

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邝海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O_3 /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响

周贵宇¹, 姜慧敏^{2*}, 杨俊诚², 张建峰², 张水勤², 梁雷^{1*}

(1. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

摘要: 利用风化煤、草炭和生物炭这 3 种有机物料, 采集陕西关中地区设施菜田土壤, 通过 2014~2015 年两季盆栽模拟试验, 研究了 3 种有机物料在设施菜田土壤重金属 Cd、Pb 单一和复合污染条件下对 Cd、Pb 生物有效态等赋存形态的影响, 探究风化煤、草炭和生物炭对设施菜田重金属 Cd、Pb 污染土壤修复的可行性。结果表明, 风化煤显著降低了复合污染土壤中 Cd 有效态含量, 达 11.9% ($P < 0.05$), 并使 Pb 有效态含量显著降低达 83.5% 以上 ($P < 0.05$); 对 Cd、Pb 的交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态之和分别降低了 26.4%~34.4% 和 12.0%~34.5%。草炭显著降低了复合污染土壤中 Cd 有效态含量 18.9% ($P < 0.05$), 分别显著降低了 Pb 单一和 Cd、Pb 复合污染土壤中 Pb 有效态含量 2.7% 和 7.2% ($P < 0.05$), 对 Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态三者之和分别降低了 15.8% 和 14.6%。生物炭提高了土壤 pH 0.03~0.08 个单位, 分别降低了 Cd 有效态、Pb 有效态含量 4.7%~15.0% 和 1.0%~6.8%, Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态之和降低了 11.9%~66.6%。风化煤、草炭和生物炭使番茄地上部对 Cd 的累积量显著降低 15.0%~38.0% ($P < 0.05$), 使复合污染条件下番茄地上部对 Pb 的累积量显著降低 17.9%~30.0% ($P < 0.05$)。番茄 Cd 含量与土壤中 Cd 交换态含量呈现极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。番茄 Pb 含量与 Pb 交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态三者含量之和呈现极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。综合来看, 风化煤、草炭和生物炭这 3 种有机物料可以通过改变设施菜田土壤 pH 值和对重金属的吸附、络合等固定作用, 降低土壤中 Cd、Pb 高活性态比例, 进而减少植物对 Cd、Pb 的累积。

关键词: 生物炭; 草炭; 风化煤; 重金属 Cd、Pb 污染; 设施土壤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-4011-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.045

Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil

ZHOU Gui-yu¹, JIANG Hui-min^{2*}, YANG Jun-cheng², ZHANG Jian-feng², ZHANG Shui-qin², LIANG Lei^{1*}

(1. College of Environmental Sciences, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A two-season soil culture experiment was continually conducted to study the effects of three organic materials, namely Dant, Peat and Biochar, respectively, on combined forms and bio-availability of cadmium (Cd) and lead (Pb) under Cd and Pb in single and combined pollution during 2014-2015. This study aimed to provide a theoretical basis for remediating greenhouse soil contaminated with heavy metals Cd and Pb using organic materials. The main results were as follows: the content of DTPA-Cd decreased significantly by 11.9% ($P < 0.05$) in the soil of Cd and Pb combined pollution with the application of danty, the total of exchangeable Cd, carbonate-bound Cd and iron-manganese oxide bound Cd was reduced by 26.4% and 34.4% in the soil, and the accumulation of Cd in shoots was significantly cut down by 32.0% and 28.0% ($P < 0.05$) respectively in Cd single and Cd and Pb combined pollution after applying danty; the content of DTPA-Pb was significantly depleted by 83.5% and 83.8% ($P < 0.05$), the total of exchangeable Pb, carbonate-bound Pb and iron-manganese oxide bound Pb was decreased by 34.5% and 13.9% in the soil and the accumulation of Pb in shoots was significantly reduced by 32.0% and 30.0% ($P < 0.05$) in Pb single and Cd and Pb combined pollution respectively as the use of danty. The content of DTPA-Cd was significantly decreased by 18.9% ($P < 0.05$) in the soil of Cd and Pb combined pollution with the use of peat, the accumulation of Cd in shoots was reduced by 38.0% and 23.4% ($P < 0.05$) in Cd single and Cd-Pb combined pollution respectively after the application of peat; The content of DTPA-Pb was significantly decreased by 2.7% and 7.2% ($P < 0.05$), the total of exchangeable Pb, carbonate-bound Pb and iron-manganese oxide bound Pb was decreased by 15.8% and 14.6% in the soil and the accumulation of Pb in shoots was significantly reduced by 12.7% and 23.4% ($P < 0.05$) respectively

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB127406); 国家自然科学基金项目(21577172, 41501322); 国家国际科技合作专项(2015DFA20790); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(IARRP-2015-21)

作者简介: 周贵宇(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向土壤环境, E-mail: 229365460@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jianghuimin@caas.cn; sylshenyang@163.com

in Pb single and Cd and Pb combined pollution due to the application of peat. The pH value of the soil was increased by the use of biochar, the content of DTPA-Cd was reduced by 4.7% and 15.0% respectively in the soil of Cd single and Cd and Pb combined pollution, and the accumulation of Cd in shoots was significantly minified by 38.0% and 23.4% respectively in Cd single and Cd and Pb combined pollution as the application of biochar. The content of DTPA-Pb was decreased by 6.8% and 1.0% and the total of exchangeable Pb, carbonate-bound Pb and iron-manganese oxide bound Pb was cut down by 11.9% and 30.0% in the soil of Pb single and Cd and Pb combined pollution respectively by the application of biochar. The content of Cd in plant was most significantly positively correlated with the content of exchangeable Cd in soil ($P < 0.01$). The content of Pb in plant was most significantly positively correlated with the total of exchangeable Pb, carbonate-bound Pb and iron-manganese oxide bound Pb ($P < 0.01$). In summary, after the application of danty, peat and biochar, the proportion of highly active content of Cd and Pb was minified through adjusting soil pH and immobilizing Cd and Pb by means of adsorption and complexation in greenhouse soil. With the analysis of input-output, the application of danty, peat and biochar costs 4 050 yuan·hm⁻², 11 250 yuan·hm⁻² and 22 500 yuan·hm⁻², respectively. Thus danty, peat and biochar could be used as effective organic agents in the remediation of Cd and Pb contaminated greenhouse soil.

Key words: biochar; peat; danty; heavy metal pollution of Cd, Pb; greenhouse soil

21 世纪以来,随着农业产业结构的不断调整,我国设施园艺发展迅猛,据统计,2014 年我国设施蔬菜栽培面积已逾 380 万 hm²^[1,2]. 但是,随着设施蔬菜产业的快速发展,农业投入品的过量施用造成土壤重金属污染风险凸显^[3~7],其中尤以重金属 Cd 和 Pb 污染超标问题突出^[8~13],直接影响到我国设施农产品的品质 and 安全性^[14~17].

目前,施用有机物料降低土壤中 Cd、Pb 生物有效性以减少农产品中 Cd、Pb 含量,被认为是保障农产品质量安全的主要途径之一^[18~23]. 风化煤、草炭和生物炭具有生物和化学稳定性,可以长时间存在于土壤中,具有作为重金属污染土壤修复剂的潜力,同时还能提高土壤肥力. 钟世霞等研究表明^[24],风化煤有效降低了山东棕壤土中 Pb、Cd 的可移动性,使小白菜中 Pb、Cd 含量明显降低. 苏天明等也发现^[25],随着泥炭施用量的增加,广西红壤水稻土中 DTPA 交换态的重金属明显减少,有机结合态重金属明显增加,菜心根、茎、叶重金属含量显著降低. 刘阿梅等发现^[26],在人工 Cd 污染土壤中添加适当比例的生物炭可以明显减少蔬菜体内重金属 Cd 的积累. 然而,针对设施菜田土壤重金属 Cd、Pb 单一和复合污染的修复效应和机制的研究相对较少.

陕西关中地区是我国典型的设施蔬菜种植基地,已有研究表明,该地区存在土壤重金属 Cd、Pb 污染累积的问题^[27~29]. 因此,本文以关中地区典型设施菜田土壤作为研究对象,重点分析风化煤、草炭和生物炭这 3 种有机物料对土壤重金属 Cd、Pb 生物有效态及其各赋存形态变化的影响,探究风化煤、草炭和生物炭对设施菜田重金属 Cd、Pb 污染土壤修复的可行性,以期修复重金属 Cd、Pb 污染设施土壤,保障农产品质量安全提供理论和技术依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验土壤取自陕西关中地区某典型设施菜田,土壤类型为棕壤壤土,设施种植年限 9 a,采样深度 0~20 cm,过 2 mm 筛. 土壤基本理化性状如下: pH 值 7.25、电导率 214 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、有机质 22.35 g·kg⁻¹、全氮 1.65 g·kg⁻¹、碱解氮 111.39 mg·kg⁻¹、速效磷 0.20 g·kg⁻¹、阳离子交换量 CEC 19.51 cmol·kg⁻¹、速效钾 35.1 mg·kg⁻¹、全量 Cd 0.18 mg·kg⁻¹、全量 Pb 40 mg·kg⁻¹、有效 Cd 0.076 mg·kg⁻¹、有效 Pb 1.0 mg·kg⁻¹.

1.2 供试作物

供试番茄选取当地的主栽品种“金棚 M6088-高抗线虫高秧粉红大果”,用混配育苗基质(草炭和蛭石 3:1)在 32 孔育苗盘育苗,培育 30 d 待用.

1.3 供试有机物料

风化煤:有机质 332 g·kg⁻¹,pH 值 6.75,粒径 40 目,全量 Cd 0.075 mg·kg⁻¹,全量 Pb 1.772 mg·kg⁻¹. 由江西省萍乡市互利腐殖酸厂提供,市场售价 360 元·t⁻¹.

草炭:有机质 98 g·kg⁻¹,pH 值 7.33,全量 Cd 0.155 mg·kg⁻¹,全量 Pb 9.55 mg·kg⁻¹. 由梅河口市山城镇碧洲育苗基质加工厂提供,市场售价 1 000 元·t⁻¹.

生物炭:有机质 360 g·kg⁻¹,pH 值 9.71,全量 Cd 0.255 mg·kg⁻¹,全量 Pb 4.93 mg·kg⁻¹. 由黑龙江省农业科学院提供,市场售价 2 000 元·t⁻¹.

1.4 试验设计

室内培养试验于 2014~2015 年在中国农业科学院作物科学研究所温室进行. 试验用盆为塑料桶(底部无洞,高 27 cm,直径 29.5 cm),盛土量为 5 kg·pot⁻¹. 3 种物料分别为风化煤(A)、草炭(B)和

生物炭(C),施用量均为 $5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[30~35]. 本试验共设 12 个处理,每个处理设 3 次重复. 具体处理如表 1 所示. 参考温室蔬菜产地环境质量评价指标限值(HJ 333-2006),并结合前期设施菜田土壤重金属调查和研究,每种物料对应 3 种不同重金属 Cd、Pb 污染的土壤,分别是:①Cd,单一 Cd 污染,重金属 Cd 添加量为 $0.72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以分析纯 CdCl_2 为供试试剂;②Pb,单一 Pb 污染,重金属 Pb 的添加量为 $65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以分析纯 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为供试试剂;③C1P1,Cd 和 Pb 复合污染,重金属 Cd 和 Pb 的添加量分别为 $0.72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $65\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,以

CdCl_2 和 $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 为供试试剂. 以无添加物料对应重金属浓度处理土壤作为对照(CK)试验.

将不同重金属浓度梯度处理后的土壤混合均匀后装盆,加入蒸馏水保持含水量为田间持水量的 60%,稳定 30 d,施入物料,选择长势一致的番茄幼苗,每盆移栽 1 株. 底肥施用 N 肥 $0.89\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,P 肥(P_2O_5) $1.07\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,K 肥(K_2O) $1.85\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$;开花期追施 N 肥 $0.89\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,K 肥(K_2O) $1.00\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$;结果期追施 P 肥(P_2O_5) $1.52\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$,K 肥(K_2O) $1.01\text{ g}\cdot\text{pot}^{-1}$.

表 1 试验处理/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
Table 1 Experimental treatments/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	Cd 含量	Pb 含量	风化煤(A)	草炭(B)	生物炭(C)
Cd-CK	0.90	40	—	—	—
Pb-CK	0.18	105	—	—	—
C1P1-CK	0.90	105	—	—	—
Cd-A	0.90	40	5	—	—
Pb-A	0.18	105	5	—	—
C1P1-A	0.90	105	5	—	—
Cd-B	0.90	40	—	5	—
Pb-B	0.18	105	—	5	—
C1P1-B	0.90	105	—	5	—
Cd-C	0.90	40	—	—	5
Pb-C	0.18	105	—	—	5
C1P1-C	0.90	105	—	—	5

1.5 采样与测定

土壤样品:于室温下自然风干,除杂、磨碎、混匀,以四分法取样 500 g,依次过 10 目、100 目尼龙筛,分别密封贮存于塑料袋中待测;土壤基本理化性状测定参考土壤农业化学分析方法^[36]. 土壤 Cd 有效态、Pb 有效态含量测定参考 GB/T 23739-2009,采用 DTPA 浸提法;土壤中重金属的形态分级采用 Tessier 连续提取法^[37]

植株样品:待番茄生长达 130 d,番茄根、茎叶分别用去离子水洗净、晾干,置于 105℃ 烘箱内杀青 10 min,75℃ 烘干后,称重,研磨后过 60 目尼龙筛,密封贮存于塑料袋中待测. 番茄植株样 Cd 含量测定参考 GB/T 5009. 15-2003,Pb 含量测定参考 GB 5009. 12-2010,采用硝酸-高氯酸湿式消解法;

重金属 Cd、Pb 含量均采用 ICP-MS 测定.

1.6 数据处理

试验分析数据采用 Excel 2010 整理,运用 SPSS 20.0 软件进行数据分析、Origin 8.0 软件做图.

2 结果与分析

2.1 不同有机物料对 Cd、Pb 污染土壤 pH、Cd 和 Pb 有效态含量的影响

由图 1 可知,Cd 单一污染条件下,土壤 pH 值由高到低依次为: Cd-C > Cd-CK > Cd-B > Cd-A,Cd-B 和 Cd-A 处理的土壤 pH 值显著低于对照($P < 0.05$),表明 Cd 单一污染条件下,风化煤和草炭显著降低了土壤 pH,生物炭提高土壤 pH 0.03 个单位;Pb 单一污染条件下,土壤 pH 值由高到低依次为: Pb-B > Pb-C > Pb-CK > Pb-A,Pb-B 处理土壤 pH 值显著高于对照($P < 0.05$),风化煤降低土壤 pH 0.07 个单位,生物炭提高了 pH 0.08 个单位;Cd 和 Pb 复合污染条件下,土壤 pH 值与 CK 相比均无显著差异,C1P1-C 处理土壤 pH 值最高,为 7.36,相比对照提高了 0.05 个单位. 可见,在 Cd、Pb 单一和复合污染中,风化煤降低土壤 pH 0.02 ~ 0.07 个单位,生物炭提高土壤 pH 0.03 ~ 0.08 个单位.

风化煤、草炭和生物炭对土壤中 DTPA- Cd 含量的影响如图 2 (a)所示,在 Cd 单一污染中, Cd 有效态含量由高到低依次为: Cd-B > Cd-A > Cd-CK > Cd-C,与对照相比,Cd-C 处理 Cd 有效态含量降低了 4.7%,说明在 Cd 单一污染条件下,生物炭降低了土壤中 Cd 有效态含量;在 Cd 和 Pb 复合污染中, C1P1-A、C1P1-B 和 C1P1-C 处理中 Cd 有效态含量分别比对照显著降低了 11.9%、18.9% 和 15.0% ($P<0.05$),表明风化煤、草炭和生物炭在 Cd、Pb 复合污染中均可降低重金属 Cd、Pb 活性.

风化煤、草炭和生物炭对土壤中 DTPA- Pb 含量的影响如图 2 (b)所示,在 Pb 单一污染中,Pb-A 和 Pb-C 处理比对照分别显著降低了 83.5% 和 6.8% ($P<0.05$),而 Pb-B 处理比对照显著提高了 12.1% ($P<0.05$),表明在 Pb 单一污染条件下,风化煤和生物炭均可降低重金属 Pb 活性;在 Cd 和 Pb 复合污染中,C1P1-A 和 C1P1-B 处理中比对照分别显著降低了 83.8% 和 7.2% ($P<0.05$),C1P1-C 处理中的 Pb 有效态含量与对照无显著差异,表明在 Cd、Pb 复合污染条件下,风化煤和草炭均可降低重金属 Pb 活性. 可见,无论是 Pb 单一污染还是 Cd、Pb 复合污染,风化煤都显著降低了土壤有效态 Pb 含量.

2.2 不同有机物料对番茄植株 Cd、Pb 吸收的影响

由图 3(a)可知,在 Cd 单一污染中,与对照相比,Cd-A、Cd-B 和 Cd-C 处理番茄地上部对 Cd 的累积量分别显著降低 32.0%、38.0% 和 22.0% ($P<0.05$),Cd-A 和 Cd-C 处理根系对 Cd 累积量分别显著降低了 26.1% 和 18.1% ($P<0.05$),Cd-B 中根系

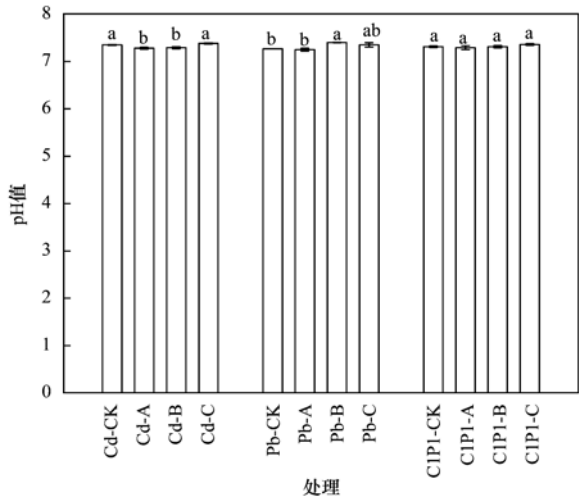


图 1 3 种物料对不同处理土壤 pH 的影响

Fig. 1 Effects of different organic materials on soil pH values

对 Cd 的累积量显著提高了 19.3% ($P<0.05$); 在 Cd 和 Pb 复合污染中,与对照相比,C1P1-A、C1P1-B 和 C1P1-C 处理番茄地上部对 Cd 的累积量分别显著降低 28.0%、23.4% 和 15.0% ($P<0.05$),C1P1-A 和 C1P1-C 处理番茄根系对 Cd 的累积量分别显著降低了 19.8% 和 7.9% ($P<0.05$),C1P1-B 处理根系对 Cd 的累积量显著提高了 19.3% ($P<0.05$),可见,在 Cd 单一污染和 Cd、Pb 复合污染条件下,风化煤、草炭和生物炭均降低了番茄地上部分对重金属 Cd 的累积.

由图 3 (b)可知,在 Pb 单一污染中,与对照相比,Pb-A 处理番茄地上部对 Pb 的累积量显著降低了 48.0% ($P<0.05$),Pb-B 和 Pb-C 处理无显著差

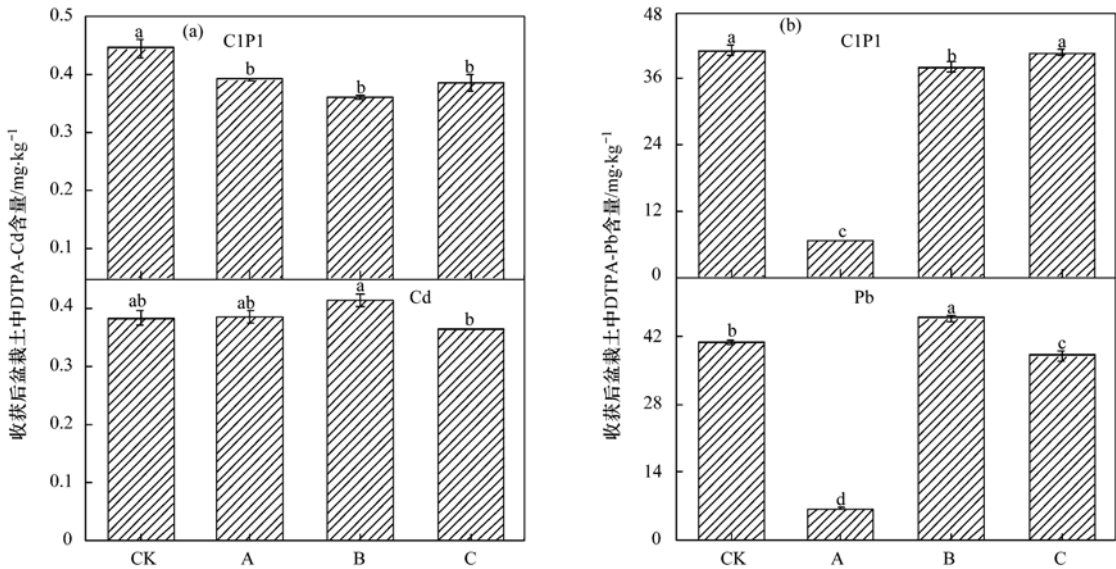


图 2 3 种物料对土壤中 Cd、Pb 有效态含量的影响

Fig. 2 Effects of different organic materials on DTPA-Cd and DTPA-Pb contents in soil

异,Pb-A 处理根系对 Pb 的累积量显著降低了 31.0% ($P < 0.05$),Pb-B 和 Pb-C 处理无显著差异;在 Cd 和 Pb 复合污染中,与对照相比,C1P1-A、C1P1-B 和 C1P1-C 处理番茄地上部对 Pb 的累积量分别显著降低了 30.0%、17.9% 和 21.1% ($P < 0.05$),C1P1-A 处理根系对 Pb 的累积量显著降低了

44.9% ($P < 0.05$),C1P1-B 和 C1P1-C 处理无显著差异.说明风化煤在 Pb 单一污染和 Cd、Pb 复合污染条件下都显著降低了番茄植株地上部分对 Pb 的累积($P < 0.05$);草炭和生物炭在 Cd、Pb 复合污染条件下,显著降低了番茄植株地上部分对 Pb 的累积($P < 0.05$).

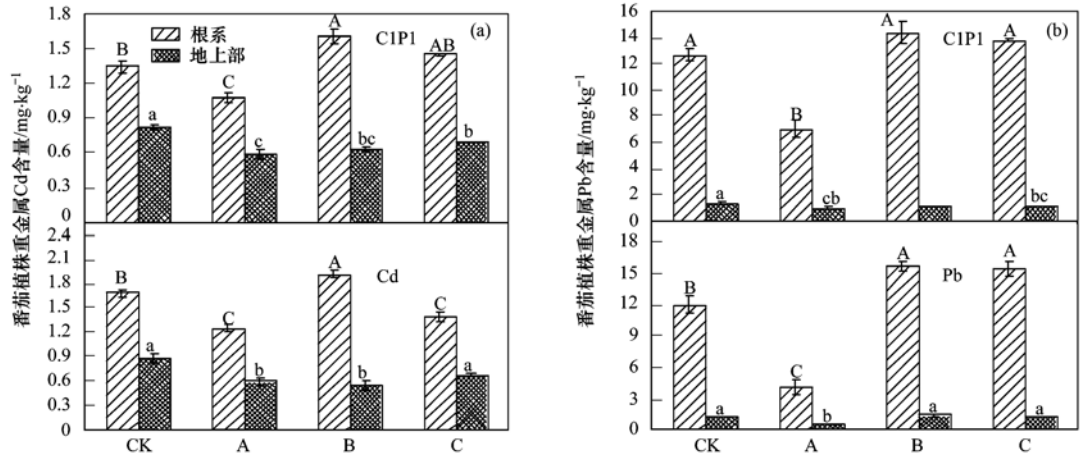


图3 不同污染土壤中番茄植株地上部和根系对 Cd 和 Pb 的吸收量

Fig. 3 Cd and Pb contents of tomato shoots and roots in soils with different contaminations

2.3 不同有机物料对土壤中 Cd、Pb 形态的影响

风化煤、草炭和生物炭对土壤中 Cd 形态的影响如图 4 所示,在 Cd、Pb 单一和复合污染处理中,添加风化煤后,土壤中 Cd 残渣态比例分别提高了 32.0%、27.5% 和 43.3%,Cd 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态之和分别降低了 26.4%、32.7% 和 34.4%. 添加草炭后,土壤中 Cd 残渣态比例在 Cd、Pb 单一和复合污染处理中相比对照分别降低了 14.6%、27.9% 和 18.4%,Cd 交换态 Cd 单一处理中提高了 15.1%,在 Pb 单一和 Cd、Pb 复合

污染处理中分别降低了 32.0% 和 6.9%. 添加生物炭后,土壤中 Cd 残渣态比例在 CD、PB 和 C1P1 中相比对照分别降低了 44.6%、57.8% 和 59.7%,Cd 交换态在 Cd、Pb 单一和复合污染处理中相比对照分别提高了 17.9%、21.3% 和 7.7%. 可见,在 Cd、Pb 单一污染和复合污染条件下,风化煤均降低了土壤中 Cd 高活性态比例,有效降低了重金属 Cd 活性;生物炭均提高了土壤中 Cd 交换态比例,活化了部分重金属,草炭在 Pb 单一污染和 Cd、Pb 复合污染中降低了重金属 Cd 活性.

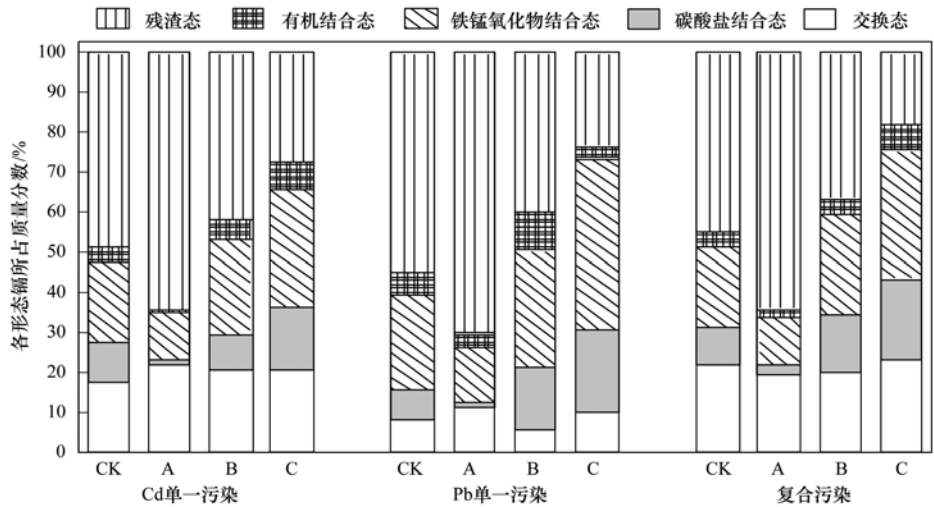


图4 不同污染土壤中各形态 Cd 的分配情况

Fig. 4 Distribution of different Pb forms in soils with different contaminations

从图 5 可以看出,在 Cd、Pb 单一和复合污染处理中,风化煤使土壤中 Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态三者之和分别降低了 12.0%、34.5% 和 13.9%;草炭分别降低了 68.0%、15.8% 和 14.6%;生物炭分别降低了 66.6%、11.9% 和 30.0%。可见风化煤、草炭和生物炭无论在 Cd、Pb 单一污染还是 Cd 和 Pb 复合污染条件下,均具有明显降低土壤中重金属 Pb 活性的作用。

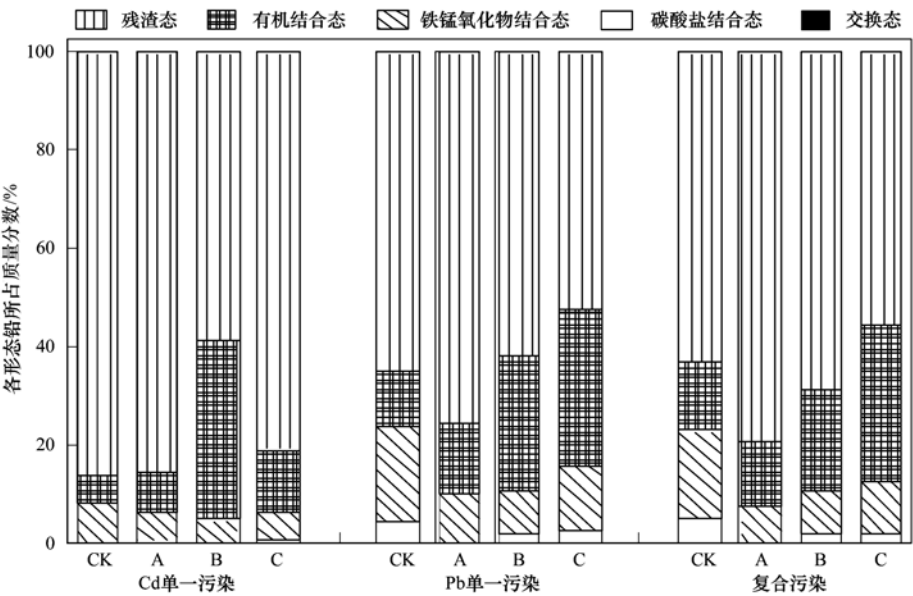


图 5 不同污染土壤中各形态 Pb 的分配情况
Fig. 5 Distribution of different Pb forms in soils with different contaminations

2.4 土壤中不同形态的重金属与番茄植株内 Cd、Pb 含量的关系

由表 2 可知,番茄植株 Cd 含量与土壤 Cd 各形态含量均呈现显著正相关关系($P < 0.05$),与 Cd 交

换态达到极显著水平($P < 0.01$),说明为了减少植株对 Cd 的吸收量,不仅可以减少土壤中重金属 Cd 总量,也可以通过降低土壤中 Cd 交换态的方式。

表 2 土壤中 Cd 形态与番茄植株中 Cd 含量的关系

	Table 2 Correlation between soil Cd forms and Cd content in tomato						
	交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残留态	总量	植株含量
交换态	1.000	0.618 *	0.783 **	0.594 *	0.717 **	0.987 **	0.891 **
碳酸盐结合态		1.000	0.959 **	0.879 **	-0.561	0.604 *	0.593 *
铁锰氧化物结合态			1.000	0.896 **	0.175	0.775 **	0.741 **
有机结合态				1.000	0.000	0.598 *	0.617 *
残留态					1.000	0.755 **	0.608 *
总量						1.000	0.887 **
植株含量							1.000

1) * * 表示不同处理间极显著相关($P < 0.01$), * 表示不同处理间显著相关($P < 0.05$), $n = 12$,下同

由表 3 可知,番茄植株 Pb 含量与土壤中 Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态三者之和呈现极显著正相关关系($P < 0.01$)。表明土壤中添加有机物料,在重金属总量不变的情况下,可以通过降低 Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态,从而抑制植物对重金属 Pb 的吸收。

3 讨论

大量研究表明有机物料主要包括秸秆、禽畜粪

便、草炭和风化煤等,不仅可以原位修复土壤重金属,而且具有改良土壤的作用^[38],其原因主要是有机质中的主要成分腐殖酸含有的羧基、羟基、酚羟基等具有对 Cd、Pb 螯合的功能^[39],这些基团还可以刺激作物生长^[40,41]。有机物料也可以改变土壤 pH 值和 Eh 值,从而影响重金属的沉淀-溶解平衡,还可以改变土壤固相物质的表面活性,从而影响重金属在土壤中的化学行为^[41,42],这些作用都对土壤 Cd、Pb 生物有效性产生影响。

表3 土壤中 Pb 形态与番茄植株中 Pb 含量的关系¹⁾

Table 3 Correlation between soil Pb forms and Pb content in tomato

	交换态	碳酸盐结合态	铁锰氧化物结合态	有机结合态	残留态	总量	植株含量
交换态	1.000	-0.098	0.038	0.092	0.441	0.300	0.152
碳酸盐结合态		1.000	0.935 **	0.498	0.502	0.624 *	0.838 **
铁锰氧化物结合态			1.000	0.662 *	0.741 **	0.828 **	0.940 **
有机结合态				1.000	0.750 **	0.882 **	0.854 **
残留态					1.000	0.964 **	0.817 **
总量						1.000	0.925 **
植株含量							1.000
1 + 2							0.854 **
1 + 2 + 3							0.931 **

1) 1 + 2: 交换态与碳酸盐结合态之和; 1 + 2 + 3: 交换态、碳酸盐结合态与铁锰氧化物结合态之和

有机物料可以通过分解产生有机酸和 CO₂ 及消化作用等过程提供质子,引起 pH 的降低,也可通过分解产生的有机还原物质及有机阴离子矿化为 CO₂ 和水等作用消耗质子,提高 pH,最终影响结果取决于各过程的相对强度^[43]. 本试验中添加风化煤后降低了土壤 pH,可能是因为风化煤分解产生有机酸和 CO₂ 起到了主导作用;添加生物炭后土壤 pH 出现不同程度的提高,说明生物炭主要是通过分解产生有机还原物质来影响土壤 pH;草炭既可以提高土壤 pH 又能降低土壤 pH,且在复合污染中对 pH 无影响,说明草炭的两种分解作用均可对土壤 pH 变化起到主要影响,最终结果受制于两个过程的相对强度.

有机物料的主要成分是腐殖酸,腐殖酸具有多种活性功能基团,能够和重金属发生各种形式的结合^[44]. 有机重金属络合物稳定性会随 pH 值的增加而增加,可以通过调节土壤 pH 值大小来调控有机金属络合物的形成,调节重金属在土壤中的行为^[45,46]. 在 Cd 单一污染和 Cd、Pb 复合污染条件下,生物炭使 Cd 有效态含量分别降低了 4.7% 和 15.0%,在 Cd、Pb 单一污染和复合污染条件下,生物炭使 Pb 有效态含量分别降低了 3.8%、6.8% 和 0.9%,生物炭通过提高土壤 pH 降低了土壤中 Cd、Pb 有效态含量,这与 Uchimiya 等^[47] 和 Zhang 等^[48] 的研究结果一致. 生物炭使 Cd 单一污染和 Cd、Pb 复合污染中 Cd 有机结合态增加了 101.7% 和 60.7%,对 Cd、Pb 单一污染和复合污染土壤中 Pb 有机结合态分别增加了 128.2%、179.4% 和 131.6%,其作用机制可能是生物炭通过表面吸附作用,表面基团的配位和离子交换作用影响重金属在土壤中的形态转化、移动性和生物有效性^[44,49]. 本试验结果表明,风化煤显著降低了 Pb 单一污染和

Cd、Pb 复合污染土壤中 Pb 有效态含量 ($P < 0.05$), Cd 单一污染、Pb 单一污染和 Cd、Pb 复合污染中,风化煤使 Cd 残渣态分别提高了 32.0%、27.5% 和 43.3%; Cd、Pb 复合污染中,草炭显著降低了 Pb 有效态含量 ($P < 0.05$), Cd 单一污染和 Pb 单一污染中,草炭使 Cd 有机结合态提高了 46.1% 和 79.1%,有研究表明,风化煤和草炭主要是通过形成难溶性的金属有机络合物或通过增加土壤阳离子交换量来增强对金属的吸附^[44],本试验中风化煤主要是通过增加土壤阳离子交换量来增强对金属的吸附,从而促使 Cd 有效态向残渣态转化,草炭通过与重金属 Cd 形成难溶性的金属有机络合物,提高了土壤中 Cd 有机结合态比例.

添加风化煤的番茄植株根系和地上部对 Cd、Pb 的吸收量都显著低于对照 ($P < 0.05$),原因可能是风化煤的比表面积大,又含有各种络合官能团和螯合基团,吸附和络合了土壤中的重金属,影响土壤中重金属的形态,降低了土壤中交换态和碳酸盐结合态重金属比例,提高了有机结合态和残渣态重金属的比例,进一步影响重金属在土壤中的固定和迁移,从而减少了番茄植株对于 Cd 和 Pb 的吸收. 而在添加草炭和生物炭的处理中,尽管番茄植株根系的 Cd 和 Pb 含量高于对照,但是番茄地上部分 Cd 和 Pb 的含量却低于对照,番茄根系与地上部重金属 Cd、Pb 含量比值几乎都高于对照,且大多达到显著 ($P < 0.05$). 说明草炭和生物炭抑制了重金属 Cd、Pb 从根到地上部的转移,这可能与根系吸收的重金属存在形态有关,重金属离子经过植株根系吸收后,与细胞内的有机、无机物螯合形成大分子复合物,积累在根部液泡中,或与细胞壁结合,进而减少了金属离子向地上部运输.

根据风化煤、草炭和生物炭的施用量和市场价格计算,所需费用分别为每亩 270、750、1 500 元,在

附加值较高的设施农业生产体系中,风化煤、草炭和生物炭均可作为设施菜田重金属 Cd、Pb 污染土壤的有效修复材料。

4 结论

(1)风化煤、草炭和生物炭显著降低了 Cd 和 Pb 复合污染中 Cd 有效态含量($P < 0.05$)。风化煤对 Cd、Pb 单一和复合污染中 Cd 高活性态含量分别降低了 26.4%、32.7% 和 34.4%。添加 3 种物料后,Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态之和都低于对照,说明风化煤、草炭和生物炭对土壤 Cd 和 Pb 具有良好的固持作用。

(2)风化煤、草炭和生物炭在 Cd 单一和 Cd、Pb 复合污染条件下,能显著降番茄植株地上部对 Cd 的累积($P < 0.05$);在 Cd、Pb 复合污染中,分别显著降低了番茄地上部对 Pb 的累积达 28.0%、23.4% 和 15.0% ($P < 0.05$),说明风化煤、草炭和生物炭抑制了番茄植株地上部对重金属 Cd、Pb 的累积。

(3)番茄 Cd 含量与土壤中 Cd 交换态含量呈现极显著正相关关系($P < 0.01$),番茄 Pb 含量与 Pb 交换态、碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态三者之和呈现极显著正相关关系($P < 0.01$)。说明施用风化煤、草炭和生物炭可通过降低土壤中 Cd、Pb 高活性态比例,以减少植株对 Cd、Pb 的累积。

参考文献:

- [1] 郭世荣,孙锦,束胜,等.我国设施园艺概况及发展趋势[J].中国蔬菜,2012,1(18):1-14.
- [2] 关桂峰.我国设施蔬菜面积达5700余万亩 大城市蔬菜自给率仍不足30%[EB/OL].http://news.xinhuanet.com/fortune/2014-04/01/c_1110051027.htm,2014-04-01.
- [3] Chen Y, Huang B, Hu W Y, *et al.* Accumulation and ecological effects of soil heavy metals in conventional and organic greenhouse vegetable production systems in Nanjing, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(8): 3605-3616.
- [4] 胡克林,张凤荣,吕贻忠,等.北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J].环境科学学报,2004,24(3):463-468.
- [5] Kong X L, Cao J, Tang R Y, *et al.* Pollution of intensively managed greenhouse soils by nutrients and heavy metals in the Yellow River Irrigation Region, Northwest China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(11): 7719-7731.
- [6] 李如忠,潘成荣,徐晶晶,等.典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估[J].环境科学,2013,34(3):1076-1085.
- [7] 吴琼,赵同科,邹国元,等.北京东南郊农田土壤重金属含量与环境质量评价[J].中国土壤与肥料,2016,(1):7-12.
- [8] Hu W Y, Chen Y, Huang B, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from a typical greenhouse vegetable production system in China[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2014, 20(5): 1264-1280.
- [9] 罗雪梅,陈新之,王侃,等.沈阳市蔬菜生产基地重金属污染及评价[J].环境保护科学,2003,29(4):43-45.
- [10] 李见云,侯彦林,化全县,等.大棚设施土壤养分和重金属状况研究[J].土壤,2005,37(6):626-629.
- [11] 陈碧华,杨和连,李新峥,等.新乡市大棚菜田土壤重金属积累特征及污染评价[J].土壤通报,2012,43(4):967-971.
- [12] 于彩莲,李文霞,杨莹,等.哈尔滨市蔬菜大棚土壤重金属污染评价[J].北方园艺,2010,(18):61-63.
- [13] 蒋光月,郭熙盛,朱宏斌,等.合肥地区大棚土壤7种重金属相关环境质量评价[J].土壤通报,2008,39(5):1230-1232.
- [14] 袁润杰,于高伟,邱晓蕾,等.区域土壤重金属空间差异及对蔬菜品质安全影响的分析——以南京八卦洲、江心洲为例[J].农业环境科学学报,2015,34(8):1498-1507.
- [15] 孔晓乐,吴重阳,曹靖,等.干旱地区设施土壤和蔬菜重金属含量及人体健康风险——以白银市为例[J].干旱区资源与环境,2014,28(1):92-97.
- [16] Wang L X, Guo Z H, Xiao X Y, *et al.* Heavy metal pollution of soils and vegetables in the midstream and downstream of the Xiangjiang River, Hunan Province[J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 353-362.
- [17] 胡文友,黄标,马宏卫,等.南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J].土壤学报,2014,51(5):1045-1055.
- [18] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等.钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J].农业环境科学学报,2014,33(5):890-897.
- [19] 张晓君,杨胜香,段纯,等.蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究[J].农业环境科学学报,2014,33(3):526-531.
- [20] 曾卉,周航,邱琼瑶,等.施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响[J].环境科学,2014,35(2):727-732.
- [21] 赵述华,陈志良,张太平,等.稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究[J].环境科学,2014,35(4):1548-1554.
- [22] Chen L, He LY, Wang Q, *et al.* Synergistic effects of plant growth-promoting *Neorhizobium huautlense* T1-17 and immobilizers on the growth and heavy metal accumulation of edible tissues of hot pepper[J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 312: 123-131.
- [23] 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.
- [24] 钟世霞,徐玉新,骆洪义,等.超声波活化风化煤腐植酸对小白菜吸收Pb、Cd和土壤酶活性影响[J].水土保持学报,2012,26(6):185-189,193.
- [25] 苏天明,李杨瑞,江泽普,等.泥炭对菜心-土壤系统中重金属生物有效性的效应研究[J].植物营养与肥料学报,2008,14(2):339-344.
- [26] 刘阿梅,向言词,田代科,等.生物炭对植物生长发育及重金属镉污染吸收的影响[J].水土保持学报,2013,27(5):

- 193-198, 204.
- [27] 刘哲民. 宝鸡土壤重金属污染及其防治[J]. 干旱区资源与环境, 2005, **19**(2): 101-104.
- [28] 柳玲. 设施菜地重金属含量变化及芹菜对 Cr^{6+} 的吸收与累积规律[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [29] 胡世玮, 杨静, 谢伟强, 等. 杨凌蔬菜产地土壤重金属污染风险评价[J]. 西北农业学报, 2015, **24**(8): 175-180.
- [30] 杜志敏, 郝建设, 周静, 等. 四种改良剂对 Cu、Cd 复合污染土壤中 Cu、Cd 形态和土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(10): 1507-1512.
- [31] 李磊, 闫敏, 张强. 风化煤对碱性土壤中重金属镉、铅有效态的影响[J]. 山西农业科学, 2009, **37**(12): 32-35, 41.
- [32] 文雅, 李东旭. 风化煤腐殖酸在土壤改良中的应用[J]. 科技情报开发与经济, 2010, **20**(33): 148-150.
- [33] Ham I, 胡林飞, 吴建军, 等. 泥炭对土壤镉有效性及镉形态变化的影响[J]. 土壤通报, 2009, **40**(6): 1436-1441.
- [34] 唐行灿, 陈金林, 张民. 生物炭对铜、铅、镉复合污染土壤的修复效果[J]. 广东农业科学, 2014, **41**(12): 67-71.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Waqas M, Khan A L, Kang S M, *et al.* Phytohormone-producing fungal endophytes and hardwood-derived biochar interact to ameliorate heavy metal stress in soybeans [J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(7): 1155-1167.
- [39] Caporale A G, Pigna M, Sommella A, *et al.* Effect of pruning-derived biochar on heavy metals removal and water dynamics[J]. Biology and Fertility of Soils, 2014, **50**(8): 1211-1222.
- [40] 代允超, 吕家珑, 刁展, 等. 改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(1): 80-86.
- [41] 孟令阳, 辛术贞, 苏德纯. 不同惰性有机碳物料对土壤镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(8): 1531-1538.
- [42] 高译丹, 梁成华, 裴中健, 等. 施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(2): 258-261.
- [43] 单世平, 郭照辉, 付祖姣, 等. 降低水稻镉吸收原位钝化修复技术及其作用机理[J]. 生态科学, 2015, **34**(4): 175-179.
- [44] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(4): 721-728.
- [45] 曾炜铨, 宋波, 袁立竹, 等. 改良剂对广西环江强酸铅锌污染土壤的修复作用[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2306-2313.
- [46] Yang X, Liu J J, McGrouther K, *et al.* Effect of biochar on the extractability of heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and enzyme activity in soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(2): 974-984.
- [47] Uchimiya M, Lima I M, Klasson K T, *et al.* Immobilization of heavy metal ions (Cu^{II} , Cd^{II} , Ni^{II} and Pb^{II}) by broiler litter-derived biochars in water and soil[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, **58**(9): 5538-5544.
- [48] 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.
- [49] Qian L B, Zhang W Y, Yan J C, *et al.* Effective removal of heavy metal by biochar colloids under different pyrolysis temperatures [J]. Bioresource Technology, 2016, **206**: 217-224.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Aghna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行