

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

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 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

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

曾卉, 周航, 邱琼瑶, 廖柏寒*

(中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要: 通过盆栽试验, 研究组配固化剂石灰石 + 海泡石在不同施用量(0、1.0、2.0、4.0、8.0、16.0 g·kg⁻¹)下, 盆栽土壤中重金属 Pb、Cd、Zn 交换态含量的变化与在水稻根、茎、壳和糙米的累积分布. 结果表明: ①土壤中 Pb、Cd 和 Zn 交换态含量随着组配固化剂施用量的增加呈明显降低趋势, 交换态含量较对照分别降低了 15.3% ~ 99.9%、9.2% ~ 99.9% 和 7.0% ~ 99.9%, 有效缓解了水稻对土壤 Pb、Cd 和 Zn 的吸收. ②水稻生长状况得到改善, 株高随组配固化剂施用量的增加逐渐上升. 施用量在 1.0 g·kg⁻¹ 时, 谷粒产量最大, 与对照相比, 增产 60.4%. 水稻各器官对 Pb、Cd、Zn 的吸收随施用量的增加逐渐下降; 与对照相比, 施用 1.0 ~ 16.0 g·kg⁻¹ 的组配固化剂后糙米中 Pb、Cd 和 Zn 含量下降幅度分别为 2.2% ~ 13.1%、29.3% ~ 79.3% 和 19.5% ~ 43.3%.

关键词: 石灰石 + 海泡石; 重金属 Pb、Cd、Zn; 盆栽试验; 土壤; 水稻

中图分类号: X171; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0727-06

Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants

ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, LIAO Bo-han

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

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of a group matching curing agent (limestone plus sepiolite) with different concentrations (0, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0 g·kg⁻¹) on the exchangeable Pb, Cd, and Zn contents in the potted soil collected from a mining area in southern China and their cumulative distribution in rice plants. The results showed that: ① Exchangeable Pb, Cd, and Zn contents in the potted soils decreased obviously with the increase in the amounts of group matching curing agent by 15.3% - 99.9%, 9.2% - 99.9%, and 7.0% - 99.9%, respectively, compared with the CK, indicating that the addition of limestone plus sepiolite effectively inhibited the uptake of Pb, Cd, Zn from soils into rice plants. ② Growth conditions of rice plants were improved, and the heights of rice plants increased with the increase in the amounts of group matching curing agent. The rice yield reached the optimal level and was increased by 60.4% compared with the CK, when the amount of limestone plus sepiolite was 1.0 g·kg⁻¹. The uptake of heavy metals in different organs of rice plants decreased obviously with the increasing amounts of the group matching curing agent, and the Pb, Cd, and Zn contents of rice grains decreased by 2.2% - 13.1%, 29.3% - 79.3%, 19.5% - 43.3% with different concentrations (1.0 - 16.0 g·kg⁻¹) of the group matching curing agent, respectively, compared with the CK.

Key words: limestone plus sepiolite; heavy metal Pb, Cd, Zn; pot experiment; soil; rice

土壤重金属污染已成为一个危及全球环境质量的重要问题^[1-3]. 重金属污染具有隐蔽性、滞后性、累积性和不可逆性, 且很难治理, 不仅会影响粮食作物产量和质量, 还会通过植物的积累进入食物链, 对人体健康造成严重危害. 重金属污染的来源主要有采矿、冶炼、电镀、化工等工业“三废”的排放以及农业生产中农药化肥的不合理施用等. 因此, 治理土壤重金属污染一直是国内外瞩目的热点和难点问题^[4-7].

土壤重金属污染的治理主要有物理、化学方法, 农业措施与植物修复等, 目前研究最为广泛的是化学固定方法, 即施用土壤固化剂, 如石灰石、碱性

磷酸盐等. 这类固化剂可提高土壤 pH 值, 促使 Cd、Hg、Cu、Zn 等形成碳酸盐或氢氧化物沉淀, 降低其活性^[8,9], 同时石灰石中的 Ca 元素本身对减轻 Cd 的危害也有直接作用^[10-12]. 目前对不同固化剂的组配施用研究较少. 本试验以石灰石 + 海泡石作为重金属固化剂施用于盆栽土壤中, 以模拟水稻-土壤系统为研究对象, 探讨组配固化剂在不同施用量下

收稿日期: 2013-05-25; 修订日期: 2013-08-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201009047); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07212-001-05); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 曾卉(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染修复技术, E-mail: luckyhui154@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liaobh1020@163.com

对土壤中重金属交换态含量以及在水稻根、茎、壳和糙米中累积分布的影响,以期为重金属污染地区土壤改良及治理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试水稻品种为中稻Ⅱ优93,由湖南亚华种业科学研究院提供(湘审稻2006031,属三系杂交中熟中粳);石灰石为天津市大茂化学试剂厂提供的分

析纯石灰石,石灰石中Pb、Cd、Zn含量分别为3.69、0、0 mg·kg⁻¹;海泡石为宁乡矿石厂提供,海泡石中Pb、Cd、Zn含量分别0.62、0、0 mg·kg⁻¹;试验所用试剂均为优级纯或分析纯;供试土壤采自湘南某铅锌矿区附近重金属污染农田(N26°34.265',E112°36.144'),土壤类型为红黄色土壤。土样采回后,将土块压碎,除去残根、杂物,铺成薄层在阴凉、洁净、无污染处自然风干。施用组配固化剂前土壤主要理化性质如表1。

表1 固化前土壤基本理化性质

土壤类型	pH	CEC /cmol·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	重金属总量/mg·kg ⁻¹			重金属交换态含量/mg·kg ⁻¹		
				Pb	Cd	Zn	Pb	Cd	Zn
黄红壤	5.58	2.22	14.87	965.84	9.24	1164.72	160.25	8.14	136.83

1.2 试验设计

盆栽试验在室外进行,该地气候特征为中亚热带季风湿润气候,年均气温在16.6~19.2℃之间,年平均降水量在1223~1421 mm之间。将风干后土样填装于盆栽桶中,每桶装4.0 kg土,施入底肥磷酸铵、磷酸钾、和尿素,施用量P:0.10 g·kg⁻¹(以P₂O₅计)、N:0.50 g·kg⁻¹,K:0.15 g·kg⁻¹(以K₂O计),以溶液形式加入使土壤自然湿润,使其更趋近于稻田土壤。组配固化剂石灰石+海泡石,按质量比2:1^[13]混合均匀,设置0、1.0、2.0、4.0、8.0、16.0 g·kg⁻¹这6个添加水平,分别施入盆栽土壤中,拌匀。每个处理设3个重复,土壤培养两周,期间保持土壤湿润。与土壤相比,由于组配固化剂中Pb、Cd、Zn含量很低,施用量也很少,所以由组配固化剂带入的重金属可以忽略不计。2012年5月底将水稻秧苗移入盆中,每盆1株,所选秧苗均形态相近且长势优良。整个水稻生长期采用淹水灌溉,定期浇水,2012年9月初水稻成熟,成熟后进行采样收割。

将采集的水稻植株带回实验室后,用自来水和蒸馏水洗净,晾干后放入烘箱,105℃杀青30 min,然后在70℃烘干至恒重,水稻各部位(根、茎叶、谷壳和糙米)分开称重,用小型粉碎机粉碎,过100目尼龙筛,保存待测。采集水稻植株根际土壤,风干磨碎,分别过10目与100目筛,保存备用。

土壤pH值用酸度计(pHs-3C,上海精密科学仪器有限公司)测定,固液比值为=1:2.5^[14];有机质采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定^[13];土壤阳离子交换量采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定^[15];土壤重金属总量测定采用王水-高氯酸消解^[14];水

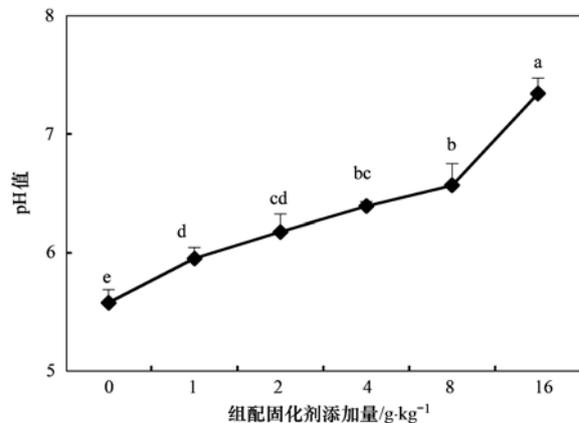
稻各部位重金属(Pb、Cd和Zn)含量采用干灰化法消解(GB/T 5009-2003)。重金属交换态含量通过Tessier连续提取法获得(提取剂为1 mol·L⁻¹ MgCl₂)^[16];重金属浓度用原子吸收分光光度计(日立Z-2000)测定。试验数据用Excel 2010与SPSS 18.0处理分析。

2 结果与分析

2.1 组配固化剂对土壤pH值和土壤交换态重金属含量的影响

2.1.1 组配固化剂对土壤pH值的影响

由图1可知,对照土壤(未添加组配固化剂处理)pH=5.58,施用组配固化剂后(石灰石+海泡石),土壤pH值逐渐升高。分析表明,土壤pH值与组配固化剂的施用量呈极显著正相关关系($R^2 =$



图中每一系列数据中无相同字母表示差异显著,显著水平 $\alpha=0.05$,下同

图1 组配固化剂对盆栽土壤pH的影响

Fig. 1 Effects of the group matching curing agent amount on the pH values of the potted soils

0.891; $n = 6$, $R_{0.01}^2 = 0.841$, $R_{0.05}^2 = 0.657$). 当施用量为 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤 pH 值达到最高值 7.34, 与对照相比, 升高了 1.76. 由此可见, 组配固化剂的施用, 能有效提高土壤 pH 值, pH 值升高是由于 CaCO_3 能促进 Al^{3+} 的水解, 中和水解过程产生的 H^+ 从而有效地中和土壤活性酸度和潜在酸度^[17,18].

2.1.2 组配固化剂对土壤交换态重金属含量的影响

由图 2 可知, 对照土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量分别为 147.75 、 6.55 、 $119.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 随着组配固化剂施用量的增加, 土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量呈明显下降趋势. 分析表明, 土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量与海泡石 + 石灰石施用量均呈显著负相关关系 ($R_{\text{Pb}}^2 = 0.697$, $R_{\text{Cd}}^2 = 0.799$, $R_{\text{Zn}}^2 = 0.824$; $n = 6$, $R_{0.01}^2 = 0.841$, $R_{0.05}^2 = 0.657$), Pb、Cd、Zn 交换态含量也均与土壤 pH 值呈显著负相关关系 ($R_{\text{Pb}}^2 = 0.721$, $R_{\text{Cd}}^2 = 0.760$, $R_{\text{Zn}}^2 = 0.762$; $n = 6$, $R_{0.01}^2 = 0.841$, $R_{0.05}^2 = 0.657$). 当添加量达到最高用量 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 土壤 Pb、Cd、Zn 交换态含量均低于检测限, 施用组配固化剂后, 土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量的降低幅度分别为 $15.3\% \sim 99.9\%$ 、 $9.2\% \sim 99.9\%$ 和 $7.0\% \sim 99.9\%$. 由此可见, 组配固化剂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.

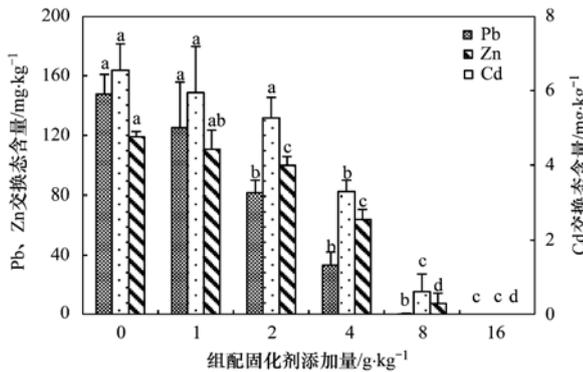


图 2 组配固化剂对盆栽土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量的影响

Fig. 2 Effects of the group matching curing agent amount on the exchangeable Pb, Cd, Zn contents in soils

2.2 组配固化剂对水稻生长状况的影响

水稻株高随着海泡石 + 石灰石施用量的增加逐渐上升, 这表明组配固化剂对重金属的固化与毒性缓解, 有利于植物生长 (图 3). 谷粒产量随着施用量的增加, 先上升再下降, 原因可能是试验中发现株高过高的水稻易出现轻微倒伏现象, 因此其营养物质不能充分转运到籽粒上, 从而影响水稻的结籽率.

由图 3 可知, 与对照相比, 组配固化剂施用量为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 谷粒产量达到最高 51.33 g , 增加了 60.4% , 其次是施用量为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 谷粒产量 49.33 g , 增加了 54.2% . 有研究表明, 在一定范围内, 随着水稻株高增加, 产量也相应增加, 超出一定范围, 随着株高增加, 产量反而下降^[19,20].

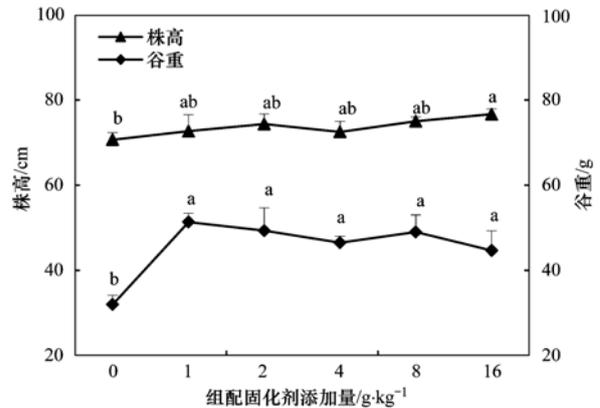


图 3 组配固化剂对盆栽水稻株高、产量的影响

Fig. 3 Effects of the group matching curing agent amount on the plant heights and the yields of rice

2.3 组配固化剂对水稻各器官重金属含量的影响

2.3.1 组配固化剂施用对水稻根中重金属含量的影响

由表 2 可知, 对照组的水稻根中 Pb、Cd、Zn 含量分别为 1278.95 、 32.78 、 $163.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 施用了组配固化剂后, 根中 Pb、Cd 含量大幅下降, 且随着施用量的增加逐渐下降, 当施用量为 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 根中 Pb、Cd 含量分别降为 $694.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $11.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 与对照相比, 当组配固化剂施用量为 $1.0 \sim 16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 水稻根中 Pb 和 Cd 含量分别下降了 $5.1\% \sim 45.7\%$ 和 $1.0\% \sim 64.6\%$. 根中 Zn 含量也明显下降, 但在施用量为 $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, Zn 含量达到最低. 与对照相比, 施用了组配固化剂后的盆栽水稻根中 Zn 含量下降了 $17.5\% \sim 46.4\%$. 这说明, 海泡石 + 石灰石对降低水稻根中重金属 Pb、Zn 含量有较好效果, 对 Cd 效果最明显, 对 3 种重金属的抑制效果表现为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$. 显然, 石灰石 + 海泡石能有效缓解水稻根对重金属的吸收, 原因是随着组配固化剂的添加, 土壤中交换态重金属含量显著降低, 可利用态重金属减少 (图 2).

2.3.2 组配固化剂施用对水稻茎中重金属含量的影响

由表 3 可知, 对照组茎中 Pb、Cd、Zn 含量分别为 34.18 、 1.98 、 $126.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 组配固化剂海泡

石 + 石灰石使茎中 Pb、Cd、Zn 含量呈明显下降趋势。分析表明,茎中 Zn 含量与海泡石 + 石灰石施用量极显著负相关($R_{Zn}^2 = 0.852$; $n = 6$, $R_{0.01}^2 = 0.841$, $R_{0.05}^2 = 0.657$)。当施用量为 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,茎中 Cd、Zn 含量分别达到最低值 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $57.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与对照相比,施用组配固化剂后,盆栽水稻茎中 Pb、Cd、Zn 含量分别下降了 $51.3\% \sim 58.8\%$ 、 $4.2\% \sim 63.9\%$ 、 $23.2\% \sim 54.7\%$ 。这说明,海泡石 + 石灰石能有效降低水稻茎中重金属 Pb、Cd、Zn 含量,施用量越大,降低越明显,对 3 种重金属的抑制效果表现为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$ 。

表 2 组配固化剂对水稻根中重金属的影响

Table 2 Effects of the group matching curing agent amount on the contents of heavy metals in the rice roots

组配固化剂施用量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0	903.77 + 4.70a	13.64 + 1.08a	243.25 + 1.00a
1	881.13 + 18.45ab	11.91 + 0.95a	241.80 + 2.78b
2	884.13 + 27.88bc	12.51 + 1.72ab	241.40 + 5.20b
4	932.38 + 13.78c	10.96 + 0.60ab	240.28 + 4.08ab
8	893.38 + 1.53d	13.09 + 0.33ab	242.93 + 1.33b
16	937.15 + 31.14c	13.36 + 0.74b	234.43 + 7.39ab

表 3 组配固化剂对水稻茎中重金属的影响

Table 3 Effects of the group matching curing agent amount on the contents of heavy metals in the rice stems

组配固化剂施用量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0	34.18 + 6.06a	1.98 + 0.32a	126.52 + 3.74a
1	16.63 + 3.12b	1.90 + 0.28ab	97.18 + 6.83b
2	14.37 + 4.21b	1.13 + 0.53bc	84.02 + 7.05c
4	15.23 + 1.38b	1.05 + 0.55c	74.85 + 3.85cd
8	15.58 + 1.73b	0.75 + 0.40c	70.88 + 3.18d
16	14.08 + 2.84b	0.72 + 0.23c	57.32 + 3.80e

2.3.3 组配固化剂施用对水稻壳中重金属含量的影响

由表 4 可知,对照组的壳中 Pb、Cd、Zn 含量分别为 2.73 、 2.02 、 $33.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 随着组配固化剂施用量的增加,壳中 Zn 含量呈明显下降趋势。壳中 Zn 含量与组配固化剂(海泡石 + 石灰石)施用量呈极显著负相关关系($R_{Zn}^2 = 0.776$; $n = 6$, $R_{0.01}^2 = 0.841$, $R_{0.05}^2 = 0.657$)。与对照相比,当组配固化剂施用量为 $16.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Zn 含量最低,为 $9.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,施用量为 $8.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Pb、Cd 含量最低,分别为 $11.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。施用了组配固化剂后,水稻壳中 Pb、Cd、Zn 含量分别下降了 $33.5\% \sim 70.7\%$ 、 $46.7\% \sim 83.9\%$ 、 $27.8\% \sim$

73.4% 。说明海泡石 + 石灰石能有效降低水稻壳中重金属 Pb、Cd、Zn 含量,且随着施用量的增加,降低幅度越大。对 3 种重金属的抑制效果表现为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 。

表 4 组配固化剂对水稻壳中重金属的影响

Table 4 Effects of the group matching curing agent amount on the contents of heavy metals in the rice husks

组配固化剂施用量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0	2.73 + 0.60a	2.02 + 0.09a	33.85 + 1.59a
1	1.82 + 0.25ab	0.58 + 0.29bc	24.43 + 1.22b
2	1.22 + 0.57ab	1.07 + 0.45b	22.65 + 1.34b
4	1.15 + 0.35ab	1.08 + 0.08b	16.83 + 0.98c
8	0.80 + 0.00b	0.33 + 0.03c	11.38 + 2.03d
16	1.47 + 0.46ab	0.37 + 0.13c	9.02 + 2.84d

2.3.4 组配固化剂施用对水稻糙米中重金属含量的影响

随着施用量的增加,海泡石 + 石灰石使糙米中 Cd、Zn 含量呈明显下降趋势。由表 5 可知,对照组的糙米中 Pb、Cd、Zn 含量分别为 5.21 、 2.18 、 $76.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,当固化剂施用量为 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Cd、Zn 含量分别降为最低的 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $43.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,下降幅度分别为 79.3% 和 43.3% 。海泡石 + 石灰石施用量对糙米中 Pb 含量影响较小,固化剂施用量为 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Pb 含量降为最低 $4.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与对照相比,Pb 含量下降 13.1% 。可见,海泡石 + 石灰石对降低水稻糙米中重金属 Cd、Zn 的效果较好,固化剂施用量越大,降低越明显,但是对 Pb 效果一般。对 3 种重金属的抑制效果表现为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 。5 个梯度下,即使糙米中 Pb、Cd 含量达到最低,依然没有达到食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中糙米 $\text{Pb} \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Cd} \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的要求。

表 5 组配固化剂对水稻米中重金属的影响

Table 5 Effects of the group matching curing agent amount on the contents of heavy metals in the brown rice

组配固化剂施用量/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn 含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0	5.21 + 0.48a	2.18 + 0.05a	76.03 + 6.59a
1	5.09 + 0.43a	1.44 + 0.42ab	61.22 + 7.05c
2	4.98 + 0.32a	0.91 + 0.36bc	57.88 + 1.63b
4	4.53 + 0.35a	1.54 + 0.39ab	53.80 + 3.00b
8	4.78 + 0.25a	1.23 + 0.48b	51.30 + 0.20bc
16	4.64 + 0.17a	0.45 + 0.35c	43.08 + 4.87c

3 讨论

3.1 组配固化剂固化重金属污染土壤的机制及效果
试验结果表明,随着组配固化剂施用量的增加,

土壤中 Pb、Cd、Zn 交换含量逐渐降低(图 2),有效抑制了水稻对 Pb、Cd、Zn 的吸收(表 2~5),使水稻产量有所增加(图 3). 土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量与组配固化剂施用量、土壤 pH 值均呈显著负相关关系,土壤 pH 值与组配固化剂的施用量呈极显著正相关关系. 土壤溶液中 OH^- 增加,与重金属形成氢氧化物沉淀,海泡石通过吸附与离子交换作用也可固定一部分重金属,有机质、铁锰氧化物等作为土壤吸附重金属的主要载体,与重金属结合更牢固,从而降低重金属生物活性^[21,22]. 同时,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^[21,23,24].

3.2 Pb、Cd、Zn 在水稻根、茎、壳、糙米中的积累分布及迁移能力的差异性

在表 2~5 中,Pb 在水稻植株中含量分布为根 > 茎 > 糙米 > 壳,Cd 含量的分布为根 > 茎 ≈ 糙米 ≈ 壳,Zn 含量的分布为根 > 茎 > 糙米 > 壳,Pb、Cd、Zn 在水稻各器官中的分布存在一定差异,根中重金属含量最高. 这与莫争等^[25]研究的结果一致:重金属在水稻植株不同部位的积累分布为:根部 > 根基茎 > 主茎 > 穗 > 籽实 > 叶部. 组配固化剂对水稻器官中各重金属的降低效果也有明显差异,效果排序表现为:水稻根中 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$,茎中 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Zn}$,壳中 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$,糙米中 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$. 由此可知,组配固化剂对 Cd 的降低效果最好,Zn 次之,Pb 最差,这与重金属在水稻植株中的迁移能力有关. 由以上排序可看出,3 种重金属在水稻器官中的迁移能力表现为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$. 这也与莫争^[25]等研究的结果一致:重金属在水稻植株中迁移能力的大小依次为: $\text{Cd}, \text{Cr} > \text{Zn}, \text{Cu} > \text{Pb}$.

3.3 不同组配固化剂施用量对水稻谷粒产量及糙米中重金属含量的影响

由图 3 可看出,组配固化剂施用量为 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,能使水稻谷粒增产 60.4%,而糙米中 Pb、Cd、Zn 含量仅降低 2.2%、33.7%、19.5%;施用量为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,谷粒增产 54.2%,糙米中 Pb、Cd、Zn 含量降低 4.5%、58.2%、23.9%;在最大施用量 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,谷粒仅增产 39.6%,糙米中 Pb、Cd、Zn 含量降低 13.1%、79.3%、43.3%. 在几个施用量下,即使糙米 Pb、Cd 含量降为最低的 $4.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,也仍然没有达到食品中污染物限量标准(GB 2762-2012)中糙米 $\text{Pb} \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

$\text{Cd} \leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的要求.

因此,该组配固化剂最好应用于中度或轻度重金属污染土壤. 在重金属严重污染的地区,土壤经过固化剂改良后,可以考虑种植一些对 Pb、Cd 吸收较弱的经济类作物或在污染土上开展旱作种植,降低重金属的迁移能力. 该试验中,随着组配固化剂施用量的增加,水稻糙米产量先增后减,糙米中重金属含量呈现递减趋势. 考虑到组配固化剂对水稻糙米中重金属的降低效果、大剂量组配固化剂对水稻谷粒产量的抑制和组配固化剂的成本费用,本研究认为 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 应该是较理想的组配固化剂施用量.

4 结论

(1) 石灰石 + 海泡石能有效降低土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量,且随着施用量的增加逐渐降低,与对照相比,土壤中 Pb、Cd、Zn 交换态含量分别下降了 15.3%~99.9%、9.2%~99.9%、7.0%~99.9%.

(2) 石灰石 + 海泡石有效抑制了制水稻对重金属的吸收,改善了水稻生长状况,减缓了重金属对水稻植株的毒害. 在组配固化剂施用量为 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,谷粒重最高,产量较对照提高 60.4%,施用量为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,谷粒增产 54.2%.

(3) 所有处理下,对抑制水稻吸收重金属的效果:水稻根中 Pb、Cd、Zn 含量分别下降 5.1%~45.7%、1.0%~64.6%、17.5%~46.4%;糙米中 Pb、Cd、Zn 含量分别下降 2.2%~13.1%、29.3%~79.3%、19.5%~43.3%.

(4) 综合考虑组配固化剂对水稻器官中重金属的降低效果、对水稻产量的影响及组配固化剂的成本费用,得出 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是较理想的施用量.

参考文献:

- [1] Purves D. Trace element contamination of the environment[M]. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1985.
- [2] 杨科璧. 中国农田土壤重金属污染与其植物修复研究[J]. 世界农业, 2007, (8): 58-61.
- [3] 梁家妮, 马友华, 周静. 土壤重金属污染现状与修复技术研究[J]. 环境整治, 2004, 12(4): 45-49.
- [4] 雷鸣, 曾敏, 郑表明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土壤重金属污染及其潜在风险评价[J]. 环境科学学报, 2008, 28(6): 1212-1220.
- [5] 李永华, 王五一, 杨林生, 等. 湘西多金属矿区汞铅污染土壤的环境质量[J]. 环境科学, 2005, 26(5): 187-191.
- [6] 夏家淇, 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.
- [7] 陈程, 陈明. 环境重金属污染的危害与修复[J]. 环境保护,

- 2010, (3): 55-57.
- [8] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, **35**(3): 367-370.
- [9] 廖柏寒, 曾敏, 张永, 等. CaCO_3 对 Cd 和几种营养元素在红壤-黄豆系统中的调控作用[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(6): 57-61.
- [10] Skorzynska P E, Tukendorf A, Selstam E, *et al.* Calcium modifies Cd effect on runner bean plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1998, **40**(3): 275-286.
- [11] Zhao X L, Saigusa M. Fractionation and solubility of cadmium in paddy soils amended with porous hydrated calcium silicate[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(3): 343-347.
- [12] 章明奎, 符娟林, 黄昌勇. 杭州市居民区土壤重金属的化学特性及其与酸缓冲性的关系[J]. 土壤学报, 2005, **42**(1): 44-51.
- [13] 曾卉, 徐超, 周航, 等. 几种固化剂组配修复重金属污染土壤[J]. 环境化学, 2012, **31**(9): 1368-1374.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. 30-35.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 12-14, 109, 208-211, 334-335.
- [16] 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.
- [17] 彭克明. 农业化学[M]. 北京: 农业出版社, 1998. 45-49.
- [18] 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.
- [19] 唐甫林, 胡石海, 侯秀芳, 等. 水稻株高对经济系数及产量影响的初探[J]. 上海农业科技, 2000, (5): 18-19.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 李瑞美, 王果, 方玲. 钙镁磷肥与有机物料配施对作物镉铅吸收的控制效果[J]. 土壤与环境, 2002, **11**(4): 348-351.
- [23] 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]. 植物营养与肥料科学, 2001, **7**(1): 78-87.
- [24] 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.
- [25] 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.

CONTENTS

Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China	WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401)
Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing	TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411)
Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing	ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418)
Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing	WANG Yan-hui, XIAO Yao (428)
Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring	XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436)
Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing	WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442)
Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451)
Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City	SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458)
Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou	QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464)
Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis	SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470)
Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea	XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475)
Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data	LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area	HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490)
Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation	JIA Long, XU Yong-fu (495)
Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China	DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504)
Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area	QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513)
Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520)
Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends	LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526)
Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting	ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533)
Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition	HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541)
Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian	ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547)
Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study	JIA Hai-feng, GUO Yu (555)
Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain	GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562)
Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary	ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569)
Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577)
Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area	CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585)
Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands	BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592)
Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i>	ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597)
Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water	TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605)
Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611)
Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride	SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619)
Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System	FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety	YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633)
Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment	LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643)
Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter	LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651)
Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process	CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657)
Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes	ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663)
Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster	HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669)
Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition	WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678)
Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684)
Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China	ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692)
Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site	ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704)
Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China	ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711)
Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River	TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719)
Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants	ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727)
Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites	YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733)
Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1	ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740)
Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture	CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746)
Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou	GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753)
Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles	ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759)
Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea	ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764)
Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i>	WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770)
Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System	LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780)
Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary	LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786)
Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies	ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行