

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源 张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)

FTIR对大气颗粒物PM_{2.5}中硝酸盐的定量分析 刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程巴阳 (3347)

福建茫荡山地区春季大气O₃、HONO、HCHO、H₂O₂对·OH的贡献率研究 刘昊, 王会祥 (3352)

水体类固醇雌激素污染现状研究进展 都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)

嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查 闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)

上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征 姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)

水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究 张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)

四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用 徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)

光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响 李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)

围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)

长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征 赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)

长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究 李胜男, 史小丽, 谢薇薇, 龚伊, 孔繁翔 (3416)

峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析 黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)

九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义 鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)

氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律 陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究 张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)

杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究 邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)

滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究 谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)

自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响 张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)

J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价 李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)

水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响 吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)

重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究 胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)

聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究 刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)

镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制 桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)

钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究 欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)

以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征 宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)

氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究 赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)

缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮 唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)

微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N₂O产生量的研究 陈丽丽, 高大文 (3532)

Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究 马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)

高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性 唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)

内蒙古温带草原氮沉降的观测研究 张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)

湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究 刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈永稳, 叶长城 (3557)

蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究 王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)

密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价 于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义 许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)

复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究 王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)

湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征 何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌霄, 胡瑶 (3595)

安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较 王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)

三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)

二氯甲烷降解菌 *Methylobacterium rhodesianum* H13 的分离鉴定及降解特性研究 刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)

引物选择对污泥微生物多样性分析的影响 徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)

钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO₂储存性能研究 曹琳, 王海滨, 解强 (3627)

基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究 袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)

重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文

多证据分析技术在场地重金属污染评价中的应用研究 姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)

我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源 李晓燕, 刘艳青 (3648)

黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价 张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)

青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究 朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)

某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险 郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)

某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响 周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)

某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究 岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)

原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究 张建荣, 李娟, 许伟 (3684)

淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究 朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)

铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析 任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)

超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究 王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)

摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价 杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)

土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究 郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)

《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)

无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究

曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静*

(华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 研究了单独无机稳定剂和复合无机稳定剂对污染土壤中重金属的稳定化效果. 实验室小试结果表明, KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂对 Zn 和 Cu 的稳定化具有显著的协同作用, 将混合药剂用于实际农田污染土壤的原位稳定化, 当两种药剂用量均为 $0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 时, Zn、Cu 和 Cd 的稳定化率分别为 41.8%、28.2% 和 48.4%. 混合药剂对花生的生长有抑制作用, 同时混合药剂能够抑制花生对重金属的吸收.

关键词: 重金属; 土壤修复; 稳定化; 原位; 农田

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3722-05

Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils

CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, WANG Lin-ling, CHEN Jing

(College of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Effects of single and mixed inorganic amendments on the stabilization of heavy metals in contaminated soils were investigated. Significant synergistic effects on the stabilization of Zn and Cu were observed with the mixed inorganic amendments of KH_2PO_4 and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the laboratory test. In the field test, the stabilization ratios of Zn, Cu and Cd were 41.8%, 28.2% and 48.4%, respectively, with the dosage of $0.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$. The growth of peanut was inhibited by the addition of the inorganic amendments. Meanwhile, the uptake of heavy metals was reduced in peanut.

Key words: heavy metal; soil remediation; stabilization; in-situ; farmland

随着我国工业化和城市化进程不断加快, 大量工业“三废”排放, 矿山开采, 污水灌溉和农药化肥的施用导致农田重金属污染问题日趋严重^[1~3]. 重金属具有明显的生物富集作用, 在土壤中不易随水迁移, 不能被微生物降解, 通过农作物如粮食和蔬菜等进入人体进而危害人体健康^[4,5]. 据农业部调查统计, 我国重金属污染的耕地约 $1 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占耕地总面积的 10% 以上, 每年被重金属污染的粮食多达 $1.2 \times 10^7 \text{ t}$, 由此造成的经济损失高达 200 亿元以上^[6]. 因此, 重金属污染农田土壤的修复极为必要.

重金属污染土壤修复技术主要有物理修复、化学修复、生物修复和多种技术的联用等^[7~9]. 其中化学修复中的稳定化技术采用化学药剂与土壤中的重金属作用, 有效地降低重金属的迁移性和生物可利用性, 具有操作简单、成本低且适用范围宽等优点, 近年来得到广泛研究和应用^[10,11]. Cao 等^[12,13] 的研究表明, 磷酸盐对污染土壤中重金属 Pb、Zn 和 Cu 具有很好的稳定化效果, 廖敏等^[14] 通过施加石灰能够有效降低土壤中 Cd 的毒性. 目前土壤稳定化研究多集中于实验室小试研究, 缺乏针对农田重金属污染土壤的原位稳定化修复研究^[15,16].

本研究在实验室小试的基础上, 优化重金属稳

定化药剂, 选择湖北省大冶市某矿区附近的农田为试验田, 考察原位农田重金属稳定化的效果, 稳定化药剂对农作物果实产量和果实中重金属含量的影响, 以期为重金属污染农田原位修复奠定基础.

1 材料与方法

1.1 实验试剂

磷酸二氢钾 (AR, 天津市科密欧化学试剂开发中心), 氢氧化钙 (AR, 上海市奉贤奉城试剂厂), $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 和 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ (AR, 上海纯试剂有限公司), MgCl_2 和 HAc (AR, 国药集团化学试剂有限公司). 氢氟酸、硝酸和盐酸 (AR, 开封东大化工有限公司试剂厂).

1.2 实验方法

1.2.1 实验室小试

土壤样品采集于湖北省大冶有色冶炼厂附近某

收稿日期: 2012-08-20; 修订日期: 2012-10-17

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2012AA06A304); 华中科技大学自主创新研究基金项目 (2012QN126, 2011TS064)

作者简介: 曹梦华 (1985 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为土壤修复, E-mail: cmh850513@163.com

* 通讯联系人, E-mail: chenjing@mail.hust.edu.cn

农田,该农田面积为 200 m²,样品经过风干、除杂、碾磨和过筛后密封保存备用. 土壤黏粒、粉粒和砂粒所占的质量分数分别为 38.4%、43.7% 和 17.9%,根据美国土壤质地标准,该土壤属于粉砂质黏壤土. 土壤有机质、pH 和含水率分别为 1.38%、7.17 和 4.04%. 土壤中主要重金属有效态含量分别为:Zn(22.4 mg·kg⁻¹)、Cu(65.8 mg·kg⁻¹)和 Cd(2.05 mg·kg⁻¹). 称取 15 g 土壤样品,置于 50 mL 塑料离心管中,采用两种方式加入稳定剂,一种是分别单独加入一定量的 KH₂PO₄ 和 Ca(OH)₂,反应 72 h,另一种是先加入一定量 KH₂PO₄ 反应 72 h,接着再加入一定量 Ca(OH)₂ 反应 72 h,作为混合药剂对重金属进行稳定化,分别测定土壤中有效态重金属含量.

1.2.2 原位农田实验

农田平均划分为 4 块,一块为空白对照组,另 3 块为实验组,在实验室小试的基础上,优化稳定化药剂,以每平方为单位,3 块实验组分别施加不同量的稳定化药剂,当花生成熟后,每个地块设置 3~6 个采样点,均采集土壤和花生样品进行分析测定.

1.3 分析方法

土壤中重金属总量的测定:准确称取 0.5 g 土壤样品于聚四氟乙烯瓶中,加入硝酸、盐酸和氢氟酸放入微波消解仪中消解 15 min 后得透明溶液,定容到 50 mL 后用火焰原子吸收测定(BRAIC, WFX-110).

土壤中重金属有效态的测定:准确称取 0.5 g 土壤样品于 15 mL 塑料离心管中,加入 10 mL 0.50 mol·L⁻¹MgCl₂ 和 0.25 mol·L⁻¹HAc 混合溶液作为重金属有效态提取剂,在 25℃ 下连续振荡 18 h 后离心过滤,用硝酸将滤液的 pH 调至小于 2,用火焰原子吸收测定滤液中重金属含量,当土壤 pH 偏碱性时,在加入提取剂前,先加入稀盐酸将 pH 调至中性

范围.

花生果实(花生仁)中重金属含量的测定:去壳粉碎后取样品 2.0 g 置于坩埚中,先在电热板上 300℃ 下加热使其碳化(约 2~4 h),再转移到马弗炉中 650℃ 下使其完全灰化(约 18 h). 加优级纯盐酸 2 mL,在电热板上低温溶解,连同残渣定容至 25 mL,过滤后取滤液加硝酸调 pH 至小于 2,用火焰原子吸收测定滤液中重金属含量.

2 结果与讨论

2.1 实验室小试

图 1 为单一稳定剂对土壤中重金属稳定化效果. 图 1(a) 显示随着 KH₂PO₄ 的用量逐渐增加,有效态的 Cu 和 Cd 浓度逐渐降低,当 KH₂PO₄ 的投加量为 10% 时,Cu 和 Cd 的稳定化率分别增加到 8% 和 9%,其主要原因是 KH₂PO₄ 可降低土壤 pH,提高土壤液中的 Cu²⁺ 和 Cd²⁺ 的浓度,有利于磷酸盐沉淀的生成. 与 Cu 和 Cd 不同,有效态的 Zn 随着 KH₂PO₄ 的用量增加反而降低,Cao 等^[17] 提出磷酸盐稳定化 Zn 的机制主要取决于表面络合或吸附,仅有少量 Zn 形成磷酸盐沉淀,施尧等^[18] 的研究结果也表明水溶态的 Zn 与 pH 呈负相关,加入 KH₂PO₄ 所引发的土壤 pH 的降低会促进 Zn 的解吸^[19],所以加入 KH₂PO₄ 会导致 Zn 有效态含量增加.

图 1(b) 显示随着 Ca(OH)₂ 的投加量的增加,有效态的 Zn 和 Cd 浓度逐渐降低,当 Ca(OH)₂ 的质量分数增加到 5% 时,Zn 和 Cd 的稳定化率分别增加到 36% 和 26%,明显高于磷酸盐的稳定化率,但此时土壤 pH 增加到 12.3,不利于农作物生长^[20]. Ca(OH)₂ 对 Cu 的稳定化作用明显低于 Zn 和 Cd,主要原因是 Cu(OH)₂ 的稳定性低于 Zn(OH)₂ 和 Cd(OH)₂^[21],在酸提取条件下易溶解,导致有效态 Cu 的含量变化较小.

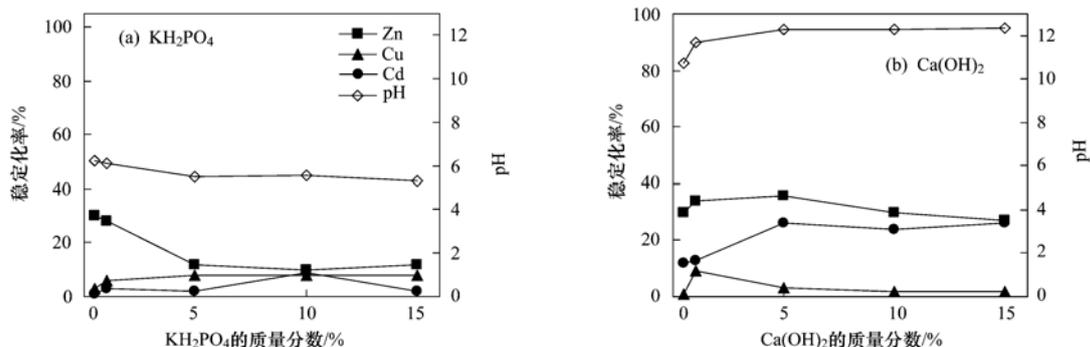


图 1 单独 KH₂PO₄ 和 Ca(OH)₂ 对重金属的稳定化

Fig. 1 Effect of KH₂PO₄ and Ca(OH)₂ alone on the stabilization of heavy metals

图 2(a)显示固定 KH_2PO_4 的投加量为 5% 时,随着 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的增加,Zn 和 Cu 的稳定化实验观测值明显高于理论值(实心图例和空心图例分别表示观测值和理论值,其中理论值为在两种稳定化剂单独作用条件下的稳定化率之和),结果表明 KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂对 Zn 和 Cu 的稳定化具有协同作用. 对于 Cu 的稳定化, KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 均能通过沉淀实现,但单独添加 KH_2PO_4 时,仅能生成少量的磷酸盐沉淀,当加入 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 时, H_2PO_4^- 转化为 PO_4^{3-} ,能够促进磷酸盐沉淀的生成,所以 Cu 的稳定化能明显增强. 磷酸盐对 Zn 的稳定化机制与 Cu 不同, OH^- 会与磷酸盐对 Zn 的络合与吸附作用产生竞争,Zn 易与 OH^- 生成稳定的 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 沉淀,从而络合态和吸

附态的 Zn 减少,导致在酸提取条件下,Zn 的有效态降低,所以 Zn 的稳定化率在混合药剂作用下也能明显增强. 与 Cu 和 Zn 的稳定化效果不同,混合药剂对 Cd 的稳定化没有明显协同作用,图 1(a)显示单独 KH_2PO_4 对 Cd 的稳定化效率很低,表明 $\text{Cd}(\text{PO}_4)_3$ 沉淀不稳定,对 Cd 稳定化的贡献较小,所以 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 促进 H_2PO_4^- 的转化不能促进 Cd 的稳定化,混合药剂对 Cd 的稳定化主要是通过生成 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 沉淀. 图 2(b)固定 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的投加量为 5% 时,随着 KH_2PO_4 浓度的增加,同样观察到 KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂协同稳定化 Zn 和 Cu. 同时 KH_2PO_4 浓度的变化对 Cd 的稳定化效率基本没有影响,进一步证明 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 沉淀主导 Cd 的稳定化.

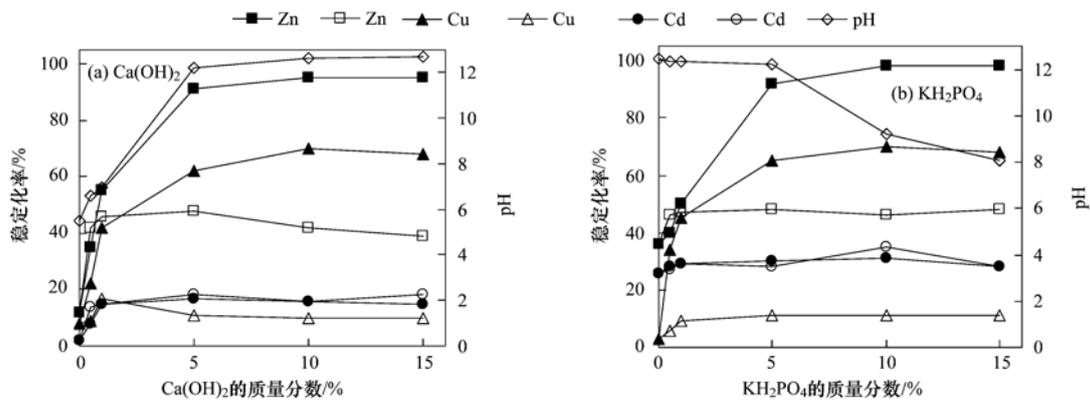


图 2 KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂对重金属的稳定化

Fig. 2 Effect of KH_2PO_4 combined with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on the stabilization of heavy metals

2.2 农田实验

表 1 显示 KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂对农田原位稳定化效果. 当药剂用量均为 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,Zn、Cu 和 Cd 的稳定化率分别为 27.2%、13.3% 和 35.8%. 3 种重金属稳定化效果 $\text{Cd} > \text{Zn}$

$> \text{Cu}$,Cu 的稳定化率较低,结果与实验室小试结果一致. 当药剂用量增加到 $0.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,Zn、Cu 和 Cd 的稳定化率分别增加到 41.8%、28.2% 和 48.4%, 进一步增加药剂用量,3 种重金属的稳定化率仅有少量增加.

表 1 稳定化对土壤重金属有效态含量的影响

Table 1 Effect of stabilization on the concentration of available heavy metals in the soil

项目	稳定化药剂用量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$		土壤中重金属有效态含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		
	KH_2PO_4	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Zn	Cu	Cd
空白对照组	0	0	21.3	64.6	1.90
	0.2	0.2	15.5	56.0	1.22
实验组	0.5	0.5	12.4	46.4	0.98
	1.0	1.0	11.8	45.3	0.88

稳定化后农作物对重金属的吸收和生长状况是对农田稳定化技术评估的重要指标,表 2 反映了稳定化对农作物吸收重金属和农作物生长的影响. 与对照组相比,实验组的花生产量明显减小,一方面由

于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的加入对花生的生长有抑制作用^[20],另一方面磷酸盐修复过程导致高量的磷进入土壤,容易引起作物生长环境的营养失衡^[22,23],从单株花生仁中重金属总量进行比较,实验组中单株花生仁

中重金属含量均低于对照组,表明稳定化药剂的加入能够抑制花生对重金属的吸收,从而有利于降低花生对重金属的富集,原因在于植物对重金属的吸收量主要取决于土壤中有效态重金属浓度^[24], Zeng 等^[25]的研究也表明通过磷酸盐稳定化土壤中

的重金属能够有效降低重金属在植物体内的富集。同时随着实验组中药剂剂量的增加,单株花生仁中重金属含量越低,当药剂用量增加到 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,实验组中单株花生仁中重金属 Zn、Cu 和 Cd 的含量比对照组分别降低了 37.4%、40.9% 和 46.3%。

表 2 稳定化对农作物吸收重金属和农作物生长的影响

Table 2 Effect of stabilization on crop uptake of heavy metals and crop growth

项目	花生仁中重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$			花生产量 / $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$	单株花生仁中重金属总量 ¹⁾ / mg		
	Zn	Cu	Cd		Zn	Cu	Cd
空白对照组	47.8	21.5	0.84	49.1	2.35	1.05	0.041
实验组	47.1	19.6	0.80	46.6	2.19	0.91	0.037
	49.0	19.2	0.69	43.5	2.13	0.83	0.030
	46.8	19.8	0.71	31.5	1.47	0.62	0.022

1) 单株花生仁中重金属总量 = 花生仁中重金属含量 × 花生产量

3 结论

(1) KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂对污染土壤中 Zn 和 Cu 的稳定化具有显著的协同作用。

(2) KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂能够有效实现原位农田重金属污染土壤的稳定化, 3 种重金属稳定化效果 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu}$ 。

(3) KH_2PO_4 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 混合药剂对花生的生长有抑制作用, 同时能够降低花生对重金属的吸收。

参考文献:

- [1] 崔斌, 王凌, 张国印, 等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, **40**(1): 373-375, 447.
- [2] Huong N T L, Ohtsubo M, Higashi T, *et al.* Heavy metal concentration in sediments of the Nhue river and its water-irrigated farmland soil in the suburbs of Hanoi, Vietnam[J]. Soil and Sediment Contamination, 2012, **21**(3): 364-381.
- [3] Xu L, Luo W, Lu Y L, *et al.* Status and fuzzy comprehensive assessment of metals and arsenic contamination in farmland soils along the Yanghe River, China[J]. Chemistry and Ecology, 2011, **27**(5): 415-426.
- [4] Wang Y C, Qiao M, Liu Y X, *et al.* Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(4): 690-698.
- [5] Zhang P, McBride M B, Xia H P, *et al.* Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(5): 1551-1561.
- [6] 王岩, 成杰民. 重金属污染农田土地整理技术研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(5): 164-168.
- [7] Bisone S, Blais J F, Drogui P, *et al.* Toxic metal removal from polluted soil by acid extraction [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2012, **223**(7): 3739-3755.
- [8] Wei S H, da Silva J A T, Zhou Q X. Agro-improving method of phytoextracting heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **150**(3): 662-668.
- [9] Peng J F, Song Y H, Yuan P, *et al.* The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 633-640.
- [10] Conner J R, Hoeffner S L. A critical review of stabilization/solidification technology [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1998, **28**(4): 397-462.
- [11] 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势[J]. 化学进展, 2009, **21**(2-3): 558-565.
- [12] Cao R X, Ma L Q, Chen M, *et al.* Phosphate-induced metal immobilization in a contaminated site [J]. Environmental Pollution, 2003, **122**(1): 19-28.
- [13] Cao X D, Wahbi A, Ma L Q, *et al.* Immobilization of Zn, Cu, and Pb in contaminated soils using phosphate rock and phosphoric acid[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **164** (2-3): 555-564.
- [14] 廖敏, 黄昌勇, 谢正苗. 施加石灰降低不同母质土壤中镉毒性机理研究[J]. 农业环境科学, 1998, **17**(3): 101-103.
- [15] 王永强, 蔡信德, 肖立中. 多金属污染农田土壤固化/稳定化修复研究进展[J]. 广西农业科学, 2009, **40**(7): 881-888.
- [16] Yang J, Mosby D. Field assessment of treatment efficacy by three methods of phosphoric acid application in lead-contaminated urban soil [J]. Science of the Total Environment, 2006, **366** (1): 136-142.
- [17] Cao X D, Ma L Q, Rhue D R, *et al.* Mechanisms of lead, copper, and zinc retention by phosphate rock[J]. Environmental Pollution, 2004, **131**(3): 435-444.
- [18] 施尧, 曹心德, 魏晓欣, 等. 含磷材料钝化修复重金属 Pb、Cu、Zn 复合污染土壤[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2011, **29**(3): 62-68.
- [19] Chen X B, Wright J V, Conca J L, *et al.* Effect of pH on heavy metal sorption on mineral apatite [J]. Environmental Science &

- Technology, 1997, **31**(3): 624-631.
- [20] 郑应泽. 土壤酸碱度对农作物生长的影响[J]. 玉溪师专学报(自然科学版), 1994, **10**(3-4): 64-67.
- [21] Wang Y M, Chen T C, Yeh K J, *et al.* Stabilization of an elevated heavy metals contaminated site [J]. Journal of Hazardous Materials, 2001, **88**(1): 63-74.
- [22] Boisson J, Ruttens A, Mench M, *et al.* Evaluation of hydroxyapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part I. Influence of hydroxyapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal accumulation [J]. Environmental Pollution, 1999, **104**(2): 225-233.
- [23] Theodoratos P, Papassiopi N, Xenidis A. Evaluation of monobasic calcium phosphate for the immobilization of heavy metals in contaminated soils from Lavrion [J]. Journal of Hazardous Materials, 2002, **94**(2): 135-146.
- [24] 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.
- [25] Zeng M, Liao B H, Lei M, *et al.* Arsenic removal from contaminated soil using phosphoric acid and phosphate [J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(1): 75-79.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaying	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epiclorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Jia-wei, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, LI Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-minget <i>al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-yong, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行