

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟荪琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控

王英杰¹, 邹佳玲¹, 杨文弢², 周航¹, 廖柏寒^{1*}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 湖南农业大学生物科学技术学院, 长沙 410128)

摘要: 通过水稻盆栽种植试验, 研究了两种组配改良剂 LST(石灰石 + 海泡石 + 二氧化钛)和 LSF(石灰石 + 海泡石 + 硫酸铁)在不同添加量(0、1、2、4、8、16 g·kg⁻¹)下对水稻土壤 Pb、Cd 和 As 的生物有效性以及水稻吸收累积 Pb、Cd 和 As 的影响。结果表明: ①与对照相比, 组配改良剂 LST 和 LSF 均使土壤 pH 值上升, 且与对照之间均存在显著差异($P < 0.05$); 两种组配改良剂相比, LST 比 LSF 使土壤 pH 值上升得更多。②施用 1~16 g·kg⁻¹ 的 LST 和 LSF 使土壤中 Pb、Cd 和 As 的交换态含量分别降低 16.8%~88.3%、22.4%~73.7%、2.25%~43.8% 和 20.2%~86.9%、20.7%~51.2%、18.0%~55.1%, 均与对照之间存在显著差异。LST 和 LSF 均能显著降低水稻植株对 Pb、Cd 和 As 的吸收。当 LST 和 LSF 施加量为 16 g·kg⁻¹ 时, 糙米中 Pb、Cd 和 As 的含量最高分别降低了 50.7%、64.7%、34.1% 和 40.7%、40.7%、36.2%。③水稻各部位对 Pb 和 As 的转运能力为谷壳 > 茎叶 > 根系, 对 Cd 的转运能力为谷壳 > 根系 > 茎叶, 水稻中谷壳向糙米转运 Pb、Cd 和 As 的能力为 Cd > As > Pb。④施加 LST 和 LSF 后, 水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与土壤 Pb、Cd 和 As 交换态含量之间存在极显著的正相关关系, 与土壤 pH 值之间存在显著的负相关关系。

关键词: 组配改良剂; Pb/Cd/As; 土壤; 水稻; 生物有效性

中图分类号: X171.5; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-4004-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.10.044

Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments

WANG Ying-jie¹, ZOU Jia-ling¹, YANG Wen-tao², ZHOU Hang¹, LIAO Bo-han^{1*}

(1. College of Environment Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. College of Bioscience and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: This paper studied the effects of applying two combined amendments LST (limestone + meerschaum + titanium dioxide) and LSF (limestone + meerschaum + ferric sulfate) at different ratios of 0, 1, 2, 4, 8 and 16 g·kg⁻¹ on bioavailability Pb, Cd and As in paddy soil and bioaccumulation in rice plants through a pot experiment planting rice. The results indicated that: ①Compared with the control, applying LST and LSF could both significantly increase soil pH values ($P < 0.05$), and LST increased the soil pH values more. ②Applying combined amendments LST and LSF with the amount of 1-16 g·kg⁻¹ decreased exchangeable contents of soil Pb, Cd and As significantly by 16.8%-88.3%, 22.4%-73.7%, 2.25%-43.8%, and 20.2%-86.9%, 20.7%-51.2%, 18.0%-55.1%, respectively. LST and LSF significantly decreased contents of Pb, Cd and As of rice root, shoot, husk and brown rice. When the applying amount of LST and LSF was 16 g·kg⁻¹, the contents of Pb, Cd and As in brown rice decreased by 50.7%, 64.7%, 34.1%, and 40.7%, 40.7%, 36.2%, respectively. ③The ability of rice organs transferring Pb and As was husk > rice straw > root, and that transferring Cd was husk > root > rice straw. The ability to transfer Pb, Cd and As from rice straw to brown rice was Cd > As > Pb. ④After applying LST and LSF, a significant positive relationship was observed between contents of Pb, Cd and As in brown rice and exchangeable contents of these elements in soil. Between contents of Pb, Cd and As in brown rice and soil pH values, there was a significant negative correlation.

Key words: combined amendment; Pb/Cd/As; soil; rice; bioavailability

土壤重金属和 As 污染已成为一个危及全球环境质量的重要问题^[1,2]。受重金属、持久性有机污染物等影响,我国耕地土壤正面临非常严峻的环境污染问题,并呈现出复合或混合污染的特征^[3,4]。由于影响重金属复合污染效应的因子很多^[5],使得重金属复合污染的研究显得异常复杂。绝大多数重金属在土壤环境中并不经历微生物或化学降解过程,残留在土壤中的重金属元素发生渗漏进入地下水或通

过不同途径进入食物链,在食物链不同营养级中累积放大,通过“土壤→植物→人体”或“土壤→水→人体”间接被人体吸收,危害人体健康^[6]。重金属和

收稿日期: 2016-02-03; 修订日期: 2016-04-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201009047); 国家自然科学基金项目(41201530); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 王英杰(1988~),女,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制, E-mail: 15674811246@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liaobh1020@163.com

As 污染的稻田土壤治理目标,不仅在于抑制重金属和 As 对水稻的毒害和提高水稻的产量,更在于降低水稻对土壤重金属和 As 的吸收^[7]。

重金属的毒性与其在土壤中存在各种形态密切相关^[8],As 在土壤中的存在形态可能比总量更重要,因为存在形态决定着 As 的生物有效性和毒性^[9],水稻吸收重金属和 As 的量取决于土壤中有有效态含量,而不是土壤中的总量^[10]。为了减轻重金属和 As 对人类健康的威胁,土壤重金属和 As 污染的治理主要取决于它们有效态含量的降低,那么处理技术是迫切需要改进的。目前已有较多的分别治理重金属和 As 污染土壤的研究,如周利强等^[11]研究了有机物料对水稻吸收重金属的调控作用,丁凌云等^[12]探讨了石灰、过磷酸钙和有机物等改良剂的应用对水稻产量和重金属吸收的影响,Mench 等^[13]利用工业废铁处理土壤中的 As,李士杏等^[14]采用平衡吸附法研究了铁铝土对砷酸根的吸附特

性。但是,同时治理重金属和 As 污染土壤的研究却鲜有报道。本研究将前期实验室筛选试验中所得的两种组配改良剂石灰石 + 海泡石 + 二氧化钛(LST)和石灰石 + 海泡石 + 硫酸铁(LSF)应用于水稻盆栽种植,通过水稻盆栽试验研究组配改良剂对稻田系统中 Pb、Cd 和 As 生物有效性和这些元素在水稻种植中迁移转运的影响,以期为 Pb、Cd 与 As 复合污染耕地的修复与治理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤来源于湘南某矿区(113°06.042' E, 25°48.775' N)周围稻田耕作层(0~30 cm)。该地区土壤由于 80 年代尾砂坝倒塌导致农田受到污染,虽采取紧急措施移除了表层的污染土壤,但仍有大量农田重金属污染严重^[15, 16]。组配改良剂添加前,土壤基本理化性质如表 1 所示。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

项目	pH	OM /%	CEC /cmol·kg ⁻¹	As 总量 /mg·kg ⁻¹	重金属总量/mg·kg ⁻¹	
					Pb	Cd
供试土壤	6.22	4.55	17.34	210.25	257.40	3.74
土壤环境质量标准(Ⅱ级)	<6.5	—	—	40	250	0.3

土壤改良剂原料为石灰石(CaCO₃,过 100 目筛)由天津市大茂化学试剂厂提供;海泡石(Mg₈(H₂O)₄[Si₆O₁₅]₂(OH)₄·8H₂O,过 100 目筛),由上海市四赫维化工有限公司提供;二氧化钛(TiO₂,过 100 目筛)由国药集团化学试剂有限公司提供;硫酸铁(Fe₂(SO₄)₃,过 100 目筛)由汕头市西陇化工厂有限公司提供。供试水稻品种选用杂交稻Ⅱ优 93,由湖南亚华种业有限公司提供。

本试验将石灰石、海泡石、二氧化钛以及硫酸铁进行组配,通过前期组配改良剂的筛选研究,筛选出石灰石 + 海泡石 + 二氧化钛(LST)和石灰石 + 海泡石 + 硫酸铁(LSF)以一定的比例进行混合的两种组配改良剂。

1.2 盆栽试验

盆栽试验在中南林业科技大学生命科学大楼 3 楼露天试验平台进行,花坛内光、水、气、热等环境条件均为自然状态,无人为干扰。该地区属亚热带季风性湿润气候,气候温和,降水充沛,雨热同期,四季分明。年平均气温 16.8~17.3℃,年均降水量 1 358.6~1 552.5 mm。水稻种植期间(4~8 月),最高温度出现在 7 月,平均最高气温 28.0℃;最低温

度出现在 4 月,平均最低气温 21.4℃;月平均降水量 68.8~273.2 mm。

盆栽试验用盆为无盖圆柱形桶,直径 200 mm(内径),高 240 mm,每桶装土 4.0 kg。两种组配改良剂分别设置 6 个添加浓度(0、1、2、4、8、16 g·kg⁻¹),其中 0 g·kg⁻¹(空白对照)为两种组配改良剂共用,每个添加浓度设置 3 个平行,共 33 个处理。2014 年 4 月初进行水稻育秧,同时向盆栽用桶中施加各浓度组配改良剂。改良剂 LST 和 LSF 在土壤中熟化 15 d 后,选取长势一致的水稻幼苗进行插秧移栽。移栽时添加基肥 K₂CO₃(按 K₂O 计算)0.22 g·kg⁻¹,(NH₄)₃PO₄(按 P₂O₅ 计算)0.21 g·kg⁻¹,尿素(按 N 计算)0.28 g·kg⁻¹,水稻生长期间根据生长情况补充上述基肥,并喷洒农药防止病虫害。2014 年 8 月下旬水稻成熟后采集水稻根系 0~2 cm 土壤,并收割水稻,保存。

1.3 样品分析测试方法

水稻样品处理:用自来水和蒸馏水洗净,晾干后放入烘箱,105℃杀青 30 min,然后在 70℃下烘干至恒重,使用小型脱壳机将水稻谷粒脱壳,收集糙米。水稻各部位(根、茎叶、谷壳、糙米)使用小型粉碎

机粉碎,过 100 目尼龙筛,用塑料封口袋密封保存.测定各部分 Pb、Cd 和 As 总量.

土壤样品处理:风干磨碎分别过 20 目与 100 目筛,测定土壤的 pH 值,测有机质(OM)含量、阳离子交换量(CEC)、Pb、Cd 和 As 的总量及交换态含量.

土壤 pH 值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,固液比为 $m(\text{固}):V(\text{液})=1:2.5$,用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NH_4Cl 溶液提取土壤中交换态的 As^[17],重金属交换态含量通过 Tessier 连续提取法获得(提取剂为 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ MgCl}_2$)^[18],水稻各部位中重金属 Pb、Cd 和 As 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,样品溶液中的 As 浓度用原子荧光光度计测定.所有样品分析过程中以国家标准物质土壤(GBW(E)-070009)和湖南大米 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

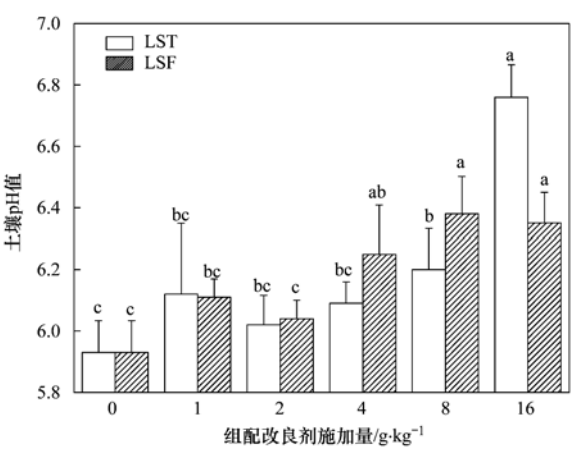
本试验中的数据结果均为平均值 $\pm$ 标准偏差,所有数据采用显著性 F 测验和 Duncan 多重比较法($P<0.05$ 和 $P<0.01$)进行统计分析,应用 Excel 2010、SPSS 19.0 和 Origin 8.5 进行处理.

2 结果与分析

2.1 组配改良剂对水稻成熟后土壤 pH 值的影响

图 1 为两种组配改良剂对土壤 pH 值的影响.与对照相比,两种组配改良剂在不同施加量水平下的土壤 pH 值均呈现显著上升的趋势($P<0.05$).与对照(5.93)相比,施加 $1\sim 16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的组配改良剂 LST 和 LSF,土壤 pH 值分别为 $6.02\sim 6.76$ 和 $6.04\sim 6.38$,分别升高了 $0.09\sim 0.83$ 和 $0.11\sim 0.42$ 个单位.且 LST 施加量 $\geq 8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤 pH 值与对

照之间存在显著差异;LSF 施加量 $\geq 4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,土壤 pH 值与对照之间存在显著差异.



图中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同

图 1 组配改良剂对水稻成熟后土壤 pH 值的影响

Fig. 1 Effect of combined amendments on pH of paddy field soil

2.2 组配改良剂对土壤 Pb、Cd 和 As 生物有效性的影响

通过研究土壤中交换态 Pb、Cd 和 As 含量的变化来评价其生物有效性.从表 2 可以看出,两种组配改良剂均能显著降低土壤中 Pb、Cd 和 As 的交换态含量($P<0.05$),且随着施用量的增加其含量逐渐降低.与对照相比,施用 LST 和 LSF ($1\sim 16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),土壤中 Pb、Cd、As 的交换态含量分别下降了 $16.8\%\sim 88.3\%$ 、 $22.4\%\sim 73.7\%$ 、 $2.25\%\sim 43.8\%$ 和 $20.2\%\sim 86.9\%$ 、 $20.7\%\sim 51.2\%$ 、 $18.0\%\sim 55.1\%$.

2.3 组配改良剂对水稻生物量和各部位 Pb、Cd 和 As 含量的影响

表 3 为组配改良剂对水稻生物量的影响.可以看出,随组配改良剂 LST 和 LSF 施加量的增大,水

表 2 组配改良剂对土壤中 Pb、Cd 和 As 交换态含量的影响

Table 2 Effect of two combined amendments on exchangeable Pb, Cd and As in soil

组配改良剂	添加量/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	As/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
石灰石 + 海泡石 + 二氧化钛(LST)	0	$1.952 \pm 0.238\text{a}$	$0.410 \pm 0.070\text{a}$	$0.089 \pm 0.002\text{a}$
	1	$1.625 \pm 0.131\text{b}$	$0.318 \pm 0.053\text{b}$	$0.087 \pm 0.007\text{a}$
	2	$1.314 \pm 0.061\text{c}$	$0.28 \pm 0.062\text{b}$	$0.072 \pm 0.003\text{b}$
	4	$1.02 \pm 0.064\text{d}$	$0.265 \pm 0.041\text{b}$	$0.064 \pm 0.005\text{c}$
	8	$0.768 \pm 0.111\text{e}$	$0.261 \pm 0.016\text{b}$	$0.051 \pm 0.011\text{d}$
	16	$0.228 \pm 0.006\text{f}$	$0.108 \pm 0.010\text{c}$	$0.050 \pm 0.001\text{d}$
石灰石 + 海泡 + 硫酸铁石(LSF)	0	$1.952 \pm 0.238\text{a}$	$0.410 \pm 0.070\text{a}$	$0.089 \pm 0.002\text{a}$
	1	$1.558 \pm 0.173\text{b}$	$0.324 \pm 0.033\text{ab}$	$0.068 \pm 0.006\text{b}$
	2	$1.300 \pm 0.190\text{b}$	$0.325 \pm 0.016\text{ab}$	$0.073 \pm 0.004\text{b}$
	4	$0.704 \pm 0.100\text{c}$	$0.255 \pm 0.063\text{bc}$	$0.060 \pm 0.005\text{c}$
	8	$0.730 \pm 0.088\text{c}$	$0.215 \pm 0.091\text{c}$	$0.044 \pm 0.010\text{d}$
	16	$0.256 \pm 0.037\text{d}$	$0.200 \pm 0.032\text{c}$	$0.040 \pm 0.000\text{d}$

稻生物量呈上升趋势,但 LST 的施加对水稻生物量增大的影响并不显著,而 LSF 的施加量达 $16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时水稻生物量与对照之间存在显著差异.

表 3 组配改良剂对水稻生物量的影响

Table 3 Effects of LST and LSF on biomass of rice plants		
组配改良剂添加量 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	生物量/g	
	LST	LSF
0	$55.94 \pm 2.83\text{a}$	$55.9 \pm 2.83\text{b}$
1	$68.13 \pm 5.36\text{a}$	$78.00 \pm 36.03\text{ab}$
2	$69.22 \pm 12.23\text{a}$	$81.54 \pm 11.19\text{ab}$
4	$73.90 \pm 10.23\text{a}$	$72.40 \pm 11.51\text{ab}$
8	$66.32 \pm 11.91\text{a}$	$82.50 \pm 17.05\text{ab}$
16	$72.18 \pm 8.34\text{a}$	$95.23 \pm 18.04\text{a}$

两种组配改良剂对水稻各部位中 Pb、Cd 和 As 含量均有一定的影响(图 2). 随着组配改良剂 LST 施用量的增加,水稻各部位 Pb、Cd 和 As 含量均逐渐降低. 与对照相比,糙米中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 25.7% ~ 50.7%、28.2% ~ 64.7% 和 11.2% ~ 34.1%,可见糙米中 Pb 和 Cd 的降低效果是比较明显的,As 的降低效果稍差;谷壳中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 8.6% ~ 78.7%、43.9% ~ 81.6% 和 4.4% ~ 41.0%,其中 Cd 的降低效果最为显著;茎叶中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 15.0% ~ 34.5%、18.5% ~ 73.3% 和 10.6% ~ 44.1%,其中 Pb 的降低效果较差;根系中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 20.5% ~ 41.8%、47.2% ~ 61.0% 和 13.5% ~ 28.6%. 由此可见,组配改良剂 LST 对水稻各部位 Cd 的降低效果较好,其次为 Pb,而 As 的降低效果较差. 各处理根系、谷壳和糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与对照之间差异性显著($P < 0.05$).

组配改良剂 LSF 对水稻各部位 Pb、Cd 和 As 含量的影响与组配改良剂 LST 相似. 与对照相比,当施用量为 $1 \sim 16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 8.9% ~ 40.7%、22.3% ~ 40.7% 和 16.3% ~ 36.2%,谷壳中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 15.4% ~ 51.8%、28.9% ~ 79.6% 和 3.0% ~ 45.9%,茎中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 3.9% ~ 53.5%、7.2% ~ 70.3% 和 24.0% ~ 49.8%,根中 Pb、Cd 和 As 含量分别降低了 8.8% ~ 58.5%、23.1% ~ 69.8% 和 5.8% ~ 38.1%. 各处理根系、茎叶、谷壳和糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与对照之间差异性显著($P < 0.05$).

当 LST 施用量为 $8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米中 Pb、Cd 含量分别为 $0.200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.153\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到和低于国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)

中 Pb 和 Cd 的限量($0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);当 LSF 施用量为 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,糙米中 Cd 含量为 $0.183\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中 Cd 的限量($0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 组配改良剂 LST 和 LSF 施用量最大时,糙米中 As 含量分别为 $0.534\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.517\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仍高于国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中 As 的限量($0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$).

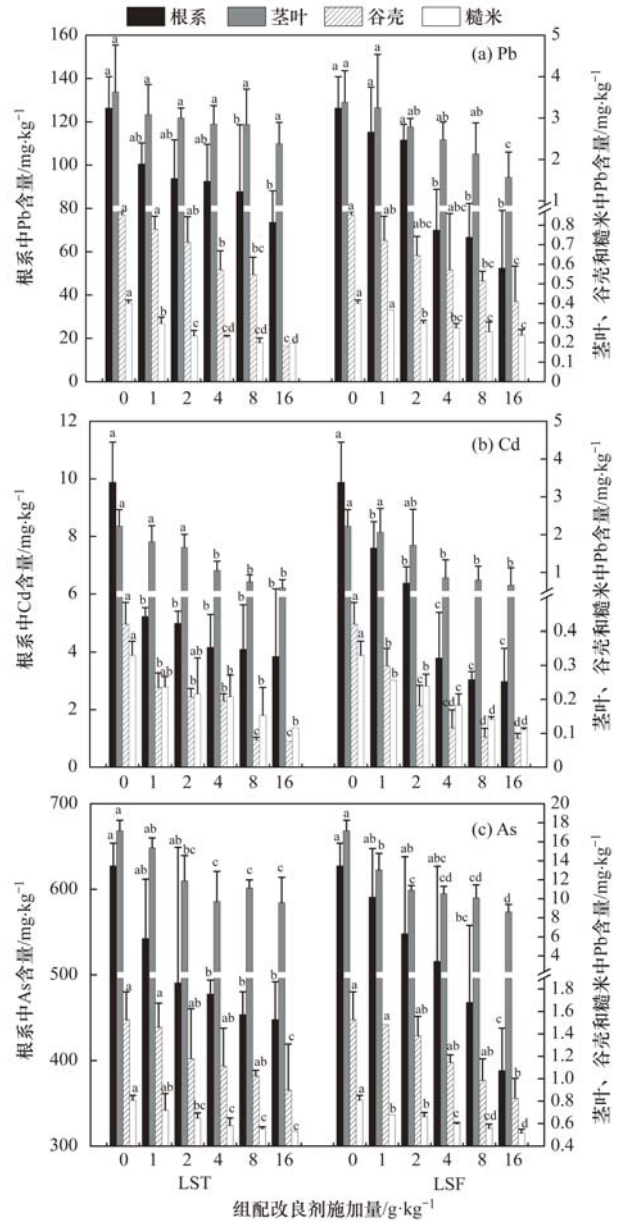


图 2 组配改良剂对水稻各部位中 Pb、Cd 和 As 含量的影响
Fig. 2 Effect of two combined amendments on concentrations of Pb, Cd and As in different rice tissues

2.4 组配改良剂对土壤 Pb、Cd 和 As 在水稻植株中转运系数的影响

转运系数是指水稻后一部位中重金属和 As 含

量与前一部位中重金属和 As 含量的比值(包括根→茎叶、茎叶→谷壳、谷壳→糙米),用于评估水稻各部位对重金属和 As 的转运能力. 转运系数越大,说明该部位对重金属和 As 的转运能力越强^[19]. 两种组配改良剂对水稻各部位 Pb、Cd 和 As 转运系数的影响如表 4 所示. LST 施加量为 2~8 g·kg⁻¹时, Pb 在谷壳→糙米的转运系数显著降低 ($P<0.05$), 施加量达到 16 g·kg⁻¹时, Pb 在谷壳→糙米的转运系数显著上升 ($P<0.05$). 当 LST 施加量为 1 g·kg⁻¹时, Cd 在根系→茎叶转运系数为 0.435, 与对照(0.224)相比显著上升 ($P<0.05$); 施加量为 8 g·kg⁻¹时, Cd 在茎叶→谷壳的转运系数为 0.112, 与对照(0.192)相比显著降低 ($P<0.05$), 在谷壳→糙

米的转运系数为 1.953, 与对照(0.798)相比显著上升 ($P<0.05$); As 在根系→茎叶、茎叶→谷壳和谷壳→糙米转运系数与对照之间均不存在显著差异.

施加不同浓度 LSF 后, Pb 在根系→茎叶、茎叶→谷壳和谷壳→糙米的转运系数与对照之间均不存在显著差异; Cd 在根系→茎叶、茎叶→谷壳的转运系数与对照之间不存在显著差异, 在谷壳→糙米的转运系数逐渐增大, 且在施加量为 2、4、8 g·kg⁻¹时, 谷壳→糙米转运系数与对照相比显著上升 ($P<0.05$); As 在茎叶→谷壳、谷壳→糙米的转运系数与对照之间不存在显著差异, 施加量为 2 g·kg⁻¹时, As 在根系→茎叶转运系数为 0.020, 与对照(0.027)相比显著上升 ($P<0.05$).

表 4 不同施加量水平下水稻各部位 Pb、Cd 和 As 转运系数

Table 4 Translocation factor of different parts of rice with different added content levers										
组配改良剂	施加量 /g·kg ⁻¹	Pb			Cd			As		
		根系→茎叶	茎叶→谷壳	谷壳→糙米	根系→茎叶	茎叶→谷壳	谷壳→糙米	根系→茎叶	茎叶→谷壳	谷壳→糙米
石灰石+海泡石+二氧化钛(LST)	0	0.029 ± 0.011a	0.251 ± 0.076a	0.471 ± 0.018b	0.224 ± 0.022bc	0.192 ± 0.029a	0.798 ± 0.156b	0.027 ± 0.001ab	0.089 ± 0.014a	0.534 ± 0.042a
	1	0.031 ± 0.010a	0.262 ± 0.062a	0.387 ± 0.070bc	0.435 ± 0.096a	0.135 ± 0.036ab	1.038 ± 0.268ab	0.029 ± 0.004a	0.095 ± 0.010a	0.491 ± 0.065a
	2	0.033 ± 0.009a	0.236 ± 0.035a	0.338 ± 0.068c	0.333 ± 0.039ab	0.127 ± 0.023ab	1.054 ± 0.493ab	0.025 ± 0.004ab	0.101 ± 0.043a	0.601 ± 0.200a
	4	0.031 ± 0.006a	0.204 ± 0.046a	0.407 ± 0.054bc	0.217 ± 0.101bc	0.189 ± 0.033a	1.052 ± 0.232ab	0.020 ± 0.006b	0.12 ± 0.041a	0.542 ± 0.097a
	8	0.034 ± 0.011a	0.198 ± 0.025a	0.367 ± 0.042c	0.198 ± 0.065bc	0.112 ± 0.038b	1.953 ± 1.123a	0.025 ± 0.002ab	0.092 ± 0.009a	0.541 ± 0.031a
	16	0.033 ± 0.009a	0.079 ± 0.016a	1.079 ± 0.000a	0.172 ± 0.067c	0.145 ± 0.062ab	1.512 ± 0.000ab	0.021 ± 0.004ab	0.105 ± 0.061a	0.639 ± 0.216a
石灰石+海泡石+硫酸铁(LSF)	0	0.029 ± 0.011a	0.251 ± 0.076a	0.471 ± 0.018a	0.224 ± 0.022a	0.192 ± 0.029a	0.798 ± 0.156c	0.027 ± 0.001a	0.089 ± 0.014a	0.534 ± 0.042a
	1	0.027 ± 0.007a	0.257 ± 0.133a	0.512 ± 0.063a	0.272 ± 0.072a	0.155 ± 0.054a	0.868 ± 0.106bc	0.022 ± 0.002ab	0.111 ± 0.038a	0.520 ± 0.204a
	2	0.025 ± 0.002a	0.233 ± 0.045a	0.472 ± 0.062a	0.273 ± 0.149a	0.115 ± 0.027a	1.398 ± 0.355ab	0.020 ± 0.003b	0.127 ± 0.012a	0.484 ± 0.063a
	4	0.038 ± 0.016a	0.227 ± 0.091a	0.555 ± 0.222a	0.219 ± 0.031a	0.139 ± 0.014a	1.720 ± 0.484a	0.021 ± 0.004ab	0.109 ± 0.008a	0.522 ± 0.038a
	8	0.034 ± 0.018a	0.259 ± 0.077a	0.501 ± 0.101a	0.257 ± 0.095a	0.125 ± 0.049a	1.630 ± 0.278a	0.022 ± 0.006ab	0.098 ± 0.006a	0.571 ± 0.053a
	16	0.038 ± 0.026a	0.305 ± 0.230a	0.643 ± 0.219a	0.201 ± 0.087a	0.196 ± 0.148a	1.336 ± 0.275abc	0.022 ± 0.002ab	0.096 ± 0.017a	0.652 ± 0.184a

2.5 糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与土壤 pH 值、交换态 Pb、Cd 和 As 含量的相关性

施用两种组配改良剂 LST 和 LSF 对土壤的 pH 值以及 Pb、Cd 和 As 的交换态含量影响显著(表 2),同时水稻各部位 Pb、Cd 和 As 含量变化显著(图 2). 为研究土壤的 pH 值以及 Pb、Cd 和 As 交换态含量对水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量的影响,分别对其做线性相关分析(表 5). 结果表明,施用组配

改良剂 LST 和 LSF,水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与土壤 pH 值的相关系数分别为 -0.518、-0.571、-0.605 和 -0.836、-0.800、-0.794,呈显著或极显著的负相关关系($n=18$, $r_{0.05}=0.468$, $r_{0.01}=0.590$);施用两种组配改良剂,水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量分别与土壤交换态含量之间存在极显著的正相关关系,相关系数分别为 0.850、0.843、0.830 和 0.909、0.828、0.926.

表 5 水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与其土壤 pH 值以及交换态含量的相关系数(r)

Table 5 Correlation coefficient of Pb, Cd and As concentrations of unpolished rice and pH & exchangeable Pb, Cd and As of soil (r)					
组配改良剂	水稻糙米中含量	土壤 pH 值以及交换态含量			
		pH	Pb	Cd	As
石灰石+海泡石+二氧化钛(LST)	Pb	-0.518 *	0.850 **	—	—
	Cd	-0.571 *	—	0.843 **	—
	As	-0.605 **	—	—	0.830 **
石灰石+海泡石+硫酸铁(LSF)	Pb	-0.836 **	0.909 **	—	—
	Cd	-0.800 **	—	0.828 **	—
	As	-0.794 **	—	—	0.926 **

1) * 和 ** 分别表示 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平, $n=18$, $r_{0.05}=0.468$, $r_{0.01}=0.590$

3 讨论

施用两种组配改良剂 LST 和 LSF 显著降低了土壤中 Pb、Cd 的生物有效性,其原因可能是石灰石中包含的 Ca^{2+} 对重金属离子具有拮抗作用,参与竞争植物根系上的吸收位点,抑制植物对重金属的吸收,减缓了重金属对植物的毒害作用,因此改善了水稻的生长状况^[20~22]. 施用组配改良剂升高了土壤 pH 值,随着土壤 pH 值的升高,带负电荷的土壤胶体对带正电荷的重金属离子吸附能力增加,另外土壤中的 Fe、Mn 等离子与 OH^- 结合形成羟基化合物为重金属离子提供了更多的吸附位点^[23],从而降低了重金属的生物有效性^[24]. 曾卉等^[25]的研究也表明,组配改良剂石灰石+海泡石的施用能有效降低盆栽土壤中重金属交换态含量,且施用量越多,降低幅度越大. 本文中施用两种组配改良剂 LST 和 LSF 显著地降低了土壤中的 Pb、Cd 交换态含量(表 2)与之相一致.

施用 LST 和 LSF 显著降低了土壤中 As 的生物有效性. 影响土壤 As 生物有效性的因素很多. 一方面,土壤 pH 值越高,土壤对 As 的吸附性越差,土壤溶液中的 As 含量就越大^[26,27]; 另一方面,二氧化钛和硫酸铁均能提高土壤对 As 的吸附性. 研究表明^[28],铁在 pH 较高时对土壤中的 As 也有较好的钝化效果; 肖亚兵等^[29]研究了纳米 TiO_2 对砷(Ⅲ)和砷(Ⅴ)的吸附行为,结果表明:纳米 TiO_2 在 pH 1~10 范围内对 As(Ⅲ)和 As(Ⅴ)的吸附率可达 99%. 付建丽^[30]研究了负载型 TiO_2 对 As(Ⅲ)的吸附,结果表明,在溶液 pH 值为 8.0 时负载型 TiO_2 可将 As(Ⅲ)定量吸附. 硫酸铁对土壤 As 的固定机理是由于 Fe^{3+} 与砷酸根的共沉淀作用^[31,32]. 在本研究中,随着两种组配改良剂施用量的增加,土壤 pH 值显著上升而土壤 As 的生物有效性显著降低,这与前人的研究结果不同^[33],其可能是因为 TiO_2 对 As 的吸附性以及 Fe 元素对 As 有效性降低的影响大于 pH 值对其活化的影响.

两种组配改良剂的不同浓度处理下, Pb 和 As 在水稻各部位的转运系数为谷壳→糙米>茎叶→谷壳>根系→茎叶,说明水稻各部位对 Pb 和 As 的转运能力为谷壳>茎叶>根系; Cd 在水稻各部位的转运系数为谷壳→糙米>根系→茎叶>茎叶→谷壳,说明水稻各部位对 Cd 的转运能力为谷壳>根系>茎叶,可见谷壳向糙米转运 Pb、Cd 和 As 的能力很强. 水稻中 Pb、Cd 和 As 的谷壳到糙米的转运

系数 Cd 明显高于 Pb 和 As,说明水稻对不同元素的转运能力不同,这与莫争等^[34]的研究结果一致. 随着两种组配改良剂 LST 和 LSF 施用量的增加, Pb、Cd 和 As 在谷壳→糙米转运系数无显著差异(表 4),水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 吸收累积量却显著降低(图 2),说明组配改良剂对 Pb、Cd 和 As 的抑制作用主要发生在土壤中,而不是靠抑制水稻器官的转运能力来实现.

通过分析水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量变化情况发现,虽然两种组配改良剂均使水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量显著降低,并且 Pb、Cd 含量能低于国家食品中污染物限量标准(GB 2762-2012),但由于供试土壤 As 污染非常严重,因此稻米中的 As 含量在本研究中还没有达到国家标准. 如果将本项目的组配改良剂应用到中度或中轻度复合污染的稻田中,将有可能使这 3 个元素在糙米中的含量同时达到国家标准.

周航等^[24]研究发现,土壤中 Pb、Cd 和 As 的交换态含量与水稻糙米中含量存在显著的正相关关系,说明土壤 Pb、Cd 和 As 的交换态含量能在一定程度上反映土壤中 Pb、Cd 和 As 的生物有效性. LST 和 LSF 显著降低了土壤中 Pb、Cd 和 As 交换态含量(表 2),而土壤中 Pb、Cd 和 As 的交换态含量与水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 交换态含量之间存在极显著的正相关关系(表 5). 这一研究结果与 Zhou 等^[35]和竺朝娜等^[37]的研究结果相同.

4 结论

(1) 与对照相比,组配改良剂 LST 和 LSF 均使土壤 pH 值上升,且与对照之间均存在显著差异($P < 0.05$); 两种组配改良剂相比, LST 比 LSF 使土壤 pH 值上升的更多.

(2) 施用 1~16 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 LST 和 LSF 使土壤中 Pb、Cd 和 As 的交换态含量分别降低 16.8%~88.3%、22.4%~73.7%、2.25%~43.8% 和 20.2%~86.9%、20.7%~51.2%、18.0%~55.1%,均与对照之间存在显著差异. LST 和 LSF 均能显著降低水稻植株对 Pb、Cd 和 As 的吸收. 当 LST 和 LSF 施加量为 16 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,糙米中 Pb、Cd 和 As 的含量最高分别降低了 50.7%、64.7%、34.1% 和 40.7%、40.7%、36.2%.

(3) 水稻各部位对 Pb 和 As 的转运能力为谷壳>茎叶>根系,对 Cd 的转运能力为谷壳>根系>茎叶,水稻中谷壳向糙米转运 Pb、Cd 和 As 的能力

为 $Cd > As > Pb$ 。

(4)施加 LST 和 LSF 后,水稻糙米中 Pb、Cd 和 As 含量与土壤 Pb、Cd 和 As 交换态含量之间存在极显著的正相关关系,与土壤 pH 值之间存在显著的负相关关系。

参考文献:

- [1] 郭伟,朱永官,梁永超,等. 土壤施硅对水稻吸收砷的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1393-1397.
- [2] 许超,夏北成,吴海宁,等. 酸性矿山废水污染区水稻土重金属的形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 900-906.
- [3] 骆永明. 中国土壤环境污染态势及预防、控制和修复策略[J]. 环境污染与防治, 2009, **31**(12): 27-31.
- [4] 夏家洪,骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. 生态与农村环境学报, 2007, **23**(1): 1-6.
- [5] Stewart A R, Malley D F. Effect of metal mixture (Cu, Zn, Pb, and Ni) on cadmium partitioning in littoral sediments and its accumulation by the fresh water macrophyte *Eriocaulon septangulare* [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1999, **18**(3): 436-447.
- [6] 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.
- [7] 张潮海,华村章,邓汉龙,等. 水稻对污染土壤中镉、铅、铜、锌的富集规律的探讨[J]. 福建农业学报, 2003, **18**(3): 147-150.
- [8] 郭观林,周启星,李秀颖,等. 重金属污染土壤原位化学固定修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(10): 1990-1996.
- [9] 王春旭,李生志. 环境中砷的存在形态研究[J]. 环境科学, 1993, **14**(4): 53-57.
- [10] 李丽君,张强,白光洁,等. 改良剂与油菜对土壤重金属有效态的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1): 246-252.
- [11] 周利强,尹斌,吴龙华,等. 有机物料对污染土壤上水稻重金属吸收的调控效应[J]. 土壤, 2013, **45**(2): 227-232.
- [12] 丁凌云,蓝崇钰,林建平,等. 不同改良剂对重金属污染农田水稻产量和重金属吸收的影响[J]. 生态环境, 2006, **15**(6): 1204-1208.
- [13] Mench M, Bussi re S, Boisson J, et al. Progress in remediation and revegetation of the barren Jales gold mine spoil after *in situ* treatments[J]. Plant and Soil, 2003, **249**(1): 187-202.
- [14] 李士杏,骆永明,章海波,等. 不同性质铁铝土对砷酸根吸附特性的比较研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(3): 474-480.
- [15] Liu H Y, Probst A, Liao B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. Science of the Total Environment, 2005, **339**(1-3): 153-166.
- [16] Lei M, Zhang Y, Khan S, et al. Pollution, fractionation, and mobility of Pb, Cd, Cu, and Zn in garden and paddy soils from a Pb/Zn mining area [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **168**(1-4): 215-222.
- [17] 武斌,廖晓勇,陈同斌,等. 石灰性土壤中砷形态分级方法的比较及其最佳方案[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(9): 1467-1473.
- [18] 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.
- [19] 吴玉俊,周航,朱维,等. 碳酸钙和海泡石组配水稻中 Pb 和 Cd 迁移转运的影响[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(8): 4047-4054.
- [20] 杜彩艳,祖艳群,李元. 施用石灰对 Pb、Cd、Zn 在土壤中的形态及大白菜中累积的影响[J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1710-1713.
- [21] 汪洪,周卫,林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, **7**(1): 78-87.
- [22] 陈宏,陈玉成,杨学春. 石灰对土壤中 Hg Cd Pb 的植物可利用性的调控研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(5): 549-552.
- [23] 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.
- [24] 周航,周歆,曾敏,等. 2 种组配改良剂对稻田土壤重金属有效性的效果[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 437-444.
- [25] 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.
- [26] 陈静,王学军,朱立军. pH 值和矿物成分对砷在红土中迁移的影响[J]. 环境化学, 2003, **22**(2): 121-125.
- [27] 雷梅,陈同斌,范稚连,等. 磷对土壤中砷吸附的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(11): 1989-1992.
- [28] Kim J Y, Davis A P, Kim K W. Stabilization of available arsenic in highly contaminated mine tailings using iron [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(1): 189-195.
- [29] 肖亚兵,钱沙华,黄淦泉,等. 纳米二氧化钛对砷(Ⅲ)和砷(Ⅴ)吸附性能的研究[J]. 分析科学学报, 2003, **19**(2): 172-174.
- [30] 付建丽. 负载型二氧化钛对 As(Ⅲ)的吸附[D]. 成都:四川大学, 2006.
- [31] 蒋国民,王云燕,柴立元,等. 高铁酸钾处理含砷废水[J]. 过程工程学报, 2009, **9**(6): 1109-1114.
- [32] Lenoble V, Laclautre C, Deluchat V, et al. Arsenic removal by adsorption on iron (III) phosphate [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, **123**(1-3): 262-268.
- [33] Masscheleyn P H, Delaune R D, Patrick Jr W H, et al. Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil [J]. Environmental Science & Technology, 1991, **25**(8): 1414-1419.
- [34] 莫争,王春霞,陈琴,等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, **21**(2): 110-116.
- [35] Zhou H, Zhou X, Zeng M, et al. Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **101**: 226-232.
- [36] 竺朝娜,冯英,胡桂仙,等. 水稻糙米砷含量及其与土壤砷含量的关系[J]. 核农学报, 2010, **24**(2): 355-359.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行