

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

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0899>

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>

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>

黑麦根系分泌物氨基酸组分对PAHs胁迫的响应

胡芳雨, 孟凡波, 张闻, 高永超, 郑立稳

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 1937–1945 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0414>

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>

喷施硫酸锰和硫酸锌对小麦籽粒镉锰锌生物可给性的影响

陶雪莹, 徐应明, 王林, 黄青青, 闫秀秀, 刘畅

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2181–2189 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0821>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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 Yang, HU Shao-wu, NIU Xi-chao, 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.



开放科学 OSID

高 CO₂ 浓度和叶面施锌对稻米锌营养的影响

杨阳¹, 户少武², 牛玺朝¹, 童楷程¹, 陈晨², 杨连新², 王云霞^{1*}

(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2. 扬州大学江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009)

摘要:水稻是全球半数以上人口的主食, 增加稻米中的锌营养水平对解决人类锌缺乏至关重要。依托稻田 FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 平台, 采用 9 个现代品种为供试材料, CO₂ 处理设置环境 CO₂ 浓度 (Ambient) 和高 CO₂ 浓度 (增 200 μmol·mol⁻¹) 两个水平, 锌处理设置对照 (不施锌) 和叶面施锌 (灌浆前期喷施 0.2% ZnSO₄) 处理, 研究水稻糙米产量、锌浓度、锌有效性以及锌肥利用率对 CO₂ 和锌处理的响应及其品种间差异。结果表明, 与 Ambient 相比, 高 CO₂ 浓度使所有品种糙米产量平均增加 15.7%, 但对糙米锌浓度、植酸浓度及植酸与锌摩尔比均无显著影响, 不同品种和不同锌处理条件下趋势均一致; 高 CO₂ 浓度下扬稻 6 号和隆两优 1988 糙米籽粒锌肥利用率显著降低, 而其他品种无显著变化。花后叶面施锌对糙米产量及植酸浓度无显著影响, 但使糙米锌浓度平均增加 37.3%, 植酸与锌摩尔比平均降低 29.1%, 不同品种间响应幅度存在显著差异。以上数据说明, 在环境 CO₂ 浓度和 CO₂ 浓度升高两种情形下, 水稻花后叶面喷施锌肥均可显著改善稻米的锌营养水平, 幅度因品种而异, 而高 CO₂ 浓度使部分籼稻品种的锌肥利用率显著下降。

关键词:水稻; 叶面施锌; 锌浓度; 植酸; 锌有效性

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)02-0436-09 doi:10.11654/jaes.2020-0899

Effects of free air CO₂ enrichment and foliar zinc application on the grain zinc nutrition of rice

YANG Yang¹, HU Shao-wu², NIU Xi-chao¹, TONG Kai-cheng¹, CHEN Chen², YANG Lian-xin², WANG Yun-xia^{1*}

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

Abstract: More than half of the world's population uses rice as a staple food, and increasing the zinc nutrition level in rice is vital to solve the problem of human zinc deficiency. In 2018, nine rice cultivars were grown at ambient and elevated CO₂ concentrations (200 μmol·mol⁻¹ higher than ambient) in a Free Air CO₂ Enrichment (FACE) facility installed in a paddy field. Foliar zinc application (0.2% ZnSO₄) commenced immediately after the flowering period three times at an interval of every five days. At plant maturity, the response of the brown rice yield, grain zinc concentration, and bioavailability in different rice cultivars to CO₂ and zinc treatment were studied, and the effect of elevated CO₂ on zinc fertilizer use efficiency was determined. The results showed that high CO₂ significantly increased the brown rice yield by 15.7%. However, zinc concentration, phytic acid concentration, and the molar ratio of phytic acid to zinc of brown rice were not affected by elevated CO₂, which was the same trend observed for different rice cultivars and different zinc treatments. The grain zinc use efficiency of Indica rice cultivars YD6 and LLY1988 decreased under elevated CO₂ levels, but other rice cultivars showed no significant changes.

收稿日期: 2020-07-31 录用日期: 2020-11-05

作者简介: 杨阳 (1995—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事水稻微量元素生物强化的研究。E-mail: 1967593896@qq.com

*通信作者: 王云霞 E-mail: yxwang@yzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31671618, 31571597, 31371563); 江苏高校优势学科建设工程项目

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (31671618, 31571597, 31371563); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

Foliar zinc application had no effect on the phytic acid concentration and yield of brown rice. Foliar zinc application significantly increased the zinc concentration of brown rice by 37.3% on average but significantly reduced the molar ratio of phytic acid to zinc in brown rice by 29.1%, and the magnitude of each response varied significantly among cultivars. These results suggest that the spraying of zinc fertilizer on a leaf surface after flowering significantly improve the zinc nutrient levels of rice at both ambient and elevated CO₂ levels. Improvements varied with cultivars, but the zinc use efficiency of some Indica cultivars decreased with elevated CO₂.

Keywords: rice; foliar zinc application; zinc concentration; phytic acid; zinc availability

水稻是重要的粮食作物,大米是世界上半数以上人口的主食^[1]。稻米中的主要成分淀粉是以大米为主食人群的主要热量来源,蛋白质和锌、铁等微量元素对维持人体健康及免疫系统至关重要。缺锌可能导致生长迟缓、免疫力下降、学习障碍、智力迟钝、DNA损伤、冠心病甚至癌症^[2]。目前,锌缺乏已被列为影响全球人类健康的主要危险因素之一^[3]。据报道,在以水稻为主食的地区,缺锌人口的数量占总人口的34%~73%,这主要是由于大米中的锌含量及锌的生物有效性较低^[4-5]。因此,提高粮食作物中的锌浓度及其生物有效性,改善人类健康,是一项重要的全球性挑战。

自工业革命以来,人类活动加剧使大气二氧化碳(CO₂)浓度不断增加,预计到本世纪中叶将上升到550 μmol·mol⁻¹^[6]。高浓度CO₂促进作物的光合作用,从而使作物生物量及产量增加^[7]。但是大气CO₂浓度升高情形下稻米蛋白质、维生素等营养素浓度多呈降低趋势,这可能导致以大米为主食人群营养缺乏的风险^[8]。稻米微量元素锌对CO₂浓度升高的响应多为显著降低或没有影响,不同试验中响应不一致可能与供试品种、栽培和气候条件不同有关^[9]。

前人关于高CO₂浓度对稻米锌浓度影响的研究较多,但关于锌生物有效性影响的报道非常少。锌的生物有效性常以植酸与锌摩尔比来表示。因为大米中的锌与植酸形成植酸盐,不容易被人体小肠直接吸收,从而降低了锌的生物有效性^[10]。植酸与锌摩尔比<10时,植酸对人体吸收锌的影响很小,当植酸与锌摩尔比超过15时,锌的吸收被抑制^[11]。因此大米植酸含量的高低直接影响锌的生物有效性,截至目前仅有的几例研究认为大气CO₂浓度升高对稻米植酸浓度没有显著影响^[12-14]。

锌生物强化是提高水稻籽粒锌含量和锌生物有效性的有效途径,是解决人类缺锌问题的一种经济且可持续的方法^[15]。基因生物强化和农艺生物强化是提高水稻籽粒锌浓度的两种重要措施^[3]。其中农艺生物强化策略(例如施锌肥)是提高水稻籽粒中锌浓

度的一种快速有效的方法^[5]。锌肥的使用一般包括土壤施用、锌溶液浸种和叶面施用^[3]。近年来,通过叶面施锌进行稻谷中锌的生物强化应用广泛,它具有施用量低和避免土壤固定的优点^[3]。叶面施用的锌可以被叶表皮吸收,并通过韧皮部转移到水稻籽粒中^[16]。通常叶面施用锌肥使糙米锌浓度的增加幅度大于土壤施用^[17]。据报道,小麦土壤施锌时锌肥利用率只有不到1%,叶面施用锌肥利用率可达8%以上^[18],但水稻锌肥利用率对高CO₂浓度的响应未见报道。

纵观前人研究,大气CO₂浓度升高对稻米锌浓度影响的前期研究较多,但通常供试品种较少,特别是新选育的高产优质超级稻品种;相对锌浓度、高CO₂浓度对稻米锌生物有效性影响的报道非常少,对籽粒锌肥利用率的影响则未见报道。为此,本研究依托自由空气中CO₂浓度增高(Free Air CO₂ Enrichment, FACE)技术平台,以大田生产使用较广的9个品种为供试材料,设置CO₂浓度、品种以及花后叶面施锌三因子试验,成熟期测定糙米产量、锌浓度、锌生物有效性以及锌肥利用率,研究这些参数对CO₂和锌处理的响应及其品种间差异,为未来高浓度CO₂环境下制订生物强化策略提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本试验于2018年依托我国稻田FACE技术平台进行,该平台位于江苏省扬州市小纪镇良种场试验田内(32°35′50″N, 119°42′00″E)。FACE平台设有对照(Ambient)圈及FACE圈各3个,直径为12 m,面积约为80 m²,且各圈层之间间隔均大于90 m^[9]。平台运行时,纯CO₂气体通过FACE圈周围架设的管道上小孔向中心喷射。通过CO₂监测仪和计算机网络系统实时监控各圈的CO₂浓度。处理圈纯CO₂气体释放的速度和方向根据大气中CO₂浓度、风向、风速以及作物冠层高度的目标CO₂浓度进行自动调节,从而使水稻主要生育期FACE圈内CO₂浓度比大气环境高200 μmol·mol⁻¹。试验田为水稻-冬闲单季种植,其土

壤理化性质:pH 7.1,有机质 $24.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $9.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $146.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $51.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $17.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效锌 $6.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

本试验为裂区设计,以 CO_2 浓度、水稻品种、锌处理为主区、裂区和裂裂区。 CO_2 处理设置为环境 CO_2 浓度(Ambient)和高 CO_2 浓度(比 Ambient 高 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$),各3个重复。锌处理设置2个水平,分别为对照(不施锌处理)和0.2% 锌肥处理(以溶液中的 Zn^{2+} 计)。叶面喷施的锌肥为 ZnSO_4 溶液($800 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$,含有0.01% Tween-20)。水稻开花之后的2周,籽粒锌积累迅速增加,故水稻从抽穗期开始进行叶面锌处理,每隔5 d 喷施一次,共3次^[20-22]。喷施时为避免交叉感染,用塑料薄膜将处理植株与对照植株分隔开来。

1.2 材料培育

本研究以大田生产使用较广的9个品种为材料进行试验,淮稻5号(常规粳稻)、南粳46(常规粳稻)、南粳5055(常规粳稻,超级稻)、武运粳27(常规粳稻,超级稻)、扬稻6号(常规籼稻)、丰优香占(籼型三系杂交稻)、隆两优1988(籼型两系杂交稻,超级稻)、深两优136(籼型两系杂交稻,超级稻)和甬优1540(籼粳杂交稻,超级稻)。大田早育秧:5月18日浸种,3 d 后播种,6月20日移栽。移栽密度为 $24 \text{ 穴} \cdot \text{m}^{-2}$ (株行距为 $16.7 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$),粳稻每穴2株,籼稻和杂交稻每穴1株。施氮总量为 $22.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,其中40%、30%、30% 分别作为基肥、分蘖肥和穗肥,分别于6月19日、6月29日和7月28日施用;磷、钾肥施用量均为 $9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,全部作基肥施用。基肥使用复合肥(N:P:K=15:15:15),追肥使用尿素(含氮率为46.7%)。水分管理:6月17日至7月20日保持3 cm 水层;7月21日至8月10日期间多次轻搁田;8月11日至成熟期收获前10 d 间歇灌溉之后断水至收获。

1.3 测定内容

糙米产量的测定:水稻成熟期时选取长势基本一致的具有代表性的植株5穴,手工脱粒,晒干后用风选仪(FX-II,汇尔公司,杭州)分出饱粒,经砻谷机出糙后称质量得到糙米产量。

糙米用磨粉机(盘式振动研磨仪 TS1000, Siebtechnik,德国)磨成细粉待用。

糙米锌元素的测定:称取 0.100 g 烘干米粉样品,在马弗炉中 $480 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温灰化14 h,待灰分冷却后加入 2 mL 15% 的进口纯硝酸溶解,静置24 h后用超纯水

定容至 10 mL ,将溶液混匀后过滤。最后用 ICP-AES (IRIS Intrepid II XSP, Thermo Elemental, 美国)测定滤液中的锌元素浓度。同时用大米粉标准品[GBW (E)080684a, 国家粮食局科学研究院]进行质量控制。

糙米植酸浓度的测定:参考 Vaintraub 等^[23]的方法并进行适当改进,具体方法为:称取烘干米粉样品 0.250 g ,加入 5 mL 0.7% HCl 振荡提取1 h ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)后离心($4000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 15 min),上清液经显色剂显色后用酶标仪(SpectarMAX PLUS384, 美国)测定 500 nm 波长下的吸光度值;根据植酸标准曲线计算样品中的植酸浓度。

相关指标计算方法:

糙米锌累积量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$) = 糙米产量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) × 糙米锌浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 1000

籽粒锌肥利用率 = [施锌处理籽粒锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) - 不施锌处理籽粒锌累积量($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$)] / 施锌量(以纯锌计)($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$) × 100%^[24-25]

1.4 数据分析

本实验数据用 Excel 2010 处理并进行图表绘制,用 SPSS (19.0) 进行裂裂区方差分析。

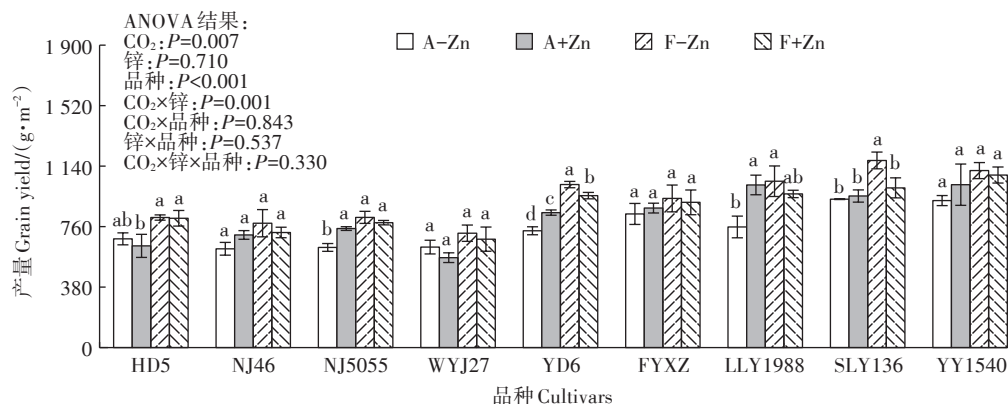
2 结果与分析

2.1 高 CO_2 浓度和叶面施锌对不同水稻品种糙米产量的影响

高 CO_2 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米产量的影响见图1。结果表明:供试品种糙米产量变幅为 $565.0 \sim 1175.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,品种间存在极显著差异。 CO_2 浓度升高使糙米产量从 $785.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 增加到 $908.4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,增幅为15.7%,差异达极显著水平;从不同品种看,高 CO_2 浓度环境下所有水稻品种糙米产量均呈增加趋势,增幅为7.8%~23.2%,其中淮稻5号、南粳5055、武运粳27、扬稻6号和深两优136分别增加23.2%、16.4%、17.0%、25.1%和15.6%,均达显著水平。花后叶面施锌对糙米产量无显著影响,但是不同 CO_2 条件下,叶面施锌对糙米产量的影响不同,表现为 CO_2 与锌处理之间存在显著的互作效应。具体表现为环境 CO_2 浓度下,叶面施锌使南粳5055、扬稻6号和隆两优1988糙米产量增加,而高 CO_2 浓度下,叶面施锌使相应品种糙米产量呈下降的趋势。

2.2 高 CO_2 浓度和叶面施锌对不同水稻品种糙米锌浓度的影响

高 CO_2 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米锌浓度的影响见图2。供试品种糙米锌浓度的变



A-Zn: 环境 CO₂ 浓度不施锌; A+Zn: 环境 CO₂ 浓度叶面施锌; F-Zn: 自由空气中 CO₂ 浓度升高不施锌; F+Zn: 自由空气中 CO₂ 浓度升高叶面施锌; HD5: 淮稻 5 号, NJ46: 南粳 46, NJ5055: 南粳 5055, WYJ27: 武运粳 27, YD6: 扬稻 6 号, FYXZ: 丰优香占, LLY1988: 隆两优 1988, SLY136: 深两优 136, YY1540: 甬优 1540。同一品种的不同字母表示处理间差异达 0.05 显著水平。下同

A-Zn: No zinc application under ambient CO₂ concentration; A+Zn: Foliar zinc application under ambient CO₂ concentration; F-Zn: No zinc application under free air CO₂ enrichment; F+Zn: Foliar zinc application under free air CO₂ enrichment; HD5, NJ46, NJ5055, WYJ27, YD6, FYXZ, LLY1988, SLY136 and YY1540 represent Huaidao 5, Nanjing 46, Nanjing 5055, Wuyunjing 27, Yangdao 6, Fengyouxiangzhan, Longliangyou 1988, Shenliangyou 136 and Yongyou 1540, respectively. Different letters within the same cultivar indicate significant difference among treatments at 0.05 level. The same below

图 1 高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米产量的影响

Figure 1 Effects of elevated CO₂ concentration and foliar zinc application after flowering on brown rice yield of different rice cultivars

幅为 20.7~39.6 mg·kg⁻¹, 品种间差异达极显著水平。高 CO₂ 浓度对糙米锌浓度的影响不显著, 不同品种趋势一致。与对照不施锌处理相比, 叶面锌处理使所有品种糙米锌浓度从 24.9 mg·kg⁻¹ 增加到 34.2 mg·kg⁻¹, 增幅为 37.3%, 差异达极显著水平; 从不同品种看, 花后叶面锌处理使淮稻 5 号、南粳 46、南粳 5055、武运粳 27、扬稻 6 号、丰优香占、隆两优 1988、深两优 136、甬优 1540 糙米锌浓度平均分别极显著增加 45.6%、41.6%、52.7%、31.8%、20.3%、32.8%、41.8%、34.8%、38.9%。方差分析表明, 锌处理与品种之间存在极显著互作, 而其他处理间均无互作效应。

2.3 高 CO₂ 浓度和叶面施锌对不同水稻品种糙米植酸浓度的影响

高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙

米植酸浓度的影响见图 3。供试品种糙米植酸浓度变幅为 7.4~10.5 g·kg⁻¹, 品种间差异达极显著水平。高 CO₂ 浓度对糙米植酸浓度的影响不显著, 不同品种趋势一致。花后叶面施锌对糙米植酸浓度的影响不显著, 不同品种趋势一致。方差分析表明, 各处理间均无显著互作效应。

2.4 高 CO₂ 浓度和叶面施锌对不同水稻品种糙米植酸与锌摩尔比的影响

锌的生物有效性常以植酸与锌的摩尔比来表示, 高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米植酸与锌摩尔比的影响见图 4。供试品种糙米植酸与锌摩尔比最小为 22.7, 最大为 45.1, 品种间存在极显著差异。高 CO₂ 浓度对糙米植酸与锌摩尔比无显著影响, 且不同品种趋势一致。花后叶面施锌使所有供

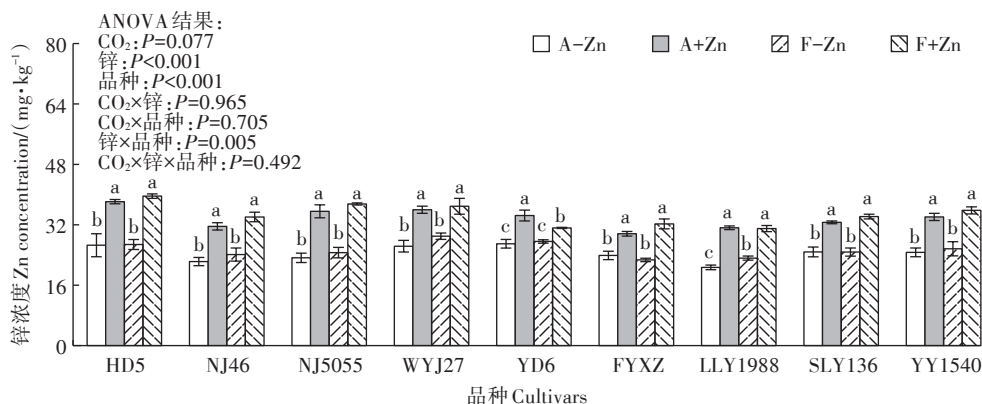


图 2 高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米锌浓度的影响

Figure 2 Effects of CO₂ and foliar zinc application after flowering on zinc concentration of brown rice of different rice cultivars

试品种糙米植酸与锌摩尔比平均降低 10.7, 降幅为 29.1%, 达极显著水平; 从不同品种看, 花后叶面锌处理使淮稻 5 号、南粳 46、南粳 5055、武运粳 27、扬稻 6 号、丰优香占、隆两优 1988、深两优 136、甬优 1540 糙米植酸与锌摩尔比平均分别降低 30.7%、29.3%、38.3%、25.6%、20.4%、23.3%、37.3%、28.5%、26.7%, 各品种均达显著水平。方差分析表明, 锌处理与品种之间存在显著互作, 而其他处理间均无互作效应。

2.5 高 CO₂ 浓度和叶面施锌对不同水稻品种糙米锌累积量的影响

高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米锌累积量的影响见图 5。供试品种糙米锌累积量变幅为 13.9~38.9 mg·m⁻², 品种间存在极显著差异。CO₂ 浓度升高使糙米锌累积量从 22.9 mg·m⁻² 增加到 27.0 mg·m⁻², 增幅为 17.9%, 差异达极显著水平; 从不同品种看, 高 CO₂ 浓度使供试品种淮稻 5 号、南粳 46、

南粳 5055、武运粳 27、扬稻 6 号、丰优香占、隆两优 1988、深两优 136、甬优 1540 糙米锌累积量平均分别增加 26.9%、20.8%、20.3%、24.3%、18.2%、10.2%、13.9%、16.9%、17.1%, 其中南粳 5055、深两优 136、武运粳 27、扬稻 6 号达到 $P<0.1$ 显著水平。花后叶面锌处理使糙米锌累积量从 21.0 mg·m⁻² 增加到 28.9 mg·m⁻², 增幅为 37.6%, 差异达极显著水平; 从不同品种看, 花后叶面施锌使对应品种糙米锌累积量平均分别增加 40.9%、42.0%、60.8%、20.9%、22.8%、34.7%、54.3%、24.9%、43.3%, 除武运粳 27 和扬稻 6 号外, 均达显著水平。方差分析表明, 各处理间均无显著的互作效应。

2.6 高 CO₂ 浓度对不同水稻品种糙米籽粒锌肥利用率的影响

籽粒锌肥利用率是评价锌肥利用率的重要指标。高 CO₂ 浓度对不同水稻品种糙米籽粒锌肥利用率的

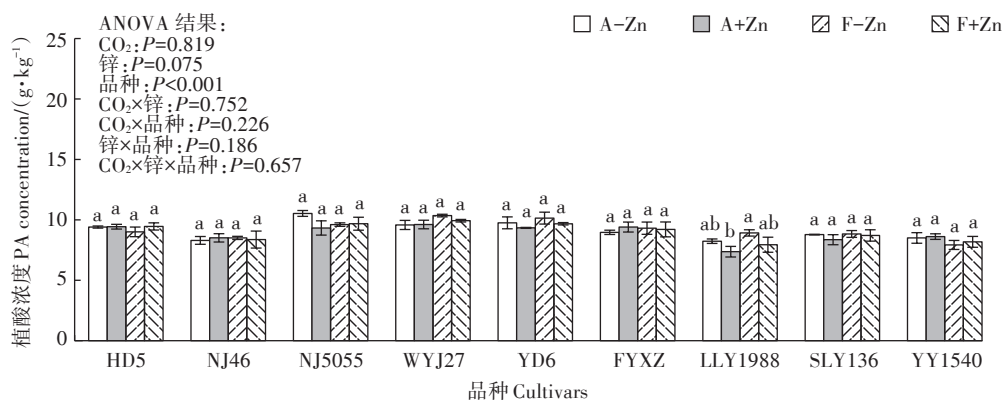


图3 高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米植酸浓度的影响

Figure 3 Effects of elevated CO₂ concentration and foliar zinc application after flowering on phytic acid concentration of brown rice of different rice cultivars

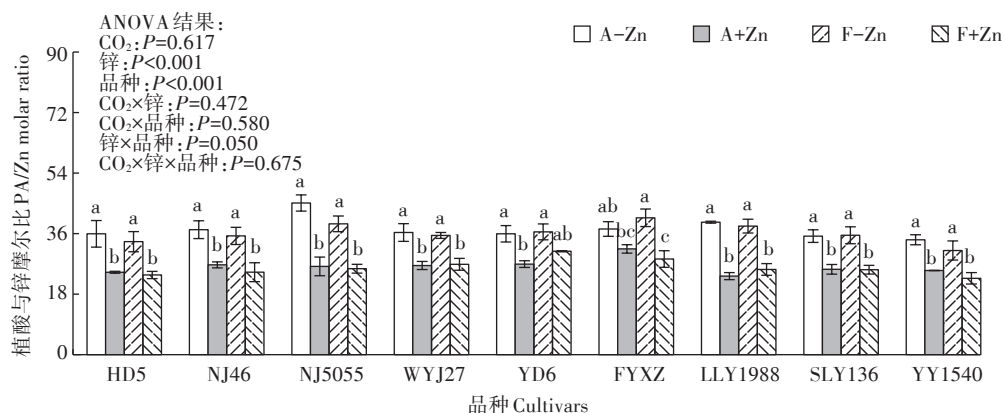


图4 高 CO₂ 浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米植酸与锌摩尔比的影响

Figure 4 Effects of elevated CO₂ concentration and foliar zinc application after flowering on the molar ratio of PA to zinc of brown rice of different rice cultivars

影响见图6。结果表明:供试品种糙米籽粒锌肥利用率变幅为0.9%~10.1%,品种间存在显著差异;其中武运粳27糙米籽粒锌肥利用率最低,甬优1540最高。高CO₂浓度使糙米籽粒锌肥利用率平均降低1.5个百分点,降幅为26.2%;从不同品种看,高CO₂浓度使扬稻6号和隆两优1988糙米籽粒锌肥利用率分别显著降低84.0%和65.4%,而其他品种变化不显著,表现为CO₂与品种之间存在微弱的互作效应($P<0.1$)。

3 讨论

本研究发现,FACE条件下大气CO₂浓度升高200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 使9个供试水稻品种产量平均增加15.7%,增产幅度与前人整合分析结果基本一致^[26-27]。水稻属于C₃作物,高CO₂浓度下C₃作物显著增产主要是与碳同化速率提高以及气孔导度下降导致水分利用率增加有关^[26]。此外,利用¹³C同位素标记研究发

现,CO₂浓度升高还可以使光合产物向籽粒转移的速度加快,从而增强作物的结实能力^[28]。与CO₂的增产效应不同,叶面施锌对水稻产量多无显著性影响^[5,17,22],但也有潜在缺锌土壤上水稻叶面施锌使水稻增产的报道^[29-31]。本研究花后叶面施锌对水稻产量没有显著影响,且各品种趋势基本一致(品种与锌没有互作),这与前人报道的在非缺锌土壤上叶面施锌对水稻^[22]和小麦^[32]无明显增产效应的结果相符合。

对于CO₂浓度升高对水稻锌元素浓度的影响,与前人得出的结果并不一致,多数报道锌浓度下降^[12],但也有一些研究发现植物锌浓度并没有显著下降。例如,开放式大田研究发现,大气CO₂浓度升高对糙米籽粒锌浓度无显著影响^[33]。这可能与各试验中植物、土壤和环境因素的不同有关。本研究9个水稻品种的结果表明,全生育期高浓度CO₂处理对糙米锌浓度的影响总体并未达到显著水平($P=0.077$)。最近的

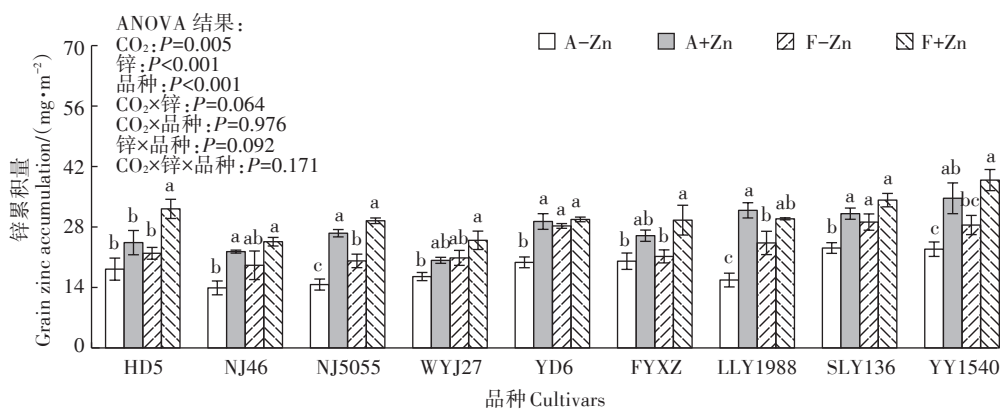
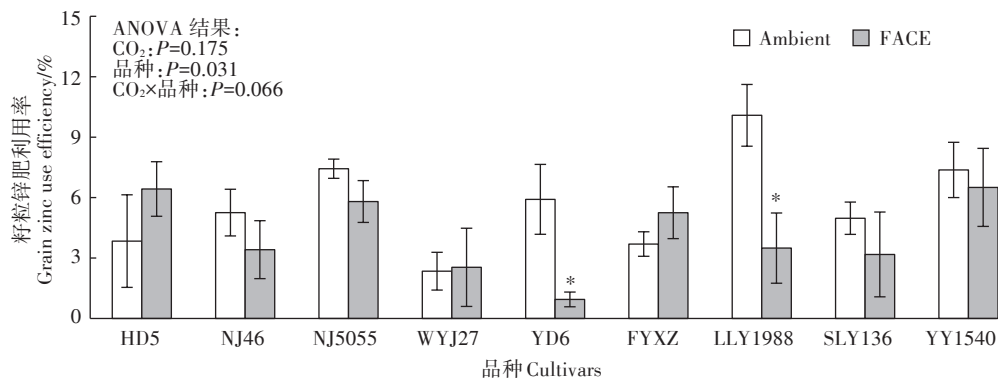


图5 高CO₂浓度和花后叶面施锌对不同水稻品种糙米锌累积量的影响

Figure 5 Effects of elevated CO₂ concentration and foliar zinc application after flowering on grain zinc accumulation of brown rice of different rice cultivars



Ambient: 环境CO₂浓度; FACE: 自由空气中CO₂浓度升高; *: $P<0.05$
Ambient: Ambient CO₂ concentration; FACE: Free air CO₂ enrichment; *: $P<0.05$

图6 高CO₂浓度对不同水稻品种糙米籽粒锌肥利用率的影响

Figure 6 Effects of elevated CO₂ concentration on grain zinc use efficiency of brown rice of different rice cultivars

一个水稻FACE研究综合了中日两国的试验发现,尽管总的CO₂效应达到显著,但18个水稻品种中有10个品种的稻米锌浓度无显著变化^[8]。因此,大气CO₂浓度升高对稻米锌营养的影响与供试品种密切相关,确切结论可能还需要更多试验的检验。

叶面施锌使水稻^[14]、小麦^[34]和玉米^[35]等作物籽粒中锌浓度显著增加。前人研究一致表明,花后叶面施锌肥是实现水稻籽粒锌浓度较大增幅的重要措施^[17,20]。这可能与种子发育过程中锌积累的模式有关,水稻开花之后的2周,籽粒锌积累迅速增加^[36]。本研究中,花后叶面施锌使糙米锌浓度由24.9 mg·kg⁻¹显著增加至34.2 mg·kg⁻¹,增幅达37.3%,与前人研究一致。叶面施锌能有效提高籽粒锌浓度可能与锌元素在韧皮部中的转运效率较高有关。Nishiyama等^[37]于水稻籽粒灌浆早期在剑叶施用⁶⁵Zn,发现锌主要通过韧皮部进入籽粒。Erenoglu等^[38]在小麦研究中采用⁶⁵Zn同位素标记手段,发现在缺锌条件下,锌很容易通过韧皮部从老的叶片和根转移到幼嫩的叶片和根中,改善缺锌小麦的营养状况。

籽粒锌浓度增幅与锌肥浓度、气候条件及水稻基因型等有关。付力成等^[29]利用两优培九和嘉花1号进行田间试验,喷施0.1%的ZnSO₄使两品种精米锌浓度分别显著增加了21.6%、25.0%;喷施0.2%的ZnSO₄分别使两品种精米锌浓度显著增加了69.7%、41.7%。本研究9个品种同年同地的试验发现,不同品种糙米锌浓度对叶面锌处理的响应是不同的,表现在锌处理与品种间互作达显著水平。进一步相关性分析发现,这种增幅差异可能与不同水稻品种本身的锌浓度差异有关。叶面施锌后糙米锌浓度的增幅与其对照(未施锌)水稻籽粒的锌浓度呈显著负相关($r=-0.655^{**}$, $n=54$),说明本身锌浓度较低的品种,叶面施锌效果更好。锌含量不同的水稻品种对叶面施锌的响应差异使筛选和培育高产富锌水稻成为可能。

植酸是种子中磷的主要储存化合物,以球状体的形式在蛋白贮藏液泡中积累,主要分布在水稻籽粒的糊粉层^[39]。植酸是种子中天然存在的锌营养限制物质,其与锌离子结合,降低了锌的生物有效性,抑制了锌在人体内的消化和吸收^[3]。大气CO₂浓度升高对作物植酸浓度影响的研究较少。Myers等^[12]通过对18个水稻品种的整合分析发现,高浓度CO₂使稻米植酸浓度平均仅增加1.2%,未达显著水平。本研究也得到与前人相同的结论,大气CO₂浓度升高使所有品种稻米植酸浓度增加1.1%,统计上未达显著水平。叶

面施锌对作物籽粒植酸浓度的影响,不同作物研究结果并不一致。例如,对小麦^[3]和大田豌豆^[40]的研究发现叶面施锌使籽粒植酸降低。对水稻的研究发现,多数情形下,叶面施锌对稻米植酸的影响较小^[13-14,22]。本研究中叶面施锌处理对糙米植酸浓度无显著影响且品种与锌处理间无互作,说明叶面施锌不会对糙米植酸浓度产生影响,所有供试品种间趋势一致。

能被人体利用的锌占摄入总锌的比例称为锌的生物有效性,通常用植酸与锌摩尔比来表示。大气CO₂浓度升高对水稻籽粒锌生物有效性的影响研究不多,结果多表现为降低或没有变化^[9]。前期单一品种的FACE试验发现,CO₂浓度升高使Ⅱ优084稻米植酸与锌摩尔比增加^[13],但对武运粳23没有影响^[14]。高浓度CO₂使本研究中9个供试品种糙米植酸与锌摩尔比略降低,但未达显著水平。进一步方差分析表明,CO₂处理与供试品种或锌处理之间均无互作效应,说明本试验条件下稻米生物有效性对CO₂的响应不受品种和叶面施锌的影响。从锌处理效应看,花后叶面施锌使稻米植酸与锌摩尔比平均值显著降低29.1%,与前人在水稻^[22]和小麦^[32]上的报道一致。相关性分析发现,叶面施锌后糙米锌浓度的增幅和糙米植酸与锌摩尔比的降幅呈显著正相关($r=0.729^{**}$, $n=54$),说明糙米锌浓度增加是导致锌有效性增加的主要原因。

籽粒锌肥利用率是评价锌肥利用效率的重要指标,前人研究发现叶面施锌的锌肥利用效率大于土壤施锌^[17,41]。小麦土壤施锌的锌肥利用效率不到1%,但叶面施锌的锌肥利用效率可达8%以上^[18]。本研究供试品种在环境CO₂浓度下糙米锌肥利用率平均为5.7%,高CO₂浓度下降至4.2%,平均降幅达26.2%。这一现象可能与高CO₂浓度下水稻叶片气孔导度下降有关^[26-27]。有研究发现,叶片气孔导度与叶面施锌效果密切相关,气孔导度大有利于叶面施锌后籽粒锌增加^[21]。水稻叶片气孔的张开有利于空气中的微小颗粒附着在气孔壁上,微小颗粒的存在有助于极性液体对气孔的浸润,使极性液体通过气孔进入叶片内部的过程更加顺畅,因此利于叶面锌肥的吸收^[42]。大气CO₂浓度升高对水稻籽粒锌肥利用率的影响品种间差异显著,总体而言籼型水稻的降幅(-47.9%, $P=0.044$)明显大于粳型水稻(-5.9%, $P=0.826$),其中扬稻6号和隆两优1988的籽粒锌肥利用率降幅最大,分别达到84.0%和65.4%(图6)。大气CO₂浓度升高条件下水稻籽粒锌肥利用率下降显著的水稻品种均为

籼型水稻,可能与籼型水稻在高CO₂浓度下气孔导度下降较大有关,Wang等^[27]整合分析结果显示,籼稻品种高CO₂浓度下气孔导度降幅约为粳稻2倍(30.1% vs 15.2%)。

4 结论

(1)水稻从移栽至成熟期大气CO₂浓度升高200 μmol·mol⁻¹处理增加了稻米产量,但是对稻米的锌营养影响较小。

(2)水稻花后叶面施锌明显改善稻米的锌营养水平,表现在糙米锌浓度和锌有效性显著增加,但增幅因品种而异。

(3)高CO₂浓度使籼型水稻扬稻6号和隆两优1988锌肥利用率显著下降,但对其他水稻品种锌肥利用率影响较小。

参考文献:

- [1] Maclean J L, Dawe D C, Hardy B, et al. Rice almanac. Source book for the most important economic activity on earth[M]. 3rd Edition. Wallingford: CABI Publishing, 2002.
- [2] Gibson R S. Zinc: The missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries[J]. *The Proceedings of the Nutrition Society*, 2006, 65(1): 51-60.
- [3] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant and Soil*, 2008, 302(1): 1-17.
- [4] White P J, Broadley M R. Biofortifying crops with essential mineral elements[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(12): 586-593.
- [5] Wei Y Y, Shohag M J, Yang X E, et al. Biofortification and bioavailability of rice grain zinc as affected by different forms of foliar zinc fertilization[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e45428.
- [6] IPCC. The physical science basis[R]//Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [7] 杨连新, 王云霞, 朱建国, 等. 开放式空气中CO₂浓度增高(FACE)对水稻生长和发育的影响[J]. *生态学报*, 2010(6): 1573-1585. YANG Lian-xin, WANG Yun-xia, ZHU Jian-guo, et al. What have we learned from 10 years of free-air CO₂ enrichment(FACE) experiments on rice? Growth and development[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010(6): 1573-1585.
- [8] Zhu C W, Kobayashi K, Loladze I, et al. Carbon dioxide(CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaq1012.
- [9] 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 Yun-xia, YANG Lian-xin. Response of rice quality to major climate change factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 822-833.
- [10] Yang X W, Tian X H, Lu X C. Foliar zinc fertilization improves the zinc nutritional value of wheat(*Triticum aestivum* L.) grain[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(66): 14778-14785.
- [11] World Health Organization. Trace element in human nutrition and health[R]. Geneva: World Health Organization, 1996.
- [12] Myers S S, Zanobetti A, Kloog I, et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition[J]. *Nature*, 2014, 510(7503): 139-142.
- [13] 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 San-ni, WANG Yun-xia, LAI Shang-kun, et al. Effects of elevated CO₂ concentration, nitrogen fertilization, planting density and foliar Zn application on rice Zn concentration and bioavailability of supper rice Ⅱ you 084 under FACE conditions[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(3): 289-296.
- [14] 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 San-ni, LAI Shang-kun, WU Yan-zhen, 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.
- [15] Cakmak 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.
- [16] Wu C Y, Lu L L, Yang X E, et al. Uptake, translocation, and remobilization of zinc absorbed at different growth stages by rice genotypes of different Zn densities[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(11): 6767-6773.
- [17] 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(1): 131-141.
- [18] 李孟华, 王朝辉, 王建伟, 等. 低锌旱地施锌方式对小麦产量和锌利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1346-1355. LI Meng-hua, WANG Zhao-hui, WANG Jian-wei, et al. Effect of Zn application methods on wheat grain yield and Zn utilization in Zn-deficient soils of dryland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, 19(6): 1346-1355.
- [19] 刘钢, 韩勇, 朱建国, 等. 稻麦轮作FACE系统平台Ⅰ. 系统结构与控制[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1253-1258. LIU Gang, HAN Yong, ZHU Jian-guo, et al. Rice-wheat rotational FACE platform I. System structure and control[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1253-1258.
- [20] Boonchuay P, Cakmak 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.
- [21] 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 Xin, HU Shao-wu, ZHANG Yan-liu, 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.
- [22] 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 Qing, WANG Juan, JING Li-quan, 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.
- [23] Vaintraub I A, Lapteva N A. Colorimetric determination of phytate in unpurified extracts of seeds and the products of their processing[J]. *Analytical Biochemistry*, 1988, 175(1): 227-230.
- [24] 张腾, 崔利利, 刘艳妮, 等. 施用纳米氧化锌对小麦籽粒锌含量和锌利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 7-14.
- ZHANG Teng, CUI Li-li, LIU Yan-ni, et al. Effects of ZnO NPs application on grain zinc content and zinc utilization of wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(4): 7-14.
- [25] Wang J, Mao H, Zhao H, et al. Different increases in maize and wheat grain zinc concentrations caused by soil and foliar applications of zinc in Loess Plateau, China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 135: 89-96.
- [26] Ainsworth E A. Rice production in a changing climate: A meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1642-1650.
- [27] Wang J Y, Wang C, Chen NN, et al. Response of rice production to elevated CO_2 and its interaction with rising temperature or nitrogen supply: A meta-analysis[J]. *Climatic Change*, 2015, 130: 529-543.
- [28] Sasaki H, Hara T, Ito S, et al. Effect of free-air CO_2 enrichment on the storage of carbohydrate fixed at different stages in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Field Crops Research*, 2007, 100(1): 24-31.
- [29] 付力成, 王人民, 孟杰, 等. 叶面锌、铁配施对水稻产量、品质及锌铁分布的影响及其品种差异[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24): 5009-5018.
- FU Li-cheng, WANG Ren-min, MENG Jie, et al. Effect of foliar application of zinc and iron fertilizers on distribution of zinc and iron, quality and yield of rice grain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(24): 5009-5018.
- [30] Pooniya V, Shivay Y S, Rana A, et al. Enhancing soil nutrient dynamics and productivity of Basmati rice through residue incorporation and zinc fertilization[J]. *European Journal of Agronomy*, 2012, 41: 28-37.
- [31] Ghasal P C, Shivay Y S, Pooniya V, et al. Zinc partitioning in basmati rice varieties as influenced by Zn fertilization[J]. *Crop Journal*, 2017, 6(2): 136-147.
- [32] Wang S X, Tian X H, Liu Q. The effectiveness of foliar applications of zinc and biostimulants to increase zinc concentration and bioavailability of wheat grain[J]. *Agronomy*, 2020, 10(2): 178.
- [33] 庞静, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由空气 CO_2 浓度升高对水稻营养元素吸收和籽粒中营养元素含量的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4): 350-354.
- PANG Jing, ZHU Jian-guo, XIE Zu-bin, et al. Effects of elevated CO_2 on nutrient uptake by rice and nutrient contents in rice grain[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(4): 350-354.
- [34] Zhang Y, Shi R, Rezaul K M, et al. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(23): 12268-12274.
- [35] 刘智龙. 土施和叶面施锌对玉米锌吸收和分布的影响研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2012: 25-27.
- LIU Zhi-long. The research of soil application and foliar zinc spray effecting on maize zinc absorption and distribution[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012: 25-27.
- [36] Iwai T, Takahashi M, Oda K, et al. Dynamic changes in the distribution of minerals in relation to phytic-acid accumulation during rice seed development[J]. *Plant Physiology*, 2012, 160(4): 2007-2014.
- [37] Nishiyama R, Tanoi K, Yanagisawa S, et al. Quantification of zinc transport via the phloem to the grain in rice plants (*Oryza sativa* L.) at early grain-filling by a combination of mathematical modeling and ^{65}Zn tracing[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59(5): 750-755.
- [38] Erenoglu B, Nikolic M, Romheld V, et al. Uptake and transport of foliar applied zinc (^{65}Zn) in bread and durum wheat cultivars differing in zinc efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 251-257.
- [39] Bohn L, Meyer A S, Rasmussen S K, et al. Phytate: Impact on environment and human nutrition. A challenge for molecular breeding[J]. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2008, 9(3): 165-191.
- [40] Poblaciones M J, Rengel Z. Soil and foliar zinc biofortification in field pea (*Pisum sativum* L.): Grain accumulation and bioavailability in raw and cooked grains[J]. *Food Chemistry*, 2016: 427-433.
- [41] Pooniya V, Shivay Y S. Enrichment of basmati rice grain and straw with zinc and nitrogen through ferti-fortification and summer green manuring under indo-gangetic plains of India[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2013, 36(1): 91-117.
- [42] Fernandez V, Eichert T. Uptake of hydrophilic solutes through plant leaves: Current state of knowledge and perspectives of foliar fertilization[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2009, 28(1): 36-68.