

水稻花后叶面锌和尿素配施对稻米锌营养的影响

陈晨, 张欣, 户少武, 顾珈名, 童楷程, 陈旺, 景立权, 王云霞, 杨连新

引用本文:

陈晨, 张欣, 户少武, 顾珈名, 童楷程, 陈旺, 景立权, 王云霞, 杨连新. 水稻花后叶面锌和尿素配施对稻米锌营养的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1636–1646.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1461>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面施锌对不同水稻品种稻米锌营养的影响及其机理

张欣, 户少武, 章燕柳, 牛玺朝, 邵在胜, 杨阳, 童楷程, 王云霞, 杨连新

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1450–1458 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1256>

高CO₂浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响

杨阳, 户少武, 牛玺朝, 童楷程, 陈晨, 杨连新, 王云霞

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 436–444 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0899>

叶面喷施不同浓度锌对水稻锌镉积累的影响

吕光辉, 许超, 王辉, 帅红, 王帅, 李佰重, 朱奇宏, 朱捍华, 黄道友

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1521–1528 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0709>

臭氧浓度升高和叶面施锌对小麦籽粒产量、锌浓度及有效性的影响

张庆, 贾一磊, 杨连新, 王余龙, 王云霞

农业环境科学学报. 2019, 38(4): 728–736 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1043>

叶面施锌对油菜镉锌生物可给性与形态的影响

陶雪莹, 徐应明, 王林, 刘畅, 孙约兵, 梁学峰

农业环境科学学报. 2022, 41(4): 735–745 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1123>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈晨, 张欣, 户少武, 等. 水稻花后叶面锌和尿素配施对稻米锌营养的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1636–1646.

CHEN C, ZHANG X, HU S W, et al. Effects of the post-anthesis foliar application of zinc and urea on zinc nutrition of rice grains[J].

Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(8): 1636–1646.



开放科学 OSID

水稻花后叶面锌和尿素配施对稻米锌营养的影响

陈晨¹, 张欣¹, 户少武¹, 顾珈名¹, 童楷程², 陈旺², 景立权¹, 王云霞^{2*}, 杨连新^{1*}

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心, 扬州大学, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘 要:为研究水稻花后单独叶面施锌及配施尿素对不同品种糙米和精米锌含量及生物有效性的影响及其原因,以11个种子锌含量不同的水稻品种为试验材料,于开花期、花后6 d和12 d叶面分别喷施0.5% ZnSO₄(ZnSO₄)和0.5% ZnSO₄+1% 尿素(ZnSO₄-Urea),同期喷施等量清水作为对照,测定各品种成熟期糙米和精米的锌营养指标及花后剑叶气孔相关性状。结果表明:与精米相比,糙米的锌含量、植酸含量和植酸与锌摩尔比平均分别极显著增加31%、222%和151%。ZnSO₄、ZnSO₄-Urea处理使糙米锌含量较对照分别极显著增加28.2%和31.5%,精米锌含量分别极显著增加22.2%和27.6%。ZnSO₄、ZnSO₄-Urea处理对糙米、精米植酸含量均没有影响,但植酸与锌摩尔比均极显著降低,其中糙米两处理下均降低24.3%,精米则分别降低17.2%、20.3%。锌处理与品种或部位的互作对稻米锌含量有极显著影响,锌处理与部位的互作对植酸与锌摩尔比亦有极显著影响。相关分析表明,糙米及精米锌含量在叶面施锌后的增幅与开花期气孔导度均呈极显著正相关,而与稻米本身的锌含量呈显著负相关。由此可知,花后叶面施锌处理使稻米锌营养水平明显增加,增幅总体表现为籼稻大于粳稻,糙米大于精米,叶面锌肥与尿素配施效果更好;水稻种子锌水平低及其叶片气孔导度大均有利于叶面锌肥的吸收。

关键词:水稻; 锌含量; 锌有效性; 气孔导度; 叶片结构特征

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2022)08-1636-11 doi:10.11654/jaes.2021-1461

Effects of the post-anthesis foliar application of zinc and urea on zinc nutrition of rice grains

CHEN Chen¹, ZHANG Xin¹, HU Shaowu¹, GU Jiaming¹, TONG Kaicheng², CHEN Wang², JING Liquan¹, WANG Yunxia^{2*}, YANG Lianxin^{1*}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Province Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of foliar zinc application alone or combination with urea on zinc concentration and bioavailability in brown and milled rice of different rice cultivars, and to explore the physiological mechanisms for genotypic differences in grain zinc nutrient enhancement. Eleven rice cultivars with different seed zinc concentrations were subjected to two foliar zinc fertilizer treatments: 0.5% ZnSO₄ alone (ZnSO₄) or 0.5% ZnSO₄ plus 1% urea (ZnSO₄-Urea). For each foliar zinc treatment, zinc fertilizer was sprayed three times: at anthesis and 6 days and 12 days after anthesis, and water was sprayed at the same time as the control. The stomatal characteristics of flag leaves of each rice cultivar were determined after anthesis. Grain zinc nutritional indexes of brown and milled rice were measured at plant maturity. The averages across all rice cultivars and foliar zinc applications for grain zinc concentration, phytic acid concentration, and molar ratio of phytic acid to zinc of brown rice were significantly higher than those of milled rice by 31%, 222%, and 151%, respectively. Compared with the foliar spray of water, foliar spray of ZnSO₄ and ZnSO₄-Urea significantly increased the zinc concentrations of brown rice by 28.2% and 31.5%, and those of milled rice by 22.2% and 27.6%, respectively. In contrast, foliar ZnSO₄ and

收稿日期: 2021-12-19 录用日期: 2022-03-29

作者简介: 陈晨(1995—), 男, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 从事水稻微量元素生物强化研究。E-mail: 2293138897@qq.com

*通信作者: 杨连新 E-mail: lxyang@yzu.edu.cn; 王云霞 E-mail: yxwang@yzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31671618, 31101101); 江苏高校优势学科建设工程项目

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31671618, 31101101); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

ZnSO₄-Urea treatments had no significant effect on grain phytic acid concentrations for both brown and milled rice, but the molar ratio of phytic acid to zinc decreased significantly, in which the ratio decreased by 24.3% for both ZnSO₄ and ZnSO₄-Urea treatments in brown rice, whereas in milled rice, it decreased by 17.2% with ZnSO₄ treatment and by 20.3% with ZnSO₄-Urea treatment. Significant zinc treatment by rice cultivar interactions ($P<0.01$) were detected in zinc concentration of rice, and significant interactions ($P<0.01$) between zinc treatment and grain were detected in the zinc concentration of rice and molar ratio of phytic acid to zinc. The increases in zinc concentration in brown and milled rice by foliar zinc application was positively correlated ($P<0.01$) with leaf stomatal conductance at anthesis, but negatively correlated ($P<0.05$) with seed zinc concentration of rice cultivars. Thus, the zinc nutrient levels of rice grains were significantly enhanced by foliar zinc application after anthesis, and the increases were greater in brown rice than those in milled rice. Indica rice were generally more responsive to foliar zinc application than japonica rice. ZnSO₄ in combination with urea was more effective than ZnSO₄ alone in rice grain zinc nutrient enhancement. Biofortification through foliar zinc fertilizer is relatively simple in rice cultivars characterized with low seed zinc level and high leaf stomatal conductance.

Keywords: rice; zinc concentration; zinc availability; stomatal conductance; leaf structural characteristic

锌是人体必需且较易缺乏的微量元素,缺锌可能会使身体发育异常,导致慢性疾病发生,进而危害全球30多亿人口的健康^[1-2]。人体锌营养主要从食物中摄取^[3]。大部分人群的膳食构成以谷类为主,而谷粒中的锌含量较低,人体对锌吸收利用不足会引起锌营养的缺乏^[4]。近20年数据表明,随着空气中CO₂浓度持续升高,谷粒中本已较低的锌含量进一步下降,有关人类缺锌的健康问题日益严重^[5-8]。因此,探明如何有效增加稻米的锌营养水平是当前和未来必须面对的重要科学问题。目前,生物强化可有效提高稻米锌含量,增强锌生物有效性,是最具可持续发展的方法。从短期看,锌肥施用作为一种潜力较高的生物强化手段,主要包括土壤施锌和叶面施锌两种。与土壤施锌相比,叶面施锌因具有需肥少、吸收快、对环境友好、肥效高等优点而被公认为是一种便捷、速效的锌生物强化手段,能促进锌向籽粒转移,有效改善籽粒锌营养状况^[3,7-11]。

谷粒的锌生物有效性与植酸含量特别是植酸与锌摩尔比密切相关,且谷粒的锌营养水平由其和锌含量决定^[4,7-8,12]。面对人类锌缺乏的严重性,近年来学者们进行了大量叶面锌肥对稻米锌含量影响的研究^[7-8,13-16],但很少同时研究与之相关的锌生物有效性,且研究对象多以一个^[17-18]或少数几个^[7,19]品种为主,局限性较大。糙米加工成精米会导致锌等微量元素的含量锐减^[20],因此如何提高精米部位的锌含量显得更为重要。目前,稻米锌营养的研究主要针对糙米部位^[7],而比较叶面施锌对糙米和精米锌营养影响差异的研究报道很少^[11,21-22]。已有少量研究表明,花后叶面施锌对糙米锌营养的影响总体大于精米^[8,17,22]。前期有研究表明,含氮有机物能促进小麦锌营养富集^[23-24],但也有研究得到不同的结果^[25-26]。

因此,氮、锌配合喷施对籽粒的富锌效果如何,仍需进一步的研究。此外,氮、锌叶面配施对籽粒锌营养的影响研究多集中于小麦,对水稻尚无相关报道。对于锌肥中添加尿素叶面喷施是否能促进籽粒的富锌效果是本试验的研究重点。

相关研究表明,水稻籽粒锌含量在叶面施锌后具有明显的品种差异,但叶面施锌效率高的品种特征报道较少^[7-8]。本课题组前期研究了6个品种稻米锌含量对叶面施锌的响应,结果表明种子锌水平低、抽穗期叶片气孔导度大的水稻品种锌肥吸收效率更高,但该研究只观察了糙米部位^[7],精米部位是否有相同趋势尚待验证,同时锌处理较为单一。因此本研究在前人试验基础上,于开花期、花后6 d和12 d对11个不同锌含量供试水稻品种进行叶面喷施0.5% ZnSO₄、0.5% ZnSO₄+1% 尿素,测定水稻糙米和精米部位的锌元素含量、植酸含量、植酸与锌摩尔比,同时观察水稻花后剑叶的气孔特性。通过对这些指标的测定,比较糙米和精米的部位差异,探讨氮、锌配施对水稻籽粒锌营养的影响以及明确叶面吸肥效率与气孔特性的关系,为稻作生产上通过氮、锌配施增强锌生物有效性提供依据,为叶面锌肥吸收机制提供理论基础。主要研究假设:①花后叶面施锌对稻米锌营养的影响存在品种依赖,本身锌水平低且叶片气孔导度大的品种叶面吸锌效率更高;②相比于精米,花后叶面施锌对糙米锌营养的影响更大;③与单独叶面施锌相比,氮肥与锌肥配合喷施有利于增强稻米的锌营养水平。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验地点位于扬州大学农学院,以土培池培育水

稻,土壤为灰潮土,背景值见文献[7]。本试验以清水为对照(CK);0.5% ZnSO_4 (0.5% 为溶液中 ZnSO_4 浓度,用量为 $800 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,并加入 $100 \mu\text{L}$ Tween-20 促进叶面浸润)和 0.5% ZnSO_4 +1% 尿素(ZnSO_4 -Urea)为施锌处理,叶面喷施。每个处理重复3次。从水稻抽穗期开始第一次喷锌处理,共3次,每次间隔6 d;整个喷锌处理水稻处于籽粒灌浆初期。喷施时用挡板将各处理植株隔开,防止污染^[7]。

1.2 材料培育

试验材料为11个大田生产上广泛种植的高产优质水稻品种,包括常规籼稻、常规粳稻和杂交稻。分别为淮稻5号(HD5,常规粳稻)、南粳46(NJ46,常规粳稻)、南粳5055(NJ5055,常规粳稻)、武运粳27(WYJ27,常规粳稻)、扬稻6号(YD6,常规籼稻)、中早39(ZZ39,常规籼稻)、桂农占(GNZ,常规籼稻)、丰优香占(FYXZ,籼型三系杂交稻)、深两优136(SLY136,籼型两系杂交稻)、隆两优1988(LLY1988,籼型两系杂交稻)和甬优1540(YY1540,籼粳杂交稻,偏粳)。大田早育秧,于5月18日播种,一个月后移栽。株行距分别为18、20 cm,粳稻1穴2株,其他品种1穴1株。水稻生长过程中共施氮 $22.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,基肥于6月中旬施用,间隔10 d施用分蘖肥,再间隔1个月施用穗肥,施氮量分别占40%、30%和30%。磷、钾肥为复合肥(有效成分 N: P_2O_5 : K_2O =15%: 15%: 15%),均作基肥施用,施用量为 P_2O_5 $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 K_2O $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。水分管理:6月19日至8月1日保持浅水层,之后干湿交替(自然落干后保持3 d,灌水1 d,放干水保持4 d,灌水1 d,如此4 d无水层1 d浅水层循环至收获),控水搁田。

1.3 测定指标

水稻产量的测定:成熟期,每处理选取5穴水稻,统计穗数,脱粒晒干。用FX-II型风选仪保留饱粒(1 min);用数粒板计数,并称质量,计算单穗籽粒产量(饱粒总质量/总穗数)。

糙米、精米锌及其他元素含量的测定详见文献[7]的方法:稻谷经出糙和出精后,分别磨成粉,称样0.5 g,分别加入5 mL硝酸和3 mL超纯水,滴加2~3滴双氧水,高温下(180 $^{\circ}\text{C}$)消解,稀释过滤。用光谱仪(iCAP 6300, USA)测定 Zn、Cu、Fe、Mn、P、K、Ca、Mg、S 等元素的含量。

氮含量的测定参照张欣等^[8]的方法:将约0.2 g样品置于50 mL消化管中,加浓硫酸5 mL,在消煮炉370 $^{\circ}\text{C}$ 高温下消煮,中途滴加双氧水,稀释过滤后测

定米粉含氮量。

植酸含量的测定方法^[7]:于0.25 g样品中加入稀盐酸,振荡后离心,取一定量上清液。分别在上清液、植酸钠配制的标准溶液中加入显色剂(三氯化铁和磺基水杨酸),读取500 nm下的吸光值,计算稻米的植酸含量。

光合测定方法^[7]:测定抽穗期、穗后20 d剑叶光合数据。光强、气体流速、 CO_2 浓度设置见文献[7]。期间保持温度、湿度与环境一致。

叶面气孔观察参照文献[7]的方法:取抽穗期主茎剑叶(每品种3次重复),在剑叶背面中部刷一层长1 cm,宽3 cm的透明指甲油,并用透明胶带撕下该区域,反面朝上固定在载玻片上,用LeicaDM 2500型号显微镜观察气孔密度和长度^[27]。

1.4 统计分析方法

采用Excel 2013进行试验数据处理和图表绘制;采用SPSS 19.0进行数据完全随机方差分析,并采用SPSS提供的Duncan法($\alpha=0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理对籽粒产量和稻米元素含量的影响

供试品种间单穗籽粒产量存在显著差异,但同一品种花后施锌处理对水稻产量无影响,且不同品种表现一致(图1)。成熟糙米和精米部位的N、P、K、Ca、Mg、S、Cu、Fe和Mn等元素含量表明(表1),品种、部位及其互作对这些元素含量影响极显著(Cu除外),但锌处理,包括品种、部位与其互作对各元素含量多无显著影响。说明花后叶面施锌对不同品种稻米元素含量多无显著影响,故下面主要分析供试品种糙米和精米锌营养的响应。

2.2 不同处理对糙米和精米锌含量的影响

叶面施锌对糙米和精米两部位锌含量的影响见图2和表2。糙米、精米品种间锌含量的差异较大($P<0.001$),糙米平均锌含量较精米增加28.4%($P<0.01$)。叶面施锌使两部位锌含量较对照分别增加7.9、5.3 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅分别达29.9%($P<0.01$)、24.9%($P<0.01$)。从不同品种看,叶面施锌使对应部位锌含量增加的幅度分别为15.9%~37.3%和7.9%~39.8%,其中以扬稻6号(糙米)、丰优香占(精米)增幅最大,甬优1540增幅最小。从不同锌处理看,与对照相比, ZnSO_4 处理使两部位锌含量平均分别增加28.2%、22.2%, ZnSO_4 -Urea处理下锌含量分别增加31.5%、27.6%,均达极显著水平; ZnSO_4 -Urea处理的两部位

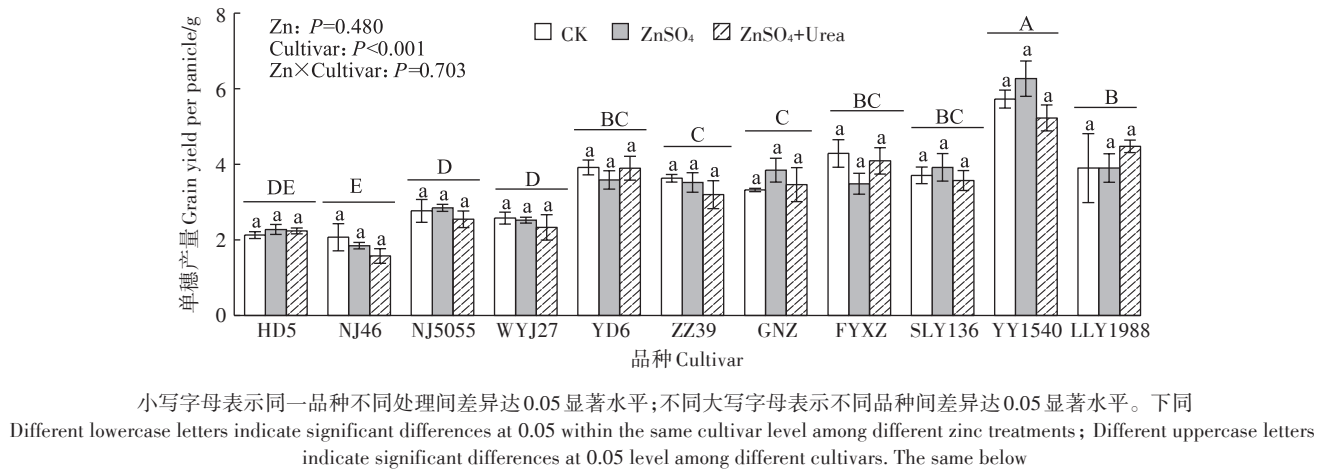


图1 不同处理对供试品种单穗籽粒产量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on grain yield of tested cultivars

表1 锌处理、品种和部位对稻米元素含量影响的显著性检验(P值)

变异来源 Source	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn
锌处理(Zn)	* ↑	ns	ns	ns	ns	** ↑	ns	* ↑	ns
品种(C)	**	**	**	**	**	**	**	**	**
部位(P)	** ↑	** ↑	** ↑	** ↑	** ↑	** ↑	ns	** ↑	** ↑
Zn×C	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	*	ns
Zn×P	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C×P	**	**	**	**	**	**	ns	**	**
Zn×C×P	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	**	ns

注: ↑表示水稻稻米元素含量经施锌处理后较对照显著或极显著增加,或表示糙米元素含量较精米显著或极显著增加。*, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ns,不显著。下同。
Note: ↑ denotes significant increases in element concentrations of rice grains by foliar zinc application compared with the control, or higher element concentrations in brown rice than in milled rice. *, $P<0.05$; **, $P<0.01$; ns, no significant. The same below.

锌含量较 $ZnSO_4$ 分别增加2.6%、4.4%,均达显著水平。方差分析表明,锌处理与品种、部位,以及品种与部位之间的互作对稻米锌含量的影响均达极显著水平。
2.3 不同处理对糙米和精米植酸含量及植酸与锌摩尔比的影响

如图3所示,叶面施锌,糙米和精米植酸含量在品种间差异较大($P<0.001$)。糙米植酸含量较精米植酸含量平均增加218%($P<0.01$)。各品种的糙米、精米植酸含量叶面施锌后与对照无显著差异。方差分析显示,各锌处理间糙米和精米植酸含量均无显著差异($P>0.05$),锌处理与品种或部位的互作对稻米植酸含量均无显著影响(表2)。

植酸与锌摩尔比通常作为稻米中锌有效性的指标,该参数的计算结果见图4和表2。糙米和精米植酸与锌摩尔比的品种间差异较大($P<0.001$)。平均而言,糙米植酸与锌摩尔比约为精米植酸与锌摩尔

表2 锌处理、品种和部位对稻米锌营养的影响(P值)

Table 2 ANOVA results for effects of zinc treatment, rice cultivar, grain part on zinc nutrition of rice grains(P value)

变异来源 Source	锌含量 Zn concentration	植酸含量 PA concentration	植酸与锌摩尔比 PA/Zn molar ratio
锌处理(Zn)	** ↑	ns	** ↓
品种(C)	**	**	**
部位(P)	** ↑	** ↑	** ↑
Zn×C	**	ns	ns
Zn×P	**	ns	**
C×P	**	**	**
Zn×C×P	ns	ns	ns

注: ↑和↓表示锌处理水稻稻米锌含量、植酸含量和植酸与锌摩尔比比较对照显著增加或减少,或表示糙米部位对应指标较精米极显著增加或减少。
Note: ↑ and ↓ denote significant increases or decreases in Zn concentrations, phytic acid concentrations and the mole ratio of phytic acid to zinc of rice grains by foliar zinc application in comparison with the control, or the corresponding indexes in brown rice are significantly increased or decreased compared with milled rice.

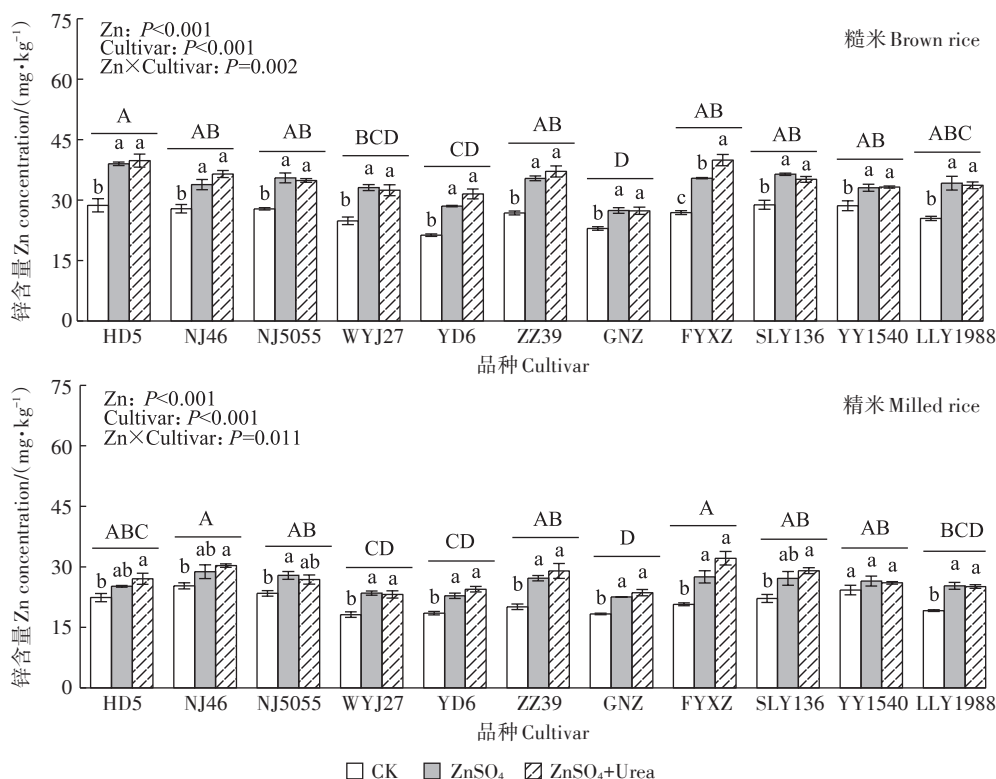


图2 不同处理对供试品种锌含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on grain zinc concentration of tested cultivars

比的1.5倍($P<0.01$)。叶面施锌使糙米和精米的植酸与锌摩尔比较对照平均分别降低24.3%($P<0.01$)、18.8%($P<0.01$)。各品种对应部位植酸与锌摩尔比在叶面施锌后均降低,品种间降幅最大差异均达两倍以上,其中以扬稻6号(糙米)、甬优1540(精米)降幅最大,中早39(糙米)和南粳46(精米)降幅最小。从不同锌处理看,与对照相比, ZnSO_4 处理使两部位的植酸与锌摩尔比平均分别下降24.3%、17.2%, ZnSO_4 -Urea处理使对应部位平均分别下降24.3%、20.3%,且均达极显著水平,但两个锌处理间该比值无显著差异。锌处理与部位以及锌处理与品种对该比值的互作均达极显著水平。

2.4 供试品种结实期剑叶的气孔特性

表3为对照水稻(未进行叶面施锌的水稻)结实期剑叶的净光合速率(P_n)和气孔导度(G_s)。所有品种平均,开花期和花后20 d的 P_n 分别为20.3、17.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, G_s 分别为0.83、0.40 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,开花期极显著大于花后20 d。水稻两期叶片 P_n 和 G_s 的品种间差异均达极显著水平:不同品种开花期 P_n 的变幅为17.7~24.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, G_s 的变幅为0.44~1.42 $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。方差结果显示,时期和品种对叶片 P_n 和 G_s 的互作达极显著水平,说明因测定时期不同,这两

个参数品种间的差异也不同。

图5为抽穗期对照水稻剑叶气孔数据。品种间气孔长度的差异达极显著水平,其中南粳5055最大(平均23.5 μm),丰优香占最小(20.1 μm)。气孔密度也存在极显著的品种差异,其中以深两优136最大(928 mm^{-2}),南粳5055最小(617 mm^{-2})。

2.5 叶面施锌水稻稻米锌营养差异相关性分析

水稻叶面施锌后籽粒锌营养差异相关分析见表4。两部位锌含量的增幅与其对照水稻的糙米锌含量均呈显著负相关(糙米 $r=-0.340^*$,精米 $r=-0.391^*$),与精米锌含量亦呈显著负相关(糙米 $r=-0.452^*$,精米 $r=-0.615^{**}$),说明水稻叶面施锌效率与本身种子锌含量有关,种子锌含量低,富锌效果好。表4还表明稻米锌含量的增幅与抽穗期 G_s 显著正相关(糙米 $r=0.354^+$,精米 $r=0.413^+$),与抽穗期气孔性状无显著相关;水稻抽穗期和灌浆期 G_s 与气孔长度均呈显著正相关,而与气孔密度均呈负相关,其中灌浆期达极显著水平;叶片气孔密度与气孔长度呈极显著线性负相关。

3 讨论

大量研究表明,在土壤不缺锌条件下,水稻花后叶面施用锌肥对水稻产量多无显著影响^[7,22,28]。本试

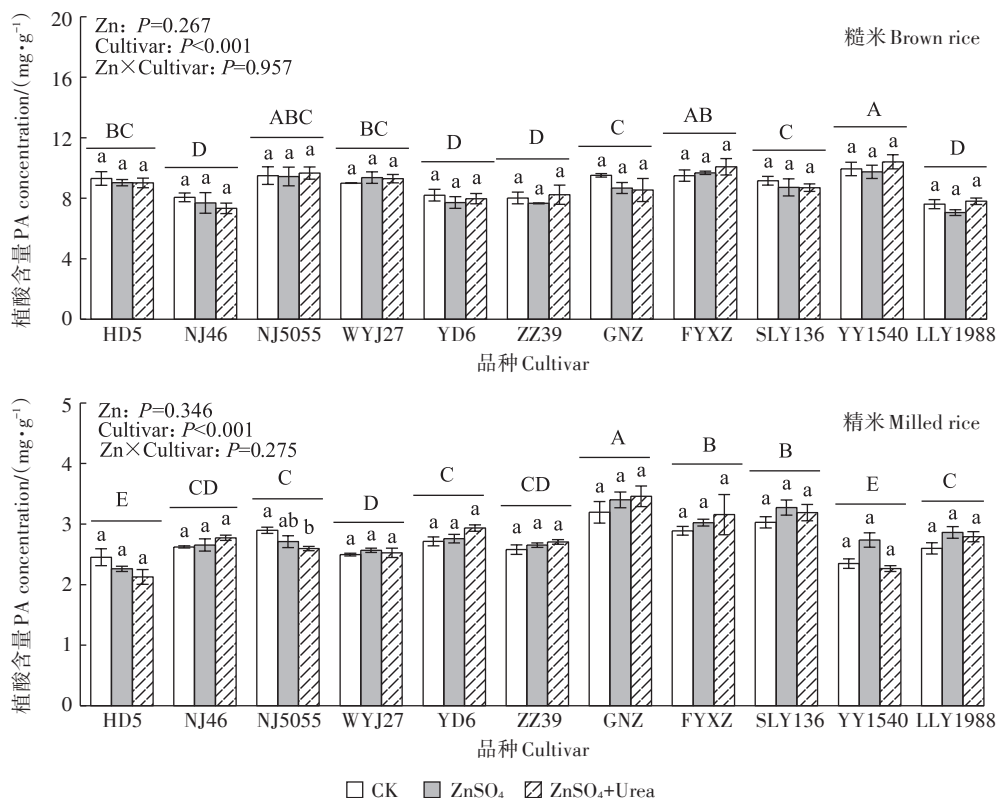


图3 不同处理对供试品种植酸含量的影响

Figure 3 Effects of different treatments on grain phytic acid concentrations of tested cultivars

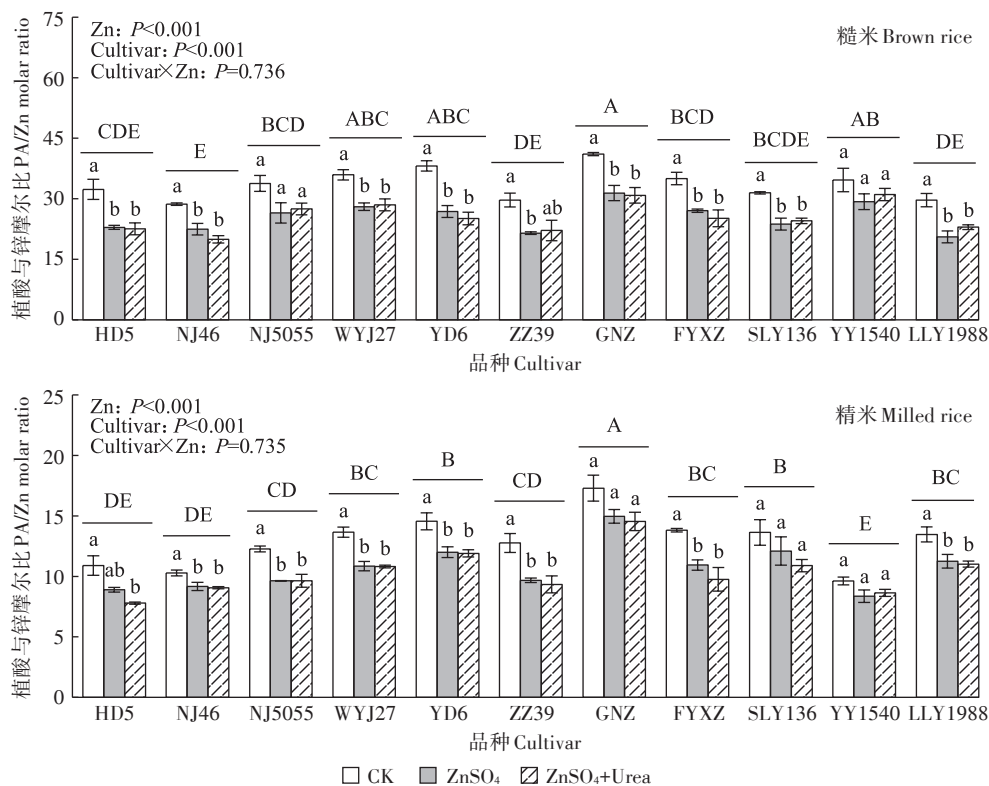


图4 不同处理对供试品种植酸与锌摩尔比的影响

Figure 4 Effects of different treatments on the molar ratio of phytic acid to zinc of tested cultivars

表3 开花期和花后20 d对照水稻剑叶的净同化率(Pn)和气孔导度(Gs)

Table 3 Net assimilation rate(Pn) and stomatal conductance(Gs) of flag leaves of cultivars at anthesis and DAA 20 under control conditions

品种 Cultivar	Pn/($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		Gs/($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
	开花期 Anthesis	花后20 d DAA 20	开花期 Anthesis	花后20 d DAA 20
HD5	21.0±1.6bc	17.6±0.3c	0.62±0.07def	0.38±0.03c
NJ46	21.7±1.1ab	16.8±1.3cd	0.44±0.03f	0.35±0.03c
NJ5055	20.3±0.8bcd	21.0±1.1ab	0.94±0.04bc	0.66±0.04a
WYJ27	22.2±0.9ab	21.7±0.5a	1.23±0.12ab	0.51±0.01b
YD6	17.7±1.0d	19.0±2.1abc	0.87±0.02cd	0.40±0.05c
ZZ39	24.0±1.3a	16.1±0.5cd	1.42±0.12a	0.37±0.02c
GNZ	22.1±0.6ab	18.5±0.9bc	0.74±0.06cdef	0.32±0.01c
FYXZ	18.4±0.7cd	16.7±0.7cd	0.62±0.03def	0.34±0.05c
SLY136	18.2±0.5cd	13.7±0.3d	0.83±0.05cde	0.31±0.02c
YY1540	19.7±0.9bcd	18.1±0.9bc	0.54±0.10ef	0.37±0.01c
LLY1988	18.8±0.6cd	15.9±1.3cd	0.86±0.03cd	0.26±0.04c
ANOVA结果				
时期(S)	**		**	
品种(C)	**		**	
C×S	**		**	

注:不同字母表示品种间差异达0.05显著水平。

Note: Different letters indicate significant difference at 0.05 level among rice cultivars.

验以高产优质的11个不同水稻品种为供试材料,结果表明,水稻花后叶面喷施 ZnSO_4 或 $\text{ZnSO}_4\text{-Urea}$ 对单穗籽粒产量均无显著影响,各品种趋势一致(图1)。由于花后叶面施锌对水稻分蘖发生无明显影响^[7-8],且最终穗数无显著变化,因此单位面积籽粒产量亦无明显变化。除此之外,花后叶面施锌对成熟稻米Cu、Fe、Mn、N、P、K、Ca、Mg、S等元素含量亦无明显影响,且不同品种、不同测定部位(糙米和精米)对其响应一致,表现在锌处理及其与品种或部位的互作对这些元素含量多无显著影响(表1)。

大量研究表明,花后叶面施锌使谷粒包括稻米的锌含量明显增加^[7-8,29-31]。本研究证实,与不喷施锌的对照相比,花后连续喷施3次锌肥使稻米锌含量显著增加(图2)。本试验同时测定了糙米和精米部位的锌含量,所有品种平均,糙米部位锌含量较精米增加约30%(增加 $7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这主要与糙米外层的糊粉层富含蛋白质和植酸有关,这些物质可以螯合锌等微量元素^[4,32-34]。这一结果亦说明稻米精加工过程中会造成锌的损失^[8,35],导致精米锌含量明显减少,因此如何增加精米锌含量显得尤为重要。迄今为止,叶面施锌

对糙米和精米锌含量影响的比较研究较少^[17,19,36],多品种研究更为少见^[8,11,37]。本研究中11个品种的测定结果表明,花后叶面施锌使两部位锌含量较对照平均分别增加29.9%、24.9%(图2),糙米响应更大,锌处理与部位间存在显著的互作效应,说明叶面施锌对两部位锌含量的影响存在显著差异,与前人报道一致^[8,17]。这种部位差异在小麦上亦有报道:叶面施锌下小麦粒锌含量的增幅通常为麸皮>次粉>面粉^[38-41]。这些部位差异说明外源锌从表皮和糊粉层再转运到胚乳的过程中可能存在某种障碍,破解这些障碍有利于从根本上增加胚乳(精米)的锌含量^[8]。

前人研究表明,花后叶面施锌对稻米锌含量的影响与供试品种有关^[7-8,37]。本研究证实,花后叶面施锌对稻米锌含量的影响存在明显的品种差异,即锌处理与品种间互作显著。所有供试品种比较,叶面施锌使扬稻6号糙米(37%)和丰优香占精米(40%)的锌含量增幅最大,使甬优1540的增幅(糙米16%、精米8%)最小,其中精米锌含量的增幅品种间最大相差达5倍(图2)。进一步将供试材料分为籼型(扬稻6号等6个品种)和粳型(淮稻5号等5个品种)两类水稻,总体而言,叶面施锌对籼型水稻糙米锌含量的影响(32%)大于粳型水稻(27%),精米锌含量的增幅两类水稻差异更大:籼稻(33%)的增幅接近粳稻(18%)的两倍(图2)。上述品种差异说明,通过品种选育尤其是籼型水稻可以增强稻米特别是精米的富锌效果,进而改善人类的锌营养状况^[8]。

与叶面喷施 ZnSO_4 相比,氮、锌配施对籽粒锌含量的影响存在两种观点,一种是不会增加锌含量^[25-26],另一种认为可显著提高籽粒锌含量^[42-43],而目前已有研究多针对小麦^[10,44],对水稻研究较少^[28]。水稻花后叶面施锌会增加稻米锌含量,关于氮、锌叶面配施是否能进一步增加稻米锌的积累,本研究表明,与单独叶面施锌相比,水稻花后叶面氮、锌配施对增加稻米锌含量有显著效果,且精米部位更为明显。所有品种的糙米锌含量在 ZnSO_4 、 $\text{ZnSO}_4\text{-Urea}$ 处理下较对照分别增加28.2%、31.5%,精米锌含量分别增加22.2%、27.6%(图2),与 ZnSO_4 相比, $\text{ZnSO}_4\text{-Urea}$ 处理下糙米、精米增幅分别为2.6%、4.4%;方差结果表明两个锌处理间的差异均达显著水平(糙米: $P=0.042$,精米: $P=0.014$)。这一结果表明叶面所施锌肥中添加一定浓度尿素对增加籽粒锌含量的效果好于单独施锌,尤其是精米锌含量的增加更明显。稻米在氮、锌配施下富锌效果增强,可能与锌离子在尿素作用下进

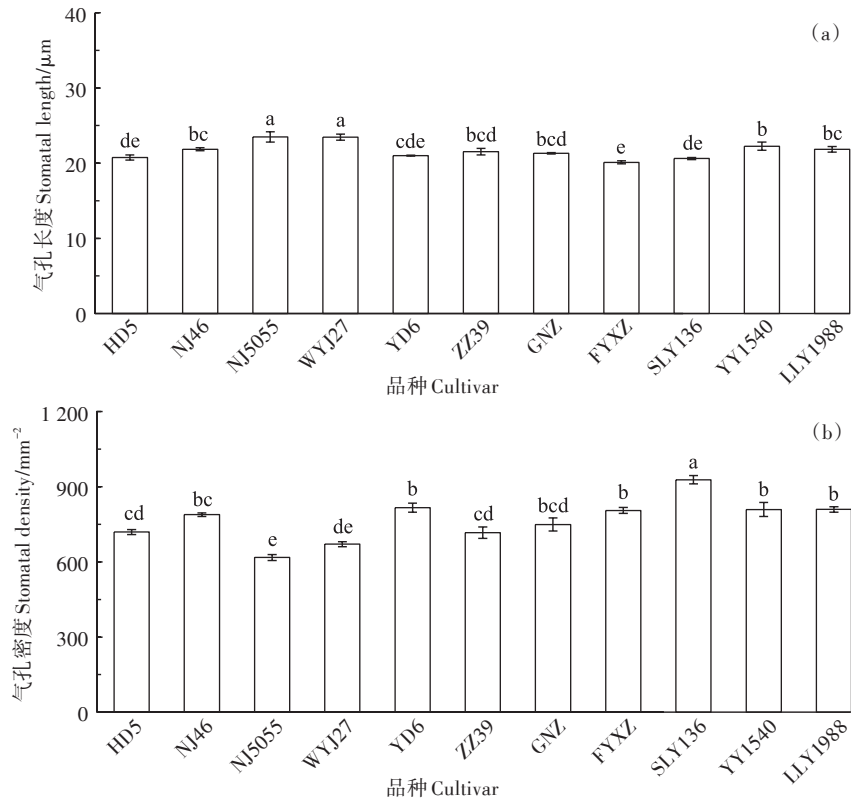


图5 对照条件下供试品种开花期剑叶的气孔性状

Figure 5 Stomatal characters of tested cultivars at anthesis under controlled conditions

表4 叶面施锌对稻米锌营养的影响与对照水稻的稻米和剑叶气孔性状的相关性分析($n=33$)

Table 4 Correlation analysis of the responses of grain zinc nutrition to foliar zinc application and the grain zinc concentration and stomatal characteristics of flag leaves of control rice($n=33$)

相关性分析 Correlation analysis	糙米锌含量增幅 Percentage increase in Zn concentration in brown rice	精米锌含量增幅 Percentage increase in Zn concentration in milled rice	糙米锌含量 Zn concentration in brown rice	精米锌含量 Zn concentration in milled rice	抽穗期 Gs Heading Gs	灌浆期 Gs Grain filling Gs	气孔密度 Stomatal length	气孔长度 Stomatal density
糙米锌含量增幅	1							
精米锌含量增幅	0.391*	1						
糙米锌含量	-0.340*	-0.390*	1					
精米锌含量	-0.452*	-0.615**	0.824**	1				
抽穗期 Gs	0.354+	0.413*	-0.352+	-0.555**	1			
灌浆期 Gs	0.169	-0.058	0.018	0.081	0.511**	1		
气孔密度	-0.136	0.017	0.081	0.070	-0.336+	-0.763**	1	
气孔长度	-0.239	-0.066	0.079	0.099	0.459*	0.643**	-0.642**	1

注: 锌含量增幅为 ZnSO₄处理的锌含量较对照的增幅。+, 表示接近显著。

Note: Zinc concentration increment: the percentage increase in grain zinc concentration by foliar zinc application as compared with the control. +, indicates close to significant.

一步渗透表皮,从而进入叶片组织有关^[7-8,44-46];经由韧皮部转运,再到达籽粒胚乳(精米)中,稻米的锌含量因此增大,但其深层的生理机制还有待探明。

作物籽粒中的植酸容易与锌等金属离子在人体内螯合并生成难溶性物质,从而影响人体对锌的吸收

和利用^[8,47-50]。植酸盐的存在大幅降低了锌的生物有效性,而发展中国家的居民对植酸含量较高谷物的大量吸收也是锌缺乏的主要原因^[51]。水稻中植酸多存在于糠层中,在水稻籽粒中的分布通常为稻谷>糙米>糠层>精米^[52]。研究表明,水稻花后叶面施锌对其籽

粒植酸含量有显著影响^[7-8,19,31]。相似地,本研究发现尽管各品种及其部位植酸含量差异很大,但对 ZnSO_4 、 ZnSO_4 -Urea处理均无显著响应,且糙米和精米部位趋势一致(图3)。方差分析亦显示锌处理与品种、部位间的互作对稻米植酸含量均无显著影响。

人体对锌的摄入量除了与植酸绝对含量有关,更与植酸与锌摩尔比相关,后者常被用来评价锌的生物有效性^[14,7-8,48]。本研究表明,与锌含量相同,糙米植酸与锌摩尔比显著大于精米(表2),说明虽然精米的锌含量显著低于糙米,但锌的生物有效性显著高于糙米。叶面施锌使稻米锌含量大幅增加,但植酸含量没有变化,因而植酸与锌摩尔比即生物有效性显著下降(图4),这与有关水稻^[7-8,19,31,36]、小麦^[48-50,53]的报道相同。叶面施锌导致植酸与锌摩尔比的降幅品种间存在较大差异(最大相差2倍以上),且粳型水稻比粳型水稻的响应更大(图4)。研究还发现,叶面施锌对稻米植酸与锌摩尔比的影响存在显著的部位差异:糙米部位的平均降幅(24.3%)明显大于精米(18.8%)。目前有关尿素溶于叶面锌肥中配施对稻米锌有效性的影响未见报道。本研究表明,尽管糙米植酸与锌摩尔比对 ZnSO_4 和 ZnSO_4 -Urea处理的响应相同(24.3%),但后者对精米植酸与锌摩尔比的影响(20.3%)大于前者(17.2%)(图4)。综上可知,花后叶面施锌显著增加籽粒,特别是糙米部位锌的生物有效性;与单独施锌相比,叶面施锌配施尿素有利于增加精米锌的生物有效性^[8]。

如前所述,稻米锌含量对花后叶面施锌的响应存在显著的品种差异,但较少研究报道这种差异的原因^[7,37]。张欣等^[7]对6个品种糙米锌含量分析发现,与对照相比,叶面施锌对水稻糙米锌含量的增幅与叶片气孔长度和密度均无显著关联,但与花后 G_s 呈显著正相关。本研究以更多的品种验证了这一结果,同时发现施锌导致精米锌含量的增幅亦与 G_s 呈显著或极显著正相关。结合前人研究可知,水稻气孔大小是衡量叶面施锌效果的重要参数。本研究观察到粳稻叶面施锌的效果优于粳稻,这与粳稻叶片 G_s 明显大于粳稻相吻合:粳型和粳型水稻开花期平均 G_s 分别为 $0.88 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.77 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (根据表3计算所得),说明气孔张开变大,气孔壁上附着的颗粒增加,更易于极性液体通过,增加对叶面锌肥的吸收^[8,50,53]。

除了气孔性状,稻米的富锌效果可能还与植株本身锌含量的高低有关。JAKSOMSAK等^[21]通过品种比较试验发现,叶面施锌对2个低锌品种稻米锌含量的

影响明显大于2个高锌品种;张欣等^[7]对6个水稻品种的观察表明,花后叶面施锌对低锌品种糙米锌含量的影响显著大于高锌品种。本研究在增加品种的基础上,同时观察了糙米和精米锌含量对叶面施锌的响应,相关分析显示,水稻植株本身的锌含量与稻米锌含量的增幅显著负相关,进一步表明种子锌含量较低的品种富锌效果更好。

4 结论

(1)叶面施锌对水稻产量无影响,但使稻米锌营养显著增强。就品种类型而言,粳稻吸锌效率更高;就部位而言,糙米响应幅度更大。

(2)锌肥中添加适量尿素后叶面喷施有利于稻米锌营养水平的增强,即叶面锌肥与氮肥配施对稻米锌营养具有一定的协同作用。

(3)水稻种子锌含量低,抽穗期叶片气孔导度大的品种,对叶面锌肥的吸收效率更高。

(4)本研究对稻麦生产中锌生物强化和品种选育具有指导意义。结合本研究结果,扬稻6号、中早39、丰优香占、隆两优1988等粳型水稻品种富锌效果更好。

参考文献:

- [1] CAKMAK I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1/2): 1-17.
- [2] 黄秋婵, 韦友欢, 石景芳. 微量元素锌对人体健康的生理效应及其防治途径[J]. 微量元素与健康研究, 2009, 26(1): 68-70. HUANG Q C, WEI Y H, SHI J F. The physiological effects of zinc trace elements on the human health and its measures of preventing[J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2009, 26(1): 68-70.
- [3] 叶廷红, 张赓, 李小坤. 水稻锌营养及锌肥高效施用研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 1-6. YE T H, ZHANG G, LI X K. Research advance of zinc nutrition and efficient application of zinc fertilizer in rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(6): 1-6.
- [4] CAKMAK I, KUTMAN U B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2018, 69(1): 172-180.
- [5] MYERS S S, ZANOBETTI A, KLOOG I, et al. Increasing CO_2 threatens human nutrition[J]. *Nature*, 2014, 510(7503): 139-142.
- [6] 王云霞, 杨连新. 水稻品质对主要气候变化因子的响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 822-833. WANG Y X, YANG L X. Response of rice quality to major climate change factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 822-833.
- [7] 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. ZHANG X, HU S W, ZHANG Y L, et al. Effect of foliar zinc application on zinc nutrient levels of different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1450-1458.
- [8] 张欣. 叶面施锌对不同水稻品种稻米锌营养的影响及其机理[D].

- 扬州:扬州大学, 2019:1-70. ZHANG X. Effects of foliar zinc application on grain zinc nutrition of different rice cultivars and its mechanism[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019:1-70.
- [9] 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. LI Y T, LI X Y, XIAO Y, et al. Advances in study on mechanism of foliar nutrition and development of foliar fertilizer application[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1):162-172.
- [10] ÇAKMAK I, KALAYCI M, KAYA Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16):9092-9102.
- [11] PHATTARALUL 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(1):131-141.
- [12] 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.
- [13] 范小琴, 董思奇, 邵宇辉, 等. 不同品种粳稻的锌强化方法研究[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2):173-178. FAN X Q, DONG S Q, SHAO Y H, et al. Study on the method of zinc augmentation in different cultivars of japonica rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(2):173-178.
- [14] 韩潇潇, 任兴华, 王培培, 等. 叶面喷施锌离子对水稻各器官镉积累特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8):1809-1817. HAN X X, REN X H, WANG P P, et al. Effects of foliar application with zinc on the characteristics of cadmium accumulation in organs of rice plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1809-1817.
- [15] WANG Z, WANG H, XU C, et al. Foliar application of Zn-EDTA at early filling stage to increase grain Zn and Fe, and reduce grain Cd, Pb and grain yield in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 105(3):428-432.
- [16] ZULFIQAR U, HUSSAIN S, MAQSOOD M M, et al. Zinc nutrition to enhance rice productivity, zinc use efficiency, and grain biofortification under different production systems[J]. *Crop Science*, 2021, 61(1):739-749.
- [17] 周三妮, 赖上坤, 吴艳珍, 等. 大气CO₂浓度升高和叶面施锌对武运粳23稻米不同部位锌浓度和有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(9):1686-1692. ZHOU S N, LAI S K, WU Y Z, et al. Effects of elevated CO₂ concentration and foliar Zn application on Zn concentration and bioavailability in different parts of grains of rice Wuyunjing 23[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(9):1686-1692.
- [18] 周三妮, 王云霞, 赖上坤, 等. FACE下二氧化碳、施氮量、密度和锌肥对Ⅱ优084稻米锌浓度及有效性的影响[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(3):289-296. ZHOU S N, WANG Y X, LAI S K, et al. Effects of elevated CO₂ concentration, nitrogen fertilization, planting density and foliar Zn application on rice Zn concentration and bioavailability of super rice Ⅱ you 084 under FACE conditions[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(3):289-296.
- [19] KHAMPUANG K, LORDKAEW S, DELL B, et al. Foliar zinc application improved grain zinc accumulation and bioavailable zinc in unpolished and polished rice[J]. *Plant Production Science*, 2021, 24(1):94-102.
- [20] BRYANT R J, DORSCH J A, PETERSON K L, et al. Phosphorus and mineral concentrations in whole grain and milled low phytic acid (*lpa*) 1-1 rice[J]. *Cereal Chemistry*, 2005, 82(5):517-522.
- [21] JAKSOMASK P, TUIWONG P, RERKASEM B, et al. The impact of foliar applied zinc fertilizer on zinc and phytate accumulation in dorsal and ventral grain sections of four thai rice varieties with different grain zinc[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 79:6-12.
- [22] WEI Y, SHOHAG M, YANG X. Biofortification and bioavailability of rice grain zinc as affected by different forms of foliar zinc fertilization[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9):1-10.
- [23] WANG S, SUN N, YANG S, et al. The effectiveness of foliar applications of different zinc source and urea to increase grain zinc of wheat grown under reduced soil nitrogen supply[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2020, 44(5):1-16.
- [24] 郭九信, 廖文强, 凌宁, 等. 氮锌配施对小麦产量及氮锌含量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2013, 6(2):77-82. GUO J X, LIAO W Q, LING N, et al. Effects of combination use of N and Zn fertilizers on the yield and N, Zn concentrations in wheat[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2013, 6(2):77-82.
- [25] ZHANG Y Q, SUN Y X, YE Y L, et al. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 125:1-7.
- [26] LI M, WANG S, TIAN X, et al. Zinc and iron concentrations in grain milling fractions through combined foliar applications of Zn and macronutrients[J]. *Field Crops Research*, 2016, 187:135-141.
- [27] LAZA M R C, KONDO M, IDETA O, et al. Quantitative trait loci for stomatal density and size in lowland rice[J]. *Euphytica*, 2009, 172(2):149-158.
- [28] 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. GUO J X, SUI B, SHANG Q Y, et al. Effects of N and Zn interaction on yield and contents of N and Zn in grains of rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(6):1336-1342.
- [29] 张庆, 王娟, 景立权, 等. 叶面施用不同形态锌化合物对稻米锌浓度及有效性的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(6):610-618. ZHANG Q, WANG J, JING L Q, et al. Effects of foliar application of different Zn compounds on Zn concentration and bioavailability in brown rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(6):610-618.
- [30] BOONCHUAY P, ÇAKMAK I, RERKASEM B, et al. Effect of different foliar zinc application at different growth stages on seed zinc concentration and its impact on seedling vigor in rice[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(2):180-188.
- [31] 杨阳, 户少武, 牛玺朝, 等. 高CO₂浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(2):436-444. YANG Y, HU S W, NIU X C, et al. Effects of free air CO₂ enrichment and foliar zinc application on the grain zinc nutrition of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(2):436-444.
- [32] 居超明, 周勇, 徐国成. 水稻种子植酸含量的地域差异[J]. 水生生物学报, 2000, 24(5):570-571. JU C M, ZHOU Y, XU G C. Regional variations of phytic acid content in the rice seeds[J]. *Acta Hydrobiologia Sinica*, 2000, 24(5):570-571.

- [33] OCKENDEN I, DORSCH J A, REID M M, et al. Characterization of the storage of phosphorus, inositol phosphate and cations in grain tissues of four barley (*Hordeum vulgare* L.) low phytic acid genotypes[J]. *Plant Science*, 2004, 167(5):1131-1142.
- [34] 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. YU Y J, LIAO H B, CHEN W R, et al. Mechanism of Zn uptake, translocation in rice plant and Zn-enrichment in rice grain[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2012, 26(3):365-372.
- [35] SAENCHAI C, JAMJOD S, DELL B, et al. Genotypic variation in milling depression of iron and zinc concentration in rice grain[J]. *Plant and Soil*, 2012, 361(1):271-278.
- [36] 张庆. 不同条件下叶面施锌对水稻和小麦籽粒锌营养的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2016. ZHANG Q. The effects of foliar application on grain Zn bioavailability under different growth conditions[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [37] 郝兴顺, 姜雨含, 吴玉红, 等. 汉中地区籼稻锌、铁、锰营养基因型差异及叶面喷锌对籽粒锌含量的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(4):74-77. HAO X S, JIANG Y H, WU Y H, et al. Genotypic differences of zinc, iron and manganese nutrition in indica rice in Hanzhong area and the effects of foliar zinc spraying on grain zinc content[J]. *China Rice*, 2019, 25(4):74-77.
- [38] 齐义涛, 张庆, 周三妮, 等. 结实期叶面施锌对扬麦16号和扬辐麦2号籽粒不同部位锌含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):675-680. QI Y T, ZHANG Q, ZHOU S N, et al. The effect of foliar Zn application at grain filling stage on Zn content in grain fractions of winter wheat Yangmai 16 and Yangfuma 2[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):675-680.
- [39] 杨月娥, 王森, 王朝辉, 等. 我国主要麦区小麦籽粒锌含量对叶喷锌肥的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(3):579-589. YANG Y E, WANG S, WANG Z H, et al. Response of wheat grain Zn concentration to foliar sprayed Zn in main wheat production regions of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(3):579-589.
- [40] 董明, 王琪, 周琴, 等. 花后5天喷施锌肥有效提高小麦籽粒营养和加工品质[J]. 植物营养与肥料学, 2018, 24(1):63-70. DONG M, WANG Q, ZHOU Q, et al. Efficient promotion of the nutritional and processing quality of wheat grain by Zn foliar spraying at 5 days after anthesis[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1):63-70.
- [41] 张庆, 贾一磊, 杨连新, 等. 臭氧浓度升高和叶面施锌对小麦籽粒产量、锌浓度及有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4):728-736. ZHANG Q, JIA Y L, YANG L X, et al. Impacts of elevated ozone concentration and foliar zinc application on yield, grain zinc content and bioavailability of wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4):728-736.
- [42] KUTMAN U B, YILDIZ B, CAKMAK I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat[J]. *Journal of Cereal Science*, 2011, 53(1):118-125.
- [43] 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):159-167. LI J L, QIAN G, LI H X, et al. Effects of combined application of nitrogen and zinc on growth, yield, nutrient absorption and distribution of rice [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2021, 40(3):159-167.
- [44] 王少霞, 李萌, 田霄鸿, 等. 锌与氮磷钾配合喷施对小麦锌累积、分配及转移的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(2):296-305. WANG S X, LI M, TIAN X H, et al. Effects of combined foliar application of Zn with N, P, or K on Zn accumulation, distribution and translocation in wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2):296-305.
- [45] 靳静静, 王朝辉, 戴健, 等. 长期不同氮、磷用量对冬小麦籽粒锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6):1358-1367. JIN J J, WANG Z H, DAI J, et al. Effects of long-term N and P fertilization with different rates on Zn concentration in grain of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6):1358-1367.
- [46] 李宏云, 王少霞, 李萌, 等. 不同水氮管理下锌与氮磷钾配合喷施对冬小麦锌营养品质的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(20):4016-4026. LI H Y, WANG S X, LI M, et al. Effects of combined foliar Zn application with N or P under different water and nitrogen managements on Zn nutritional quality of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(20):4016-4026.
- [47] 赵宁春, 张其芳, 程方民, 等. 氮、磷、锌营养对水稻籽粒植酸含量的影响及与几种矿质元素间的相关性[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2):185-190. ZHAO N C, ZHANG Q F, CHENG F M, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and zinc supply levels on grain phytic acid content and its correlation with several mineral nutrients in rice grains[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2007, 21(2):185-190.
- [48] 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.
- [49] 齐义涛, 周三妮, 张庆, 等. 结实期叶面施锌对小麦籽粒不同部位锌生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1085-1091. QI Y T, ZHOU S N, ZHANG Q, et al. The effect of foliar Zn application at grain filling stage on Zn bioavailability in grain fractions of modern winter wheat cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(6):1085-1091.
- [50] SCHONHERR J, BUKOVAC M J. Foliar penetration of succinic acid-2, 2-dimethylhydrazide: Mechanism and rate limiting step[J]. *Physiologia Plantarum*, 1978, 42(2):243-251.
- [51] 苏达, 吴良泉, 周庐建, 等. 低植酸水稻种质资源筛选、遗传生理调控与环境生态适应性研究进展[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(2):95-107. SU D, WU L Q, ZHOU L J, et al. Research advances on the low phytic acid rice breeding and their genetic physiological regulation and environmental adaptability[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2019, 33(2):95-107.
- [52] GIBSON R S, BAILEY K B, GIBBS M, et al. A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability[J]. *Food and Nutrition Bulletin*, 2010, 31(Suppl 2):134-146.
- [53] EICHERT T, GOLDBACH H E. Equivalent pore radii of hydrophilic foliar uptake routes in stomatous and astomatous leaf surfaces—further evidence for a stomatal pathway[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 132(4):491-502.

(责任编辑:叶飞)