

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

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

1960~2013年我国霾污染的时空变化 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化磷酸盐的影响 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe⁰-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO₂ 纳米颗粒对 Cd²⁺ 的吸附 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH₄、CO₂ 排放的短期影响 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO₂ 通量变化及其影响因素 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 严俊霞, 郝忠, 荆雪镡, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应

辜娇峰¹, 杨文弢², 周航¹, 张平¹, 彭佩钦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: 采用水稻盆栽实验研究不同含量外源 Zn 对模拟 Cd 中度污染和重度污染土壤中水稻低累积品种湘晚粳 12 和高累积品种威优 46 水稻各部位累积 Cd 的影响. 结果表明, 在 Cd 中度污染水平, 外源 Zn 分别增大 2 种水稻各部位 Cd 含量, 湘晚粳 12 和威优 46 糙米 Cd 含量分别增加 125.0% ~ 275.0% 和 6.6% ~ 91.2%, 但各处理糙米 Cd 含量不高于 0.2 mg·kg⁻¹; 在 Cd 重度污染水平, 外源 Zn 有降低水稻各部位中 Cd 含量的作用, 湘晚粳 12 和威优 46 糙米 Cd 含量相应降低了 16.6% ~ 63.5% 和 15.6% ~ 74.4%, 且威优 46 糙米 Cd 含量随外源 Zn 施用含量的增大而逐渐降低, 使得糙米中 Cd 含量低于 0.2 mg·kg⁻¹. 水稻糙米累积 Cd 含量与土壤中 Cd、Zn 交换态含量的相关关系, 因 Cd 污染程度和水稻品种的不同而不同. 在 Cd 中度污染水平, 湘晚粳 12 水稻糙米 Cd 含量与土壤中交换态 Zn 含量正线性相关, 而威优 46 水稻糙米 Cd 含量与土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量正线性相关; 在 Cd 重度污染水平, 威优 46 水稻糙米 Cd 含量与土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量为负线性相关. 在不造成土壤 Zn 污染的前提下, 可向 Cd 重度污染土壤施用一定量的 Zn 肥, 以降低糙米 Cd 含量, 提高糙米品质.

关键词: 外源锌; 镉污染; 累积; 水稻; 土壤

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3554-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.038

Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice

GU Jiao-feng¹, YANG Wen-tao², ZHOU Hang¹, ZHANG Ping¹, PENG Pei-qin¹, 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: Pot experiments were carried out to study the influences of different concentrations of exogenous Zn on accumulation of Cd in various rice organs of low Cd accumulation cultivar Xiang -Wanxian 12 (XWX12) and high Cd accumulation cultivar Wei-You 46 (WY46) exposed to soil with medium and serious Cd pollution. The results showed that: In the soil with medium Cd pollution, Cd contents in various rice organs of two rice varieties were increased by exogenous Zn, and the Cd contents in brown rice of XWX12 and WY46 were increased by 125.0% - 275.0% and 6.6% - 91.2%, respectively, but still lower than 0.2 mg·kg⁻¹. In the soil with serious Cd pollution, Cd accumulation in various rice organs were reduced by exogenous Zn. Cd contents in brown rice of XWX12 and WY46 were reduced by 16.6% - 63.5%, and 15.6% - 74.4%, respectively, and Cd contents in brown rice of WY46 were gradually decreased with increasing exogenous Zn application, resulting in lower than 0.2 mg·kg⁻¹ of Cd in brown rice. The correlations of Cd contents in brown rice and exchangeable contents of Cd and Zn in soil were different depending on the Cd pollution levels and the rice varieties. In the soil with medium Cd pollution, Cd content in brown rice of XWX12 was linearly positively related to exchangeable Zn content in soil, and Cd content in brown rice of WY46 was linearly positively related to exchangeable Cd or Zn contents in soil. In the soil with serious pollution, however, the correlation of Cd contents in brown rice of WY46 and the contents of exchangeable Cd or Zn in soil was linear negative correlation. Therefore, for improvement of the rice quality, under the condition that total Zn content in soil was lower than the pollution level, applying a certain amount of Zn to reduce Cd contents in brown rice was feasible in the soil with serious pollution.

Key words: exogenous Zn; Cd pollution; accumulation; rice; soil

伴随着采矿与冶炼、电镀等工业的快速发展以及农业种植过程中的污水灌溉、过度施肥和农药滥用,我国农田土壤镉(Cd)污染问题日趋严重,超过文献[1]中Ⅱ级的比例达 11.9% ~ 21.1%^[2]. Cd 是植物生长发育过程中的非必需元素,在 Cd 污染农田土壤上种植的农作物可吸收累积 Cd 在可食部位,从而进入人类食物链危害人体健康^[3]. 水稻是我国居民首要粮食作物,有研究表明,水稻对 Cd 具有较强耐受性,也是易于吸收 Cd 的大宗类谷物之一^[4,5],当前我国农田土壤镉污染严重,糙米 Cd 超

标问题备受关注. 锌(Zn)是 Cd 的同族元素,具有相似的地球化学和环境特征,而且 Zn 是各生物体必需的重要微量元素,发挥着重要的生理功能^[6],植物对 Cd 和 Zn 的累积具有一定的相互作用^[6~16]. 张建辉等^[7]采集的 108 组湖南大米与土壤发现,稻

收稿日期: 2016-03-16; 修订日期: 2016-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501344); 农业部财政部科研专项([2015]38号); 湖南省重点学科建设项目(2006180)

作者简介: 辜娇峰(1979~),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为土壤污染与控制, E-mail: gujiaofeng@163.com

* 通讯联系人, E-mail: liaobh1020@163.com

米 Cd 含量受到土壤有效态 Cd 含量的促进,土壤有效态 Zn 含量高可抑制稻米对 Cd 的积累,叶面喷施 Zn 肥以及在 Cd 污染土壤中添加 Zn 肥有降低作物 Cd 含量的趋势^[9~14];但也有研究发现,Cd 与 Zn 是协同作用^[14~16]. 显然,在土壤-植物系统中各元素之间存在着复杂的相互关系,Cd 和 Zn 到底是协同作用或拮抗作用,依作物种类、品种、生长介质以及土壤 Cd/Zn 含量、存在形态等因素的不同而异. 当前的研究主要是从水培溶液施 Zn^[9]、叶面喷施 Zn 肥^[10~14]、固化剂配施 Zn 肥^[13]等探讨 Cd 污染土壤的治理,对于不同程度 Cd 污染土壤上施用不同含量 Zn,不同 Cd 累积水稻品种对外源 Zn 的响应等研究还很少,特别缺乏针对实际 Cd 污染土壤治理施加外源 Zn 的具体建议. 本文选用湖南无 Cd 和 Zn 污染的红壤为应试土壤,通过添加一定含量的外

源 Cd 模拟中度和重度 Cd 污染土壤,然后再施用不同含量外源 Zn,研究水稻高 Cd 累积品种和低 Cd 累积品种对土壤 Cd 的累积效应,分析外源 Zn 对水稻各部位累积 Cd 的影响,以期 Cd 污染土壤的修复及水稻的安全生产提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试土壤为红壤,取自湖南省宁乡县双江口镇(28°27.716'N,113°16.356'E),基本理化性质见表 1. 实验试剂为分析纯或优级纯. 湘晚籼 12 为籼型常规稻,由湖南亚华种业有限公司提供;威优 46,籼型晚稻,由湖南湘潭市兴农种业公司提供. 一般认为,湘晚籼 12 为 Cd 低累积品种^[17,18],而威优 46 为 Cd 高累积品种^[17].

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic properties of the tested soil

类型	pH	CEC /cmol·kg ⁻¹	OM /g·kg ⁻¹	全量 Cd /mg·kg ⁻¹	交换 Cd /mg·kg ⁻¹	全量 Zn /mg·kg ⁻¹	交换 Zn /mg·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	速效钾 /mg·kg ⁻¹
红壤	5.61	31.3	32.0	0.23	0.06	78.80	4.17	103.3	20.4	77.4

1.2 实验方法

1.2.1 不同含量 Cd 和 Zn 土壤的制备

Cd 设置中度和重度 2 个污染程度,分别添加 0.5 mg·kg⁻¹和 5.0 mg·kg⁻¹外源 Cd 使之达到相应水平. Zn 则依据供试土壤全量 Zn 设置约 0、0.5、1、2 倍的添加量,依次为 0、40、80、160 mg·kg⁻¹这 4 个水平. Cd 和 Zn 的具体添加方法为:在无盖圆柱型塑料桶(内径 30 cm,高 24 cm)中装入自然风干的供试土壤 5 kg,按照土壤 70% 最大田间持水量加入自来水. Cd 和 Zn 分别以 CdCl₂、ZnCl₂ 溶液的形式加入,每盆土壤先加入不同体积的 CdCl₂ 母液,混合平衡 7 d,再加入不同体积的 ZnCl₂ 母液混合平衡 14 d,以获得不同含量的 Cd、Zn 污染土壤. 每个处理 3 个平行.

1.2.2 盆栽实验

实验安排在中南林业科技大学生命科学楼 3 楼户外种植基地进行,栽培时间为 2015 年 7 月至 10 月底. 在上述土壤中加入基肥 K₂CO₃ 0.22 g·kg⁻¹(按 K₂O 计算),(NH₄)₃PO₄ 0.21 g·kg⁻¹(按 P₂O₅ 计算),尿素 0.28 g·kg⁻¹(按 N 计算),2 d 后移栽长势均匀的秧苗,1 盆 1 穴 2 株. 实验过程中全程自来水灌溉,常规农田水分管理及农药喷施,并根据水稻生长情况补充上述基肥.

水稻成熟后采集水稻植株,超纯水洗净,105℃

杀青再 70℃ 烘干,分根、茎叶、谷壳、糙米这 4 个部位,称重后称干重,粉碎备用,分析各部位生物量和 Cd、Zn 含量. 同时采集水稻根系 0~2 cm 处根际土壤,自然风干进行土壤基本理化性质及土壤中 Cd、Zn 相关指标的分析.

1.3 样品分析测定方法

土壤基本理化性质根据文献[19]所述方法测定,土壤全量 Cd、Zn 用盐酸-硝酸-高氯酸电热板加热消解^[20]. 采用修正 Tessier 连续提取法第一步(1 mol·L⁻¹ MgCl₂)溶液提取土壤中 Cd、Zn 的交换态含量^[21]. 水稻各部位中 Cd、Zn 总量采用干灰法消解(GB/T 5009.15-2003)^[22]. 土壤样品中 Cd、Zn 含量及水稻样品中 Zn 含量采用 ICP-AES (ICP 6300, Thermo)测定,水稻样品溶液中 Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度计(iCE-3500, Thermo)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,Cd、Zn 的回收率分别为 94.5%~98.6% 和 97.2%~102.3%,同时做空白实验.

1.4 数据统计与分析

所有数据均采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行统计分析,文中数据为 3 个重复样的平均值,采用显著性 F 测验和 Duncan 多重比较法(P < 0.05 和 P < 0.01)分析各处理间差异,表 2~4 中不

同字母表示差异具有统计学意义, 图形采用 OriginPro 8.5 进行处理.

2 结果与分析

2.1 土壤中 Cd 和 Zn 交换态含量

添加外源 Cd、Zn 混合平衡 2 周后, 土壤中 Cd、Zn 交换态含量与应试土壤相比均相应增大, 外源 Cd 的 2 个污染程度各处理间无差异, 外源 Zn 的 4 个梯度水平各处理间差异显著 ($P < 0.05$), 达到实验要求(表 2).

表 2 水稻种植前和成熟后根际土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Contents of exchangeable Cd and Zn in the rhizosphere soil before and after rice planting/mg·kg⁻¹

Cd 程度	Zn 处理	种植前		种植后			
		Ex-Cd	Ex-Zn	湘晚籼 12		威优 46	
				Ex-Cd	Ex-Zn	Ex-Cd	Ex-Zn
中度	Zn0	0.42a	4.02d	0.50a	3.93d	0.53a	4.46d
	Zn40	0.36a	31.13c	0.51a	17.57c	0.52a	13.49c
	Zn80	0.30a	56.64b	0.57a	45.28b	0.46a	35.60b
	Zn160	0.35a	87.40a	0.46a	70.58a	0.44a	65.61a
重度	Zn0	2.33a	5.03d	3.34a	1.82d	3.30a	2.05d
	Zn40	2.29a	30.38c	3.38a	14.61c	3.37a	19.54c
	Zn80	2.36a	67.36b	3.10a	26.63b	3.39a	37.33b
	Zn160	2.30a	87.78a	3.35a	61.60a	3.46a	65.16a

1) Ex-Cd、Ex-Zn 分别表示土壤中交换态 Cd 含量和交换态 Zn 含量, Zn0、Zn40、Zn80、Zn160 分别代表 Zn 的添加量分别为 0、40、80、160 mg·kg⁻¹, 同列不同字母表示相同 Cd 污染程度不同 Zn 处理差异显著 ($P < 0.05$), 数据结果为 3 重复平行的平均值, 下同

2.2 外源 Cd 和 Zn 对水稻生物量的影响

从表 3 中可以看出, 在 Cd 的 2 种污染水平, 相比外源 Zn0 处理, Zn40 和 Zn80 的处理有提高水稻

水稻种植后, 根际土壤中交换态 Cd 含量均相比种植前增大, 在 Cd 中度污染水平增大 12.2% ~ 44.4%, 在重度污染水平增大 31.4% ~ 47.6%, 最大增大率均出现在 Zn40 处理的土壤中. 同一水稻品种不同 Cd 污染程度以及不同外源 Zn 处理下, 交换态 Cd 含量差异不显著 ($P > 0.05$). 土壤交换态 Zn 含量相比种植前均有降低, 在 Cd 中度污染水平降低 2.2% ~ 56.7%, 在重度污染水平降低 25.8% ~ 63.8%. 交换态 Zn 含量随外源 Zn 含量的增大而增大, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$).

生物量的趋势, 各处理间差异不显著 ($P > 0.05$); 但 Zn 含量增大到 160 mg·kg⁻¹ 后, 对水稻总生物量有降低影响.

表 3 外源 Cd 和 Zn 对水稻生物量的影响(干重)/g·pot⁻¹

Table 3 Effects of exogenous Cd and Zn on rice biomass (dry weight)/g·pot⁻¹

Cd 程度	Zn 处理	湘晚籼 12				威优 46			
		茎叶	谷壳	糙米	总生物量	茎叶	谷壳	糙米	总生物量
中度	Zn0	25.23a	4.60ab	6.43b	36.27ab	17.40b	4.67a	16.80a	38.87a
	Zn40	24.93a	4.10b	9.23a	38.27a	19.50a	4.23a	17.93a	41.67a
	Zn80	23.33a	5.20a	8.37ab	36.90ab	20.50a	4.70a	18.63a	43.83a
	Zn160	24.90a	3.63c	3.63c	32.17b	13.23c	4.37a	16.10a	33.70a
重度	Zn0	26.12a	4.05b	5.33a	35.50a	19.12a	5.22b	14.37ab	38.71ab
	Zn40	27.30a	3.97bc	5.40a	36.67a	19.90a	5.30b	15.20a	40.40a
	Zn80	27.43a	4.77a	5.43a	37.63a	19.83a	5.40b	15.67a	40.90a
	Zn160	19.57b	3.53c	3.47b	26.57b	21.87a	5.83a	11.57b	39.27ab

2.3 外源 Cd 和 Zn 对水稻各部位 Cd 和 Zn 含量影响

图 1 显示了不同含量 Cd 和 Zn 污染土壤对水稻各部位累积 Cd 的影响. 在 Cd 中度污染水平, 随外源 Zn 含量的增大, 湘晚籼 12 各部位 Cd 含量有增大趋势[图 1(a)], 糙米 Cd 含量增大了 125.0% ~ 275.0%, 但各处理糙米 Cd 含量均小于 0.2 mg·kg⁻¹, 处理间差异不显著 ($P > 0.05$). 在 Cd 重

度污染水平, 当外源 Zn 含量为 40 mg·kg⁻¹ 和 80 mg·kg⁻¹ 时, 水稻各部位 Cd 含量相比 Zn0 有减小, 但在外源 Zn160 时则各部位 Cd 含量相比 Zn40、Zn80 时处理反而增大, 尤以根部增大显著, 处理间差异显著 ($P < 0.05$); 就糙米而言, 各处理 Cd 含量范围是 0.07 ~ 0.19 mg·kg⁻¹, 均小于 0.2 mg·kg⁻¹, 外源 Zn 处理可使糙米 Cd 含量降低 16.6% ~

63.5%.

在 Cd 中度污染水平,随外源 Zn 含量的增大,威优 46 的根和糙米中 Cd 含量呈增大趋势[图 1(b)],分别增大 7.0%~63.5%和 6.6%~91.2%,各处理糙米 Cd 含量均小于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各处理间差异显著 ($P < 0.05$);根、茎叶和谷壳中 Cd 含量在 Zn40 时最大,在 Zn80 和 Zn160 时又相对减小.在 Cd 重度污染水平,随外源 Zn 含量的增大,威优 46 根部、茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量均小于 Zn0 处理,分别降低了 0.3%~51.8%、48.3%~71.9%、67.2%~87.6%和 15.6%~74.4%,且茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量随 Zn 含量的增大而逐渐降低;Zn 含量在 $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $160 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时糙米中 Cd 含量均降低到 $0.12 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于 Zn0 的 $0.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且低于 $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的国家污染物限量标准.

上述实验结果显示,外源 Zn 施加于中度 Cd 污染土壤可激发这水稻对 Cd 的累积,导致糙米中 Cd 含量增加;在重度 Cd 污染情况下,外源 Zn 则降低了糙米 Cd 含量.另外,随土壤 Cd 污染程度的加重,

水稻各部位 Cd 含量相应增加,就糙米而言,湘晚籼 12 糙米在中度污染状况下的 Cd 含量范围是 $0.04 \sim 0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在重度污染则为 $0.07 \sim 0.19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;威优 46 糙米 Cd 含量范围在中度污染状况下是 $0.09 \sim 0.17 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在重度污染状况下是 $0.12 \sim 0.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可见相比湘晚籼 12,威优 46 糙米中累积了更多的 Cd.

表 4 则显示了不同含量 Cd 和 Zn 污染,水稻各部位累积 Zn 含量随外源 Zn 施用含量的增大有增大趋势.就糙米而言,在 Cd 中度污染水平,湘晚籼 12 糙米 Zn 含量在 $160 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下达到最大值 $42.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,存在显著差异 ($P < 0.05$),而威优 46 糙米在 $40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下达到最大值 $29.59 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;在 Cd 重度污染水平,湘晚籼 12 糙米 Zn 含量在 $80 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下达到最大值 $35.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各处理间差异不显著 ($P > 0.05$),而威优 46 糙米在 $160 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理下达到最大值 $26.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.对比 2 种水稻糙米累积 Zn 含量的大小,湘晚籼 12 可累积更多的 Zn.

表 4 外源 Cd 和 Zn 处理对水稻各部位中 Zn 含量的影响/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 4 Effects of exogenous Cd and Zn on Zn contents in various rice organs/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Cd 程度	Zn 处理	湘晚籼 12				威优 46			
		根	茎叶	谷壳	糙米	根	茎叶	谷壳	糙米
中度	Zn0	14.86c	19.42c	24.61ab	25.59b	8.26c	28.54b	17.11b	19.30b
	Zn40	20.57bc	29.55bc	20.27b	24.99b	39.23b	45.28b	23.83a	29.59a
	Zn80	27.16b	37.14ab	24.55ab	28.82b	54.84b	67.11a	16.70b	21.85b
	Zn160	48.67a	46.80a	27.67a	42.66a	94.55a	72.65a	21.35a	26.34a
重度	Zn0	20.00b	19.48b	32.46a	25.28a	23.12b	21.15c	16.35a	21.90b
	Zn40	17.49b	20.05b	23.48a	30.17a	29.04b	41.91b	16.30a	22.01b
	Zn80	28.30ab	25.95b	25.24a	35.09a	27.52b	39.42b	18.43a	25.90a
	Zn160	39.49a	46.17a	25.50a	28.36a	74.09a	73.34a	17.89a	26.06a

为进一步探讨不同含量 Cd、Zn 处理下水稻各部位累积 Cd、Zn 含量的关系,将其进行相关性分析(表 5).结果显示,在 Cd 中度污染水平,湘晚籼 12 糙米中 Cd 和 Zn 含量显著正线性相关 ($P < 0.05$),相关系数 R 为 0.641;威优 46 茎叶部 Cd 和 Zn 含量显著负指数相关 ($P < 0.05$),而谷壳部 Cd 和 Zn 含量显著正线性相关 ($P < 0.05$);在 Cd 重度污染水平,湘晚籼 12 谷壳部 Cd 和 Zn 含量显著正线性相关 ($P < 0.01$);威优 46 茎叶和糙米中 Cd 和 Zn 含量分别呈现负指数相关和负线性相关 ($P < 0.05$),相关系数 R 分别为 0.580 和 0.693,其他相关关系不显著.

2.4 水稻各部位 Cd 含量与其土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量的关系

在不同含量 Cd 和 Zn 影响下,土壤中 Cd、Zn 交换态含量(表 2)以及水稻各部位 Cd 含量(图 1)均

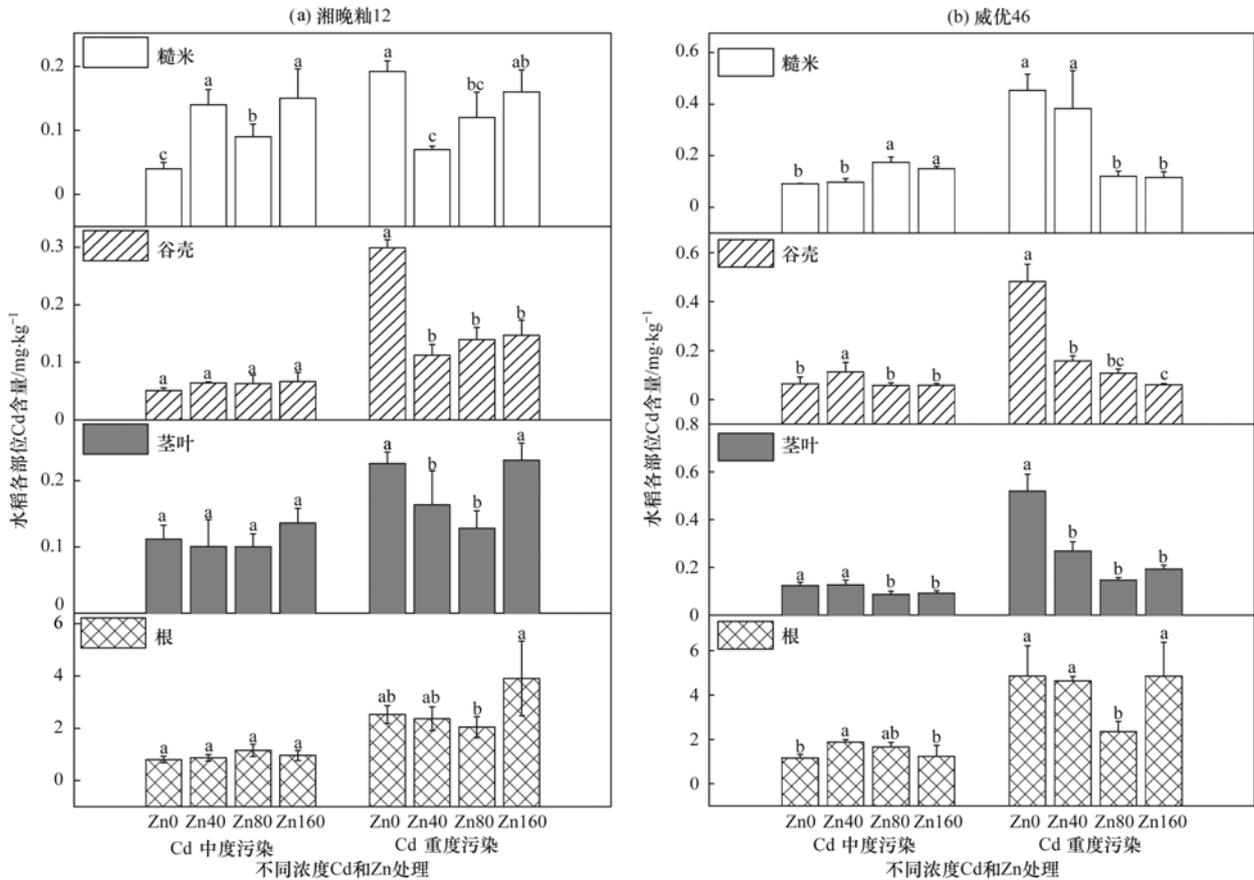
表 5 水稻各部位 Cd 和 Zn 含量之间的相关系数¹⁾

Table 5 Correlation coefficients of contents of Cd and

Cd 程度	水稻品种	Zn in various rice organs			
		根	茎叶	谷壳	糙米
中度	湘晚籼 12	0.205	0.541	0.513	0.641*
	威优 46	0.063	-0.576* Δ	0.664*	0.130
重度	湘晚籼 12	0.063	0.094	0.711**	-0.190
	威优 46	0.303	-0.580* Δ	0.170	-0.693*

1) * 和 ** 分别表示 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 显著水平, $n = 12$, $R_{0.05} = 0.576$, $R_{0.01} = 0.709$, Δ 表示用指数分析进行拟合,下同

有变化.为进一步探讨它们之间的关系,分别进行相关性分析(表 6).结果表明,在 Cd 中度污染水平,湘晚籼 12 各部位只有糙米中 Cd 含量与土壤交换态 Zn 含量显著正线性相关 ($P < 0.05$);威优 46 茎叶中 Cd 含量与土壤交换态 Cd 含量显著正线性



Zn0、Zn40、Zn80、Zn160 分别代表 Zn 的添加量分别为 0、40、80、160 mg·kg⁻¹；误差线上不同字母表示差异显著达 5% 水平 ($P < 0.05$)

图 1 外源 Cd 和 Zn 处理对水稻各部位中 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effects of exogenous Cd and Zn on Cd contents in various rice organs

相关,而与土壤交换态 Zn 含量显著负线性相关($P < 0.05$);威优 46 糙米 Cd 含量与土壤交换态 Cd 含量显著负线性相关,而与土壤交换态 Zn 含量显著正线性相关($P < 0.05$),相关系数 R 值如表 6 所示;其他线性关系不显著.在 Cd 重度污染水平,湘晚籼 12 根部 Cd 含量与土壤交换态 Cd 含量显著正线性相关($P < 0.05$),而谷壳 Cd 含量与土壤交换态 Cd 含量显著负线性相关($P < 0.05$),其他关系不显著;威优 46 茎叶、谷壳和糙米中 Cd 含量均与土壤交换态 Cd 含量

及交换态 Zn 含量显著负线性相关($P < 0.01$),相关系数 R 值如表 6 所示.就糙米而言,湘晚籼 12 累积的 Cd 含量与土壤中交换态 Cd 含量无关,仅在 Cd 中度污染水平,土壤中交换态 Zn 越多,糙米中累积的 Cd 越多;威优 46 累积的 Cd 含量与土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量相关,在 Cd 中度污染水平,土壤中交换态 Cd 越多,交换态 Zn 越少,则糙米累积的 Cd 越少,在 Cd 重度污染水平,则是土壤中交换态 Cd 和 Zn 越多,糙米累积的 Cd 越少.

表 6 水稻各部位 Cd 含量与相应土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of Cd contents in various rice organs and contents of exchangeable Cd and Zn in soils

Cd 程度	Cd/Zn 交换态含量	湘晚籼 12 各部位 Cd 含量				威优 46 各部位 Cd 含量			
		根	茎叶	谷壳	糙米	根	茎叶	谷壳	糙米
中度	Ex-Cd	0.566	0.374	0.477	0.010	0.281	0.591 *	0.118	-0.687 *
	Ex-Zn	0.394	0.272	0.438	0.651 *	0.134	-0.626 *	-0.358	0.710 **
重度	Ex-Cd	0.587 *	0.342	-0.621 *	0.342	0.245	-0.787 **	-0.960 **	-0.671 **
	Ex-Zn	0.570	0.031	0.389	0.028	0.152	-0.736 **	-0.801 **	-0.837 **

3 讨论

本实验通过分析模拟 Cd 污染土壤上不同含量

外源 Zn 刺激下,水稻各部位 Cd、Zn 含量的变化以及土壤中交换态 Cd 和 Zn 含量的关系,探讨外源 Zn 对水稻各部位尤其是糙米累积 Cd 的作用.实验

结果表明,土壤中交换态 Cd 含量相比种植前提高,这是水稻根系分泌的低分子有机酸与土壤中化合物反应,溶解土壤中 Cd,从而使 Cd 的生物有效性增加^[23,24];而土壤中交换态 Zn 的降低,则是因为水稻根系主动吸收了大量的活性 Zn^[25].

在 Cd 的 2 种污染水平,外源 Zn 施用量在 40 mg·kg⁻¹和 80 mg·kg⁻¹时有提高水稻生物量的趋势,各处理间差异不显著($P > 0.05$),但当 Zn 含量增大到 160 mg·kg⁻¹后,对总生物量有降低影响,处理间差异显著($P < 0.05$,表 3),这表明高含量外源 Zn 的施用对水稻有减产作用.当土壤中全量 Zn 达到 240 mg·kg⁻¹左右,超过国家土壤 II 级标准中的 200 mg·kg⁻¹,也即土壤中 Zn 全量达到污染程度时,超过了水稻生态安全阈值^[26]且土壤中交换态 Zn 含量过高(65 mg·kg⁻¹左右),就影响了水稻正常生长.有研究表明,施用锌肥,对水稻生物量有增产作用^[12,14,27],但本实验中,这一趋势虽然有但并不显著,这与供试土壤本身交换态 Zn 含量较高(4.17 mg·kg⁻¹)相关,并非缺 Zn 土壤^[28],因此外源 Zn 增产的效果不明显.

综合分析水稻在外源 Zn 影响下各部位 Cd 含量(图 1 和表 4)可知,在土壤 Cd 中度污染时,外源 Zn 可激发 2 种水稻各部位对 Cd 的吸收,这可能是因为 Cd 与 Zn 之间存在相同的运输通道,Zn 吸收是主动运输,而 Cd 吸收是被动运输^[6,25,29],当土壤中交换态 Zn 大量存在于水稻根系环境后,水稻在主动吸收 Zn 的同时促进了 Cd 的吸收,此时土壤中 Cd 与 Zn 之间产生了协同作用.湘晚籼 12 糙米中 Cd 与 Zn 含量正线性相关,威优 46 水稻谷壳中 Cd 与 Zn 含量正线性相关(表 5),以及 2 种水稻糙米中 Cd 含量与土壤中 Zn 交换态含量正线性相关(表 6),正是这一协同作用的结果.实验还显示,湘晚籼 12 无论在 Cd 中度污染还是重度污染,水稻各部位对 Cd 的累积含量都较低,因为湘晚籼 12 自身是 Cd 低累积品种,高含量外源 Zn 的施用,均提高了其水稻各部位 Cd 含量,这也印证了水稻在主动吸收 Zn 的过程中被动地促进了 Cd 的吸收.本实验结果与胡坤等^[10]的研究中 ZnCl₂ 对水稻累积 Cd 结果相似,也与 Cherif 等^[15]研究报道的 Zn 促进番茄对 Cd 吸收以及 Tkalec 等^[16]报道的 Zn 施用加重了烟草 Cd 毒害作用的结果相似.

在土壤 Cd 重度污染水平,外源 Zn 在 40 mg·kg⁻¹和 80 mg·kg⁻¹含量可以减少水稻对 Cd 的吸收,降低水稻糙米对 Cd 的累积(图 1),这是因为

Zn 与 Cd 在吸收和运输过程中共用同一个转运子,而 Zn 是 Cd 在该转运子结合位点的主要竞争者^[9,30],这导致了水稻根细胞膜吸附位点对 Cd 吸附的减少,Cd 与 Zn 之间为拮抗作用.湘晚籼 12 水稻各部位 Cd 含量降低[图 1(a)],威优 46 水稻茎叶与糙米中 Cd 与 Zn 含量负线性相关(表 5),且与土壤中交换态 Zn 含量负线性相关(表 6),就可能是 Cd 与 Zn 拮抗作用的结果.威优 46 是 Cd 高累积品种,在 Cd 污染土壤中会吸收更多的 Cd,外源 Zn 的拮抗作用就更显著.但当外源 Zn 含量继续增加到 160 mg·kg⁻¹时,湘晚籼 12 水稻各部位以及威优 46 根部和茎叶部 Cd 含量相比 Zn 在 80 mg·kg⁻¹处理上有增加的趋势,激发水稻对 Cd 吸收,这是因为土壤中交换态 Cd 与 Zn 同时大量存在,而 Cd 与 Zn 有相同的价态和近似相同的离子半径,在植物细胞表面竞争结合位点,导致 Cd 的溶解性增强,促使 Cd 从根部向地上部转移^[31].

实验也发现,在土壤 Cd 中度污染水平时,威优 46 根、茎叶和谷壳在 Zn 40 mg·kg⁻¹处理中 Cd 含量达到最大值[图 1(b)],反映出外源 Zn 刺激下水稻根系主动吸收 Zn,从而连带吸收了土壤中的活性 Cd,Cd 与 Zn 表现为协同作用;随着外源 Zn 含量的继续增大,交换态 Zn 大量存在时,Zn 对根系的胁迫大于 Cd,水稻根系优先吸收 Zn,故其根、茎叶和谷壳中 Zn 含量大幅度增加(表 4),而对 Cd 的吸收相对减少了,Cd 与 Zn 之间的关系则可能转化为拮抗作用.

本实验中土壤 Cd 污染程度的不同,外源 Zn 影响水稻累积 Cd 的效应也不同.索炎炎等^[14]向 5 mg·kg⁻¹的模拟 Cd 污染土壤进行水稻叶面喷施 0.2% 锌肥后,糙米 Cd 含量降低 15.4%,而向 2.5 mg·kg⁻¹的污染土壤进行相同处理后,糙米 Cd 含量却升高了 41.9%.本实验结果与之一致.相比向实际 Cd 污染土壤(Cd 含量 7.61 mg·kg⁻¹)施用 0.2% 的锌肥,糙米中 Cd 含量略有下降但差异不显著^[32],Cd 中度污染(Cd 含量 0.78 mg·kg⁻¹)施用 0.2% 的锌肥,糙米中 Cd 含量因水稻品种的不同表现出较大差异^[33],本实验的结果也与之相符.因此,综合实验结果可知,通过施加外源 Zn 控制水稻糙米 Cd 污染的效果因水稻品种、Cd 污染程度不同而可能存在一定差异,只有在 Cd 重度污染水平下外源 Zn 的施用才能够有效降低糙米中的 Cd 含量.

4 结论

(1)在 Cd 中度污染水平,外源 Zn 增大 2 种水

稻各部位 Cd 含量,湘晚籼 12 和威优 46 糙米 Cd 含量分别增加 125.0% ~ 275.0% 和 6.6% ~ 91.2%, 但 Cd 含量均低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属安全生产; 在 Cd 重度污染水平, 外源 Zn 可降低水稻各部位 Cd 含量, 湘晚籼 12 和威优 46 糙米 Cd 含量相应降低了 16.6% ~ 63.5% 和 15.6% ~ 74.4%, 且外源 Zn 施用使得威优 46 糙米中 Cd 含量从 $0.45 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 达到安全生产的要求。

(2) 在 Cd 中度污染水平, 湘晚籼 12 和威优 46 糙米 Cd 含量与土壤中交换态 Zn 含量正线性相关; 在 Cd 重度污染水平, 威优 46 糙米 Cd 含量与土壤中交换态 Zn 含量负线性相关。

(3) 在不造成土壤 Zn 污染的前提下, 不同含量外源 Zn 的施用对水稻地上部位总生物量有增产趋势。

(4) 在不造成土壤 Zn 污染的前提下, 在 Cd 重度污染土壤中施用一定量的 Zn 可降低糙米 Cd 含量, 提高糙米品质, 但在 Cd 中度污染土壤中, 则建议不要施用锌肥。

参考文献:

- [1] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [2] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, **50**(1): 186-194.
- [3] Roy M, McDonald L M. Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils [J]. Land Degradation & Development, 2015, **26**(8): 785-792.
- [4] Chaney R L, Reeves P G, Ryan J A, *et al.* An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risk [J]. Biometals, 2004, **17**(5): 549-553.
- [5] 王美娥, 彭驰, 陈卫平. 水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4283-4290.
- [6] Hall J L, Williams L E. Transition metal transporters in plants [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, **54**(393): 2601-2613.
- [7] 张建辉, 王芳斌, 汪霞丽, 等. 湖南稻米镉和土壤镉锌的关系分析[J]. 食品科学, 2015, **36**(22): 156-160.
- [8] 杨勇, 江荣风, 李花粉, 等. 土壤容重改变对锌/镉超累积植物遏兰菜根系特征及吸镉的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 3043-3049.
- [9] 曲荣辉, 张曦, 李合莲, 等. 不同锌水平对低剂量镉在水稻中迁移能力的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, **24**(4): 517-523.
- [10] 胡坤, 喻华, 冯文强, 等. 中微量元素和有益元素对水稻生长和吸收镉的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(8): 2341-2348.
- [11] 陈贵青, 张晓璟, 徐卫红, 等. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1657-1662.
- [12] Yang J X, Wang L Q, Wei D P, *et al.* Foliar spraying and seed soaking of zinc fertilizers decreased cadmium accumulation in cucumbers grown in Cd-contaminated soils [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2011, **20**(4): 400-410.
- [13] 刘昭兵, 纪雄辉, 田发祥, 等. 碱性废弃物及添加锌肥对污染土壤镉生物有效性的影响及机制[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1164-1170.
- [14] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, **38**(4): 449-458.
- [15] Cherif J, Derbel N, Nakkach M, *et al.* Spectroscopic studies of photosynthetic responses of tomato plants to the interaction of zinc and cadmium toxicity [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2012, **111**: 9-16.
- [16] Tkalec M, Štefanić P P, Cvjetko P, *et al.* The effects of cadmium-zinc interactions on biochemical responses in tobacco seedlings and adult plants [J]. PLoS One, 2014, **9**(1): e87582.
- [17] 许珂. 水稻吸收积累 Cd 的规律及其对硅肥硒肥施用的响应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012. 36-42.
- [18] 温娜, 王景安, 刘仲齐. 利用 AMMI 模型分析稻米镉含量的基因型与环境互作效应[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(5): 817-823.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] Bunluesin S, Pokethitiyook P, Lanza G R, *et al.* Influences of cadmium and zinc interaction and humic acid on metal accumulation in *Ceratophyllum demersum* [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007, **180**(1-4): 225-235.
- [21] 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.
- [22] GB/T 5009.15-2003, 食品中镉的测定[S].
- [23] Doyle M O, Otte M L. Organism-induced accumulation of iron, zinc and arsenic in wetland soils [J]. Environmental Pollution, 1997, **96**(1): 1-11.
- [24] Liu J G, Qian M, Cai G L, *et al.* Variations between rice cultivars in root secretion of organic acids and the relationship with plant cadmium uptake [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2007, **29**(3): 189-195.
- [25] Stomph T J, Jiang W, Struik P C. Zinc biofortification of cereals: rice differs from wheat and barley [J]. Trends in Plant Science, 2009, **14**(3): 123-124.
- [26] 陈世宝, 林蕾, 魏威, 等. 基于不同测试终点的土壤锌毒性阈值及预测模型[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 922-930.
- [27] Wang Y Y, Wei Y Y, Dong L X, *et al.* Improved yield and Zn accumulation for rice grain by Zn fertilization and optimized water management [J]. Journal of Zhejiang University-Science B (Biomedicine & Biotechnology), 2014, **15**(4): 365-374.
- [28] 刘铮, 朱其清, 唐丽华, 等. 我国缺乏微量元素土壤及其区域分布[J]. 土壤学报, 1982, **19**(3): 209-223.
- [29] 华璐, 白铃玉, 韦东普, 等. 镉锌复合污染对小麦籽粒镉累积的影响和有机肥调控作用[J]. 农业环境保护, 2002, **21**(5): 393-398.
- [30] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat

- seedlings[J]. *Physiologia Plantarum*, 2002, **116**(1): 73-78.
- [31] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, *et al.* Zinc effects on cadmium accumulation and partitioning in near-isogenic lines of durum wheat that differ in grain cadmium concentration[J]. *New Phytologist*, 2005, **167**(2): 391-401.
- [32] 张良运, 李恋卿, 潘根兴, 等. 磷、锌肥处理对降低污染稻田水稻籽粒 Cd 含量的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 909-913.
- [33] 索炎炎. 镉污染条件下叶面喷施锌肥对水稻镉积累的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012. 44-46.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section)	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI)	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i>	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe ⁰ -PRB Systems	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd ²⁺ from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPy/AQDS in Microbial Fuel Cells	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR)	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH ₄ and CO ₂ Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO ₂ Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i>	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

《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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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