

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.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.03.030

硅镁锌肥改善稻米品质的研究进展

魏晓东, 张亚东, 宋雪梅, 王才林

(江苏省农业科学院粮食作物研究所/江苏省优质水稻工程技术研究中心/国家水稻改良中心南京分中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 稻米品质受遗传因素、环境条件和栽培条件的影响,合理的栽培技术和肥料运筹能有效提升稻米品质。硅、镁、锌是除氮、磷、钾等大量元素外应用于水稻较多的元素,对水稻的生长发育具有重要作用。本文概述了硅肥、镁肥、锌肥施用对水稻生长发育中的作用,重点综述了硅、镁、锌在稻米品质形成中的生理功能,以及对稻米外观品质、加工品质、食味品质、安全品质的影响,提出了今后的研究重点,为水稻的优质栽培提供参考依据。

关键词: 稻米品质; 硅肥; 镁肥; 锌肥

中图分类号: S143.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)03-0783-06

Research progress on rice quality improvement by applying silicon-magnesium-zinc fertilizer

WEI Xiao-dong, ZHANG Ya-dong, SONG Xue-mei, WANG Cai-lin

(*Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Jiangsu High Quality Rice Research and Development Center/Nanjing Branch of Chinese National Center for Rice Improvement, Nanjing 210014, China*)

Abstract: Rice quality is affected by genetic factors, environmental conditions and cultivation conditions, reasonable cultivation techniques and fertilizer management can improve rice quality effectively. Silicon, magnesium and zinc fertilizers, which play important roles in the growth and development of rice are much more applied to rice cultivation besides macroelements such as nitrogen, phosphorus and potassium. In this paper, the roles of silicon, magnesium and zinc fertilizers in the growth and development of rice were summarized, the physiological functions of silicon, magnesium and zinc in the formation of rice grain quality, as well as the effects on appearance quality, processing quality, taste quality and safety quality of rice grain were mainly reviewed. The focus of future research was put forward to provide a reference for high-quality cultivation of rice.

Key words: rice quality; silicon fertilizer; magnesium fertilizer; zinc fertilizer

水稻作为全球最重要的粮食作物之一,世界50%以上的人口均以其为主食^[1]。中国是农业大

国,水稻产业的发展备受重视。随着社会的发展,人们生活水平得到提高,对稻米品质的要求也逐渐提高^[2]。肥料施用在一定程度上影响水稻的产量和品质。水稻除了需要氮、磷、钾等大量元素外,还需要硅、镁、锌等中微量元素。关于硅、镁、锌改善稻米品质已有大量研究报道,但缺乏相关总结。本文综述了近年来应用硅、镁、锌改善稻米品质的相关研究进展,以期水稻优质栽培提供理论依据。

收稿日期:2020-08-31

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(20)2001];国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-01-62);江苏省重点研发计划项目(BE2018399-1、BE2019343)

作者简介:魏晓东(1981-),女,湖北随州人,博士,副研究员,研究方向为水稻遗传育种。(E-mail)weiyinlin@163.com

通讯作者:王才林,(Tel)02584390317;(E-mail)clwang@jaas.ac.cn

1 硅肥对水稻生长的作用

1.1 硅肥对水稻生长发育的影响

水稻是喜硅作物,硅是水稻所需的重要营养元素之一,其作用仅次于氮、磷、钾^[3]。硅在水稻茎或叶中的含量高达10%~15%,高于其他农作物体内的硅含量。硅对水稻的生长和发育作用较大,在水稻生长发育过程中需要从土壤中不断地吸收硅元素,以满足自身生长代谢的需要。每生产 100 kg 水稻籽粒,需吸收 22 kg 硅,一个生长季节 1 hm² 高产水稻可以吸收土壤中 1 125~1 950 kg 的二氧化硅^[4]。如果水稻成熟期茎叶中有效硅含量低于 10%,则认为水稻缺硅。水稻如果缺硅,其苗期叶片就会披垂,灌浆期易倒伏,功能叶会提前死亡,光合作用受影响,生育后期出现早衰,使得产量减少,品质降低。硅肥不仅能够增加产量,还可以增加水稻的抗折力,使其抗倒伏能力提高。赵海成等^[5]研究发现施用硅肥可以使水稻基部节间硅化程度增加,增加细胞壁的厚度,使水稻叶片直立,减少叶片之间的遮荫率从而提高光能利用率,增加茎秆的抗折力,减少倒伏。硅肥能够调节水稻自身的营养,促进正常的生长代谢活动,在生长发育后期增加功能叶片中叶绿素含量,从而增强水稻光合作用及光合产物的积累^[6]。

1.2 硅肥对水稻抗逆性的影响

施用硅肥可以提高水稻的抗旱、抗病虫害、耐盐胁迫和耐重金属胁迫的能力,增强水稻在逆境中的生存能力^[7]。Kumar 等^[8]发现硅的施用降低了植株相对含水量,增加了脯氨酸含量、过氧化氢酶和过氧化物酶的活性,提高了水稻的抗旱能力。Wang 等^[9]发现在干旱条件下施用硅肥可以缓解水稻膜蛋白复合物的降解。雷雨等^[10]发现硅在细胞壁内沉淀会使其细胞壁增厚,阻碍病原菌侵入水稻体内。Yan 等^[11]发现硅可以减轻盐离子毒性和渗透约束,减少植株地上部分钠的吸收和增加根系中钠的含量来减轻钠离子毒性,提高水稻的盐胁迫耐受性。彭华等^[12]和 YU 等^[13]研究发现,对镉胁迫下的水稻施用硅肥后,重金属离子被土壤吸附的能力增强,并有利于重金属离子发生螯合反应,降低其在土壤中的有效性,抑制重金属离子向地上部分运输,减轻重金属胁迫。

1.3 硅肥对稻米品质的影响

稻米品质包括外观品质、加工品质、食味品质、营养品质和安全品质。近年来,许多研究结果都表明,硅肥在提高和改善稻米品质方面具有重要作用。稻米的外观品质和加工品质在施用硅肥后可以得到显著改善。多数学者认为施用硅肥能够提高水稻的糙米率、精米率及整精米率,使稻米的垩白度和垩白率下降,提高其加工和外观品质^[2,14]。张国良^[15]认为,硅肥用量 0~300 kg/hm² 时,硅肥施用量与精米率、整精米率呈正相关,而与垩白度和垩白率呈负相关。王远敏^[16]则发现硅肥用量在 60~120 kg/hm² 时,加工品质和外观品质均下降,这可能和水稻的品种特性及当地土壤条件有关。硅肥也能在一定程度上改善食味品质和营养品质。稻米食味品质的主要指标有直链淀粉含量、蛋白质含量、胶稠度、糊化温度、食味值和 RVA 值。米饭质地的硬度、凝聚性和黏度等多项物理特性与稻米中直链淀粉含量密切相关,直链淀粉含量过高或过低均会使米饭品质变差^[17-18],稻米中蛋白质含量的下降可使其食味品质得到改善^[19-21]。稻米蛋白质和直链淀粉含量受硅的影响随品种和施用时期的不同会出现差异。丁王梅等^[22]的研究结果表明,孕穗期施用硅肥能够增加稻米直链淀粉含量和蛋白质含量,而王力等^[2]则认为在倒二叶期施用硅肥会使蛋白质含量下降,直链淀粉含量上升。商全玉等^[14]认为适量施用硅肥能增加稻米蛋白质含量,直链淀粉含量则无显著变化,而张国良^[15]发现施用硅肥可引起稻米直链淀粉含量的下降以及蛋白质含量的增加。稻米食味品质与 RVA 谱特征值密切相关,适量施用硅肥能使稻米最高黏度、胶稠度和崩解值提高,降低糊化温度和消减值,提高食味值,从而提高其蒸煮食味品质。Liu 等^[23]发现在孕穗期施用硅肥能够提高稻米中锌、钙、镁和蛋白质含量以及天冬氨酸、谷氨酸、丝氨酸、丙氨酸、酪氨酸、精氨酸、脯氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸等氨基酸的含量,表明在一定时期稻米的营养品质可通过施用硅肥来提高。Wang 等^[24]研究了 6 个水稻品种在镉、铅、钴污染土壤上叶面喷施有机和无机纳米硅对水稻重金属积累的影响,发现施用硅肥降低了水稻中重金属的含量,特别是有毒镉在籽粒中的含量,这表明纳米硅对水稻的重金属毒性有明显的缓解作用,施用硅肥能够降低水稻籽粒中镉含量,提高稻米的安全品质^[25]。

2 镁肥对水稻生长的作用

2.1 镁肥对水稻生长发育的影响

镁作为中量元素的代表之一,在水稻的不同发育过程中是不可或缺的^[26]。镁参与叶绿素的合成,进而影响着水稻的光合作用以及能量代谢。叶片缺镁后会发生叶片变黄的现象,并伴有老叶焦状卷曲、剑叶出现黄色条斑的现象^[27],这主要是由于缺镁导致叶绿体结构遭到破坏,使叶绿素合成受阻^[28-29]。镁还可以催化植物体内多种酶促反应^[30],例如,镁可以催化磷酸转移酶发生反应,促进磷酸盐在水稻体内的转运,提高水稻对磷的吸收利用率^[31]。水稻穗数和结实率的增加是镁对水稻产量影响的主要表现。钱永德^[32]研究发现,少量施用镁肥能够增加穗数和每穗粒数,镁充足还会增强水稻的光合作用及产物的积累,使得粒质量增加,从而提高水稻产量。

2.2 镁肥对稻米品质的影响

合理施用镁肥能够改善稻米品质。多数研究者认为施用镁肥会提高稻米的加工品质和外观品质。研究结果^[33-34]表明,镁肥可以提高水稻糙米率、精米率及整精米率,周立军等^[35]认为镁肥能够降低垩白度和垩白率。钱永德等^[36]认为施镁量与稻米的垩白率成反比,与整精米率成正比。李军等^[37]认为施穗肥时可以通过追施镁肥来提高稻米糙米率、精米率及整精米率,降低垩白度和垩白粒率。稻米蛋白质和直链淀粉含量受镁肥的影响随品种不同而异,但总的来说施用镁肥可以使稻米的食味值得到提高。刘显爽等^[34]认为施用镁肥可以增加稻米中蛋白质含量,降低直链淀粉含量。镁肥追肥时期不同也会造成不同的结果。一般施基肥时施用镁肥会增加稻米中蛋白质含量,降低直链淀粉含量,而分蘖期和孕穗期追施镁肥会降低稻米中蛋白质含量、增加直链淀粉含量^[37]。一般认为,食味值高的稻米具有较高的最高黏度、热浆黏度和崩解值,较低的冷胶黏度、回复值和消减值。杨文祥等^[38]研究发现施用镁肥后 RVA 谱中的最终黏度、回复值及消减值降低,且最高黏度、热浆黏度及崩解值明显上升,施用镁肥提高了稻米的食味品质;李军等^[37]认为南粳 9108 穗期追施镁肥,能够使稻米的消减值降低,崩解值升高,最终黏度显著降低,食味值得以优化。此外,镁肥也能提高稻米的营养安全品质。增施镁肥能够显著增加稻米中氮、镁、锌、锰、钙、铜等元素的

含量,提高稻米营养品质^[37]。降低重金属在水稻中的积累也可通过施用镁肥来实现。杜文琪^[39]研究外源镁对镉在水稻体内的转运和积累的影响,发现镉和镁在根系中存在拮抗作用,在孕穗期和分蘖期施用镁肥会降低根系对镉的吸收,降低糙米中镉含量,提高水稻抵抗镉胁迫的能力。

3 锌肥对水稻生长的作用

3.1 锌肥对水稻生长发育的影响

锌是植物健康生长的必需元素,如果叶片的锌含量低于 15 $\mu\text{g/g}$,就有可能缺锌。但锌的含量不是越多越好,当含量超过 0.4 mg/g 时,就会产生毒害作用^[40]。水稻是对锌较敏感的植物,缺锌会延缓水稻生长发育,降低水稻的抗逆能力,减少分蘖数而降低产量。锌是多种酶的活化剂,能对酶起到催化、激活的作用,也可以保持蛋白质的原有结构。植物生长发育过程中 CO_2 的固定、生物膜的维持、蛋白质的合成、生长素的合成和花粉粒的形成等都会受到含锌酶的调控^[41]。水稻中的碳酸酐酶(CA)是与光合作用密切相关的一种酶,张凯岳^[42]研究了锌对水稻碳酸酐酶和光合作用的调节作用,发现通过叶面喷施硫酸锌可以提高 CA 的活性,进而促进水稻的净光合速率,提高水稻的光合作用。还有研究结果表明,锌是锌指蛋白的重要组成成分,核酸与锌指蛋白相互作用会影响植物基因的表达,从而调节植物的生长^[43]。因此锌对于水稻抵御外界胁迫、抵抗病虫害,促进其生长发育具有重要作用。

3.2 锌肥对稻米品质的影响

施用锌肥可以明显改善稻米品质。王力等^[2]研究了施用锌肥对优良食味粳稻稻米品质的影响,发现施用锌肥可以使稻米的精米率和整精米率明显提高,降低糙米率、垩白度和垩白率,说明施用锌肥可以改善稻米的外观品质和加工品质;刘健等^[44]也发现叶面喷施硫酸锌可以降低稻米的垩白度和垩白率,提高稻米的外观品质;黄锦霞等^[45]的研究结果表明,锌肥之所以使稻米的外观品质得到改善,主要是由于锌肥的施用提高了稻米中氮的含量,使得细胞内核糖核酸、核糖体和 RNA 含量增加,促进蛋白质的合成,使籽粒充实坚硬,整精米率提高,垩白度和垩白率降低,最终稻米外观品质、加工品质和营养品质得以提高。施用锌肥对稻米的蒸煮品质也有重要影响,主要表现在稻米的胶稠度、碱消值、糙米率

和直链淀粉含量的变化。王力等^[2]的研究结果表明,在倒二叶期追施锌肥能够提高南粳 9108 的胶稠度、最高黏度、崩解值、口感和食味值。徐巡军等^[46]的研究结果表明,施用锌肥可以使稻米的胶稠度、碱消值、糙米率增加,稻米的直链淀粉的含量降低,稻米的营养品质和蒸煮食味品质提高,这主要是由于施用锌肥使水稻的光合作用增强,对碳水化合物转化酶具有活化作用,从而提高稻米品质。

锌肥还有一项重要的作用就是能够增加稻米香味,目前已开展大量研究。Lei 等^[47]研究发现,锌肥可以通过提高脯氨酸转化成 2-AP(2-乙酰基-1-吡咯啉)的效率来提高稻米的香味。Mo 等^[48]也获得了相同的研究结果,他们发现锌可以诱导脯氨酸浓度和脯氨酸脱氢酶活性增加,提高 2-AP 含量,有助于促进稻米香气的形成。Luo 等^[49]发现孕穗期喷施外源氯化锌能够增加香稻籽粒中 2-AP 含量。此外,有研究结果表明,施用锌肥能明显降低糙米对镉的积累,Fahad 等^[50]的研究结果表明,这可能是由于锌和镉之间存在拮抗作用,植物组织中锌浓度的增加会影响镉在组织细胞中的转移,从而降低了镉向籽粒中的迁移率。

4 硅、镁、锌复合使用对稻米品质的影响

目前关于硅肥、镁肥、锌肥单独施用的研究比较多,3 种元素共同施用的研究相对较少。张莉萍等^[51]的研究发现,硅肥、镁肥、锌肥交互配施可以提高稻米的糙米率,降低垩白率,在一定范围内可以改善空育 131 的外观品质,每 667 m² 高效硅酸钠 10 kg、镁 1 kg、锌 1 kg 是硅、镁、锌复合肥的最佳施用量^[51];石孝均等^[52]的研究结果表明,硅肥镁肥配施会使水稻籽粒中氮、钾、硅、镁的含量提高,增加籽粒中蛋白质的含量,能够改善稻米的营养品质。李军等^[37]的研究结果表明,孕穗期镁肥、锌肥配施能够改善南粳 9108 的加工品质和营养品质,但是外观品质和蒸煮食味品质都比镁肥、锌肥单独施用差。王力等^[2]也认为硅肥锌肥的配施能够显著提高南粳 9108 的外观品质、加工品质和食味品质,且在倒四叶期施用最佳。3 种元素配施不仅可以发挥每一种元素对水稻生长发育的促进作用,还交互影响水稻对元素的吸收,共同调节养分供应,改良水稻植株的营养状况,使稻米品质得以改善。

5 展望

随着人民生活水平的提高,稻米品质越来越受到人们的关注。稻米品质受品种遗传因素、土壤、气候等方面的影响^[53],合理的栽培技术和肥料运筹能有效提升稻米品质。除氮、磷、钾等大量元素外,硅、镁、锌是水稻上应用较多的元素,它们对水稻的生长发育和品质提升都具有重要作用。合理施用硅肥、镁肥、锌肥,可以提高稻米的加工品质、外观品质、蒸煮食味品质和安全品质,但不同研究者的结论不尽一致。不同品种以及不同地域对栽培的要求也不同,因此今后需要进一步系统地研究硅肥、镁肥、锌肥对改善稻米品质的作用、最佳施用时期和施用量及其在不同品种间作用的差异,针对不同品种和不同地域确定合适的施用量和施用时期,以达到最佳的品质提升效果。另外,需要针对不同品种研究硅、镁、锌等各种元素与氮、磷、钾的最佳配比,使产量和品质达到最佳平衡,在提升品质的同时,获得最佳产量。

参考文献:

- [1] SAMI A, BUTT M S, KHAN M I, et al. Cooking and eating quality attributes of edible coated zinc fortified rice[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2017, 54(3): 663-670.
- [2] 王力,孙影,张洪程,等. 不同时期施用锌硅肥对优良食味粳稻产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(6): 885-898.
- [3] 殷碧秋,常红,齐君. 硅肥对水稻品质的影响及发展前景[J]. 吉林农业, 2010(5): 112.
- [4] 陈平平. 硅在水稻生活中的作用[J]. 生物学通报, 1998, 33(8): 5-7.
- [5] 赵海成,李红宇,陈立强,等. 硅氮配施对寒地水稻产量品质及抗倒性的影响[J]. 上海农业学报, 2018, 34(4): 36-42.
- [6] 陈光东,杨新彬,董广林. 硅肥对水稻的增产及抗瘟效应[J]. 农村实用科技信息, 2006(6): 9.
- [7] 贾建新,蔡德龙. 硅肥对改善农作物品质研究及新进展[C]//中国农业产业经济发展协会. 2011 新型肥料研发与新工艺、新设备研究应用研讨会论文集. 北京:北京晟勋炎国际会议服务中心, 2011: 47-52.
- [8] KUMAR A, NAYAK A K, PANI D R, et al. Application of phosphorus, iron, and silicon reduces yield loss in rice exposed to water deficit stress[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1488-1497.
- [9] WANG Y W, ZHANG B B, JIANG D E, et al. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress[J]. Environmental

- and Experimental Botany, 2019(158):117-124.
- [10] 雷 雨,黄 云,杜晓宇,等. 增施硅肥对水稻抗稻瘟病的效果分析[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23):11044-11046, 11066.
- [11] YAN G H, FAN X P, PENG M, et al. Silicon improves rice salinity resistance by alleviating tonic toxicity and osmotic constraint in an organ-specific pattern [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020 (11):260.
- [12] 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.
- [13] 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
- [14] 商金玉,张文忠,韩亚东,等. 硅肥对北方粳稻产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6):661-664.
- [15] 张国良. 硅肥对水稻产量和品质的影响及硅对水稻纹枯病抗性的初步研究[D]. 扬州:扬州大学, 2005.
- [16] 王远敏. 硅对水稻生长发育及产量品质的影响研究[D]. 重庆:西南大学, 2007.
- [17] 李 琳,丁 峰,潘介春,等. 植物锌指蛋白转录因子家族研究进展[J]. 热带农业科学, 2020, 40(2):65-75.
- [18] CHEN X Q, ZHOU X, YANG Z Y. Analysis of quality involving in minerals, amylose, protein, polyphenols and antioxidant capacity in different coloured rice varieties [J]. *Food Science and Technology Research*, 2019, 25(1):141-148.
- [19] 李洪亮,李 丹,张 超,等. 鲜食水稻籽粒成熟过程中多糖组成及抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2020, 36(5):59-63, 69.
- [20] FAHAD S, HUSSAIN S, KHAN F, et al. Effects of tire rubber ash and zinc sulfate on crop productivity and cadmium accumulation in five rice cultivars under field conditions [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015(22):12424-12434.
- [21] ZHANG H, YU C, HOU D P, et al. Changes in mineral elements and starch quality of grains during the improvement of japonica rice cultivars [J]. *Journal of The Science of Food and Agriculture*, 2018(98):122-133.
- [22] 丁王梅. 纳米硅制剂对水稻养分吸收及品质的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2015.
- [23] LIU Q H, ZHOU X B, SUN Z W. Application of silicon fertilizer affects nutritional quality of rice [J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2017, 77(2):163-170.
- [24] WANG S H, WANG F Y, GAO S C, et al. Heavy metal accumulation in different rice cultivars as influenced by foliar application of nano-silicon [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2016, 227(7):228.
- [25] HUANG F, WEN X H, CAI Y X, et al. Silicon-mediated enhancement of heavy metal tolerance in rice at different growth stages [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(10):2193.
- [26] 温海英,陈利利,曾 志. 镁肥对水稻经济性状及产量的影响 [J]. 农技服务, 2014, 31(3):79.
- [27] 刘君汉. 浅谈水稻施镁技术 [J]. 江西农业科技, 2001(2):17.
- [28] 高 洋. 镁钾配施对寒地水稻产量和品质影响的研究 [D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2010.
- [29] 王志超. 增施微生物菌肥和镁肥对水稻新品种彥梗软玉 1 号产量和品质性状的影响 [D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2019.
- [30] 王 猛. 镁肥对水稻产量和品质的影响 [J]. 农民致富之友, 2016(5):57.
- [31] 宋 泽. 肥料配施对盐碱地水稻产量品质的影响研究 [D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2016.
- [32] 钱永德. 氮镁肥对水稻产量和品质的影响研究 [D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2012.
- [33] 聂 录,林玉萍,张少波. 镁肥对水稻产量和品质的影响 [J]. 现代化农业, 2017(6):17-18.
- [34] 刘显爽,王士全,孟维良. 镁肥对水稻米质的影响 [J]. 农民致富之友, 2015(9):82.
- [35] 周立军,李 妮,张玉烛,等. 钙镁硫对优质早稻产量和米质的影响 [J]. 湖南农业科学, 2001(2):21-23.
- [36] 钱永德,郑桂萍,李小蕾,等. 氮镁耦合对梗稻龙梗 20 稻米外观品质和加工品质的影响 [J]. 江苏农业科学, 2013, 41(7):40-44.
- [37] 李 军,邓先亮,朱兴敏,等. 镁锌肥施用时期对优质软米梗稻产量及稻米中 6 种元素吸收的影响 [J]. 中国稻米, 2018, 24(4):57-63.
- [38] 杨文祥,王强盛,王绍华,等. 镁肥对水稻镁吸收与分配及稻米食味品质的影响 [J]. 西北植物学报, 2006(12):2473-2478.
- [39] 杜文琪. 外源镁对镉在稻田系统中生物有效性及转运累积的影响 [D]. 长沙:中南林业科技大学, 2018.
- [40] 郑建峰. 叶面锌肥对水稻旗叶生理及稻米品质的调控研究 [D]. 南京:南京农业大学, 2017.
- [41] MATHPAL B, SRIVASTAVA P C, SHANKHDHAR D, et al. Improving key enzyme activities and quality of rice under various methods of zinc application [J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2015, 21(4):567-572.
- [42] 张凯岳. 锌对水稻碳酸酐酶和光合作用的调节作用研究 [D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- [43] 李 琳,丁 峰,潘介春,等. 植物锌指蛋白转录因子家族研究进展 [J]. 热带农业科学, 2020, 40(2):65-75.
- [44] 刘 建,魏亚凤,徐少安. 几种物质对稻米品质及水稻产量的影响 [J]. 长江大学学报(自然科学版), 2005, 2(5):4-6, 97.
- [45] 黄锦霞,肖 迪,唐湘如. 施锌对香稻产量、香气和品质的影响 [J]. 耕作与栽培, 2010(3):5-7.
- [46] 徐巡军,葛仁山,李 晓,等. 锌肥种类对太湖地区水稻生长和稻米品质的影响 [J]. 化肥工业, 2019, 46(4):54-60.
- [47] LEI S, WANG C C, ASHRAF U, et al. Exogenous application of mixed micro-nutrients improves yield, quality, and 2-AP content in fragrant rice [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2015, 15(3):1097-1109.
- [48] MO Z W, HUANG J X, XIAO D, et al. Supplementation of 2-Ap,

- Zn and La improves 2-Acetyl-1-Pyrroline concentrations in detached aromatic rice panicles *in vitro* [J]. PLoS One, 2016, 11 (2):e0149523.
- [49] LUO H W, DU B, HE L X, et al. Exogenous application of zinc (Zn) at the heading stage regulates 2-acetyl-1-pyrroline (2-AP) biosynthesis in different fragrant rice genotypes[J]. Scientific Reports, 2019(9):19513.
- [50] FAHAD S, HUSSAIN S, KHAN F, et al. Effects of tire rubber ash and zinc sulfate on crop productivity and cadmium accumulation in five rice cultivars under field conditions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015(22):12424-12434.
- [51] 张莉萍,王安东,陈少龙. 硅镁锌肥配施对水稻产量及品质的影响[J]. 农业科技通讯, 2008(5):51-52.
- [52] 石孝均,毛知耘,石孝洪. 硅锌镁对水稻营养效应研究[J]. 西南农业大学学报, 1996,19(5):34-37.
- [53] 裘实,卫平洋,魏海燕,等. 穗发芽程度对梗稻稻米品质和蛋白质组分的影响[J]. 江苏农业学报, 2019,35(3):523-530.

(责任编辑:陈海霞)