

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

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

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈雨冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐雨梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

两种钝化剂对土壤 Pb、Cd、As 复合污染的菜地修复效果

田桃, 雷鸣, 周航, 杨文弢, 廖柏寒*, 胡立琼, 曾敏

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

摘要: 通过辣椒种植田间试验, 研究了硫酸铁和碳酸钙对土壤 Pb、Cd 和 As 复合污染的生物有效性以及对辣椒中 Pb、Cd、As 迁移与累积的影响。结果表明: ①硫酸铁和碳酸钙都能显著降低土壤中 Pb、Cd 的 TCLP 提取态含量, 使土壤中 As 的 TCLP 提取态含量显著升高。②硫酸铁使辣椒果实中 Pb 和 Cd 含量分别降低 7.2% ~ 22.9% 和 2.3% ~ 2.9%, 而对 As 含量没有影响; 碳酸钙使辣椒果实中 Pb、Cd、As 的含量分别降低 15.8% ~ 16.3%、11.8% ~ 15.0%、0.03% ~ 53.2%。③硫酸铁使辣椒茎到果实中 Pb、Cd、As 的转运系数分别最大降低 16.7%、68.0%、10.2%; 碳酸钙使辣椒茎到果实中 Pb、Cd、As 的转运系数分别最大降低 16.7%、51.5%、45.6%。硫酸铁和碳酸钙都能有效降低旱地中 Pb、Cd、As 向辣椒中迁移, 且碳酸钙效果比硫酸铁好。

关键词: 钝化剂; 蔬菜土壤; Pb、Cd、As 复合污染; 辣椒; 转运系数

中图分类号: X171.1; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2553-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201611179

Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As

TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, LIAO Bo-han*, HU Li-qiong, ZENG Min

(College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: This paper studied the effects of two amendments (iron sulfate [$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$] and calcium carbonate [CaCO_3]) on the bioavailability of Pb, Cd and As in a garden soil and on the migration and accumulation of Pb, Cd and As in pepper through an in-situ experiment planting pepper plants. The results indicated that: ① Addition of these amendments significantly decreased TCLP extractable contents of Pb and Cd in soil, and increased TCLP extractable contents of As. ② Compared with the control group, addition of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ led to reduction in contents of Pb and Cd in pepper fruits by 7.2%-22.9% and 2.3%-2.9%, respectively, but no obvious changes were observed for As contents in pepper fruits. Meanwhile, addition of CaCO_3 decreased the contents of Pb, Cd and As in pepper fruits by 15.8%-16.3%, 11.8%-15.0%, and 0.03%-53.2%, respectively. ③ The maximum reductions for the translocation factors of Pb, Cd and As from stem to fruits in pepper plants were 16.7%, 68.0%, 10.2%, respectively, due to $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ application and 16.7%, 51.5%, 45.6%, respectively, due to CaCO_3 application, compared with the control group. It was obvious that $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ and CaCO_3 could both effectively decrease the migration of soil Pb, Cd and As to pepper plants, but the effects of CaCO_3 were better than those of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

Key words: amendment; garden soil; complexly contamination with Pb, Cd and As; pepper; translocation factor

湖南省是金属矿产资源丰富的地区, 拥有铅、镉、砷、铜、钨等 20 多种矿产资源^[1], 这些矿产的采矿和冶炼使矿区周围土壤受到不同程度的重金属污染。土壤中重金属通过作物吸收转运, 累积在可食部位, 通过食物链危害人体健康。因此, 采取安全有效的措施修复重金属污染土壤, 减少重金属在作物中吸收和累积, 已成为当前该地区亟需解决的问题。

目前研究多采用原位钝化技术修复重金属污染土壤, 通过添加钝化剂以改善土壤理化性质, 降低重金属的生物有效性, 减少其向作物可食部位的迁移^[2], 从而达到修复土壤的目的。原位钝化修复技术具有经济成本低廉, 操作简单, 效果显著等优

势, 成为了重金属污染土壤修复的重要手段^[3]。较为常见钝化剂有海泡石、石灰、磷酸盐、生物炭、沸石等^[4-7], 这些钝化剂主要是用于修复 Pb、Cd 等重金属污染土壤, 研究表明, 添加石灰可明显降低小白菜中 Pb 和 Cd 的含量^[8]。As 污染土壤修复的钝化剂多为零价铁(铁粉)、铁的氧化物、铁的硫化物、骨炭等含铁物质^[9-11]。向猛等^[12]研究发现添加硫酸亚铁使土壤 As 的生物可给性含量比

收稿日期: 2016-11-22; 修订日期: 2017-01-13

基金项目: 农业部财政部科研专项(农办财函 2016); 国家自然科学基金项目(41501344); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 田桃(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属土壤污染控制, E-mail: 15700718997@163.com

* 通信作者, E-mail: liaobh1020@163.com

对照降低了 90.8%。然而,以上土壤修复试验只针对重金属 Pb、Cd 的污染或者类金属 As 的污染,没有探讨 Pb、Cd 和 As 复合污染土壤的修复问题,且大部分研究成果仅在盆栽试验条件进行。本研究将硫酸铁和碳酸钙作为钝化剂施用在污染菜地中,研究其对土壤 Pb、Cd、As 的钝化效果及辣椒各部位吸收累积 Pb、Cd、As 的影响,以期为该地区 Pb、Cd、As 复合污染土壤的修复提供一些参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验在湖南省某铅锌矿区附近的菜地进行。该地区位于中亚热带季风湿润气候区,年平均气温在 15.6~18.3℃,土壤 pH 值 4.75,阳离子交换量为 12.5 cmol·kg⁻¹,有机质含量为 2.3%。土壤中 Pb、Cd 和 As 含量分别为 418.1、5.7 和 45.5 mg·kg⁻¹,其中 Pb、Cd 和 As 含量分别超过我国土壤环境质量标准(GB 15618-1995)Ⅱ级标准值 8.4、22.8、1.3 倍。

1.2 试验材料

供试钝化剂硫酸铁[Fe₂(SO₄)₃](分析纯)是由湖南省衡阳市绿野堂生物化工科技有限公司供应,石灰石[CaCO₃]是由湖南省宁乡县道林镇尚杰矿石粉厂提供,基本理化性质如表 1。供试蔬菜选用辣椒(新椒四号,湖南郴州继棉种业)。

表 1 钝化剂的基本理化性质

钝化剂	pH 值	重金属含量/mg·kg ⁻¹		
		As	Pb	Cd
硫酸铁	2.93	0.62	3.87	—
碳酸钙	8.61	0.19	4.04	—

1.3 试验设计

硫酸铁设置 3 个添加浓度:0、1、2 g·kg⁻¹,碳酸钙设置 3 个添加浓度:0、2、4 g·kg⁻¹。每个处理设置 3 个样方,每个样方面积为 8 m²(2 m×4 m),共 18 个样方,随机区组排列。辣椒于当年 3 月下旬播种,参照当地生产习惯进行田间管理,至 7 月中下旬收获。

1.4 样品处理

每个样方中随机采集 3 株辣椒,同时采集对应土壤样品。辣椒植株带回实验室后,用自来水和蒸馏水洗净,晾干后放入烘箱,105℃杀青 30 min,然后在 70℃下烘干至恒重。辣椒分部位(根、茎、叶、

果实)用小型粉碎机粉碎,用封口袋密封保存备用。土壤自然风干后,去除杂质,分别过 10 目和 100 目尼龙筛,保存待测。

1.5 样品分析

土壤 pH 值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,土壤阳离子交换量用氯化钡-硫酸强迫交换法测定^[13],土壤有机质用重铬酸钾氧化-比色法测定^[13],土壤重金属总量用王水-高氯酸消解提取^[13],土壤 As 总量用 1+1 王水消解提取^[13],土壤重金属和 As 的 TCLP 提取态采用美国 EPA 的方法提取^[14]。辣椒样品中重金属和 As 总量采用干灰化法消解提取[GB/T 5009.15-2003, GB/T 5009.11-2003]。溶液中重金属浓度用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES 6300, Thermo)测定,溶液中 As 含量采用 AFS-8220 原子荧光分光光度计测定。所有样品分析过程中以国家标准物质土壤[GBW(E)-070009]和大米[GBW10045(GSB-23)]进行质量控制,Pb、Cd、As 的回收率分别为 94.5%~98.6%、97.2%~102.3%和 96.8%~99.5%。

1.6 数据处理

辣椒植株前一部位向后一部位转移 Pb、Cd、As 能力用转运系数(TF)^[15,16]表示。

$$TF = \frac{C_i}{C_r}$$

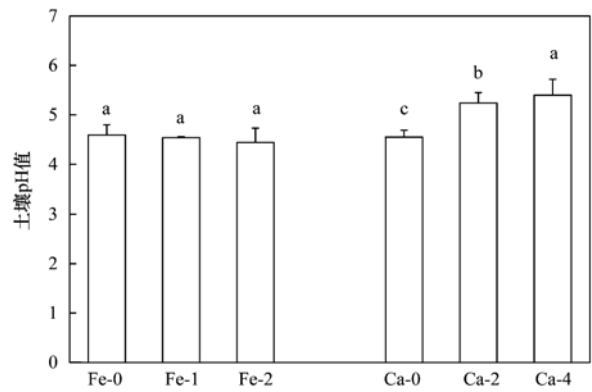
式中,C_i代表后一部位中 Pb、Cd、As 含量(mg·kg⁻¹),C_r代表前一部位中 Pb、Cd、As 含量(mg·kg⁻¹)。

采用 Office 2010、SPSS15.0 和 Origin 8.5 软件进行数据处理及绘图,在 P<0.05 水平下进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 钝化剂对土壤 pH 值影响

图 1 显示了硫酸铁和碳酸钙对土壤 pH 值的影响。与对照比较,添加硫酸铁的各处理土壤 pH 值之间均不存在显著性差异(P>0.05),添加碳酸钙使土壤 pH 增加了 0.65~0.85 个单位,各处理土壤 pH 值之间均存在显著性差异(P<0.05),显然,碳酸钙显著地提高土壤 pH 值,硫酸铁对土壤 pH 值没有显著影响。碳酸钙是一种碱性物质,在土壤中可产生大量 OH⁻,使土壤 pH 值升高。硫酸铁是一种强酸弱碱盐,在土壤中能水解产生大量的 H⁺,在本试验条件下,因添加量较小,未能使土壤 pH 值显著降低。



Fe-0, Fe-1, Fe-2 分别代表:添加硫酸铁的浓度为 0、1、2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, Ca-0, Ca-2, Ca-4 分别代表:添加碳酸钙的浓度为 0、2、4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;同一处理下,相同字母表示在 0.05 水平上无显著性差异,不同字母表示有显著性差异,下同

图1 两种钝化剂对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effects of two amendments on the soil pH

2.2 钝化剂对土壤中 Pb、Cd 和 As 的 TCLP 提取态的影响

图 2 显示硫酸铁和碳酸钙对土壤中 Pb、Cd 和 As 的 TCLP 提取态含量的影响. 随着添加量的增加,硫酸铁和碳酸钙均能使 Pb、Cd 的 TCLP 提取态含量逐渐降低,且具有显著性差异. 添加硫酸铁,可使 Pb 和 Cd 的 TCLP 提取态含量分别降低 65.7% ~ 81.8% 和 12.5% ~ 15.3%; 添加碳酸钙,可使 Pb 和 Cd 的 TCLP 提取态含量分别降低 23.7% ~ 81.8% 和 0.1% ~ 3.9%. 硫酸铁和碳酸钙分别使 As 的 TCLP 提取态含量提高 0.5 ~ 1.0 和 1.0 ~ 1.2 倍,且与对照存在显著差异 ($P < 0.05$). 显然,硫酸铁和碳酸钙均可有效降低土壤中 Pb 和 Cd 的生物有效性,使土壤 As 的活性显著提高.

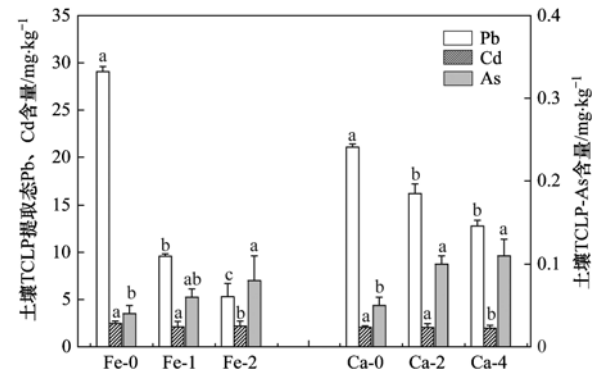


图2 两种钝化剂对土壤中 Pb、Cd 和 As 的 TCLP 提取态含量的影响

Fig. 2 Effects of two amendments on TCLP extractable contents of Pb, Cd, and As in soil

2.3 钝化剂对辣椒各部位 Pb、Cd 和 As 含量的影响

由图 3(a) 可知,随着硫酸铁和碳酸钙的添加

量增加,辣椒各部位 Pb 含量都呈现逐渐降低的规律. 与对照相比,硫酸铁使辣椒根、茎、叶、果实中 Pb 含量分别降低 44.2% ~ 69.1%、36.9% ~ 37.3%、25.4% ~ 42.0%、7.2% ~ 22.9%,硫酸铁在添加量 1 ~ 2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时辣椒根、叶中 Pb 含量与对照存在显著性差异 ($P < 0.05$). 碳酸钙使辣椒根、茎、叶、果实中 Pb 含量分别降低 51.5% ~ 72.2%、10.6% ~ 13.9%、8.3% ~ 23.2%、15.8% ~ 16.3%,碳酸钙在添加量为 2 ~ 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时辣椒根、叶、果实中 Pb 含量与对照存在显著性差异 ($P < 0.05$). 显然,两种钝化剂可有效降低辣椒各部位 Pb 含量,其效果相当.

随着硫酸铁和碳酸钙的添加量增加,辣椒各部位 Cd 含量逐渐降低,如图 3(b). 与对照相比,硫酸铁使辣椒根、茎、叶、果实中 Cd 含量分别降低

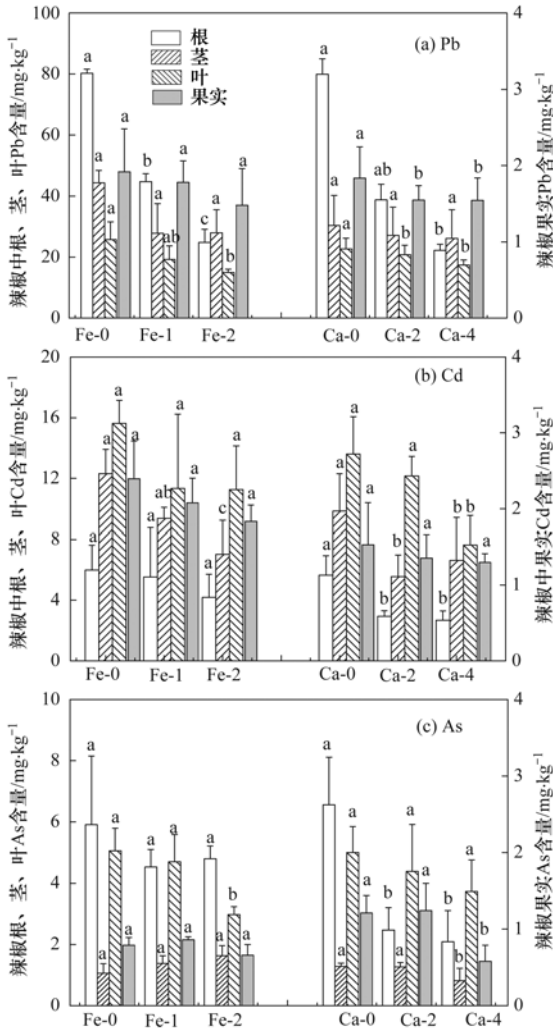


图3 两种钝化剂对辣椒各部位中 Pb、Cd 和 As 含量的影响

Fig. 3 Effects of two amendments on contents of Pb, Cd, and As in different organs of pepper plants

7.8% ~ 30.1%、24.0% ~ 42.9%、27.5% ~ 27.95%、2.3% ~ 2.9%，硫酸铁在添加量为 1 ~ 2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时辣椒茎中 Cd 含量与对照存在显著性差异 ($P < 0.05$)。碳酸钙使辣椒根、茎、叶、果实中 Cd 含量分别降低 47.8% ~ 52.7%、32.8% ~ 43.6%、10.7% ~ 43.8%、11.8% ~ 15.0%，碳酸钙在添加量为 2 ~ 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时辣椒根、茎、叶中 Cd 含量与对照存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

由图 3(c) 可知，硫酸铁使辣椒叶中 As 的含量降低 7.1% ~ 41.3%，硫酸铁在添加量为 2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时辣椒叶中 As 含量与对照存在显著性差异 ($P < 0.05$)，而添加硫酸铁对辣椒根、茎和果实中 As 含量没有显著影响。碳酸钙使辣椒根、茎、叶、果实中 As 含量与对照比较分别降低 62.4% ~ 68.1%、1.6% ~ 23.7%、12.2% ~ 25.4%、0.1% ~ 53.2%，碳酸钙在添加量为 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时辣椒根、茎、果实中 As 含量与对照存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.4 钝化剂对辣椒各部位 Pb、Cd 和 As 转运系数的影响

从表 2 可以看出，两种钝化剂均能有效降低辣椒中 Pb、Cd 从茎到果实的转运系数。当硫酸铁的添加量为 2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，Pb、Cd 从茎到果实的转运系数分别降低 16.7% 和 68.0%。碳酸钙的添加同样降低 Pb、Cd 从茎到果实的转运系数，当碳酸钙的添加量为 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，Pb、Cd 从茎到果实转运系数分别降低 16.7% 和 51.5%，碳酸钙在添加量为 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，Pb、Cd 从茎到果实的转运系数与对照相比均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

添加硫酸铁和碳酸钙均降低 As 从茎到果实的转运系数。与对照相比，添加 1 ~ 2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 硫酸铁，As 从茎到果实的转运系数最大降低 10.2%，但不存在显著性差异。与对照相比，添加 2 ~ 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 碳酸钙，As 从茎到果实的转运系数最大降低 45.6%，存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

表 2 两种钝化剂对 Pb、Cd、As 在辣椒植株各部位间转运系数的影响¹⁾

Table 2 Effects of two amendments on the translocation factors of Pb, Cd, and As in different organs of pepper plants

钝化剂	添加量 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb			Cd			As		
		TF _{根/茎}	TF _{茎/叶}	TF _{茎/果实}	TF _{根/茎}	TF _{茎/叶}	TF _{茎/果实}	TF _{根/茎}	TF _{茎/叶}	TF _{茎/果实}
硫酸铁	0	0.66 ± 0.09a	0.67 ± 0.05a	0.06 ± 0.02ab	1.51 ± 0.25a	1.49 ± 0.35a	0.25 ± 0.07a	0.17 ± 0.10a	3.86 ± 0.16a	0.59 ± 0.01a
	1	0.59 ± 0.17a	0.71 ± 0.25a	0.07 ± 0.02a	1.50 ± 0.26a	2.47 ± 0.61a	0.25 ± 0.10a	0.27 ± 0.07a	4.06 ± 1.08a	0.66 ± 0.11a
	2	0.80 ± 0.14a	0.56 ± 0.01a	0.05 ± 0.03b	1.66 ± 0.33a	2.07 ± 0.60a	0.08 ± 0.02b	0.17 ± 0.01b	1.87 ± 0.54b	0.53 ± 0.05a
碳酸钙	0	0.64 ± 0.03b	0.56 ± 0.11a	0.06 ± 0.02ab	1.51 ± 0.38b	1.45 ± 0.29a	0.33 ± 0.14a	0.21 ± 0.07b	3.96 ± 0.99b	1.03 ± 0.00a
	2	0.61 ± 0.08b	0.48 ± 0.10a	0.07 ± 0.03a	1.41 ± 0.17b	1.36 ± 0.42a	0.30 ± 0.13a	0.16 ± 0.08a	5.95 ± 0.50a	0.72 ± 0.10b
	4	0.75 ± 0.05a	0.65 ± 0.13a	0.05 ± 0.00b	2.47 ± 0.29a	1.27 ± 0.27a	0.16 ± 0.01b	0.48 ± 0.18c	1.81 ± 0.61c	0.56 ± 0.08c

1) 同一列中相同字母表示各处理无显著性差异，不同字母表示数据间有显著性差异 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 土壤 pH 值与土壤的 Pb、Cd、As 的 TCLP 提取态含量的相关关系

本研究结果表明，添加硫酸铁对土壤 pH 值的影响不大，添加碳酸钙使土壤 pH 值升高。图 2 表明，两种钝化剂均降低土壤中 Pb、Cd 的 TCLP 提取态含量，使土壤中 As 的 TCLP 提取态含量显著增加。为了研究土壤 pH 值与 Pb、Cd、As 的 TCLP 提取态含量关系，分别对其做相关分析(图 4)。结果表明，添加硫酸铁时，土壤 pH 值与 Pb、Cd、As 的 TCLP 提取态含量之间均不存在线性相关关系。这说明土壤中添加硫酸铁并不是通过改变土壤 pH 值而改变土壤中 Pb、Cd、As 的 TCLP 提取态含量。李婧菲等^[17] 研究结果表明，土壤中添加 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 对土壤 pH 影响不显著，但可使土壤中重金属交换态含量降低，这一结论与本研究结果一致。根据已有

报道 Fe^{3+} 对土壤 Pb、Cd 具有固定修复作用^[18]，其原因可能是 Fe^{3+} 水解形成胶体可有效吸附土壤中释放出来的 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} ^[19-21]，同时硫酸根离子与 Pb^{2+} 易生成难溶性沉淀。相关研究表明土壤中添加 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 对土壤有效态 As 含量影响不大，而添加 FeCl_3 可使土壤中有有效态 As 含量与对照相比降低 46%^[17]。本研究发现，添加硫酸铁对土壤中 As 的 TCLP 提取态含量显著上升。这表明 Fe^{3+} 对土壤砷有效性的影响需要进一步研究。添加碳酸钙，土壤 pH 值分别与 Pb、As 的 TCLP 提取态含量呈极显著的线性相关关系，其相关系数为 $R_{\text{Pb}}^2 = 0.767$ 、 $R_{\text{As}}^2 = 0.774$ ，与 Cd 的 TCLP 提取态含量线性相关性不明显。这一结果与孙约兵等^[22] 和王林等^[23] 的研究一致。添加碳酸钙能降低土壤中 Pb、Cd 的 TCLP 提取态含量的原因可能是，碳酸钙作为碱性物质能提高土壤 pH 值，增加土壤负电荷，促进增强对带正电荷的重金属离子的吸附^[24,25]；土壤处于碱性环境有

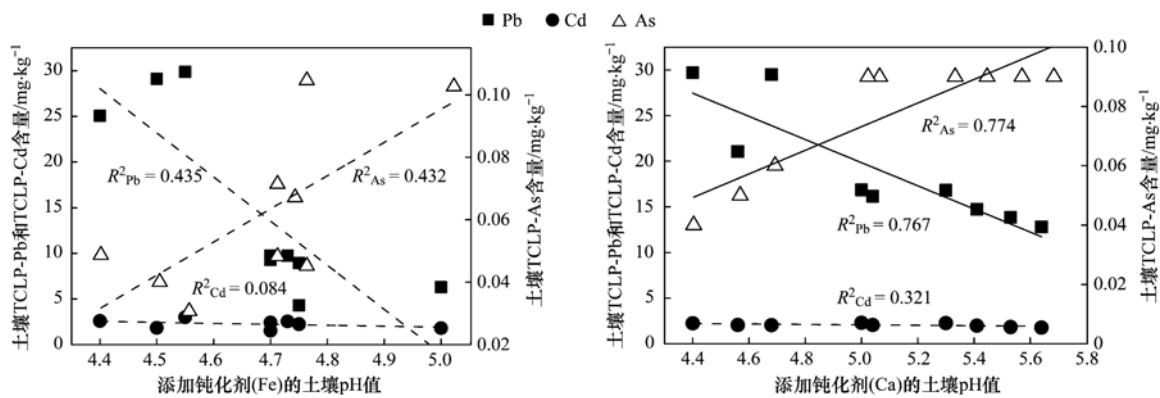


图 4 土壤理化性质与土壤 Pb、Cd 和 As 含量的相关关系

Fig. 4 Correlations between physical and chemical properties and contents of Pb, Cd, and As in soil

利于重金属离子生成氢氧化物或者是碳酸盐沉淀^[26~28]，从而降低土壤重金属含量的生物有效性。本研究结果表明土壤 pH 值越大，土壤 As 的 TCLP 提取态含量越高，这与杨文弢等^[29]和辜娇峰等^[30]的试验结果一致。Tokunaga 等^[31]的研究结果证明，土壤对 As 的吸附能力与土壤 pH 值密切相关，随着土壤 pH 值升高，土壤对 As 的固定作用减弱，其原因是增加的 OH⁻可配位取代土壤中的 As，促进土壤中 As 释放^[32,33]。

3.2 土壤 TCLP 的提取态含量与辣椒各部位 Pb、Cd、As 含量的相关性

土壤 TCLP 提取态方法主要用于检测固体介质或废弃物中重金属元素的溶出性和迁移性^[14]，它可以作为土壤中 Pb、Cd、As 生物有效性的评价指标。为研究土壤 Pb、Cd、As 的 TCLP 提取态含量与辣椒各部位 Pb、Cd、As 含量的关系，分别对其做相关性分析(表 3)。

添加硫酸铁的处理中，土壤中 Pb 的 TCLP 提取态含量与辣椒根、茎、叶中 Pb 含量之间存在显著或极显著的正相关关系，其相关系数分别为 0.979、0.769、0.766 ($n=9$, $R_{0.05}^2=0.443$, $R_{0.01}^2=0.637$)，土壤中 Cd 的 TCLP 提取态含量与辣椒茎、叶、果实中 Cd 含量之间存在显著正相关关系，其相关系数分别为 0.455、0.539、0.490 ($n=9$, $R_{0.05}^2=0.443$, $R_{0.01}^2=0.637$)。说明硫酸铁主要是通过降低土壤中 Pb 和 Cd 的 TCLP 提取态含量降低辣椒中 Pb、Cd 含量。该结论与李婧菲等^[17]研究结果一致。土壤中 As 的 TCLP 提取态含量与茎、叶中 As 含量之间存在显著负相关关系(表 3)。相关研究表明，添加钝化剂可能使土壤有效态 As 活化，使土壤中 As 从强结合态转化为弱结合态，从而导致土壤 As 浸出毒性提高^[34]。由表 2 可知，辣椒对 As 的积累主要是

在根部，As 从根部向地上部的转运很少。As 的 TCLP 提取态含量与茎、叶中 As 含量之间的负相关关系可能与植物体内复杂的 As 转运途径有关。

添加碳酸钙的处理中，土壤中 Pb 的 TCLP 提取态含量与辣椒根、叶、果实中 Pb 含量之间存在显著或极显著的正相关关系，其相关系数分别为 0.871、0.777、0.455。土壤中 Cd 的 TCLP 提取态含量与辣椒茎、叶中 Cd 含量之间存在显著正相关关系，其相关系数分别为 0.703、0.649。该结果与 Arao 等^[16]的研究一致，添加石灰石和海泡石的组配钝化剂可以显著降低土壤交换态 Pb、Cd 含量，降低蔬菜对 Pb、Cd 的吸收。土壤 As 的 TCLP 提取态含量与辣椒叶、果实中 As 含量之间存在显著负相关关系，其相关系数分别为 0.476、0.580。钟倩云等^[35]通过水稻盆栽试验发现，添加碳酸钙可以降低土壤中 As 交换态含量，但并未显著降低水稻糙米 As 含量。这与本研究中添加碳酸钙活化土壤 As，降低辣椒果实中 As 的含量试验结果不一致。

表 3 辣椒各部位中 Pb、Cd 和 As 含量与土壤 TCLP 提取态含量的相关关系 (R^2)

Table 3 Correlations between contents of Pb, Cd, and As in different organs of pepper plants and TCLP extractable contents of Pb, Cd, and As in soil (R^2)

钝化剂	辣椒各部 Pb、Cd、As 含量	土壤 TCLP 提取态		
		Pb	Cd	As
硫酸铁	根	0.979 **	0.294	-0.113
	茎	0.769 *	0.455 *	-0.576 *
	叶	0.766 *	0.539 *	-0.612 *
	果实	0.396	0.490 *	-0.182
碳酸钙	根	0.871 **	0.392	-0.373
	茎	0.227	0.703 *	-0.092
	叶	0.777 **	0.649 *	-0.476 *
	果实	0.455 *	0.226	-0.580 *

1) * 和 ** 分别代表 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 的显著水平, $n=9$, $R_{0.05}^2=0.443$, $R_{0.01}^2=0.637$

本研究中,辣椒果实中 As 含量降低的原因可能是大量 Ca^{2+} 对细胞膜透性及细胞分裂具有一定影响, Ca^{2+} 易与果胶质形成难溶性沉淀, 改变其结构及通透性, 从而阻止 As 进入植物果实体内^[36,37]。

4 结论

(1) 硫酸铁使土壤中 Pb、Cd 的 TCLP 提取态含量最大降低 81.8% 和 5.3%; 碳酸钙使土壤中 Pb、Cd 的 TCLP 提取态含量最大降低 56.0% 和 3.9%。硫酸铁和碳酸钙均使土壤中 As 的 TCLP 提取态含量显著升高。

(2) 硫酸铁使辣椒果实中 Pb 和 Cd 的含量分别降低 7.2% ~ 22.9% 和 2.3% ~ 2.9%, 而对果实中 As 的含量没有影响。碳酸钙使辣椒果实中 Pb、Cd、As 的含量分别降低 15.8% ~ 16.3%、11.8% ~ 15.0%、0.03% ~ 53.2%。

(3) 硫酸铁和碳酸钙都能有效降低旱地中 Pb、Cd、As 向辣椒中迁移, 且碳酸钙效果比硫酸铁好。但由于辣椒种植土壤的重金属污染非常严重, 添加两种钝化剂均未能使辣椒果实中 Pb、Cd、As 含量达到国家食品安全卫生标准限值(GB 2762-2012)。

参考文献:

- [1] 甘国娟, 刘伟, 邱亚群, 等. 湘中某冶炼区农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境化学, 2013, **32**(1): 132-138.
Gan G J, Liu W, Qiu Y Q, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils in a smelting area in Central Hunan[J]. Environmental Chemistry, 2013, **32**(1): 132-138.
- [2] Kumpiene J, Lagerkvist A, Maurice C. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments-a review[J]. Waste Management, 2008, **28**(1): 215-225.
- [3] 黄益宗, 郝晓伟, 雷鸣, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 409-417.
Huang Y Z, Hao X W, Lei M, *et al.* The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 409-417.
- [4] 邓贵友, 吴燕明, 周航, 等. 组配改良剂对重金属污染土壤-蔬菜系统的修复效果研究[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(2): 154-158, 164.
Deng G Y, Wu Y M, Zhou H, *et al.* Effects of a combined amendment on remediation of soil-vegetable system polluted with heavy metals[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(2): 154-158, 164.
- [5] 雷鸣, 曾敏, 胡立琼, 等. 不同含磷物质对重金属污染土壤-水稻系统中重金属迁移的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(6): 1527-1533.
Lei M, Zeng M, Hu L Q, *et al.* Effects of different phosphorus-containing substances on heavy metals migration in soil-rice system[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(6): 1527-1533.
- [6] Liang X F, Han J, Xu Y M, *et al.* In situ field-scale remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and palygorskite[J]. Geoderma, 2014, **235-236**: 9-18.
- [7] Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **101**: 226-232.
- [8] 肖细元, 杨森, 郭朝晖, 等. 改良剂对污染土壤上蔬菜生长及吸收重金属的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(8): 41-46.
Xiao X Y, Yang M, Guo Z H, *et al.* Effect of amendments on vegetable growth and uptake of heavy metals from contaminated soils[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(8): 41-46.
- [9] 黄玲, 雷鸣, 胡立琼, 等. 2 种含铁物质对底泥中砷的固化效果[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1): 253-256.
Huang L, Lei M, Hu L Q, *et al.* Immobilization effects of iron-containing materials on arsenic in sediment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, **28**(1): 253-256.
- [10] Jackson B P, Miller W P. Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, **64**(5): 1616-1622.
- [11] 胡立琼, 曾敏, 雷鸣, 等. 含铁材料对污染水稻土中砷的稳定化效果[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(4): 1599-1604.
Hu L Q, Zeng M, Lei M, *et al.* Stabilization effects of iron-containing materials on arsenic in contaminated paddy soils[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(4): 1599-1604.
- [12] 向猛, 黄益宗, 蔡立群, 等. 改良剂对土壤 As 钝化作用及生物可给性的影响[J]. 环境化学, 2016, **35**(2): 317-322.
Xiang M, Huang Y Z, Cai L Q, *et al.* Influence of amendments on inactivation and bio-accessibility of arsenic in soils[J]. Environmental Chemistry, 2016, **35**(2): 317-322.
- [13] 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.
- [14] 孙叶芳, 谢正苗, 徐建明, 等. TCLP 法评价矿区土壤重金属的生态环境风险[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 152-156.
Sun Y F, Xie Z M, Xu J M, *et al.* Assessment of toxicity of heavy metal contaminated soils by toxicity characteristic leaching procedure[J]. Environmental Science, 2005, **26**(3): 152-156.
- [15] 朱维, 刘丽, 吴燕明, 等. 组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4277-4282.
Zhu W, Liu L, Wu Y M, *et al.* In-situ study on effects of combined amendment on translocation control of Pb and Cd in soil-vegetable system[J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 4277-4282.
- [16] Arao T, Takeda H, Nishihara E. Reduction of cadmium translocation from roots to shoots in eggplant (*Solanum melongena*) by grafting onto *Solanum torvum* rootstock[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2008, **54**(4): 555-559.
- [17] 李婧菲, 方晰, 曾敏, 等. 2 种含铁材料对水稻土中砷和重金属生物有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2013, **27**(1): 136-140.
Li J F, Fang X, Zeng M, *et al.* Effects on biological availability

- of arsenic and heavy metals in paddy soil by two kinds of iron-containing materials[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, **27**(1): 136-140.
- [18] 卢明, 屠乃美, 胡华勇. 氯化铁和硫酸铁对酸性土壤中有效态镉和铅污染的修复作用[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(1): 469-476.
- Lu M, Tu N M, Hu H Y. Remediation of available Cd and Pb contamination in acidic soil by ferric chloride and ferric sulfate [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(1): 469-476.
- [19] 王旌, 付融冰, 罗启仕, 等. 亚铁盐对城市污泥中重金属的稳定化作用研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 1036-1040.
- Wang J, Fu R B, Luo Q S, *et al.* Stabilization of heavy metals in sewage sludge by using a ferrous iron [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 1036-1040.
- [20] 郝晓伟, 黄益宗, 崔岩山, 等. 赤泥对污染土壤 Pb、Zn 化学形态和生物可给性的影响[J]. *环境工程学报*, 2010, **4**(6): 1431-1435.
- Hao X W, Huang Y Z, Cui Y S, *et al.* Effects of red mud addition on fractionation and bio-accessibility of Pb and Zn in contaminated soil [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, **4**(6): 1431-1435.
- [21] 徐仁扣, 肖双成, 蒋新, 等. pH 对 Cu(II) 和 Pb(II) 在可变电荷土壤表面竞争吸附的影响[J]. *土壤学报*, 2006, **43**(5): 871-874.
- Xu R K, Xiao S C, Jiang X, *et al.* Effect of pH on competitive adsorption of Cu(II) and Pb(II) on variable charge soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, **43**(5): 871-874.
- [22] 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.
- [23] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(2): 314-320.
- Wang L, Xu Y M, Sun G H, *et al.* Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, **21**(2): 314-320.
- [24] 周航, 周歆, 曾敏, 等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 437-444.
- Zhou H, Zhou X, Zeng M, *et al.* Effects of two combined amendments on heavy metal bioaccumulation in paddy soil [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 437-444.
- [25] 孙约兵, 徐应明, 史新, 等. 污灌区镉污染土壤钝化修复及其生态效应研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(8): 1467-1473.
- Sun Y B, Xu Y M, Shi X, *et al.* The immobilization remediation of Cd contaminated soils in wastewater irrigation region and its ecological effects [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(8): 1467-1473.
- [26] Lombi E, Hamon R E, McGrath S P, *et al.* Lability of Cd, Cu, and Zn in polluted soils treated with lime, beringite, and red mud and identification of a non-labile colloidal fraction of metals using isotopic techniques [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(5): 979-984.
- [27] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(7): 1441-1453.
- Cao X D, Wei X X, Dai G L, *et al.* Combined pollution of multiple heavy metals and their chemical immobilization in contaminated soils: a review [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, **5**(7): 1441-1453.
- [28] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, **18**(4): 847-851.
- Zhu Q H, Huang D Y, Liu G S, *et al.* Effects and mechanisms of amendments on remediation of cadmium contaminated acid paddy soils [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, **18**(4): 847-851.
- [29] 杨文戮, 周航, 邓贵友, 等. 组配改良剂对污染稻田中铅、镉和砷生物有效性的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(1): 257-263.
- Yang W T, Zhou H, Deng G Y, *et al.* Effects of combined amendment on bioavailability of Pb, Cd, and As in polluted paddy soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(1): 257-263.
- [30] 辜娇峰, 周航, 吴玉俊, 等. 复合改良剂对稻田 Cd、As 活性与累积的协同调控[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 206-214.
- Gu J F, Zhou H, Wu Y J, *et al.* Synergistic control of combined amendment on bioavailability and accumulation of Cd and As in rice paddy soil [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 206-214.
- [31] Tokunaga S, Hakuta T. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(1): 31-38.
- [32] Alam M G M, Tokunaga S, Maekawa T. Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate [J]. *Chemosphere*, 2001, **43**(8): 1035-1041.
- [33] 李季, 黄益宗, 保琼莉, 等. 几种改良剂对矿区土壤中 As 化学形态和生物可给性的影响[J]. *环境化学*, 2015, **34**(12): 2198-2203.
- Li J, Huang Y Z, Bao Q L, *et al.* Effect of several amendments on the speciation and bio-accessibility of arsenic polluted soils in adjacent areas of mine [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(12): 2198-2203.
- [34] 黄益宗, 郝晓伟. 赤泥、骨炭和石灰对玉米吸收积累 As、Pb 和 Zn 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 456-462.
- Huang Y Z, Hao X W. Effect of red mud, bone char and lime on uptake and accumulation of As, Pb and Zn by maize (*Zea mays*) planted in contaminated soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 456-462.
- [35] 钟倩云, 曾敏, 廖柏寒, 等. 碳酸钙对水稻吸收重金属 (Pb、Cd、Zn) 和 As 的影响[J]. *生态学报*, 2015, **35**(4): 1242-1248.
- Zhong Q Y, Zeng M, Liao B H, *et al.* Effects of CaCO₃ addition on uptake of heavy metals and arsenic in paddy fields [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(4): 1242-1248.

- [36] 韩照祥, 冯贵颖, 吕文洲, 等. 环境中 As(Ⅲ)对小麦萌发的影响及砷毒害防治初探[J]. 西北植物学报, 2002, 22(1): 123-128.
- Han Z X, Feng G Y, Lü W Z, *et al.* Study on effects of As(Ⅲ) in environment on wheat sprout and the original researcher of prevention and treatment of arsenic toxicant[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(1): 123-128.

- [37] 邵云, 李万昌, 侯小丽, 等. 粉煤灰和碳酸钙对 As(Ⅲ)污染土壤上小麦产量性状及麦株 As 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1784-1788.
- Shao Y, Li W C, Hou X L, *et al.* Effect of coal fly ash and calcium carbonate on yield constituents and As content of wheat in As(Ⅲ) contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1784-1788.

欢迎订阅 2017 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2017 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)