

水稻锌营养及锌肥高效施用研究进展

叶廷红¹, 张 赓², 李小坤^{1*}

(1. 华中农业大学资源与环境学院 / 农业农村部长江中下游耕地保育重点实验室 / 华中农业大学微量元素研究中心, 湖北 武汉 430070; 2. 全国农业技术推广服务中心, 北京 100026)

摘 要: 水稻是我国主要的粮食作物之一。近年来, 关于锌肥在水稻上的施用已成为水稻研究领域的热点。本文综述了锌在水稻中的营养功能、水稻缺锌及营养诊断和稻田土壤锌含量概况; 总结了锌肥在不同年代、不同地区、不同季型和不同施用方式下的增产效果, 以及施锌对稻米营养品质的影响; 提出了锌肥高效施用方法和技术。

关键词: 水稻; 锌; 产量; 营养品质; 施用技术

锌 (Zn) 是动植物生长发育过程中必需的微量元素之一。在植物中, 锌是许多酶的组成成分, 对蛋白质合成、碳水化合物代谢、细胞分裂、基因表达等过程具有重要作用^[1], 植物缺锌时常常出现植株矮小、生长缓慢。同时, 锌也与人体健康密切相关^[2-3], 缺锌会使人体生长发育迟缓、免疫力低下、生殖功能下降, 产生智力障碍, 甚至出现不孕等一系列疾病^[4]。人体自身不能合成锌元素, 只能通过食物来补充, 当人体每天摄入的锌含量超过 15 mg 时才能满足正常生命活动需求^[5], 因而提高食物中的锌含量至关重要。水稻是世界上半数以上人口的主食, 其产量和品质备受关注, 关于锌肥在水稻上的施用也已成为水稻研究领域的热点^[6-7]。全球约 50% 的谷物产区土壤有效锌缺乏^[8-9], 由土壤缺锌引起的稻米锌含量低又将导致人体缺锌普遍。因此, 了解水稻锌营养, 掌握锌肥高效施用技术对提高水稻产量和籽粒锌含量具有重要意义。本文综述了锌对水稻的作用、水稻施锌效应以及锌肥的施用方法, 提出了锌肥高效施用技术, 并对水稻锌营养研究进行了展望。

1 锌在水稻中的营养功能

锌是许多酶的组成成分和活化剂, 超氧化物

歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (POD) 等酶中都含有锌^[10], 施锌后水稻根、叶中 SOD 活性比不施锌增加 243.48%、172.77%, POD 活性比不施锌增加 43.60% 和 75.35%^[11], 有利于增强细胞的清氧能力, 保证细胞免受活性氧的破坏, 促进水稻生长^[12]。锌与蛋白质代谢密切相关, 缺锌时蛋白质合成受阻; 研究证明, 稻株缺锌导致核糖核酸酶活性提高, 核糖核酸降解加快, 蛋白质含量下降^[13]。锌参与了植物体内的生长素代谢, 锌能促进吲哚和丝氨酸合成色氨酸, 而色氨酸是生长素的前身; 缺锌时, 吲哚乙酸合成锐减, 抑制了色氨酸转化为生长素, 植物生长发育缓慢甚至出现停滞状态^[14]。锌会影响植物体内的碳水化合物代谢, 因为锌能增加植物体内叶绿素的含量, 并催化叶绿素的光合反应^[15], 研究表明, 缺锌时, 水稻叶绿素含量会减少 31%, 光合会降低 12%^[16]; 锌也是植物碳酸酐酶 (CA) 的辅因子, 在光合作用过程中, H₂O 和 CO₂ 能在 CA 催化下形成 HCO₃⁻^[17], 同时 CA 也可捕捉光呼吸过程释放的 H₂CO₃, 释放 CO₂, 为光合作用提高底物^[18]。锌能明显影响水稻的生殖生长, 施锌后水稻有效穗增加 10.2%, 穗粒数增加 7.0%^[19]。此外, 锌还能提高植物的抗逆性, 当水稻处于涝、旱、盐、冷等不良环境时, 体内活性氧会增加^[20], 破坏细胞膜透性, 降低植物的抵抗能力, 而锌能维持细胞膜的完整, 避免蛋白质和膜脂被过氧化。

2 稻田土壤锌含量及水稻缺锌诊断

稻田土壤有效锌含量是判断土壤是否缺锌的

收稿日期: 2019-01-05; 录用日期: 2019-03-02

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200401-2); 公益性行业 (农业) 科研专项 (201503123); 湖北省水稻产业农业科技创新行动和中央高校基本科研业务费专项 (2662018YJ026)。

作者简介: 叶廷红 (1995-), 女, 云南普洱人, 硕士研究生, 研究方向为现代施肥技术。E-mail: yth@webmail.hzau.edu.cn。

通讯作者: 李小坤, E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn。

重要指标,当土壤有效锌(DTPA-Zn)含量低于土壤缺锌临界值 0.5 mg/kg 时,植物生长受到抑制^[21]。土壤有效锌含量受到土壤pH值、土壤类型、土壤全锌含量、有机质含量、土壤含水量、土壤温度等因素的影响^[22-23],其中,pH值对土壤有效锌含量的影响最为突出,研究表明,pH值增加一个单位,土壤溶液锌离子浓度会降低 $4\sim 10$ 倍^[24]。一般认为,在pH值 >6.5 的土壤中易缺锌,水稻土pH值大于 7.2 时,水稻易发生缺锌^[25]。不同土壤类型的锌含量有差异,主要是因为其发育母质不同^[21];在低有机质含量、低土壤含水量、低土壤温度条件下,土壤有效锌含量一般较低^[22-23]。此外,注重养分间的协调也是提高锌有效性的重要措施,在一定范围内,土壤锌有效性与土壤全氮、全磷、有机质呈显著正相关关系^[26],但大量施用磷肥或土壤磷含量过高时,会抑制作物对锌的吸收从而导致缺锌^[27]。

水稻是对锌敏感的作物,通常可作为判断土壤有效锌丰缺的指示植物。水稻缺锌常出现在移栽后 $2\sim 4$ 周,表现为僵苗或稻缩苗,具体症状为新叶基部发白,生长缓慢;老叶沿中脉向两侧发褐,严重时褐色斑点^[28];老根变黑,新根不长或生长迟缓;稻株矮小,不发生分蘖或很少分蘖,甚至枯萎死去。

3 水稻施锌效应

3.1 施锌对水稻产量的影响

土壤缺锌会严重制约作物的生长和产量的提升。根据土壤中锌的供给情况和农作物对缺锌的敏感程度,可将锌肥应用效果分为3区:锌肥显效区(有效态锌低于 0.5 mg/kg),农作物常有缺锌症状,锌肥效果显著;锌肥有效区(有效态锌含量 $0.5\sim 1.0\text{ mg/kg}$),农作物潜在缺锌,施锌有效;锌肥可能有效区,土壤有效态锌低于缺锌临界含量,但田间试验少,有待进一步验证^[21]。因此,锌肥施用效果与土壤有效锌含量密切相关^[29],当土壤有效锌含量较高时,锌不是水稻增产的限制因子,锌肥施用对水稻增产效果并不显著,有时可能还会造成毒害^[30]。此外,锌肥施用效果还与施用方式、施用量、施用时期以及不同年代气候、产量水平和农艺措施等有关。

锌肥施用效果受施锌量影响较大^[7, 19, 30-35](图1)。随着锌肥用量增加,水稻增产率上升,但当锌肥用量超过 50 kg/hm^2 时,可能会对水稻造成毒害

而导致减产^[30]。不同施锌条件下,水稻增产率在 $2\%\sim 30\%$ ^[19, 30, 32, 36],变异较大。这主要是因为不同稻区土壤有效锌含量相差较大,导致锌肥效应不同。例如,四川省水稻施锌增产 4.6% ^[37],贵州省增产达 8.4% ^[32],江苏省增产 13.0% ^[30]。锌肥施用效果具有年际效应,由于不同年代下气候、土壤肥力、产量水平、作物品种、农艺措施差异较大,不同年代锌肥施用效果也有差异^[38](图2)。从20世纪70年代到2013年,锌肥基施增产效果从 29.7% 降至 6.0% ,呈现逐年降低的趋势,一方面可能是因为锌肥后效大,前一年施用的锌肥残留导致土壤锌含量提高,锌不再是最小限制因子;其次是耐低锌品种更替。

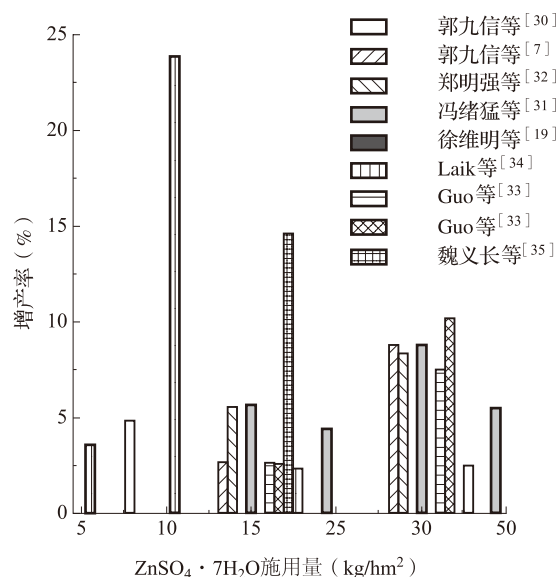


图1 锌肥施用量对水稻增产率的影响

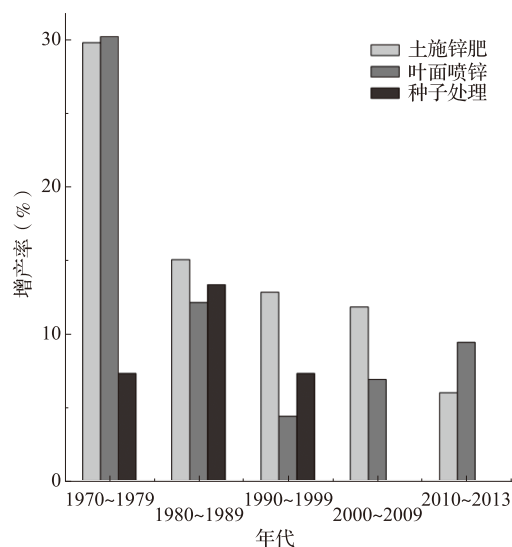


图2 不同年代下施锌增产率^[38]

锌肥施用方式也会影响施肥效果^[7, 33, 37, 39-40] (图3)。锌肥施用方式主要有土施(基施)、叶面喷施、种子处理。与叶面喷施相比,土壤施肥增产效果最佳;土壤施用与叶面喷施相结合也能达到较好的增产效果。此外,施肥对不同季型水稻的增产效果也有差异。根据湖北省126个施肥试验,早、中、晚稻平均增产分别为12.6%、10.8%、8.2%^[41],早稻显著高于晚稻,一般认为是早春气温低,土壤有效锌含量低,早稻施肥效果较显著^[42]。需要注意的是,锌肥利用率不高,第一季水稻锌肥利用率仅为0%~3.5%^[41-42],存在后效,在施肥用量大时尤为明显。因此,锌肥可隔年施用,避免造成作物锌中毒^[35]。

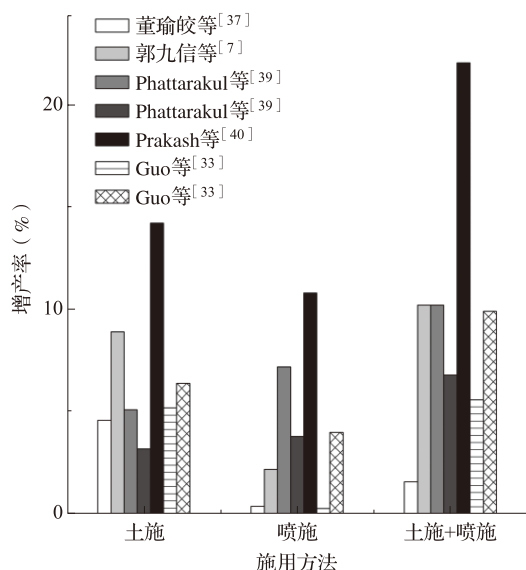


图3 锌肥施用方法对水稻增产率的影响

3.2 施肥对稻米营养品质的影响

水稻是我国主要粮食作物之一,水稻籽粒锌含量一般在8~53 mg/kg^[29, 43-44]。土壤锌含量是导致稻米锌含量差异的主要原因,同一水稻品种生长在不同锌含量土壤上其籽粒锌浓度在8~47 mg/kg^[29]。施肥也会影响稻米籽粒锌含量,施肥量增加,籽粒锌含量提高^[30],但锌肥的不同施用方法对水稻籽粒中锌浓度的贡献率不同^[39, 45](图4),与土施锌肥相比,叶面喷施锌肥使籽粒锌浓度提高幅度更大。叶面喷施锌肥能显著提高籽粒锌含量可能是因为避免了锌被复杂的土壤所固定吸附,同时也减少了植物体锌向籽粒的转运距离,提高了锌肥施用的生物有效性。此外,土施锌肥和叶面喷施相结合也能显著提高稻米锌含量,提高稻米营养品

质^[46],但这种方式成本较高,农民可能难以接受。水稻籽粒锌含量还与锌离子活度密切相关,随锌离子活度下降,水稻籽粒含锌量降低,当锌离子活度为10.3时,碧玉早糯籽粒锌含量最高,锌离子活度超过或低于此值均会降低籽粒锌含量^[47-48],因此,增加环境中的锌离子活度,有利于改善水稻的锌营养,提高水稻籽粒的锌含量。

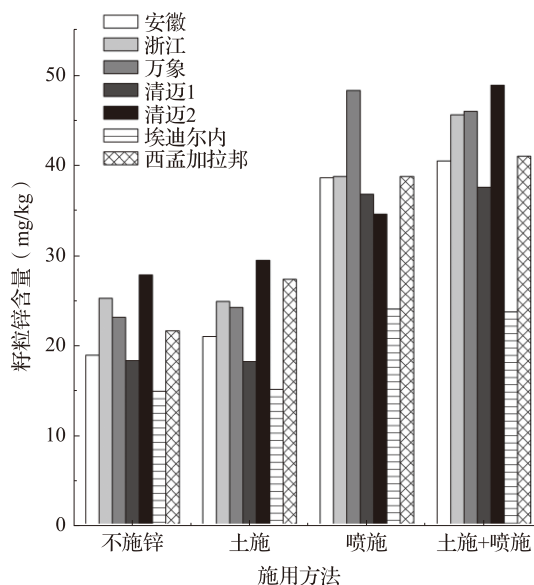


图4 锌肥施用方法对水稻籽粒锌含量的影响^[39, 45]

在追求高锌含量稻米的同时,稻米锌的生物有效性也备受关注^[49-50]。稻米中的植酸含量是影响籽粒锌有效性的主要因素之一^[51-52],植酸含量高的稻米锌的有效性低,因为植酸会与锌形成络合物,影响人体吸收锌^[50]。施肥会影响稻米中植酸含量,研究表明,磷肥施用会提高籽粒植酸含量7%~64%,降低锌的有效性^[52];而锌肥施用可以使水稻籽粒植酸含量降低14.8%~30.4%,也能使米饭中锌的生物有效性提高52%^[45]。此外,锌肥施用还能降低水稻籽粒中重金属的含量,保障粮食安全^[53-54]。锌降低重金属污染可能是因为锌与某些重金属具有相似的原子半径,施肥后通过离子间的拮抗作用来减少水稻对重金属特别是镉的吸收^[53]。但也有研究表明,锌对水稻籽粒镉富集具有多重效应,当土壤镉含量中等或较低时,施肥会增加籽粒镉含量;而镉含量较高时,施肥会降低籽粒镉含量^[55-56]。因此,在镉污染稻区,锌肥施用应协调好锌与镉的关系。

综上,在土壤有效锌含量较低的土壤上,施用锌肥可以满足作物正常生长对锌的需求,从而保证水

稻产量,且土壤施锌增产效果更佳。若要进一步增加籽粒中锌含量,提高稻米品质,可采用叶面喷施锌肥^[57],且在花前1周和花期多次喷施更能提高籽粒锌含量^[58-59]。而要在增加产量的同时增加籽粒中锌含量最有效的方法是土施和叶面喷施相结合^[46]。

4 锌肥在水稻上的施用技术

4.1 锌肥种类

锌肥可分为无机锌和有机锌,无机锌主要包括硫酸锌、氯化锌、氧化锌、碳酸锌等;有机锌是指有机配体形成的络合物或螯合物,如氨基酸锌复合物^[60]、葡萄糖酸锌等。在粮食生产中,通常所用的锌肥是硫酸锌。随着技术的发展和进步,将锌添加到大量元素肥料中使之成为复合肥也逐渐发展起来,例如氮锌复合肥、磷锌复合肥、钾锌复合肥等已应用到农业生产中。此外,含锌的包膜肥料也正在开发,对水稻而言,浓度为1.0%硫酸锌包衣尿素最为经济和实用,能使水稻增产28%,籽粒锌含量增加到35 mg/kg以上^[61]。

4.2 锌肥施用方法

锌肥施用方法包括土壤施用、叶面喷施和种子处理3种。锌肥作为基肥施用时,一般在秧苗移栽前均匀撒施并深翻,可将锌肥与生理酸性肥料混合施用,但不宜与磷肥混施,以免生成水稻难以吸收利用的磷酸锌而降低肥效,也不可碱性肥料一起使用,因为锌在碱性条件下易被固定^[62]。水稻田适宜锌肥用量在15~45 kg/hm²^[31-32, 35],具体根据土壤有效锌情况而定。但当用量超过45 kg/hm²时可能出现锌中毒^[30, 32]。叶面喷施也是锌肥施用的主要方式之一,但一般只作为追肥施用,可在分蘖期、齐穗期连续喷施2~3次为好^[59]。喷施浓度在0.1%~0.5% ZnSO₄·7H₂O之间,一般选择无风的晴天傍晚喷施较好,在有露水的早晨或雨天喷肥,都会降低效果甚至无效。此外,还可采用种子处理的方式,包括浸种、拌种及蘸秧根,浸种和拌种主要是解决秧苗缺锌,蘸秧根主要是为了缓解秧苗移栽后在短期内缺锌,但它们均不能满足水稻后期对锌的需求,且采用种子处理时硫酸锌浓度要控制好,以免对种子造成毒害或伤苗,一般采用0.1%硫酸锌溶液。

4.3 锌肥高效施用技术

水稻施锌具有显著的增产效果,且能改善稻米品质,但应科学合理施肥。水稻施锌肥要掌握以下技术要求:首先,要遵循适量早施的原则。锌肥的施用应采用测土配方施肥技术,根据水稻养分需求

和土壤养分供应情况,适量补充锌肥;因水稻缺锌主要发生在苗期和分蘖期,且营养生长期施锌增产效果较好,因此水稻施锌以早为好。其次,基施和追施相结合,基施时要均匀撒施,注意与其他肥料的配合施用;后期可根据水稻生长情况适当追肥,以叶面喷施为主,从而提高籽粒锌含量。再则,注重养分的相互作用,适量的氮磷肥和有机肥有助于水稻对锌的吸收^[31, 62-64]。但需要注意,锌肥后效稳长,一般2~3年施用一次即可。

5 问题与展望

锌缺乏已成为影响人体健康的重要问题,也是国际 Harvest Plus 计划中最重要的研究目标。水稻施锌可以提高产量和籽粒锌含量,保证粮食安全和提高稻米营养品质,但锌肥在水稻中的施用仍然存在一些问题。首先,由于种植制度的改变、施肥量及水稻产量的提高,过去的土壤有效锌临界指标已不能满足目前的生产需要,而目前关于全国范围内稻田土壤锌营养状况还不明确,难以根据测土结果进行推荐施肥,严重限制了锌肥在水稻上的应用。其次,锌肥的施用方法还存在一定限制。土壤施用锌肥的效果受土壤条件的影响很大,土壤高CaCO₃含量、高pH值、低有机质含量等都会增加锌肥被土壤固定的程度,降低其有效性;而叶面喷施又无法满足根系对锌的需求,增产效果低。因此,如何通过营养调控或栽培措施调控实现施锌提质增产双重效应还有待进一步的研究。再则,水稻植株各部位的锌含量以籽粒最低^[31],难以满足人体对锌的需求,如何通过各种技术增加锌向水稻籽粒中的分配,提高籽粒锌含量,实现水稻籽粒锌的强化还具有较大的发展空间。

参考文献:

- [1] White P J, Broadley M R. Physiological limits to zinc biofortification of edible crops [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2011, 2 (12): 80-91.
- [2] Gibson R S. Zinc deficiency and human health: etiology, health consequences, and future solutions [J]. *Plant Soil*, 2012, 361: 291-299.
- [3] Maret W, Li Y. Coordination dynamics of zinc in proteins [J]. *Chemical Reviews*, 2009, 109 (10): 4682-4707.
- [4] 曹继琼,何长华. 锌缺乏对人体健康的影响 [J]. *现代医药卫生*, 2014, 30 (7): 1016-1019.
- [5] Tapiero H, Tew K D. Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins [J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2003, 57 (9): 399-411.

- [6] 冯绪猛, 郭九信, 王玉雯, 等. 锌肥品种与施用方法对水稻产量和锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1329-1338.
- [7] 郭九信, 廖文强, 孙玉明, 等. 锌肥施用方法对水稻产量及籽粒氮锌含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(2): 185-192.
- [8] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification? [J]. Plant Soil, 2007, 302(1-2): 1-17.
- [9] Cakmak I, Kutman U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review [J]. European Journal of Soil Science, 2017, 69(1): 172-180.
- [10] 陈文荣, 陈雅彬, 陈莉, 等. 缺锌胁迫对水稻叶绿体抗氧化系统的影响[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2014, 37(4): 373-381.
- [11] 徐建明, 李才生, 毛善国, 等. 锌对水稻幼苗生长及体内SOD、POD活性的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(3): 877-878.
- [12] 王晓波, 宋凤斌. 锌对水稻种子萌发的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(2): 119-122.
- [13] 李延, 黄毅斌. 缺锌对水稻蛋白质合成的影响[J]. 福建省农科院学报, 1996, 11(1): 22-24.
- [14] 高质, 林葆, 周卫. 锌素营养对春玉米内源激素与氧自由基代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 424-428.
- [15] 付春霞, 张元珍, 王衍安, 等. 缺锌胁迫对苹果叶片光合速率及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(18): 3826-3833.
- [16] Sasaki H, Hirose T, Watanabe Y, et al. Carbonic anhydrase activity and CO₂-transfer resistance in Zn-deficient rice leaves [J]. Plant Physiology, 1998, 118(3): 929-934.
- [17] 虞银江, 廖海兵, 陈文荣, 等. 水稻吸收、运输锌及其籽粒富集锌的机制[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(3): 365-372.
- [18] 陆景陵, 张福锁, 李春俭, 等. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 95-99.
- [19] 徐维明, 李小坤, 杨运清, 等. 施锌对鄂中地区水稻产量和籽粒锌含量的影响[J]. 中国稻米, 2016, 22(4): 84-85, 87.
- [20] 罗娅, 汤浩茹, 张勇. 低温胁迫对草莓叶片SOD和AsA-GSH循环酶系统的影响[J]. 园艺学报, 2007, 34(6): 1405-1410.
- [21] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37.
- [22] Sadeghzadeh B, Rengel Z. Zinc in soils and crop nutrition [M]// The molecular and physiological basis of nutrient use efficiency in crops. Wiley-Blackwell, 2011. 335-375.
- [23] Noulas C, Tziouvalekas M, Karyotis T. Zinc in soils, water and food crops [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 49: 252-260.
- [24] Curtin D, Smillie G W. Soil solution composition as affected by liming and incubation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1983, 47(4): 701-707.
- [25] 杨清. 我国锌肥应用现状及展望[J]. 土壤肥料, 1988, (6): 22-25.
- [26] 刘合满, 张兴昌, 苏少华. 黄土高原主要土壤锌有效性及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 898-902.
- [27] 黄德明, 徐秋明, 李亚星, 等. 土壤氮、磷营养过剩对微量元素锌、锰、铁、铜有效性及植株中含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 966-970.
- [28] Wissuwa M, Ismail A M, Yanagihara S. Effects of zinc deficiency on rice growth and genetic factors contributing to tolerance [J]. Plant Physiology, 2006, 142(2): 731-741.
- [29] Wissuwa M, Ismail A M, Graham R D. Rice grain zinc concentrations as affected by genotype, native soil-zinc availability, and zinc fertilization [J]. Plant Soil, 2007, 306(1-2): 37-48.
- [30] 郭九信, 隋标, 商庆银, 等. 氮锌互作对水稻产量及籽粒氮、锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1336-1342.
- [31] 冯绪猛, 郭九信, 高丽敏, 等. 氮锌配施对水稻锌的吸收、累积与分配的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(2): 279-287.
- [32] 郑明强, 左明玉. 锌肥不同用量在水稻上的应用效果研究[J]. 园艺与种苗, 2015, (1): 23-25, 29.
- [33] Guo J X, Feng X M, Hu X Y, et al. Effects of soil zinc availability, nitrogen fertilizer rate and zinc fertilizer application method on zinc biofortification of rice [J]. The Journal of Agricultural Science, 2015, 154(4): 584-597.
- [34] Laik R, Singh S K, Kumar V, et al. Zinc fertilization in rice-wheat cropping system under upland calcareous soil [J]. Journal of Plant Nutrition, 2019, 42(5): 1-11.
- [35] 魏义长, 白由路, 杨俐苹, 等. 测土推荐施锌对水稻产量结构及土壤有效养分的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 197-202.
- [36] Farooq M, Ullah A, Rehman A, et al. Application of zinc improves the productivity and biofortification of fine grain aromatic rice grown in dry seeded and puddled transplanted production systems [J]. Field Crops Research, 2018, 216: 53-62.
- [37] 董瑜皎, 袁江, 吕世华. 2个氮水平下不同施锌方式对覆膜水稻产量及锌吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2018, 31(8): 1655-1661.
- [38] 王孝忠, 田娣, 邹春琴. 锌肥不同施用方式及施用量对我国主要粮食作物增产效果的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4): 998-1004.
- [39] Phattarakul N, Rerkasem B, Li L J, et al. Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries [J]. Plant and Soil, 2012, 361: 131-141.
- [40] Prakash P, Hemalatha M, Joseph M. Zinc accounting for lowland rice (*Oryza sativa* L.) under different methods of zinc application with green leaf manuring [J]. Advances in Crop Science and Technology, 2018, 6(3): 374.
- [41] 胡霁堂, 周立祥. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. 105-123.

- [42] 钱金红, 谢振翅. 湖北省主要水稻土供锌特性与施锌效应的研究[J]. 中国农业科学, 1989, 22(6): 59–64.
- [43] Prasad R, Shivay Y S, Kumar D. Agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 125: 55–91.
- [44] 王子腾, 耿元波. 国内外主要粮食作物对施用锌肥响应的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 805–816.
- [45] Saha S, Chakraborty M, Padhan D, et al. Agronomic biofortification of zinc in rice: Influence of cultivars and zinc application methods on grain yield and zinc bioavailability[J]. *Field Crops Research*, 2017, 210: 52–60.
- [46] Tyagi R, Sharma A, Srivastava P C, et al. Modulation of phytic acid and phytic acid–zinc molar ratio by different modes of zinc application in rice[J]. *Indian Journal of Plant Physiology*, 2018, 23(3): 529–535.
- [47] 万吉丽, 王人民, 孟杰, 等. 锌离子活度对水稻产量及籽粒锌含量的影响及基因型差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 605–611.
- [48] 万吉丽, 王人民, 孟杰, 等. 锌离子活度对水稻锌积累与分配的影响[J]. 核农学报, 2010, 24(4): 821–828.
- [49] Hunt J R, Johnson L K, Juliano B O. Bioavailability of zinc from cooked philippine milled, undermilled, and brown rice, as assessed in rats by using growth, bone zinc, and zinc–65 retention[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(18): 5229–5235.
- [50] Liang J, Han B Z, Nout M J R, et al. Effects of soaking, germination and fermentation on phytic acid, total and in vitro soluble zinc in brown rice[J]. *Food Chemistry*, 2008, 110(4): 821–828.
- [51] Kumar A, Lal M K, Kar S S, et al. Bioavailability of iron and zinc as affected by phytic acid content in rice grain[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2017, 41(6): e12413.
- [52] Su D, Zhou L, Zhao Q, et al. Different phosphorus supplies altered the accumulations and quantitative distributions of phytic acid, zinc, and iron in rice (*Oryza sativa* L.) grains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, 66(7): 1601–1611.
- [53] 张良运, 李恋卿, 潘根兴, 等. 磷、锌肥处理对降低污染稻田水稻籽粒 Cd 含量的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 909–913.
- [54] Huang G, Ding C, Zhou Z, et al. A tillering application of zinc fertilizer based on basal stabilization reduces Cd accumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 167: 338–344.
- [55] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(4): 449–458.
- [56] 辜娇峰, 杨文毅, 周航, 等. 外源锌对水稻植株镉的累积差异分析[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 340–345, 351.
- [57] Ram H, Rashid A, Zhang W, et al. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries[J]. *Plant Soil*, 2016, 403(1–2): 389–401.
- [58] 王健波, 林琪, 张洪生, 等. 不同时期施锌对旱稻籽粒锌积累的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010, (2): 45–48.
- [59] Mabesa R L, Impa S M, Grewal D, et al. Contrasting grain–Zn response of biofortification rice (*Oryza sativa* L.) breeding lines to foliar Zn application[J]. *Field Crops Research*, 2013, 149: 223–233.
- [60] 王晨, 刘朝, 马婧, 等. 叶面喷施氨基酸锌复合物对水稻产量性状和锌吸收的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 118–123.
- [61] Shivay Y S, Kumar D, Prasad R, et al. Relative yield and zinc uptake by rice from zinc sulphate and zinc oxide coatings onto urea[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2008, 80(2): 181–188.
- [62] Khoshgoftarmanesh A H, Schulin R, Chaney R L, et al. Micronutrient-efficient genotypes for crop yield and nutritional quality in sustainable agriculture[M] // *Sustainable Agriculture Volume 2*, Springer, 2011. 219–249.
- [63] Singh A P, Sakal R, Singh B P. Relative effectiveness of various types and methods of zinc application on rice and maize crops grown in calcareous soil[J]. *Plant Soil*, 1983, 73(3): 315–322.
- [64] 茹淑华, 张国印, 苏德纯, 等. 禽粪有机肥对土壤锌积累特征及其生物有效性的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(2): 186–191.

Research advance of zinc nutrition and efficient application of zinc fertilizer in rice

YE Ting-hong¹, ZHANG Geng², LI Xiao-kun^{1*} [1. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan Hubei 430070; 2. National Agricultural Technology Extension Service Center, Beijing 100026]

Abstract: Rice is one of the main food crops in China. In recent years, the application of zinc fertilizer on rice has become a hot topic in the field of rice research. This article reviewed the nutritional functions of zinc in rice, zinc deficiency and nutrient diagnosis in rice and zinc content in paddy soil. We summarized the effect of zinc fertilizer on yield increase in different year, regions, different season rice and different application ways. As well as the effect of zinc application on rice nutritional quality. The methods and techniques for efficient application of zinc fertilizer were proposed.

Key words: rice; zinc; yield; nutritional quality; application technique