

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

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

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究	颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)
利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征	赵仕伟, 高晓清 (2637)
秋冬季节华北背景地区 PM ₁ 污染特征及来源	张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)
杭州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献	吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)
青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布	谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)
西安市重污染与清洁天 PM _{2.5} 组分及其活性氧物质对比	王堃, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)
黄山 PM ₁₀ 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源	孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)
泉州市大气 PM _{2.5} 铜系元素组成特征及来源解析	张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)
西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价	许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)
G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析	张璘, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)
四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征	冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)
长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单	鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晨荣, 陶士康, 李莉 (2738)
我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定	张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)
地下水污染风险评价中污染源荷载量化方法的对比分析	赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)
胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析	张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)
桂江流域夏季水-气界面 CO ₂ 脱气的空间变化及其影响因素	张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)
都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险	宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)
太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险	陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)
洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异	李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)
阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征	孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雪, 兰晨, 王箫 (2810)
北京市水环境中精神活性物质污染特征	张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)
降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响	陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)
CaO ₂ 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用	徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)
坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征	鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)
微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果	陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)
氧化镁基生物炭高效去除水体中磷的特性	王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)
Pd/Fe ⁰ 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺	张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)
针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响	孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)
污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律	韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)
微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水	孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)
水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用	苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)
沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻	蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)
K ⁺ 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能	吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)
包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行	于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)
ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布	李惠娟, 彭聪聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)
厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体	李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)
基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理	林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)
基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成	沈庆然, 李田, 曹熠, 潘奥 (2953)
罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响	高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)
不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水	周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)
CO ₂ -咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征	王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)
油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应	田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)
模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响	腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)
秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素	杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)
微生物对汞矿区农田土壤汞甲基化的影响	贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)
施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响	方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小斌 (3028)
BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用	刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)
1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比	李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)
铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征	朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)
膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用	周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)
餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比	郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)
我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异	晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)
甲烷催化还原 NO _x 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化	潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焱, 贺亚飞 (3085)
《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)	

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响

方至萍^{1,2}, 廖敏^{1,2*}, 张楠^{1,2}, 吕婷^{1,2}, 黄小辉^{1,2}

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江省亚热带土壤与植物营养重点实验室, 杭州 310058)

摘要: 以浙江省绍兴市某铅(Pb)、镉(Cd)复合重污染地区土壤(全Pb含量为2 028.22 mg·kg⁻¹, 全Cd含量为2.36 mg·kg⁻¹)及具有低Pb、Cd积累特性的浙江省典型晚粳稻品种嘉33为对象,通过土培盆栽试验,研究了海泡石的施用对铅、镉复合污染土壤中有效态Pb、Cd的含量以及水稻植株对Pb、Cd的吸收和分配关系的影响。结果表明:供试土壤中有效态Pb、Cd的含量与添加的海泡石量呈显著负相关,其相关系数分别为-0.940、-0.952,均达到显著水平($P < 0.01$)。随着海泡石添加量的增加,水稻根、茎、叶和精米中Pb、Cd的含量有不同程度地降低,水稻根、茎、叶及精米对Pb、Cd的富集系数显著下降,同时茎对根系吸收的Pb、Cd以及精米对茎中Pb、Cd的转运系数也显著下降。当海泡石的添加量为9.00 g·kg⁻¹土时,嘉33精米中的Pb、Cd含量分别为(0.14 ± 0.02) mg·kg⁻¹、(0.03 ± 0.01) mg·kg⁻¹,均低于国家的限量指标(GB 2762-2012);相比于对照组而言,水稻根、茎、叶及精米对Pb的富集系数分别下降了8.83%、29.96%、49.20%、79.41%,对Cd的富集系数分别下降了23.08%、63.22%、44.00%、82.35%;另外,茎对根吸收的Pb、Cd的转运系数分别下降了23.18%、52.19%,精米对茎转运的Pb、Cd的转运系数分别下降了70.83%、52.00%,意味着在铅、镉复合重污染土壤上,海泡石同时对重金属Pb、Cd在土壤-水稻系统的迁移与再分配具有较好的阻控作用,合理施用海泡石与低重金属积累品种相结合可以实现污染浓度相对较高的重金属Pb、Cd复合污染土壤的农业安全利用。

关键词: 水稻;海泡石;有效态Pb、Cd;吸收;分配

中图分类号: X171; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-3028-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612254

Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination

FANG Zhi-ping^{1,2}, LIAO Min^{1,2*}, ZHANG Nan^{1,2}, LÜ Ting^{1,2}, HUANG Xiao-hui^{1,2}

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Subtropical Soil and Plant Nutrition, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to research the coordination relation between sepiolite application and the contents of available lead (Pb) and cadmium (Cd) in soil or rice absorption and redistribution of Pb and Cd, a pot experiment was conducted by selecting the soil sampled from a area polluted by Pb and Cd combination in Shaoxing City of Zhejiang Province and atypical late Japonica Rice Varieties in Zhejiang Province (Jia 33) with lower accumulation for Pb, Cd. The results showed that: the contents of available Pb and Cd in soil were significantly negatively correlated with the concentration of sepiolite added, the correlation coefficients of contents of available Pb and Cd with the concentration of sepiolite added were -0.940 respectively and -0.952, which reached the significant level ($P < 0.01$). The contents of Pb and Cd in rice roots, stems, leaves and polished rice had different reducing rates with the increase of the concentration of sepiolite. In addition, with the increase of the concentration of sepiolite added, the enrichment coefficients of Pb and Cd in rice roots, stems, leaves and polished rice decreased dramatically. At the same time, Pb and Cd absorbed by roots transferred to the stems decreasingly, Pb and Cd absorbed by stems transferred to the polished rice decreasingly. When the addition of Sepiolite was 9.00 g·kg⁻¹ soil, the contents of Pb and Cd in polished rice of Jia 33 were (0.14 ± 0.02) mg·kg⁻¹ and (0.03 ± 0.01) mg·kg⁻¹ respectively, which were all lower than the national limit index (GB 2762-2012). Compared with the control group, the enrichment coefficients of Pb in roots, stems and leaves and polished rice decreased by 8.83%, 29.96%, 49.20%, 79.41% respectively, and the enrichment coefficients of Cd decreased by 23.08%, 63.22%, 44.00%, 82.35% respectively. In addition, the transportation coefficients of Pb and Cd absorbed by roots transfer to the stems were decreased by 23.18% and 52.19% respectively and the transportation coefficients of stem rice translocation of Pb and Cd absorbed by stems transfer to the polished rice were decreased by 70.83%, 52.00%, respectively. This result means the sepiolite had a good resistance control in the migration and redistribution of Pb and Cd in soil rice system on the soil polluted by lead and cadmium, indicating the combination of rational application of sepiolite and rice varieties with lower accumulation for heavy metals can achieve safe agricultural utilization of the soil with combined contamination

收稿日期: 2016-12-29; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201203045); 国家自然科学基金项目(41371312)

作者简介: 方至萍(1993~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤环境化学, E-mail: fangzhiping@zju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: liaomin@zju.edu.cn

by a relatively higher concentration of Pb and Cd.

Key words: rice; sepiolite; available Pb and Cd; absorption; distribution

随着工业化和城市化进程的加快,大量的重金属进入人类赖以生存和发展的土壤与生物圈,从而导致了大量的农业用地被重金属污染. 这样一来不仅影响农产品的品质与产量,而且重金属还可以通过食物链传递,危害人类健康^[1]. 早在 2002 年,农业部稻米及食品质量监督检验测试中心(杭州)对生产基地及市场上的稻谷、大米样品进行相关的监测分析,结果显示:稻谷样品达标比例仅为 57.4%,大米样品达标率为 79.3%,超标污染物主要是铅、镉及砷^[2]. 重金属铅(Pb)、镉(Cd)是我国农用耕地土壤污染的主要无机污染物. 据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》指出,土壤点位超标率为 19.4%,无机污染物铅和镉的点位超标率分别为 1.5% 和 7.0%^[3].

由于传统的土壤修复方法(如:换土法、热处理、电处理、淋溶冲洗等)成本高,不利于生产中的大规模推广应用,所以在现阶段土壤铅镉污染没有大幅度减轻的情况下,通过添加各种钝化剂或改良剂的原位固定成为了修复重金属污染土壤的一种替代方案并且在生产中被推广利用,例如王林等通过设计田间试验证明了添加原位阻控剂能明显地降低糙米中的 Cd 和 Pb 的含量^[4]. 据报道,杨明平等及罗道成等通过设计相关试验研究了海泡石对重金属 VI、Hg、Pb、Cd 的净化吸附效果,结果显示,改性海泡石对重金属的处理效果很理想^[5,6]. 另外,有研究表明,海泡石可以明显降低土壤中可提取态以及水溶性 Cd、Pb 含量,促进污染土壤中的 Cd、Pb 由活性高的交换态向活性低的残渣态转化,从而显著降低 Cd、Pb 的生物有效性和迁移能力^[7,8]. 这为建立利用钝化原位控制技术实现重金属污染农田的安全利用提供了思路. 浙江省绍兴市的某废弃的铅锌开采区,由于矿区尾矿中的 Cd、Pb 等重金属元素经长期的淋溶和地表径流的输出迁移,已在开采区下游稻田种植区形成近 3 000 亩的 Cd、Pb 复合污染农田,严重威胁着稻米的安全输出和区域百姓身体健康. 因此,寻找投入相对少,并可保障该区域稻田稻米的安全输出的调控技术,实现农田的安全利用是一迫切需要解决的课题.

因此,以本课题组筛选的低积累水稻品种嘉 33(晚粳稻品种)为对象^[9],探讨钝化材料海泡石对上述铅锌开采区下游 Pb、Cd 复合重污染稻田土壤中

有效态 Pb、Cd 含量的影响以及对水稻嘉 33 植株吸收和分配 Pb、Cd 的影响,探讨水稻嘉 33 各器官的 Pb、Cd 积累与海泡石施用量间的关系,以期形成低积累水稻品种与钝化材料相结合的、可用于保障铅、镉复合污染地区粮食安全输出技术提供基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤:土壤样品采自于浙江省绍兴市上虞区东关镇担山村某铅镉污染农田. 土壤 pH 值为 6.39,有机质含量为 $7.57 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $903.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $44.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $193.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,微生物量碳含量为 $40.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 Pb 含量为 $2\,028.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 Cd 含量为 $2.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

供试水稻品种:浙江嘉兴市农科院用常规杂交方法选育的晚粳稻品种嘉 33(原代号嘉 04-33),经本课题组研究其对 Pb、Cd 吸收较少,属于低 Pb、Cd 累积品种^[9].

供试海泡石:购自兴磊海泡石有限公司,其中 SiO₂ 质量分数为 52%~65%,MgO 质量分数为 15%~25%,水分 <10%,pH 为 8~8.5,过 100 目筛.

1.2 试验设计

试验设计一组空白对照及 5 个海泡石施用量的梯度处理,即 0、0.90、2.70、4.50、6.30、9.00 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,标记为 CK、H₁、H₂、H₃、H₄、H₅. 每组处理重复 3 次. 试验用桶规格为 90 cm² × 30 cm,每盆装土 5 kg,添加 2 g 尿素、2 g 磷酸二氢钾作为基肥并添加阻控剂海泡石,放置两周后移栽 21 d 苗龄的嘉 33 水稻幼苗(每盆定植 4 丛,每丛 2 株),于浙江大学紫金港校区网室内(网室为玻璃屋顶,四面通风结构,除雨水外,其温度、湿度及光照时长均与自然环境相一致),并按照水稻生长需水规律按时灌溉自来水.

1.3 样品的采集与测定

水稻即将成熟时,分批采集整株水稻(含根、茎、叶、谷粒)、水稻土样品,并做好相关标记. 水稻土经自然风干后,磨细过 3.2 mm 筛,用 HCl-HNO₃-HClO₄ 湿消解-石墨炉原子吸收光谱法测土壤全量 Pb、Cd^[10]以及 DTPA-原子吸收分光光度法测土壤有效态 Pb、Cd^[11]. 水稻植株按照根、茎、叶、

谷粒分离,分别粉碎,谷粒要经过砻谷机脱壳烘干后再经过碾米机碾磨得到精米,最后粉碎,过 100 目筛备用. 用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 消解-石墨炉原子吸收光谱法测水稻各器官中重金属 Pb、Cd 含量,用 DCB-原子吸收分光光度法测定根表铁膜量^[12,13].

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 IBM SPSS Statistics 20 统计分析软件对数据进行统计,用 LSD 法进行比较.

2 结果与分析

2.1 海泡石施用对土壤有效态 Pb、Cd 含量的影响

2.1.1 海泡石施用对土壤有效态 Pb 含量的影响

表 1 是海泡石施用对土壤有效态 Pb 含量的影响. 从中可知,对照组土壤中有有效态 Pb 的含量为 $(497.48 \pm 30.09) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而当海泡石的施用量为 $9.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时,土壤中有有效态 Pb 的含量降为 $(216.41 \pm 16.37) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相比于对照组供试土壤中有有效态 Pb 含量降低 56.50%. 说明施用海泡石能显著降低供试土壤中有有效态 Pb 的含量,且在试验所设计的海泡石施用量范围内,土壤的有效态 Pb 含量与海泡石施用量呈显著负相关,相关系数为 -0.940 ($P < 0.01$),意味着随着海泡石施用量的增加,土壤的有效态 Pb 含量将快速降低. 王林等^[7]通过盆栽试验研究不同阻控剂对土壤中重金属 Pb 的钝化修复效果,结果显示添加海泡石可以使土壤 TCLP 提取态 Pb 含量显著降低. 可见,海泡石的施用能有效钝化土壤中的重金属 Pb,降低土壤中有有效态 Pb 含量,意味着土壤中可向水稻植株迁移的铅量将有效减少.

表 1 海泡石施用对供试土壤有效态 Pb 含量的影响

Table 1 Effect of Sepiolite on the content of available Pb in the selected soil

处理水平及水稻品种	有效态 Pb 含量 ¹⁾ / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	降幅/%
CK-嘉 33	$497.48 \pm 30.09\text{a}$	—
H ₁ -嘉 33	$460.94 \pm 21.38\text{b}$	7.35
H ₂ -嘉 33	$409.82 \pm 18.16\text{c}$	17.62
H ₃ -嘉 33	$325.13 \pm 41.29\text{d}$	34.65
H ₄ -嘉 33	$233.78 \pm 32.01\text{e}$	53.01
H ₅ -嘉 33	$216.41 \pm 16.37\text{e}$	56.50

1) 平均值 $\pm$ 标准误差, $n=3$, 同列不同字母表示 LSD 检验多重比较处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同

2.1.2 海泡石施用对土壤有效态 Cd 含量的影响

表 2 是海泡石施用对土壤有效态 Cd 含量的影响. 从中可知,对照组土壤中有有效态 Cd 的含量为 $(0.404 \pm 0.010) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;而当海泡石的施用量为

$9.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土时,土壤中有有效态 Pb 的含量降为 $(0.318 \pm 0.024) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,供试土壤中有有效态 Cd 含量相比于对照组降低 21.29%. 即施用海泡石能够明显降低供试土壤中有有效态 Cd 的含量,而且在试验所设计的海泡石施用量范围内,土壤的有效态 Cd 的含量与海泡石施用量呈显著负相关,相关系数为 -0.952 ($P < 0.01$). 可见,海泡石能有效钝化土壤中的重金属 Cd,降低土壤中有有效态 Cd 含量,从而减少镉向水稻的迁移.

表 2 海泡石施用对供试土壤有效态 Cd 含量的影响

Table 2 Effect of sepiolite on contents of available Cd in the selected soil

处理水平及水稻品种	Cd in the selected soil	
	有效态 Cd 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	降幅/%
CK-嘉 33	$0.404 \pm 0.010\text{a}$	—
H ₁ -嘉 33	$0.393 \pm 0.016\text{a}$	2.85
H ₂ -嘉 33	$0.371 \pm 0.004\text{b}$	8.17
H ₃ -嘉 33	$0.368 \pm 0.020\text{b}$	8.91
H ₄ -嘉 33	$0.338 \pm 0.013\text{c}$	16.34
H ₅ -嘉 33	$0.318 \pm 0.024\text{d}$	21.29

2.2 海泡石施用对 Pb、Cd 在水稻根、茎、叶及精米中积累的影响

2.2.1 海泡石施用对水稻根、茎、叶以及精米中 Pb、Cd 含量的影响

表 3 是海泡石施用对水稻根、茎、叶以及精米中 Pb、Cd 含量的影响. 由表 3 可知,对照组水稻根中 Pb 的含量高达 $(541.32 \pm 29.64) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd 的含量为 $(0.91 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而茎、叶、精米中 Pb 的含量分别为 $(70.53 \pm 0.16) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(94.01 \pm 0.67) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.68 \pm 0.08) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd 的含量分别为 $(0.87 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.50 \pm 0.01) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $(0.17 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明水稻嘉 33 对 Pb、Cd 的吸收积累主要集中在根部,水稻嘉 33 各器官中重金属 Pb 的积累量排序大体相同:根 > 叶 > 茎 > 精米,Cd 的积累量排序也大体相同:根 > 茎 > 叶 > 精米. 同时,由表 3 可知,成熟期水稻各器官中 Pb、Cd 含量均随着海泡石施用量的增加而下降,当海泡石的施用量(以土计,下同)为 $9.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (H₅ 处理)时,水稻根、茎、叶和精米中 Pb 的积累量相比于对照组分别降低了 8.83%、29.96%、49.20%、79.41%,Cd 的积累量相比于对照组分别降低了 23.08%、63.22%、44.00%、82.35%. 此时,H₅ 处理下水稻精米中 Pb、Cd 的含量均低于国家的限量指标 (GB 2762-2012),说明在此海泡石施用量下可实现稻米的安全输出,意味着嘉 33 与海泡

表 3 海泡石施用水稻根、茎、叶以及精米中 Pb、Cd 含量的影响

Table 3 Effect of sepiolite on contents of Pb and Cd in roots, stems, leaves and polished rice

处理水平及 水稻品种	在根中的含量/mg·kg ⁻¹		在茎中的含量/mg·kg ⁻¹		在叶中的含量/mg·kg ⁻¹		在精米中的含量/mg·kg ⁻¹	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
CK-嘉 33	541.32 ± 29.64a	0.91 ± 0.08a	70.53 ± 0.16a	0.87 ± 0.05a	94.01 ± 0.67a	0.50 ± 0.01a	0.68 ± 0.08a	0.17 ± 0.02a
H ₁ -嘉 33	539.18 ± 30.15a	0.90 ± 0.07ab	66.75 ± 7.71ab	0.80 ± 0.07ab	92.83 ± 5.95a	0.46 ± 0.05a	0.57 ± 0.16a	0.15 ± 0.01a
H ₂ -嘉 33	530.64 ± 22.94ab	0.86 ± 0.05ac	67.09 ± 3.56a	0.75 ± 0.06b	90.36 ± 4.36a	0.40 ± 0.04b	0.56 ± 0.15a	0.12 ± 0.01b
H ₃ -嘉 33	518.48 ± 16.86ac	0.84 ± 0.07bc	60.87 ± 8.31bc	0.62 ± 0.08c	72.31 ± 2.34b	0.38 ± 0.03bc	0.30 ± 0.09b	0.09 ± 0.01c
H ₄ -嘉 33	504.73 ± 12.47bc	0.74 ± 0.04d	58.25 ± 1.05c	0.51 ± 0.05d	63.56 ± 3.05c	0.34 ± 0.04c	0.23 ± 0.04bc	0.05 ± 0.01d
H ₅ -嘉 33	493.52 ± 1.02c	0.70 ± 0.01d	49.40 ± 0.23d	0.32 ± 0.01e	47.76 ± 7.19d	0.28 ± 0.02d	0.14 ± 0.02c	0.03 ± 0.01e

石施用的有机结合可实现铅镉复合污染土壤的农业安全利用.

2.2.2 海泡石施用对重金属 Pb、Cd 在水稻各器官中富集的影响^[14]

吸收富集系数不仅可用来表征土壤-水稻体系中重金属元素迁移的难易程度,而且也能较清楚地比较水稻不同器官对重金属元素的吸收积累能力.通过计算水稻根、茎、叶及精米中 Pb、Cd 含量与土壤有效态 Pb、Cd 含量比值,得出水稻各器官对土壤重金属 Pb、Cd 的富集系数.结果(表 4)可知,对照组水稻根、茎、叶及精米对 Pb 的富集系数分别为 1.087、0.142、0.189、0.001 4,对 Cd 的富集系数分

别为 2.253、2.154、1.238、0.420 8,说明水稻嘉 33 各器官对重金属 Cd 的富集能力明显大于对重金属 Pb 的富集能力,即在土壤-水稻体系中重金属 Cd 比 Pb 的移动性强,在精米中的富集系数也较大.随着海泡石施用量的增大,水稻各器官对 Pb、Cd 的富集能力均下降,当海泡石的施用量为 9.00 g·kg⁻¹时,水稻根、茎、叶和精米对 Pb、Cd 的富集能力相比于对照组分别下降了 8.83%、29.96%、49.20%、79.41%,对 Cd 的富集能力相比于对照组分别降低了 23.08%、63.22%、44.00%、82.35%.因此,海泡石的添加可以显著降低水稻各器官对重金属 Pb、Cd 的富集.

表 4 海泡石施用对水稻富集系数的影响

Table 4 Effect of sepiolite on enrichment coefficients of Pb, Cd by rice

处理水平及 水稻品种	根的富集系数		茎的富集系数		叶的富集系数		精米的富集系数	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
CK-嘉 33	1.087	2.253	0.142	2.154	0.189	1.238	0.001 4	0.420 8
H ₁ -嘉 33	1.083	2.228	0.134	1.980	0.186	1.139	0.001 1	0.371 3
H ₂ -嘉 33	1.066	2.129	0.135	1.856	0.182	0.990	0.001 1	0.297 0
H ₃ -嘉 33	1.041	2.079	0.122	1.535	0.145	0.941	0.000 6	0.222 8
H ₄ -嘉 33	1.014	1.832	0.117	1.262	0.128	0.842	0.000 5	0.123 8
H ₅ -嘉 33	0.991	1.733	0.099	0.792	0.096	0.693	0.000 3	0.074 3

2.2.3 海泡石施用对水稻植株体内重金属 Pb、Cd 转运的影响

重金属在植物体内的转运系数是用来表征植物由某种器官或组织向另一种器官或组织运输重金属的能力.分别计算成熟期茎与根以及叶、籽粒与茎中的重金属 Pb、Cd 含量比值得出水稻的转运系数结果(表 5)可知,就对照组而言,叶对茎中重金属 Pb、Cd 的转运系数分别为 1.333、0.575,精米对茎中重金属 Pb、Cd 的转运系数分别为 0.010、0.195,即叶对茎中重金属 Pb、Cd 的转运系数显著高于精米对茎中重金属 Pb、Cd 的转运系数,说明水稻茎从根部转运的 Pb、Cd 主要转运到叶中积累.另外,随着海泡石施用量的增加,茎对根以及精米对茎吸收的重金属 Pb、Cd 的转运系数下降,当海泡石的施用

量为 9.00 g·kg⁻¹时,茎对根吸收的 Pb、Cd 的转运系数分别降低了 23.18%、52.19%,精米对茎转运的 Pb、Cd 的转运系数分别降低了 70.83%、52.00%,叶对茎转运的 Pb 的转运系数降低了 27.47%,而叶对茎转运的 Cd 的转运系数则增大了 34.32%.综上所述,海泡石处理不仅能明显降低水稻茎对根吸收积累的重金属 Pb、Cd 的转运能力,而且能降低重金属 Pb、Cd 从茎向精米中转运,促进重金属 Cd 优先分配到叶中积累.

2.3 海泡石施用对供试土壤 pH 的影响

表 6 是海泡石施用对土壤 pH 影响.从中可知,土壤添加海泡石后,供试土壤 pH 从近中性变成弱碱性,当海泡石的添加量为 9.00 g·kg⁻¹土时,供试土壤 pH 值从 6.85 ± 0.02 上升到 7.84 ± 0.12.通过

相关性分析可知,供试土壤的 pH 值变化与海泡石施用量呈显著正相关,相关系数为 0.875 ($P < 0.05$),意味着随着海泡石施用量的增大,土壤 pH 值将显著升高.

表 5 海泡石施用对水稻转运系数的影响

Table 5 Effect of sepiolite on transportation coefficients of Pb, Cd in rice

处理水平及 水稻品种	茎/根		叶/茎		精米/茎	
	Pb	Cd	Pb	Cd	Pb	Cd
CK-嘉 33	0.130	0.956	1.333	0.575	0.010	0.195
H ₁ -嘉 33	0.124	0.889	1.391	0.575	0.009	0.188
H ₂ -嘉 33	0.126	0.872	1.347	0.533	0.008	0.160
H ₃ -嘉 33	0.117	0.738	1.188	0.613	0.005	0.145
H ₄ -嘉 33	0.115	0.689	1.091	0.667	0.004	0.098
H ₅ -嘉 33	0.100	0.457	0.967	0.875	0.003	0.094

表 6 海泡石施用对供试土壤 pH 值的影响

Table 6 Effect of sepiolite on the pH value of the selected soil

处理水平及水稻品种	pH 值
CK-嘉 33	6.85 ± 0.02d
H ₁ -嘉 33	7.13 ± 0.14c
H ₂ -嘉 33	7.58 ± 0.17b
H ₃ -嘉 33	7.74 ± 0.09ab
H ₄ -嘉 33	7.64 ± 0.06b
H ₅ -嘉 33	7.84 ± 0.12a

表 7 海泡石施用对水稻根表铁膜含量的影响

Table 7 Effect of sepiolite on contents of rice iron plaque

处理水平及 水稻品种	根表铁膜含量 /mg·kg ⁻¹	增幅/%
CK-嘉 33	17 371.97 ± 62.64f	—
H ₁ -嘉 33	17 743.40 ± 49.75e	2.14
H ₂ -嘉 33	17 841.04 ± 45.37d	2.70
H ₃ -嘉 33	18 279.16 ± 58.91b	5.22
H ₄ -嘉 33	18 120.25 ± 76.99c	4.31
H ₅ -嘉 33	19 424.39 ± 80.06a	11.81

2.4 海泡石施用对水稻植株根表铁膜含量的影响

表 7 是海泡石施用对水稻植株根表铁膜含量的影响. 从中可知,随着供试土壤海泡石施用量的增加,水稻根表铁膜能含量明显增加. 在没有添加任何外源钝化剂的情况下,嘉 33 的根表铁膜含量为 (17 371.97 ± 62.64) mg·kg⁻¹;而当海泡石的施用量为 9.00 g·kg⁻¹ 土时,嘉 33 的根表铁膜含量升高为 (19 424.39 ± 80.06) mg·kg⁻¹,比对照组植株的根表铁膜的含量高 11.81%. 统计分析可知,在本研究设置的海泡石施用量范围内,根表铁膜含量与海泡石的施用量呈显著正相关,相关系数为 0.925 ($P < 0.01$). 说明施用海泡石有助于水稻根表铁膜的形成,且水稻根表铁膜形成量随着海泡石施用量的增大将快速增加.

2.5 土壤中有有效态 Pb、Cd 含量以及土壤 pH、根表铁膜的含量之间的相关性分析

表 8、表 9 是海泡石施用对水稻根、茎、叶、精米 Pb、Cd 含量与土壤 pH、土壤有效态 Pb 及根表

铁膜的相关系数的影响. 由表 8、9 可知,水稻各器官中 Pb、Cd 含量与土壤 pH 及根表铁膜含量呈显著负相关,相关系数分别在 -0.943 ~ -0.785 之间;水稻各器官中 Pb、Cd 含量与土壤有效态 Pb、Cd 含量呈显著正相关,相关系数分别在 0.935 ~ 0.986 之间. 这表明海泡石施用导致土壤 pH 越高、水稻根表铁膜含量越高、土壤有效态 Pb、Cd 含量降低,是造成土壤向水稻植株转运积累的重金属 Pb、Cd 含量减少的重要原因. 另外,由表 8、表 9 还可知,土壤中有有效态 Pb 含量与水稻根、茎、叶、精米中 Pb 含量之间的相关系数分别为 0.986、0.935、0.961、0.981,均为 0.01 水平显著相关,土壤中有有效态 Cd 含量与水稻根、茎、叶、精米中 Cd 含量之间的相关系数分别为 0.978、0.983、0.995、0.995,均为 0.01 水平显著相关,说明土壤重金属 Pb、Cd 的生物有效性可以有效反映水稻各器官中 Pb、Cd 的积累剂量效应关系,是控制水稻各器官中 Pb、Cd 积累的关键因素.

表 8 海泡石施用对水稻根、茎、叶、精米 Pb 含量与土壤 pH、土壤有效态 Pb 及根表铁膜的相关系数的影响¹⁾

Table 8 Effect of sepiolite on correlation coefficients between soil pH, soil available Pb and Fe of rice iron plaque and Pb concentrations in roots, stems, leaves and polished rice

水稻器官	根	茎	叶	精米
土壤 pH	-0.838 *	-0.802 *	-0.790	-0.864 *
有效态 Pb	0.986 **	0.935 **	0.961 **	0.981 **
根表铁膜	-0.839 *	-0.964 **	-0.919 **	-0.872 *

1) n = 18; * 表示 0.05 水平显著相关; ** 表示 0.01 水平显著相关,下同

表9 海泡石施用对水稻根、茎、叶、精米 Cd 含量与土壤 pH、土壤有效态 Cd 及根表铁膜的相关系数的影响

Table 9 Effect of sepiolite on correlation coefficients between soil pH, soil available Cd and Fe of rice iron plaque and Cd concentrations in roots, stems, leaves and polished rice

水稻器官	根	茎	叶	精米
土壤 pH	-0.785	-0.832 *	-0.924 **	-0.889 *
有效态 Cd	0.978 **	0.983 **	0.995 **	0.995 **
根表铁膜	-0.860 *	-0.943 **	-0.910 *	-0.868 *

3 讨论

水稻吸收富集重金属 Pb、Cd 受诸多因素影响,如土壤 pH 值、CEC、有机质以及离子间作用等^[15].在偏酸性铅镉复合污染土壤中,施用碱性的海泡石不仅可以改良土壤酸性,而且还能降低土壤有效态 Pb、Cd 含量,从而减轻重金属 Pb、Cd 对作物的毒害.其可能的机理在于海泡石的添加会提升土壤 pH 值,增加土壤胶体和黏粒表面负电荷,增强其对土壤中镉离子的吸附能力,有利于镉的氢氧化物和磷酸盐、碳酸盐沉淀的形成,从而降低土壤中有效态 Pb、Cd 的含量及其生物有效性,减少重金属在植物体内的富集^[7,16~18].据刘昭兵等^[19]的试验研究表明,在酸性土壤中,当土壤 pH 值由 5.0 升高到 6.0 时,土壤有效 Cd 含量降低 45.90%,同时水稻糙米 Cd 含量则随土壤 pH 值的升高而降低 27.1%~65.1%;孙约兵等^[20]的试验结果显示,添加海泡石提高了土壤 pH 值,污染土壤中 Cd 和 Pb 由活性较高的可提取态向活性低的有机结合态、铁锰氧化物结合态以及残渣态转化,可溶态 Cd 和 Pb 含量分别较对照降低了 1.4%~72.9%和 11.8%~51.4%.本试验结果也表明,施用海泡石使水稻成熟期土壤 pH 值比对照增加近 1.0 个单位,土壤有效态 Pb 含量比对照降低了 56.50%,有效态 Cd 含量比对照降低了 21.29%,与已有报道结论一致.此外,据林大松等^[8]的试验研究表明,土壤 pH 的提升,也有利于海泡石表面可变负电荷数增加,从而促进海泡石与重金属离子的吸附或络合物的形成,从而进一步减弱重金属污染物质的活性及扩散性.即海泡石的添加导致土壤 pH 值提升,将显著降低土壤重金属有效性,进而降低了重金属 Pb、Cd 向水稻植株的迁移与积累.本研究结果可知水稻各器官中 Pb、Cd 含量与土壤 pH 呈显著负相关,相关系数分别在 -0.924~-0.785 之间,进一步证明海泡石的添加导致土壤 pH 值升高是影响重金属 Pb、Cd 向水稻植株的迁移与积累的重要因素.

另一方面,植物在环境胁迫条件下会产生适应

性反应,而根表铁膜就是水生植物适应环境胁迫的重要机制.水稻是典型的水生植物,在长期淹水条件下,水稻植株地上部、根系的通气组织大量形成,这样一来,大气中的氧气可由通气组织输送到根系,然后根系可将这部分氧气、氧化性物质释放到根际,将土壤中的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,并沉积在水稻根表及质外体而形成铁氧化膜^[21~25].Machado 等^[26]通过试验研究发现,水稻根表铁膜的主要成分为两性胶体铁氧化物胶膜,可以吸附土壤中多种元素,因而能够有效地减轻土壤中重金属离子对水稻根系的毒害作用.另外,也有相关的试验研究表明,根表铁膜是通过外在抗性机制和内在耐受机制两种机制共同保护植物不受土壤重金属的毒害^[27].添加海泡石后,土壤 pH 值升高近 1.0 个单位,水稻根表铁膜的含量增加了 11.81%,水稻各器官对重金属 Pb、Cd 的吸收富集减少.通过软件分析土壤 pH 值与根表铁膜之间的相关性,水稻嘉 33 的 Pearson 系数 0.793 ($P<0.05$),即土壤 pH 值与根表铁膜之间存在明显的相关关系.因此其可能的机制在于土壤 pH 值的改变影响了根际微环境,导致了水稻根表铁膜的形成加快,而水稻根表铁膜能吸附有毒元素或与之共沉淀,将重金属滞留在根系表面,从而减少水稻植株对重金属的富集^[24,26].本研究结果表明,水稻各器官中 Pb、Cd 含量与水稻根表铁膜含量呈显著负相关,相关系数分别在 -0.943~-0.860 之间,进一步证明了添加海泡石后,水稻根表铁膜含量增加,进而阻控 Pb、Cd 向水稻地上部分各器官的迁移和分配,降低了 Pb、Cd 在茎、叶和精米中累积这一机制的存在.

上述机制作用结果表明,施用海泡石可显著降低土壤中有有效态 Pb、Cd 的含量以及水稻各器官中 Pb、Cd 含量,并且影响了重金属 Pb、Cd 在水稻地上部的分配积累,意味海泡石在实现一定重金属污染浓度的土壤上,具有较好的保障实现农产品安全输出的潜力.本研究结果表明,当海泡石的添加浓度为 $9.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土时,嘉 33 精米中的 Pb、Cd 含量分别为 $(0.14 \pm 0.02)\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 (0.03 ± 0.01)

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,均低于国家的限量指标(GB 2762-2012);相比于对照组而言,水稻根、茎、叶及精米对 Pb 的富集系数分别下降了 8.83%、29.96%、49.20%、79.41%,对 Cd 的富集系数分别下降了 23.08%、63.22%、44.00%、82.35%;另外,茎对根吸收的 Pb、Cd 的转运系数分别下降了 23.18%、52.19%,精米对茎转运的 Pb、Cd 的转运系数分别下降了 70.83%、52.00%,可见在铅镉复合重污染土壤上,海泡石同时对重金属 Pb、Cd 在土壤-水稻系统的迁移与再分配具有较好的阻控作用,合理施用海泡石与低积累水稻品种相结合可以实现污染浓度相对较高的重金属 Pb、Cd 复合污染土壤的农业安全利用。

此外研究发现,茎对根吸收的 Pb、Cd 的转运系数及精米对茎转运的 Pb、Cd 的转运系数随着海泡石处理浓度的增大而降低的同时,叶对茎中 Cd 的转运系数却增大,在 H_5 处理时,水稻叶对茎中 Cd 的转运系数相比于对照组增大了 52.17%。其原因可能与低 Cd 积累水稻品种独有的解毒机制有关,即通过作物自身的相关生理生化调节,提高对镉胁迫环境的耐性响应,优先将水稻吸收的 Cd 分配到叶片中,进而减少其进入可食部分的量有关。有研究也发现低 Cd 积累水稻品种这一特有解毒机制,即随着生育期的推进,水稻植株 Cd 向茎的转运量降低,而茎向叶的转运量则升高,进而降低 Cd 向精米的转运^[28~30]。这进一步表明,在实现污染浓度相对较高的重金属 Pb、Cd 复合污染土壤的农业安全利用方面,低重金属积累水稻品种的应用具有重要的地位。

4 结论

(1)海泡石的添加显著降低土壤中有有效态 Pb、Cd 的含量,且土壤中有有效态 Pb、Cd 的含量与海泡石添加量呈显著负相关,相关系数分别为 -0.940、-0.952,均达到了显著水平($P < 0.01$)。

(2)水稻各器官中 Pb、Cd 含量与土壤 pH 呈显著负相关,相关系数分别在 -0.924 ~ -0.785;同时水稻各器官中 Pb、Cd 含量也与水稻根表铁膜含量呈显著负相关,相关系数分别在 -0.943 ~ -0.860。

(3)海泡石的添加显著降低了水稻根、茎、叶以及精米中重金属 Pb、Cd 的积累,而且随着海泡石添加量的增大,水稻根、茎、叶及精米对 Pb、Cd 的富集系数减少,同时茎对根系吸收的 Pb、Cd 以及精米对茎中 Pb、Cd 的转运系数均减小。表明在铅镉复合重污染土壤上,海泡石同时对重金属 Pb、Cd 在

土壤-水稻系统的迁移与分配具有较好的阻控作用。

(4)在供试的铅镉复合重污染土壤上,施用 $9.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土的海泡石后,嘉 33 精米中的 Pb、Cd 含量均低于国家的限量指标(GB 2762-2012),意味着合理施用海泡石与低 Pb、Cd 积累水稻品种相结合可以实现污染浓度相对较高的重金属 Pb、Cd 复合污染土壤的农业安全利用。

参考文献:

- [1] 周启星,宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [2] 章力建,周晓霞,杨正礼,等. 我国水稻生产中的立体污染及防治[J]. 中国稻米, 2005, (5): 1-4.
Zhang L J, Zhou X Z, Yang Z L, *et al.* Agriculture multi-dimension pollution in rice production and its control in China [J]. China Rice, 2005, (5): 1-4.
- [3] 王玉军,刘存,周东美,等. 客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有问题的讨论和建议[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1465-1473.
Wang Y J, Liu C, Zhou D M, *et al.* A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [4] 王林,徐应明,梁学峰,等. 广西刁江流域 Cd 和 Pb 复合污染稻田土壤的钝化修复[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 563-568.
Wang L, Xu Y M, Liang X F, *et al.* Remediation of contaminated paddy soil by immobilization of pollutants in the Diaojiang catchment, Guangxi Province [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(5): 563-568.
- [5] 杨明平,彭荣华,李国斌. 用改性海泡石处理含铬废水[J]. 材料保护, 2003, 36(7): 54-55.
Yang M P, Peng R H, Li G B. Treatment of waste water containing Cr^{6+} by modified meerschaum [J]. Materials Protection, 2003, 36(7): 54-55.
- [6] 罗道成,易平贵,陈安国,等. 改性海泡石对废水中 Pb^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Cd^{2+} 吸附性能的研究[J]. 水处理技术, 2003, 29(2): 89-91.
Luo D C, Yi P G, Chen A G, *et al.* Adsorption of modified unchanged meerschaum on Pb^{2+} , Hg^{2+} and Cd^{2+} in wastewater [J]. Technology of Water Treatment, 2003, 29(2): 89-91.
- [7] 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.
- [8] 林大松,刘尧,徐应明,等. 海泡石对污染土壤镉、锌有效态的影响及其机制[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 46(3): 346-350.
Lin D S, Liu Y, Xu Y M, *et al.* Effects of sepiolite on the immobilization of cadmium and zinc in soil [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 46(3): 346-350.

- [9] 张楠. 低积累型水稻品种的筛选及其配套阻控技术初探[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Zhang N. A preliminary study on screening for low accumulation-type rice cultivars and forming a set of controlling technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有态铅和镉的测定[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(增刊): 300-302.
Liu M, Liu F Z, Liu B F. Determination of available lead and cadmium in soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, **26**(S): 300-302.
- [12] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(3): 432-437.
Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al.* Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(3): 432-437.
- [13] Treeby M, Marschner H, Römheld V. Mobilization of iron and other micronutrient cations from a calcareous soil by plant-borne, microbial, and synthetic metal chelators [J]. Plant and Soil, 1989, **114**(2): 217-226.
- [14] 谢运河, 纪雄辉, 黄涓, 等. 赤泥、石灰对 Cd 污染稻田改制玉米吸收积累 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(11): 2104-2110.
Xie Y H, Ji X H, Huang J, *et al.* Effects of red-mud and lime on Cadmium uptake of corn in dryland converted from Cadmium polluted Paddy Field [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(11): 2104-2110.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王长伟, 徐应明, 王林, 等. 海泡石与磷酸盐对镉铅复合污染土壤的钝化修复效应[J]. 安全与环境学报, 2010, **10**(4): 42-45.
Wang C W, Xu Y M, Wang L, *et al.* Amendment effects of cadmium and lead to the co-contaminated soils through sepiolite and phosphate [J]. Journal of Safety and Environment, 2010, **10**(4): 42-45.
- [18] 李永涛, 吴启堂. 土壤污染治理方法研究[J]. 农业环境保护, 1997, **16**(3): 118-122.
- [19] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤微生物有效性的影响及机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1164-1170.
Liu S B, Ji X H, Tian X F, *et al.* Effects and mechanism of alkaline wastes application and Zinc fertilizer Addition on Cd Bioavailability in Contaminated Soil [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1164-1170.
- [20] 孙约兵, 王朋超, 徐应明, 等. 海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4720-4726.
Sun Y B, Wang P C, Xu Y M, *et al.* Immobilization remediation of Cd and Pb contaminated soil: remediation potential and soil environmental quality [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4720-4726.
- [21] Bacha R E, Hossner L R. Characteristics of coatings formed on rice roots as affected by iron and manganese additions [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, **41**(5): 931-935.
- [22] Chen C C, Dixon J B, Turner F T. Iron coatings on rice roots: morphology and models of development [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, **44**(5): 1113-1119.
- [23] 刘文菊, 朱永官. 湿地植物根表的铁锰氧化物膜[J]. 生态学报, 2005, **25**(2): 358-363.
Liu W J, Zhu Y G. Iron and Mn plaques on the surface of roots of wetland plants [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(2): 358-363.
- [24] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 根表铁膜对水稻铅吸收转运的影响[J]. 生态毒理学报, 2014, **9**(1): 35-41.
Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al.* Influence of iron plaque on Pb uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, **9**(1): 35-41.
- [25] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(6): 1527-1534.
Fu Y Q, Yu Z W, Cai K Z, *et al.* Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: a review [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- [26] Machado W, Gueiros B B, Lisboa-Filho S D, *et al.* Trace metals in mangrove seedlings: role of iron plaque formation [J]. Wetlands Ecology and Management 2005, **13**(2): 199-206.
- [27] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及其营养与生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2004, **15**(6): 1069-1073.
He C E, Liu X J, Zhang F S. Formation of iron plaque on root surface and its effect on plant nutrition and ecological environment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, **15**(6): 1069-1073.
- [28] 龙小林, 向珣朝, 徐艳芳, 等. 镉胁迫下籼稻和粳稻对镉的吸收、转移和分配研究[J]. 中国水稻科学, 2014, **28**(2): 177-184.
Long X L, Xiang X C, Xu Y F, *et al.* Absorption, transfer and distribution of Cd in indica and japonica rice under Cd stress [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2014, **28**(2): 177-184.
- [29] 张路. 水稻镉安全亲本材料对镉的吸收、转运及积累特征[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
Zhang L. Characteristic of cadmium uptake, translocation and accumulation in cadmium-safe rice line [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015.
- [30] 张利强. 水稻重金属镉的吸收、转运和积累特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.

CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM ₁ in North China During the Autumn and Winter Polluted Period ...	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Hangzhou	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM _{2.5} in Xi'an, China During Haze and Clean Days	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM ₁₀ from Mt. Huangshan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM _{2.5} of Quanzhou	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO ₂ Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir ...	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO ₂	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K ⁺ Addition in Saline Surroundings	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO ₂ -Brine-Sandstone Interaction Process	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China; A Comparison Study Between 1999 and 2014	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO _x by CH ₄	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)