

施肥管理调控对水稻镉吸收转运的影响

黄其颖¹, 卢九斤¹, 高健苗¹, 生艳菲¹, 叶楠¹, 傅丽青^{1,*}, 叶正钱²

1. 金华市农业技术推广与种子管理中心, 浙江 金华, 321000

2. 浙江农林大学, 全省土壤修复与质量提升重点实验室, 浙江 杭州, 311300

摘要: 为筛选酸性镉污染稻田安全利用的施肥调控技术, 在金华镉污染农田设置空白对照、硅肥低用量(20 kg/667 m²)、硅肥高用量(40 kg/667 m²)、锌肥低用量(5 kg/667 m²)、锌肥高用量(10 kg/667 m²) 5个田间小区处理, 研究硅肥、锌肥对水稻农艺性状、产量、镉(Cd)吸收转运及土壤理化性质的影响。结果表明, 硅肥、锌肥均能改善水稻生长并提升产量, 高用量硅肥增产达6.04%。各施肥处理显著降低水稻根、茎、叶、籽粒Cd含量, 呈根>茎>叶>籽粒分布; 施肥可促进Cd由根向茎转运, 但显著抑制茎向籽粒转运, 实现籽粒降镉。高用量硅肥使土壤有效态Cd降低26.89%, 同时提升土壤pH、有机质及速效养分; 高用量锌肥效果较弱且易导致土壤酸化与养分拮抗。综合来看, 高用量硅肥(40 kg/667 m²)可协同实现水稻增产、籽粒降镉与土壤改良, 是酸性镉污染稻田安全利用的优选施肥措施。

关键词: 镉污染稻田; 施肥调控; 水稻; 镉转运; 安全利用

Effects of Fertilization Management on Cadmium Uptake and Translocation in Rice

Qiyang Huang¹, Jiujin Lu¹, Jianmiao Gao¹, Yanfei Sheng¹, Nan Ye¹, Liqing Fu^{1,*}, Zhengqian Ye²

1. Jinhua Agricultural Technology Extension and Seed Management Center, Jinhua, Zhejiang 321000, China

2. Zhejiang A&F University, Provincial Key Laboratory of Soil Remediation and Quality Improvement, Hangzhou, Zhejiang 311300, China

Abstract: To identify fertilization strategies for the safe utilization of acidic cadmium (Cd)-contaminated paddy fields, a field experiment with five treatments was conducted in Jinhua: control (no amendment), low-rate silicon fertilizer (20 kg/667 m²), high-rate silicon fertilizer (40 kg/667 m²), low-rate zinc fertilizer (5 kg/667 m²), and high-rate zinc fertilizer (10 kg/667 m²). The effects of silicon and zinc fertilizers on rice agronomic traits, yield, Cd uptake and translocation, and soil physicochemical properties were investigated. The results showed that both silicon and zinc fertilizers improved rice growth and increased yield, with the high-rate silicon treatment achieving a yield increase of 6.04%. All fertilization treatments significantly reduced Cd concentrations in rice roots, stems, leaves, and grains, following the order: root > stem > leaf > grain. Fertilization promoted Cd translocation from roots to stems but significantly inhibited Cd translocation from stems to grains, thereby reducing grain Cd concentration. The high-rate silicon treatment reduced soil available Cd by 26.89%, while increasing soil pH, organic matter content, and available nutrients. The high-rate zinc treatment showed weaker effects and

tended to induce soil acidification and nutrient antagonism. Overall, high-rate silicon fertilizer (40 kg / 667 m²) can simultaneously enhance rice yield, reduce grain Cd accumulation, and improve soil quality, making it a preferred fertilization strategy for the safe utilization of acidic Cd-contaminated paddy fields.

Keywords: Cadmium-contaminated paddy fields; Fertilization regulation; Rice; Cadmium translocation; Safe utilization

农田土壤镉 (Cd) 污染已成为威胁我国粮食安全与生态环境的突出问题^[1]。Cd 具有高迁移性、生物累积性与毒性, 可通过土壤-作物-食物链进入人体, 引发肾脏损伤、骨骼病变、心血管疾病等健康风险^[2]。全国土壤污染状况调查公报显示, 我国耕地土壤 Cd 点位超标率达 7.0%, 南方酸性水稻土因 pH 低、有机质含量差异大、淹水还原环境等因素, Cd 生物有效性高, 水稻籽粒 Cd 超标现象频发, 严重制约稻米质量安全与农田可持续利用^[3, 4]。

中轻度 Cd 污染农田的安全利用, 核心是在不改变土地农业用途前提下, 通过农艺调控、原位钝化、品种筛选等技术, 降低作物 Cd 吸收累积, 保障籽粒达标^[5, 6]。微量元素硅 (Si)、锌 (Zn) 是调控作物重金属吸收的关键元素: 硅肥可通过提升土壤 pH、促进 Cd 沉淀、增强根系细胞壁固定、调控 Cd 转运蛋白表达等途径, 降低 Cd 生物有效性与向籽粒转运^[7-9]; 锌作为植物必需营养元素, 可与 Cd²⁺ 竞争根系吸收位点与转运通道, 抑制水稻对 Cd 的吸收与转运, 同时改善作物生长与抗逆性^[10, 11]。

目前, 硅肥、锌肥阻控水稻 Cd 累积的研究多集中于单一肥料、单一用量或盆栽试验, 针对南方酸性 Cd 污染稻田的田间大区对比研究较少, 且硅锌肥对水稻 Cd 转运分配、土壤理化性质及养分协同影响的机制仍需深化^[12, 13]。本研究以金华地区 Cd 污染稻田为对象, 开展硅肥、锌肥不同用量田间试验, 系统分析其对水稻生长、产量、重金属累积、Cd 转运及土壤环境的影响, 明确最优施肥参数与调控机制, 为 Cd 污染稻田安全利用提供科学依据与实用技术。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于浙江省金华市典型 Cd 污染稻田开展, 土壤类型为酸性水稻土, 基础理化性质: pH = 4.95, 有机质 3.27%, 碱解氮 227.52 mg/kg, 有效磷 11.37 mg/kg, 速效钾 73.77 mg/kg, 土壤总 Cd 含量为 0.42 mg/kg, 属于中轻度 Cd 污染农田, 适宜开展安全利用技术研究。

1.2 供试材料

供试水稻: 当地主栽常规水稻品种甬优 1540, 适应性强、稳产性好。供试肥料: 硅肥: 液体硅肥, Si ≥ 85 g/L, pH = 5.0-7.0, 水不溶物 ≤ 10 g/L, Na ≤ 10 g/L; 锌肥: 七水硫酸锌, Zn ≥ 21%, 农用级, 纯度符合标准。

1.3 试验设计

采用小区对比试验, 共设 5 个处理, 肥料均作为基肥一次性施入: T1: 空白对照 (CK): 不施硅肥和锌肥; T2: 硅肥低用量 (20 kg / 667 m²); T3: 硅肥高用量 (40 kg / 667 m²); T4: 锌肥低用量 (5 kg / 667 m²); T5: 锌肥高用量 (10 kg / 667 m²)。每个处理 3 个重复, 小区面积为 30 m², 区间接田埂与保护行, 防止水肥串流; 统一耕作、灌溉、病虫害防治, 确保处理间仅肥料变量差异, 常规施肥为: 基肥复合肥 (20-10-15) 30 kg / 667 m², 追肥尿素 10 kg / 667 m²。

1.4 样品采集与测定

1.4.1 植物样品采集

水稻成熟期,每小区随机采集5株代表性植株,分根、茎、叶、籽粒分装,去离子水洗净,105℃杀青30min,70℃烘干至恒重,粉碎过筛备用。

1.4.2 土壤样品采集

同步采集0-20cm耕层土壤,风干、研磨、过2mm与0.149mm筛,测定pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾及DTPA提取态有效Cd含量。

1.4.3 测定方法

土壤pH采用电位法(水土比2.5:1)测定;有机质采用重铬酸钾外加热法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷采用HCl-NH₄F浸提-钼锑抗比色法测定;速效钾采用CH₃COONH₄浸提-火焰光度法测定^[14]。土壤有效态Cd采用0.1mol/LDTPA溶液提取,植物样品经HNO₃-HClO₄消解后,均使用石墨炉原子吸收光谱仪(GFAAS,PerkinElmer)测定。所有分析过程均使用国家标准物质(GBW)进行质量控制。

1.5 数据处理

转运系数(TF_{A-B}) = 器官B_{Cd含量} / 器官A_{Cd含量}。数据采用WPS整理,SPSS 26.0进行单因素方差分析(ANOVA),Duncan新复极差法检验差异显著性($p < 0.05$),Origin 2023绘图。

2 结果与分析

2.1 硅锌肥对水稻农艺性状及产量的影响

硅肥、锌肥均改善水稻农艺性状并提升产量。锌肥低用量处理株高增幅最大,达8.91%;硅肥高用量对有效穗数增幅最大,达5.21%;锌肥低用量穗粒数增幅达13.50%;硅肥高用量结实率提升2.38%,产量增幅6.04%,为所有处理最优。锌肥高用量增产效果弱于硅肥高用量,表明硅肥在稳产增产方面更具优势。

表1 施肥管理调控水稻重金属吸收研究试验水稻产量指标分析
Table 1 Rice Yield Indicators under Fertilization Management

序号	处理	株高 (cm)	有效穗数 (万穗/667m ²)	穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	产量 (kg/667m ²)
1	空白对照	83.24±6.35a	12.65±0.51a	213.28±16.13a	82.19±0.45b	396.71±12.65a
2	硅肥(低用量)	84.33±8.14a	12.82±0.78a	220.56±22.67a	85.50±1.32a	412.93±9.88a
3	硅肥(高用量)	86.67±7.64a	13.31±0.56a	234.22±10.22a	85.76±1.06a	420.65±19.16a
4	锌肥(低用量)	90.67±3.21a	12.96±0.73a	242.00±12.29a	82.33±0.88b	404.22±17.72a
5	锌肥(高用量)	88.67±1.15a	12.86±1.02a	225.22±20.12a	84.16±0.83a	409.09±21.39a

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($p = 0.05$),下同。

2.2 硅锌肥对水稻不同部位Cd含量的影响

各处理水稻Cd含量均呈现根>茎>叶>籽粒的分布规律,硅锌肥显著降低各器官Cd含量。高用量硅肥处理根系Cd降幅最显著,主要因硅肥提升土壤pH,降低Cd生物有效性,抑制根系吸收;籽粒Cd降幅普遍高于茎叶,表明硅锌肥可有效阻断Cd向可食部位转运。茎叶Cd响应较弱,说明调控具有器官特异性。

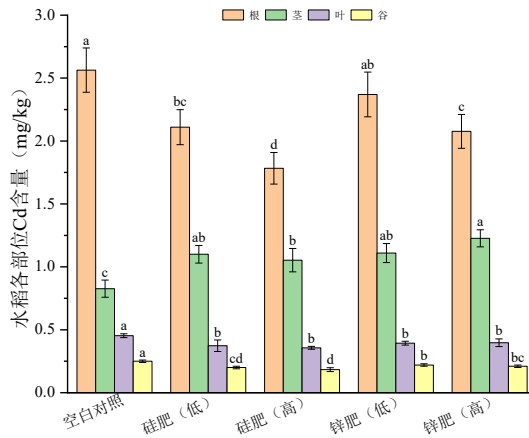


图 1 施肥管理调控水稻重金属吸收研究试验水稻 Cd 含量分析
 Fig. 1 Cd Content in Rice under Different Fertilization Treatments

2.3 硅锌肥对水稻不同部位 Cd 含量的影响

与对照相比，施肥处理根-茎转运系数显著升高，茎-叶、茎-籽粒转运系数极显著降低。说明硅锌肥虽促进 Cd 从根向茎转运，但强烈抑制茎向籽粒的关键转运，将 Cd 固定在茎等营养器官，实现籽粒降镉，这是硅锌肥阻控水稻 Cd 累积的核心机制。

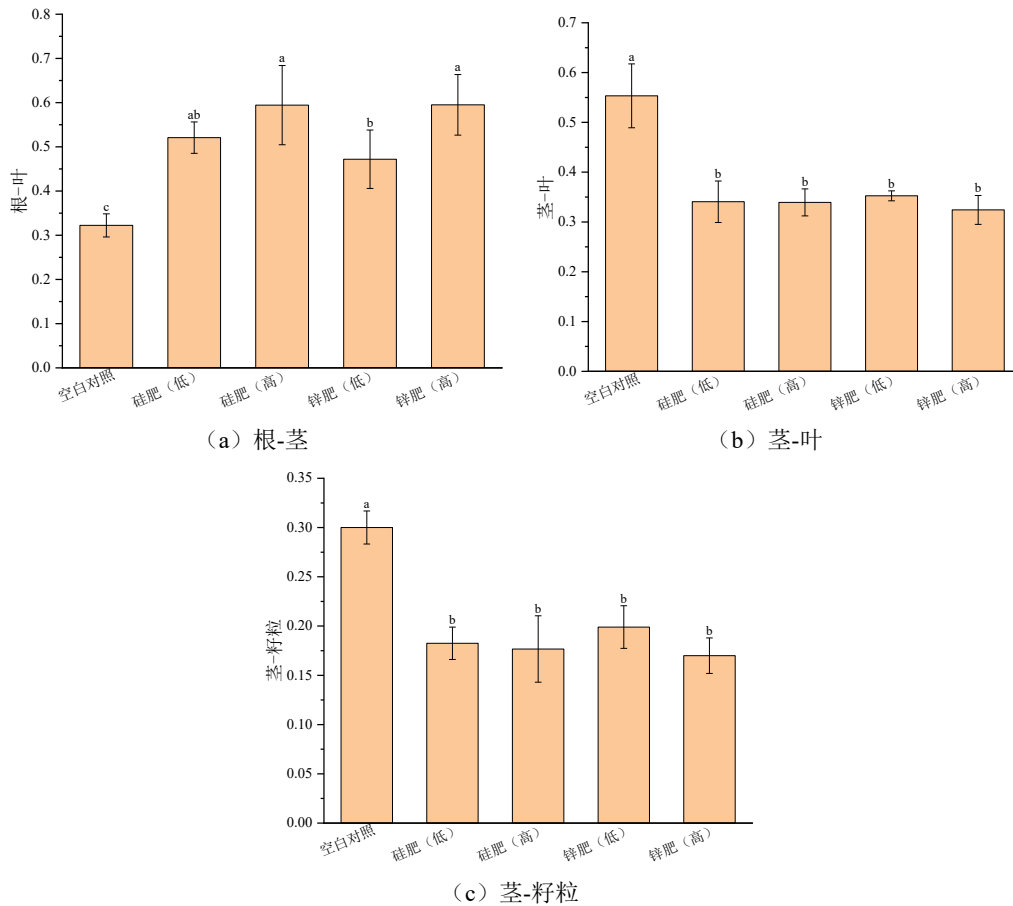


图 2 水稻中 Cd 的转运系数
 Fig. 2 Cd Translocation Factor in Rice

2.4 硅锌肥对水稻不同部位 Cd 含量的影响

各处理均显著降低土壤有效态 Cd, 高用量硅肥效果最优, 降幅 26.89%; 高用量锌肥降幅约 10%。硅肥通过提升 pH, 促进 Cd 形成碳酸盐、氢氧化物沉淀, 降低生物有效性; 锌肥主要通过 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的离子拮抗, 减少土壤吸附位点与根系吸收, 机制存在明显差异。

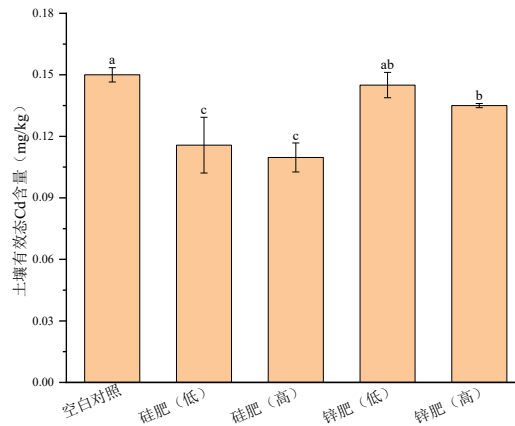


图3 施肥管理调控水稻土壤有效态 Cd 含量分析

Fig. 3 Soil Available Cd Content under Fertilization Management

2.5 硅锌肥对水稻农艺性状及产量的影响

硅肥显著提升土壤 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾, 高用量硅肥效果最突出; 高用量锌肥导致 pH 下降, 并降低碱解氮、有效磷含量, 产生养分拮抗。表明硅肥兼具改良酸性土壤、提升肥力与钝化重金属的多重功能, 锌肥高量施用存在土壤酸化风险。

表2 土壤基本理化性质分析

Table 2 Basic Soil Physicochemical Properties

处理	pH	有机质 (%)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)
T1	4.96±0.11abc	3.29±0.17c	232.34±4.72b	10.68±0.83b	79.06±5.60d
T2	5.03±0.11ab	3.74±0.19ab	243.31±3.2ab	11.74±0.84b	120.48±7.65b
T3	5.12±0.14a	3.83±0.06a	247.91±11.94a	16.51±0.29a	135.97±1.49a
T4	4.83±0.05c	3.31±0.08c	236.83±8.88ab	11.55±1.16b	99.26±4.01c
T5	4.86±0.03bc	3.51±0.1bc	204.27±1.20c	8.40±0.70c	72.41±4.31d

3 讨论

硅、锌作为水稻有益/必需营养元素, 在改善株型、促进分蘖、提高光合效率与抗逆性方面作用显著^[15, 16]。本研究中, 硅肥高用量处理有效穗数、结实率及产量增幅最大, 这与硅能增强细胞壁稳定性、提升抗倒伏与抗病能力、优化冠层结构、延长功能叶寿命密切相关^[17]。锌肥低用量对株高与穗粒数提升最明显, 说明适量锌可促进生长素合成、提高花粉育性与灌浆速率, 但高用量锌未进一步增产, 可能与离子拮抗、养分吸收失衡及轻微生理胁迫有关^[18]。整体来看, 硅肥在稳产增产方面更稳定、更高效, 更适合南方酸性稻田大面积推广。

本试验中水稻各部位 Cd 含量表现为根>茎>叶>籽粒, 与已有研究结果一致^[19]。硅肥与锌肥均能显著降低各器官 Cd 含量, 但二者的作用路径存在明显差异。硅肥一方面通过提高土壤 pH, 促进 Cd 形成碳酸盐或氢氧化物沉淀, 降低土壤有效态 Cd, 从而减少根系对 Cd 的初始吸收^[20]; 另一方面,

硅在根系和茎秆中形成硅质层并促进细胞壁固定,诱导 Cd 区室化,进而促进 Cd 由根向茎转运、抑制 Cd 由茎向籽粒转运,形成“根部吸收、茎部固定、籽粒低积累”的调控模式^[21,22]。锌肥则主要依赖 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 在根系吸收通道及转运蛋白上的竞争拮抗作用,减少水稻对 Cd 的吸收与向上转运^[23],但其对土壤 Cd 的钝化能力较弱,整体降 Cd 效果低于硅肥^[24]。相比之下,硅肥通过调控 Cd 在植株体内的分配格局实现安全利用,更契合稻田轻简化与高效化的调控需求^[25]。

硅肥在本研究中展现出“钝化重金属—改良土壤—提升肥力”的三重协同效应^[26]。一方面,硅肥显著提升土壤 pH,增加胶体负电荷,强化对 Cd^{2+} 的吸附与沉淀,是降低土壤 Cd 生物有效性的核心机制^[27];另一方面,硅肥施用后土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾同步提升,表明其可改善土壤微生态,促进养分循环与盐基离子积累,增强土壤持续供肥能力,这对长期处于酸化退化状态的南方稻田尤为重要^[28]。相比之下,锌肥高用量处理导致土壤 pH 下降,碱解氮与有效磷含量降低。其主要原因在于,过量 Zn^{2+} 与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子产生拮抗作用,抑制土壤微生物活性,从而干扰氮磷的矿化与转化过程^[29]。这一结果提示,在镉污染稻田中施用锌肥时,应严格控制用量,或与硅肥配施,以避免土壤酸化和肥力下降的风险^[30]。综合来看,在酸性镉污染农田中,优先选择碱性或含硅材料进行安全利用,具有更高的生态安全性与应用可靠性。

4 结论

(1) 硅肥与锌肥均能显著提升水稻农艺性状及产量,其中高用量硅肥 ($40\text{ kg} / 667\text{ m}^2$) 增产效果最优,增幅达 6.04%。

(2) 硅锌肥可显著降低水稻各器官 Cd 含量,其分布特征为根>茎>叶>籽粒;二者通过促进 Cd 由根向茎转运、抑制 Cd 由茎向籽粒转运,实现对籽粒 Cd 的高效阻控。

(3) 高用量硅肥可使土壤有效态 Cd 含量降低 26.89%,同时具有改良酸性土壤、提升土壤肥力的综合效应;而高用量锌肥降 Cd 效果较弱,且存在土壤酸化与养分拮抗的风险。

(4) 综合考虑增产、降镉与土壤改良效应,推荐在酸性 Cd 污染稻田中以硅肥 $40\text{ kg} / 667\text{ m}^2$ 作为核心施肥措施;锌肥建议采用低用量 ($5\text{ kg} / 667\text{ m}^2$) 或与硅肥配施,以避免负面效应。

参考文献

- [1] 林红梅,江淼华,林文雄. 镉胁迫对水稻不同生育期硅和镉吸收分配的影响[J/OL]. 生态学杂志, 2026, 1-9.
- [2] Rizwan M, Ali S, Adrees M, et al. A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables[J]. Chemosphere, 2017, 182: 90-109.
- [3] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 2014.
- [4] 陈巧茂, 张玉盛, 等. 水稻镉污染防治及营养调控研究进展[J]. 中国农学通报, 2025, 39(28): 1-8.
- [5] 汪鹏, 赵方杰. 我国主要粮食作物中镉限量标准问题的若干思考[J]. 科学通报, 2022, 67(27): 3252-3262.
- [6] 张燕, 黄奇娜, 邵国胜, 等. 水稻镉污染相关农艺调控技术研究与应用进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(2): 15-20.
- [7] Lavinsky A O, Detmann K C, Reis J V, et al. Silicon-mediated cadmium tolerance in rice: physiological and molecular mechanisms[J]. Plant Science, 2021, 307: 110869.
- [8] Zhang Y, Wang X, Ji X H, et al. Effect of a novel Ca-Si composite mineral on Cd bioavailability, uptake and translocation in rice[J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115589.
- [9] 许佳莹, 朱练峰, 禹盛苗, 等. 硅肥对水稻产量及生理特性影响的研究进展[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 1-6.
- [10] 王江瑶, 田梓犀, 曾鹏, 等. 叶面喷施氨基酸和锌对水稻镉吸收和富集的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(11): 80-88.
- [11] Yue J, Zhang N, Wu D, et al. Molecular insights into cadmium transport and micronutrient crosstalk in rice[J]. Journal

- of Integrative Plant Biology, 2025, 67(1): 123-142.
- [12] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 硅锌配施对水稻镉吸收转运及土壤环境的影响[J]. 生态环境学报, 2024, 33(5): 901-910.
- [13] 李少华, 潘荣祝, 陆贵佳, 等. 不同矿物调理剂对 Cd 污染水田土壤性质及水稻 Cd 含量的影响[J]. 西南农业学报, 2024, 37(3): 597-603.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [15] 魏晓东, 张亚东, 宋雪梅, 等. 硅镁锌肥改善稻米品质的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 783-788.
- [16] 田露丹, 樊文华, 刘奋武, 等. 施硅对镉胁迫下生育前期水稻生长及其植株体内抗氧化酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1412-1418.
- [17] 吴伊鑫, 黄奇伟, 叶木军, 等. 农药减施条件下追施硅肥对水稻抗逆性及产量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2021, 47(4): 507-516.
- [18] Kandil E E, El-Banna A A A, Tabl D M M, et al. Zinc Nutrition Responses to Agronomic and Yield Traits, Kernel Quality, and Pollen Viability in Rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 791066.
- [19] 杨金康, 杨秋云, 朱利楠, 等. 不同改良剂在石灰性潮土上对土壤-水稻体系镉的吸收转运的影响[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 96-102.
- [20] 张光旭, 赵凤亮, 李杨, 等. 镉胁迫条件下纳米硅肥和锌肥对水稻生长、镉吸收及其转运的影响[J]. 热带作物学报, 2025, 46(8): 1912-1920.
- [21] Luo J S, Yang Y, He Y, et al. Overexpression of Silicon Uptake Transporter OsLsi1 and OsLsi2 Decreased Cadmium Accumulation in Rice[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73: 16242-16250.
- [22] Wang H, Liu M, Zhang Y, et al. Foliar spraying of Zn/Si affects Cd accumulation in paddy grains by regulating the remobilization and transport of Cd in vegetative organs[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 206: 108258.
- [23] 焦欣田, 薛卫杰, 赵艳玲, 等. 硅锌互作对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2491-2497.
- [24] 李明举, 严正炼, 王文华. 水稻施用锌肥对镉吸收的抑制效果初探[J]. 耕作与栽培, 2014, (4): 12-14.
- [25] 焦欣田. 硅锌互作对水稻镉积累特性及分布特征的影响[D]. 东北农业大学, 2019.
- [26] Wang Y, Wang X, Li Y, et al. Effects of silicon application on soil properties, cadmium availability and uptake in rice (*Oryza sativa* L.) in a typical Cd-contaminated paddy soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(32): 40381-40391.
- [27] 杨俊兴, 郭庆军, 杨军, 等. 硅肥对镉污染稻田土壤理化性质、镉形态及水稻镉吸收的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(6): 2840-2848.
- [28] 曹庭悦, 刘鸣达, 沃惜慧, 等. 硅、磷配施对水稻镉吸收转运的影响及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 37-44.
- [29] 张光旭, 赵凤亮, 李杨, 等. 镉胁迫条件下纳米硅肥和锌肥对水稻生长、镉吸收及其转运的影响[J]. 热带作物学报, 2025, 46(08): 1912-1920.
- [30] Shi X, Zhang X, Li Y, et al. Interactive effects of silicon and zinc on cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) and soil cadmium fractions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402: 123467.

¹ **第1作者简介:** 黄其颖 (1989-), 男, 硕士研究生, 农艺师, 研究方向: 从事土壤肥料的研究与推广工作。E-mail: 794994198@qq.com。

* **通讯作者简介:** 傅丽青 (1972-), 女, 高级农艺师, 研究方向: 主要从事作物测土配方施肥等方面研究。E-mail: fu_liqing@hotmail.com。