

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

周三妮¹, 赖上坤¹, 吴艳珍¹, 王云霞², 朱建国³, 王余龙^{1*}, 杨连新^{1*}

(1.扬州大学 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2.扬州大学 环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 3.中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 2013年利用稻田 FACE(Free Air CO₂ Enrichment)平台, 以武运粳 23 为供试材料, 主区 CO₂ 处理分别设置环境 CO₂ 浓度(Ambient)和高 CO₂ 浓度[比 Ambient 高(200±40)μL·L⁻¹]两个水平, 裂区锌处理分别设置对照(不施锌)和叶面施锌(齐穗后每隔 5 d 喷施 0.2% ZnSO₄, 共 3 次)处理, 研究常规粳稻籽粒不同部位锌浓度、植酸浓度以及[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比值对 CO₂ 和锌处理的响应。结果表明, 籽粒不同部位的锌浓度、植酸浓度以及[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比均表现为精米<糙米<糠层, 糠层部位分别是精米部位的 4.8、45.3 倍和 9.6 倍。大气 CO₂ 浓度升高对精米、糙米和糠层部位锌浓度均无显著影响, 但锌处理使对应部位锌浓度平均分别增加 8.5%、17.1%和 22.7%, 均达显著或极显著水平。CO₂ 和锌处理对稻米各部位植酸浓度均无显著影响。大气 CO₂ 浓度升高对稻米各组分[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比均无显著影响, 但锌处理使精米、糙米和糠层[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比平均分别下降 5.2%、12.9%和 18.7%, 糙米和糠层部分达显著水平。方差分析表明, 锌处理与部位间的交互对锌浓度、[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比的影响达极显著和显著水平。糙米和糠层中[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比与对应部位锌浓度均呈极显著负相关, 但与植酸浓度相关不密切。以上数据说明, 高浓度 CO₂ 环境下武运粳 23 稻米不同部位锌浓度及有效性无显著变化, 但结实期叶面喷施锌肥, 可改善该品种稻米不同部位特别是外层的锌营养水平。

关键词: 水稻; 二氧化碳; FACE; 叶面施锌; 锌浓度; 锌有效性; 植酸

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)09-1686-07 doi:10.11654/jaes.2014.09.003

Effects of Elevated CO₂ Concentration and Foliar Zn Application on Zn Concentration and Bioavailability in Different Parts of Grains of Rice Wuyunjing 23

ZHOU San-ni¹, LAI Shang-kun¹, WU Yan-zhen¹, WANG Yun-xia², ZHU Jian-guo³, WANG Yu-long^{1*}, YANG Lian-xin^{1*}

(1.Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Elevated CO₂ concentrations enhance plant growth and biomass production, but may also decrease concentrations of elements in plants, thus reducing rice quality. In this study, a conventional *japonica* rice variety Wuyunjing 23 was grown under two levels of CO₂ concentrations[ambient and (200±40)μL·L⁻¹ higher than ambient] in a Free Air CO₂ Enrichment(FACE) facility installed in a paddy field. Foliar Zn applications(0.2% ZnSO₄) were performed for 3 times at 5-day interval right after flowering. Rice seeds were divided into milled rice, brown rice and bran and subjected to analysis of Zn and phytate(PA) concentrations. Zinc and PA concentrations and PA to Zn molar ratios in different parts of rice grains were all in order of milled rice < brown rice < bran, and they were respectively 4.8 times, 45.3 times and 9.6 times higher in the bran than in milled rice. Elevated CO₂ had no significant effects on Zn concentrations in different parts of rice grains; while foliar Zn applications significantly increased Zn concentrations of milled rice, brown rice and bran by 8.5%, 17.1% and 22.7%, respectively. Phytate concentrations of milled rice, brown rice and bran were not affected by either CO₂ or Zn treatments. The molar ratio of

收稿日期: 2014-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(31171460 和 31101101); 国家自然科学基金重大国际合作项目(31261140364); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(11KJA210003); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_915); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 周三妮(1987—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事大气环境变化与农产品安全的研究。E-mail:zhoumymemory@163.com

* 通信作者: 杨连新 E-mail:lyang@yzu.edu.cn 王余龙 E-mail:ylwang@yzu.edu.cn

PA to Zn in different parts of rice grains was not affected by elevated CO₂, but decreased by Zn applications by 5.2% in milled rice, 12.9% ($P<0.05$) in brown rice and 18.7% ($P<0.05$) in bran. Zinc treatment and seed part interaction had significant effects on Zn concentrations and PA to Zn molar ratios. The molar ratio of PA to Zn in brown rice or bran was negatively correlated with Zn concentration, but not with PA concentration. Our results indicate that content and bioavailability of micronutrient Zn in edible part of rice Wuyunjing 23 were not affected by elevated CO₂, while foliar Zn application during grain-filling could improve Zn nutrition of rice grains, particularly in outer layer of rice grains.

Keywords: rice; elevated CO₂; FACE (Free Air CO₂ Enrichment); foliar Zn application; Zn concentration; Zn bioavailability; phytate

微量元素与人类的生命健康息息相关,由于谷物中微量元素含量较低,再加上饮食单一,造成多数以谷类为主食的欠发达地区和国家人口微量元素营养不良^[1-2]。锌作为人体必需营养元素,而且是人体最易缺乏的三种微量营养物质 Zn、Fe、V_A 之一^[3],其不能在代谢过程中分解和合成,必须从外界摄入,这使得如何提高谷类作物中锌含量及其生物有效性成为一个亟待解决的问题^[4-5]。

持续迅速上升的大气二氧化碳(CO₂)浓度使作物光合速率和水分利用效率提高,生物产量和籽粒产量增加,但有可能导致元素浓度的下降,进而加剧人类主食中锌含量的不足(或称隐性饥饿)^[6]。水稻是最重要的粮食作物之一,前人报道高浓度 CO₂ 环境下水稻籽粒锌浓度减小^[7-9]或不变^[10-12]或因外界条件而异^[13],对于高浓度 CO₂ 环境下水稻籽粒锌的生物有效性(或[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比)的影响,以及这种影响能否进行栽培调控,迄今为止只有一例这方面的报道^[9]。笔者曾于2012年通过大田 FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 试验以超级稻 II 优 084 精米和糙米部位为观察对象,结果发现大气 CO₂ 浓度升高 200 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 使该品种精米和糙米部位微量元素锌浓度下降且生物有效性降低,但通过栽培调控可不同程度地改善精米和糙米的锌营养水平,且糙米响应显著大于精米^[9]。这一差异是否主要是由糠层引起的? 前期研究发现高浓度 CO₂ 环境下常规水稻产量响应小于杂交水稻(包括超级稻)^[14-16],那么是否常规粳稻籽粒锌浓度对高浓度 CO₂ 的响应也小于超级稻? 另一方面,由于不同部位间锌浓度差异显著,笔者推测认为部位与处理之间可能存在交互。以上问题均需严格的田间试验来回答。

在前期研究的基础上,本研究于2013年依托同一 FACE 平台,以本地大面积种植的常规粳稻品种武运粳 23 为试验材料,设置 CO₂ 和锌肥双因子试验,同步测定精米、糙米和糠层部位的锌浓度、植酸浓度以及植酸与锌的摩尔比,研究常规粳稻品种稻米不同组分锌浓度和有效性对 CO₂ 和锌处理的响应,并与此前

研究进行比较分析,以期对未来高浓度 CO₂ 环境下稻作生产适应策略的制订提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验平台

本试验依托我国稻田 FACE (Free Air CO₂ Enrichment) 技术平台,该平台建于江苏省江都市小纪镇良种场试验田内(119°42'0"E, 32°35'5"N)。试验田土壤类型为清泥土,年均降水量 980 mm 左右,年均蒸发量大于 1 100 mm,年平均温度 14.9 °C,年日照时间大于 2 100 h,年平均无霜期 220 d,耕作方式为水稻—冬闲单季种植。土壤理化性质为:有机碳 18.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 N 1.45 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 P 0.63 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全 K 14.0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 P 10.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效 K 70.5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,砂粒(2~0.02 mm) 578.4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粉砂粒(0.02~0.002 mm) 285.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,粘粒(<0.002 mm) 136.5 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,容重 1.16 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,pH 7.2^[17]。平台共有 3 个 FACE 试验圈和 3 个对照(Ambient)圈。FACE 系统性能描述详见刘钢等报道^[18]。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 90 m,以减少 FACE 圈 CO₂ 释放对其他圈的影响。FACE 设计为正八角形,直径 12 m,平台运行时通过 FACE 圈周围的管道向中心喷射纯 CO₂ 气体,利用计算机网络对平台的 CO₂ 浓度进行监测控制,根据大气中 CO₂ 浓度、风向、风速、作物冠层高度的 CO₂ 浓度及其昼夜变化等因素自动调节 CO₂ 气体的释放速率及方向,使水稻全生育期 FACE 圈内 CO₂ 浓度保持比大气背景 CO₂ 浓度高(200±40) $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 。对照田块无 FACE 管道,环境条件与自然状态一致。

1.2 材料培育和处理

本研究于 2013 年以早熟晚粳稻武运粳 23 为供试品种,大田旱育秧,5 月 22 日播种,6 月 21 日移栽,双本栽插(每穴 2 株)。密度为 24 穴·m⁻²(行距 25 cm,株距 16.7 cm),水稻全生育总施 N 量为 22.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$,其中 40%(9 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)作基肥,30%(6.75 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)作分蘖肥(6 月 24 日),30%(6.75 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)作穗肥施用(8 月 2 日)。

磷肥(P_2O_5)和钾肥(K_2O)总施用量均为 $9\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 均作基肥施用。水分管理与当地一致: 6月21日—7月11日保持浅水层, 7月12日—7月25日控水搁田, 7月26日—8月28日保持水层(5 cm), 8月29日—9月24日间隙灌溉, 收获前10日断水。综合防治黑条矮缩病、纹枯病、稻曲病、稻瘟病、恶苗病和条纹叶枯病等江苏常见病虫害, 保证水稻正常生长发育。

本试验采用裂区设计, CO_2 浓度为主区, 锌处理为裂区, 重复3次。 CO_2 浓度设环境 CO_2 浓度(Ambient 约 $390\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 即对照圈)和高浓度 CO_2 [比 Ambient 高约(200±40) $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$, 即 FACE 圈], 试验共设3个对照圈, 3个 FACE 圈。锌处理设置对照(不施锌)和0.2%锌肥处理(以溶液中 Zn^{2+} 浓度计)两个水平。锌肥为硫酸锌溶液形式叶面施用($800\ \text{L}\cdot\text{hm}^{-2}$, 加入0.01%的 Tween 溶液), 每次 $80\ \text{mL}\cdot\text{m}^{-2}$, 即每次施锌量为 $1.6\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。喷锌时将处理植株(选代表性植株12穴左右)与对照植株用塑料薄膜隔开, 避免影响对照植株。处理始于8月28日(齐穗)开始, 每隔5 d 喷施1次, 共3次。于10月19日收获。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 锌浓度的测定

于成熟期各小区除去杂株病株, 根据普查结果每小区收获6穴, 手工脱粒, 晒干至恒重, 用风选仪去除空秕粒, 选取饱粒。将烘干饱粒样品置于干燥通风处或有空调的实验室内1周左右, 使样品的水分含量为 $13\%\pm 1\%$ 。根据农业部标准《NY 147—1988 米质测定方法》进行出糙, 取部分糙米出精, 收集糠层; 将精米、糙米分别磨粉。称取烘干样品0.1 g, 放入马弗炉 $480\ ^\circ\text{C}$ 灰化(14 h)。灰分冷却后用 $2\ \text{mL}\ 1:3(V/V)\ HNO_3$ 溶解, 静置后加入 $8\ \text{mL}$ 超纯水用定量滤纸过滤。最后用 IRIS 电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP, Thermo Elemental, 美国)测定滤液中锌浓度。

1.3.2 植酸浓度的测定

植酸浓度的测定参照 Lapteva^[9]并作适当改进, 具体如下: 称取烘干样品0.25 g左右, 用 $5\ \text{mL}\ 0.7\%$ HCl 提取1 h($25\ ^\circ\text{C}$, $150\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$), 离心($4000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 15 min)后取上清液。加入显色剂(由 $FeCl_3$ 和磺基水杨酸配置)混匀后离心($3400\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 10 min), 取上清液于 $500\ \text{nm}$ 下测定吸光度; 精米、糙米、糠层分别配制标准曲线, 根据标准曲线计算样品植酸浓度, 标准溶液由植酸钠(含9个结晶水)配制。

1.4 统计分析方法

本试验所有数据均以 Excel 进行数据处理和图

表绘制, 以 SPSS19.0 进行统计分析。各处理的比较采用最小显著差法(LSD), 显著水平设 $P<0.01$ 、 $P<0.05$, 分别用 **、* 表示。

2 结果与分析

2.1 稻米不同部位锌浓度

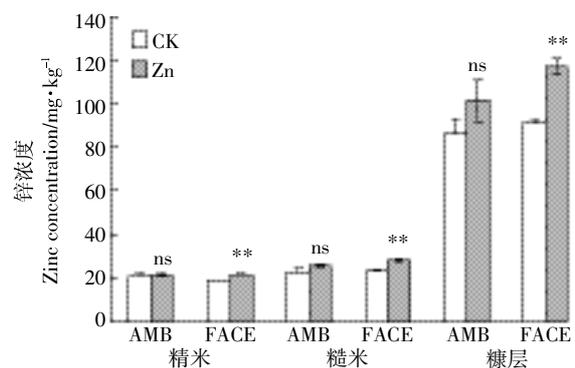
大气 CO_2 浓度升高和叶面施锌对武运粳 23 精米、糙米、糠层锌浓度的影响见表1和图1。结果表明, 所有处理精米、糙米、糠层锌浓度平均值分别为 20.8 、 24.9 、 $99.2\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 糠层部位锌浓度分别是精米、糙米部位的4.8倍和4.0倍, 部位间差异达极显著水平。大气 CO_2 浓度升高对武运粳 23 精米和糙米锌浓度没有影响, 同时使糠层部位锌浓度有增加趋势, 特别是施锌条件下, 但均未达到显著水平。与不施锌相比, 结实期叶面喷施锌肥使该品种精米、糙米、糠层

表1 武运粳 23 稻米中锌浓度的显著性检验

Table 1 Significance test for zinc concentrations of rice in different treatments

处理	df	Ⅲ 型平方和	均方	F 值	P 值
CO_2	1	114.1	114.1	3.063	0.093
Zn	1	668.8	668.8	17.949	0.000**
$CO_2\times Zn$	1	52.9	52.9	1.420	0.245
D	2	46 692.8	23 346.4	626.560	0.000**
$CO_2\times D$	2	219.2	109.6	2.942	0.072
$Zn\times D$	2	613.9	307.0	8.238	0.002**
$CO_2\times Zn\times D$	2	38.3	19.2	0.514	0.604

注: * 表示达显著水平; ** 表示达极显著水平。 CO_2 —高浓度 CO_2 处理; Zn—叶面喷锌; D—不同部位。下表同。



AMB—环境 CO_2 浓度; FACE—自由空气中 CO_2 浓度升高; CK—不施锌; Zn—叶面喷锌; ns—不显著; *—显著; **—极显著。下同

图1 大气 CO_2 浓度升高和叶面施锌对武运粳 23 精米、糙米、糠层中锌浓度的影响

Figure 1 Effects of CO_2 and foliar Zn applications on Zn concentrations of milled rice, brown rice and bran of rice

Wuyunjing 23

锌浓度均显著或极显著增加。对应部分锌浓度分别由19.9、23.0、89.0 mg·kg⁻¹增加到21.6、26.9、109.3 mg·kg⁻¹,增幅分别为8.5%、17.1%和22.7%。方差分析表明,锌处理与部位对锌浓度的影响达极显著水平,CO₂与部位间存在微弱的互作效应($P < 0.1$),而CO₂与锌处理间没有互作效应。

2.2 稻米不同部位植酸浓度

武运粳23稻米不同部位植酸浓度的变化见表2和图2。结果表明,3个测定部位间植酸浓度存在极显著差异。所有处理平均,精米、糙米、糠层植酸浓度分别为1.19、7.53和53.97 mg·g⁻¹,糠层植酸浓度分别是精米、糙米部位的45.3倍和7.2倍。高浓度CO₂使精米植酸浓度略减,同时使糙米和糠层中植酸浓度略增,但均未达显著水平。与不施锌相比,锌处理对精米、糙米、糠层植酸浓度均无显著影响。方差分析表明,CO₂×锌、CO₂×部位、锌×部位、CO₂×锌×部位对植酸浓度均无显著影响。

表2 武运粳23稻米中植酸浓度的显著性检验

Table 2 Significance test for phytate (PA) concentrations of rice in different treatments

处理	df	Ⅲ型平方和	均方	F值	P值
CO ₂	1	0.492	0.492	0.327	0.573
Zn	1	0.122	0.122	0.081	0.778
CO ₂ ×Zn	1	0.419	0.419	0.279	0.602
D	2	19 931.5	9 965.8	6 630.388	0.000**
CO ₂ ×D	2	0.759	0.379	0.252	0.779
Zn×D	2	0.937	0.469	0.312	0.735
CO ₂ ×Zn×D	2	1.171	0.586	0.390	0.682

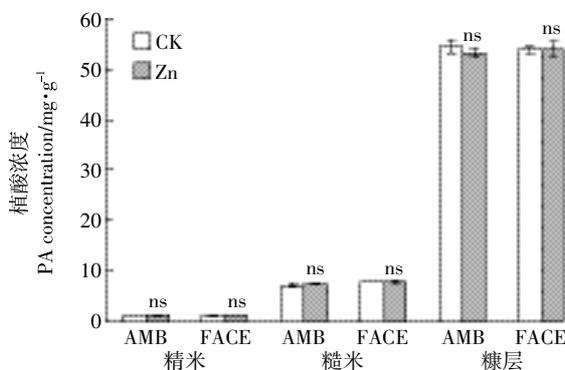


图2 大气CO₂浓度升高和叶面施锌对武运粳23精米、糙米、糠层中植酸浓度的影响

Figure 2 Effects of CO₂ and foliar Zn applications on phytate concentrations of milled rice, brown rice and bran of rice

Wuyunjing 23

2.3 稻米不同部位植酸与锌的摩尔比

通常以植酸与锌的摩尔比表示植物可食用部位锌的生物有效性,结果列于表3和图3。结果表明,不同部位间植酸浓度存在极显著差异。所有处理平均,精米、糙米、糠层中植酸与锌的摩尔比分别为5.7、30.0、54.8,糠层部分分别是精米和糙米部位的9.6倍和1.8倍。大气CO₂浓度升高使精米和糙米植酸与锌的摩尔比没有影响,但使糠层中植酸与锌摩尔比下降了10.3%($P = 0.16$)。锌处理使精米、糙米、糠层中植酸与锌的摩尔比分别下降5.2%、12.9%、18.7%,糙米和糠层部分均达显著水平。统计分析表明,CO₂×锌、CO₂×部位对植酸与锌摩尔比均无显著影响,CO₂×部位间存在微弱的互作效应($P \approx 0.1$),而锌×部位间存在显著的互作效应。

2.4 植酸与锌摩尔比和锌浓度、植酸浓度的相关性

对武运粳23糙米和糠层中植酸与锌摩尔比和对应部位锌和植酸浓度进行相关分析,结果示于图4。结果表明,糙米和糠层中植酸与锌摩尔比与锌浓度均呈线性负相关,相关系数分别为-0.807、-0.965($n =$

表3 武运粳23稻米中植酸与锌摩尔比的显著性检验

Table 3 Significance test for PA to Zn molar ratios of rice in different treatments

处理	df	Ⅲ型平方和	均方	F值	P值
CO ₂	1	23.6	23.6	1.286	0.268
Zn	1	248.4	248.4	13.533	0.001**
CO ₂ ×Zn	1	6.2	6.2	0.336	0.568
D	2	14 478.4	7 239.2	394.446	0.000**
CO ₂ ×D	2	86.6	43.3	2.359	0.116
Zn×D	2	187.5	93.8	5.109	0.014*
CO ₂ ×Zn×D	2	2.4	1.2	0.065	0.937

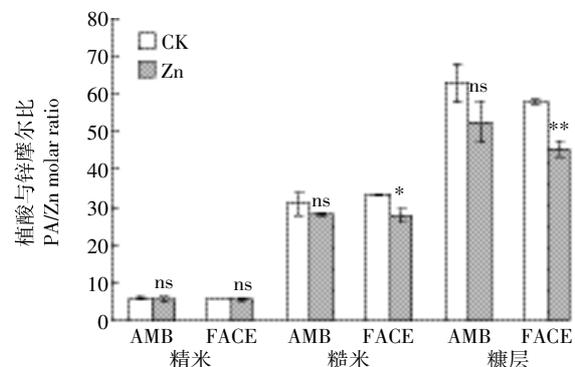


图3 大气CO₂浓度升高和叶面施锌对武运粳23精米、糙米、糠层中植酸与锌摩尔比的影响

Figure 3 Effects of CO₂ and foliar Zn applications on PA to Zn molar ratios of milled rice, brown rice and bran of rice Wuyunjing 23

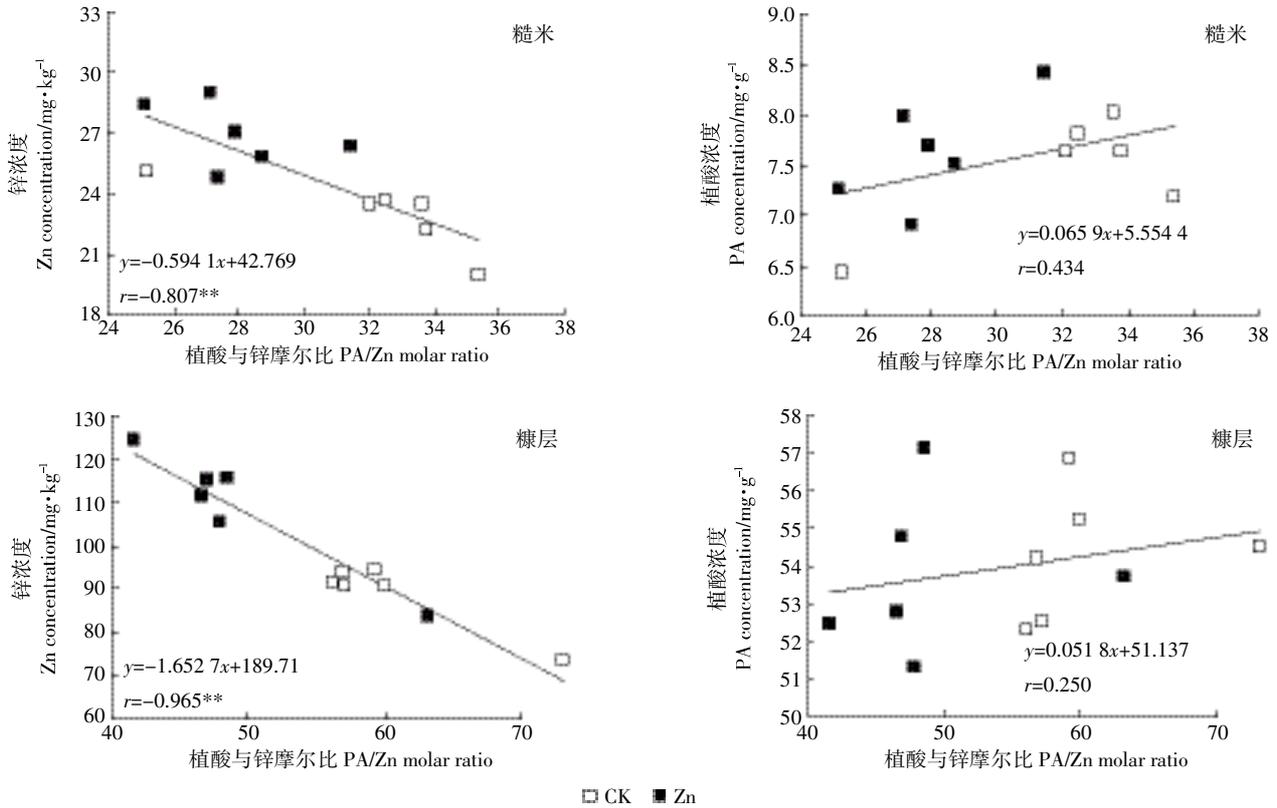


图4 武运粳23糙米和糠层中植酸与锌摩尔比与锌浓度或植酸浓度之间的相关性($n=12$)

Figure 4 Relationship between PA/Zn molar ratios and concentrations of Zn or PA in brown rice and bran of rice Wuyunjing 23 ($n=12$)

12),均达极显著水平。与此相反,糙米和糠层中植酸与锌摩尔比和植酸浓度均呈正相关,相关系数分别为0.434、0.250($n=12$),均未达显著水平。

3 讨论

本试验将武运粳23成熟籽粒出糙后、取部分糙米出精,收集糠层,分别测定精米、糙米和糠层3个部位的锌元素和植酸浓度。结果表明,稻米不同部位锌浓度存在明显差异(表1),最外面糠层部位的锌元素浓度(平均 $99\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)明显高于精米(平均 $21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),糙米部位则介于两者之间(图1)。Cakmak等^[4]在小麦上的双硫脲染色实验亦证明了糊粉层是锌含量最高的部位。糠层部位元素含量明显高于精米部位可能与其富含高浓度的蛋白质和植酸(见图3)有关^[20]。

前人报道大气 CO_2 浓度升高使稻米锌元素浓度减小^[7-8]、没有变化^[10-12]或因外界条件而异^[13]。利用FACE技术,笔者前期对超级稻Ⅱ优084的研究发现,高浓度 CO_2 使精米和糙米部分锌浓度显著下降^[9]。利用同样的FACE平台,本试验结果表明,大气 CO_2 浓度升至 $550\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ 对常规粳稻武运粳23精米、糙米和糠层部位锌浓度均无显著影响(表1),与该品种

千粒重无显著变化一致(数据未列出)。笔者前期研究发现,高浓度 CO_2 环境下常规水稻产量响应小于杂交水稻(包括超级稻)^[14-16],本课题组2013年试验亦发现高浓度 CO_2 环境下武运粳23产量增幅(+10%)小于超级稻Ⅱ优084(+39%),说明本试验没有观察到锌浓度的变化可能与该品种对 CO_2 较为钝感有关。

增施锌肥被认为是提高作物籽粒锌含量最直接的方法^[4,20]。籽粒发育早期锌处理大幅增加稻米锌浓度^[9,21],但对稻米不同部位响应差异的报道甚少。本研究证实结实期叶面喷锌肥使稻米锌浓度显著增加,同时不同部位的增幅存在显著差异,表现在锌处理与部位间存在明显的互作效应(表1):糠层部位的增幅(+23%)明显大于精米部位(+9%)。与文献[9]相比,锌处理对武运粳23精米和糙米的影响明显小于超级稻Ⅱ优084精米(+40%)和糙米部位(+63%)。这除了品种差异外,可能亦与武运粳23结实期叶面喷施锌肥的次数(3次)少于Ⅱ优084(4次)有关。

植酸是人体锌吸收的抑制剂^[22]。本试验测定发现,精米、糙米、糠层部位的植酸浓度存在极显著差异,糠层植酸浓度分别是精米、糙米部位的45倍和7倍,证实米糠(糊粉层)部位积累大量的植酸^[23]。前报

对超级稻Ⅱ优084的试验结果表明,FACE条件下高浓度CO₂和结实期叶面喷锌对精米和糙米部位的植酸含量均无显著影响^[9]。本文同一FACE平台的试验数据表明,CO₂和锌处理不仅对武运梗23精米和糙米部位的植酸含量没有影响,而且糠层部位植酸含量亦无显著变化。最新的小麦试验亦发现,结实期叶面喷锌对麸皮、次粉和面粉部位的植酸浓度均无显著影响,不同小麦品种趋势一致^[24]。

粮食作物可食用部位必须积累足够的锌,并且能被人体所吸收才能最大地发挥其营养价值。[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比通常用来表示粮食中锌的生物有效性^[25]。本研究表明,精米、糙米、糠层中[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比平均分别为5.7、30.0、54.8,糠层和精米部位相差近10倍(图3)。这说明,尽管籽粒外层富锌但其有效性明显低于内层。大气CO₂浓度升高对精米、糙米、糠层[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比均无显著影响,与文献^[9]中超级稻的表现不同。以上数据表明,大气CO₂浓度增高对武运梗23稻米不同部位的锌浓度及其有效性均无显著变化,但其他常规水稻品种是否亦有这种趋势,尚需试验证实。

前人对稻米不同部位锌生物有效性的研究甚少。与CO₂效应不同,花后叶面施锌使武运梗23稻米不同组分[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比明显下降(表3),其中糠层部位的降幅最大(-19%,*P*<0.05),糙米部位其次(-13%,*P*<0.05),精米部位最小(-5%,*P*>0.1),方差分析表明锌处理与稻米部位间存在显著的互作效应。进一步相关分析表明,稻米糙米和糠层部位[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比与锌浓度均呈极显著线性负相关,但与对应部位植酸浓度的相关程度不密切(图4)。这说明,锌处理使糙米和糠层部位[植酸]/[Zn²⁺]摩尔比显著下降主要是由于锌含量的上升(而非植酸的变化)而造成的,花后叶面施锌进入到籽粒中的锌可能主要以非植酸盐形态(即生物可利用的锌)存在(植酸浓度与锌浓度相关不密切,图略)。

4 结论

利用FACE技术,本研究发现本世纪中叶的大气CO₂浓度对常规粳稻武运梗23精米、糙米和糠层部位的锌含量及其生物有效性均无显著影响。与此不同,结实期叶面喷施锌肥可提高稻米不同组分的锌含量和生物有效性,特别是在糙米和糠层部位,但精米部位的响应则较小。通常糠层在稻米深加工过程中被去除,因此未来研究需要进一步寻找水稻灌浆过程中

锌在籽粒精米中积累的障碍部位,并通过多学科交叉研究找到破解这些障碍的办法,以提高锌进入籽粒精米(而非糠层中)的效率,进而持续有效地解决普遍存在的人类锌营养不足问题。

致谢:感谢中国科学院南京土壤研究所刘钢、唐昊冶和朱国兴老师对FACE系统的日常维护。

参考文献:

- [1] 龙新宪, 杨肖娥. 植物育种途径改善人类的铁、锌营养[J]. 广东微量元素科学, 1998, 5(9): 5-10.
LONG Xin-xian, YANG Xiao-e. Plant breeding to improve the human way of iron, zinc nutrition[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1998, 5(9): 5-10.
- [2] Michael B Z, Richard F H. Improving iron, zinc and vitamin A nutrition through plant biotechnology[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2002, 13: 142-145.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations(FAO). Preventing micronutrient malnutrition: A guide to food-based approaches [R]. Washington DC: International Life Science Institute, 1977: 105.
- [4] Cakmak I. Enrichment of cereal grains with zinc: Agronomic or genetic biofortification?[J]. *Plant Soil*, 2008, 302: 1-17.
- [5] Zhao F J, McGrath S P. Biofortification and phytoremediation[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2009, 12: 373-380.
- [6] Wang Y X, Frei M, Song Q L, et al. The impact of atmospheric CO₂ concentration enrichment on rice quality: A research review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31: 277-282.
- [7] Seneweera S P, Blakeney A, Milham P, et al. Influence of rising atmospheric CO₂ and phosphorus nutrition on the grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* cv. Jarrah)[J]. *Cereal Chemistry*, 1996, 73: 239-243.
- [8] Seneweera S P, Conroy J P. Growth, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO₂ and phosphorus nutrition[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997, 43: 1131-1136.
- [9] 周三妮, 王云霞, 赖上坤, 等. FACE情形下二氧化碳、施氮量、密度和锌肥对Ⅱ优084稻米锌含量及有效性的影响[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 Zn content and bioavailability of super rice II-you084 under FACE condition[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2014, 28(3): 289-296.
- [10] Loefflering M, Kim H Y, Kobayashi K, et al. The impact of elevated CO₂ on the elemental concentrations of field-grown rice grains[J]. *Field Crops Research*, 2004, 88(2-3): 279-286.
- [11] Yang L X, Wang Y L, Dong G C, et al. The impact of free-air CO₂ enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102: 128-140.
- [12] 庞静, 朱建国, 谢祖彬, 等. 自由空气CO₂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 pCO₂ on nutrient uptake by rice and nutrient contents in rice grain[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2005, 19(4):350-354.
- [13] Wang Y X, Song Q L, Frei M, et al. Effects of elevated ozone, carbon dioxide, and the combination of both on the grain quality of Chinese hybrid rice[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 189:9-17.
- [14] Liu H J, Yang L X, Wang Y L, et al. Yield formation of CO₂-enriched hybrid rice cultivar Shanyou 63 under fully open-air field conditions [J]. *Field Crops Research*, 2008, 108:93-100.
- [15] Yang L X, Liu H J, Wang Y X, et al. Yield formation of CO₂-enriched inter-subspecific hybrid rice cultivar Liangyoupeijiu under fully open-air field condition in a warm sub-tropical climate[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129:193-200.
- [16] Yang L X, Liu H J, Wang Y X, et al. Impact of elevated CO₂ concentration on inter-subspecific hybrid rice cultivar Liangyoupeijiu under fully open air field conditions[J]. *Field Crops Research*, 2009, 112:7-15.
- [17] 任思荣, 朱建国, 李辉信, 等. 大气 CO₂ 浓度升高对水稻伤流液中矿质元素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5):1849-1853. REN Si-rong, ZHU Jian-guo, LI Hui-xin, et al. Effect of free-Air CO₂ enrichment(FACE) on mineral elements of xylem sap of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1849-1853.
- [18] 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.
- [19] Lapteva N A. Colorimetric determination of phytate in unpurified extracts of seeds and the products of their processing[J]. *Analytical Biochemistry*, 1988, 175:227-230.
- [20] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, et al. Biofortification and localization of zinc in wheat grain[J]. *Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58:9092-9102.
- [21] Mabesa R L, Impa S M, Grewal, 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.
- [22] Schlemmer U. Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis [J]. *Molecular Nutrition Food Research*, 2009, 53:330-375.
- [23] 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性[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(2):215-218. WANG Hui, LI Mao-bai, ZHANG Jian-ming, et al. Phytic acid content in different parts of grain and its correlation with rice quality traits[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2009, 23(2):215-218.
- [24] 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有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1085-1091. QI Yi-tao, ZHOU San-ni, ZHANG Qing, 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.
- [25] Morris E R, Ellis R. Usefulness of the dietary phytic acid/zinc molar ratio as an index of zinc bioavailability to rats and humans[J]. *Biological Trace Element Research*, 1989, 19:107-117.