

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估	张玉欣, 安俊琳, 林旭, 王俊秀, 师远哲, 刘静达 (1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布	蒋磊, 汤莉莉, 潘良宝, 刘丹彤, 花艳, 张运江, 周宏仓, 崔玉航 (13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM _{2.5} 浓度变化的影响	贺祥, 林振山 (22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散	李双德, 徐俊波, 莫胜鹏, 李文辉, 高佳佳, 曹亚裙, 陈运法 (33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量	赵佳玉, 张弥, 肖薇, 王伟, 吴红艳, 张圳, 肖启涛, 胡诚, 于洲, 曹正达, 徐敬争, 刘寿东, 李旭辉 (41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH ₄ 与 CO ₂ 浓度日动态	谭立山, 杨平, 何露露, 黄佳芳, 胡智强, 全川 (52)
河南鸡冠洞 CO ₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较	张萍, 杨琰, 孙喆, 梁沙, 张娜, 田宁, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征	陈俊伊, 王书航, 姜霞, 黄晓峰, 赵丽 (70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析	韩秀秀, 黄晓虎, 余丽燕, 杨浩, 黄昌春, 黄涛, 余艳红, 罗玉 (78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化	张维, 唐翔宇, 鲜青松 (87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应	祁闯, 王国祥, 吴馨婷, 许晓光, 韩睿明, 吴松峻 (95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性: 以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例	杨朝辉, 苏群, 陈志辉, 白俊武, 钱新强, 张志敏 (104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水温的响应特征	陈小华, 李小平, 钱晓雍, 胡双庆 (113)
深水型水库藻形态功能组 (MBFG) 的季节演替特征	杨毓, 卢金锁, 张颖 (121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素	范志伟, 郝庆菊, 黄哲, 柴雪思, 江长胜 (129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征	华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 崔超, 刘宏斌, 任天志, 张富林, 雷秋良 (138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析: 以羊圈沟为例	贾璐杰, 高扬, 陈维梁, 郝卓, 汪亚峰, 陈利顶 (147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较	金树权, 周金波, 包薇红, 陈君, 李丹丹, 李洋 (156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估	张芹, 张圣虎, 汪贞, 郭敏, 刘济宁, 石利利, 古文 (162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价	张家泉, 胡天鹏, 邢新丽, 郑煌, 张丽, 占长林, 刘红霞, 肖文胜, 祁士华 (170)
pH 和络合剂对五价锑在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响	王华伟, 李晓月, 李卫华, 孙英杰 (180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制	王文东, 王昌鑫, 刘荟, 韩雨 (188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响	艾扬, 孔东东, 于畅, 沈扬, 李剑 (195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证	高婷婷, 杜鹏, 徐泽琼, 杨军, 张华方, 李喜青 (201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯	赵纯, 张帅, 周宇, 李琨, 周炜, 黎鹏宇, 杨广, 孙志华, 郑怀礼 (212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究	王利颖, 石洁, 王凯伦, 关羽琪, 郭瑾 (220)
曝气生物滤池 (Fe ²⁺) -臭氧组合工艺强化处理石化二级出水	徐敏, 吴昌永, 周岳溪, 郭明昆, 王翼 (229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整梯烷脂的特异性	王晗, 方芳, 李凯, 邢晖, 郭劲松, 陈猷鹏, 曾前松 (238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析	张超, 陶华强, 宋圆圆, 逯彩彩, 郭延凯, 廉静, 郭建博 (247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征	刘竹寒, 岳秀, 于广平, 金腊华, 唐嘉丽, 吉世明 (253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制	季民, 刘灵婕, 翟洪艳, 刘京, 苏晓 (260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响	王书永, 钱飞跃, 王建芳, 沈耀良 (269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程	郑莹, 潘杨, 周晓华, 廖炬弘, 孟璇, 夏健伟 (276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析	吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 刘鑫 (283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响	史广宇, 程媛媛, 施维林 (294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响	石小霞, 赵诣, 张琳, 吴文良, 孟凡乔 (301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸 (PLFAs) 及酶活性的季节变化特征	李南洁, 曾清苹, 何丙辉, 周飞 (309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性	刘晋仙, 李鑫, 景炬辉, 贾彤, 刘兴港, 王小云, 柴宝峰 (318)
安徽省部分城市土壤中全氯化物空间分布及来源解析	李法松, 倪卉, 黄涵宇, 徐志兵, 张倩, 李长霞, 黄文秀, 金陶胜 (327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤活性有机碳的影响	赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 刘丹, 王旭东, 张阿凤 (333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响	田桃, 曾敏, 周航, 徐璐, 杨文强, 辜娇峰, 邹佳玲, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (343)
砒、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制	陈欣瑶, 杨惠子, 李敏, 牛晓丛, 苏雨轩, 张园 (352)
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	高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晚, 胡红青 (361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测	李培中, 吕晓健, 王海见, 杨苏才, 魏文侠, 宋云 (368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力	黄辉, 宁西翠, 郭瞻宇, 郭堤, 张增强, 李荣华, 王力, Ali Amjad (374)
卤系阻燃剂在东江鱼体中的生物富集	何明靖, 杨婷, 李琦, 王登祥, 赵佳渊 (382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价	陈志良, 黄玲, 周存宇, 钟松雄, 王欣, 戴玉, 蒋晓璐 (389)
蔬菜镉 (Cd) 富集因子变化特征及其影响因素	杨阳, 李艳玲, 陈卫平, 王美娥, 彭驰 (399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响	余亚伟, 杨雨洽, 张成, 易建婷, 安思危, 王定勇 (405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局	赵辉, 郑有飞, 曹嘉晨, 徐静馨, 黄积庆, 袁月 (412)
《环境科学》征稿简则 (12) 《环境科学》征订启事 (194) 信息 (21, 51)	

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

高瑞丽, 唐茂, 付庆灵, 郭光光, 李晓, 胡红青*

(华中农业大学资源与环境学院, 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 本文以采自湖南临湘某重金属复合污染的土壤为研究材料, 采用室内培养方法, 将生物炭(BC)和蒙脱石(MM)按1%、2%、5%单独添加, 以及将二者混合添加(1%+1%), 通过BCR连续提取法, 研究不同钝化剂对复合污染土壤重金属形态变化的影响。结果表明, 生物炭处理显著降低了Cu、Pb和Cd的有效态含量。蒙脱石处理中, MM5%处理使Cu、Pb、Zn、Cd的弱酸提取态含量分别降低了27.6%、19.2%、25.6%、19.2%。混合钝化剂处理使Cu、Pb、Zn、Cd的弱酸提取态含量分别降低了15.8%、15.9%、13.1%、12.0%, 残渣态含量分别增加了39.0%、110.1%、9.6%、62.5%, 显著降低了4种元素的移动性。蒙脱石钝化效果整体优于生物炭, 两者结合使用效果更佳。

关键词: 重金属; BCR法; 钝化; 有效性

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0361-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201606018

Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition

GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, GUO Guang-guang, LI Xiao, HU Hong-ying*

(College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: A compound contaminated soil sampled from Lingxiang City, Hunan Province, was used to investigate the effects of biochar (BC) and montmorillonite (MM) addition on heavy metals fractions. The addition amounts of BC and MM were 1%, 2%, 5%, respectively, and the mixture treatment was 1% BC + 1% MM. BCR (European Community Bureau of Reference) sequential extraction method was used to assess the fractions of heavy metals in soil after incubation. The results indicated that adding BC alone significantly reduced the available contents of Pb, Cu and Cd. Among montmorillonite treatments, MM5% treatment decreased the weak acid extractable content of Cu, Pb, Zn, Cd by 27.6%, 19.2%, 25.6%, 19.2%, respectively. BC + MM treatment worked well, decreased the weak acid extractable content of Cu, Pb, Zn, Cd by 15.8%, 15.9%, 13.1%, 12.0%, and increased the residual content by 39.0%, 110.1%, 9.6%, 62.5%, significantly reducing the mobility of the four elements. For the stabilization effect, MM treatment worked better than BC treatment, and a combination of two amendments worked the best.

Key words: heavy metal; BCR continuous extraction; stabilization; bioavailability

近年来我国土壤重金属污染问题凸显, 全国土壤污染调查结果显示, 我国工矿业废弃地土壤重金属污染十分突出, 污染类型主要以Cd、Pb、Cu、Zn等重金属为主^[1]。土壤重金属修复方法一般为将重金属从土壤中提取去除(淋洗、植物提取等), 或降低重金属的迁移性和毒性(化学钝化、氧化还原等)^[2,3]。其中, 原位化学钝化方法在成本和时间上能更好地满足重金属污染土壤修复要求, 更加适用于农田污染土壤, 尤其是复合污染土壤的治理, 而该项技术中对钝化剂的选用是关键。在众多钝化剂中, 蒙脱石是一种良好的无机钝化剂, 目前已有许多针对蒙脱石及改性蒙脱石钝化重金属的研究^[4~6], 但大多数研究集中于蒙脱石去除水体中重金属的机制探究^[7,8]; 生物炭是一种应用广泛的有机钝化剂, 由于其特殊的物理化学性质, 可以降低土壤中重金

属的活性, 同时改良土壤^[9~11], 但是将生物炭同蒙脱石复合的研究较少。再者, 有机-无机复合体对重金属的吸附、沉淀、凝聚、络合等能力一般大于单一的有机物或无机物, 但研究较少^[12,13]。当前的研究大都利用单一钝化剂对重金属进行处理, 将有机和无机组分结合进行钝化处理的研究较少^[14]。本文通过单独添加生物炭、蒙脱石以及两者混合添加, 对Cu、Pb、Zn、Cd复合污染的农田土壤进行钝化修复, 分析了加入钝化剂后重金属形态的变化, 通过筛选出较好的钝化剂, 以期对矿区农田土壤重金属复合污染修复提供参考。

收稿日期: 2016-06-04; 修订日期: 2016-08-21

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B02)

作者简介: 高瑞丽(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属修复, E-mail: rlgao@webmail.hzau.edu.cn

* 通信作者, E-mail: hqhu@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省临湘市某矿区周围污染水稻田. 基本理化性质为: pH 5.56, 有机质 43.59 g·kg⁻¹, 阳离子交换量 9.0 cmol·kg⁻¹, 机械组成为砂粒 (0.02 ~ 2 mm) 31%, 粉粒 (0.002 ~ 0.02 mm) 52%, 黏粒 (<0.002 mm) 17%. 土壤中重金属总量及形态分布如表 1 所示.

表 1 供试土壤中铅、锌、铜、镉总量及不同形态的含量/mg·kg⁻¹

Table 1 Fractionation of lead, zinc, copper, cadmium in the tested soil/mg·kg ⁻¹					
重金属	弱酸提取态	可还原态	可氧化态	残渣态	总量
Pb	229.39	701.01	44.91	17.66	992.97
Zn	179.98	232.90	102.85	285.16	800.88
Cu	62.65	105.49	26.32	22.77	217.22
Cd	3.17	1.54	0.14	0.16	5.00

1.1.2 钝化剂

稻壳生物炭购自浙江省生物炭工程技术研究中心, pH 为 7.25, BET 比表面为 101.2 m²·g⁻¹, 直接灰化法测定灰分为 51.7%, 利用元素分析仪测定碳含量为 30.35%, 氮含量 0.56%, 氧含量 38.41%.

蒙脱石从南方黏土公司 (Gonzales, TX) 提供的钙基蒙脱石中提取, 然后用 NaCl 溶液饱和, 制成钠基蒙脱石. 沉积物再用去离子水清洗, 直到检测不到 Cl⁻, 冻干. 样品的 pH 为 8.0, CEC 为 81 cmol·kg⁻¹, BET 比表面为 357.8 m²·g⁻¹.

经测定, 生物炭中铜、锌、铅的含量分别为 8.5、41.5、1.3 mg·kg⁻¹, 蒙脱石中铜、锌、铅的含量分别为 8.2、45.7、14.6 mg·kg⁻¹, 两种钝化剂中镉均未检出. 由于试验钝化剂添加量少, 后续计算不再考虑其自身重金属含量的影响.

1.2 稳定化试验

本试验共设 8 个处理, 分别为: ①对照 (CK); ②~④ 添加 1%、2%、5% (质量比) 生物炭 (BC1%、BC2%、BC5%); ⑤~⑦ 添加 1%、2%、5% (质量比) 蒙脱石 (MM1%、MM2%、MM5%); ⑧生物炭和蒙脱石以 1:1 形成混合钝化剂并以 2% (质量比) 添加到土壤中 (BC + MM). 每个处理设 3 次重复.

取过 20 目筛的土样 100 g, 与各类钝化剂按比例混匀, 装入塑料杯中. 用称重法添加超纯水至土壤含水量 30%. 老化培养 45d 后采样, 自然风干, 磨

细, 过 100 目筛备用.

1.3 测定方法

1.3.1 土壤 pH 值测定

按照水土比 2.5:1 的比例混匀, 静置 10min, 用 pH 计测定.

1.3.2 重金属 BCR 分级

采用改进的 BCR 连续提取法处理样品^[15], 提取出弱酸提取态、可还原态、可氧化态和残渣态重金属. 离心过滤后得到的提取液在 4℃ 保存, 用火焰原子吸收光谱仪 (FASS-240) 测定 Pb、Cu、Zn, 用石墨炉原子吸收光谱仪 (GTA-120) 测定 Cd.

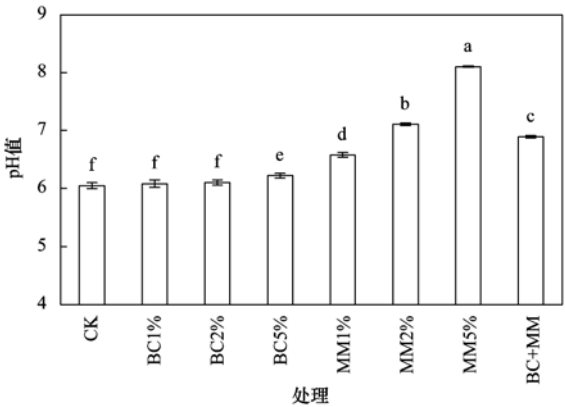
1.4 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 2013 和 SPSS 18.0 进行数据处理、作图和方差分析.

2 结果与分析

2.1 钝化剂对重金属复合污染土壤 pH 的影响

土壤 pH 值是影响土壤中重金属活性的关键因素. 如图 1 所示, 稳定化试验后 CK 处理的 pH 值为 6.05. 相比于 CK 处理, 添加生物炭 1% 和 2% 后, 经过 45 d 培养土壤 pH 变化不显著, 而当添加量为 5% 时土壤 pH 值有了显著提高. 添加蒙脱石的处理, 随着添加量的增加, pH 值增大, 其中 MM5% 处理的土壤 pH 值达到 8.10, 比 CK 处理增加了 2.05 个单位. 此外, BC + MM 处理也显著提高了土壤的 pH, 增幅为 0.84 个单位.



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同钝化剂对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of various treatments on pH in soil

2.2 钝化剂对复合污染土壤中弱酸提取态重金属含量的影响

如表 2 所示, 相比 CK 处理, 除 BC1% 处理外, 其余处理都显著降低了弱酸提取态铜含量, 且随着

生物炭和蒙脱石的添加量增加,弱酸提取态铜含量降低幅度逐渐增大,其中 BC5%、MM5% 处理弱酸提取态铜含量分别降低了 18.6%、27.7%,同时 BC + MM 处理也显著降低了该形态铜的含量,降幅为 15.8%。对于铅而言,添加各种钝化剂均可显著降低弱酸提取态铅的含量,其中单独添加生物炭的处理降幅为 3.2% ~ 8.9%,单独添加蒙脱石降幅为 14.0% ~ 29.2%; BC + MM 处理也显著降低了该形态铅的含量,降幅为 15.9%。此外,CK 处理的弱酸提取态锌含量为 179.98 mg·kg⁻¹; 相比 CK 处理,单独添加生物炭处理无显著变化,而蒙脱石处理则均显著降低了弱酸提取态锌含量,MM1%、MM2%、MM5% 处理中弱酸提取态锌的降幅依次为 17.9%、15.1%、25.6%; 混合钝化剂 BC + MM 也显著降低了该形态的锌含量,降幅为 13.1%。对镉而言,CK

处理下的弱酸提取态镉含量为 3.17 mg·kg⁻¹; 相比 CK 处理,BC5% 处理下弱酸提取态镉的降幅为 6.6%,而 BC1% 和 BC2% 处理下弱酸提取态镉则无显著变化; 蒙脱石的添加可以有效降低土壤中弱酸提取态镉含量,且随着蒙脱石添加量的增加,弱酸提取态镉含量降低的幅度逐渐增大,降幅为 7.3% ~ 19.2%; BC + MM 处理也显著降低该形态镉含量,降幅为 12.0%。针对 4 种重金属而言,生物炭和蒙脱石的添加均可有效降低其在土壤中的活性,且蒙脱石效果优于生物炭。此外,两者以 1:1 配合形成的复合钝化剂在添加量为 2% 时也可有效降低弱酸提取态重金属含量,效果优于 BC2% 和 BC5% 处理。且同 MM2% 处理的效果相比,Cu、Pb、Zn 的弱酸提取态含量无显著差异,而 Cd 弱酸提取态含量显著降低。

表 2 不同处理土壤中铅、锌、铜、镉弱酸提取态含量/mg·kg⁻¹

Table 2 Weak acid extractable Cu, Pb, Zn, Cd contents in contaminated soils treated by different additives/mg·kg⁻¹

处理	Cu	Pb	Zn	Cd
CK	62.65 ± 1.79a	229.39 ± 4.81a	179.98 ± 1.74a	3.17 ± 0.03ab
BC1%	59.58 ± 0.76ab	219.66 ± 3.52b	180.32 ± 2.14a	3.23 ± 0.03a
BC2%	57.39 ± 1.52b	222.02 ± 6.76b	183.14 ± 7.03a	3.06 ± 0.12bc
BC5%	51.01 ± 1.20cd	209.33 ± 2.15c	187.21 ± 1.94a	2.96 ± 0.13c
MM1%	48.84 ± 1.02d	162.32 ± 3.31f	147.71 ± 8.36c	2.94 ± 0.10c
MM2%	52.01 ± 0.34cd	197.33 ± 1.05d	152.79 ± 1.24bc	2.93 ± 0.03c
MM5%	45.28 ± 0.18e	184.86 ± 4.01e	133.87 ± 3.66d	2.56 ± 0.07e
BC + MM	52.77 ± 0.31c	192.93 ± 0.88d	156.34 ± 1.13b	2.79 ± 0.04d

2.3 钝化剂对复合污染土壤中其它形态重金属含量的影响

2.3.1 可还原态、可氧化态、残渣态铜

如图 2 所示,CK 处理下可还原态铜含量为 105.5 mg·kg⁻¹; 添加生物炭后显著增加了可还原态铜含量,其中 BC5% 处理下的增幅为 6.9%; 而单独添加蒙脱石处理和 BC + MM 处理下的可还原态铜含量,与 CK 处理相比差异不显著。CK 处理可氧化态铜含量为 26.3 mg·kg⁻¹; BC5% 处理比 CK 处理的可氧化态铜含量增加了 21.7%,而 BC1%、BC2% 处理与 CK 差异不显著; MM1%、MM2%、MM5% 处理可显著增加可氧化态铜的含量,增幅依次为 11.9%、12.9%、34.0%; 而 BC + MM 处理对可氧化态铜含量则无显著影响。对于残渣态铜而言,添加蒙脱石可显著增加其含量,增幅为 24.9% ~ 30.0%; 而生物炭处理对于残渣态铜含量无显著影响。BC + MM 处理的残渣态铜为 31.7 mg·kg⁻¹,比 CK 处理增加了 39.0%。

总体上而言,单独添加生物炭、蒙脱石以及混

合添加的处理,铜形态都有从弱酸提取态逐渐向可还原态、可氧化态和残渣态转化。而蒙脱石的整体钝化效果要优于生物炭,两者混合施用效果更佳。

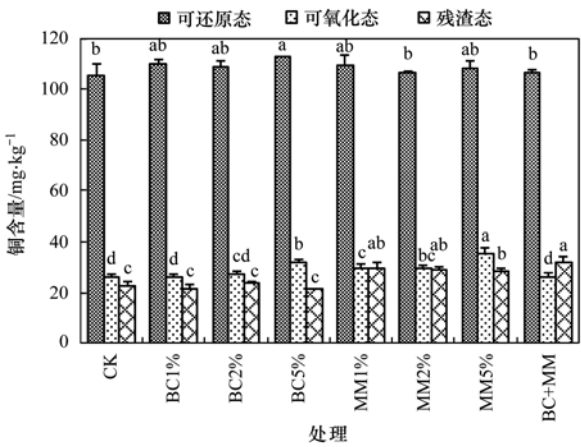


图 2 不同钝化处理污染土壤中可还原态、可氧化态、残渣态铜含量

Fig. 2 Reducible, oxidizable and residual Cu contents in contaminated soils treated by different additives

2.3.2 可还原态、可氧化态、残渣态铅

Pb 在土壤中的迁移性比较弱,如图 3(a)所示,相比 CK 处理,添加钝化剂可在一定程度上增加土壤中可还原态铅的含量,MM1% 处理达到显著变化,其余处理变化不显著. 如图 3(b)所示,CK 处理可氧化态铅含量为 $44.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比 CK 处理,随着添加生物炭量的增加可氧化态铅含量降低,且达到显著差异,其中 BC5% 处理下可氧化态铅含量为 $37.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低了 21.4%;而蒙脱石添加会增加该形态铅的含量,MM5% 处理下增幅为 32.2%,MM1%、MM2% 处理则无显著差异;BC + MM 处理下可氧化态铅含量有所降低,但未达到显著差异. 此外,与 CK 处理相比,所有钝化剂处理都显著增加了残渣态铅的含量,生物炭处理增幅为 22.9% ~ 49.6%,蒙脱石处理的增幅为 87.7% ~ 107.3%,而增幅最大的处理是 BC + MM,达到 110.1%.

总体上而言,生物炭和蒙脱石以及混合处理,都使弱酸提取态铅逐渐向残渣态铅转化,而蒙脱石的钝化效果要优于生物炭,两者配施则效果更好.

2.3.3 可还原态、可氧化态、残渣态锌

由图 4 可知,与 CK 处理相比,随着生物炭添加量的增加可还原态锌含量有增加的趋势,其中 BC5% 处理的增幅为 7.9%,同时,蒙脱石处理也显著增加了该形态锌的含量,增幅为 3.8% ~ 5.7%. CK 处理下可氧化态锌的含量为 $102.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比 CK 处理,BC5%、MM2%、MM5% 处理显著增加了可氧化态锌含量,增幅分别为 9.7%、8.8%、68.3%;BC + MM 处理则对该形态锌无显著影响. 随着生物炭和蒙脱石添加量的增加,残渣态锌含量

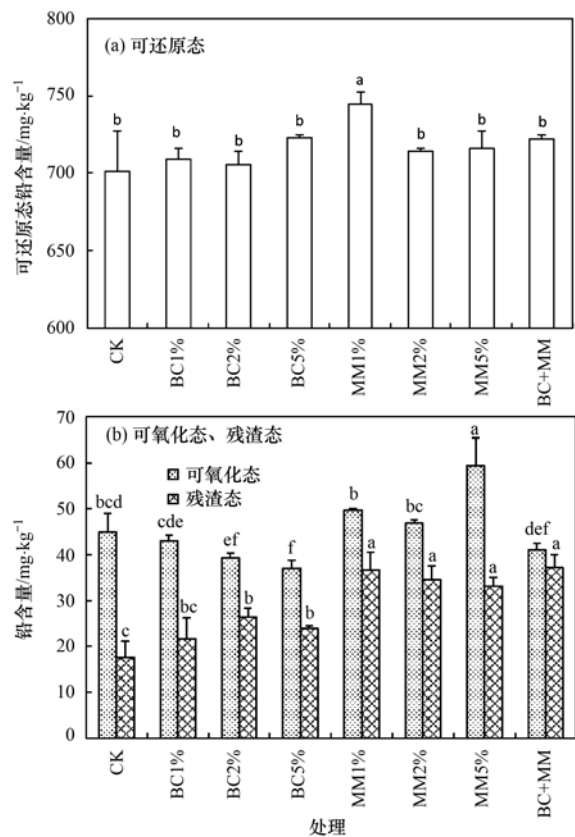


图 3 不同钝化处理污染土壤中铅含量

Fig. 3 Reducible, oxidizable and residual Pb contents in contaminated soils treated by various additives

有降低的趋势,但相比于 CK 处理,MM1%、MM2% 处理增加了残渣态锌含量,增幅为 7.1%、2.0%,此外,BC + MM 处理则显著增加了该形态锌的含量,增幅为 9.6%.

整体上,生物炭对锌的钝化效果不显著,而蒙脱

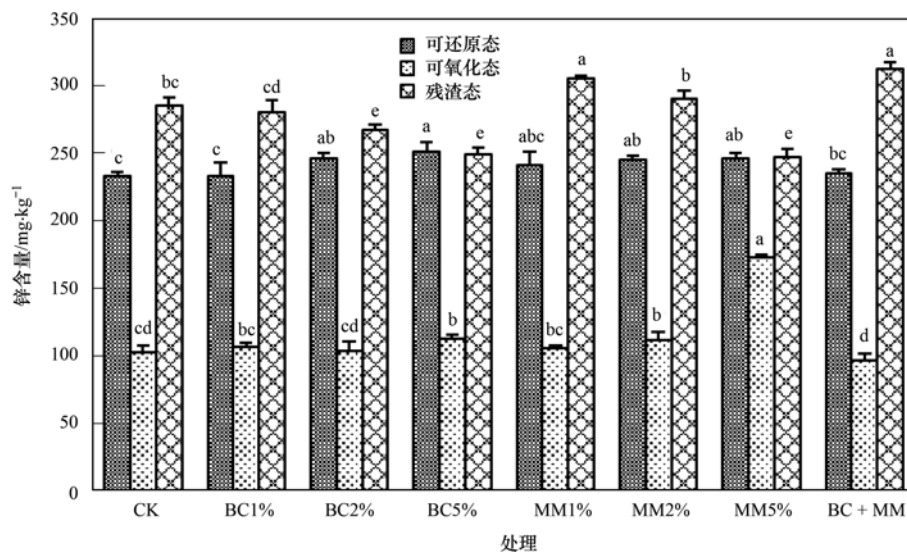


图 4 不同钝化处理污染土壤中可还原态、可氧化态、残渣态锌含量

Fig. 4 Reducible, oxidizable and residual Zn contents in contaminated soils treated by various additives

石和混合钝化剂对锌的钝化作用显著。

2.3.4 可还原态、可氧化态、残渣态镉

原土中镉含量严重超标,钝化后镉污染得到有效缓解。图 5(a)显示,与 CK 处理相比,除 BC1% 处理外,其他处理均可增加可还原态镉的含量,其中 MM5% 处理增幅最大,为 38.3%。由图 5(b)可知,CK 处理可氧化态和残渣态镉含量分别为 $0.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,由于这两种形态的含量都较低,多数处理与 CK 处理相比都无显著差异。只有混合钝化剂 BC + MM 处理显著提高了这两种形态镉的含量,使可氧化态镉和残渣态镉分别增加了 21.4% 和 62.5%。

整体上,生物炭和蒙脱石的添加量越大,钝化镉的效果越好。相比之下,蒙脱石的效果好于生物炭,而混合处理的钝化效果最优。

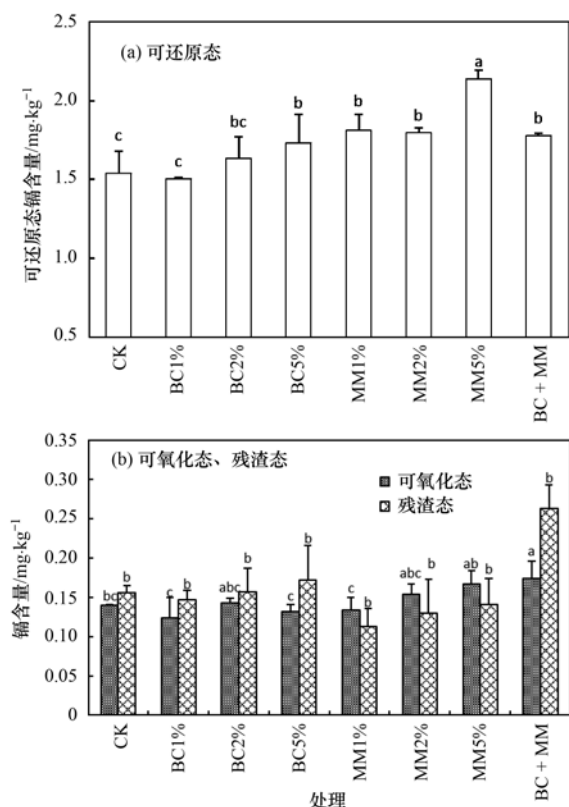


图 5 不同钝化处理污染土壤中镉含量

Fig. 5 Reducible, oxidizable and residual Cd contents in contaminated soils treated by various additives

3 讨论

3.1 不同钝化剂对铜、铅、锌和镉形态的影响

生物炭具有较大比表面和孔隙度,添加生物炭后,显著降低了铜、铅和镉的弱酸提取态含量,且随着添加量的增加,降低的幅度增大,最大降幅分别为 18.6%、8.9% 和 6.6%,这与 Houben 等^[16]的研究

结果类似。但是对 Zn 的弱酸提取态含量影响不大,可能是由于在供试土壤中 Zn 的存在形式更加稳定,残渣态含量较高。添加生物炭后重金属形态向着较稳定的可氧化态和残渣态转化,活性降低,钝化效果明显。目前关于生物炭修复重金属机制的研究较多。刘晶晶等^[17]发现生物炭钝化重金属与其自身的性质有关,其比表面积大,具有多孔性,可通过吸附作用降低重金属的溶解。同时,生物炭本身含有碱性物质,有机质含量高,大量添加使用后有利于提高土壤 pH 值,本研究中添加生物炭后土壤 pH 有一定程度上的提高,有利于重金属的固定。Rizwan 等^[18]和高瑞丽等^[19]也通过钝化试验发现施用生物炭后土壤中重金属的酸提取态含量显著降低,土壤 pH 值提高。另外,生物炭表面存在各种有机官能团,如羧基、羟基等,可与重金属络合而显著降低其生物有效性。

黏土矿物对土壤重金属修复方面的研究较多^[20],本研究中单独添加蒙脱石后,随着添加量的增加显著降低了铜、铅、锌和镉的弱酸提取态含量,使重金属向着稳定的可氧化态和残渣态转化,有效降低了它们的有效性。关于蒙脱石吸附重金属的机制已经有较多研究,蒙脱石是 2:1 型铝硅酸盐矿物,比表面积大,吸附能力强,从而使重金属得以钝化^[21]。Xi 等^[22]发现,当土壤 pH 值提高到 >8 后,土壤中铅的固定机制主要是吸附作用,而蒙脱石有较强的吸附能力,施用后土壤 pH 值显著增加,更有利于其对铅的吸附固定。Gupta 等^[23]和 Brown 等^[24]研究表明蒙脱石对重金属的钝化主要是通过吸附作用进行。本研究表明蒙脱石对重金属的钝化效果优于生物炭,这是由于蒙脱石可以在短时间内提高土壤的 pH,而生物炭对土壤 pH 的提升并不明显(图 1),再者蒙脱石的比表面积比生物炭大。

蒙脱石是一种常见的土壤矿物,其巨大比表面积和强交换性可以使得土壤中重金属趋于稳定,生物炭不仅可以吸附和络合重金属,同时可以改良土壤性质,将蒙脱石同生物炭复合后加入土壤中可以避免因为单独加入有机物或者无机物而对土壤环境产生的巨大影响,同时两者复合可以同时发挥作用。表 2 结果显示,BC + MM 处理均优于 BC2% 和 MM2% 处理,那么蒙脱石同生物炭复合对重金属的钝化具有相互促进的作用,且可以替代单一钝化剂。根据钝化后土壤中重金属的形态变化可知 BC + MM 的处理可使 4 种重金属都从弱酸提取态逐渐向稳定的残渣态转化,使其活性显著降低,但对于两者结合

产生促进作用的机制还有待于进一步研究。

3.2 铜、铅、锌和镉钝化差异比较

生物炭、蒙脱石以及混合添加的处理,对4种不同重金属的钝化效果显著不同。其中,对铅的钝化效果最好,可能是因为添加生物炭后,土壤中水合硅酸钙类黏性强的化合物大量增加,利于铅的固定,另外,生物炭本身含有磷酸盐类物质有利于铅生成沉淀^[25]。而铅本身移动性差,蒙脱石因其较强的吸附能力可以很好地固定铅。

铜和镉的钝化效果次之。生物炭降低铜和镉的有效性主要是利用吸附、络合以及沉淀作用,而稻壳秸秆炭由于硅含量高更有利于重金属离子的沉淀^[26]。生物炭含有的有机官能团对镉亲和力强,有效地吸附固定了镉^[27]。锌的钝化效果较差,特别是添加生物炭的处理,锌的形态变化不显著。主要是由于Zn在土壤中的存在形态大多以稳定形式存在,且4种离子存在着竞争作用,而钝化剂本身的吸附能力有限。

单独施加生物炭、蒙脱石及复合施加生物炭-蒙脱石后的土壤中4种重金属的弱酸提取态含量虽然有显著下降,但是其含量仍然很高,有部分处理仍然超过土壤环境质量标准(第3次意见稿)中农田土壤中重金属总量的限值。混合添加改良材料后,Cu、Pb、Zn的弱酸提取态含量低于土壤环境质量标准(第3次意见稿)中农田土壤中重金属总量的限值,但是Cd的含量依然很高,是限值($0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的5.6倍。故经过45 d钝化后的土壤不可以直接农作,还需要进一步进行改良,进行长期试验观测土壤中重金属的变化。

4 结论

土壤培养试验结果表明,添加生物炭和蒙脱石均可有效提高土壤pH,而蒙脱石对土壤pH的影响大于生物炭。钝化后土壤中重金属的形态发生变化,分析结果表明,添加生物炭和蒙脱石后土壤中弱酸提取态重金属会向更加稳定的可氧化态和残渣态转化,单独添加蒙脱石比单独添加生物炭对重金属的钝化效果好,且添加量越大,钝化效果越显著;生物炭和蒙脱石混合添加的钝化效果最好,且优于单一生物炭和蒙脱石,混合添加更适合复合污染土壤的修复。

参考文献:

[1] 王玉军,刘存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关

问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(8): 1465-1473.

Wang Y J, Liu C, Zhou D M, *et al.* A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in china: discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(8): 1465-1473.

[2] Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, *et al.* Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils-to mobilize or to immobilize? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **266**: 141-166.

[3] Marques A P G, Rangel A O S S, Castro P M L. Remediation of heavy metal contaminated soils: an overview of site remediation techniques[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, **41**(10): 879-914.

[4] Gong B N, Wu P X, Huang Z J, *et al.* Efficient inhibition of heavy metal release from mine tailings against acid rain exposure by triethylenetetramine intercalated montmorillonite (TETA-Mt) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, **318**: 396-406.

[5] Tsai W C, Ibarra-Buscano S, Kan C C, *et al.* Removal of copper, nickel, lead, and zinc using chitosan-coated montmorillonite beads in single-and multi-metal system [J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(21): 9799-9812.

[6] 田犀卓, 金兰淑, 应博, 等. 钢渣-蒙脱石复合吸附剂对水中 Cd^{2+} 的吸附去除[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 207-214.

Tian X Z, Jin L J, Ying B, *et al.* Adsorption of Cd^{2+} from aqueous solution by steel slag-montmorillonite composite adsorbent[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(1): 207-214.

[7] Xiong S Y, Qiu M Q, Wu W Z, *et al.* Adsorption of cadmium (Cd^{2+}) ions from aqueous solutions on the modified montmorillonite [J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2016, **15**(2): 503-508.

[8] Chen C, Liu H B, Chen T H, *et al.* An insight into the removal of Pb(II), Cu(II), Co(II), Cd(II), Zn(II), Ag(I), Hg(I), Cr(VI) by Na(I)-montmorillonite and Ca(II)-montmorillonite[J]. Applied Clay Science, 2015, **118**: 239-247.

[9] Ehsan M, Barakat M A, Husein D Z, *et al.* Immobilization of Ni and Cd in soil by biochar derived from unfertilized dates [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2014, **225**: 2123.

[10] Bian R J, Joseph S, Cui L Q, *et al.* A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in contaminated paddy field with biochar amendment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **272**: 121-128.

[11] Zhang X K, Wang H L, He L Z, *et al.* Using biochar for remediation of soils contaminated with heavy metals and organic pollutants[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(12): 8472-8483.

[12] 荆林晓. 重金属污染土壤的有机-无机复合原位钝化修复技术研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.

Jing L X. Study on immobilization remediation technology for heavy metal contaminated soil by organic-inorganic complex[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2009.

[13] 陶雪, 杨琥, 季荣, 等. 固定剂及其在重金属污染土壤修复中的应用[J]. 土壤, 2016, **48**(1): 1-11.

- Tao X, Yang H, Ji R, *et al.* Stabilizers and their applications in remediation of heavy metal-contaminated soil[J]. *Soils*, 2016, **48**(1): 1-11.
- [14] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 309-313.
- Wu L S, Zeng D M, Mo X R, *et al.* Immobilization impact of different fixatives on heavy metals contaminated soil [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 309-313.
- [15] Rauret G, López-Sánchez J F, Sahuquillo A, *et al.* Application of a modified BCR sequential extraction (three-step) procedure for the determination of extractable trace metal contents in a sewage sludge amended soil reference material (CRM 483), complemented by a three-year stability study of acetic acid and EDTA extractable metal content [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2000, **2**(3): 228-233.
- [16] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Beneficial effects of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed (*Brassica napus* L.) [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, **57**: 196-204.
- [17] 刘晶晶, 杨兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3679-3687.
- Liu J J, Yang X, Lu Q P, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the transformation and bioavailability of heavy metals in soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3679-3687.
- [18] Rizwan M S, Imtiaz M, Huang G Y, *et al.* Immobilization of Pb and Cu in polluted soil by superphosphate, multi-walled carbon nanotube, rice straw and its derived biochar[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(15): 15532-15543.
- [19] 高瑞丽, 朱俊, 汤帆, 等. 水稻秸秆生物炭对镉、铅复合污染土壤中重金属形态转化的短期影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 251-256.
- Gao R L, Zhu J, Tang F, *et al.* Fractions transformation of Cd, Pb in contaminated soil after short-term application of rice straw biochar[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 251-256.
- [20] 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.
- [21] 杭小帅, 周健民, 王火焰, 等. 粘土矿物修复重金属污染土壤[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(9): 113-120.
- Hang X S, Zhou J M, Wang H Y, *et al.* Remediation of heavy metal contaminated soils using clay minerals[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, **1**(9): 113-120.
- [22] Xi Y H, Wu X F, Xiong H. Solidification/stabilization of Pb-contaminated soils with cement and other additives[J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2014, **23**(8): 887-898.
- [23] Gupta S S, Bhattacharyya K G. Adsorption of heavy metals on kaolinite and montmorillonite: a review[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012, **14**(19): 6698-6723.
- [24] Brown L, Seaton K, Mohseni R, *et al.* Immobilization of heavy metals on pillared montmorillonite with a grafted chelate ligand [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **261**: 181-187.
- [25] Moon D H, Park J W, Chang Y Y, *et al.* Immobilization of lead in contaminated firing range soil using biochar [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(12): 8464-8471.
- [26] Lu K P, Yang X, Shen J J, *et al.* Effect of bamboo and rice straw biochars on the bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn to sedum *plumbizincicola* [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2014, **191**: 124-132.
- [27] Mohamed I, Zhang G S, Li Z G, *et al.* Ecological restoration of an acidic Cd contaminated soil using bamboo biochar application [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **84**: 67-76.

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibaohe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Jun-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《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)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行业

ISSN 0250-3301



9 770250 330172