

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响

高子翔¹, 周航¹, 杨文毅², 辜娇峰¹, 陈立伟¹, 杜文琪¹, 徐珺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与技术学院, 长沙 410128)

摘要: 为研究硅肥对土壤 Cd 生物有效性以及水稻累积重金属 Cd 的影响, 模拟土壤低 Cd 污染水平 (Cd 总量为 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和土壤高 Cd 污染水平下 (Cd 总量为 $5.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 土壤基施 0、15、30、60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硅肥, 进行水稻盆栽种植实验。结果表明, 施用 15~60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 硅肥能提升水稻各生育期土壤的 pH 值, 降低土壤交换态 Cd 含量和 TCLP 提取态 Cd 含量 24.2%~43.7%, 12.7%~46.8%, 土壤中 Si 能与 Cd 形成 Si-Cd 复合物, 降低土壤 Cd 的生物有效性, 且降低效果在土壤低 Cd 污染水平时优于高 Cd 污染水平。硅肥提升水稻地上部的生物量尤其是产量。土壤低 Cd 污染水平下, Si 对土壤 Cd 向水稻地上部的转运有促进和阻碍两种作用, 施用量过低 (Si 15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 或过高 (Si 60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时均促进土壤 Cd 向水稻地上部转运, 施用量为 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时则阻碍 Cd 向上转运。随着 Si 施用量的增大, 糙米 Cd 含量先上升后下降, 范围为 0.07~0.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均低于 0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤高 Cd 污染水平下, Si 阻碍 Cd 向水稻地上部的转运, 糙米、谷壳、茎叶的 Cd 含量分别降低 38.7%~48.5%、35.7%~70.7%、30.9%~40.7%, 糙米 Cd 含量范围 0.23~0.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。综合考虑产量和糙米 Cd 含量, 土壤低 Cd 污染水平下, 建议施用 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Si; 高 Cd 污染水平下, 建议施用 Si 15~60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

关键词: 硅肥; 生物有效性; 累积; 镉污染; 土壤; 水稻

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5299-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201704210

Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants

GAO Zi-xiang¹, ZHOU Hang¹, YANG Wen-tao², GU Jiao-feng¹, CHEN Li-wei¹, DU Wen-qi¹, XU Jun¹, LIAO Bo-han^{1*}

(1. College of Environmental 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: The impacts of silicon (Si) on cadmium (Cd) bioavailability in soil and Cd accumulation in rice plants were investigated in pot experiments with rice (*Oryza sativa* L.) cultivation. Silicon fertilizer as the base manure (Si 0, 15, 30, and 60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) was added in simulated slightly Cd-contaminated soil (total soil Cd of $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and severe Cd-contaminated soil (total soil Cd of $5.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). It indicated that the application of 15-60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Si before the rice was transplanted improved soil pH values and reduced the contents of exchangeable-Cd and TCLP extractable-Cd in the soil by 24.2%-43.7% and 12.7%-46.8%, respectively, during the rice growing stages. The reduction in soil Cd bioavailability resulted from the complexing of Si and Cd, and the reduction followed the order: slightly Cd-contaminated soil > severely Cd-contaminated soil. It was obvious that silicon fertilizer improved rice biomass above ground, especially for rice grain yield. In the slightly Cd-contaminated soil, Si both promoted and restrained soil Cd transportation from the rice root to the shoot; the low application (Si 15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) and high application (Si 60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) of Si both promoted Cd transportation, but the medium application (Si 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) restrained Cd transportation. With increasing silicon fertilizer application, Cd contents in brown rice increased first and then decreased, ranging from 0.07-0.15 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, remaining lower than 0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In the severely Cd-contaminated soil, Si restrained the soil Cd transportation from the rice root to the shoot. The Cd contents in brown rice, husk, and straw were reduced by 38.7%-48.5%, 35.7%-70.7%, and 30.9%-40.7%, respectively, and Cd contents in brown rice were 0.23-0.28 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Considering rice grain yields and Cd contents in brown rice, it was recommended that the Si application be 30 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ of Si in the slightly Cd-contaminated soil and Si 15-60 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the severely Cd-contaminated soil.

Key words: silicon fertilizer; bioavailability; accumulation; Cd contamination; soil; rice

矿冶和电镀行业的快速发展以及农业肥料和农药的滥用导致土壤重金属污染严重, 农田重金属污染已经成为受全世界关注的环境问题^[1~3]。我国农田 Cd 污染严重, 其面积达到 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 约占农田总面积的 1/5, 污染所造成的经济损失至少为 200 亿元^[4,5]。全世界约有一半的人口以水稻为主

食, 而被污染的土壤生长的水稻吸收和累积重金属镉 (Cd), 通过食物链严重危害人类的健康^[1,3,6]。

收稿日期: 2017-04-21; 修订日期: 2017-06-14

基金项目: 农业部财政部科研专项 (农办财函 2016); 国家自然科学基金项目 (41501344)

作者简介: 高子翔 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染与控制, E-mail: owen_544013802@qq.com

* 通信作者, E-mail: liaobh1020@163.com

硅(Si)是地壳除氧(O)元素之外最多的元素. 土壤中的 Si 含量虽高且以各种形态赋存,但是能被植物吸收利用的只有有效态 Si, 缺乏 Si 元素的植株无法正常生长, 所以有些学者将其视为高等植物的必需元素^[7~9]. 有研究表明, Si 能提高农作物生物量和产量^[9~11], 提高农作物对褐斑病、二化螟、稻飞虱、纹枯病等生物胁迫的能力^[7,12,13], 也能提高农作物应对盐胁迫^[14]、重金属 Cd、Mn、Cu、Al、As 胁迫^[9,15~22]、干旱^[23~25]等非生物胁迫的能力. Si 能减轻土壤和水稻中重金属 Cd 的毒害作用, 但是 Si 与 Cd 在土壤中和土壤-水稻系统中的解毒机制十分复杂, 包括提升土壤 pH 值, 减少植物根系对 Cd 的吸收, 减少地下部向地上部的运输, 堵塞质外体运输通道, 细胞壁中形成 Cd-Si 复合物^[9,15,26~30]等. 有研究发现, 施用粉煤灰、钢渣和炉渣等富 Si 材料能提升土壤 pH 值来影响土壤重金属 Cd 的活性^[15,26~28,31]; 也有研究表明, 土壤 pH 值未发生变化^[25,32,33]. 土壤中的 Si 与 Fe、Al、Mn 等元素相互作用, 使专性吸附态 Cd 或铁锰氧化物结合态 Cd 含量增加, 因而交换态 Cd 减少, 从而降低植物的毒害^[9,15,34~36]. 有研究表明, 叶面喷施和土壤施用硅酸钠(Na_2SiO_3)均能提高水稻的生物量, 减少水稻各部位 Cd 含量, 但 Cd 累积量变化较小^[10,29,36]. 实验发现, 不同施用量的硅酸钠进入污染土壤能降低土壤 Cd 生物有效性和活性, 显著提高小麦的生物量, 其原因是 Si 增加根部细胞质外体中的 Cd 引起的; 而低施用量 Na_2SiO_3 促进小麦 Cd 累积^[9,37,38]. Zhang 等认为^[10], 硅酸钾(K_2SiO_3)能减少水稻各部位的 Cd 含量和植株的总累积量, 但是根系的 Cd 累积量有可能增长^[39]; 而 Lu 等发现^[40], 硅酸钾促进甘蓝地上部和地下部的 Cd 累积. 但是, 关于在不同 Cd 污染水平的土壤中施用 Si 肥能否有效控制水稻对 Cd 吸收累积和降低水稻糙米 Cd 含量还不得而知, 土壤中 Cd 与 Si 的作用机制并不清楚, 特别缺乏针对实际 Cd 污染土壤种植水稻施用 Si 肥的具体建议.

本研究采用酸性红壤, 选取湖南地区常见籼稻(威优 46 号), 利用基施 Si 肥的方式, 进行水

稻盆栽实验, 研究 Si 对土壤 Cd 生物有效性和水稻 Cd 累积效应的影响, 以期对不同 Cd 污染下施用 Si 肥降低水稻对 Cd 的吸收累积提供参考和依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为威优 46, 由湖南亚华种业科学研究院提供. 硅肥溶液的配比为山梨糖醇($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$):甘露糖醇($\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$):甘油($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$):水(H_2O):硅酸钠(Na_2SiO_3) = 4:5:8:20:75. 将 4 份山梨糖醇、5 份甘露糖醇、8 份甘油依次加入到 20 份水中, 搅拌均匀, 然后加入 75 份硅酸钠, 于 70℃ 下反应 40 min, 冷却后即为硅肥溶液, 其中硅含量为 $150\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$. 供试土壤选自湖南省长沙市宁乡县双江口镇($28^\circ27.716'\text{N}$, $113^\circ16.356'\text{E}$)轻微 Cd 污染土壤. 实验试剂均为优级纯或分析纯.

1.2 实验设计

本研究采用盆栽水稻试验, 地点在中南林业科技大学生命科学楼 3 楼户外种植基地, 处于亚热带季风湿润气候, 雨热同期, 四季分明. 年平均气温 $16.8\sim17.3^\circ\text{C}$, 年均降水量 $1\,400\sim1\,500\text{ mm}$. 将供试土壤自然风干、碾碎, 去除石头、根茎等杂物, 并装入盆栽试验用桶中, 每桶装有微量 Cd 污染的供试土壤土 4.0 kg.

6 月 28 日添加 $\text{CdCl}_2\cdot2.5\text{H}_2\text{O}$ 两种浓度梯度($0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 土壤充分搅拌均匀, 使土壤 Cd 含量分别达到 $0.72\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (低 Cd 污染水平, Cd0.72)和 $5.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (高 Cd 污染水平, Cd5.08) (表 1). 7 月 12 日 Si 肥溶液稀释后 (pH 约为 11.59), 按 0、15、30、60 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 这 4 个 Si 施用水平 (Si0、Si15、Si30、Si60) 施用于土壤, 熟化 15 d, 每个处理各设置 3 个重复, Si0 为对照组. 7 月 28 日水稻秧苗移植入盆栽, 为促进水稻根系生长和有效分蘖, 水稻分蘖期晒田 15 d (停止灌溉), 其他生长期间全程自来水灌溉, 另施加基肥且水分管理与传统种植方式一致, 期间喷施农药预防病虫害.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of the tested paddy soil

pH 值	OM / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	碱解氮 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效磷 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd 全量 ¹⁾ / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	有效态 Si / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
5.5	32.0	31.3	103.3	20.4	77.4	0.22/0.72/5.08	259.4

1) 3 个数值分别表示供试土壤、低 Cd 污染水平土壤和高 Cd 污染水平土壤

1.3 样本采集

土壤样品分别于设置 4 个采样时期: 土壤熟化期(7 月 28 日)、水稻分蘖期(8 月 29 日)、灌浆期(10 月 9 日)、成熟期(11 月 3 日)。水稻成熟后采集水稻植株, 超纯水洗净, 105℃ 杀青, 再 70℃ 烘干, 水稻分成糙米、谷壳、茎叶、根部这 4 个部位, 衡重后称干重, 粉碎备用, 分析各部位生物量和 Cd、Si 含量。同时采集水稻根系约 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、Si 相关指标的分析。

1.4 样品分析

采用 TCLP 毒性浸出试验^[41~43]和修正 Tessier 连续提取法第一步($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$)溶液提取土壤中 Cd 的交换态含量^[44]评价土壤 Cd 的生物有效性。土壤有效态 Si 采用柠檬酸浸提-硅钼蓝比色法($0.025 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 柠檬酸)测定^[45,46]。水稻样品中 Cd 含量的测定方法(干灰化法)如下: 称取 3.00 g 水稻样品粉末于 30 mL 坩埚中, 同时做两份空白试验, 于马弗炉中炭化至无黑烟(250℃), 然后 500℃ 高温灰化 6~8 h。取出冷却, 加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硝酸溶解灰分, 并多次洗涤坩埚, 定容到 50 mL 容量瓶中, 保存备测^[47]。水稻各部位 Si 含量采用 50% 的 NaOH 溶液提取, 采用硅-钼蓝比色法测定^[48]。土壤样品 Cd 含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES 6300, Thermo, USA)测定,

其检测限为 $2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 水稻样品 Cd 含量采用石墨炉原子吸收仪(ICE-3500, Thermo, USA)测定, 检测限为 $0.02 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。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 与 Si 的回收率分别为 94.5%~98.6% 和 97.2%~102.3%, 同时做空白实验。

1.5 数据分析

本研究数据统计与分析均采用 IBM SPSS Statistics 22.0 Pearson 相关性分析和 Duncan 多重比较法($P < 0.05$ 和 $P < 0.01$)进行分析, 图形采用 OriginPro 8.5.1 进行处理。

2 结果与分析

2.1 Si 对土壤 Cd 生物有效性的影响

土壤低 Cd 污染水平下, 施用 Si 肥后, 熟化期的土壤交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量与对照相比变化不大, 处理间不存在显著差异($P > 0.05$), 水稻不同生育期(水稻分蘖期、灌浆期、成熟期)Si 处理土壤的交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量分别降低 24.2%~43.7% 和 12.7%~46.8%, 存在显著性差异($P < 0.05$)[图 1(a)和 1(c)]。

土壤高 Cd 污染水平下, Si 处理的交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量略微降低, 处理间不存在显著差异[图 1(b)和 1(d)]。

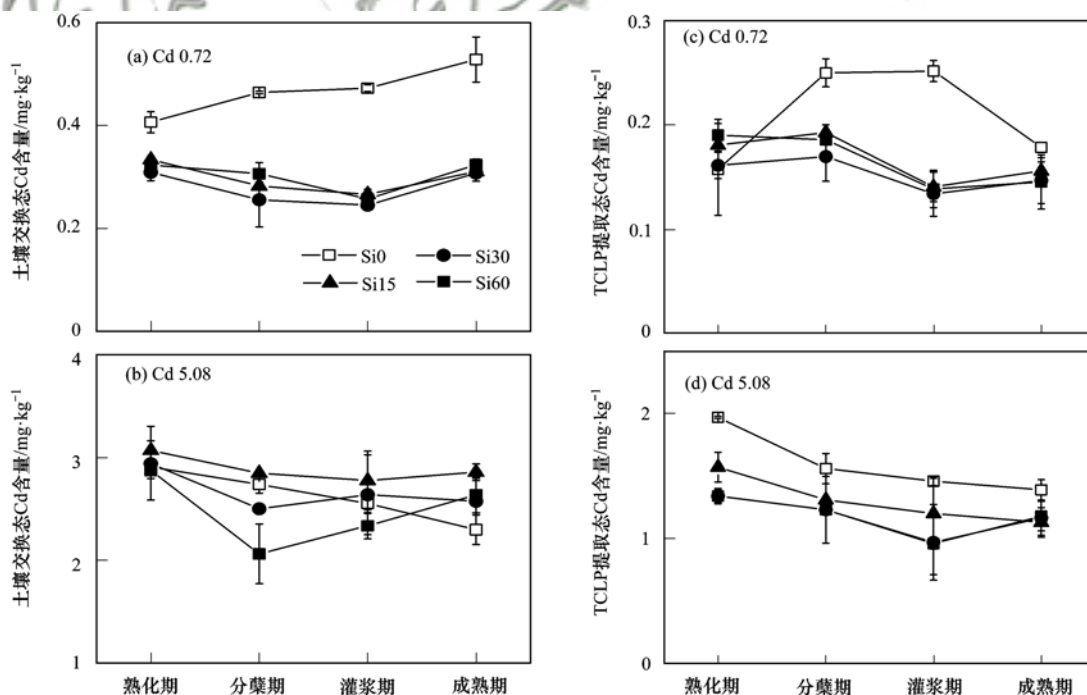


图 1 不同 Si 处理对水稻不同生育期土壤交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量的影响

Fig. 1 Effects of silicon fertilizer on exchangeable-Cd and TCLP extractable-Cd in soils at four rice growth stages

2.2 土壤 pH 值和有效态 Si 含量的变化

熟化期的土壤 pH 值变化不大, 各处理不存在显著差异 ($P>0.05$). 在水稻生育期 (水稻分蘖期、灌浆期和成熟期), 施 Si 处理的土壤 pH 值均高于对照 [图 2(a) 和 2(b)]. 土壤低 Cd 污染水平下, 水稻分蘖期处理的土壤 pH 值相对对照升高 0.09 ~ 0.28 个单位; 土壤高 Cd 污染水平下, 分蘖期土壤 pH 值相对对照升高 0.34 ~ 0.47 个单位, 存在显著性差异 ($P<0.05$). 低 Cd 和高 Cd 污染水平下, 种植水稻后, 分蘖期的对照土壤 pH 值较熟化期各降低 0.1 和 0.13 个单位. Si 肥提升水稻各生育期的土壤 pH 值.

施用 Si 肥后, 熟化期的土壤有效态 Si 显著上升 (表 2). 随着生育期的延长, 土壤有效态 Si 的含量逐渐减少. 与各时期相比, 土壤熟化期与水稻分蘖期间土壤有效态 Si 的降幅最大, 其次是水稻分蘖期到灌浆期.

2.3 Si 对水稻生物量的影响

从表 3 可以看出, 土壤低 Cd 和高 Cd 污染水平下 Si 有提高水稻生物量的趋势, 尤其是水稻地上部生物量, 提高 11.4% ~ 46.3%、23.7% ~

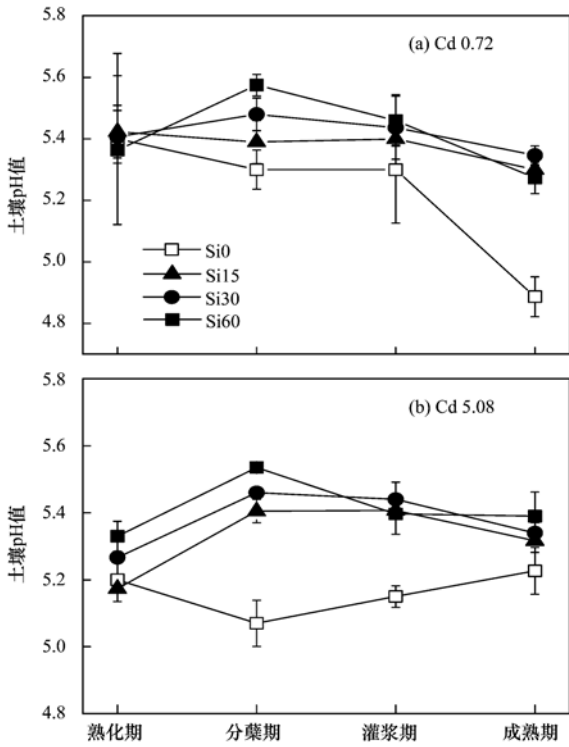


图 2 不同 Si 肥施用量对水稻不同生育期土壤 pH 值的影响

Fig. 2 Effects of silicon fertilizer on soil pH values at four rice growth stages

表 2 不同 Si 肥施用量对水稻不同生育期土壤有效态 Si 含量的影响¹⁾

Table 2 Effects of silicon fertilizer on available Si contents in soils at four rice growth stages

Cd 污染土壤 /mg·kg ⁻¹	Si 施用量 /mg·kg ⁻¹	种植水稻					
		未种植水稻 土壤熟化期	水稻分蘖期	降幅/%	水稻灌浆期	降幅/%	水稻成熟期
0.72	0	295.2	226.5	23.3	218.7	2.6	248.3
	15	414.0	259.6	37.3	241.0	4.5	255.0
	30	361.8	138.1	61.8	101.1	10.2	86.6
	60	415.6	130.1	68.7	100.7	7.1	83.1
5.08	0	277.9	233.0	16.2	216.9	5.8	219.6
	15	373.7	337.7	9.6	279.5	15.6	156.0
	30	385.9	126.9	67.1	100.4	6.9	86.5
	60	424.6	136.4	67.9	73.5	14.8	87.1

1) 降幅是相邻两个时期土壤有效态 Si 含量的变化量占水稻种植前后土壤有效态 Si 含量的总变化量的百分比

表 3 不同 Si 肥施用量对成熟期水稻生物量的影响¹⁾

Table 3 Effects of Si fertilizer on biomass (dry weight) of rice at maturity

Cd 污染土壤 /mg·kg ⁻¹	Si 施用量 /mg·kg ⁻¹	总生物量 /g·株 ⁻¹	稻谷产量 /g·株 ⁻¹	地上部生物量 /g·株 ⁻¹	地下部生物量 /g·株 ⁻¹
0.72	0	44.5 ± 5.9Bb	11.4 ± 0.8b	36.0 ± 1.4b	5.6 ± 0.1a
	15	53.6 ± 9.2ABab	11.7 ± 0.2b	50.1 ± 7.3ab	6.0 ± 0.4a
	30	65.1 ± 14.6Aa	13.0 ± 0.5a	52.1 ± 18.9a	5.1 ± 1.3a
	60	49.6 ± 2.0ABab	10.9 ± 0.2b	44.9 ± 3.0ab	4.7 ± 1.1a
5.08	0	38.0 ± 7.0Bb	7.8 ± 1.2b	39.5 ± 4.3b	4.5 ± 0.7a
	15	48.9 ± 2.7ABab	9.0 ± 2.0b	44.1 ± 2.5ab	4.8 ± 0.3a
	30	56.4 ± 11.1Aa	13.4 ± 0.7a	54.2 ± 10.6a	4.7 ± 0.6a
	60	47.1 ± 6.8ABab	9.0 ± 1.9b	39.8 ± 7.9b	4.5 ± 0.6a

1) 不同字母表示处理间差异显著, 小写字母表示显著差异 ($P<0.05$), 大写字母表示极显著差异 ($P<0.01$)

48.2%, 存在显著性差异($P < 0.05$). 低 Cd 污染水平下, 施 Si 略为提高水稻产量, 各处理间差异不显著, 但 Si 施用量为 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 水稻显著增产 14.0% ($P < 0.05$). 高 Cd 污染水平下, 施 Si 处理的水稻产量增加 15.4% ~ 71.8%.

2.4 Si 对水稻各部位 Cd 含量的影响

土壤低 Cd 污染水平下, 随着 Si 肥施用量的增大, 水稻糙米、谷壳的 Cd 含量有先增长后降低的趋势 [图 3(a)]. Si 施用量为 $15 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 糙米、谷壳的 Cd 含量增大 8.3% ~ 66.7%、19.6% ~ 113.7%; 但在施用量为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,

糙米和谷壳 Cd 含量较对照各降低 22.0%、13.4%. 各 Si 处理的茎叶和根系 Cd 含量各增长 14.6% ~ 145.3%、10.4% ~ 33.0%. 就糙米而言, 各 Si 处理 Cd 含量范围为 $0.07 \sim 0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

土壤高 Cd 污染水平下, Si 处理的水稻的糙米、谷壳、茎叶的 Cd 含量各降低 38.7% ~ 48.5%、35.7% ~ 70.7%、30.9% ~ 40.7%, 均存在显著性差异($P < 0.05$) [图 3(b)]. 糙米 Cd 含量范围为 $0.23 \sim 0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均大于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Si 处理的水稻根系的 Cd 含量变化趋势不明显.

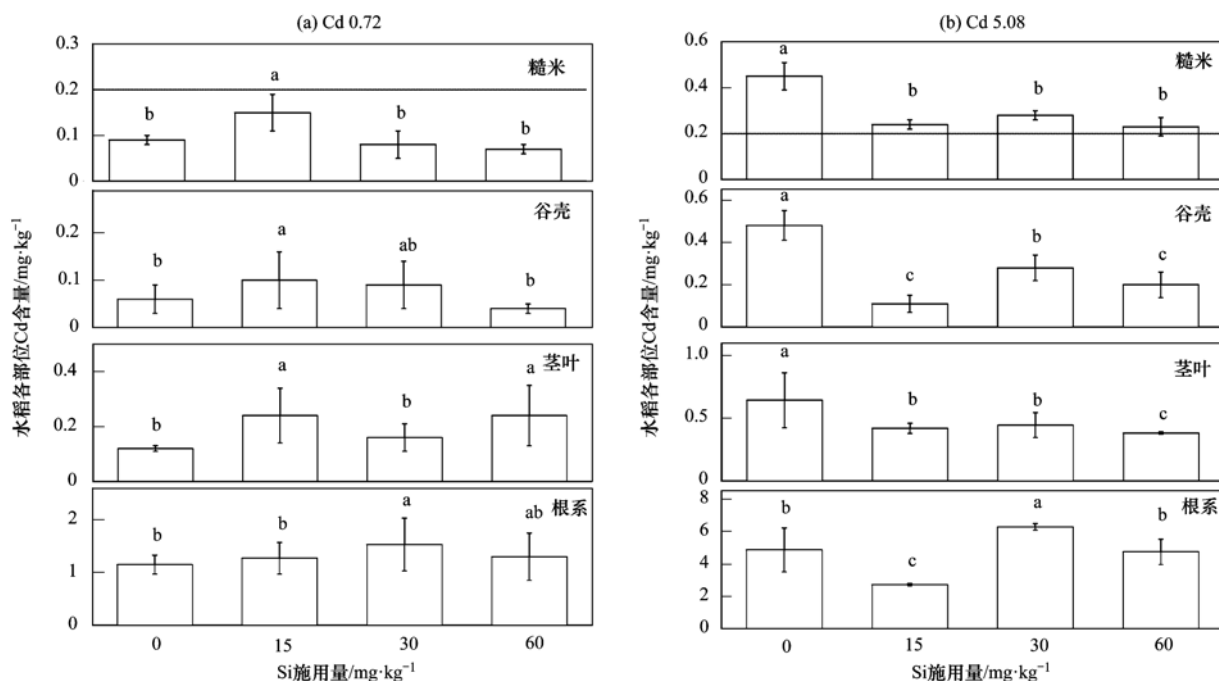


图3 不同 Si 处理对成熟期水稻各部位 Cd 含量的影响

Fig. 3 Effects of Si fertilizer on Cd contents in different rice tissues (brown rice, husk, straw, and root) at maturity

3 讨论

3.1 Si 降低土壤 Cd 的生物有效性

供试土壤的有效态 Si 含量为 $259.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于供硅能力较强的土壤. 本实验中 $15 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Si 施用量约为土壤有效态 Si 含量的 6% ~ 23%, 高 Si 施用量 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别是文献[15,33]施用量的 15% 和 40%, 相对较低的 Si 施用量可以减弱因土壤大量施硅直接提升土壤 pH 值的影响[15,33]. 土壤熟化期(未种植水稻), 施 Si 土壤 pH 值变化较小, 而水稻生育期(水稻分蘖期、灌浆期、成熟期)Si 处理的土壤 pH 值均高于对照[图 2(a)和 2(b)]. $15 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的施用量 Si 并未直接提升土壤 pH 值, 而是通过影响水稻植株的生长发

育, 影响水稻根系分泌物和土壤微生物来提升土壤 pH 值[49,50].

土壤低 Cd 污染水平下, 在停止灌溉的晒田期间(即水稻分蘖后期), 对照的土壤 pH 值较熟化期降低 0.1 个单位, 土壤交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量各上升 9.3%、58.9%, 这与 Honma 等的研究结果相同[51]. 这可能是因为水稻的根系分泌氧和小分子的有机酸, 降低 pH 值, 溶解土壤中的 Cd, 从而使 Cd 的生物有效性升高[49,52~54]. 但施 Si 后的土壤 pH 值在水稻分蘖期和灌浆期上升, 交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量下降(图 1 和图 2). 在水稻各生育期, 土壤交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量低于对照 Si0 处理(图 1 和图 2), 且随着生育期的延长, 各处理的土壤有效态 Si 含量逐渐降低, 在水稻分

蘖期和灌浆期降幅较大(表2),其原因可能是:水稻生长发育时期,水稻根系对有效态 Si 的需求较大,直接吸收部分土壤有效态 Si;而另一部分有效态 Si 能形成复杂的聚硅酸凝胶,与 Cd、Fe、Al、Mn 等重金属离子凝聚形成 Cd-Si 复合物,从而降低土壤交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量,降低土壤 Cd 生物有效性^[35,36,50].而水稻根系与 Si 的复合作用,使得土壤 pH 值增大,这也有利于 Si 与土壤中的 Cd 形成活性较弱的铁锰氧化态 Cd 和特殊吸附态的 Cd,降低土壤 Cd 的生物有效性^[9,27].

土壤高 Cd 污染水平下,水稻各生育期 Si 处理土壤交换态和 TCLP 提取态 Cd 含量下降不显著.可能是因为 Si 相对施用量较小,土壤有效态 Si 与土壤活性 Cd 的凝聚效果较弱,土壤 Cd 生物有效性的降低效果不显著.

3.2 Si 提升水稻地上部生物量

基施 Si 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ 的硅肥显著提高水稻地上部生物量,但对水稻根系的生物量影响不明显(表3),这源于 Si 能增厚植物表皮细胞壁中与纤维素相关的硅胶层,减少细胞水分的流失,使植物蒸腾作用减弱并减少植物内部水分胁迫,从而提高植物的生物量和稻谷产量^[22~24].

3.3 水稻地下部 Cd 向地上部的转运

土壤低 Cd 污染水平下, Si 处理的水稻地下部根系和地上部茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量都不同程度上升[图3(a)].高 Cd 污染水平下, Si 处理的水稻地下部根系 Cd 含量上升,但地上部茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量显著降低($P < 0.05$)[图3(b)]. Si 施用量为 30 mg·kg⁻¹ 时,低 Cd 和高 Cd 污染水平下的土壤 Cd 生物有效性降低,土壤 Cd 的活性减弱(图1),但是水稻根系对土壤 Cd 主动吸收加强,根系 Cd 含量上升;高 Cd 污染的水稻地上部茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量显著降低($P < 0.05$),但低 Cd 污染的水稻地上部茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量均上升

[图3(a)和3(b)]. Si 有阻碍 Cd 由水稻地下部向地上部运输的能力,且在高 Cd 污染水平下, Si 的阻碍效果较强.

土壤低 Cd 污染水平下,水稻茎叶 Cd 与水稻茎叶 Si 含量呈显著负相关关系($R = -0.687$, $P < 0.05$, $n = 12$),水稻根系 Cd 与 Si 也呈负相关关系($R = -0.554$, $P > 0.05$, $n = 12$)(表4),这与 Yu 的分析相同^[47]. 15 mg·kg⁻¹ 低施用量 Si 促进水稻地下部 Cd 向地上的转运,加重水稻地上部 Cd 累积; Si 施用量增加到 30 mg·kg⁻¹ 时,根系 Cd 含量显著增加 33.0%,而水稻茎叶 Cd 含量变化较小;而 Si 施用量为 60 mg·kg⁻¹ 时,茎叶 Cd 含量显著增加地下部, Cd 向地上部运输增强[图3(a)]. Si 在水稻地下部 Cd 向地上部运输过程中有促进和阻碍两种作用:施用量过低(Si 15 mg·kg⁻¹)和施用量过高(Si 60 mg·kg⁻¹)水稻茎叶的 Cd 含量均显著上升,此时促进作用大于阻碍作用,地下 Cd 向地上部的运输增强;而 Si 施用量为 30 mg·kg⁻¹ 时,根系 Cd 含量显著上升而茎叶 Cd 含量变化较小,此时阻碍作用大于促进作用, Si 阻碍 Cd 向地上的转运.水稻表皮细胞壁中的 Si 能与 Cd 形成共沉淀,减小水稻根部的质外体向地上部运输通道的流量,使 Cd 稳定在茎秆的共质体中, Cd 与 Si 在运输过程中呈现竞争作用,从而阻碍 Cd 由水稻地下部根系向地上部茎秆的运输^[10,19,28,53]. 土壤高 Cd 污染水平下,除 Si15 处理外,施 Si 的水稻根系 Cd 含量显著升高($P < 0.05$),各处理茎叶 Cd 含量均显著降低($P < 0.05$). Si 促进水稻根系对土壤 Cd 的吸收,但是阻碍根系向地上部的转运,降低了茎叶、谷壳、糙米 Cd 含量.而水稻茎叶 Cd 与茎叶 Si 呈极显著的正相关关系($R = 0.861$, $P < 0.01$, $n = 12$),糙米 Cd 含量与 Si 含量的相关关系和谷壳 Cd 含量与 Si 含量的相关关系均不显著(表4). Si 阻碍 Cd 由根系向糙米累积的关键在于根系到茎秆的转运, Si 减

表4 水稻各部位 Si 含量和各部位 Cd 含量的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 4 Pearson correlations for Si contents and Cd contents in different rice tissues in Cd0.72 and Cd5.08 soils

Cd 污染土壤/mg·kg ⁻¹		糙米 Cd	谷壳 Cd	茎叶 Cd	根系 Cd
0.72	糙米 Si	-0.091	-0.222	-0.787 **	-0.076
	谷壳 Si	-0.771 **	-0.616 *	-0.410	0.741 **
	茎叶 Si	-0.356	-0.426	-0.687 *	0.069
	根系 Si	0.216	0.153	0.563	-0.554
5.08	糙米 Si	-0.385	-0.591 *	-0.264	-0.881 **
	谷壳 Si	0.146	0.104	-0.176	0.463
	茎叶 Si	0.839 **	0.810 **	0.861 **	0.227
	根系 Si	0.152	0.103	-0.069	0.371

1) * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$; $n = 12$

少根系 Cd 向茎秆的转运的同时也可能减少茎秆 Si 的累积. 有研究发现, Si 与细胞壁半纤维素交联形成 Si 复合物, 这些 Si 复合物的负电荷能增强与 Cd 的结合, 从而抑制 Cd 的运输^[29,53]. 另外, 水稻生育期土壤 pH 值的上升以及 Si 刺激水稻生物量的提高也是减少水稻 Cd 累积的潜在途径.

3.4 Si 肥施用建议

土壤低 Cd 污染水平下 (Cd0.72), 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ 的 Si 肥对水稻产量负面影响较小, Si 施用量为 30 mg·kg⁻¹ 时, 水稻产量为 13.0 g·株⁻¹, 增加 14.0% (表 3). 随着 Si 肥施用量的增大, 水稻糙米 Cd 含量先上升后下降, 各 Si 处理糙米 Cd 含量范围为 0.07 ~ 0.15 mg·kg⁻¹, 均低于 0.2 mg·kg⁻¹ 的国家食品中污染物限量标准^[55] (GB 2762-2012, Cd < 0.2 mg·kg⁻¹) [图 3 (a)]. 建议施用 Si 30 mg·kg⁻¹, 既降低水稻糙米 Cd 含量, 又增加水稻产量.

土壤高 Cd 污染水平下 (Cd5.08), 土壤施用 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ Si 肥, 糙米 Cd 含量范围为 0.23 ~ 0.28 mg·kg⁻¹, 虽然超出国家食品中污染物限量标准 0.2 mg·kg⁻¹, 但显著降低 38.7% ~ 48.5% ($P < 0.05$) [图 3 (b)], 且水稻增产 15.4% ~ 71.8% (表 3). 建议土壤施用 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ Si 肥降低水稻糙米中 Cd 含量且增加水稻产量.

4 结论

(1) 土壤低 Cd (Cd0.72) 和高 Cd (Cd5.08) 污染水平下, 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ 施用量的 Si 肥可以降低水稻全生育期土壤 Cd 的生物有效性, 提升水稻生育期的土壤 pH 值.

(2) 土壤低 Cd 污染水平和高 Cd 污染水平下, Si 肥显著提高水稻地上部生物量 11.4% ~ 48.2%. 低 Cd 污染水平下, 施用 Si 肥对水稻产量影响较小, Si 施用量为 30 mg·kg⁻¹ 时, 水稻增产 14.0%, 达到 13.0 g·株⁻¹. 高 Cd 污染水平下, 施用 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ Si 肥, 水稻增产 15.4% ~ 71.8%, 最高达到 13.4 g·株⁻¹.

(3) 土壤低 Cd 污染水平下, 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ Si 肥加重水稻地上部 Cd 累积, 但糙米 Cd 含量范围为 0.07 ~ 0.15 mg·kg⁻¹, 均低于 0.2 mg·kg⁻¹. 高 Cd 污染水平下, 15 ~ 60 mg·kg⁻¹ Si 肥降低水稻糙米、谷壳、茎叶 Cd 含量 38.7% ~ 48.5%, 35.7% ~ 70.7%, 30.9% ~ 40.7%, 糙米 Cd 含量范围为 0.23 ~ 0.28 mg·kg⁻¹.

(4) 土壤低 Cd 污染水平下, 建议施用 Si 30 mg·kg⁻¹; 高 Cd 污染水平下, 建议施用 Si 15 ~ 60 mg·kg⁻¹.

参考文献:

- [1] Borlaug N. Feeding a hungry world [J]. Science, 2007, **318** (5849): 359.
- [2] 邹晓锦, 仇荣亮, 黄穗虹, 等. 广东大宝山复合污染土壤的改良及植物复垦 [J]. 中国环境科学, 2008, **28** (9): 775-780.
- [3] Zou X J, Qiu R L, Huang S H, et al. Immobilization and revegetation of heavy metal polluted soils in Dabao Mountain, Guangdong province by amendments [J]. China Environmental Science, 2008, **28** (9): 775-780.
- [4] Zhou H, Zeng M, Zhou X, et al. Heavy metal translocation and accumulation in iron plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa*, L.) cultivars [J]. Plant and Soil, 2015, **386** (1-2): 317-329.
- [5] 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.
- [6] Zeng X B, Xu J M, Huang Q Y, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, **50** (1): 186-194.
- [7] Williams P N, Lei M, Sun G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: Hunan, China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43** (3): 637-642.
- [8] Meharg C, Meharg A A. Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, **120**: 8-17.
- [9] Shi X H, Zhang C C, Wang H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings [J]. Plant and Soil, 2005, **272** (1-2): 53-60.
- [10] Liang Y C, Wong J W C, Wei L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil [J]. Chemosphere, 2005, **58** (4): 475-483.
- [11] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161** (2-3): 1466-1472.
- [12] Zhang C, Wang L, Nie Q, et al. Long-term effects of exogenous silicon on cadmium translocation and toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, **62** (3): 300-307.
- [13] Schurt D A, Cruz M F A, Nascimento K J T, et al. Silicon potentiates the activities of defense enzymes in the leaf sheaths of rice plants infected by *Rhizoctonia solani* [J]. Tropical Plant Pathology, 2014, **39** (6): 457-463.
- [14] Dallagnol L J, Rodrigues F A, Chaves A R M, et al. Photosynthesis and sugar concentration are impaired by the defective active silicon uptake in rice plants infected with *Bipolaris oryzae* [J]. Plant Pathology, 2013, **62** (1): 120-129.
- [15] Kim Y H, Khan A L, Waqas M, et al. Silicon application to rice root zone influenced the phytohormonal and antioxidant responses under salinity stress [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2014, **33** (2): 137-149.
- [16] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Chemical methods and

- phytoremediation of soil contaminated with heavy metals [J]. Chemosphere, 2000, **41**(1-2): 229-234.
- [15] 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.
- Hu K, Yu H, Feng W Q, *et al.* Effects of secondary, micro-and beneficial elements on rice growth and cadmium uptake[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(8): 2341-2348.
- [16] 朱健, 王平, 林艳, 等. 不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 717-725.
- Zhu J, Wang P, Lin Y, *et al.* Differential effect and mechanism of *in situ* immobilization of cadmium contamination in soil using diatomite produced from different areas [J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 717-725.
- [17] 李萍, 宋阿琳, 李兆君, 等. 硅对胁迫下水稻吸收矿质元素的影响[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(10): 3390-3398.
- Li P, Song A L, Li Z J, *et al.* Silicon-mediated mineral elements in rice (*Oryza sativa* L.) under excess manganese stress [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(10): 3390-3398.
- [18] Shen X F, Xiao X M, Dong Z X, *et al.* Silicon effects on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of peanut under aluminum stress[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2014, **36**(11): 3063-3069.
- [19] Keller C, Rizwan M, Davidian J C, *et al.* Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μM Cu [J]. Planta, 2015, **241**(4): 847-860.
- [20] 郭伟, 朱永官, 梁永超, 等. 土壤施硅对水稻吸收砷的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1393-1397.
- Guo W, Zhu Y G, Liang Y C, *et al.* Effect of application of silicon on arsenic uptake by rice seedlings in soil [J]. Environmental Science, 2006, **27**(7): 1393-1397.
- [21] Fleck A T, Mattusch J, Schenk M K. Silicon decreases the arsenic level in rice grain by limiting arsenite transport [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2013, **176**(5): 785-794.
- [22] Shen X F, Zhou Y Y, Duan L S, *et al.* Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation [J]. Journal of Plant Physiology, 2010, **167**(15): 1248-1252.
- [23] Gong H J, Chen K M, Chen G C, *et al.* Effects of silicon on growth of wheat under drought [J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, **26**(5): 1055-1063.
- [24] Shobbar Z S, Oane R, Gamuyao R, *et al.* Absciscic acid regulates gene expression in cortical fiber cells and silica cells of rice shoots [J]. New Phytologist, 2008, **178**(1): 68-79.
- [25] Rizwan M, Meunier J D, Miche H, *et al.* Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **209-210**: 326-334.
- [26] Liang Y C, Sun W C, Zhu Y G, *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review [J]. Environmental Pollution, 2007, **147**(2): 422-428.
- [27] Gu H H, Qiu H, Tian T, *et al.* Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil [J]. Chemosphere, 2011, **83**(9): 1234-1240.
- [28] Ye J, Yan C L, Liu J C, *et al.* Effects of silicon on the distribution of cadmium compartmentation in root tips of *Kandelia obovata* (S., L.) Yong [J]. Environmental Pollution, 2012, **162**: 369-373.
- [29] Liu J, Ma J, He C W, *et al.* Inhibition of cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells by a wall-bound form of silicon [J]. New Phytologist, 2013, **200**(3): 691-699.
- [30] 陈喆, 张森, 叶长城, 等. 富硅肥料和水分管理对稻米镉污染阻控效果研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(12): 4003-4011.
- Chen Z, Zhang M, Ye C C, *et al.* Mitigation of Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) with Si fertilizers and irrigation managements [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(12): 4003-4011.
- [31] 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.
- Chen Z, Tie B Q, Lei M, *et al.* Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2762-2770.
- [32] Cunha K P V D, Nascimento C W A D, Silva A J D. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, **171**(6): 849-853.
- [33] Naeem A, Saifullah, Ghafoor A, *et al.* Suppression of cadmium concentration in wheat grains by silicon is related to its application rate and cadmium accumulating abilities of cultivars [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, **95**(12): 2467-2472.
- [34] Wang L J, Wang Y H, Chen Q, *et al.* Silicon induced cadmium tolerance of rice seedlings [J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, **23**(10): 1397-1406.
- [35] Hobara S, Fukunaga-Yoshida S, Suzuki T, *et al.* Plant silicon uptake increases active aluminum minerals in root-zone soil: implications for plant influence on soil carbon [J]. Geoderma, 2016, **279**: 45-52.
- [36] Wang S H, Wang F Y, Gao S C. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(4): 2837-2845.
- [37] Vaculík M, Lux A, Luxová M, *et al.* Silicon mitigates cadmium inhibitory effects in young maize plants [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, **67**(1): 52-58.
- [38] Vaculík M, Landberg T, Greger M, *et al.* Silicon modifies root anatomy, and uptake and subcellular distribution of cadmium in young maize plants [J]. Annals of Botany, 2012, **110**(2): 433-443.
- [39] Srivastava R K, Pandey P, Rajpoot R, *et al.* Exogenous application of calcium and silica alleviates cadmium toxicity by suppressing oxidative damage in rice seedlings [J]. Protoplasma, 2015, **252**(4): 959-975.
- [40] Lu H P, Zhuang P, Li Z A, *et al.* Contrasting effects of silicates on cadmium uptake by three dicotyledonous crops grown in contaminated soil [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(16): 9921-9930.
- [41] Li Y D, Richardson J B, Walker A K, *et al.* TCLP heavy metal leaching of personal computer components [J]. Journal of Environmental Engineering, 2006, **132**(4): 497-504.
- [42] 陈立伟, 杨文毅, 辜娇峰, 等. 复合改良剂对 Cd 污染稻田早

- 晚稻产地修复效果[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2546-2552.
- Chen L W, Yang W T, Gu J F, *et al.* Remedying effects of a combined amendment for paddy soil polluted with Cd for spring and autumn rice[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2546-2552.
- [43] 辜娇峰, 杨文戮, 周航, 等. 外源锌刺激下水稻对土壤镉的累积效应[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3554-3561.
- Gu J F, Yang W T, Zhou H, *et al.* Provoking effects of exogenous Zn on cadmium accumulation in rice [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3554-3561.
- [44] 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.
- [45] Xu G H, Zhan X H, Li C H, *et al.* Assessing methods of available silicon in calcareous soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, **32**(5-6): 787-801.
- [46] Yu H Y, Ding X D, Li F B, *et al.* The availabilities of arsenic and cadmium in rice paddy fields from a mining area: the role of soil extractable and plant silicon[J]. Environmental Pollution, 2016, **215**: 258-265.
- [47] Hseu Z Y. Evaluating heavy metal contents in nine composts using four digestion methods[J]. Bioresource Technology, 2004, **95**(1): 53-59.
- [48] Elliott C L, Snyder G H. Autoclave-induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, **39**(6): 1118-1119.
- [49] Adrees M, Ali S, Rizwan M, *et al.* Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, **119**: 186-197.
- [50] 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.
- [51] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, *et al.* Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains [J]. Environmental Science & Technology, 2016, **50**(8): 4178-4185.
- [52] 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.
- [53] Ma J, Cai H M, He C W, *et al.* A hemicellulose-bound form of silicon inhibits cadmium ion uptake in rice (*Oryza sativa*) cells [J]. New Phytologist, 2015, **206**(3): 1063-1074.
- [54] 杨文戮, 周航, 邓贵友, 等. 组配改良剂对污染稻田中铅、镉和砷生物有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(1): 257-263.
- Yang W T, Zhou H, Deng G Y, *et al.* Effects of combined amendment on bioavailability of Pb, Cd, and As in polluted paddy soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(1): 257-263.
- [55] GB 2762-2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量[S].

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui, <i>et al.</i> (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si, <i>et al.</i> (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong, <i>et al.</i> (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi, <i>et al.</i> (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)