

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

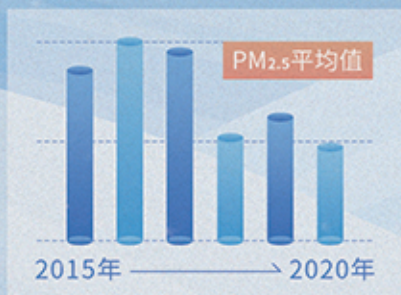
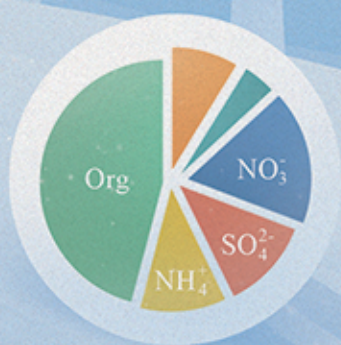
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

北京冬季奥运会历史同期大气PM_{2.5}污染特征分析

刘玥晨, 满睿琪, 裴彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意,
曾立民, 吴志军, 胡敏



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年8月

第43卷 第8期
Vol.43 No.8

目次

北京冬季奥运会历史同期大气 PM _{2.5} 污染特征分析·····	刘玥晨, 满睿琪, 袁彦挺, 杨佳炜, 王均睿, 谭瑞, 汤丽姿, 俞颖, 宋锴, 郭松, 陈仕意, 曾立民, 吴志军, 胡敏 (3895)
天津城区 2019 年 2~3 月气溶胶粒径分布特征观测分析·····	郝团, 蔡子颖, 刘敬乐, 王晓佳, 姚青 (3903)
长江中游地区 PM _{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响·····	王莹, 智协飞, 白永清, 董甫, 张玲 (3913)
滇中典型工矿城市大气干湿沉降重金属等元素特征及健康风险评价·····	范晨子, 刘永兵, 袁继海, 郭威, 孙冬阳, 刘成海 (3923)
典型工业城市夏季 VOCs 污染特征及反应活性·····	秦涛, 李丽明, 王信梧, 杨文, 王晓丽, 徐勃, 耿春梅 (3934)
大连市夏季 VOCs 化学反应活性及来源·····	朱轲欣, 刘立忠, 刘焕武, 罗静期, 高冉冉 (3944)
河南省 18 个城市大气污染物分布特征、区域来源和传输路径·····	刘光瑾, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 王克 (3953)
京津冀臭氧污染特征、气象影响及基于神经网络的预报效果评估·····	朱媛媛, 刘冰, 桂海林, 李健军, 汪巍 (3966)
2006~2020 年中国大气本底站 BC 气溶胶的时空分布特征·····	王红磊, 颜雪, 沈利娟, 柳竞先, 赵天良, 管小彬, 赵德龙 (3977)
钢铁生产行业二噁英污染特征变化及其排放因子·····	杨艳艳, 谢丹平, 付建平, 陈晓燕, 尹文华, 韩静磊, 张素坤, 张璐, 肖滔 (3990)
长江流域着生藻类群落结构的格局及其生态评价·····	胡愈忻, 曹亮, 屈仁超, 黄杰, 胡圣, 周正, 王英才, 张静 (3998)
基于蒙特卡罗模拟与 PMF 模型的黄河流域沉积物重金属污染评价及源解析·····	庞阔, 李敏, 刘璐, 杨璐, 赵洪军 (4008)
梯级拦河堰对典型山地城市河流重金属元素的滞留效应: 以重庆市梁滩河为例·····	王超, 贾伯阳, 潘成勇, 何文战, 叶秋, 罗杉山, 张夏武 (4018)
基于土壤流失的农业面源 TN 和 TP 排海系数估算·····	王有霄, 黄翀, 刘高焕, 赵忠贺, 李贺, 刘庆生 (4032)
河湟谷地不同时空尺度下土地利用及空间格局对水质的影响·····	李好好, 黄懿梅, 郭威, 侯宏洋, 范梦苑, 齐照平, 贾鹏辉, 郭庆波 (4042)
联合 PMF 模型与稳定同位素的地下水污染溯源·····	张涵, 杜昕宇, 高菲, 曾卓, 程思茜, 许懿 (4054)
江西锦江流域抗生素污染特征与生态风险评价·····	李佳乐, 王萌, 胡发旺, 董一慧, 孙占学, 王瑶, 卫承芳, 燕雯 (4064)
天津市地表水中新型优先污染物筛选与管控对策·····	吴颜岐, 宋帅, 史雅娟, 刘莹, 杨胜杰 (4074)
宁夏第三排水沟中药物和个人护理品 (PPCPs) 的污染特征与生态风险评估·····	李富娟, 高礼, 李凌云, 郑兰香, 马兰, 杨桂钦 (4087)
再生水河道浮游生物多样性季节变化分析: 以北运河为例·····	袁训超, 王敏, 郭道宇, 吴东丽 (4097)
太湖草、藻湖区沉积物 WSOM 组成和分子结构分析·····	杜瑛珣, 戴家如, 张巧颖, 刘静静, 黄秀琳, 安世林, 文帅龙 (4108)
太湖氧化亚氮 (N ₂ O) 排放特征及潜在驱动因素·····	刘朝荣, 朱俊羽, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 杨艳, 周永强 (4118)
海绵城市生物滞留带重金属污染特征及风险评价·····	雷晓玲, 邱丽娜, 魏泽军, 杨程, 何博 (4127)
玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果·····	胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 陈柯沁, 罗师旭, 江长胜 (4136)
环境 pH 条件下 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解有机污染物的效能与影响因素·····	刘颖, 郭依玮, 乔俊莲, 孙远奎 (4146)
新疆沙雅县不同植物类型农田环境中典型农药残留及其风险评价·····	谢宣宣, 艾力江·努尔拉, 买合木提·巴拉提, 仲乃福, 李南鑫 (4154)
宁夏养鸡场粪污和周边土壤中抗生素及抗生素抗性基因分布特征·····	沈聪, 张俊华, 刘吉利, 韩新宁, 尚天浩, 代金霞 (4166)
宁夏石嘴山市农用地土壤硒的富集因素·····	王莹, 刘海燕, 王泽晶, 张晓东, 王登红 (4179)
地块尺度重金属污染风险耕地安全利用区划方法·····	王锐, 余京, 李瑜, 周蛟, 贾中民, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲 (4190)
姜湖贡米产地土壤重金属空间分布、源解析及生态风险评价·····	于林松, 万方, 范海印, 康桂玲, 刘辉, 王东平, 徐佳 (4199)
基于特定源风险评估模型的小麦籽粒铅超标风险预测·····	杨阳, 李艳玲, 牛硕, 陈卫平, 王天齐, 王美娥 (4212)
柳州地源性镉异常区稻米重金属累积效应与健康风险·····	朱亮亮, 王佛鹏, 唐乐斌, 肖乃川, 董心月, 韦美溜, 宋波 (4219)
不同玉米品种 Cd、Pb、Zn 和 As 积累与转运特性·····	任超, 肖建辉, 李竞天, 杜倩倩, 朱利文, 王浩, 朱瑞颖, 赵海洋 (4232)
橡胶草 (TKS) 对铅镉污染农田土壤的修复潜力·····	张恒, 熊明彪, 王乾鑫, 孙博文, 饶逸驰, 程章, 徐小逊, 杨占彪, 鲜骏仁, 朱雪梅, 杨绍平, 杨远祥 (4253)
3 种地被竹对重金属复合污染农田土壤的修复潜力·····	张颖, 赵欣, 张圣虎, 漆丹, 王博, 陈引, 陆建刚 (4262)
连续施肥对双季稻镉硅累积效应的影响·····	彭华, 邓凯, 石宇, 魏维, 柳赛花, 纪雄辉 (4271)
改性壳聚糖负载氧化硅调控水稻对砷吸收与转运的影响·····	杨嘉仪, 孙梦强, 肖羽堂, 韦行, 张建强, 陈志刚 (4282)
不同螯合剂和有机酸对苍耳修复镉复合污染土壤的影响·····	张雅睿, 黄益宗, 保琼莉, 魏祥东, 铁柏清, 张盛楠, 韩甘, 黄永春 (4292)
水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与酶活性变化的耦合关系·····	李明远, 张小婷, 刘汉斌, 魏世强 (4301)
外源 Fe 调控根系微生物群落结构和功能对水稻 Cd 积累的影响·····	郑沈, 黄道友, 李波, 马天池, 许超, 朱奇宏, 朱捍华, 张泉 (4313)
不同降水下覆盖与缓释肥减量对油菜土壤微生物群落结构的影响·····	冯军, 石超, Hafiz Athar Hussain, 刘永波, 刘天朋, 李永洪, 刘俊峰, 王龙昌 (4322)
基于高通量测序和代谢组学解析重金属污染对农田微生物群落组成和功能的影响·····	庞发虎, 李晓琦, 段莉阳, 陈彦, 姬明飞, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (4333)
汞矿区周边农田土壤微生物群落结构特征及其环境驱动因子·····	陈芬, 余高, 孙约兵, 张红丽, 田霞, 夏蓓 (4342)
岩溶湿地与稻田土壤团聚体细菌群落结构的比较·····	冷蒙, 靳振江, 肖筱怡, 熊丽媛, 李雪松 (4353)
戴云山土壤微生物碳源利用效率的海拔变异规律及影响因素·····	吕坤, 王晶晶, 吴国朋, 林思诺, 苏延桂, 黄刚 (4364)
长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的影响·····	刘峰, 王云秋, 张昀, 祝贞科, 吴金水, 葛体达, 李宇虹 (4372)
秸秆还田配施生物炭对关中平原夏玉米产量和土壤 N ₂ O 排放的影响·····	白金泽, 刘镇远, 宋佳杰, 李娜, 于琦, 郝嘉琪, 许宏伟, 程博豪, 王兴, 冯永忠 (4379)
聚苯乙烯纳米塑料对大蒜生长生理的影响·····	邱陈陈, 李国新, 李青松, 颜昌宙 (4387)
微塑料对土壤水分入渗和蒸发的影响·····	王志超, 张博文, 倪嘉轩, 杨文焕, 李卫平 (4394)
氢燃料电池汽车动力系统生命周期评价及关键参数对比·····	陈轶嵩, 兰利波, 郝卓, 付佩 (4402)
《环境科学》征订启事 (4211) 《环境科学》征稿简则 (4312) 信息 (3922, 4031, 4107)	

连续施硅对双季稻镉硅累积效应的影响

彭华^{1,2,3}, 邓凯^{1,2,3}, 石宇⁴, 魏维⁵, 柳赛花^{1,2,3}, 纪雄辉^{1,2,3,5*}

(1. 湖南省农业科学院, 湖南省农业环境生态研究所, 长沙 410125; 2. 农业农村部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125; 3. 稻田土壤重金属污染防治与修复湖南省重点实验室, 长沙 410125; 4. 湖南湘西州农业农村局土壤肥料工作站, 吉首 416000; 5. 湖南大学隆平分院, 长沙 410000)

摘要: 为研究硅肥对土壤镉生物有效性以及双季稻对镉硅积累的影响, 在稻田土壤镉较高[$\omega(\text{总 Cd})$ 为 $1.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] 污染条件下, 开展双季稻连续基施硅肥 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (以 SiO_2 计) 的田间定位试验。结果表明, 双季稻田连续施用硅肥能够增加土壤有效硅含量, 增幅为 $108.1\% \sim 275.0\%$, 同时提高土壤 $1.15 \sim 1.33$ 个 pH 单位, 施用硅肥早、晚稻土壤 DTPA-Cd 含量降幅分别为 12.3% 和 15.9% , 差异达显著水平; 施硅促进了土壤镉向稳定形态的转化, 土壤可交换态 EXC-Cd 含量降幅为 $2.6\% \sim 5.1\%$, QW 处理降低达显著水平; 施硅肥处理, 碳酸盐结合态 CAR-Cd 含量降低, 降幅为 $8.6\% \sim 24.9\%$, 显著增加了铁锰氧化态 FMO-Cd 含量, 增加了土壤有机结合态 OR-Cd 含量, 增幅为 $2.3\% \sim 12.8\%$, 残渣态 RES-Cd 含量增幅为 $2.3\% \sim 6.0\%$; 连续施硅肥降低了水稻对镉的积累, 早稻根、茎叶和稻米平均降幅分别为 38.4% 、 49.7% 和 50.9% , 晚稻根、茎叶和稻米平均降幅分别为 30.6% 、 34.4% 和 39.2% ; 硅处理显著降低了水稻根吸收系数 ($A_{\text{根/茎叶}}$), 降幅为 $25.5\% \sim 49.6\%$, 同时降低了水稻根向茎叶的转运系数 ($T_{\text{根/茎叶}}$), 降幅为 $13.5\% \sim 52.6\%$, 差异显著, 早、晚稻稻米镉富集系数 (BAF) 分别平均降低 6.0% 和 8.0% , 其中粉末状硅肥对降低水稻镉吸收效果最佳。综上表明硅肥能够降低水稻对镉的吸收积累, 然而硅肥持续性降镉效应不明显。

关键词: 双季稻; 硅肥; 镉 (Cd); 生物有效性; 迁移转化

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)08-4271-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110213

Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application

PENG Hua^{1,2,3}, DENG Kai^{1,2,3}, SHI Yu⁴, WEI Wei⁵, LIU Sai-hua^{1,2,3}, JI Xiong-hui^{1,2,3,5*}

(1. Hunan Institute of Agricultural Environment and Ecology, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China; 2. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agriculture Environment in Middle Reach Plain of Yangtze River, Changsha 410125, China; 3. Key Laboratory of Prevention, Control and Remediation of Soil Heavy Metal Pollution in Hunan Province, Changsha 410125, China; 4. Xiangxi Station of Soil and Fertilizer, Jishou 416000, China; 5. Long Ping Branch of Hunan University, Changsha 410000, China)

Abstract: The impacts of silicon (Si) fertilizers on cadmium (Cd) bioavailability in soil and Cd accumulation in paddy-rice plants were investigated in a field positioning test. The results indicated that the continuous application of $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ Si fertilizers improved soil bioavailable Si in paddy-rice fields by $108.1\% \sim 275.0\%$ and improved pH values by $1.15 \sim 1.33$ in soil. The difference in the contents of DTPA-Cd in soil by 12.3% and 15.9% was significant in early and late rice, respectively. The continuous application of silicon promoted the transformation of soil cadmium to a stable form and reduced the contents of exchangeable Cd and carbonate binding state Cd in the soil by $2.6\% \sim 5.1\%$ and $8.6\% \sim 24.9\%$. The contents of ferric manganese oxide binding state Cd were increased significantly; meanwhile, the contents of organic binding state Cd and residue state Cd in soil were improved by $2.3\% \sim 12.8\%$ and $2.3\% \sim 6.0\%$, respectively. The contents of Cd in the root, shoot, and rice were reduced by 38.4% , 49.7% , and 50.9% in early season rice and by 30.6% , 34.4% , and 39.2% in late season rice, respectively. The absorption factors and translocation factors were reduced significantly by $25.5\% \sim 49.6\%$ and $13.5\% \sim 52.6\%$, and the average bioaccumulation factors were decreased by 6.0% and 8.0% in early and late season rice. The powder Si fertilizer had the best results overall. In conclusion, Si fertilizer could reduce the absorption and accumulation in rice; however, the continuous Cd reduction effect of continuous application Si fertilizer was not obvious.

Key words: double cropping rice; silicon fertilizers; cadmium (Cd); bioavailability; migration and transformation

镉 (Cd) 是一种具有毒性的重金属微量元素, 它不能被植物吸收富集并通过食物链威胁人类健康。2014 年全国土壤污染状况调查公报显示, 镉污染点位超标率最高, 占比为 7% 。当前, 镉污染耕地安全利用是社会聚焦点, 镉也是我国农产品主要的重金属污染物^[1]。如何保障耕地和农产品质量安全面临重要挑战, 研发成本低、效果好和易操作的镉污染耕地安全利用技术是解决重金属污染问题的重点和难点。

我国是水稻生产大国, 双季稻是我国南方主要

的种植制度, 稻米质量安全是人体身体健康的重要保障, 也是区域农业经济可持续发展的要求。施用化学改良剂是控制土壤重金属污染的有效措施, 以硅肥作为改良剂对重金属污染土壤治理的研究大量涌现^[2~5]。硅能够缓解作物重金属毒性已

收稿日期: 2021-10-28; 修订日期: 2021-12-15

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2019WK2031); 湖南省农业科学院创新项目 (2020CX56)

作者简介: 彭华 (1982 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤重金属污染修复治理, E-mail: penghua@hunaas.cn

* 通信作者, E-mail: 1546861600@qq.com

是不争的事实. 有研究表明, 硅施入土壤能够提高土壤 pH 值, 改变土壤镉形态^[6], 降低土壤镉生物有效性, 减少土壤镉的迁移^[7], 降低了根系细胞质膜透性^[8], 也通过增加水稻根部非蛋白巯基物质 (NPT) 降低水稻对镉的吸收积累^[9], 同时降低水稻对镉的迁移转运系数, 减少镉向地上部运输等^[4,10]. 已有研究结论多数基于短期田间试验或培养模拟试验, 然而连续 (5 a 以上) 施用硅肥对双季稻吸收积累镉的研究鲜见报道. 为明确硅肥对镉污染稻田降镉效应的长效性和持续性 (作用效果长久, 累加持续效果好), 本文通过连续施用硅肥定位试验, 监测连续施硅下双季稻植株、稻米镉硅含量, 探明连续多年施硅对双季稻田水稻对镉硅吸收积累的影响, 以期对镉污染耕地安全利用的硅肥施用技术提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 试验材料

硅肥定位试验始于 2013 年, 地点位于湖南省长沙县北山镇农业技术推广站试验基地 (113°03′27.70″E, 28°26′23.71″W), 区域属于亚热带季风湿润气候区, 具有热量丰富、降水充沛且日照充足的特点, 是南方典型的双季稻生产区. 试验前基础土壤类型为麻砂泥, pH 值为 4.90, ω (有机质) 为 49.3 g·kg⁻¹, ω (碱解氮) 为 173.0 mg·kg⁻¹, ω (有效磷) 为 47.2 mg·kg⁻¹, ω (速效钾) 为 72.0 mg·kg⁻¹, 土壤中 ω (全镉) 为 1.03 mg·kg⁻¹, 是土壤环境质量农用地土壤风险管控标准 (GB 15618-2018) 的 3.4 倍, 其 ω [有效态镉 (DTPA-Cd)] 为

0.46 mg·kg⁻¹, 区域主要是由于历史污水灌溉导致的稻田土壤重金属 Cd 污染现象, 土壤 ω (有效硅) 为 18.93 mg·kg⁻¹, 属于缺硅土壤.

1.2 试验设计

定位试验采用田间小区试验, 设置 4 个处理, 随机排列, 每个处理重复 4 次. 每小区面积 4 × 5 = 20 m². 设置处理: ①对照处理 (CK): 习惯施肥, 不施硅肥处理; ②山东领先生物硅肥 (LX): 习惯施肥, 施用颗粒硅钙肥 (有效硅含量 18.8%); ③山西曲沃硅肥 (QW): 习惯施肥, 施用粉末硅钙肥 (有效硅含量 20.0%); ④北京哈斯科硅肥 (HSK): 习惯施肥, 施用钢渣硅肥 (有效硅含量 26.0%).

早、晚稻常规施肥情况为: 早、晚稻施用复合肥 40% (22-8-10) 作基肥, 施肥量分别为 600 kg·hm⁻² 和 675 kg·hm⁻², 水稻分蘖期追施尿素 75 kg·hm⁻². 硅肥与复合肥一起基施入稻田, 硅肥施用量 (SiO₂ 计) 为 180 kg·hm⁻², 施肥为撒施, 施肥后耙匀, 使土壤和肥料充分混合. 为了避免小区相互串水, 小区田埂采用薄膜覆盖, 保证每个小区独立性, 化学肥料于水稻移栽前 1 d 施入. 早、晚稻品种分别为: 株两优 819 和湘晚籼 12 号, 水稻统一育秧, 施入基肥后进行移栽, 生产中病虫害防治与灌溉和当地习惯保持一致.

硅肥种类和来源: 3 种硅肥来源分别为山东领先生物农业股份有限公司、山西曲沃县瑞丰硅肥厂和北京哈斯科公司, 3 种类型硅肥均是以炼钢废弃物钢渣作为硅肥原料生产而成, 重金属含量符合国家标准 (GB 38400-2019) 的要求. 其形貌特征及理化性状见表 1.

表 1 不同类型硅肥基本理化性状

Table 1 Morphological characteristics and physiochemical properties of the silicon fertilizers

硅肥	形状	pH 值	ω (SiO ₂) /%	ω (CaO) /%	ω (Cd) /mg·kg ⁻¹	ω (Cr) /mg·kg ⁻¹	ω (Pb) /mg·kg ⁻¹	ω (As) /mg·kg ⁻¹
山东领先	白色颗粒	9.92	18.8	23	0.023	4.25	1.29	6.29
山西曲沃	黑色粉末	9.83	20.0	16	0.043	5.15	2.39	7.25
北京哈斯科	黑色颗粒	9.51	26.0	18	0.015	5.52	2.05	7.11

1.3 样品采集

按照“梅花形”或者“S 形”5 点法分别于早、晚稻分蘖期和成熟期采集 0 ~ 15 cm 稻田耕层土壤样品, 土壤样品自然风干, 去除杂质, 粉碎, 分别过 20 目和 100 目筛, 备用. 早、晚稻水稻分蘖期、成熟期采集水稻整株样品 (根、茎叶和籽粒), 用清水将泥土冲洗干净, 然后用去离子水冲洗 3 遍, 分根系、茎叶和籽粒分别烘干, 粉碎, 待测.

1.4 检测方法

土壤全量 Cd 测定^[11], 土壤有效态 Cd 测定采用

DTPA 浸提法, 土壤镉形态测定采用 Tessier 方法^[12], 植株 Cd 含量用微波消解仪消解, 后用 ICP-MS 测定溶液中 Cd 含量 (土壤镉标样 GSS-30, 植物镉标准样品采用 GSB-27 大葱样品, 土壤和植株样品检测回收率为 90% ~ 105%), 土壤有效硅测定采用钼蓝比色法^[13], 植株全硅采用一种简易的方法测定^[14].

1.5 数据处理

本试验数据选取 2015 ~ 2019 年的数据和结果, 用 Microsoft Excel 和 SPSS 17.0 软件进行处理与分

析,采用 LSD 法进行差异显著性比较,用 Origin 8.0 软件作图。

计算方法,①生物富集系数(bioaccumulation factor,BAF):作物籽粒某物质的含量与土壤中该物质的含量之比^[15];②转运系数(translocation factor,TF):水稻后一部位中重金属含量与前一部位中重金属含量的比值^[15];③根吸收系数(absorption factor,AF):根部某物质的含量与土壤中该物质含量比值。

2 结果与分析

2.1 施硅对土壤 pH 值的影响

总体而言,土壤 pH 值年份和季节性差异显著

($P < 0.05$),硅肥、水稻季和年份这 3 个因子两两交互作用对土壤 pH 值影响达到显著水平($P < 0.05$),如图 1 所示.与 2013 年基础土壤 pH 值(4.90)相比,2019 年晚稻收获后,连续施用硅肥处理提高 1.15~1.33 个 pH 单位,而比当年的 CK 处理增加 0.90~0.11 个 pH 单位.连续施硅肥早稻收获期土壤 pH 值增加 0.37~0.78 个 pH 单位,晚稻收获期土壤 pH 值增加 0.57~1.30 个 pH 单位.与 CK 处理相比,LX、QW 和 HSK 处理均能够显著提高土壤 pH 值,顺序为:QW > HSK > LX,连续施用硅肥能够持续提高土壤 pH 值,对缓解土壤酸化和钝化重金属镉具有重要作用。

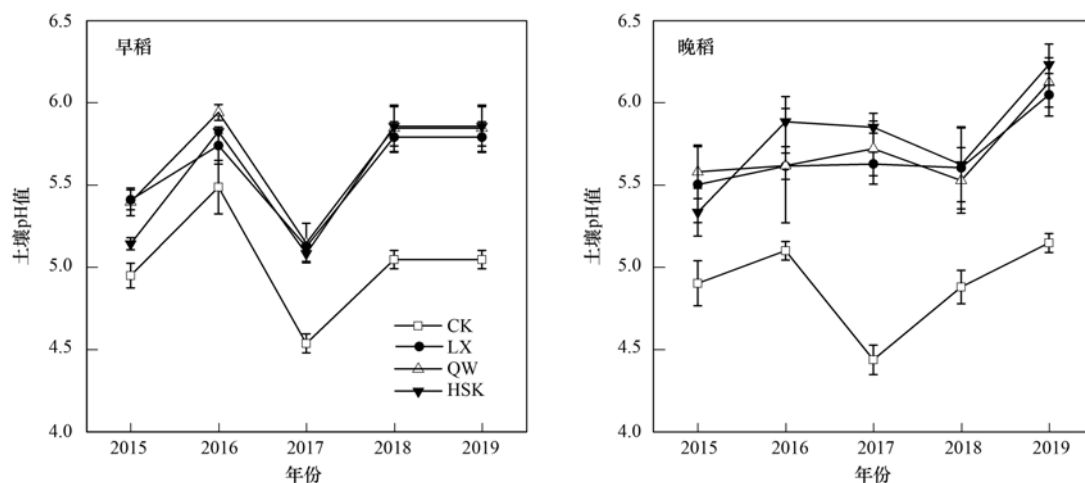


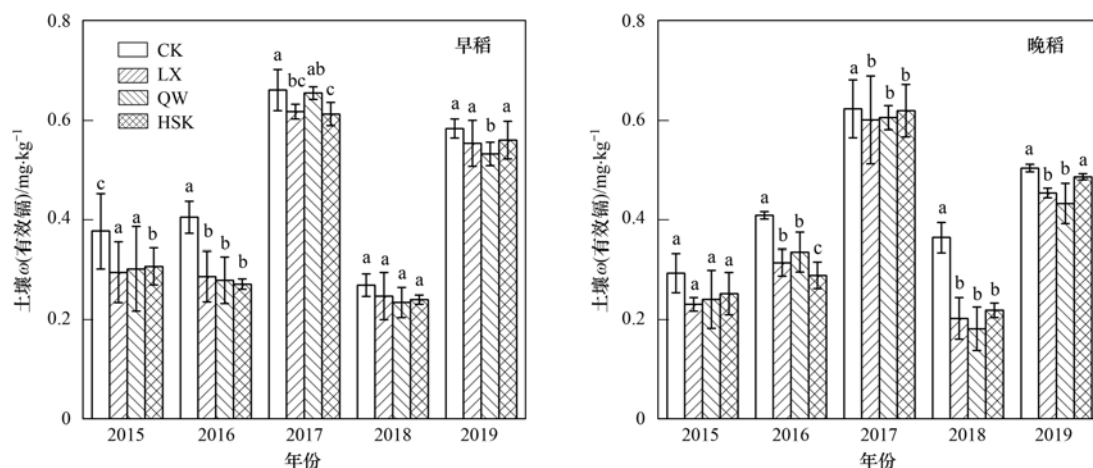
图1 土壤 pH 值动态变化

Fig. 1 Dynamic changes in soil pH

2.2 施硅对双季稻田土壤有效镉、硅含量的影响

施硅对双季稻田土壤有效镉含量情况如图 2. 土壤有效镉含量(DTPA-Cd)受施硅、年份、水稻季节和年份与水稻季交互作用的影响,差异显著($P < 0.05$).施硅肥显著降低土壤 DTPA-Cd 含量,平均降

低幅度为 14.1%,早、晚稻土壤 DTPA-Cd 含量降幅分别为 12.3% 和 15.9%,差异均达显著水平.与 CK 处理相比,LX、QW 和 HSK 各施硅处理均显著降低土壤 DTPA-Cd,平均降幅分别为 13.6%、15.8% 和 13.9%. 2015~2019 年,LX、QW 和 HSK 处理早稻



不同小写字母表示同一年份不同处理间差异达显著水平($P < 0.05$),下同

图2 不同处理土壤有效镉含量差异

Fig. 2 Difference in soil available Cd concentrations in soil under different treatments

季土壤 DTPA-Cd 含量降幅为 0.9% ~ 31.1%, LX、QW 和 HSK 处理晚稻季土壤 DTPA-Cd 含量降幅为 0.6% ~ 44.4%。综上表明连续施用硅肥能够降低土壤镉生物有效性,然而并没有呈持续降低的线性关系。

不同处理土壤不同形态镉差异如图 3。可以看出,2019 年成熟期土壤 5 种镉形态占比情况为:残渣态 (RES-Cd) (38% ~ 41%) > 可交换态 (EXC-Cd) (33% ~ 35%) > 铁锰氧化态 (FMO-Cd) (20% ~ 22%) > 碳酸盐结合态 (CAR-Cd) (3% ~ 5%) > 有机结合态 (OR-Cd) (1%)。与 CK 处理相比,硅肥处理降低了可交换态 EXC-Cd 含量,降幅为 2.6% ~ 5.1%,其中 QW 处理降低达显著水平; LX 和 HSK 处理显著降低了碳酸盐结合态 CAR-Cd 含量,降幅分别为 8.6% 和 24.9%; LX 和 QW 处理增加了铁锰氧化态 FMO-Cd 含量,其中 QW 增幅为 9.1%,差异显著;硅肥处理增加了土壤有机结合态 OR-Cd 含量,增幅为 2.3% ~ 12.8% 之间,其中 QW 和 HSK 处理增加显著;对残渣态而言,LX 和 HSK 处理残渣态 RES-Cd 含量,增幅为 2.3% ~ 6.0%,HSK 处理增加显著,而 QW 处理 RES-Cd 含量有所降低,但没有显著差异。综上表明,施硅促进了土壤镉向稳定形态的转变,从而减少了水稻吸收。

不同处理土壤有效硅含量变化如图 4。总体而言,施硅、水稻季节、年份间及其交互作用均显著影响土壤有效硅含量 ($P < 0.05$)。2019 年晚稻收获后,连续施硅肥土壤 ω (有效硅) 平均值为 $52.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,较 2013 年试验基础土壤有效硅含量增加,增幅为 108.1% ~ 275.0%,其中 LX 处理增加有效硅效果最佳。水稻成熟期晚稻季 ω (有效硅) (平均值为 $32.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 较早稻季 (平均值为 $23.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 高,差异达显著水平,与 CK 处理相比,施

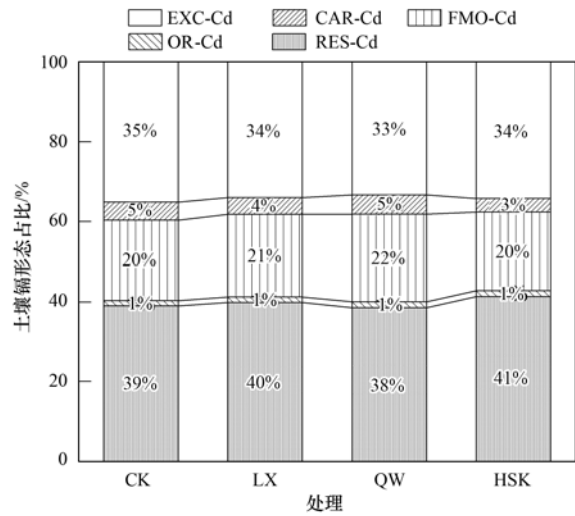


图3 施硅对土壤不同形态镉含量占比的影响

Fig. 3 Effects of Si application on Cd speciation concentrations ratios in soil

硅显著增加有效硅含量,平均增幅为 43.6%,其中早稻土壤 ω (有效硅) 增幅为 1.3% ~ 68.1%,晚稻土壤 ω (有效硅) 增幅为 3.5% ~ 274.8%。

2.3 施硅对双季稻植株镉硅积累的影响

施硅对双季稻水稻镉积累的影响如图 5。结果表明,施硅对双季稻不同年份和不同水稻季镉含量的影响显著 ($P < 0.05$)。2015 ~ 2019 年,与 CK 处理相比,硅肥 (LX、QW 和 HSK) 处理显著降低早稻分蘖期根和茎叶含量,降幅分别为 28.4% ~ 50.2% 和 44.4% ~ 54.2%,早稻成熟期根、茎叶和稻米镉含量显著降低,降幅分别为 36.6% ~ 45.8%、54.2% ~ 60.6% 和 55.2% ~ 61.8%;硅肥处理下降低了晚稻分蘖期根和茎叶镉含量,降幅为 26.1% ~ 50.5% 和 42.7% ~ 50.0%,晚稻季成熟根、茎叶和稻米镉含量降幅为 24.5% ~ 35.8%、34.1% ~ 34.8% 和 39.3% ~ 48.6%,差异均达显著水平。综上表明,连续施用

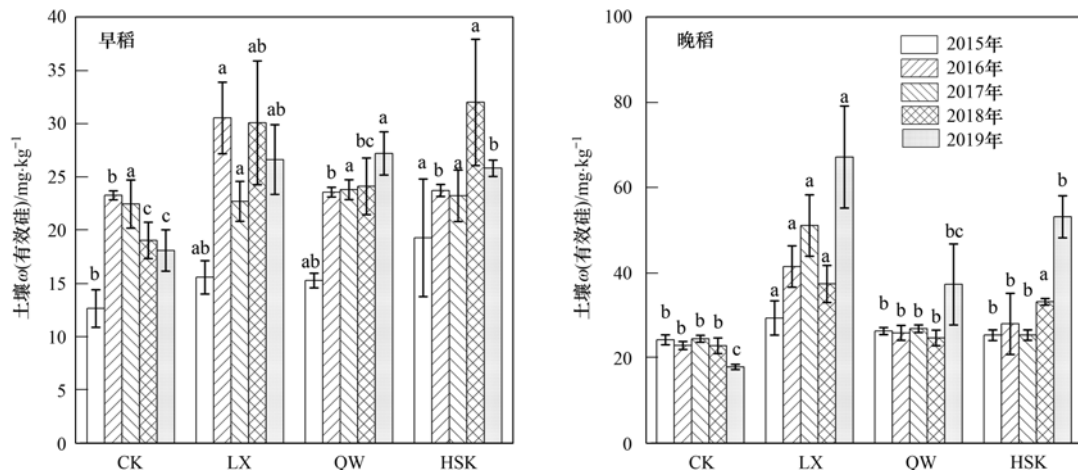


图4 不同处理土壤有效硅含量

Fig. 4 Available silicon concentrations in soil by different treatments

硅肥能够降低水稻对镉的吸收积累,然而本试验镉污染条件下 $[\omega(\text{Cd}) 1.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$,施硅量(SiO_2 计)为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,虽降低了水稻对镉的吸收和积

累,但不能保障稻米质量安全,仅2017年QW处理稻米 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.148 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 未超过国家食品限量标准($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

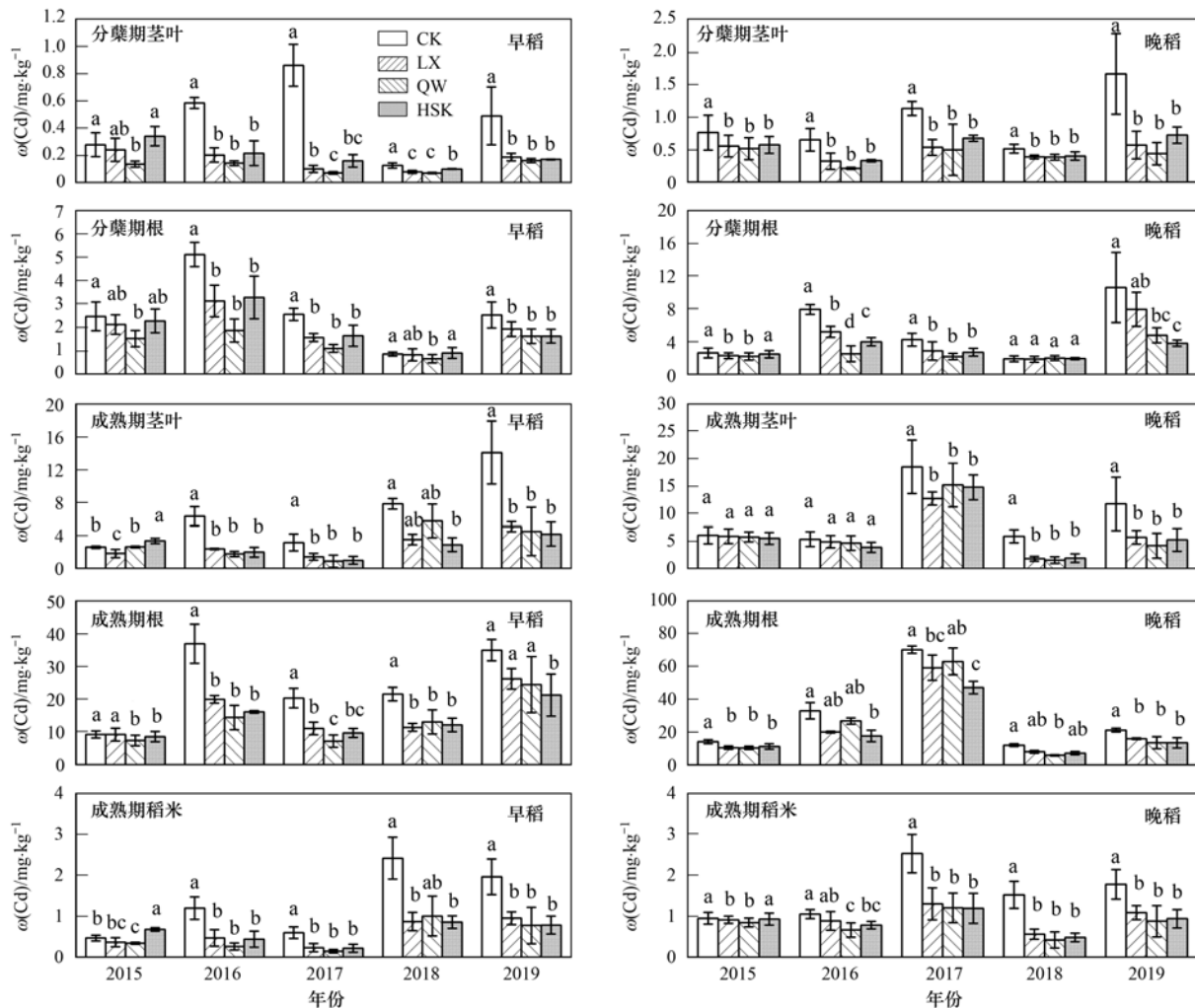


图5 不同处理下水稻根、茎叶和稻米镉含量变化

Fig. 5 Changes in Cd concentrations in roots, shoots and rice under different treatments

2015~2019年水稻不同时期和不同部位硅累积情况如图6. 无论水稻分蘖期还是成熟期,水稻硅积累部位主要是茎叶,其次为根部,茎叶中硅平均含量较根部增加,增幅为55.5%. 与CK处理相比,施硅肥增加水稻根和茎叶硅含量,平均增幅分别为21.9%和39.2%,差异达显著水平. 早稻分蘖期水稻根 $\omega(\text{Si})$ 为0.55%~4.51%,早稻分蘖期茎叶 $\omega(\text{Si})$ 为1.26%~8.47%,早稻成熟期根 $\omega(\text{Si})$ 为1.57%~5.94%,平均值为2.79%;成熟期茎叶 $\omega(\text{Si})$ 为1.79%~10.72%,平均值为4.30%. 晚稻分蘖期根和茎叶 $\omega(\text{Si})$ 分别为0.66%~6.14%和1.61%~6.75%;晚稻成熟期根和茎叶 $\omega(\text{Si})$ 分别为1.02%~5.57%和0.97%~6.73%。

2.4 施硅对双季稻镉迁移转运的影响

连续施用硅肥试验结果表明(表2),双季稻施用硅肥对土壤-水稻系统镉迁移转运影响显著。

2015~2019年,早稻根吸收系数($AF_{\text{土/根}}$)、根向茎叶迁移系数($T_{\text{根/茎叶}}$)和茎叶向稻米转运系数($T_{\text{茎叶/稻米}}$)平均值分别为9.023、0.172和0.209,晚稻根吸收系数($AF_{\text{土/根}}$)、根向茎叶迁移系数($T_{\text{根/茎叶}}$)和茎叶向稻米转运系数($T_{\text{茎叶/稻米}}$)平均值分别为13.626、0.260和0.187. 双季稻 $AF_{\text{土/根}}$ 、 $T_{\text{根/茎叶}}$ 和 $T_{\text{茎叶/稻米}}$ 平均值分别为11.324、0.216和0.1980, $AF_{\text{土/根}} > T_{\text{根/茎叶}} > T_{\text{茎叶/稻米}}$,表明土壤-水稻系统水稻对镉的积累取决于根对水稻的吸收,水稻作为高富集植物,根对土壤镉吸收是土壤镉含量的11.3倍,其中21.6%吸收的镉向地上部迁移转运,积累在水稻茎叶中,茎叶中19.8%的镉由茎叶向稻米迁移,最终积累在稻米中. 施硅减少了土壤向水稻根系的吸收系数,但一定程度上增加了 $T_{\text{根/茎叶}}$,成熟期 $T_{\text{茎叶/稻米}}$ 也略微增加,表明硅主要是减少了水稻根对土壤镉的吸收过程,从而降低了水稻镉积累,硅减

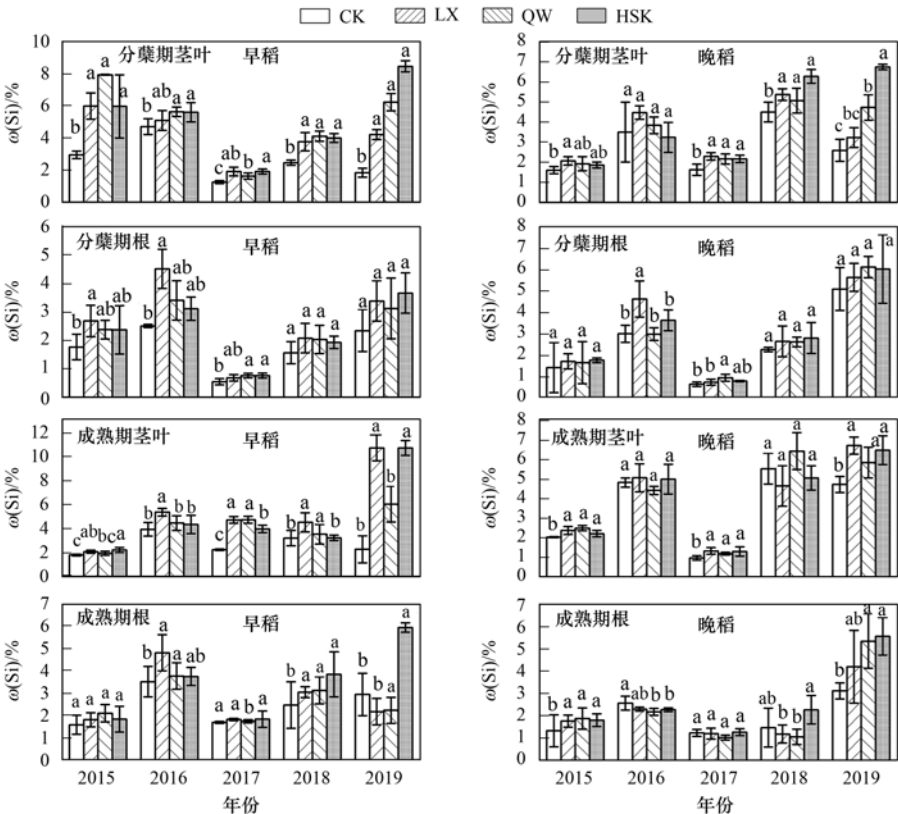


图6 不同处理水稻根和茎叶硅含量变化

Fig. 6 Changes in Si concentrations in roots and shoots under different treatments

少水稻根对镉的吸收作用要远远强于硅降低镉在水稻体内由根系向茎叶、茎叶向稻米迁移转运用,其主要原因可能是硅肥提高了土壤 pH 值,土壤镉活性降低.与 CK 处理相比,LX、QW 和 HSK 处理显著降低早稻分蘖期 $AF_{\text{土/根}}$,降低幅度分别为 24.4%、48.9% 和 21.7%,早稻成熟期 $AF_{\text{土/根}}$ 降低幅度分别为 34.9%、44.4% 和 44.3%,同时降低了水稻 $T_{\text{根/茎叶}}$,分蘖期 $T_{\text{根/茎叶}}$ 降幅分别为 52.5%、50.0% 和 44.6%,成熟期 $T_{\text{根/茎叶}}$ 降幅分别为 34.9%、13.6% 和 26.0%,显著降低晚稻分蘖期 $AF_{\text{土/根}}$,降

幅分别为 26.1%、50.0% 和 45.5%,同时显著降低晚稻成熟期 $AF_{\text{土/根}}$,降幅分别为 23.2%、20.6% 和 33.5%.另外,分蘖期、成熟期 $T_{\text{根/茎叶}}$ 降幅分别为 27.0%、22.8%、10.4% 和 19.5%、21.7%、17.4%.除了 HSK 处理,LX 和 QW 处理降低早稻 $T_{\text{茎叶/稻米}}$,降幅分别为 2.1% 和 17.6%,LX、QW 和 HSK 处理降低了晚稻 $T_{\text{茎叶/稻米}}$,降幅分别为 0.4%、8.7% 和 5.9%.稻米镉富集系数(BAF)变化如图 7. BAF 范围在 0.126 ~ 0.343,平均值为 0.188,晚稻较早稻稻米镉富集系数显著降低,降幅为

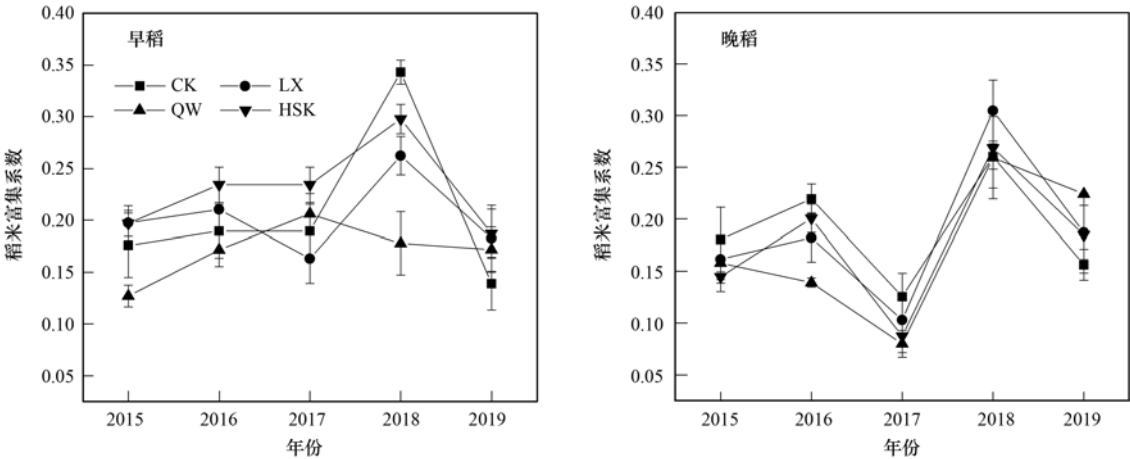


图7 水稻稻米镉富集系数动态变化

Fig. 7 Dynamic change in Cd in rice bioaccumulation factor

表 2 土壤-水稻系统中镉迁移系数¹⁾
Table 2 Cd migration coefficient in soil and rice system

年份	处理	早稻分蘖期				晚稻分蘖期				晚稻成熟期			
		土壤-根	根-茎叶	土壤-根	根-茎叶	土壤-根	根-茎叶	土壤-根	根-茎叶	土壤-根	根-茎叶	土壤-根	根-茎叶
2015	CK	2.138 ± 0.173a	0.118 ± 0.038ab	9.008 ± 1.042a	0.284 ± 0.044b	0.181 ± 0.032a	0.285 ± 0.038a	13.761 ± 1.207a	0.427 ± 0.075b	0.186 ± 0.034a			
	LX	2.058 ± 0.208ab	0.114 ± 0.030ab	8.987 ± 1.890a	0.200 ± 0.038c	0.203 ± 0.054a	0.240 ± 0.043c	10.236 ± 1.018b	0.555 ± 0.048a	0.167 ± 0.020ab			
	QW	1.477 ± 0.157b	0.090 ± 0.010b	7.221 ± 1.538b	0.364 ± 0.065a	0.131 ± 0.011b	0.232 ± 0.029c	10.090 ± 0.964b	0.552 ± 0.040a	0.163 ± 0.020ab			
	HSK	2.210 ± 0.213ab	0.160 ± 0.066a	8.368 ± 1.217b	0.394 ± 0.044a	0.203 ± 0.013a	0.231 ± 0.015b	11.547 ± 1.650b	0.468 ± 0.055b	0.149 ± 0.015b			
2016	CK	4.964 ± 0.797a	0.113 ± 0.016a	35.863 ± 4.366a	0.172 ± 0.042a	0.195 ± 0.027a	0.082 ± 0.013ab	31.972 ± 3.894a	0.165 ± 0.039b	0.226 ± 0.015a			
	LX	3.334 ± 0.335b	0.058 ± 0.003b	19.383 ± 5.301b	0.113 ± 0.030b	0.217 ± 0.067a	0.061 ± 0.011b	21.284 ± 3.678ab	0.226 ± 0.051a	0.188 ± 0.024a			
	QW	1.931 ± 0.479b	0.075 ± 0.018b	14.033 ± 3.606b	0.115 ± 0.051b	0.177 ± 0.057a	0.093 ± 0.031a	25.950 ± 4.193ab	0.179 ± 0.032b	0.143 ± 0.004b			
	HSK	3.182 ± 0.383b	0.064 ± 0.008b	15.673 ± 5.092b	0.117 ± 0.029b	0.241 ± 0.072a	0.084 ± 0.008ab	17.145 ± 3.397b	0.226 ± 0.065a	0.207 ± 0.044a			
2017	CK	2.482 ± 0.310a	0.335 ± 0.020a	19.783 ± 2.356a	0.158 ± 0.058a	0.195 ± 0.027a	0.275 ± 0.062a	68.050 ± 2.131a	0.313 ± 0.125a	0.129 ± 0.060a			
	LX	1.667 ± 0.329b	0.058 ± 0.003b	10.777 ± 1.521 b	0.127 ± 0.016 b	0.168 ± 0.057b	0.194 ± 0.027b	57.406 ± 4.168 bc	0.211 ± 0.050b	0.106 ± 0.026a			
	QW	0.965 ± 0.240b	0.075 ± 0.018b	7.017 ± 1.803 c	0.115 ± 0.051b	0.212 ± 0.100a	0.221 ± 0.148a	61.101 ± 3.496ab	0.235 ± 0.065ab	0.082 ± 0.013a			
	HSK	2.076 ± 0.440b	0.070 ± 0.014b	8.242 ± 2.672bc	0.111 ± 0.029b	0.241 ± 0.072a	0.251 ± 0.031a	48.373 ± 3.676c	0.289 ± 0.086ab	0.090 ± 0.016a			
2018	CK	0.836 ± 0.067a	0.146 ± 0.017a	20.928 ± 2.004a	0.366 ± 0.213a	0.354 ± 0.236a	0.273 ± 0.039a	11.707 ± 5.781a	0.513 ± 0.114a	0.268 ± 0.049a			
	LX	0.804 ± 0.202ab	0.098 ± 0.018b	11.097 ± 1.169b	0.319 ± 0.185a	0.270 ± 0.073b	0.216 ± 0.051b	7.751 ± 2.426ab	0.230 ± 0.031b	0.314 ± 0.030a			
	QW	0.638 ± 0.140b	0.110 ± 0.020b	12.707 ± 3.544b	0.445 ± 0.188a	0.183 ± 0.053b	0.193 ± 0.005b	5.671 ± 2.199b	0.274 ± 0.094b	0.267 ± 0.041a			
	HSK	1.031 ± 0.219a	0.097 ± 0.023b	11.820 ± 2.031b	0.234 ± 0.038b	0.307 ± 0.049a	0.210 ± 0.025b	6.986 ± 0.934ab	0.263 ± 0.105b	0.277 ± 0.085a			
2019	CK	2.451 ± 0.465 a	0.188 ± 0.046a	30.807 ± 2.582a	0.440 ± 0.098a	0.143 ± 0.026b	0.165 ± 0.049a	20.583 ± 1.151a	0.548 ± 0.199a	0.161 ± 0.032a			
	LX	1.870 ± 0.307b	0.098 ± 0.012b	25.484 ± 2.463a	0.194 ± 0.023b	0.188 ± 0.033a	0.076 ± 0.039b	15.502 ± 0.478b	0.359 ± 0.088b	0.193 ± 0.027a			
	QW	1.572 ± 0.300 b	0.101 ± 0.014b	23.788 ± 3.101a	0.188 ± 0.117b	0.177 ± 0.023ab	0.095 ± 0.033b	13.139 ± 3.553b	0.298 ± 0.107b	0.231 ± 0.086a			
	HSK	1.577 ± 0.281b	0.107 ± 0.016b	20.667 ± 1.267b	0.195 ± 0.050b	0.193 ± 0.024a	0.192 ± 0.033a	13.094 ± 3.048b	0.377 ± 0.080ab	0.191 ± 0.038a			

1) 不同小写字母表示差异显著水平 ($P < 0.05$), 下同

11.9%,表明早、晚稻品种、气候和稻田微环境等因子影响水稻对镉的吸收富集.施硅早、晚稻稻米镉 BAF 分别平均降幅为 6.0% 和 8.0%.与 CK 处理相比,2015~2019 年,LX 和 QW 处理早稻稻米平均 BAF 降低,降幅为 2.1%~21.4%,QW 处理降低达显著水平;LX、QW 和 HSK 处理晚稻 BAF 降幅为 0.4%~9.5%,其中 QW 处理差异达显著水平.综上所述,硅肥能够降低早、晚稻米镉富集系数(BAF),然而不同硅肥差异不同,QW 处理显著降低了稻米 BAF.

对土壤和植株镉硅因子关联性分析发现(表 3),土壤有效镉与稻米显著相关,表明土壤有效镉含量决定了水稻镉吸收及稻米镉累积;土壤有效硅含量与水稻成熟期根、茎叶硅显著正相关,表明土壤中镉硅含量是水稻镉硅吸收积累的基础,而由于早、晚的气候和降雨等差异导致水稻对元素吸收积累差异.分蘖期水稻根镉含量与分蘖期茎叶镉含量,成熟期根镉含量与成熟期茎叶镉含量、成熟期稻米镉含量呈显著正相关,表明水稻根吸收镉增加了地上部累积风险,同时,加硅增加水稻对硅的吸收积

累,根部吸收的硅对茎叶硅含量的贡献是显著的,分蘖期茎叶硅与分蘖期茎叶镉显著负相关,表明水稻茎叶积累镉对茎叶硅的积累具有重要影响,这可能与土壤镉、硅含量,生物有效性等因素有关.成熟期根、茎叶镉含量分别与成熟期根、茎叶硅含量呈显著负相关关系,表明硅减少了水稻根、茎叶对镉的积累,表明硅在茎叶中富集也降低了镉的富集,可能在调控水稻镉吸收的过程中,除了土壤钝化,降低根系吸收外,还可以通过茎叶的阻隔积累作用,减少镉在稻米中的积累.

综上所述,硅促进水稻吸收积累硅,同时降低根、茎叶稻米的富集,水稻根、茎叶镉、硅含量具有较好相关性,表明水稻对镉硅的积累主要取决于水稻生育前期的吸收及水稻生育后期的积累,不同生育期水稻对镉硅吸收存在差异,主要表现为晚稻分蘖期根镉、硅显著正相关,而成熟期差异不显著,而水稻分蘖期和成熟期茎叶镉硅含量显著负相关,硅肥增加了水稻生育前期根部镉的积累,但水稻体内镉硅相互竞争,硅也可能影响根部镉向地上部迁移转运.

表 3 各变量之间相互关系¹⁾
Table 3 Correlation between variables

	分蘖期 茎叶硅 含量	分蘖期 根硅 含量	成熟期 茎叶硅 含量	成熟期 根硅 含量	土壤 有效硅 含量	分蘖期 根镉 含量	分蘖期 茎叶镉 含量	成熟期 根镉 含量	成熟期 茎叶镉 含量	成熟期 稻米镉 含量	土壤 有效镉 含量
分蘖期茎叶硅含量	1	0.509 **	0.527 **	0.245 **			-0.272 **	-0.284 **	-0.373 **	-0.292 **	
分蘖期根硅含量		1	0.603 **	0.441 **		0.428 **		-0.214 **	-0.178 *		
成熟期茎叶硅含量			1	0.374 **	0.178 *			-0.239 **	-0.263 **		0.354 **
成熟期根硅含量				1	0.196 *		-0.201 *	-0.250 **	-0.302 **	-0.213 **	
土壤有效硅含量					1						
分蘖期根镉含量						1	0.701 **	0.215 **	0.261 **	0.262 **	
分蘖期茎叶镉含量							1	0.363 **	0.562 **	0.473 **	0.201 *
成熟期根镉含量								1	0.795 **	0.537 **	-0.262 **
成熟期茎叶镉含量									1	0.729 **	
成熟期稻米镉含量										1	0.177 *
土壤有效态镉含量											1

1) * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上极显著相关,样本数量 $n=80$

3 讨论

3.1 镉污染稻田安全利用硅肥施用技术

本试验条件下 $[\omega(\text{总 Cd}) \text{ 为 } 1.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}]$,连续施用硅肥能够降低土壤有效态镉含量,降低水稻对镉的吸收积累,但稻米镉含量仍超过食品安全国家标准(GB 2762-2017)的标准限值($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),该条件下仅仅依靠施用硅肥单项措施可能无法解决稻米镉超标问题,还需要其他措施(包括低积累品种、淹水灌溉等),同时在施用硅肥修复稻田镉污染时,外源镉污染如大气沉降、灌溉水等因子也会对效果造成一定的干扰,必须在切断污染

源的前提下开展稻田重金属镉污染修复治理.连续施用硅肥降低了水稻对镉的吸收,年际之间存在一定差异,总体而言,与 CK 处理相比,施用硅肥降低了土壤有效态镉、减少了水稻地上部吸收积累,但并没有表现出持续降低水稻镉吸收积累的情况,年际间差异可能受天气、施肥、土壤微环境等多方面因素的影响,南方雨水充沛,长期降雨增加水稻田水层深度,稻田淹水厌氧条件下镉活性降低,同时长期深淹水环境也不利于水稻生长,减少了水稻对镉的吸收.试验结果表明,QW 处理降镉效果较 LX 和 HSK 处理好,可能由于 QW 硅肥属于粉末状,其余硅肥均为颗粒状,粉末状硅肥比表面积大,有利于有

效硅的释放参与反应、同时增加土壤及溶液中与镉的接触面^[16], 增强了其效果。

3.2 硅对土壤镉生物有效性的影响

硅能够降低土壤镉生物有效性, 与已有的研究结果一致^[3, 17~20], 施用硅肥仅仅降低了当季水稻收获期土壤镉有效性, 土壤中负电荷增加, 会增强黏土矿物和有机质等对 Cd^{2+} 的吸附, 同时土壤溶液中阳离子和氢氧根离子的离子积增加, 生成 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 沉淀的机会增加, 从而降低了镉生物有效性^[21]。土壤 pH 值对土壤镉生物有效性影响程度取决于土壤 pH 值的高低, 同时也与土壤中有有机质含量^[22, 23]、盐基饱和度^[24, 25]和阳离子交换量^[26, 27]等多种因素有关, 本试验施硅量(以 SiO_2 计)为 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 虽然对土壤 pH 值提升具有一定效果, 但土壤镉生物有效性没有持续降低; 可能原因, 土壤溶液中含有碳酸、硅酸、磷酸、腐殖酸和其他有机酸等弱酸及其盐类是一个良好的缓冲体系, 对酸碱均具有缓冲作用, 同时土壤胶体吸附各种阳离子, 其中盐基离子和氢离子能对酸碱起缓冲作用^[28]。土壤中镉的物理化学变化主要有吸附与解吸、沉淀与溶解和配位与螯合等, 土壤镉的变化过程受土壤质地、粒径、pH 值、Eh、有机质和其他离子的影响。利用硅肥调控土壤 pH 值今后将在不同类型、不同污染程度土壤中进一步开展研究。结果表明, 硅降低了土壤可交换态镉含量, 增加了有机结合态、铁锰氧化态和残渣态镉含量, 硅降低了土壤活性态镉含量, 并促进土壤镉向稳定态的转变, 减少了水稻吸收, 这与已有的研究结果一致^[20]。可能原因是土壤 pH 提高, 土壤负电荷增加, 发生沉淀、水解等反应吸附的影响增强, 进而生成碳酸盐结合态镉、铁(铝/锰)氧化物结合态镉, 升高土壤 pH 值有利于生成稳定的有机-重金属络合物及硫化物结合态镉^[29], 同时氢氧化镉的比例会增加, 同时, 硅缓解了残渣态镉活化, 间接降低了镉生物有效性^[30]。目前, 镉在土壤中形态形成定性研究方面取得了一定进展, 但量化镉沉淀、镉螯合物、镉的硫铁化合物以及不同镉形态转化等机制方面仍需要进一步研究。

3.3 硅对水稻镉吸收转运的影响

一般而言, 根吸收系数与土壤元素含量、有效态和质地等因素有关, 本研究发现, 连续施硅降低了水稻镉吸收系数、根向茎叶的迁移转运系数, 即不仅降低了水稻对土壤镉的吸收, 同时也降低了镉的迁移转运, 硅处理下稻米镉富集系数显著降低, 与已有的研究结果一致^[17]。根吸收降低主要因为硅提高了土壤 pH 值, 土壤对阳离子吸收能力增加, 有利于重金属形成碳酸盐^[31]和硅酸盐^[32]等沉淀物, 从而

降低了土壤有效态镉含量, 减少了水稻根对镉的吸收。同时硅使镉沉淀在根部内皮细胞壁, 增加锰膜对镉的积累, 减少了镉向地上部运输^[10, 33], 硅没有影响根系分泌物, 但是增强了镉在根中的滞留, 减少其向地上部迁移转运。另外有研究表明外源硅可降低水稻吸收、转运镉的功能基因表达, 提高解毒基因表达, 抑制了镉从水稻根系向籽粒转运^[34]。硅可降低水稻镉吸收基因 *OsNramp5* 和转运基因 *OsLCT1* 的表达, 提高镉解毒基因表达, 通过共沉淀定向调控水稻对镉的吸收转运^[35], 因此镉迁移受到影响, 降低了镉在稻米中的富集。镉从土壤颗粒表面向根迁移是其有效性的关键, 这个过程受其形态、价态、土壤酸碱度、氧化还原状态决定^[36, 37]。有研究发现, 硅降低了根系向茎叶的迁移转运, 可能原因: ①水稻体内硅结合蛋白通过诱导硅在水稻根的内皮层及纤维层细胞附近沉积, 进而阻塞细胞壁孔隙度, 影响镉的质外体运输, 抑制镉向地上部的运输^[38]; ②水稻根表铁膜能够降低镉向稻谷中转运^[39], 加硅使镉沉淀在根部内皮细胞壁, 增加了锰膜对镉的积累, 减少其向上转运^[40]; ③加硅使硅、镉沉积在植物茎秆细胞壁边缘或以植硅体形态存在于茎叶中, 降低镉向上运输^[41]; ④硅降低水稻根和茎叶中易迁移的乙醇提取态和去离子水提取态镉, 增加醋酸提取态和盐酸提取态镉的生成从而降低水稻体内镉的迁移性^[42]。

4 结论

(1) 镉污染稻田连续施用硅肥能够增加土壤有效硅含量, 增幅为 108.1%~275.0%, 同时提高土壤 1.15~1.33 个 pH 单位, 施用硅肥早、晚稻土壤 DTPA-Cd 含量分别降低 12.3% 和 15.9%, 差异达显著水平。

(2) 连续施硅降低了水稻对镉的积累, 早稻根、茎叶和稻米平均降幅分别为 38.4%、49.7% 和 50.9%; 晚稻根、茎叶和稻米平均降低 30.6%、34.4% 和 39.2%。施硅降低了土壤活性态镉含量, 促进了土壤镉向稳定形态的转化, 减少了水稻吸收, 其中, 土壤可交换态 EXC-Cd 含量降低幅度在 2.6%~5.1%, QW 处理降低达显著水平; 碳酸盐结合态 CAR-Cd 含量降低, 其降幅为 8.6%~24.9%; 硅显著增加了铁锰氧化态 FMO-Cd 含量; 硅增加了土壤有机结合态 OR-Cd 含量, 增加范围在 2.3%~12.8% 之间; 残渣态 RES-Cd 含量增幅范围为 2.3%~6.0%。

(3) 硅处理显著降低了根吸收系数水稻 $\text{AF}_{\text{土/根}}$, 降幅在 25.5%~49.6%, 同时降低了水稻

$T_{\text{根/茎叶}}$, 转运系数分别降低了 13.5%~52.6%, 差异显著, 早、晚稻稻米镉富集系数(BAF) 分别平均降低 6.0% 和 8.0%, 其中 QW 硅肥(粉末状)对降低水稻镉吸收效果最佳。

参考文献:

- [1] 宋波, 陈同斌, 郑袁明, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜镉含量及其健康风险分析[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(8): 1343-1353.
Song B, Chen T B, Zheng Y M, *et al.* A survey of cadmium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(8): 1343-1353.
- [2] 陈翠芳, 钟继洪, 李淑仪. 施硅对抑制植物吸收重金属镉的效应研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, **26**(4): 567-570.
Chen C F, Zhong J H, Li S Y. Research progress on inhibitory effects of silicon on cadmium absorption by plants[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, **26**(4): 567-570.
- [3] 朱利楠, 化党领, 杨金康, 等. 不同改良剂对微碱性土壤镉形态及小麦吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(8): 3559-3566.
Zhu L N, Hua D L, Yang J K, *et al.* Effects of different amendments on chemical speciation and uptake by winter wheat in slightly alkaline soil contaminated by cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(8): 3559-3566.
- [4] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 施硅对镉胁迫下水稻镉吸收和转运的调控效应[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(4): 1049-1056.
Peng O, Liu Y L, Tie B Q, *et al.* Effects of silicon application on cadmium uptake and translocation of rice under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1049-1056.
- [5] 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 等. 改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3331-3338.
Li Y C, Wang Y H, Tang M D, *et al.* Effects of an amendment on cadmium Transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(7): 3331-3338.
- [6] 郭磊. 外源硅影响镉化学形态及其生物有效性的土壤化学机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018. 59-73.
Guo L. The soil chemistry mechanisms of influences on cadmium chemical speciation and bioavailability with exogenous silicon[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. 59-73.
- [7] 魏晓, 张鹏博, 赵丹丹, 等. 水稻土施硅对土壤-水稻系统中镉的降低效果[J]. 生态学报, 2018, **38**(5): 1600-1606.
Wei X, Zhang P B, Zhao D D, *et al.* Cadmium status in paddy soil in a rice system under silicon fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(5): 1600-1606.
- [8] 黄秋婵, 韦友欢, 黎晓峰. 硅对镉胁迫下水稻幼苗生长及其生理特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2007, **46**(3): 354-357.
Huang Q C, Wei Y H, Li X F. Effect of silicon under cadmium stress on growth and physiological characteristics of seedlings in *Oryza sativa*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2007, **46**(3): 354-357.
- [9] 李江遐, 张军, 马友华, 等. 硅对镉胁迫条件下两个水稻品种镉亚细胞分布、非蛋白硫基物质含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(6): 1066-1071.
Li J X, Zhang J, Ma Y H, *et al.* Effects of silicon on cadmium accumulation and non-protein thiol content in the seedlings of two rice varieties under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(6): 1066-1071.
- [10] 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.
- [11] 贺敏杰, 蔡昆争, 王维, 等. 硅素分期施用对土壤镉形态和水稻镉累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(8): 1651-1659.
He M J, Cai K Z, Wang W, *et al.* Effects of split silicon application on the fractions of Cd in soil and its accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(8): 1651-1659.
- [12] Tessier A P, Campbell P G C, Bisson M X. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-851.
- [13] 张效朴, 臧惠林. 土壤有效硅测定方法的研究[J]. 土壤, 1982, **14**(2): 188-192.
- [14] 戴伟民, 张克勤, 段彬伍, 等. 测定水稻硅含量的一种简易方法[J]. 中国水稻科学, 2005, **19**(5): 460-462.
Dai W M, Zhang K Q, Duan B W, *et al.* Rapid Determination of silicon content in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, **19**(5): 460-462.
- [15] Liu J G, Ma X M, Wang M X, *et al.* Genotypic differences among rice cultivars in lead accumulation and translocation and the relation with grain Pb level[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **90**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2012.12.007.
- [16] Peng H, Ji X H, W Wei, *et al.* As and Cd sorption on selected Si-rich substances[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, **228**, doi: 10.1007/s11270-017-3473-7.
- [17] 彭华, 田发祥, 魏维, 等. 不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, **36**(6): 1027-1033.
Peng H, Tian F X, Wei W, *et al.* Effects of silicon fertilizer application on the cadmium and silicon content of rice at different growth stages[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, **36**(6): 1027-1033.
- [18] 罗婷, 喻华, 秦鱼生, 等. 石灰及配合施用镁和硅对土壤 pH 和镉有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2017, **30**(8): 1826-1832.
Luo T, Yu H, Qin Y S, *et al.* Effects of lime and its combination with magnesium sulfate and sodium silicate on soil pH and Cd availability[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(8): 1826-1832.
- [19] 高子翔, 周航, 杨文弢, 等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5299-5307.
Gao Z X, Zhou H, Yang W T, *et al.* Impacts of silicon fertilizer as base manure on cadmium bioavailability in soil and on cadmium accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5299-5307.
- [20] 杨金康, 朱利楠, 杨秋云, 等. 硅钙镁肥和改性腐殖酸对土壤镉形态和小麦镉积累的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(6): 808-816.
Yang J K, Zhu L N, Yang Q Y, *et al.* Effects of silicon-calcium-magnesium fertilizer and modified humic acid on soil cadmium chemical fractions and accumulation in wheat[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, **37**(6): 808-816.
- [21] 王一志, 曹雪莹, 谭长银, 等. 不同土壤 pH 对红壤稻田镉形态及水稻镉积累的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报,

- 2017, **40**(1): 10-16.
- Wang Y Z, Cao X Y, Tan C Y, *et al.* Effects of different soil pH on cadmium fractions and cadmium accumulation in rice [J]. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 2017, **40**(1): 10-16.
- [22] 陕红, 刘荣乐, 李书田. 施用有机物料对土壤镉形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(1): 136-144.
- Shan H, Liu R L, Li S T. Cadmium fractions in soils as influenced by application of organic materials[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(1): 136-144.
- [23] 张晶, 于玲玲, 辛术贞, 等. 根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 685-691.
- Zhang J, Yu L L, Xin S Z, *et al.* Phytoavailability and chemical speciation of cadmium in different Cd-contaminated soils with crop root return [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 685-691.
- [24] 吉卫星, 王祖伟. 碱性土壤盐化过程中阳离子对土壤中镉形态分布影响[A]. 见: 十一五农业环境研究回顾与展望——第四届全国农业环境科学学术研讨会论文集[C]. 呼和浩特: 中国农业生态环境保护协会, 2011.
- [25] 杨文强, 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.
- [26] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- Chen J, Wang J, Wang Y W, *et al.* Influencing factors of cadmium bioaccumulation factor in crops [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(4): 2031-2039.
- [27] Cui X Y, Mao P, Sun S, *et al.* Phytoremediation of cadmium contaminated soils by *Amaranthus Hypochondriacus* L.: The effects of soil properties highlighting cation exchange capacity [J]. *Chemosphere*, 2021, **283**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131067.
- [28] 詹杉, 袁红, 杜田甜, 等. 不同降镉处理对水稻土酸碱缓冲能力和有效镉含量的影响[J]. *热带作物学报*, 2020, **41**(2): 225-229.
- Zhan S, Yuan H, Du T T, *et al.* Effects of buffering ability to acid and alkali and available cadmium content in different cadmium reduction treatments in paddy soil [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2020, **41**(2): 225-229.
- [29] 杨忠芳, 陈岳龙, 钱鑫, 等. 土壤 pH 对镉存在形态影响的模拟实验研究[J]. *地学前缘*, 2005, **12**(1): 252-260.
- Yang Z F, Chen Y L, Qian X, *et al.* A study of the effect of soil pH on chemical species of cadmium by simulated experiments [J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, **12**(1): 252-260.
- [30] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, **38**(1): 116-121.
- Yang C G, Dou H, Liang Y C, *et al.* Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated Soil [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38**(1): 116-121.
- [31] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(3): 514-519.
- Dai Y C, Lv J L, Cao Y F, *et al.* Effects of lime and organic amendments on Cd availability in Cd-contaminated soils with different properties [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(3): 514-519.
- [32] 宗良纲, 张丽娜, 孙静克, 等. 3 种改良剂对不同土壤-水稻系统中 Cd 行为的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 834-840.
- Zong L G, Zhang L N, Sun J K, *et al.* Effects of three amendments on behaviors of cadmium in different soil-rice system [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(4): 834-840.
- [33] Da Cunha K P V, Do Nascimento C W A. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2009, **197**, doi: 10.1007/s11270-008-9814-9.
- [34] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用[J]. *农业环境科学学报*, 2018, **37**(7): 1418-1426.
- Yu H Y, Cui J H, Qiao J T, *et al.* Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(7): 1418-1426.
- [35] Cui J H, Liu T X, Li F B, *et al.* Silica nanoparticles alleviate cadmium toxicity in rice cells: Mechanisms and size effects [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **228**: 363-369.
- [36] Li H, Luo N, Li Y W, *et al.* Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **224**: 622-630.
- [37] Kumarathilaka P, Seneweera S, Meharg A, *et al.* Arsenic speciation dynamics in paddy rice soil-water environment: sources, physico-chemical, and biological factors - A review [J]. *Water Research*, 2018, **140**: 403-414.
- [38] 史新慧, 王贺, 张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(5): 1112-1116.
- Shi X H, Wang H, Zhang F S. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, **25**(5): 1112-1116.
- [39] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 不同生育期水稻根表铁膜的形成及其对水稻吸收和转运 Cd 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, **32**(3): 432-437.
- Hu Y, Huang Y Z, Huang Y C, *et al.* Formation of iron plaque on root surface and its effect on Cd uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) at different growth stages [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(3): 432-437.
- [40] Zhang Q, Liu J C, Lu H L, *et al.* Effects of silicon on growth, root anatomy, radial oxygen loss (ROL) and Fe/Mn plaque of *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco seedlings exposed to cadmium [J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2015, **4**: 6-11.
- [41] Zhang C C, Wang L J, 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.
- [42] Prabagar S, Hodson M J, Evans D E. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, **70**(2-3): 266-276.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution in Beijing During the Historical Period of the 2022 Olympic Winter Games	LIU Yue-chen, MAN Rui-qi, QIU Yan-ting, <i>et al.</i> (3895)
Observation Analyses of Aerosol Size Distribution Properties from February to March, 2019 in Tianjin Urban Area	HAO Jian, CAI Zi-ying, LIU Jing-le, <i>et al.</i> (3903)
Analysis of Typical Weather Circulation Patterns of Heavy PM _{2.5} Pollution and the Transport Pattern in the Yangtze River Middle Basin	WANG Ying, ZHI Xie-fei, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (3913)
Characteristics of Heavy Metals and Other Elements in Atmospheric Dry and Wet Deposition and Health Risk Assessment of a Typical Industrial and Mining City in Central Yunnan	FAN Chen-zi, LIU Yong-bing, YUAN Ji-hai, <i>et al.</i> (3923)
Characteristics and Reactivity of VOCs in a Typical Industrial City in Summer	QIN Tao, LI Li-ming, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (3934)
Chemical Reaction Activity and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Summer in Dalian	ZHU Ke-xin, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3944)
One-year Simulation of Air Pollution in Central China, Characteristics, Distribution, Inner Region Cross-transmission, and Pathway Research in 18 Cities	LIU Guang-jin, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (3953)
Characteristics of Ozone Pollution, Meteorological Impact, and Evaluation of Forecasting Results Based on a Neural Network Model in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (3966)
Temporal and Spatial Variations in Black Carbon Aerosol in Different Atmospheric Background Stations in China from 2006 to 2020	WANG Hong-lei, YAN Xue, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (3977)
Pollution Characteristics and Emission Factors of PCDD/Fs from Iron and Steel Industry	YANG Yan-yan, XIE Dan-ping, FU Jian-ping, <i>et al.</i> (3990)
Community Composition and Assessment of the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, CAO Liang, QU Ren-chao, <i>et al.</i> (3998)
Evaluation and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yellow River Basin Based on Monte Carlo Simulation and PMF Model	PANG Kuo, LI Min, LIU Lu, <i>et al.</i> (4008)
Retention Effect of Heavy Metals in Rivers of a Typical Mountainous City by Cascade Weirs; A Case Study of Liangtan River in Chongqing	WANG Chao, JIA Bo-yang, PAN Cheng-yong, <i>et al.</i> (4018)
Estimation of Agricultural Non-point Source TN and TP Export Coefficients Based on Soil Loss	WANG You-xiao, HUANG Chong, LIU Gao-huan, <i>et al.</i> (4032)
Influence of Land Use and Land Cover Patterns on Water Quality at Different Spatio-temporal Scales in Hehuang Valley	LI Hao-hao, HUANG Yi-mei, GUO Wei, <i>et al.</i> (4042)
Groundwater Pollution Source Identification by Combination of PMF Model and Stable Isotope Technology	ZHANG Han, DU Xin-yu, GAO Fei, <i>et al.</i> (4054)
Antibiotic Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment in Jinjiang River Basin, Jiangxi Province	LI Jia-le, WANG Meng, HU Fa-wang, <i>et al.</i> (4064)
Screening and Control Measures for New Priority Pollutants in Surface Water of Tianjin	WU Yan-qi, SONG Shuai, SHI Ya-juan, <i>et al.</i> (4074)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs) in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (4087)
Analysis of the Seasonal Changes in Planktonic Microbial Diversity in Urban River Supplied with Reclaimed Water: A Case Study of the North Canal River	YUAN Xun-chao, WANG Min, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (4097)
Spectroscopic and Molecular Characterization of Water Soluble Organic Matter from Sediments in the Macrophyte-dominated and Algae-dominated Zones of Taihu Lake	DU Ying-xun, DAI Jia-ru, ZHANG Qiao-ying, <i>et al.</i> (4108)
Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) from Lake Taihu and the Corresponding Potential Driving Factors	LIU Chao-rong, ZHU Jun-yu, LI Yu-yang, <i>et al.</i> (4118)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Bioretention Systems of Sponge Cities	LEI Xiao-ling, QIU Li-na, WEI Ze-jun, <i>et al.</i> (4127)
Treatment Effect of Corncob and Rice Straw Enhanced Subsurface Flow Constructed Wetland on Low C/N Ratio Wastewater	HU Man-li, HAO Qing-ju, MA Rong-zhen, <i>et al.</i> (4136)
Investigation of the Performance of Organic Contaminant Degradation by Fe ²⁺ /PDS Under Environmentally Relevant pH Conditions	LIU Ying, GUO Yi-wei, QIAO Jun-lian, <i>et al.</i> (4146)
Typical Pesticide Residues and Their Risk Assessment in Farmland Environment of Different Plant Types in Shayu County, Xinjiang	XIE Xuan-xuan, NUERLA Ailijiang, BALATI Maihemuti, <i>et al.</i> (4154)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Manure and Surrounding Soil of Poultry Farm in Ningxia	SHEN Cong, ZHANG Jun-hua, LIU Ji-li, <i>et al.</i> (4166)
Enrichment Factors of Soil-Se in the Farmland in Shizuishan City, Ningxia	WANG Ying, LIU Hai-yan, WANG Ze-jing, <i>et al.</i> (4179)
Zoning and Safe Utilization Method of Heavy Metal Contaminated Cultivated Land at Block Scale	WANG Rui, YU Jing, LI Yu, <i>et al.</i> (4190)
Spatial Distribution, Source Apportionment, and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Jianghugongmi Producing Area, Shandong Province	YU Lin-song, WAN Fang, FAN Hai-yin, <i>et al.</i> (4199)
Assessing the Lead Accumulation Risks of Wheat Grain by Developing a Source-Specific Accumulation Risk Assessment Model	YANG Yang, LI Yan-ling, NIU Shuo, <i>et al.</i> (4212)
Accumulation Effects and Health Risks of Heavy Metals in Rice in Location-based Cadmium Anomaly Area in Liuzhou	ZHU Liang-liang, WANG Fu-peng, TANG Le-bin, <i>et al.</i> (4219)
Accumulation and Transport Characteristics of Cd, Pb, Zn, and As in Different Maize Varieties	REN Chao, XIAO Jian-hui, LI Jing-tian, <i>et al.</i> (4232)
Remediation Potential of <i>Taraxacum kok-saghyz</i> Rodin on Lead and Cadmium Contaminated Farmland Soil	ZHANG Heng, XIONG Ming-biao, WANG Qian-xin, <i>et al.</i> (4253)
Remediation Potential of Three Dwarf Bamboos on Farmland Soils Contaminated with Mixed Heavy Metals	ZHANG Ying, ZHAO Xin, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (4262)
Impacts of Uptake and Accumulation of Cd on Double Rice-Paddy Soil by Silicon Fertilizer Continuous Application	PENG Hua, DENG Kai, SHI Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effect of Modified Chitosan Loaded with Silica on Arsenic Uptake and Transport in Rice	YANG Jia-yi, SUN Meng-qiang, XIAO Yu-tang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Chelating Agents and Organic Acids on Remediation of Cadmium and Arsenic Complex Contaminated Soil Using <i>Xanthium sibiricum</i>	ZHANG Ya-rui, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4292)
Effects of Water Management on the Transformation of Iron Oxide Forms in Paddy Soils and Its Coupling with Changes in Cadmium Activity	LI Ming-yuan, ZHANG Xiao-ting, LIU Han-yi, <i>et al.</i> (4301)
Effects of Iron Intensity-regulated Root Microbial Community Structure and Function on Cadmium Accumulation in Rice	ZHENG Shen, HUANG Dao-you, LI Bo, <i>et al.</i> (4313)
Effects of Mulching and Slow-release Fertilizer Application Reduction on Soil Microbial Community Structure in Rapeseed Field Under Two Different Rainfall Conditions	FENG Jun, SHI Chao, Hafiz Athar Hussain, <i>et al.</i> (4322)
High-Throughput Sequencing Combined with Metabonomics to Analyze the Effect of Heavy Metal Contamination on Farmland Soil Microbial Community and Function	PANG Fa-hu, LI Xiao-qi, DUAN Li-yang, <i>et al.</i> (4333)
Characteristics of Microbial Community Structure in the Surrounding Farmlands of a Mercury Mining Area and Its Environmental Driving Factors	CHEN Fen, YU Gao, SUN Yue-bing, <i>et al.</i> (4342)
Comparison of Bacterial Community Structure in Soil Aggregates Between Natural Karst Wetland and Paddy Field	LENG Meng, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4353)
Elevational Pattern and Control Factors of Soil Microbial Carbon Use Efficiency in the Daiyun Mountain	LÜ Kun, WANG Jing-jing, WU Guo-peng, <i>et al.</i> (4364)
Effect of Long-term Straw Returning on the Mineralization and Priming Effect of Rice Root-carbon	LIU Feng, WANG Yun-qiu, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Straw Returning and Biochar Application on Summer Maize Yield and Soil N ₂ O Emission in Guanzhong Plain	BAI Jin-ze, LIU Zhen-yuan, SONG Jia-jie, <i>et al.</i> (4379)
Effects of Polystyrene Nanoplastics (PS-NPs) on the Physiology of <i>Allium sativum</i> L.	QIU Chen-chen, LI Guo-xin, LI Qing-song, <i>et al.</i> (4387)
Effect of Microplastics on Soil Water Infiltration and Evaporation	WANG Zhi-chao, ZHANG Bo-wen, NI Jia-xuan, <i>et al.</i> (4394)
Life Cycle Assessment and Key Parameter Comparison of Hydrogen Fuel Cell Vehicles Power Systems	CHEN Yi-song, LAN Li-bo, HAO Zhuo, <i>et al.</i> (4402)