

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

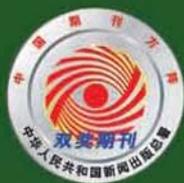
ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

**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

2015年北京市两次红色预警期间PM<sub>2.5</sub>浓度特征 ..... 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM<sub>2.5</sub>变化特征对气象因素的响应 ..... 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 ..... 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM<sub>2.5</sub>中芳香酸的测定及来源解析 ..... 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 ..... 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 ..... 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 ..... 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 ..... 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 ..... 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO<sub>2</sub>交换通量变化过程及其环境影响 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 ..... 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 ..... 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 ..... 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 ..... 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 ..... 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 ..... 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 ..... 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 ..... 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 ..... 王振红, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 ..... 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 ..... 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>活化过一硫酸盐降解金橙G ..... 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 ..... 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 ..... 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 ..... 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 ..... 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 ..... 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 ..... 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 ..... 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 ..... 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 ..... 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 ..... 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 ..... 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX<sub>2</sub>的筛选及脱氮特性 ..... 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 ..... 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 ..... 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 ..... 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 ..... 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N<sub>2</sub>O排放及其影响因素 ..... 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N<sub>2</sub>O排放研究 ..... 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 ..... 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 ..... 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 ..... 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 ..... 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 ..... 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 ..... 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 ..... 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及其NH<sub>3</sub>-SCR活性探究 ..... 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

# 组配改良剂对污染稻田中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 钝化效果持续性比较

吴玉俊, 周航, 杨文弢, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒\*

(中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004)

**摘要:** 为研究组配改良剂碳酸钙 + 海泡石 (LS) 对稻田土壤重金属 Pb、Cd、Cu、Zn 钝化效果的持久性, 通过一次性施用 0、2、4、8 g·kg<sup>-1</sup> 的 LS, 并分别于 2012 年 (第一季)、2013 年 (第二季) 和 2014 年 (第三季) 连续种植水稻, 在湘南某矿区附近污染稻田进行了一个 3 a 的大田修复试验. 结果表明: ①LS 能显著提高第三季土壤 pH 值, 且 LS 对土壤 pH 值提高效果为: 第一季 > 第二季 > 第三季. ②LS 能显著降低第三季水稻土壤中 Pb、Cd、Zn 的交换态含量, 且第三季水稻土壤中 Pb、Cd、Zn 的交换态含量分别降低 32.6% ~ 97.7%、8.3% ~ 71.4% 和 10.9% ~ 83.5%, 但对降低第三季土壤中 Cu 的交换态含量无显著影响; LS 降低第三季土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn 交换态含量的效果均为: Pb > Zn > Cd > Cu. ③LS 使第三季水稻糙米中 Pb 和 Cd 含量分别降低 26.7% ~ 66.7%、59.1% ~ 80.3%, 这种降低效果均随着改良剂 LS 添加量的增加而增大, 但对糙米中 Cu 和 Zn 含量无明显影响. LS 降低糙米中 Pb、Cd、Cu、Zn 含量的效果为: 第一季, Pb > Cd > Cu > Zn; 第二季, Pb > Cd > Cu > Zn; 第三季, Cd > Pb > Zn > Cu. LS 降低第三季水稻糙米中重金属含量的整体效果为 Pb > Cd > Cu > Zn. ④随着时间的延长, LS 对土壤中 Pb 和 Cd 具有更稳定的钝化效果. 因此, LS 对治理 Pb 和 Cd 污染的土壤具有良好的持久性.

**关键词:** 稻田土壤; 组配改良剂; 重金属; 持续性修复; 水稻

中图分类号: X171; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2791-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.048

## Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil

WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, ZOU Zi-jin, ZHU Wei, GU Jiao-feng, PENG Pei-qin, ZHANG Ping, ZENG Min, LIAO Bo-han\*

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

**Abstract:** A three-year in-situ experiment was conducted in a paddy soil near a mining area in southern Hunan in order to study the persistence of combined amendment of limestone + sepiolite (marked as LS) stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in polluted paddy soil. LS with ratios of 0, 2, 4, and 8 g·kg<sup>-1</sup> was applied once to the paddy soil, and rice was subsequently planted for three consecutive years of 2012 (first season), 2013 (second season), and 2014 (third season). The experimental results indicated that: ①LS significantly increased soil pH values for all three seasons, and the enhancement ranked as follows: first season > second season > third season. ②LS obviously decreased the exchangeable contents of soil Pb, Cd and Zn for all three seasons, and the decreasing magnitude of exchangeable contents of soil heavy metals was 32.6% - 97.7% for Pb, 8.3% - 71.4% for Cd, and 10.9% - 83.5% for Zn, respectively, in the third season; however, there was no significant decrease for Cu. The effects of LS decreasing exchangeable contents of soil heavy metals in three seasons followed the order of Pb > Zn > Cd > Cu. ③LS decreased contents of Pb and Cd in brown rice in the third season by 26.7% - 66.7% and 59.1% - 80.3%, respectively, and the reduction trend increased with increasing LS application. Cu and Zn contents in brown rice did not decrease effectively. The effect of LS reducing contents of Pb, Cd, Cu and Zn in brown rice followed the order of Pb > Cd > Cu > Zn for the first season and the second season, but Cd > Pb > Zn > Cu for the third season. For all three seasons, the total effect of LS reducing heavy metal contents in brown rice followed the order of Pb > Cd > Cu > Zn. ④The effect of LS stabilizing soil Pb and Cd emerged gradually with time. Therefore, LS was suitable for remedying soil polluted with Pb and Cd for a relatively long time because of its persistence.

**Key words:** paddy soil; combined amendment; heavy metal; remediation persistence; rice

矿山开采过程中产生大量废弃物(如尾矿、废石等), 由于含有较高的有毒重金属, 不仅大量占用土地并对堆置场原有生态系统造成破坏, 引起当地的自然条件发生变化<sup>[1]</sup>. 湖南省有着非常丰富的矿产资源, 矿业比较发达, 特别是有色金属、非金属矿产在全国占有十分重要的地位, 但是长期矿产资源

的开发利用导致了广泛的重金属污染环境<sup>[2]</sup>.

收稿日期: 2015-12-21; 修订日期: 2016-02-24

基金项目: 湖南省农业厅项目(湘农业联 2014-137-2); 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: 吴玉俊(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染与控制, E-mail: 897736522@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: liaobh1020@163.com

土壤重金属污染可导致土壤生产力下降,造成地下水污染和对农作物产生危害,直接或间接危害人类健康<sup>[3]</sup>. 近年来,重金属污染土壤的修复一直是国际上研究的难点和热点<sup>[4]</sup>. 土壤重金属修复技术主要包括物理修复、化学修复和生物修复这3类<sup>[5]</sup>,但每种修复方法都有其优缺点,并且大都针对土壤中某单一重金属污染,对于土壤中多种重金属并存的复合污染修复有一定的局限性<sup>[6,7]</sup>. 针对重金属复合污染的修复主要集中在化学钝化法<sup>[8]</sup>. 化学钝化作为一种原位修复技术,因其成本低廉、易于实施,近年来发展较快,对于重金属污染土壤,特别是对于轻中度污染,不失为一种适宜的方法<sup>[9~11]</sup>. 目前,对改良剂修复重金属污染土壤报道较多,但对改良剂在野外大田中修复多重金属复合污染土壤的效果及其比较不同重金属钝化效果持续性研究较少. 为比较组配改良剂碳酸钙+海泡石(LS)对稻田土壤重金属Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果的持久性,本

研究进行了一个为期3a的大田修复试验,通过一次性施加LS后连续3a种植水稻,观察稻田土壤理化性质的变化和水稻植株Pb、Cd、Cu和Zn的累积与分布,分析了LS各施加量下在复合污染稻田中不同重金属修复效果的持久性,以期为重金属污染农业土壤的治理提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

所选湘南某矿区由于多年的开采,致使附近农田土壤重金属污染日益严重. 2012年4月,在矿区(26°34.657'N,112°35.563'E)附近污染稻田进行组配改良剂化学原位修复试验. 组配改良剂LS为碳酸钙和海泡石(均由湖南省宁乡县道林镇尚杰矿石粉厂提供),LS组分与稻田(添加改良剂前)土壤基本理化性质如表1所示. 水稻品种选用黄华占(常规稻,湖南农丰种业有限公司).

表1 供试材料的基本性质

Table 1 Basic properties of the tested materials

试验材料	pH	有机质 /%	CEC /cmol·kg <sup>-1</sup>	Pb /mg·kg <sup>-1</sup>	Cd /mg·kg <sup>-1</sup>	Cu /mg·kg <sup>-1</sup>	Zn /mg·kg <sup>-1</sup>
矿区稻田土壤	5.39	3.66	19.93	256.68	3.03	43.85	349.44
国家Ⅱ级标准	—	—	—	250.00	0.30	50.00	200.00
海泡石	5.54	—	—	2.75	—	—	48.19
碳酸钙	9.13	—	—	1.63	—	—	7.76

### 1.2 试验方法

将碳酸钙和海泡石2种改良材料过100目筛后,再按照质量比为2:1均匀混合组配成改良剂(LS),在湘南某矿区附近的重金属污染稻田中施用. 分别设置4个LS添加量(0、2、4、8g·kg<sup>-1</sup>),面积均为9m<sup>2</sup>(3m×3m),重复3次. 矿区试验田共计12个样方,所有样方均随机排列,施用LS的土壤保持田间含水率直至插秧,连续种植水稻3季. 第一季、第二季、第三季水稻分别于2012年、2013年、2014年4月中旬进行催芽及育秧,5月初进行水稻的插秧移栽,每个样方四周设置3行水稻作为保护行,种植密度及管理均参照当地农业生产的实际情况.

2012年、2013年、2014年8月中旬水稻成熟. 在每个种植样方中采用对角线五点采样,在每个点连续采5株水稻植株,置于尼龙网袋中,同时采集相应的根际土壤样品. 水稻植株带回实验室后,分为3个部份(根、茎叶、谷粒)用自来水和蒸馏水洗净,晾干后放入烘箱,105℃杀青30min,然后在70℃

下烘干至恒重. 使用小型脱壳机将水稻谷粒脱壳,收集糙米;使用小型粉碎机粉碎,过100目尼龙筛,用塑料封口袋保存待测. 土壤采回后自然风干、磨碎后过10目和100目尼龙筛,保存待测.

### 1.3 样品分析测试方法

土壤pH值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,固液比为m(固):V(液)=1:2.5<sup>[12]</sup>. 重金属交换态含量通过Tessier连续提取法获得(提取剂为1.0mol·L<sup>-1</sup>MgCl<sub>2</sub>)<sup>[13]</sup>. 水稻各部位中重金属Pb和Cd用干灰化法消解(GB/T 5009-2003). 所有样品溶液中重金属用ICP-AES(ICP 6300,Thermo)进行测定. 所有样品分析过程中以国家标准物质土壤(GBW(E)-070009)和湖南大米GBW 10045(GSB-23)进行质量控制分析,同时全程做空白试验.

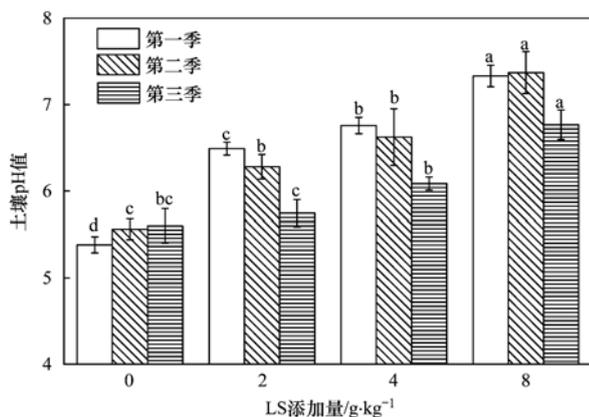
### 1.4 数据统计分析方法

试验数据结果均为平均值±标准偏差,所有数据采用显著性F测验和Duncan多重比较法(P<0.05和P<0.01)进行统计分析,应用Origin 8.5和SPSS 19.0进行处理.

## 2 结果与分析

### 2.1 组配改良剂对土壤 pH 值的影响

土壤 pH 值与土壤中重金属的赋存形态、吸附解吸、迁移转化以及生物有效性密切相关,是影响重金属污染土壤修复效果的一个重要因素<sup>[14]</sup>。由图 1 可知,施用 LS 对三季土壤 pH 值均有不同程度的增加,说明 LS 能有效提高土壤 pH 值且具有一定的持久性。与对照相比,施用 2~8 g·kg<sup>-1</sup> 的 LS 使第一、二、三季土壤 pH 值分别升高 1.11~1.95、0.5~1.81 和 0.11~1.17 个单位。以每季各处理添加量作差异性分析,第一季和第二季各处理土壤 pH 值与对照组之间均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ),而第三季各处理土壤仅在 LS 添加量为 8 g·kg<sup>-1</sup> 时 pH 值与对照组之间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。与第一、二季土壤相比,所有添加 LS 的土壤 pH 值在第三季有所回落,说明 LS 对第一、二季种植水稻土壤 pH 值增加效果好于第三季。



图中不同字母表示显著差异 ( $P < 0.05$ ), 且以每季各处理添加量之间作差异性分析,下同

图 1 组配改良剂 LS 对土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effects of combined amendment LS on soil pH values

### 2.2 组配改良剂对土壤中重金属交换态含量的影响

土壤中的重金属以不同形态存在,而植物吸收的不是土壤中重金属总量,而是生物有效态,这种形态的重金属影响其在土壤中迁移、转化,并对植物产生毒性<sup>[15]</sup>。重金属可交换态在总量中所占比例不大,但普遍认为可交换态重金属比较容易被植物吸收利用,是对植物产生污染的主要形态<sup>[16]</sup>。由图 2 可知,随着组配改良剂 LS 添加量的增加,三季水稻种植土壤中 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量都逐渐降低,但是第一季土壤 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量降低特别明显。与第一季相比,在相同 LS 添加量时,第二季和第三季土壤 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量有

所回升,而交换态 Cu 含量却有所下降。以每季各处理添加量分析,施用 LS 显著降低土壤 Pb、Cd 和 Zn 交换态含量,在第一季水稻种植土壤中,Pb、Cd 和 Zn 交换态含量与对照相比分别降低 97.6%~99.8%、88.3%~98.9% 和 87.2%~99.9%,而交换态 Cu 含量则上升 17.3%~162.4%,且各处理土壤中 Pb、Cd、Zn 和 Cu 的交换态含量与对照组相比均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ); 第二季水稻种植土壤中 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量比对照组分别降低 80.7%~97.7%、28.3%~88.0% 和 27.2%~89.3%,而 Cu 的交换态含量在 LS 大于 4 g·kg<sup>-1</sup> 时上升 14.9%~24.2%,各处理土壤中 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量与对照组相比差异明显 ( $P < 0.05$ ),但土壤 Cu 交换态含量只有在 LS 添加量为 2 g·kg<sup>-1</sup> 时才与对照组存在显著差异; 第三季水稻种植土壤中 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量比对照组分别降低 32.6%~97.7%、8.3%~71.4% 和 10.9%~83.5%,当 LS 添加量为 8 g·kg<sup>-1</sup> 时,土壤 Cu 交换态含量与对照组相比上升 190%,这时土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn 的交换态含量与对照组之间存在显著差异。显然,LS 能显著降低土壤中 Pb、Cd 和 Zn 的交换态含量,但对土壤中 Cu 的交换态含量无明显降低。通过每一季 LS 对土壤中重金属交换态含量降低幅度的分析可知,其三季降低效果均为: Pb > Zn > Cd,且这种降低效果随着 LS 添加量的增加而增大。

### 2.3 组配改良剂对水稻各部位中重金属含量的影响

由图 3 可知,组配改良剂 LS 对三季水稻根系、茎叶、谷壳、糙米中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量均有不同程度的影响。以每季各 LS 添加量分析,对于第一季水稻来说,随着 LS 添加量的增加,根系中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量与对照相比均有所下降,分别在 LS 添加量为 2、4、2 和 2 g·kg<sup>-1</sup> 时达到最低,其最大降低量分别为 27.3%、53.5%、45.1% 和 46.4%; 茎叶中 Cd、Cu 和 Zn 含量与对照组相比均有所降低,分别降低 62.2%~76.4%、7.5%~16.3% 和 50.5%~58.8%,而 Pb 含量与对照相比却有所上升; 谷壳中除 Cd 含量与对照相比有所下降外,谷壳中 Pb、Cu 和 Zn 含量与对照相比均有所上升,谷壳中 Cd 含量降低了 58.4%~68.6%; 糙米中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量与对照组相比分别降低 73.5%~81.2%、56.1%~66.8%、8.1%~14.8% 和 6.4%~10.9%,糙米中 Pb、Cd 和 Zn 含量与对照组均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

对于第二季水稻而言,LS 各处理仍能不同程度

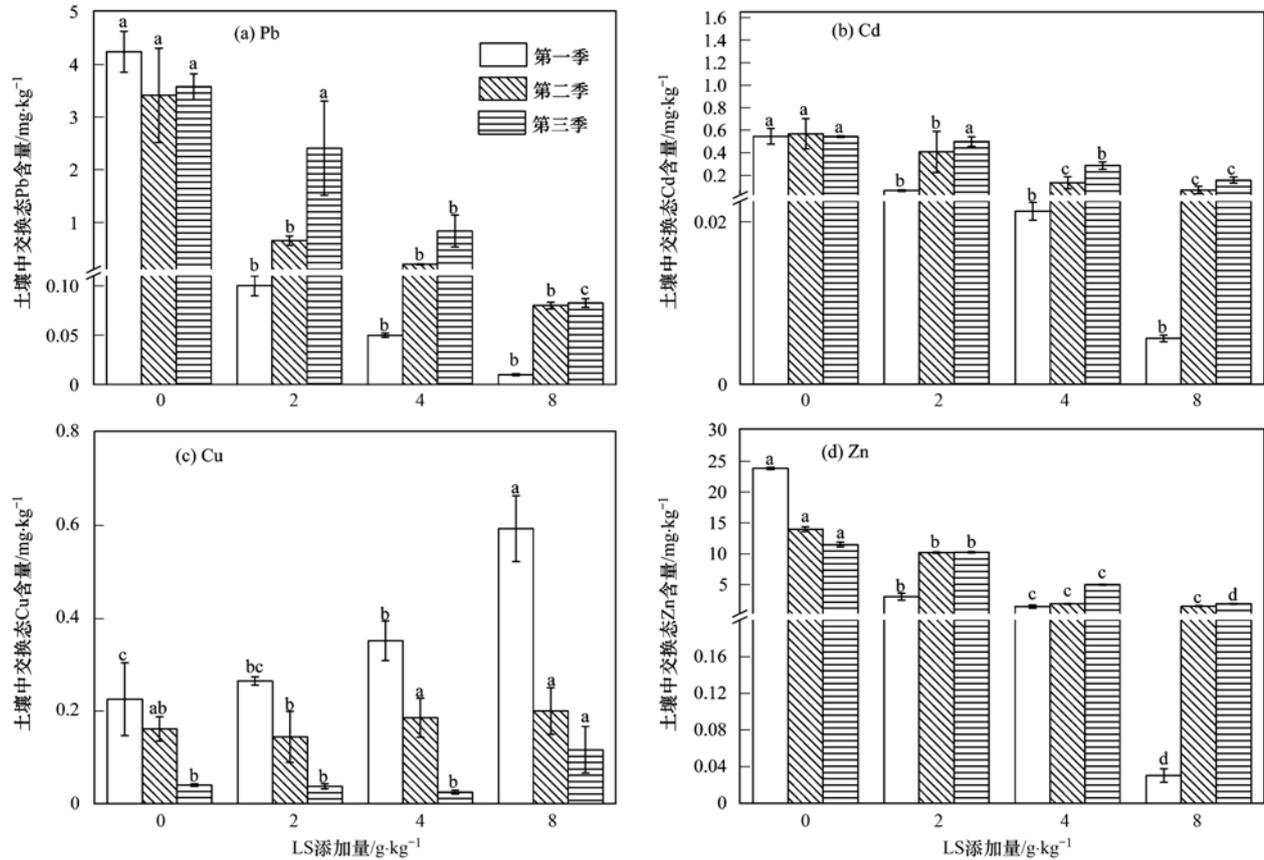


图2 组配改良剂LS对土壤中Pb、Cd、Cu和Zn交换态含量的影响

Fig. 2 Effects of combined amendment LS on exchangeable contents of soil Pb, Cd, Cu and Zn

地降低水稻各部位中重金属的含量。随着LS施用量的增加,根系中Pb、Cd、Cu和Zn含量与对照组相比均有下降,分别降低3.9%~35.2%、23.7%~75.9%、5.8%~41.9%和7.7%~51.4%;茎叶中仅Zn含量在LS各处理下与对照组相比均有所下降,降低了15.6%~42.7%,而Pb、Cd和Cu含量分别在LS添加量为2、8、2 g·kg<sup>-1</sup>时达到最低,分别比对照降低7.4%、63.3%、2.5%;谷壳中Pb、Cd、Cu和Zn含量与对照组相比均有所下降,分别降低7.9%~15.1%、24.4%~31.4%、10.6%~14.8%和3.7%~19.3%;糙米中Pb、Cd、Cu和Zn含量与对照组相比均有所下降,分别降低25.5%~78.9%、15.3%~48.1%、1.7%~29.2%和4.1%~11.4%,且Pb和Cd含量与对照组相比存在显著差异( $P < 0.05$ ),但Cu、Zn含量与对照组相比不存在显著差异。

对于第三季水稻来说,随着LS施用量的增加,根系中Pb、Cd、Cu和Zn含量在LS添加量分别为8、4、8、4 g·kg<sup>-1</sup>时最低,与对照组相比分别降低46.9%、38.4%、23.7%和48.2%;茎叶中Pb和Zn含量在LS添加量分别为2 g·kg<sup>-1</sup>、8 g·kg<sup>-1</sup>时

才低于对照,与对照组相比降低了31.9%、39.6%;谷壳中Pb、Cd、Zn含量分别在LS添加量为4、8和4 g·kg<sup>-1</sup>时达到最低,降低幅度分别为7.7%、63.1%和22.7%;糙米中Pb和Cd含量与对照组相比均有所下降,降低了26.7%~66.7%、59.1%~80.3%,而糙米中Cu和Zn含量在LS添加量分别为2 g·kg<sup>-1</sup>、4 g·kg<sup>-1</sup>时达到最低,最大降低量分别为1.0%和7.2%,糙米中Pb含量在LS添加量大于2 g·kg<sup>-1</sup>时与对照组之间存在显著差异,而Cd含量在各处理之间都存在显著差异( $P < 0.05$ )。

从每一季LS对糙米中Pb、Cd、Cu和Zn含量降低范围分析可知,降低糙米中重金属含量的效果为:第一季,Pb > Cd > Cu > Zn;第二季,Pb > Cd > Cu > Zn;第三季,Cd > Pb > Zn > Cu。与第一季LS各处理下水稻糙米中Pb、Cd、Cu和Zn含量下降率相比,LS各处理下第二季水稻糙米中Pb、Cd、Cu和Zn含量下降率分别降低了2.8%~65.3%、28.0%~72.7%、(-97.3%)~79.0%和(-4.6%)~35.9%(括号里负值表示升高);LS各处理下第三季水稻糙米中Pb、Cu和Zn含量下降率分别降低了17.9%~63.7%、93.2%~99.9%和

33.9% ~ 86.2% ,而糙米中 Cd 含量下降率却增加了 5.3% ~ 20.2% . 所以 LS 降低三季水稻糙米中重金属含量的整体效果为 Pb > Cd > Cu > Zn ; 但 LS 降低糙米中 Pb 和 Zn 含量效果为第一季 > 第二季 > 第三季,降低糙米中 Cd 含量效果为第三季 > 第一季 > 第二季,降低糙米中 Cu 含量效果为第二季 > 第一

季 > 第三季.

### 2.4 组配改良剂添加量和土壤重金属交换态含量对糙米中重金属含量的影响

由图 4 可知,组配改良剂 LS 添加量和土壤重金属交换态含量对糙米中重金属含量有着不同程度的影响. 通过 SPSS 分析软件,对 LS 添加量(自变量)

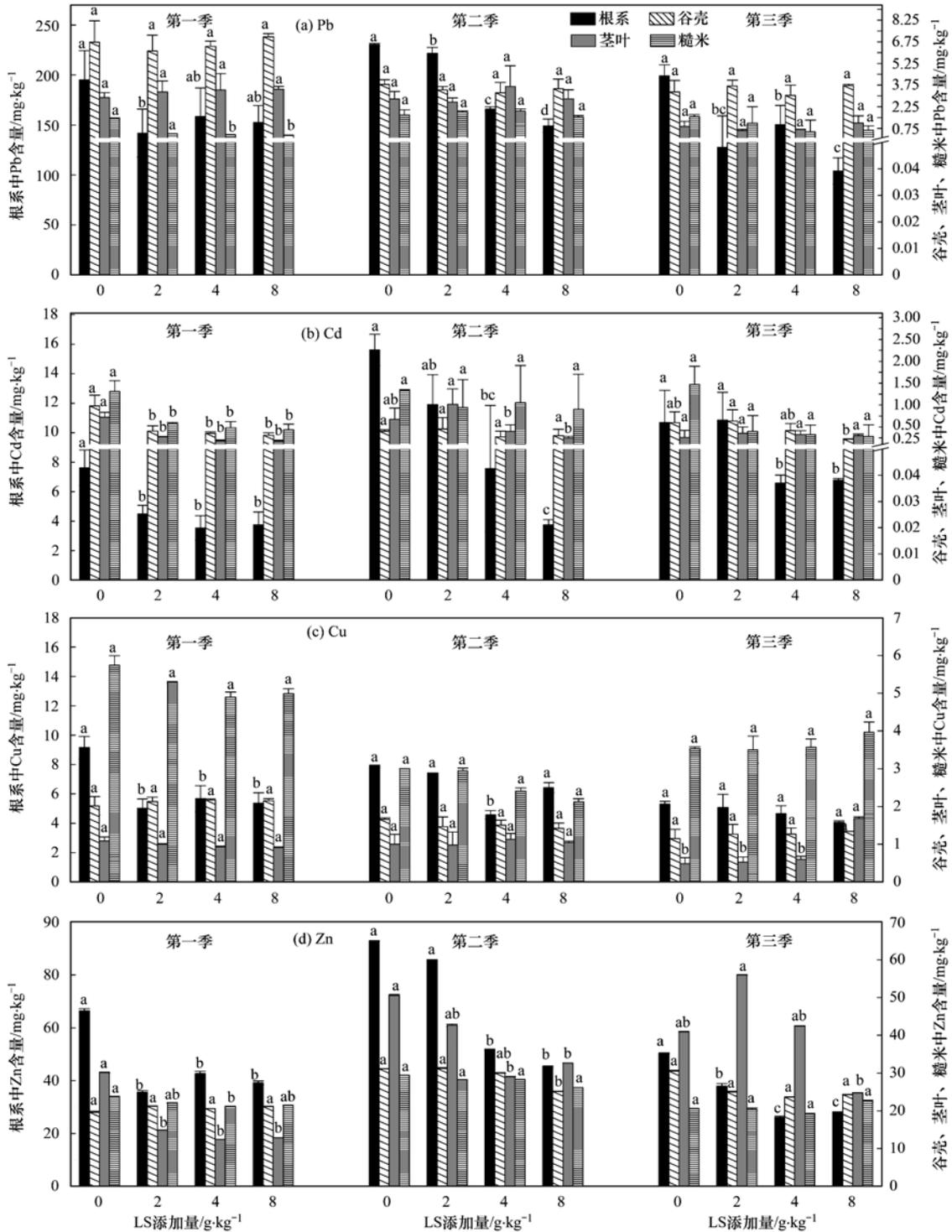


图 3 组配改良剂 LS 对水稻各部位中 Pb、Cd、Cu 和 Zn 含量的影响

Fig. 3 Effects of combined amendment LS on contents of Pb, Cd, Cu and Zn in different rice organs

和土壤重金属交换态含量(自变量)以及糙米中重金属含量(因变量)应用多元逐步回归分析,得到二元一次方程。

LS添加量( $x_2$ )、土壤Pb交换态含量( $x_1$ )、糙米中Pb含量( $y$ )三者之间关系为: $y = 0.760 + 0.178x_1 - 0.053x_2$ 。  $F$ 和 $t$ 的Sig.值均小于0.05,通过 $F$ 显著性检验和 $t$ 检验,表明该模型显著回归,方程具有统计学意义,各自变量分别对因变量具有显著影响效果。该模型 $R^2 = 0.749$ ,说明该模型能解释74.9%的因变量对自变量的影响。土壤交换态Pb含量 $x_1$ 的系数比LS添加量 $x_2$ 的系数大,说明土壤交换态Pb含量对糙米中Pb含量的影响更大。

LS添加量( $x_2$ )、土壤交换态Cd含量( $x_1$ )、糙米中Cd含量( $y$ )三者之间关系为: $y = 0.959 + 0.276x_1 - 0.077x_2$ 。  $F$ 和 $t$ 的Sig.值均小于0.05,表

明该模型显著回归,方程具有统计学意义,各自变量分别对因变量也呈显著性影响。该模型 $R^2 = 0.575$ ,说明该模型能解释57.5%的因变量对自变量的影响。土壤交换态Cd含量 $x_1$ 的系数比LS添加量 $x_2$ 的系数大,说明土壤交换态Cd含量相比于LS添加量对糙米中Cd含量影响更大。

LS添加量( $x_2$ )、交换态Cu含量( $x_1$ )、糙米中Cu含量( $y$ )三者之间的关系为: $y = 3.438 + 4.853x_1 - 0.155x_2$ 。  $F$ 和 $t$ 的Sig.值均小于0.05,该模型显著回归,各自变量分别对因变量也呈显著性影响。但是该模型 $R^2 = 0.270$ ,说明该模型只能解释27.0%的因变量对自变量的影响,表明该模型预测性意义不大。LS添加量( $x_2$ )、交换态Zn含量( $x_1$ )、糙米中Zn含量( $y$ )三者之间的二元一次方程模型不显著回归,方程不具有统计学意义。

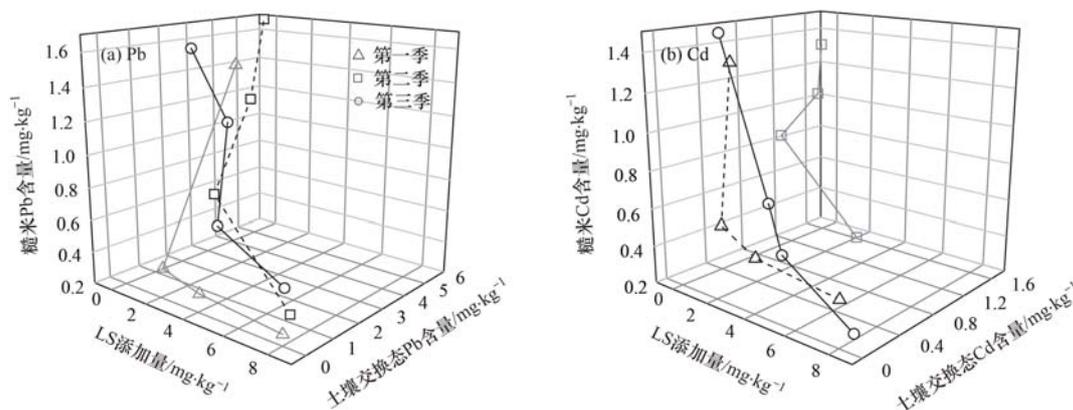


图4 组配改良剂LS添加量和土壤重金属交换态含量共同对糙米中重金属含量的影响

Fig. 4 Effects of combined amendment LS application and exchangeable contents of soil heavy metals on contents of heavy metals in brown rice

### 3 讨论

本研究进行了一个为期3a的重金属污染稻田修复试验,通过一次性施加组配改良剂LS后连续3a种植水稻试验,探讨了LS对稻田土壤重金属生物有效性变化以及LS施用对重金属在水稻各器官间分布和迁移转运的影响。LS对三季水稻土壤pH值均有升高作用,且LS提高土壤pH值效果为第一季>第二季>第三季,说明LS对提高土壤pH值具有长期性。但是随着时间的延长,LS提高土壤pH值的持续性逐渐下降,这与徐明岗等研究结果一致<sup>[17]</sup>,但其所采用实验室盆栽试验与本试验采取野外稻田小区试验不同。LS对土壤中Pb、Cd和Zn的生物有效性均有良好的稳定化效果,这与曾卉等研究结果一致<sup>[18]</sup>,所以LS是理想的土壤改良剂。但LS对Pb的降低效果最好,Zn次之,然后是Cd,对

Cu无降低效果。一些研究表明,施用改良剂后土壤pH值有显著升高,一方面使土壤胶体表面负电荷增加,对重金属离子的吸附能力增强<sup>[19,20]</sup>;另一方面可以使土壤中的Fe、Mn等离子形成羟基化合物,提供更多的重金属吸附位点<sup>[19]</sup>。海泡石具有较大比表面积,增加了土壤胶体的吸附性能,其层状结构单元之间含有大量可交换的阳离子(Ca、Mg、Si)<sup>[21,22]</sup>。石灰和海泡石可以升高土壤pH值,使土壤溶液中 $\text{OH}^-$ 增加,与重金属形成氢氧化物沉淀<sup>[23,24]</sup>。本研究中土壤Cu交换态含量与对照相比略有上升,这与Mesquita等<sup>[25]</sup>的研究不一致,这是因为Cu在 $\text{OH}^-$ 较多的条件下与 $\text{OH}^-$ 络合形成了 $\text{Cu}(\text{OH})_3^-$ ,溶解度反而增大,迁移性增强<sup>[26]</sup>。

从图3可以看出,LS的施用对三季水稻根系、茎叶、谷壳和糙米中Pb、Cd、Cu和Zn含量产生不同的影响。试验表明,LS施用后,LS降低三季水稻

糙米中重金属含量的总效果为:  $Pb > Cd > Cu > Zn$ 。显然 LS 对三季糙米中 Pb 和 Cd 含量降低效果强于糙米中 Cu 和 Zn 含量, 但均没有达到国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中大米 Pb 和 Cd 的限量( $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 这可能与土壤背景值较高有关(表 1), 因此该组配改良剂最好应用于中度或者轻度重金属污染土壤。LS 能够降低三季糙米中 Cu 和 Zn 含量, 但差异性不显著。其原因主要可能是, Cu、Zn 虽然是重金属元素, 但是它们是水稻生长所必须的微量营养元素, 即使在 LS 对土壤中 Cu、Zn 生物有效性降低的情况下, 水稻植株还是会根据生长需要主动地吸收累积这 2 种元素<sup>[27]</sup>。土壤交换态 Pb 和 Cd 含量、LS 添加量与糙米中 Pb 和 Cd 含量三者之间的模型均显著回归, 且土壤交换态 Pb 和 Cd 含量的系数均比 LS 添加量的系数大, 而且为正值, 说明土壤交换态 Pb 和 Cd 含量对糙米中 Pb 和 Cd 含量的影响更大, 与糙米中 Pb 和 Cd 含量成正比关系, 这也说明了土壤 Pb、Cd 的交换态含量能在一定程度上反映土壤中 Pb、Cd 的生物有效性。

LS 降低三季土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn 的交换态含量效果均为:  $Pb > Zn > Cd > Cu$ , 这说明随着时间的延长, LS 对土壤重金属 Pb、Zn、Cd 始终具有良好的钝化效果。LS 降低糙米中 Pb、Cd、Cu、Zn 含量总效果为:  $Pb > Cd > Cu > Zn$ , 结合国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中对大米 Pb 和 Cd 的限量( $0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )要求, 而对大米中 Cu 和 Zn 含量没有要求, 所以 LS 更适宜用于 Pb、Cd 复合污染土壤的改良, 且具有良好的土壤修复持久性。

#### 4 结论

(1) LS 能显著提高三季水稻土壤 pH 值, 对土壤 pH 值提高的效果为第一季 > 第二季 > 第三季。

(2) LS 能显著降低三季水稻土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量。与对照组相比, 第三季水稻土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量分别降低 32.6% ~ 97.7%、8.3% ~ 71.4%、10.9% ~ 83.5%, 但对降低三季土壤中 Cu 的交换态含量无显著影响。试验条件下, LS 降低三季土壤中 Pb、Cd、Cu、Zn 交换态含量效果均为:  $Pb > Zn > Cd$ 。

(3) LS 使第三季水稻糙米中 Pb 和 Cd 含量分别降低 26.7% ~ 66.7%、59.1% ~ 80.3%, 且这种降低效果均随着改良剂 LS 添加量的增加而增大; LS 对糙米中 Cu 和 Zn 含量无显著降低。LS 降低糙米中 Pb、Cd、Cu、Zn 含量的效果为: 第一季,  $Pb >$

$Cd > Cu > Zn$ ; 第二季,  $Pb > Cd > Cu > Zn$ ; 第三季,  $Cd > Pb > Zn > Cu$ 。LS 降低三季水稻糙米中重金属含量的整体效果为  $Pb > Cd > Cu > Zn$ 。

(4) 随着时间的延长, LS 对土壤中 Pb 和 Cd 具有较为稳定的钝化效果。因此, LS 对治理 Pb 和 Cd 污染的土壤具有良好的持久性。

#### 参考文献:

- [1] 李江遐, 张军, 谷勋刚, 等. 尾矿区土壤重金属污染对土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2010, **41**(6): 1476-1478.
- [2] 夏文斌. 选矿尾砂重金属污染化学修复技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.
- [3] 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.
- [4] Sjursen H, Michelsen A, Holmstrup M. Effects of freeze-thaw cycles on microarthropods and nutrient availability in a sub-arctic soil[J]. Applied Soil Ecology, 2005, **28**(1): 79-93.
- [5] Guo G L, Zhou Q X, Ma L Q. Availability and assessment of fixing additives for the in situ remediation of heavy metal contaminated soils: a review[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, **116**(1-3): 513-528.
- [6] 王晓蓉, 郭红岩, 林仁漳, 等. 污染土壤修复中应关注的几个问题[J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(2): 277-280.
- [7] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究的现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, **13**(6): 757-762.
- [8] 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.
- [9] Mulligan C N, Yong R N, Gibbs B F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation[J]. Engineering Geology, 2001, **60**(1-4): 193-207.
- [10] Diels L, van der Lelie N, Bastiaens L. New developments in treatment of heavy metal contaminated soils [J]. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 2002, **1**(1): 75-82.
- [11] Madrid F, Romero A S, Madrid L, et al. Reduction of availability of trace metals in urban soils using inorganic amendments [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, **28**(4): 365-373.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. 30-35.
- [13] 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.
- [14] 赵述华, 陈志良, 张太平, 等. 重金属污染土壤的固化/稳定化处理技术研究进展[J]. 土壤通报, 2013, **44**(6): 1531-1536.
- [15] 李丽君, 刘平, 白光洁, 等. 海泡石改良土壤效果研究[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(2): 275-278, 283.
- [16] 王亚平, 裴韬, 成杭新, 等. B 城近郊土壤柱状剖面中重金属元素分布特征研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, **22**(2): 144-148.

- [17] 徐明岗, 张青, 王伯仁, 等. 改良剂对重金属污染红壤的修复效果及评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, **15**(1): 121-126.
- [18] 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.
- [19] Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, *et al.* Sorption and desorption of cadmium from some New Zealand soils: effect of pH and contact time[J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, **36**(2): 199-216.
- [20] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 209-212.
- [21] 孙约兵, 徐应明, 史新, 等. 海泡石对镉污染红壤的钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(6): 1465-1472.
- [22] 徐应明, 梁学峰, 孙国红, 等. 酸和热处理对海泡石结构及吸附  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  性能的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(6): 1560-1567.
- [23] 谢伟强, 李小明, 陈灿, 等. 土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4609-4614.
- [24] 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.
- [25] Mesquita M E, Carranca C, Menino M R. Influence of pH on copper-zinc competitive adsorption by a sandy soil [J]. Environmental Technology, 2002, **23**(9): 1043-1050.
- [26] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace elements in soils and plants (2nd ed.) [M]. Boca Ratón, Florida: CRC Press, 1992.
- [27] 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.

## CONTENTS

Concentration Characteristics of PM <sub>2.5</sub> in Beijing During Two Red Alert Periods .....	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM <sub>2.5</sub> Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing .....	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City .....	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM <sub>2.5</sub> from the Northern Suburb of Nanjing in Winter .....	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea .....	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang .....	YANG Chun, Tashpolat Tiyip, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing .....	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors .....	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing .....	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO <sub>2</sub> Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra .....	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China .....	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing .....	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period .....	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River .....	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River .....	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin .....	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms .....	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes .....	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands .....	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine .....	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation .....	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes .....	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode .....	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process .....	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation .....	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process .....	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water .....	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing .....	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter .....	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation .....	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics .....	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX <sub>2</sub> from Sea Water .....	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater .....	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges .....	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA) .....	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions .....	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N <sub>2</sub> O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir .....	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N <sub>2</sub> O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments .....	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter .....	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau .....	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China .....	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir .....	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil .....	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil .....	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism .....	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of $\gamma$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH <sub>3</sub> .....	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

# 《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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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