

陈振玲, 王 锐, 陈 洁, 等. 拔节期喷施纳米锌对水稻产量、品质和籽粒锌含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(6): 961-968.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2024.06.001

拔节期喷施纳米锌对水稻产量、品质和籽粒锌含量的影响

陈振玲, 王 锐, 陈 洁, 浦佳玲, 杨艳菊, 张洪程, 张海鹏

(江苏省作物栽培生理重点实验室/农业农村部长江流域稻作技术创新中心/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州大学水稻产业工程技术研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 针对稻米锌含量普遍较低的现状, 本研究以南粳 9108 为材料, 通过拔节期不同用量 (0 kg/hm^2 、 0.2 kg/hm^2 、 0.4 kg/hm^2 、 0.6 kg/hm^2 、 0.8 kg/hm^2 、 1.0 kg/hm^2) 的纳米锌悬浊液叶面喷施试验, 分析喷施纳米锌对水稻产量、品质及籽粒锌含量的影响。结果表明, 拔节期喷施高剂量 ($0.8\sim 1.0\text{ kg/hm}^2$) 的纳米锌悬浊液可显著提高水稻每穗粒数、结实率和千粒重; 纳米锌施用量为 1.0 kg/hm^2 时, 水稻较不施纳米锌处理 (CK) 增产 3.9%, 效果显著。与 CK 相比, 拔节期喷施 $0.8\sim 1.0\text{ kg/hm}^2$ 纳米锌能显著提高稻米糙米率、精米率和整精米率, 降低稻米垩白粒率和垩白度。施用纳米锌对稻米食味值、崩解值和回复值等存在正向影响, 而对蛋白质含量和直链淀粉含量整体无显著影响。喷施纳米锌能够显著提高水稻籽粒锌含量, 促进锌在可食用部位的富集, 提高锌的生物利用率。因此, 拔节期喷施 $0.8\sim 1.0\text{ kg/hm}^2$ 纳米锌悬浊液有利于提高水稻籽粒锌含量, 实现水稻优质丰产。

关键词: 纳米锌; 水稻产量; 稻米品质; 叶面喷施; 锌生物利用率

中图分类号: S143.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2024)06-0961-08

Effects of foliar spraying of Zn nanoparticles during the jointing stage on rice yield, quality and grain zinc content

CHEN Zhenling, WANG Rui, CHEN Jie, PU Jialing, YANG Yanju, ZHANG Hongcheng, ZHANG Haipeng

(*Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze Valley, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Research Institute of Rice Industrial Engineering Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China*)

Abstract: In view of the current situation of low zinc content in rice, Nanjing 9108 was used as the material in this study. The effects of nano-zinc suspension on rice yield, quality and grain zinc content were analyzed by foliar spraying exper-

收稿日期: 2023-07-15

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2022338); 江苏现代农业产业技术体系建设项目 (JATS2023485); 扬州市“绿扬金凤计划”项目 (YZLYJFJH2021YXBS155); 江苏省大学生创新创业训练计划项目 (202211117128Y)

作者简介: 陈振玲 (2002-), 女, 江苏扬州人, 本科生, 主要从事纳米微肥高效施用技术研究。(E-mail) 1437590108@qq.com

通讯作者: 张海鹏, (E-mail) hpzhang@yzu.edu.cn

iments at jointing stage with different dosages (0 kg/hm^2 , 0.2 kg/hm^2 , 0.4 kg/hm^2 , 0.6 kg/hm^2 , 0.8 kg/hm^2 , 1.0 kg/hm^2). The results showed that spraying high dosages ($0.8\sim 1.0\text{ kg/hm}^2$) of nano-zinc suspension at jointing stage could significantly increase the number of grains per panicle, seed setting rate and 1 000-grain weight of rice. When the application amount of nano-zinc was 1.0 kg/hm^2 , the yield of rice increased by 3.9% compared with no nano-

zinc treatment (CK), and the effect was significant. Compared with CK, spraying 0.8–1.0 kg/hm² nano-zinc at jointing stage could significantly increase brown rice rate, milled rice rate and head rice rate, and could reduce chalky grain rate and chalkiness degree of rice. The application of nano-zinc had positive effects on the taste value, disintegration value and recovery value of rice, but had no significant effect on protein content or amylose content. Spraying nano-zinc can significantly increase the grain zinc content, promote the enrichment of zinc in edible parts, and improve the bioavailability of zinc. Therefore, spraying 0.8–1.0 kg/hm² nano zinc suspension at jointing stage is beneficial for improving the zinc content in rice grains to achieve high quality and high yield of rice.

Key words: zinc nanoparticles; rice yield; rice quality; foliar spraying; zinc bioavailability

锌是维持生命生长发育、免疫生殖功能、细胞间稳定和抗氧化等生理过程的重要基础物质。缺锌常导致人体生长发育迟滞、免疫力降低、患癌风险增加等多种锌缺乏症。与欧美发达国家居民以动物性食物为主食不同,发展中国家居民大多以植物性食物为主食,这往往会导致锌摄入不足的问题。而在常见植物性主食中,稻米锌含量又远低于小麦、玉米、马铃薯等^[1]。作为世界上最重要的口粮作物,水稻是全世界近 2/3 人口的主食^[2]。因此通过生物强化技术提高稻米中锌含量是现阶段解决以缺锌为主要代表的“隐性饥饿”问题的最为经济有效的方法。

施用锌肥是提高稻米中锌含量的有效途径^[3-6], 锌肥的施用还有利于改善稻米品质^[7-8]。Zhang 等^[9]研究发现随着籽粒锌含量的增加,在一定范围内稻米出糙率、出精率、蛋白质与直链淀粉含量也会同步提高,且增施锌肥可以改善稻米口感,增加稻米香气,搭配有机物料混施可以改善稻米蒸煮品质。冯绪猛等^[10-11]和郭九信等^[12]通过对比锌肥蘸根处理、土壤施用处理和叶面喷施处理对水稻籽粒锌含量的提升效果发现,锌肥叶面喷施处理的水稻籽粒锌强化效果要显著优于锌肥土壤施用处理和蘸根处理。而稻米锌有效性不仅与籽粒锌含量有关,与籽粒内植酸含量也存在显著关联,植酸易与籽粒中的游离金属离子螯合形成难溶解盐^[13],常导致锌肥利用率降低,因此植酸与锌的摩尔比也是衡量锌有效性的参考指标。张庆等^[14]和张欣等^[15]研究发现,叶面喷施锌肥后可以有效增加糙米中的锌含量,而对糙米的植酸含量并无显著影响,植酸与锌摩尔比显著下降,锌的生物利用率得到显著提高。然而目前叶面喷施所用锌肥一般为离子态锌,由于离子态锌在叶片上的附着性差,常导致锌利用率低。作为一种新型锌肥,纳米锌具有较高的比表面积(SSA)和表面活性^[16],能够长久滞留在作物叶片上,在提

高稻米锌含量方面,具有广泛的应用前景^[17]。因此,为了探明纳米锌对水稻产量形成、稻米品质以及籽粒锌富集的影响,本研究以水稻南粳 9108 为材料,采用田间小区试验,在水稻拔节期通过不同剂量的纳米锌叶面喷施试验,探讨纳米锌喷施用量对水稻产量和品质及籽粒锌含量与分布的影响,以期水稻丰产优质(富锌)栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试水稻为迟熟中粳水稻品种南粳 9108。试验所用的纳米锌(球状纳米氧化锌,粒径约 50 nm,纯度≥99.99%)购买于上海超威纳米科技有限公司。

称取 1.6 g、3.2 g、4.8 g、6.4 g 和 8.0 g 纳米锌粉末分别溶于 10.0 L 含有 1.2% 吐温 80 (Tween 80)的去离子水中,超声振荡 0.5 h 后得到质量浓度为 0.16 g/L、0.32 g/L、0.48 g/L、0.64 g/L、0.80 g/L 的纳米锌悬浊液。

1.2 试验设计

试验于 2022 年在扬州大学文汇路实验农场进行(32.39°N, 119.42°E)。该农场地处北亚热带湿润气候区,土壤质地为沙壤土,pH 6.92,土壤全氮含量 0.13%,有机质含量 24.4 g/kg,碱解氮含量 103.7 mg/kg,速效磷含量 36.1 mg/kg,速效钾含量 73.3 mg/kg,有效锌含量 2.14 mg/kg。本试验采用毯苗机插塑盘育秧,5 月 19 日播种,每盘播种 120 g,播后 25 d 挑选长势一致的水稻秧苗移栽至 18 个小区。移栽株行距为 12.5 cm×25.0 cm,每穴定植 4 棵苗。小区面积为 80 m²,随机排列。每个小区单独设置进水口与排水口,在小区四周筑垄并用塑料膜包覆。

于水稻拔节期(8 月 3 日)开展不同浓度纳米锌叶面喷施处理。试验设喷施含 1.2% Tween 80 的去

离子水 (CK)、0.2 kg/hm² (T1)、0.4 kg/hm² (T2)、0.6 kg/hm² (T3)、0.8 kg/hm² (T4)、1.0 kg/hm² (T5) 纳米锌悬浊液共 6 个处理。即各小区分别喷施质量浓度为 0 g/L、0.16 g/L (T1)、0.32 g/L (T2)、0.48 g/L (T3)、0.64 g/L (T4)、0.80 g/L (T5) 等纳米锌悬浊液 10 L。每处理重复 3 次。

试验中肥料施用方案如下:各处理施用纯氮 270 kg/hm²,基肥(移栽前)、分蘖肥(移栽后 7 d)和穗肥(倒 4 叶)的比例分别为 30%、30% 和 40%;磷肥(P₂O₅)施用量为 135 kg/hm²,移栽前一次性基施;钾肥(K₂O)施用量为 270 kg/hm²,按基肥、穗肥各 50%施用。其他田间栽培管理措施均参考当地水稻高产栽培方案执行。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 产量结构的测定 水稻成熟期分别在各处理小区随机选取 5 个点,每点取 10 穴,调查水稻穗数;然后按 50 穴的平均穗数每处理选取 5 穴水稻植株调查每穗粒数、结实率以及千粒重。水稻实际产量测定以小区为单位进行,每小区分别收获 3 m² 水稻装入网袋晾晒,脱粒、去杂后,测定稻谷实际含水量,以含水量为 14.5%折算得到稻谷实际产量。

1.3.2 稻米品质的测定 收获的水稻籽粒自然晒干后,采用国家标准《优质稻谷》(GB/T17891-2017)分析稻米加工品质、外观品质。精米中的蛋白质含量和直链淀粉含量使用 Infrared 1241 grain analyzer 近红外快速品质分析仪(瑞典 FOSS TECATOR 公司产品)测定。米饭的外观、口感和食味值使用 STA/A 米饭食味计(日本佐竹公司产品)进行测定。

1.3.3 淀粉黏滞谱(RVA)分析 精米淀粉黏滞谱特征参数采用 Super3 型 RVA 快速黏度分析仪(澳大利亚 Newport Scientific 公司产品)参照 Zhang 等^[9]的方法进行测定。稻米淀粉糊化特性根据美国谷物化学家协会(AACC)规程(1995-61-02)方法进行测定。

1.3.4 锌含量的测定 籽粒、稻壳、糙米、糊粉层与精米分别研磨过筛后,参照 Zhang 等^[9]和郭九信等^[12]的方法测定。

1.3.5 数据分析 使用 Microsoft Excel 2010 软件整理本研究所获取的相关数据,运用 SPSS 软件统计分析数据。

2 结果与分析

2.1 喷施纳米锌对水稻产量的影响

拔节期纳米锌喷施量对水稻产量及产量构成的影响如表 1 所示。从表中可以看出,随着拔节期纳米锌喷施量的增加,虽然穗数没有明显变化,但每穗粒数、结实率、千粒重都有增加趋势,其中,T4、T5 处理的每穗粒数、结实率、千粒重均显著高于 CK。水稻产量亦随拔节期纳米锌喷施量的增加而增加,其中 T5 处理下,产量比 CK 高 3.9%,增产显著。

表 1 喷施纳米锌对水稻产量和产量构成因素的影响

Table 1 Effects of spraying nano-zinc at jointing stage on rice yield and yield components

| 处理 | 穗数 (穗, 1 m ²) | 每穗粒数 (粒) | 结实率 (%) | 千粒重 (g) | 实际产量 (kg/hm ²) |
|----|------------------------------|-------------|------------|------------|-------------------------------|
| CK | 352.1a | 107.82b | 79.95b | 25.48b | 9 473.5b |
| T1 | 352.8a | 115.63ab | 82.09ab | 26.62ab | 9 666.6b |
| T2 | 356.2a | 115.69ab | 82.25ab | 26.86ab | 9 718.5b |
| T3 | 356.4a | 115.74ab | 82.47a | 27.20a | 9 781.4ab |
| T4 | 352.2a | 117.04a | 82.49a | 27.24a | 9 804.5ab |
| T5 | 350.7a | 117.70a | 83.04a | 27.32a | 9 842.7a |

CK 为拔节期喷施去离子水对照,T1、T2、T3、T4、T5 分别为拔节期喷施 0.2 kg/hm²、0.4 kg/hm²、0.6 kg/hm²、0.8 kg/hm²、1.0 kg/hm² 纳米锌处理。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 喷施纳米锌对水稻加工及外观品质的影响

拔节期喷施纳米锌后,稻米的糙米率、精米率和整精米率均比 CK 有不同程度的提升,其中,T4、T5 处理的糙米率、精米率和整精米率显著高于 CK,这表明拔节期喷施高浓度的纳米锌能显著提高水稻加工品质。拔节期喷施纳米锌后,稻米长宽比较 CK 有一定程度的增加,而垩白粒率和垩白度总体呈减少趋势。其中,T4 处理的长宽比比 CK 增加 1.8%,垩白粒率和垩白度分别下降 22.8% 和 27.9%,差异均显著(表 2)。说明拔节期过高的纳米锌喷施量可能会导致稻米外观品质的降低。

2.3 喷施纳米锌对水稻营养与食味品质的影响

随着拔节期纳米锌喷施量的增加,稻米中蛋白质含量和直链淀粉含量总体呈减少趋势,除 T5 处理下稻米直链淀粉含量显著低于 CK 外,其他处理与 CK 均无显著差异(表 3)。拔节期喷施纳米锌后,稻米食味值、外观值、黏度和平衡度均有不同程度的提升,其中,T2~T5 处理的稻米食味值比 CK 显著提高

7.2%~10.4%,T3~T5 处理的外观值比 CK 显著提升10.4%~12.6%,T1~T5 处理的黏度和平衡度分别较 CK 增加12.0%~22.3%和9.5%~15.0%。与 CK

相比,喷施纳米锌处理对稻米硬度均无显著影响。对稻米食味值各项指标分析发现,稻米黏度和平衡度的提升是导致食味值提高的主要原因。

表 2 喷施纳米锌对水稻加工和外观品质的影响

Table 2 Effects of spraying nano-zinc at jointing stage on rice processing and appearance quality

| 处理 | 糙米率(%) | 精米率(%) | 整精米率(%) | 长宽比 | 垩白粒率(%) | 垩白度(%) |
|----|---------|---------|---------|---------|----------|----------|
| CK | 85.23b | 75.55b | 59.27b | 1.679b | 56.81a | 20.42a |
| T1 | 85.48ab | 75.76ab | 60.57ab | 1.695ab | 53.27ab | 18.73ab |
| T2 | 85.56ab | 75.92ab | 60.83ab | 1.705a | 49.47abc | 16.01cd |
| T3 | 85.64ab | 76.12ab | 61.15ab | 1.709a | 47.88bc | 17.97abc |
| T4 | 86.19a | 76.32a | 61.28a | 1.710a | 43.88c | 14.73d |
| T5 | 86.03a | 76.40a | 61.38a | 1.707a | 49.53abc | 16.97bcd |

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

表 3 喷施纳米锌对水稻营养和食味品质的影响

Table 3 Effects of spraying nano-zinc at jointing stage on rice nutrition and eating quality

| 处理 | 蛋白质含量(%) | 直链淀粉含量(%) | 食味值 | 外观值 | 硬度 | 黏度 | 平衡度 |
|----|----------|-----------|---------|--------|--------|--------|-------|
| CK | 7.27a | 12.43a | 73.97b | 7.40b | 6.27ab | 7.50c | 7.33b |
| T1 | 7.30a | 11.98ab | 79.00ab | 7.93ab | 6.03b | 8.40b | 8.03a |
| T2 | 7.17a | 12.19ab | 79.33a | 8.00ab | 6.07b | 8.47ab | 8.10a |
| T3 | 7.10a | 12.38a | 80.67a | 8.17a | 6.00b | 8.63ab | 8.30a |
| T4 | 7.07a | 11.66ab | 81.67a | 8.33a | 5.90b | 8.70ab | 8.43a |
| T5 | 7.07a | 11.21b | 81.33a | 8.23a | 6.80a | 9.17a | 8.30a |

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 喷施纳米锌对水稻 RVA 谱特征值的影响

拔节期喷施纳米锌后,稻米的崩解值比 CK 增加26.8%~32.1%,热浆黏度比 CK 降低11.5%~20.3%,差异显著;T1、T3、T4 处理的峰值黏度与 CK 相比差异不显著,但 T2、T5 处理的峰值黏度分别比

CK 下降 3.9%和 5.5%,差异显著。与 CK 相比,拔节期喷施纳米锌后稻米的最终黏度和消减值均有显著下降,而回复值却增加8.0%~18.3%,其中,T2、T3 和 T5 处理的回复值显著高于 CK(表 4)。

表 4 喷施纳米锌对水稻蒸煮品质的影响

Table 4 Effects of spraying nano-zinc at jointing stage on cooking quality of rice

| 处理 | 峰值黏度(Pa·s) | 热浆黏度(Pa·s) | 崩解值(Pa·s) | 最终黏度(Pa·s) | 消减值(Pa·s) | 回复值(Pa·s) |
|----|------------|------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| CK | 2 708.00ab | 1 937.33a | 770.67b | 2 430.67a | -277.33a | 493.33b |
| T1 | 2 683.33ab | 1 706.33b | 977.00a | 2 239.33b | -444.00b | 533.00ab |
| T2 | 2 602.67c | 1 604.33bc | 998.33a | 2 168.00bc | -434.67b | 563.67a |
| T3 | 2 661.33b | 1 652.00bc | 1 009.33a | 2 235.67bc | -425.67b | 583.67a |
| T4 | 2 732.67a | 1 714.33b | 1 018.33a | 2 259.33b | -473.33b | 545.00ab |
| T5 | 2 559.67c | 1 544.00c | 1 015.67a | 2 118.67c | -441.00b | 574.67a |

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

2.5 喷施纳米锌对稻米锌含量和分布的影响

拔节期喷施纳米锌能有效提高水稻籽粒锌积累量、籽粒和籽粒各组成部分的锌含量(表5)。在拔节期喷施纳米锌(T1~T5)处理下,籽粒锌含量比CK增加31.6%~62.7%,籽粒锌积累量较CK提升39.9%~75.9%。在籽粒各组成部分锌含量变化方面,拔节期喷施纳米锌处理下,稻壳锌含量比CK提

高3.8%~37.3%,其中,T2~T5处理的稻壳锌含量均显著高于CK;糙米锌含量比CK增加45.2%~80.8%,米糠锌含量比CK增加62.2%~108.4%,精米锌含量比CK增加47.9%~82.9%。此外,精米、米糠与糙米中锌含量随着纳米锌喷施用量的增加呈现先增加后减少的趋势,T4处理最高。

表5 喷施纳米锌对水稻籽粒中锌元素含量的影响

Table 5 Effects of spraying nano-zinc at jointing stage on zinc content in rice grains

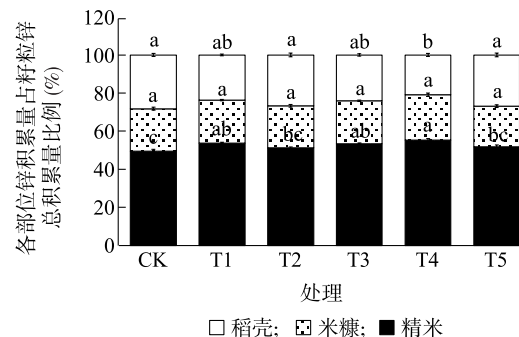
| 处理 | 锌含量 (mg/kg) | | | | | 籽粒锌积累量 (g/hm ²) |
|----|-------------|---------|---------|---------|---------|--------------------------------|
| | 精米 | 米糠 | 糙米 | 稻壳 | 籽粒 | |
| CK | 11.06d | 32.56d | 14.19d | 36.82c | 17.54e | 168.07e |
| T1 | 16.36c | 52.80c | 20.60c | 38.21c | 23.09d | 235.10d |
| T2 | 17.09c | 59.30c | 21.73c | 46.73ab | 25.37c | 259.51c |
| T3 | 18.71b | 61.34b | 23.64b | 44.69b | 26.69bc | 274.57bc |
| T4 | 20.23a | 67.87a | 25.66a | 44.77b | 27.94ab | 288.12ab |
| T5 | 19.34ab | 62.20ab | 24.16ab | 50.56a | 28.54a | 295.57a |

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见表1注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

从籽粒各部位锌占比可以发现,与CK相比,拔节期喷施纳米锌能提高精米锌积累量占籽粒锌总积累量的比例,降低稻壳锌积累量占籽粒锌总积累量的比例(图1)。T4处理的稻壳锌积累量占籽粒锌总积累量的比例较CK显著下降26.0%,糙米(米糠+精米)锌积累量占籽粒锌总积累量的比例显著上升10.2%。随着喷施纳米锌用量的增加,精米锌积累量占籽粒锌总积累量的比例均有不同程度的提升,T1、T3和T4处理的精米锌积累量占籽粒锌总积累量的比例分别较CK显著提升8.4%、7.8%和11.5%,其余处理精米锌积累量占籽粒锌总积累量的比例较CK虽有提升,但提升效果未达显著水平。纳米锌对米糠中的锌积累量占籽粒锌总积累量的比例影响不显著。

2.6 喷施纳米锌对水稻糙米内植酸含量的影响

随着拔节期纳米锌喷施量的增加,糙米植酸含量得到了显著提升,T2~T5处理的糙米植酸含量比CK提升2.1%~3.8%;而米糠与精米的植酸含量与CK无显著差异。而随着拔节期纳米锌喷施量的增加,糙米和精米的植酸与锌摩尔比呈现先明显减少后略增的趋势。T4处理下,糙米和精米的植酸与锌摩尔比均最低。拔节期喷施纳米锌处理下,糙米的植酸与锌摩尔比较CK显著降低30.8%~42.7%,精



CK、T1、T2、T3、T4、T5 见表1注。不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

图1 喷施纳米锌对水稻籽粒中锌分布的影响

Fig.1 Effects of spraying nano-zinc at jointing stage on zinc distribution in rice grains

米的植酸与锌摩尔比较CK显著下降32.1%~44.0%(表6)。

3 讨论

3.1 喷施纳米锌用量对水稻产量和稻米品质的影响

水稻剑叶是抽穗灌浆期进行同化作用的关键器官,也是籽粒灌浆充实的“源”。在水稻生长的中后期,叶面喷施锌肥可以显著提高籽粒灌浆的充实程

表 6 喷施纳米锌对稻米植酸含量及植酸与锌摩尔比值的影响

Table 6 Effects of spraying nano-zinc on phytic acid content and molar ratio of phytic acid to zinc in rice

| 处理 | 植酸含量 (mg/kg) | | | 植酸与锌摩尔比 | |
|----|--------------|------------|-----------|---------|---------|
| | 糙米 | 米糠 | 精米 | 糙米 | 精米 |
| CK | 10 239.91c | 79 741.02a | 1 341.17a | 71.48a | 12.01a |
| T1 | 10 282.14c | 79 966.18a | 1 347.38a | 49.44b | 8.16b |
| T2 | 10 454.79b | 82 104.83a | 1 356.44a | 47.66b | 7.86bc |
| T3 | 10 519.77ab | 83 826.28a | 1 361.57a | 44.08c | 7.21bcd |
| T4 | 10 616.42ab | 82 513.71a | 1 371.92a | 40.98c | 6.72d |
| T5 | 10 630.79a | 82 892.34a | 1 391.37a | 43.59c | 7.13cd |

CK、T1、T2、T3、T4、T5 见表 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

度,从而通过提高水稻籽粒的千粒重和结实率来增产^[18-19]。在本研究中,拔节期喷施纳米锌在提高水稻千粒重和结实率的基础上,对水稻每穗粒数也存在正向影响,但仅在较高纳米锌施用量处理下每穗粒数和水稻产量的提升达显著水平。张军等^[20]研究发现,穗数和穗粒数是影响水稻产量的关键因素。本研究在拔节期喷施纳米锌,并未影响到水稻前期生长,对单位面积有效穗数并无显著影响。但前人研究发现,锌影响着植株体内精氨酸、甘氨酸和色氨酸等氨基酸的合成,对植物胚胎和颖花生长发育起着重要作用,适量增施锌肥能够促进小花分化,增加每穗粒数^[21-23]。在作物生长中后期养分运输过程中,存在一定用量范围内的“氮锌互促”作用。锌作为叶绿素的重要组成部分和调控因子,能够显著影响水稻生育中后期的叶片光合作用,适量提高植株叶片中锌含量有利于籽粒中氮的积累^[24-25],促进光合产物由叶片向籽粒转运,提高籽粒饱满程度,增加实粒数。

适量增施锌肥也有利于改善稻米的品质^[26]。在本研究中,喷施纳米锌后稻米加工品质指标(糙米率、精米率和整精米率)都得到了提高。其主要原因是喷施纳米锌能刺激水稻叶片中叶绿素的合成,提高叶片光合能力,促进水稻中后期光合产物的积累,在充实籽粒的同时提高稻米的加工品质^[27-28]。本研究中喷施纳米锌还能提高稻米的长宽比,降低稻米的垩白粒率和垩白度。于波等^[24]和甘万祥等^[25]研究发现,喷施锌肥可提高剑叶叶绿素含量,增强其光合能力,并促进叶片中的光合同化物向籽粒中转运,籽粒同化物充实程度提高,因而稻米外观品质得到改善。

以往的研究结果表明,施用锌肥能够有效提高

稻米中的蛋白质和直链淀粉含量,而本研究中施纳米锌处理稻米中的蛋白质含量总体呈减少趋势,这可能与糙米和米糠中植酸含量相关。原因可能是喷施纳米锌能提升糙米和米糠的植酸含量,最终造成精米蛋白质含量的下降。李俊丽等^[29]和冯绪猛等^[11]研究发现,氮锌配施能够提高植株对氮素的吸收效率,而植株氮素积累量的增加则能提高灌浆期氮代谢强度,抑制碳代谢,阻碍直链淀粉的合成^[30]。在本研究中,喷施纳米锌处理能提高稻米黏度和平衡度,进而显著增加稻米食味值。低直链淀粉含量和低蛋白质含量的稻米黏度较好,适口性较好。喷施纳米锌后稻米蛋白质含量和直链淀粉含量均有不同程度的下降,有利于米饭的吸水膨胀,提高米饭黏性从而提升稻米口感。

3.2 喷施纳米锌用量对水稻籽粒锌含量、分布和积累的影响

王孝忠等^[31]研究发现叶面喷施锌肥虽能有效增加水稻籽粒锌含量,但锌在水稻籽粒中的分布并不均衡;籽粒中积累的锌主要集中在谷壳和米糠中,糙米中胚和糊粉层中锌含量较高,而胚乳中较低。本研究认为,随着拔节期纳米锌喷施量的增加,稻壳、米糠和精米等籽粒部位的锌含量均有所上升,但米糠中锌占比变化不大,稻壳中锌占比有所降低,精米中锌占比有所增加。这一方面是米糠和精米中的锌含量提升幅度要大于稻壳,另一方面则是由于喷施纳米锌能够显著提升糙米率和精米率,从而导致籽粒中稻壳占比下降。

锌元素转运至胚乳的过程中易被糊粉层中的植酸螯合形成人体难以利用的锌盐,因此,在评估锌的有效性时,通常会将植酸与锌的摩尔比作为一个重要的评价标准^[32]。王慧等^[33]研究结果表明,植酸

主要存在于米糠之中,显著影响着锌由糊粉层向精米中的转移。本试验结果表明,拔节期喷施纳米锌可显著降低水稻糙米和精米中的植酸与锌摩尔比,显著提升锌的生物利用率。其原因在于喷施纳米锌后,糙米和精米中植酸的增加幅度远低于锌含量的增加幅度,进而导致糙米和精米中植酸与锌摩尔比的下降^[30-31],从而提升纳米锌肥的利用率和生物有效性。

4 结 论

拔节期适量喷施纳米锌肥可以提高水稻每穗粒数、结实率与千粒重,降低稻米垩白粒率、垩白度和直链淀粉含量,提升稻米精米率、糙米率、整精米率及食味值,增加籽粒锌含量和积累量,降低糙米和精米的植酸与锌摩尔比,提升糙米和精米中锌的生物有效性。拔节期喷施0.8~1.0 kg/hm²纳米锌有利于实现水稻的优质丰产和提高籽粒各组成部分的锌含量。

参考文献:

- [1] WELCH R M, GRAHAM R D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(396):353-364.
- [2] MARTIN S J, MAZDAI G, STRAIN J J, et al. Programmed cell death (apoptosis) in lymphoid and myeloid cell lines during zinc deficiency[J]. *Clinical and Experimental Immunology*, 2010, 83(2):338-343.
- [3] CAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1):172-180.
- [4] REHMAN A, FAROOQ M, OZTURK L, et al. Zinc nutrition in wheat-based cropping systems[J]. *Plant and Soil*, 2018, 422(1/2):283-315.
- [5] GARCIA-OLIVEIRA A L, CHANDER S, ORTIZ R, et al. Genetic basis and breeding perspectives of grain iron and zinc enrichment in cereals[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9:937.
- [6] FITZGERALD M A, MCCOUCH S R, HALL R D. Not just a grain of rice: the quest for quality[J]. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(3):133-139.
- [7] LIANG J, HAN B Z, HAN L, et al. Iron, zinc and phytic acid content of selected rice varieties from China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2007, 87:504-510.
- [8] WANG Y, XUE Y, LI J. Towards molecular breeding and improvement of rice in China[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10:610-614.
- [9] ZHANG H, WANG R, CHEN Z, et al. The effect of zinc oxide nanoparticles for enhancing rice (*Oryza sativa* L.) yield and quality[J]. *Agriculture*, 2021, 11(12):1247.
- [10] 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.
- [11] 冯绪猛,郭九信,高丽敏. 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.
- [12] 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, 18(6):1336-1342.
- [13] 王 锐. 纳米锌施用方式和用量对优质食味梗稻南梗 9108 产量和品质强化的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2022.
- [14] 张 庆,王 娟,景立权,等. 叶面施用不同形态锌化合物对稻米锌用量及有效性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(6):610-618.
- [15] 张 欣,户少武,章燕柳,等. 叶面施锌对不同水稻品种稻米锌营养的影响及其机理[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(7):1450-1458.
- [16] 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.
- [17] DUBEY A N, CHATTOPADHYAYA N, MANDAL N. Variation in soil microbial population and soil enzymatic activities under zincated nanoclay polymer composites (ZNCPCs), nano-ZnO and Zn solubilizers in rice rhizosphere [J]. *Agricultural Research*, 2021, 10:21-31.
- [18] 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.
- [19] 李燕婷,李秀英,肖 艳,等. 叶面肥的营养机理及应用研究进展[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1):162-172.
- [20] 张 军,周冬冬,许 轲,等. 淮北地区麦茬机插优质食味梗稻氮肥减量的精准运筹[J]. *作物学报*, 2022, 48(6):410-422.
- [21] SANGDUEN N, KLAMSOMBOON P. Arginine enhancement of cell dissociation in suspension-cultured of aromatic rice cells (*Oryza sativa* L.) var Khao Dawk Mali 105 [J]. *Kasetsart Journal-Natural Science*, 2002, 36:353-360.
- [22] MANO Y, NEMOTO K. The pathway of auxin biosynthesis in plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63:2853-2872.
- [23] CHENG Y, DAI X, ZHAO Y. Auxin biosynthesis by the YUCCA flavin monooxygenases controls the formation of floral organs and vascular tissues in *Arabidopsis*[J]. *Genes and Development*, 2006, 20:1790-1799.
- [24] 于 波,秦嗣军,吕德国. 锌对苹果果实膨大期叶片¹³C 光合产物合成及向果实转移分配的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(6):2007-2013.
- [25] 甘万祥,高 巍,刘红恩,等. 锌肥施用量及方式对夏玉米籽粒淀粉含量和产量的影响 [J]. *华北农学报*, 2014, 29(6):202-207.
- [26] MI K, YUAN X, WANG Q, et al. Zinc oxide nanoparticles enhanced rice yield, quality, and zinc content of edible grain fraction

- synergistically[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1196201.
- [27] 姜秀英,王 铮,刘 军,等.水稻灌浆期群体光合速率的特性及其与稻米品质的关系[J]. *辽宁农业科学*, 2007(4): 10-12.
- [28] 殷春渊,王书玉,刘贺梅,等.水稻食味品质性状间相关性分析及其与叶片光合作用的关系[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(4): 119-127.
- [29] 李俊丽,钱 干,李海星,等.氮锌配施对水稻生长、产量和养分吸收分配的影响[J]. *华中农业大学学报*, 2021, 40(3): 1-9.
- [30] WEI H Y, CHEN Z F, XING Z P, et al. Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(10): 2222-2234.
- [31] 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.
- [32] WANG R, MI K, YUAN X, et al. Zinc oxide nanoparticles foliar application effectively enhanced zinc and aroma content in Rice (*Oryza sativa* L.) grains[J]. *Rice*, 2023, 16: 36.
- [33] 王 慧,李茂柏,张建明,等. 水稻籽粒不同部位植酸含量及其与稻米品质的相关[J]. *中国水稻科学*, 2009, 23(2): 215-218.

(责任编辑:石春林)