镉复合污染为主^[2]. 珠三角区域 Cd 超标率较高,其超标率与农用地土壤污染风险筛选值($0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比达 71.7%^[3]. 研发安全高效的重金属修复材料与技术对全面保障大湾区环境质量和人居安全具有重要意义.

钝化修复技术通过向土壤中添加改良剂或者钝化剂,使重金属发生一系列的化学反应,降低土壤重金属移动性和有效性,达到治理和修复的目的,钝化材料的选择是这一技术应用的关键. 钝化材料种类

繁多,如铁氧化物^[4]、腐殖质^[5]、生物炭^[6]、蒙脱石^[7]和海泡石^[8]等,采用钝化修复技术时,应根据污染土壤实际情况,因地制宜地选择合适的钝化材料,提高钝化修复效果,减少钝化剂给污染土壤带来的二次污染等问题.

珠三角地区土壤中含有大量的铁氧化物,是红壤中最为活跃的成分之一,具有反应活性强、比表面积和化学亲和力大等优点^[9],可以吸附固定土壤重金属,控制其在土壤中的迁移转化和降低其生物有效性^[9,10]. 在自然环境中,土壤中的铁氧化物并不单独

收稿日期: 2019-06-20; 修订日期: 2019-07-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802803, 2017YFD0801302); 国家自然科学基金项目(21677052, 21677041)

作者简介: 刘千钧(1971~),女,博士,副教授,主要研究方向为环境材料及土壤污染修复, E-mail: lqjzhch@gdut.edu.cn

存在,大多通过配体交换表面络合^[11, 12]、离子交换、静电效应^[13]和氢键作用等,与土壤有机质结合,形成矿物-有机复合体,影响矿物表面的吸附、溶解、结晶以及有机质的化学分解与缩合等过程.富里酸是土壤有机质中可溶于酸碱的部分,表面具有较多的活性基团和吸附位点,与重金属离子有较强的络合能力^[14],能强烈影响重金属的环境地球化学行为^[15].作者前期研究表明^[16],铁氧化物与富里酸通过形成复合体,吸附性能和材料稳定性均得到大幅提升.

本文选择南方红壤中极为丰富和稳定的铁氧化物——针铁矿及富里酸为主要组分,制备针铁矿-富里酸复合材料,借助富里酸与重金属的络合能力,进

一步提高针铁矿对铅镉的吸附固定作用,评价基于土壤中的天然组分铁氧化物和富里酸的复合材料对铅镉的钝化修复效果.

1 材料与方法

1.1 实验材料

富里酸(FA≥90%),购自上海麦克林生化科技有限公司,其余所用试剂均为分析纯.

污染土壤采自某矿区下游约 6 km 的种植区农田,取 0~20 cm 表层土壤,除去枝棒、叶片、石子等异物,将采集的土壤样品风干、研磨后过 0.25 mm 的尼龙筛后备用,土壤的基本性质见表 1.

表 1 污染土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the contaminated soil

项目	pH	CEC/cmol·kg ⁻¹	OM/%	Pb/mg·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	Mn/mg·kg ⁻¹	Fe/mg·kg ⁻¹
参数值	6.98	13.51	5.30	3422.16	22.28	53.39	5.01×10 ⁴

1.2 复合材料制备

针铁矿-富里酸复合材料的制备:将质量比为 0%、1%、5% 和 10% 的富里酸溶于 2.5 mol·L⁻¹ 的 KOH 溶液中,逐滴滴加到 0.25 mol·L⁻¹ Fe(NO₃)₃ 中,用 KOH 溶液调节溶液 pH 为 12,60℃ 老化 60 h,去离子水清洗至中性,60℃ 干燥研磨,制得 4 种复合材料(GeFA0、GeFA1、GeFA5 和 GeFA10).物相分析表明,复合材料中铁氧化物主要以针铁矿形式存在^[16].

1.3 钝化实验

取 100 g 污染土壤于 250 mL 广口瓶中,按 5% 重量比加入复合材料,翻转混合均匀,在室温下保持田间持水量的 60% 培养,分别于 7、15、30、45 和 60 d 取样,冷冻干燥后过筛,采用二乙烯三胺五乙酸(DTPA)浸取法(GB/T 23739-2009)测定土壤铅镉有效态含量.按照 Tessier 连续分级提取方法^[17]测定可交换态(F1)、碳酸盐态(F2)、铁锰氧化态(F3)、有机结合态(F4)及残渣态(F5)含量.土壤 pH 值和阳离子交换量 CEC 以及铵态氮、有效磷以及速效钾等含量参照文献^[18].

采用钝化率(IE)评价复合材料对土壤中 Pb/Cd 的钝化效果,计算公式如下:

$$IE = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100\%$$

式中,IE 为钝化率,%;C₀ 为钝化前的土壤样品中铅镉的 DTPA 有效态含量,mg·kg⁻¹;C₁ 为钝化后土壤样品中铅镉的 DTPA 有效态含量,mg·kg⁻¹.

采用土壤重金属迁移率指数(IM)描述土壤重金属的生物可利用性和迁移能力,计算公式如下^[19]:

$$IM = \frac{F1 + F2}{F1 + F2 + F3 + F4 + F5} \times 100\%$$

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 Origin 9.1 软件进行数据处理及绘图,Pearson(皮尔森)相关矩阵分析采用 SPSS 22.0 统计软件完成.

2 结果与讨论

2.1 复合材料对铅镉的钝化效果

DTPA 有效态含量可反映出重金属的可交换态、碳酸盐态、部分的铁锰氧化态及有机结合态含量,有效态含量和植物生长最为密切,可代表重金属的植物可给性^[5, 20].钝化前 Pb 和 Cd 的 DTPA 有效态含量分别 1 534.76 mg·kg⁻¹ 和 11.56 mg·kg⁻¹,以 DTPA 有效态含量计算钝化率(IE),得到污染土壤中 Pb/Cd 的钝化率随时间的变化如图 1.从中可见,复合材料对土壤中铅镉均有一定的钝化作用.随着时间的延长,钝化率也随之增加,钝化 60 d 后,4 种复合材料对土壤中 Pb 的钝化率分别可达 8.86%、3.39%、20.30% 和 56.73%,土壤 Cd 的钝化率可达 11.58%、7.25%、29.36% 和 71.81%.复合材料中富里酸所占的质量分数越大,钝化效果越好,前期复合材料 FTIR 分析表明^[16],富里酸的质量分数越高,复合材料中羧酸盐基峰强度愈强,而金属-羧酸的结合是控制金属移动性的重要因素^[21].同时,富里酸比例的增加,使复合材料表面逐渐变得粗糙^[16],也有利于吸附固定土壤中的重金属离子.

2.2 复合材料对土壤中铅镉形态分布的影响

土壤重金属的环境行为及对生态环境的危害程

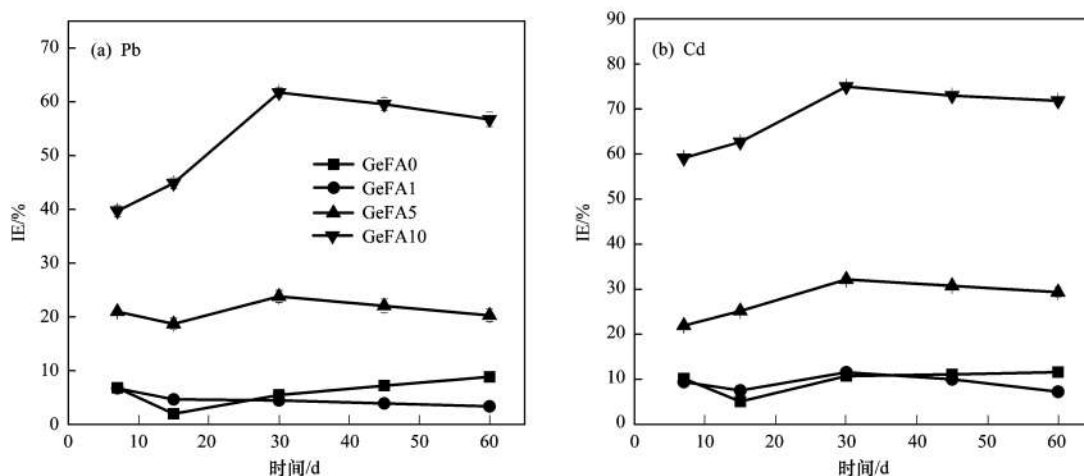


图1 复合材料对土壤铅镉的钝化效果

Fig. 1 Immobilization performance of the composites on the Pb and Cd contained in the soil

度与其赋存形态有关^[22]. 其中,可交换态部分移动性最强,是植物根系最容易吸收的形态,与人体健康密切相关^[23]. 碳酸盐结合态在酸性条件下易向植物有效态转化,铁锰氧化态及有机结合态是植物较难利用的形态,而残渣态是重金属在土壤中最稳定的形态,一般无法被植物吸收^[24]. 钝化修复前后土壤中的铅镉形态分布如图2所示,土壤中Pb主要以碳酸盐态、铁锰氧化态、有机结合态和残渣态这4种形态存在,而Cd主要以残渣态和可交换态存在,有机结合态含量较低,这主要与Cd进入土壤后与土壤胶粒结合较弱有关^[25].

钝化60 d后,可交换态Pb含量降低了0.98%~3.79%,且复合材料中富里酸的比例越大,降低幅度越明显. 碳酸盐态Pb含量降低了1.32%~8.35%,铁锰氧化态和有机结合态变化不明显,但残渣态Pb含量显著增加了4.39%~10.97%.

土壤中Cd的可交换态含量降低了3.29%~

25.61%,Cd的有机结合态含量降低了0.71%~2.44%,残渣态含量显著增加了4.81%~7.62%. 土壤中Cd的铁锰氧化态含量随着材料中富里酸的比例增加而增加,GeFA10时达到21.00%,这与复合材料主体针铁矿密切相关,同时,复合材料含有的K、Fe等元素,能够与土壤溶液中 H^+ 离子发生交换反应,提高土壤pH的同时,增强了土壤中 $CdOH^+$ 与吸附点位的亲和,使镉离子和铁锰氧化物的结合增强^[26].

根据形态分析结果,计算得到的铅镉迁移率指数(IM)如表2所示. 迁移率指数(IM值)的大小可以反映重金属在土壤中的稳定性,IM值越低,越不易被生物利用,危害性越小;相反,IM值越大,移动性就越强,表现出越大的危害性. 钝化前Pb和Cd的IM值分别为0.2591和0.5076,土壤中Cd的迁移率较Pb高,其流动性更强,与Puga等^[27]的研究结果相似. 施加复合材料钝化60 d后,土壤中铅镉

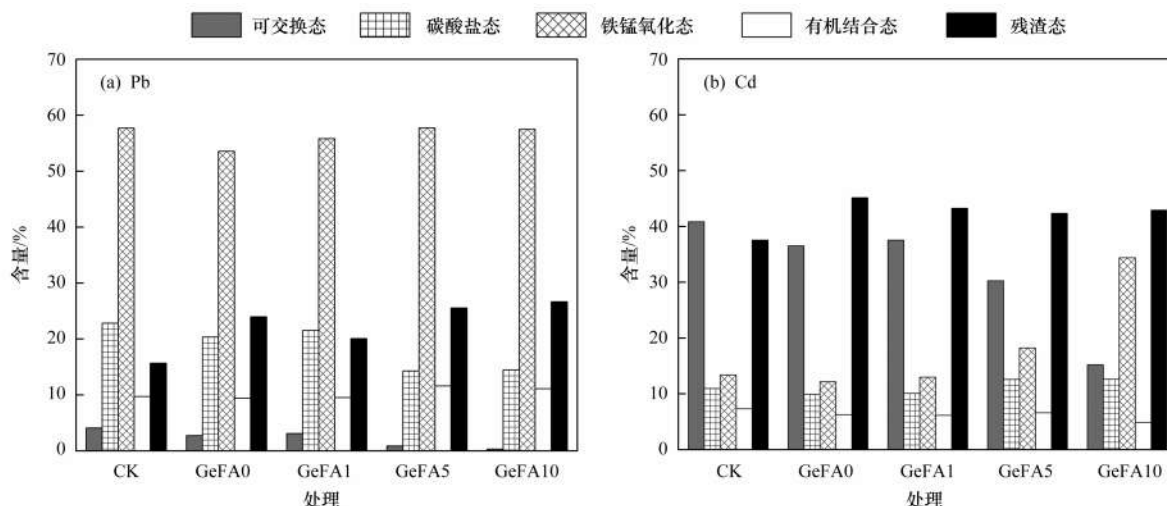


图2 复合材料对土壤Pb/Cd各形态分布的影响

Fig. 2 Effect of the composite on the speciation of Pb and Cd in the soil

表 2 钝化前后土壤中 Pb/Cd 的迁移率指数 (IM)

Table 2 Mobility indexes of Pb and Cd in the contaminated soil

金属	CK	GeFA0	GeFA1	GeFA5	GeFA10
Pb	0.259 1	0.220 9	0.236 1	0.141 5	0.137 7
Cd	0.507 6	0.454 4	0.466 1	0.418 3	0.268 4

的 IM 值分别降低了0.038 2~0.121 4和0.041 5~0.239 2,表明复合材料的添加可显著降低土壤中铅镉的移动性,其中 GeFA10 效果最为明显,除了与材料本身较高富里酸含量带来的强络合性有关外,也与 GeFA10 施用带来的土壤 pH、CEC 变化有关.如表 3 和图 3 所示,GeFA10 引起的土壤 pH 值变化幅度最大,同时 GeFA10 可能增加了土壤中黏土矿物、有机质表面和水合氧化物的负电荷,使得土壤 CEC 增大,也有利于其对土壤中铅镉的吸附固定作用.

表 4 土壤 Pb、Cd 各形态含量的皮尔逊相关系数($n=5$)¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficients of Pb and Cd for each speciation in the soil

		F1		F2		F3		F4		F5	
		Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
F1	Pb	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Cd	—	1	—	—	—	—	—	—	—	—
F2	Pb	0.983 **	—	1	—	—	—	—	—	—	—
	Cd	—	-0.760	—	1	—	—	—	—	—	—
F3	Pb	-0.294	—	-0.383	—	1	—	—	—	—	—
	Cd	—	-0.975 **	—	0.772	—	1	—	—	—	—
F4	Pb	-0.867	—	-0.935 *	—	0.659	—	1	—	—	—
	Cd	—	0.865	—	-0.349	—	-0.809	—	1	—	—
F5	Pb	-0.919 *	—	-0.875	—	-0.100	—	0.652	—	1	—
	Cd	—	-0.295	—	-0.169	—	0.099	—	-0.592	—	1

1) * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$

使污染土壤中的 Pb、Cd 由活性高的可交换态向活性较低的残渣态及铁锰氧化态转化,有效降低 Pb、Cd 的迁移性,达到钝化的目的.

2.4 复合材料对铅镉污染土壤部分理化参数的影响

土壤 pH 值是影响土壤中重金属活性的关键因素,对土壤中物质的迁移转化具有重要作用^[28].如图 3 所示,钝化处理 60 d 后,相比于空白组的 pH 值 6.98,CK 处理,钝化材料的添加使土壤 pH 值显著提升了 0.22~1.42 个单位,且随着材料中富里酸的比例增加,土壤 pH 值随之增加,GeFA10 处理后的土壤 pH 值达到最大 8.40.

土壤阳离子交换量 (CEC) 是评价土壤保肥能力、改良土壤的重要依据,也是土壤缓冲性能的主要来源^[29].土壤 CEC 随着复合材料中富里酸的比例增加而增加,这与复合材料中的富里酸使土壤有机质含量增加有关.作为植物生长不可或缺的营养元素——氮、磷和钾,直接影响植物的生长发育和形态

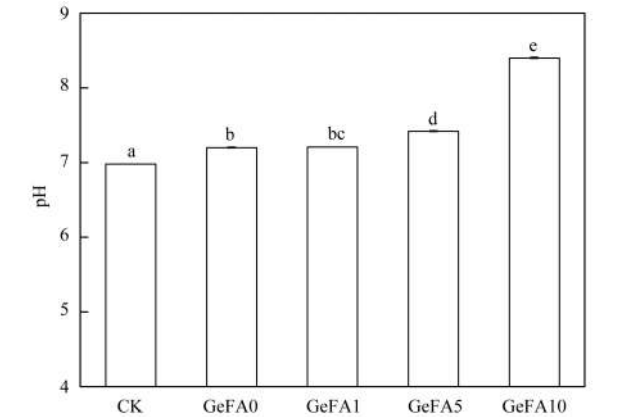
表 3 土壤中阳离子交换量及营养元素含量变化

Table 3 Changes in the cation exchange capacity and nutrient content of the soil

处理	CK	GeFA0	GeFA1	GeFA5	GeFA10
CEC/cm ^{ol} ·kg ⁻¹	13.51	12.18	12.49	13.87	15.21
铵态氮/mg·kg ⁻¹	15.75	14.35	14.75	15.55	23.33
速效钾/mg·kg ⁻¹	142.53	280.42	331.37	456.42	801.26
有效磷/mg·kg ⁻¹	29.94	13.58	14.28	17.72	18.75

2.3 土壤 Pb、Cd 各形态含量相关性分析

土壤 Pb、Cd 各形态含量的 Pearson 相关矩阵分析如表 4 所示. Pb 的 5 种形态中,可交换态与残渣态呈极显著负相关关系,相关系数为 0.919 ($P<0.05$);碳酸盐态与有机结合态呈极显著负相关关系,相关系数为 0.935 ($P<0.05$);可交换态 Cd 与铁锰氧化态 Cd 也呈现极显著负相关关系(相关系数为 0.975).这些结果均表明,添加复合材料可以促



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)
图 3 复合材料钝化处理对土壤 pH 值的影响
Fig. 3 Effect of various treatments on the soil pH

建成,对植物的形态学特征以及生理代谢过程具有显著的影响.钝化修复后土壤的有效磷含量降低了 37.37%~54.62% (表 3),而速效钾含量显著增加

了 96.74% ~ 462.17%, 这与复合材料制备过程中使用的钾盐残留有关。与对照组相比, GeFAO 使铵态氮含量略有下降, 这与铁氧化物对铵态氮有一定的固定作用^[30, 31]有关, 土壤中的铵态氮含量随复合材料中富里酸的比例增加而增加, 有研究表明材料中富里酸比例的增加, 可提高土壤中 NH_4^+ 的累积量^[32]。

3 结论

(1) 针铁矿-富里酸复合材料对土壤中 Pb 和 Cd 表现出一定的钝化作用。钝化率 (IE) 随钝化时间的延长而增加并趋于稳定, 且材料中富里酸所占的质量分数越高, 作用效果越好, 60 天后土壤中 Pb 和 Cd 的钝化率可分别达到 56.73% 和 71.81%。

(2) 复合材料施用 60 d 后污染土壤中 Pb 和 Cd 的迁移率指数 (IM) 显著降低, 分别降低了 0.038 2 ~ 0.121 4 和 0.041 5 ~ 0.239 2。形态分析表明, 可交换态及碳酸盐结合态 Pb 含量降低, 残渣态 Pb 含量增加; 而土壤中 Cd 则主要是可交换态含量降低, 铁锰氧化态及残渣态含量显著增加。

(3) 钝化修复后, 土壤 pH 有一定增加, CEC、速效钾及铵态氮含量随着富里酸比例的增加而增加, 说明复合材料在起到钝化作用的同时, 还可在一定程度上提高土壤营养元素含量。

参考文献:

- [1] 陈月芳, 彭焕玲, 侯荣荣, 等. 改性泥炭对 Pb(II) 和 Cd(II) 的单一及竞争吸附研究[J]. 应用化工, 2019, 48(2): 243-247.
Chen Y F, Peng H L, Hou R R, *et al.* Single and competitive adsorption of Pb(II) and Cd(II) onto modified peat[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(2): 243-247.
- [2] 史鼎鼎, 梁小迪, 徐少慧, 等. EDTA 与耐性细菌对黑麦草吸收复合污染土壤中铅镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1634-1641.
Shi D D, Liang X D, Xu S H, *et al.* Effects of EDTA and resistant bacteria on the uptake of Pb and Cd by ryegrass grown in Pb and Cd-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(8): 1634-1641.
- [3] 赵慧, 何博, 王铁宇, 等. 我国南方典型城市土壤重金属污染特征及源汇关系分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2231-2239.
Zhao H, He B, Wang T Y, *et al.* Pollution characteristics of heavy metals and source-sink relationship in typical city of the South China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(7): 2231-2239.
- [4] 林志灵, 曾希柏, 张杨珠, 等. 人工合成铁、铝矿物和镁铝双金属氧化物对土壤砷的钝化效应[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1953-1959.
Lin Z L, Zeng X B, Zhang Y Z, *et al.* Immobilization effects of synthetic Fe/Al minerals and Mg/Al layered double oxides Mg/Al-LDO additions on arsenic As in soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(7): 1953-1959.
- [5] 赵庆圆, 李小明, 杨麒, 等. 磷酸盐、腐殖酸与粉煤灰联合钝化处理模拟铅镉污染土壤[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 389-398.
Zhao Q Y, Li X M, Yang Q, *et al.* Passivation of simulated Pb- and Cd-contaminated Soil by applying combined treatment of phosphate, humic acid, and fly ash[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 389-398.
- [6] 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 等. 土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3716-3721.
Guo W J, Liang X F, Lin D S, *et al.* Adsorption of Cd^{2+} on biochar from aqueous solution[J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3716-3721.
- [7] 高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 等. 生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 361-367.
Gao R L, Tang M, Fu Q L, *et al.* Fractions transformation of heavy metals in compound contaminated soil treated with biochar, montmorillonite and mixed addition[J]. Environmental Science, 2017, 38(1): 361-367.
- [8] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4720-4726.
Sun Y B, Wang P C, Xu Y M, *et al.* Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: remediation potential and soil environmental quality[J]. Environmental Science, 2014, 35(12): 4720-4726.
- [9] Liu H B, Chen T H, Frost R L. An overview of the role of goethite surfaces in the environment[J]. Chemosphere, 2014, 103: 1-11.
- [10] 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 铁锰氧化物在污染土壤修复中的作用[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 557-564.
Tang Y J, Jia J Y, Xie X D. The environmental mineralogical significance of iron and manganese oxides in remediation of contaminated soil[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(4): 557-564.
- [11] Weng L P, Van Riemsdijk W H, Koopal L K, *et al.* Ligand and charge distribution (LCD) model for the description of fulvic acid adsorption to goethite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 302(2): 442-457.
- [12] Fu H B, Quan X. Complexes of fulvic acid on the surface of hematite, goethite, and akaganeite: FTIR observation[J]. Chemosphere, 2006, 63(3): 403-410.
- [13] Weng L P, Koopal L K, Hiemstra T, *et al.* Interactions of calcium and fulvic acid at the goethite-water interface[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(2): 325-339.
- [14] Weng L P, Van Riemsdijk W H, Koopal L K, *et al.* Adsorption of humic substances on goethite: comparison between humic acids and fulvic acids[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(24): 7494-7500.
- [15] Sheng G D, Yang Q, Peng F, *et al.* Determination of colloidal pyrolusite, Eu(III) and humic substance interaction: a combined batch and EXAFS approach[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 245: 10-16.
- [16] Liu Q J, Li X, Tang J P, *et al.* Characterization of goethite-fulvic acid composites and their impact on the immobility of Pb/Cd in soil[J]. Chemosphere, 2019, 222: 556-563.
- [17] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

- [19] 李小平, 徐长林, 刘献宇, 等. 宝鸡城市土壤重金属生物活性与环境风险[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(4): 1241-1249.
Li X P, Xu C L, Liu X Y, *et al.* Bioactivity and environment risk of heavy metals in urban soil from Baoji City, P. R. China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(4): 1241-1249.
- [20] 贺建群, 许嘉琳, 杨居荣, 等. 土壤中有效态 Cd、Cu、Zn、Pb 提取剂的选择[J]. 农业环境保护, 1994, **13**(6): 246-251.
He J Q, Xu J L, Yang J R, *et al.* Study of the extractants for available Cd, Cu, Zn and Pb in soils [J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, **13**(6): 246-251.
- [21] Fariña A O, Peacock C L, Fiol S, *et al.* A universal adsorption behaviour for Cu uptake by iron (hydr) oxide organo-mineral composites [J]. *Chemical Geology*, 2018, **479**: 22-35.
- [22] 任理想. 土壤重金属形态与溶解性有机物的环境行为[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(7): 69-73.
Ren L X. Heavy Metal species in soil and environment behavior of dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(7): 69-73.
- [23] 潘亚男, 陈灿, 王欣, 等. 凤眼莲源生物炭对土壤 As、Hg、Cd 溶出特性与化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(6): 2342-2350.
Pan Y N, Chen C, Wang X, *et al.* Effects of water hyacinth biochar on the leaching characteristics and fractionations of As, Hg and Cd in a multi-metal contaminated soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(6): 2342-2350.
- [24] 张瑜洁. 生物炭对土壤汞钝化、迁移和转化的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
Zhang Y J. The effect of biochar mercury passivation, migration and transformation in soil [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2015.
- [25] 覃朝科, 农泽喜, 卢宗柳, 等. 某矿区农田土壤重金属潜在生态风险评价及形态分析研究[J]. 环境科学与管理, 2016, **41**(6): 166-170.
Qin C K, Nong Z X, Lu Z L, *et al.* Potential ecological risk assessment and forms analysis of heavy metals in farmland soil of a lead-zinc mining area [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, **41**(6): 166-170.
- [26] Lombi E, Zhao F J, Zhang G Y, *et al.* In situ fixation of metals in soils using bauxite residue: chemical assessment [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **118**(3): 435-443.
- [27] Puga A P, Melo L C A, de Abreu C A, *et al.* Leaching and fractionation of heavy metals in mining soils amended with biochar [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, **164**: 25-33.
- [28] 王洋, 刘景双, 王金达, 等. 土壤 pH 值对冻融黑土重金属 Cd 赋存形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(2): 574-578.
Wang Y, Liu J S, Wang J D, *et al.* Effects of pH on the fraction transformations of Cd in phaeozem soil at the condition of freeze/thaw cycles [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, **27**(2): 574-578.
- [29] 李海鹰, 姜小三, 潘剑君, 等. 土壤阳离子交换量分布规律的研究—以江苏省溧水县为例[J]. 土壤, 2007, **39**(3): 443-447.
Li H Y, Jiang X S, Pan J J, *et al.* Distribution of soil cation exchange capacity—a case study of Lishui County, Jiangsu Province [J]. *Soils*, 2007, **39**(3): 443-447.
- [30] Wang F L, Alva A K. Ammonium adsorption and desorption in sandy soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, **64**(5): 1669-1674.
- [31] Barrett J E, Johnson D W, Burke I C. Abiotic nitrogen uptake in semiarid grassland soils of the U. S. Great Plains [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, **66**(3): 979-987.
- [32] Kasim S, Ahmed O H, Majid N M A, 等. 有机氮肥对马来西亚沙撈越州酸性土壤玉米干物质产量及铵态氮和硝态氮含量的影响[J]. 王艳群, 孙志梅, 译. 腐植酸, 2011, (2): 30-34.
Kasim S, Ahmed O H, Majid N M A, *et al.* Effect of organic based N fertilizer on dry matter (*Zea mays L.*), ammonium and nitrate recovery in an acid soil of Sarawak, Malaysia [J]. Wang Y Q, Sun Z M, trans. *Humic Acid*, 2011, (2): 30-34.

CONTENTS

Concentration Characteristics and Assessment of Model-Predicted Results of PM _{2.5} in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, LIU Bing, <i>et al.</i> (5191)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During the Heating Period of 2016-2017 in the Eastern Part of the North China Plain	ZHANG Yi-qin, WANG Jie, GAO Jian, <i>et al.</i> (5202)
Change in Characteristics of Pollution Gas and Water-soluble Ions at Different Development Stages of Haze	WANG Zhen-bin, LIU An-kang, LU Wen, <i>et al.</i> (5213)
Exposure Levels, Sources, and Health Risks of Heavy Metal Components of PM _{2.5} in Housewives in Rural Shanghai	LUO Ran-ran, DAI Hai-xia, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (5224)
Measuring the Condensable Particle Matter from a Stationary Source	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, WANG Gang, <i>et al.</i> (5234)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics of Furniture Manufacturing Enterprises and the Influence on the Atmospheric Environment	ZHANG Jia-mi, ZENG Chun-ling, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (5240)
VOCs Emission Inventory and Impact Range Simulation of Antibiotic Enterprises	ZHU Tao, LÜ Yi-rong, BIAN Wen-jing, <i>et al.</i> (5250)
Effects of Vehicle Emissions on Heavy Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Pollution in Road Dust in Xinxiang	LI Qi-lu, WU Jin-tao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (5258)
Pollution Characteristics and Exposure Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Road Dust, Chengdu	FANG Shu-hong, ZHU He-xiang, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (5265)
Characteristics of Stable Isotopes and Analysis of Water Vapor Sources of Precipitation at the Northern Slope of the Qilian Mountains	ZHANG Bai-juan, LI Zong-xing, WANG Yu, <i>et al.</i> (5272)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Source Water of the Nanjing Reach of the Yangtze River	FENG Meng-juan, ZHANG Qin, SONG Ning-hui, <i>et al.</i> (5286)
Effects of Different Coagulants on Co-manganese Oxides Filter Media for Removing Ammonium and Manganese from Surface Water in Summer and Autumn	CHENG Li-jie, HUNAG Ting-lin, CHENG Ya, <i>et al.</i> (5294)
Disinfection By-products and the Relevant Health Risk in the Water Supply System in H City of Zhejiang Province	LIU Jun-ping, YU Jian-quan, LI Qing-song, <i>et al.</i> (5302)
Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter in Rivers of the Three Gorges Reservoir Area Under the Background of Urbanization	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (5309)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Natural Rivers of Western Sichuan Plateau	LIU Yan-yang, SUN Hui, LIU Chen, <i>et al.</i> (5318)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses and Runoff in a Typical Purple Soil Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CAO Rui-xia, LIU Jing, DENG Kai-kai, <i>et al.</i> (5330)
Responses of Riverine Phosphorus Exports to Land Use and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, TANG Li, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (5340)
Effects of Land Use Types at Different Spatial Scales on Water Quality in Poyang Lake Wetland	FANG Na, LIU Ling-ling, YOU Qing-hui, <i>et al.</i> (5348)
Environmental Significance of Phosphorus Fractions of Phytoplankton-and Macrophyte-Dominated Zones in Taihu Lake	GENG Xue, WEN Shuai-long, SUN Pei-rong, <i>et al.</i> (5358)
Spatial Distribution and Pollution Evaluation of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Sediments of Zhushan Bay at Taihu Lake	FANG Jia-qi, QI Chuang, ZHANG Xin-hou, <i>et al.</i> (5367)
Effect of Rainfall Intensity on the Content of Nitrogen and Phosphorus Components in Plateau Areas: A Case Study of the Fengyu River Watershed	LI Xiao-hong, LEI Qiu-liang, ZHOU Jiao-gen, <i>et al.</i> (5375)
Water Purification Effect and Saline-alkali Tolerance Improvement Mechanism of <i>Suaeda salsa</i> in the Estuary Area	WU Dan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i> (5384)
Concentration-dependent Accumulation and Translocation of PFASs by Wetland Plant <i>Alisma orientale</i>	WANG Tuan-tuan, LI Bei-bei, WANG Sai, <i>et al.</i> (5394)
Occurrence of Denitrifying Dephosphatation in a Hybrid Constructed Wetland System and Its Stability	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, LI Qing-fei, <i>et al.</i> (5401)
Comparison of the Control of Sedimentary Phosphorus Release Using Zirconium-, Lanthanum-, and Lanthanum/Zirconium-Modified Zeolites as Sediment Amendments	LIU Ting, ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5411)
Effect of Biochar Structure on Adsorption Characteristics of Ammonia Nitrogen	CHEN Mei, WANG Fang, ZHANG De-li, <i>et al.</i> (5421)
Effect of Dissolved Oxygen on Partial Nitrification of Suspended and Attached Growth Systems	WANG Si-yu, LIU Ling-jie, WANG Fen, <i>et al.</i> (5430)
Effects of Different Intermittent Aeration Strategies on the Start-up of SNAD Process	LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> (5438)
Operational Performance and Microbiological Characteristics of an Iron-Salt Denitrification Reactor in Co-substrate Mode	WANG Ru, LIU Meng-yu, LIU Bing-yin, <i>et al.</i> (5446)
Effect of Step Aeration on a Municipal Sewage Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WEI Zi-qing, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (5456)
Improvement of the Dewaterability of Excess Activated Sludge with Mixed Yeasts by Degrading Extracellular Polymeric Substances	YU Xin-yi, XIANG Jin-hao, LIU Ying, <i>et al.</i> (5465)
Influence of Land Use Change on Ecosystem Service Value Based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018	LOU Pei-qing, FU Bo-lin, LIN Xing-chen, <i>et al.</i> (5473)
Assessment of Soil Quality in Coastal Tidal Flat Reclamation Areas Based on MDS-TOPSIS Model	XIE Xue-feng, PU Li-jie, ZHU Ming, <i>et al.</i> (5484)
Effect of Increasing Tidewater Inundation on Porewater Geochemistries and CO ₂ and CH ₄ Effluxes in the Tidal Freshwater Marshes of the Minjiang River Estuary, Southeast China	LI Jing, HUANG Jia-fang, LUO Min, <i>et al.</i> (5493)
Methane Emission Characteristics and Its Influencing Factors over Aquaculture Ponds	WANG Jiao, XIAO Wei, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (5503)
Effect of Fertilization on Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in a Sorghum Field	YAN Jun-xia, ZHANG Yuan, JIAO Xiao-yan (5515)
Land Safety Zoning Method in High-Selenium and High-Cadmium Areas	WANG Rui, HOU Wan-ling, LI Yu-tong, <i>et al.</i> (5524)
Remediation Effects of Different Composite Materials on Cadmium-Contaminated Farmland Soil	CHEN Shu-lan, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (5531)
Hydrocalumite Passivation Effect and Mechanism on Heavy Metals in Different Cd-Contaminated Farmland Soils	WU Qiu-mei, LIU Gang, WANG Hui-feng, <i>et al.</i> (5540)
Effects of Different Land Use Types on Microbial Community Diversity in the Shizishan Mining Area	HUANG Jian, ZHU Xu-yan, LU Jin, <i>et al.</i> (5550)
Effects of Conversion of Forest to Arable Land on the Abundance and Structure of the <i>cbbL</i> -Harboring Bacterial Community in Albic Soil of the Hilly Region of Northeast China	WANG Rui, WU Xian, LI Gang, <i>et al.</i> (5561)
Thoughts on and Construction of a Risk Management and Control System for Contaminated Sites in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	CHANG Chun-ying, DONG Min-gang, DENG Yi-rong, <i>et al.</i> (5570)
Visualized Quantitative Research of Soil Pollution in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHANG Ning, ZHANG Sheng, YANG Hai-chao, <i>et al.</i> (5581)
Characteristics and Environmental Impacts of Materials Stored in Municipal Solid Waste Landfills: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	MA Shi-jun, ZHOU Chuan-bin, YANG Guang, <i>et al.</i> (5593)
Heavy Metal Contamination and Migration in Correspondence of an Electroplating Site on the Hilly Lands of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China	HOU Wen-juan, GONG Xing, ZHAN Ze-bo, <i>et al.</i> (5604)
Pollution Characteristics and Migration of BTEX at a Chemical Contaminated Site in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DENG Yi-rong, LU Hai-jian, DONG Min-gang, <i>et al.</i> (5615)
Immobilization Impact of Goethite-Fulvic Acid Composites on Pb-Cd Contaminated Soil	LIU Qian-jun, LI Xiang, ZHOU Yang-mei, <i>et al.</i> (5623)
Mobilization of Heavy Metals in a Soil-Plant System and Risk Assessment in the Dabaoshan Mine Area, Guangdong Province, China	CHEN Jie-yi, LIU Guang-bo, CUI Jin-li, <i>et al.</i> (5629)
Calculation of the Soil Risk Control Value through a Hydrus-1D Model for Groundwater Protection	LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, <i>et al.</i> (5640)
INDEX HUANJING KEXUE CONTENTS 2019, Vol. 40	(5659)