

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响

王美娥, 彭驰, 陈卫平*

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 水稻镉污染是我国当前重要的农产品安全问题, 湖南攸县“镉大米”事件造成了严重的社会影响。针对南方酸性土壤镉污染特征, 进行了“镉大米”治理技术研究。结果表明, 当地主栽水稻品种株两优06的稻米Cd含量在大同桥和网岭镇的平均值分别为 $0.167 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.127 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为其它品种的20%左右; 石灰和矿物肥处理能够使稻米Cd含量降低到对照的20%~30%, 覆膜处理使稻米Cd含量与对照相比降低约50%, 而覆膜+生物炭+硅肥叶面肥处理能够降低80%左右, 硅肥叶面肥单独施用及叶面肥和追肥配合施用能够显著降低稻米中的Cd含量90%以上; BCR法分析土壤Cd形态结果发现, 供试大田土壤中Cd的弱酸可提取态比例较高, 绝大多数样品达到55%以上, 而施用石灰能够显著降低土壤中的弱酸可提取态和可还原态比例, 增加残渣态比例, 变化幅度达到20%左右; 土壤Cd含量与pH值是影响稻米对Cd吸收的重要因素。

关键词: 攸县; 镉大米; 镉低积累水稻品种; 原位钝化技术; Cd生物有效性

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4283-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.045

Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains

WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping*

(State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Cadmium pollution of rice is a big problem in agricultural food safety. The accident “Cd rice” occurred last year in Youxian County, Hunan Province caused serious social panic. In this study, trials on “Cd rice” controlling techniques specific to the Cd pollution in paddy soil in Youxian were investigated. It was suggested that the average Cd contents in rice grains of the rice variety “Zhu Liang You 06” in Datongqiao and Wangling were 0.167 and $0.127 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively, which were only equal to 20% of the contents of other varieties. The trials for stabilizing agents revealed that treatments of lime and mineral fertilizer decreased Cd contents in rice grains to 20-30% of the control. Plastic film-mulched treatment decreased the rice grain Cd to 50%. And combined treatment of plastic film-mulched and biochar and silicon foliar-fertilizer decreased 80% of rice Cd content. Single treatments of silicon foliar-fertilizer and combined treatment of silicon foliar-fertilizer and topdressing fertilizer decreased more than 90% of Cd content. Results of BCR revealed that the percentage of cationic exchangeable and/or carbonate associated Cd fraction was more than 55% for most of the soil samples. Lime treatment significantly decreased the percentage of cationic exchangeable and/or carbonate and oxides of Fe and Mn associated Cd and increased the crystalline structure of clay minerals associated Cd. The change rate reached about 20%. Our results suggested concentration of soil Cd and pH were the two significant factors impacting the uptake of Cd by rice grains.

Key words: Youxian County; cadmium rice; low Cd accumulation rice variety; in-situ stabilizing technique; Cd bioavailability

湖南省矿产资源丰富, 矿藏开采导致了大量耕地受到重金属污染^[1,2], 尤其是水稻土壤镉污染引起的“镉大米”已经成为了我国首要的农产品安全问题^[3~5], 湖南省攸县是我国重要的商品粮生产基地, “镉大米”事件不仅带来了严重的人体健康风险^[6~8], 而且对粮食生产和经销商造成了重大经济损失, 对社会也带来了一定的食品安全恐慌。

詹杰等^[9]指出, 土壤改良剂与Cd低积累品种的联合使用是解决当前大面积“镉大米”问题的重要途径之一。有研究结果表明, 稻米籽粒中60%的镉含量来自花期前植株中累积的Cd, 40%的镉来自成熟期吸收^[10]。稻米对镉的吸收主要受到水稻品种^[11]、土壤镉的总量及有效态含量、农业水肥管理

措施等因素的影响。不同品种水稻对土壤Cd的吸收差异很大^[12~17], 目前大多数对Cd低积累水稻品种的研究针对不同品种的筛选以及相应的栽培管理措施的优化, 很少针对大田环境下, 不同当地主栽品种之间的Cd累积程度的分析研究。由于当地农民的种植习惯、水稻本身的产量以及水稻田土壤Cd含量的空间分布差异等因素都会影响到Cd低积累品种的推广应用, 因此, 从当地大田实际种植的主栽

收稿日期: 2015-04-24; 修订日期: 2015-07-06

基金项目: 城市与区域生态国家重点实验室自主项目 (SKLURE2013-1-04)

作者简介: 王美娥(1975~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为土壤污染生态风险评价, E-mail: mewang@cees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wpchen@cees.ac.cn

品种中筛选 Cd 低积累品种具有很重要的应用价值。

土壤 Cd 的生物有效性与土壤氧化还原电位、金属硫化物以及竞争性离子有关^[18]。重金属原位化学钝化是农田土壤重金属污染治理的重要技术^[19~23],通过向土壤中施用一些重金属钝化剂,与土壤重金属之间发生吸附、沉淀、离子交换、氧化还原等一系列反应改变重金属在土壤中的存在形态^[24],降低重金属在土壤中的迁移性和生物有效性。该技术适合污染面积广,污染程度相对较轻的农田土壤治理,具有操作简单、成本低、见效快的特点。化学钝化剂包括硅钙物质、含磷材料、有机物料、黏土矿物、金属氧化物、生物炭及新型材料等。石灰、矿物肥包括硅肥是颇受关注的 Cd 污染土壤原位化学修复钝化剂,这些钝化剂除了能够降低土壤 Cd 的生物有效性以外,还能够提供作物 Si、Ca 等矿物元素,促进作物生长,增强作物抗逆能力。此外,近年来,水稻田覆膜技术由于能够使土壤表层保持厌氧环境而降低土壤 Cd 的生物有效性,同时能够增加水稻的产量而被试用于水稻土壤镉污染修复^[25]。

前期对攸县水稻田土壤的调查分析结果表明,水稻田表层土壤(0~10 cm)镉含量超标样点数达到 83% 以上,超标含量在 0.323~1.90 mg·kg⁻¹ 之间,处于轻中度污染程度。此外,攸县水稻田土壤酸化严重,土壤镉的生物有效性偏高。因此,针对攸县轻中度镉污染酸性稻田土壤的特征,筛选镉低积累主栽品种,改变土壤中镉的有效性,降低稻米对土壤镉的吸收是控制稻米镉污染的关键,基于以上目标,本研究进行了大田主栽品种采样调查、石灰处理、矿物肥和硅肥等土壤镉钝化剂和覆膜等大田试验,以期快速筛选出适合湖南中轻度污染水稻田镉大米治理的措施。

1 材料与方法

1.1 研究区域描述及样品采集方法

品种筛选采用随机采样分析主栽品种的方法,本研究分别在攸县水稻主栽区网岭镇和大同桥镇采集了 5 个村,共 18 户农户的稻米样品,分别属于 5 个主栽品种:陵两优 4024、珍山一号、中早 39、湘早籼 24 号、株两优 06 等,调查区水稻田土壤 Cd 含量在 0.100~0.304 mg·kg⁻¹ 之间,基本在土壤质量标准 0.3 mg·kg⁻¹ 以内。

试验田选择网岭镇某村,总试验田面积为 12

亩,试验分为 3 个组如表 1 所示。每个试验组的试验田连成一片,每组试验田面积约为 4 亩,不同处理田块用田埂包塑料薄膜隔开,同一处理不分区,只在采样时分 3 个区域,各区稻米和表层(0~10 cm)土壤样品采集采用 5 点混合法。于 2014 年 4 月进行早稻试验。所有处理采用株两优 06 水稻品种。试验田表层土壤(0~10 cm)Cd 平均含量为 0.479 mg·kg⁻¹,根据全国土壤污染调查公报的分级原则属于土壤 Cd 轻微污染;平均土壤 pH 值为 6.06;土壤电导率为 84.3 μS·cm⁻¹;土壤黏粒含量为 74.1%、粉粒含量为 24.6%、砂粒含量为 1.32%。

表 1 水稻田土壤降镉措施与处理

Table 1 Techniques and treatments of Cd control in paddy soils	
措施	处理
钝化剂	石灰
	生物炭
	矿物肥
	石灰 + 生物炭
	CK
覆膜	覆膜
	覆膜 + 生物炭 + 硅肥叶面肥
	CK
硅肥	叶面肥
	土壤追肥 + 叶面肥
	土壤追肥
	CK

1.2 技术应用方法

1.2.1 石灰试验方案

① 石灰种类:生石灰;② 施用时间:翻耕土壤前施入,确保犁田(打田)时混合均匀,而且尽量在插秧前 10~15 d 施入;③ 施用量:150 kg·hm⁻²;④ 施用方式:均匀撒播;⑤ 指其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式。

1.2.2 生物炭试验方案

① 生物炭种类:水稻秸秆生物炭,煅烧温度 400~450℃;② 施用时间:翻耕土壤前施入,确保犁田时混合均匀,而且尽量在插秧前 10~15 d 施入;③ 施用量:1 000 kg·hm⁻²;④ 施用方式:均匀撒播;⑤ 指其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式。

1.2.3 矿物肥试验方案

① 矿物肥种类:多元素微孔矿物肥,一种由天然富钾硅酸盐岩石与生石灰在约 200℃ 的水热条件下反应生成,主要含有元素 K、Si、Ca、Fe、Mg、B、Na、Mn 等,矿物肥由中国科学院地质与地球物理研究所提供;② 施用时间:做底肥施用;③ 施用量:

1 200 kg·hm⁻²; ④施用方式: 与复合肥或有机肥混匀撒施; ⑤指其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式。

1.2.4 覆膜技术

①膜规格: 1.7 m 宽, 5~7 μm 厚, 黑色(湖北十堰市农业局提供); ②整地: 常规耕地; ③施底肥: 底肥一次性施足, 后期不再施肥, 每亩施 N 肥(尿素%) 23 kg, P 肥[过磷酸钙, Ca(H₂PO₄)₂ 含量 44%] 11.5 kg, K 肥(95% KCl) 5 kg, 如果有有机肥可以适当施用; ④起沟: 沟宽 10~15 cm, 深约 20 cm; 厢面宽 1.5 m; ⑤打孔: 秧苗间距根据品种确定, 与常规栽培一致; ⑥催芽: 常规催芽、育秧; ⑦插秧: 秧龄 30 d 左右, 每穴移栽 2 株苗, 插秧时保持厢面露出水面; ⑧指其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式。

1.2.5 叶面肥技术

①硅肥规格和名称: 含硅胶体; ②施用时间和施用量: 水稻苗期、分蘖期和灌浆期这 3 次, 每次 200 g·hm⁻²; ③施用方式: 叶面喷施; ④指其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式。

1.2.6 土壤硅肥追肥技术

①硅肥规格和名称: 含有效 SiO₂ 达 50% 以上; ②施用时间和施用量: 分蘖后期一次, 150 kg·hm⁻²; ③施用方式: 播撒田间; ④指其它水分、农药和化肥管理按照常规水稻栽培方式。

1.3 土壤和稻米样品重金属 Cd 分析测定

土壤 Cd 含量分析采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸四酸法消煮, 石墨炉原子吸收分光光度法(GB/T 17141-1997)分析测定. 选择 GSS-5 土壤标准物作为质量控制, GSS-5 实际检测值范围: (0.473 ± 0.054) mg·kg⁻¹, 与标准值(0.45 ± 0.06) mg·kg⁻¹ 差异不明显. 稻米 Cd 含量分析采用湿式消解法(GB/T 5009.15-2003)分析测定. 选择 GSB-23 稻米标准物为质量控制, GSB-23 实际测定值的范围: (0.194 ± 0.022) mg·kg⁻¹, 与标准值(0.19 ± 0.02) mg·kg⁻¹ 差异不明显.

1.4 土壤 Cd 形态分析

土壤 Cd 形态分析采用改进的 BCR 分级提取法, 具体步骤见文献[26, 27], 所提取的形态包括: ①弱酸可溶态; ②还原态; ③氧化态; 及④残渣态.

1.5 数据分析

数据分析采用 SPSS 18.0, 采用 Excel 2007 进行作图.

2 结果与分析

2.1 不同品种稻米镉含量比较

对网岭和大同桥镇不同品种水稻米 Cd 含量的调查分析结果如图 1 所示. 网岭镇共采集了 4 个主栽品种: 中早 39、湘早籼 24 号、陵两优 4024、株两优 06 [图 1(a)]. 其中, 中早 39、湘早籼 24 号、陵两优 4024 共采集了 6 个样品, Cd 含量为 0.632 ~ 0.804 mg·kg⁻¹ 之间, 所有样品 Cd 含量远远超过稻米国家标准 0.2 mg·kg⁻¹, 平均值为 0.759 mg·kg⁻¹. 而株两优 06 共采集 4 个样品, 只有一个样品 Cd 含量为 0.305 mg·kg⁻¹, 超过 0.2 mg·kg⁻¹, 其余样品 Cd 含量都在 0.075 ~ 0.155 mg·kg⁻¹ 之间, 平均 Cd 含量为 0.162 mg·kg⁻¹, 只有其它品种的 20% 左右. 对大同桥镇的调查结果如图 1(b) 所示. 大同桥镇所调查的 4 个主栽品种分别为: 珍山一号、中早 39、湘早籼 24 号和株两优 06. 珍山一号、中早 39、湘早籼 24 号平均 Cd 含量都超过了 0.5 mg·kg⁻¹, 而株两优 06 的平均 Cd 含量在 0.12 mg·kg⁻¹ 左右. 此外, 珍山一号、中早 39、湘早籼 24 号共采集的 6 个样品 Cd 含量为 0.307 ~ 0.813 mg·kg⁻¹, 100% 都超过了国家标准, 平均含量为 0.638 mg·kg⁻¹; 株两优 06 共采集 6 个样品, Cd 含量为 0.046 ~ 0.187 mg·kg⁻¹, 平均含量为 0.127 mg·kg⁻¹, 也只有其它品种的 20% 左右, 并都未有超过国家标准. 以上结果说明, 不同品种之间稻米 Cd 含量差异明显, 而株两优 06 对 Cd 的积累明显较其

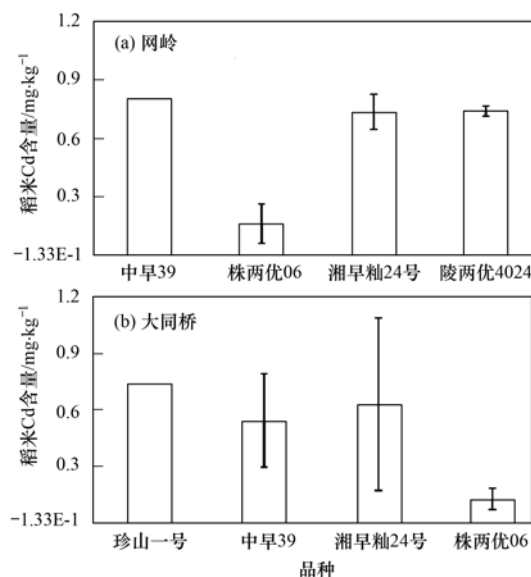


图1 网岭、大同桥不同水稻品种稻米 Cd 含量比较分析

Fig. 1 Comparison of Cd content among different rice varieties in Wangling and Datongqiao

它品种低.

2.2 各种土壤处理的稻米样品 Cd 含量

如图 2(a) 所示,在土壤钝化剂石灰、生物炭和矿物肥的处理下,对照稻米中 Cd 含量为 $0.118 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,石灰、矿物肥处理大幅度降低了稻米中 Cd 含量,平均含量分别为 $0.032 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.041 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,只有对照 Cd 含量的 20% ~ 30%. 而与对照相比,生物炭的降镉效果并不明显,约为 $0.152 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,石灰和生物炭的配合使用也使稻米中 Cd 的含量为 $0.043 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 然而,统计分析结果表明,各个处理之间稻米 Cd 含量没有显著差异.

目前已有大量研究结果发现生物炭施用能够降低水稻对 Cd 的吸收,然而大多数研究还处在实验室盆栽阶段,对大田实际施用生物炭的效果还较少报道. 生物炭固定土壤 Cd 的原理主要为提高土壤 pH 值从而改变 Cd 在土壤中的赋存形态,以及利用生物炭多空表面和离子带电荷特性增加对土壤 Cd^{2+} 的吸附性. 土壤交换性盐基离子对生物炭吸附重金属作用有较大影响,交换性盐基离子含量越高,生物炭的吸附作用越弱;此外土壤中重金属含量越高,生物炭的效果也越明显^[28]. 刘孝利等^[29]在小区试验中,以 $20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的用量研究生物炭的降 Cd 效果,结果发现,与对照相比,生物炭施用明显升高土壤 pH 值,降低水稻对 Cd 的吸收.

覆膜技术也在一定程度上降低了稻米中 Cd 的含量. 对照处理稻米镉含量为 $0.155 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而覆膜及覆膜 + 生物炭 + 硅肥叶面肥处理分别为 $0.071 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.026 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 2 (b)],与对照相比分别降低了约 50% 和 80%. 但是,与土壤改良剂类似,各个处理之间稻米 Cd 含量在统计学上没有显著差异.

硅肥处理结果如图 2(c) 所示,对照稻米 Cd 含量为 $0.305 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,叶面硅肥及土壤硅肥 + 叶面肥处理明显降低了稻米中的 Cd 含量,分别只有 $0.076 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.001 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而单独施用土壤追肥硅肥降镉效果与对照相比不明显,约为 $0.313 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 其中,叶面硅肥处理的稻米 Cd 含量显著比土壤硅肥和对照低. 陈喆等认为^[30],喷施叶面硅肥在水稻乳熟期主要表现为叶片中的 Si 阻止了茎部中 Cd 向叶片中转运,而成熟期阻止叶片中的 Si 向籽粒转运,使 Cd 滞留在茎叶部位;而土壤基肥硅肥主要改变了根细胞中 Cd 分布情况,降低 Cd 沉积在根部细胞壁中.

由于本试验采用的水稻品种株两优 06 累积 Cd

含量较低,其本身在没有任何处理情况下稻米镉含量大多也只有 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,未超过稻米 Cd 含量的质量标准,最高只有 $0.305 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 因此本试验结果尽管表现出了一些对照与处理之间镉含量的差异,但是还不能够确定各种处理的降 Cd 程度.

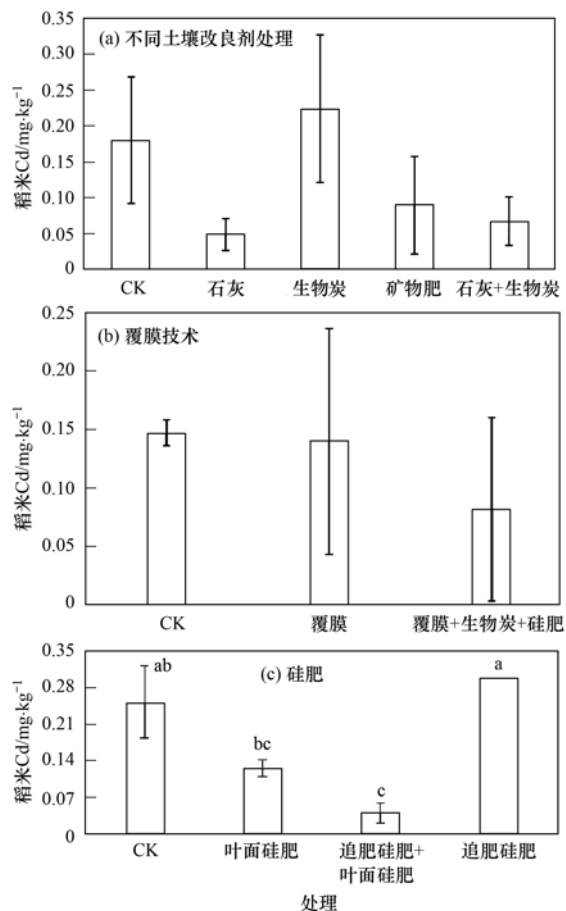


图 2 不同土壤处理稻米 Cd 含量

Fig. 2 Comparison of Cd contents in rice grains with different soil treatments

2.3 降镉技术处理前后土壤 pH 值和电导率的变化

需要特别指出的是,各处理在种水稻前和水稻灌浆期土壤 Cd 含量没有明显变化,平均值及 SD 分别为: $(0.409 \pm 0.092) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $(0.403 \pm 0.103) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤镉有效性与土壤 pH 值和电导率相关性较强. 土壤电导率是土壤质地、阳离子交换量、盐分、水分、温度以及有机质含量的综合反映,尤其与土壤阳离子交换量之间存在较强的相关关系. 有研究结果表明水稻-土壤系统中重金属富集系数土壤电导率之间存在极显著的负相关关系^[31].

各处理的 pH 值和电导率的变化情况如表 2 所示. 首先,石灰、生物炭和矿物肥这组处理中,对

照、石灰和石灰 + 生物炭处理的土壤 pH 值在灌浆期都比播种前分别提高 0.15、0.16 及 0.64 个单位,而生物炭和矿物肥处理使灌浆期土壤 pH 值比播种前降低 0.14 和 0.17 个单位;对照和生物炭处理的土壤电导率在灌浆期比播种前分别降低了 4.5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 14.4 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,石灰、矿物肥和石灰 + 生物炭处理下土壤电导率在灌浆期比播种前分别升高了 4.2、40.9 和 17.9 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 生物炭处理没有使土壤 pH 得到显著升高,可能是导致生物炭处理下稻米中 Cd 含量与对照相比没有降低的原因之一. 其次,在覆膜处理的一组试验中,对照与覆膜 + 生物炭 + 硅肥叶面处理的土壤 pH 值在灌浆期比播种前略有升高,而覆膜处理的 pH 值降低 0.34 个单

位;这组 3 个处理的电导率都有所增加,其中覆膜 + 生物炭 + 硅肥叶面处理的电导率在灌浆期比播种前增加了 33 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 最后,在硅肥处理组中,对照和硅肥追肥处理的 pH 值略有升高,而硅肥叶面肥和硅肥叶面 + 追肥处理的 pH 值在灌浆期和播种前相似,而且这组的 4 个处理电导率都有所下降,下降幅度为 7 ~ 24.3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

以上结果表明,3 组处理的土壤 pH 值在播种前和灌浆期绝大多数都超过了 6.0,对于抑制水稻吸收土壤 Cd 较为有利,但是,水稻土壤的 pH 值和电导率在播种前到灌浆期会发生不同程度变化,尤其电导率的变化在矿物肥和覆膜 + 生物炭 + 硅肥叶面上升幅度较大,分别达到 43.8% 和 55.5%.

表 2 处理前后土壤 pH 值、电导率的变化情况

Table 2 Changes of pH values and CEC in soils before and after treatments

处理	pH		电导率/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	
	播种前	灌浆期	播种前	灌浆期
CK	6.02	6.17	72.8	68.3
石灰	6.40	6.56	72.9	77.1
生物炭	6.27	6.13	76.3	61.9
矿物肥	6.23	6.06	73.7	114.6
石灰 + 生物炭	6.02	6.66	80.7	98.6
CK	6.11	6.4	61.3	63.7
覆膜	6.30	5.96	62.3	68.8
覆膜 + 生物炭 + 硅肥叶面	6.04	6.11	75.1	108
CK	5.87	5.93	131	124
硅肥叶面	5.96	5.98	92.2	67.9
硅肥叶面 + 追肥	5.81	5.8	110.5	103
硅肥追肥	5.87	6.19	131	108

2.4 降镉技术处理对土壤 Cd 有效性的影响

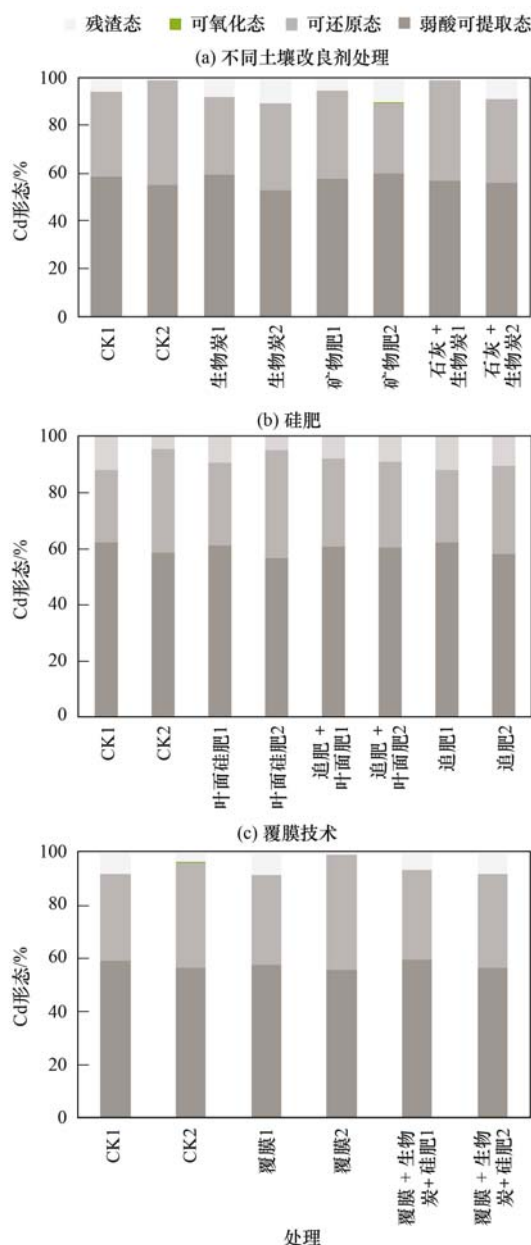
降镉技术处理对水稻田土壤 Cd 有效性的分析如图 3 所示. 所有处理和对照的弱酸可提取态都高于 50%,而残渣态大多低于 10%,可氧化态在所有样品中含量都较低,低于 1%. 在石灰、生物炭和矿物肥处理组中[图 3(a)],石灰处理在灌浆期弱酸可提取态和可还原态总和为 74% 左右,较播种前降低了近 20%,残渣态为 23%,较播种前升高了近 20%;生物炭、矿物肥以及生物炭 + 矿物肥处理使土壤中弱酸可提取态和可还原态总和略有降低,残渣态略有升高,但是幅度较小,都在 5% 左右. 硅肥处理组的土壤 Cd 形态变化如图 3(b) 所示,这一组的对照处理在灌浆期 Cd 的弱酸可提取态与可还原态总和达到 95%,比播种前升高了 7% 左右,而残渣态从播种前的 11.8% 下降到 4.35%,其它 3 个处理在播种前和灌浆期可还原态和弱酸可提取态的总和没有明显变化都在 90% 左右,残渣态变化也小于 5%. 覆膜处理对土壤 Cd 形态的变化也没有明显的

影响[图 3(c)],灌浆期弱酸可提取态和可还原态的总和都在 90% 以上. 以上结果表明,除了石灰处理能够使土壤 Cd 的形态发生较为明显的改变以外,其它的处理对土壤 Cd 形态的影响较小.

2.5 稻米镉含量与土壤 pH 值相关性分析

对稻米 Cd 含量与土壤 Cd 总量的相关分析结果如图 4 所示,随着土壤 Cd 含量的上升,稻米 Cd 含量总体上也呈现上升趋势,但是在土壤 Cd 含量低于 0.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量没有呈现明显的线性关系;然而稻米 Cd 含量的最高值出现在土壤 Cd 含量最高的田块中.

土壤 pH 值与稻米吸收土壤 Cd 的相关性极为重要,当土壤 pH 值低于 6.0 时,土壤 pH 值对植物吸收 Cd 起到了决定性作用,当土壤 pH 值接近 7.0 时,水稻对土壤 Cd 的吸收最小^[32]. 有调查发现,当土壤 pH 值较低时(pH 4.0 ~ 4.7)时,非镉污染区稻米中的 Cd 含量比镉污染区(土壤 pH 值 4.1 ~ 5.7 相对较高)的稻米镉含量高^[33]. Zhao 等^[34] 指出我



1 表示播种前,2 表示灌浆期

图3 各处理播种前与灌浆期土壤 Cd 形态比较

Fig. 3 Comparison of Cd fractions between pre-planting and flowering stages in paddy soils after different treatments

国南方水稻种植区的酸性土壤性质是镉大米形成的最主要因素,他们根据 Römken 等^[35]的模型计算得到,当土壤 pH 值为 5.0 时,土壤中 Cd 含量只要高于 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 稻米 (*Indica*) 中 Cd 含量会超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的限值,而当土壤 pH 值为 7.0 时,土壤中的 Cd 含量超过 $0.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 才能使稻米中 Cd 含量超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的限值. 本试验中稻米 Cd 含量与土壤 pH 值的相关关系见图 5 所示. 播种前各田块的土壤 pH 值在 5.8 ~ 6.4 之间,灌浆期各田块土壤的 pH 值在 5.8 ~ 6.7 之间,尽管在这范围内稻米

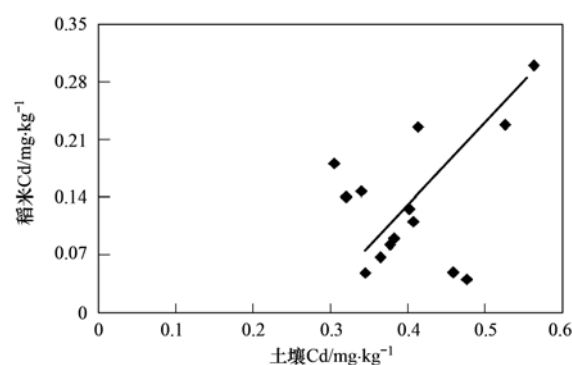


图4 稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量之间的相关分析

Fig. 4 Correlation between concentrations of Cd in rice grains and paddy soils

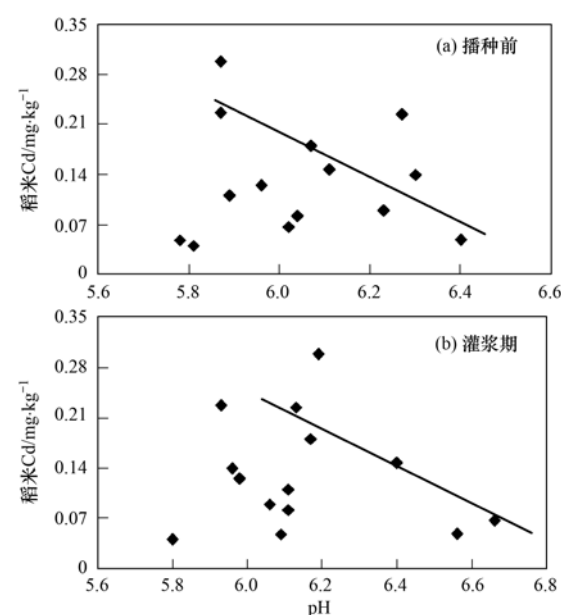


图5 稻米 Cd 与土壤 pH 值的相关分析

Fig. 5 Correlation between Cd concentrations in rice grains and pH values in paddy soils

Cd 含量与 pH 值没有表现出明显的负相关关系,但是,pH 越高,较低 Cd 含量的稻米样品的比例增加.

3 结论

(1) 湖南攸县主栽品种株两优 06 的稻米 Cd 低积累特征较为明显,稻米平均 Cd 浓度为其它品种的 20% 左右.

(2) 土壤钝化剂处理总体上能够降低稻米对 Cd 的吸收,其中石灰和矿物肥处理使稻米中 Cd 浓度较对照降低 70% ~ 80% .

(3) 攸县水稻土壤 Cd 有效性非常高,所有处理与对照的弱酸可提取态都高于 50% ,石灰处理能够明显降低土壤 Cd 弱酸可提取态和可还原态比例,

升高残渣态比例,变化幅度达到 20% 左右。

(4) 由于本次选用的试验田土壤 pH 值范围在 5.8 ~ 6.8 之间,土壤 Cd 含量大多在 0.3 ~ 0.6 mg·kg⁻¹ 之间,稻米 Cd 含量与土壤 Cd 含量以及土壤 pH 值没有呈现明显的线性关系,然而,试验结果表明,稻田土壤中的 Cd 含量与 pH 值是影响稻米 Cd 吸收的重要因素。

参考文献:

- [1] 陈艳. 湖南省土壤污染现状与修复[J]. 湖南农业科学, 2002, (6): 31-33.
- [2] 吴玺虹, 戴塔根, 方建武, 等. 长沙、株洲、湘潭三市土壤中重金属元素的来源[J]. 地质通报, 2007, 26(11): 1453-1458.
- [3] Du Y, Hu X F, Wu X H, *et al.* Affects of mining activities on Cd pollution to the paddy soils and rice grain in Hunan province, Central South China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(12): 9843-9856.
- [4] Tang J C, Bai X R, Zhang W J. Cadmium pollution and its transfer in agricultural systems in the suburbs of Tianjin, China [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2011, 20(6): 722-732.
- [5] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As、Pb、Cd 污染及其健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11): 2314-2320.
- [6] Qian Y Z, Chen C, Zhang Q, *et al.* Concentrations of cadmium, lead, mercury and arsenic in Chinese market milled rice and associated population health risk [J]. Food Control, 2010, 21(12): 1757-1763.
- [7] Wang G, Su M Y, Chen Y H, *et al.* Transfer characteristics of cadmium and lead from soil to the edible parts of six vegetable species in southeastern China [J]. Environmental Pollution, 2006, 144(1): 127-135.
- [8] 郭朝晖, 肖细元, 陈同斌, 等. 湘江中下游农田土壤和蔬菜的重金属污染[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 3-11.
- [9] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1257-1263.
- [10] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering [J]. Plant and Soil, 2011, 347(1-2): 105-114.
- [11] Patra M, Bhowmik N, Bandopadhyay B, *et al.* Comparison of mercury, lead and arsenic with respect to genotoxic effects on plant systems and the development of genetic tolerance [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52(3): 199-223.
- [12] 杜丽娜, 李军, 彭义, 等. 不同水稻品种中镉及微量元素含量的差异分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(2): 229-232.
- [13] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 529-532.
- [14] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究——品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1346-1352.
- [15] 赵雄, 李福燕, 张冬明, 等. 水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11): 2236-2240.
- [16] 杨春刚, 廖西元, 章秀福, 等. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 660-662.
- [17] 张锡洲, 张洪江, 李廷轩, 等. 水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11): 1434-1440.
- [18] de Livera J, McLaughlin M J, Hettiarachchi G M, *et al.* Cadmium solubility in paddy soils: Effects of soil oxidation, metal sulfides and competitive ions [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409(8): 1489-1497.
- [19] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441-1453.
- [20] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 721-728.
- [21] 丁永祯, 宋正国, 唐世荣, 等. 大田条件下不同钝化剂对空心菜吸收镉的影响及机理[J]. 生态环境学报, 2011, 20(11): 1758-1763.
- [22] 罗远恒, 顾雪元, 吴永贵, 等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 890-897.
- [23] 孙约兵, 徐应明, 史新, 等. 污灌区镉污染土壤钝化修复及其生态效应研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(8): 1467-1473.
- [24] Fulda B, Voegelin A, Kretzschmar R. Redox-controlled changes in cadmium solubility and solid-phase speciation in a paddy soil as affected by reducible sulfate and copper [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(22): 12775-12783.
- [25] 史锟, 张福锁, 刘学军, 等. 不同栽培方式对镉污染水稻土釉、梗稻根表铁膜铁、镉含量及根镉含量的影响[J]. 土壤通报, 2004, 35(2): 207-211.
- [26] 曹会聪, 王金达, 张学林. BCR 法在污染农田黑土重金属形态分布研究中的应用[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 163-166, 174.
- [27] Tokalioglu Ş, Kartal Ş, Elçi L. Determination of heavy metals and their speciation in sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure [J]. Analytica Chimica Acta, 2000, 413(1-2): 33-40.
- [28] 黄代宽, 李心清, 董泽琴, 等. 生物炭的土壤环境效应及其重金属修复应用的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(11): 159-165.
- [29] 刘孝利, 曾昭霞, 陈求稳, 等. 生物炭与石灰添加对稻田土壤重金属面源负荷影响[J]. 水利学报, 2014, 45(6): 682-690.
- [30] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2762-2770.
- [31] 赵科理. 土壤-水稻系统重金属空间对应关系和定量模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. 120-122.

- [32] Chaney R L, White M C, Simon P W. Plant uptake of heavy metals from sludge use on land [A]. In: Proc. 2nd Natl. Conf. on Management of Municipal Wastewater Sludges [C]. Silver Spring, MD: Information Transfer Inc. , 1975. 169-178.
- [33] Takijima Y, Katsumi F, Takezawa K. Cadmium contamination of soils and rice plants caused by Zinc mining, II. Soil conditions of contaminated paddy fields which influence heavy metal contents in rice [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1973, **19** (3): 173-182.
- [34] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, *et al.* Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(2): 750-759.
- [35] Römken P F A M, Gou H Y, Chu C L, *et al.* Prediction of Cadmium uptake by brown rice and derivation of soil-plant transfer models to improve soil protection guidelines [J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(8-9): 2435-2444.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2014 年 9 月 26 日, 中国科技论文统计结果发布会在北京举行, 会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单. 《环境科学》连续 13 次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号. “百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定. 该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析, 对期刊分学科进行评比, 其评价结果客观公正, 为我国科技界公认, 并具有广泛影响.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行