

蒋 倩,朱建国,朱春梧,等. 大气 CO₂浓度升高对糙米和精米中矿质营养元素含量的影响[J].江苏农业学报,2018,34(6):1217-1224.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.06.003

大气 CO₂ 浓度升高对糙米和精米中矿质营养元素含量的影响

蒋 倩^{1,2}, 朱建国¹, 朱春梧¹, 刘 钢¹, 徐 习^{1,2}, 张继双^{1,2}

(1.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室,江苏 南京 210008; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 利用自由空气 CO₂浓度升高(Free-air CO₂ enrichment,FACE)平台,在 CO₂浓度高于对照 200 μmol/mol 的条件下,以籼稻 IYY084 和粳稻 WYJ21(23)为材料,连续 2 年(2012 和 2013 年)研究其糙米与精米的品质性状(N、K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量等)对大气 CO₂浓度升高的响应。结果表明:CO₂浓度升高条件下,水稻糙米、精米产量连续 2 年显著增加,其中,IYY084 2 年平均分别增产 37.1%、39.6%,WYJ21(23)则增产 10.9%、9.2%。CO₂浓度升高处理的 IYY084 糙米、精米 N 含量 2 年平均分别降低 11.1%、7.7%,而 WYJ21(23)分别降低 4.2%、5.9%。品种效应显著,IYY084 糙米、精米产量及其 N 含量均高于 WYJ21(23)。CO₂浓度升高对籼稻和粳稻品种糙米、精米 K、P、Mg、Ca、Ni、Mo 含量没有显著影响。此外,籼稻与粳稻品种糙米中矿质元素含量平均值是精米的 1.10(N)~9.89(Mg)倍。与 WYJ21(23)相比,IYY084 糙米、精米产量及 N 含量对 CO₂浓度升高的响应更明显,并且糙米中矿质元素含量对 CO₂浓度升高的响应强于精米。因此,糙米、精米搭配食用是缓解大气 CO₂浓度升高引起的食用稻米人群部分矿质营养匮乏问题的有效措施之一。

关键词: FACE; 水稻; 糙米; 精米; 矿质营养元素; 加工方式

中图分类号: S162.5⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2018)06-1217-08

Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the content of mineral nutrient elements in brown rice and white rice

JIANG Qian^{1,2}, ZHU Jian-guo¹, ZHU Chun-wu¹, LIU Gang¹, XU Xi^{1,2}, ZHANG Ji-shuang^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this study, indica IYY084 and japonica WYJ21(23) (*Oryza sativa* L.) were grown at a free-air CO₂ enrichment (FACE) experimental facility across two growth seasons (2012–2013) under ambient and elevated CO₂ conditions. The target CO₂ of the FACE plots was 200 μmol/mol above that of ambient. Effects of elevated CO₂ on N, K, P, Ca, Mg, Ni and Mo concentrations in both brown rice and white rice of indica and japonica genotypes were investigated. The results showed that the yields of brown rice and white rice were increased after exposed to elevated CO₂ for two years. Averagely, the

yields of brown and white rice were increased by 37.1%, 39.6% for IYY084, and by 10.9%, 9.2% for WYJ21(23). Under the treatment of elevated CO₂, the average N concentration of brown rice and white rice of IYY084 in two years decreased by 11.1%, 7.7%, separately, and those of WYJ21(23) declined by 4.2%, 5.9%, respectively. In addition, significant cultivar effects were found, the yield and N concentration of brown and white rice in IYY084 were

收稿日期:2018-09-06

基金项目:国家自然科学基金项目(31870423);国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(31261140364);科技部国际合作与交流项目(2010DFA22770)

作者简介:蒋 倩(1980-),女,贵州思南人,博士,高级工程师,主要从事气候变化对水稻生长与稻米品质影响的研究。(E-mail)qjiang@issas.ac.cn

通讯作者:朱建国,(E-mail)jgzhu@issas.ac.cn

higher than those in WYJ21(23). No significant CO_2 effects were found on K, P, Mg, Ca, Ni and Mo concentrations in brown rice and white rice of the tested cultivars. Moreover, the average concentrations of tested mineral elements in brown rice were 1.1 (N) to 9.89 (Mg) times greater than those in white rice. In short, the responses of yield and N concentration of brown and white rice to elevated CO_2 of IY084 were much higher than those of WYJ21(23). Besides, the responses of mineral elements to elevated CO_2 in brown rice were stronger than those in white rice. Obviously, the matching use of brown rice and white rice is an effective measure to alleviate the problem of partial mineral nutrient deficiency caused by elevated atmospheric CO_2 concentration in the future.

Key words: free-air CO_2 enrichment; *Oryza sativa* L.; brown rice; white rice; mineral nutrient elements; processing methods

目前,大气 CO_2 浓度已由工业革命前的 280 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 增加至 410 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 并且每年以 1.56 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 的增长率持续上升^[1], 预计本世纪中叶将达到 550 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ^[2]。大气 CO_2 直接参与植物的光合作用,其浓度的增加提高了植物叶片光合速率,促进了碳水化合物的合成和干物质的积累,进而不同程度地增加 C3 作物,如小麦、水稻等的生物产量和经济产量^[3-7]。水稻是世界上最重要的农作物之一,全世界约有一半的人口以大米为主食。因此,有关水稻产量、品质等对未来 CO_2 浓度升高响应的研究具有重要意义。

有研究表明, CO_2 浓度升高条件下,水稻籽粒产量增加的主要原因是有效分蘖数与颖花数的增加^[8]。除了产量以外, CO_2 浓度升高对稻米的外观品质、淀粉含量以及矿质元素含量的影响已引起广泛关注^[9-11]。庞静等在中国水稻 FACE (Free-air CO_2 enrichment) 平台的研究结果表明, CO_2 浓度升高显著降低粳稻武香粳 14 籽粒的 N、K 含量,但对 P、Ca、Mg 含量并无显著影响^[12]。日本 FACE 平台的研究者发现,大气 CO_2 浓度升高条件下,粳稻 (Akita-komachi) 精米的蛋白质含量显著降低^[9],而糙米中 K、P、Mg、Mo 等含量有增加趋势,但差异并不显著^[13]。在生长室 (Growth chamber, GC) 条件下, CO_2 浓度升高显著降低水稻品种 (Jarrah) 糙米的 N 含量 (在低 P 供给下) 和 P 含量 (在中 P 条件下)^[14]。此外,Loladze 通过整理文献并分析数据发现,19 种草本植物、11 种树种以及 5 种小麦的 P、Mg、Ca 含量对高 CO_2 浓度的响应均表现为显著下降,但 K 含量增加^[15]。因此,不同试验平台 (FACE、GC)、水稻品种、种植方式 (盆栽与大田) 以及加工程度 (籽粒、糙米、精米) 都可能引起研究结论的差异^[16]。目前,大部分有关 CO_2 浓度升高对水稻品质影响的研究对象为糙米。然而,日常生活中,

人们主要食用精米。由于加工精度高,富含蛋白质、脂肪、维生素和矿物质的胚和皮层去掉的更多,因此精米的营养物质含量明显低于糙米^[17]。在大气 CO_2 浓度升高条件下,有关籼稻和粳稻 2 种类型水稻的糙米与精米中 N、K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量的响应差异还鲜有报道。有研究结果表明, CO_2 浓度升高条件下,籼稻 IY084 的产量增加幅度超过粳稻 WYJ21 (23) 1 倍^[7,18]。本试验拟利用中国水稻 FACE 平台,以这 2 种水稻品种为研究对象,探讨连续 2 年大气 CO_2 浓度增加 200 $\mu\text{mol}/\text{mol}$ 的条件下,其糙米、精米的品质性状 [包括加工品质和矿物质品质 (N、K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量)] 的响应及其差异。旨在更加准确地分析将来大气 CO_2 浓度升高对籼稻、粳稻品种糙米和精米品质性状的影响程度,从而为人们健康饮食提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地区及平台概况

中国水稻 FACE 平台位于江苏省江都市小纪镇马陵村良种场 (32°35'5"N, 119°42'0"E), 试验区年均气温约 15 °C, 年降雨量 980 mm, 年均日照时间 2 100 h, 年无霜期 220 d。土壤类型为砂浆土, 其耕作层基本性质为 pH6.8、全氮 1.45 g/kg、全磷 0.63 g/kg、全钾 14.00 g/kg、有效磷 10.10 mg/kg、速效钾 70.50 mg/kg、有机碳 18.40 g/kg^[19]。

该平台设置了 3 块 CO_2 浓度升高区域和 3 块对照区域,各区域之间距离达到 90 m 以避免相互干扰。在水稻整个生育期,通过数字控制系统实现 CO_2 浓度升高区域 CO_2 浓度始终高出对照区域 200 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 并且控制偏差在 10% 以内。各区域的光照、降雨、通风等与自然环境完全一致。FACE 平台的设计原理与运行模式详见参考文献 [20]。根据实际监测结果,2012 年与 2013 年在水稻生长期 CO_2 浓度升高区域的

CO₂平均浓度分别为 571 μmol/mol、588 μmol/mol,而空气温度、相对湿度年平均值分别为 24.4 °C、92.9% (2012 年)和 24.8 °C、91.9% (2013 年)。

1.2 试验设计

供试水稻品种为杂交籼稻 IY084 (*Oryza sativa* L.)和粳稻 WYJ21(23) (*Oryza sativa* L.)。2012 和 2013 年,分别于 5 月 18 日、5 月 21 日进行大田育秧,于 6 月 20 日和 6 月 22 日人工移栽,行距 25.0 cm,株距 16.7 cm,每穴 2 株。采用氮磷钾复合肥(15-15-15)和尿素(含氮 46.7%)结合施用。氮施用量 22.5 g/m²,其中 40%用作基肥,其余平均分配于水稻分蘖期和抽穗期施用。磷钾肥均用作基肥,施用量均为 9.0 g/m²。在移栽前 1 d 施用基肥,追施分蘖肥和穗肥日期分别是 2012 年 6 月 27 日和 7 月 31 日,2013 年 6 月 28 日和 7 月 25 日。灌溉排水,病虫害防治等田间管理与大田保持一致。

1.3 样品采集与分析

水稻分别于 2012 年 10 月 17 日(IY084、WYJ21)与 2013 年 10 月 11 日(IY084)、2013 年 10 月 24 日(WYJ23)完熟并收获。避开每个小区的边缘区域,采集 2 m²试验区域样品。随后,经自来水和纯水清洗,烘干至恒质量(70 °C,48 h),称质量。稻谷混匀后,取部分稻谷通过砻谷机(JLG-II,中储粮)脱壳而得到糙米。为了确保脱糠效率一致,称取等质量糙米再经碾米机(JNM-III,中储粮)脱糠层获得精米。然后,用球磨仪(MM400, Retsch)分别磨成待测粉末样品。

样品经烘干后(70 °C,6 h),置于干燥器中冷却至室温。采用元素分析仪(Vario MAX CNS, Elementar)测定 N 含量。称取 0.5 g(精确至 0.000 1 g)样品于石墨消解管中,纯水润湿,注入 8 ml HNO₃(GR)冷消化。次日,加入 2 ml HClO₄(GR),经全自动石墨控温消解系统(Deena II, Thomas Cain)消化,直至消化液冒白色烟雾,剩余体积约 1 ml,并且清澈即可。最后,用超纯水定容至 50 ml。采用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES, Optima 8000, PerkinElmer)测定 K、P、Ca、Mg 含量。采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, 7700x, Agilent)测定 Ni、Mo 含量。用标准样品 GBW10043(GSB-21)辽宁大米实现测试过程的质量控制。

1.4 数据处理

采用 Office2013、SPSS16.0 软件进行数据处理

与统计分析。选用双因素方差分析方法(Two-way Analysis of Variance)对 CO₂、品种及其交互作用进行统计分析(**、*、+ 分别表示 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.10$)。矿质元素含量变化百分数 = [(高[CO₂]处理-对照)/对照] × 100%,负值表示降低百分数,而正值表示增加百分数。

2 结果与分析

2.1 糙米、精米产量对 CO₂ 浓度升高的响应

从表 1 可知,2012 和 2013 年籼稻 IY084 糙米率、精米率分别为 81.6%~82.4%、85.3%~88.4%,粳稻 WYJ21(23)则分别为 83.3%~85.5%、83.5%~87.0%。双因素方差分析结果显示,CO₂浓度显著影响 2012 年水稻的糙米率($P < 0.01$)与精米率($P < 0.01$),其在 CO₂浓度升高条件下显著降低。同样,品种效应显著影响两年的糙米率($P < 0.01$, 2012; $P < 0.01$, 2013)和精米率($P < 0.05$, 2012; $P < 0.10$, 2013)。糙米率 WYJ21(23)高于 IY084,而精米率却相反(表 1、表 2)。

此外,糙米产量($P < 0.05$, 2012; $P < 0.01$, 2013)与精米产量($P < 0.05$, 2012; $P < 0.01$, 2013)对 CO₂浓度升高有显著响应。CO₂浓度升高条件下,籼稻 IY084 糙、精米产量 2 年平均升高分别达到 37.1%、39.7%;而粳稻 WYJ21(23)糙、精米产量增加幅度较小,2 年平均分别增产 10.9%、9.2%。此外,品种效应显著影响水稻糙米($P < 0.05$, 2012)和精米产量($P < 0.05$, 2012; $P < 0.10$, 2013),IY084 高于 WYJ21(23)(表 1、表 2)。

2.2 糙米、精米矿质营养元素含量对 CO₂ 浓度升高的响应

由图 1 与图 2 可见,2012 和 2013 年籼稻和粳稻品种糙米矿质营养元素含量明显高于精米。IY084 糙米 N、K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量 2 年平均分别比精米高 1.10、3.62、4.29、2.02、9.20、1.45 和 1.24 倍,WYJ21 糙米 N、K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量 2 年平均分别比精米高 1.18、3.29、4.73、2.40、9.89、1.33 和 1.09 倍。

从图 1、图 2 结合表 3 可知,CO₂浓度升高显著影响水稻糙米($P < 0.10$, 2012; $P < 0.01$, 2013)和精米($P < 0.05$, 2012 与 2013)中 N 含量。与对照相比,CO₂浓度升高处理下,IY084 糙米和精米 N 含量分别降低 7.9%、3.9% (2012 年)以及 14.3%、11.4% (2013 年)。与之相比,WYJ21(23)糙米和

精米 N 含量降低幅度较小, 分别为 3.4%、4.4% (2012 年) 以及 5.0%、7.4% (2013 年)。此外, 品种效应也显著影响水稻糙米 ($P < 0.05$, 2012; $P < 0.01$, 2013) 和精米 ($P < 0.01$, 2012 与 2013) 中 N

含量, 且籼稻 IIY084 糙米、精米中 N 含量显著高于粳稻 WYJ21(23)。同样, CO_2 与品种交互作用显著影响糙米 N 含量 ($P < 0.10$, 2012; $P < 0.05$, 2013), 但是没有显著影响精米中 N 含量(表 3)。

表 1 CO_2 浓度升高对水稻 IIY084、WYJ21(23) 糙米率、精米率以及糙米产量、精米产量的影响

Table 1 Effects of elevated CO_2 on the percentage of brown rice and white rice and the yields for IIY084 and WYJ21(23)

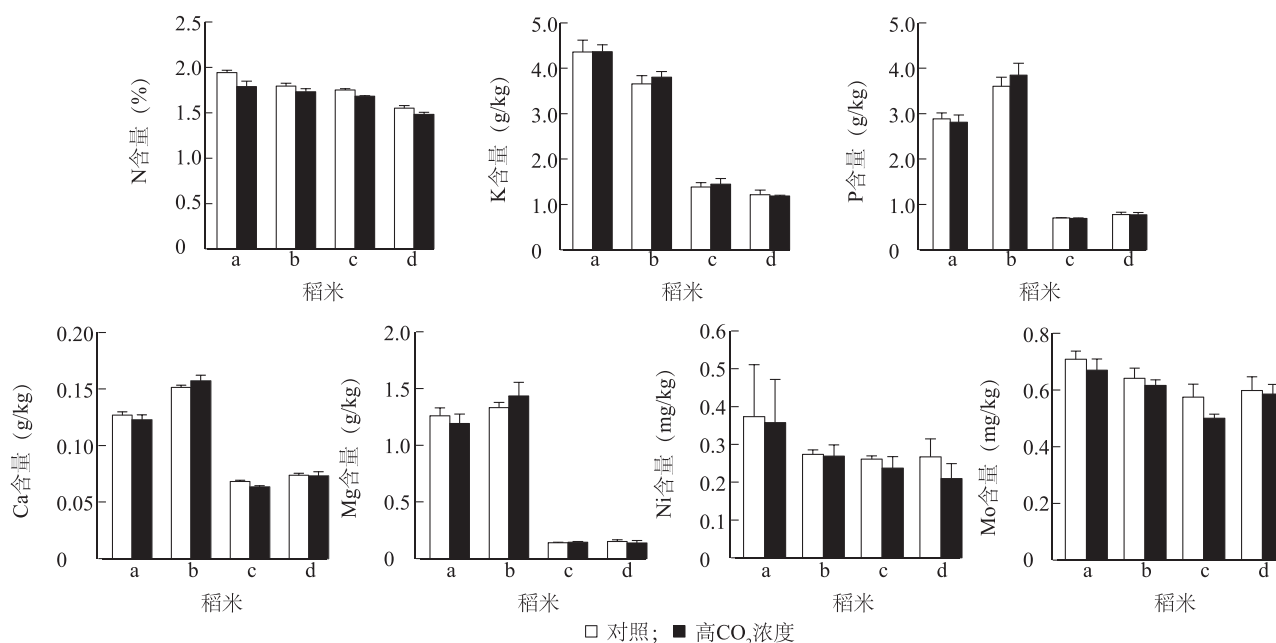
品种	处理	2012 年				2013 年			
		糙米率 (%)	精米率 (%)	糙米产量 (g/m^2)	精米产量 (g/m^2)	糙米率 (%)	精米率 (%)	糙米产量 (g/m^2)	精米产量 (g/m^2)
IIY084	对照	81.7±0.1	87.7±0.3	717±37	629±31	82.0±0.6	85.3±4.4	783±28	668±54
	高 CO_2 浓度	81.6±0.2	87.7±0.5	1 001±182	879±164	82.4±0.1	88.4±0.2	1 055±54	933±50
WYJ21(23)	对照	85.5±0.4	87.0±1.1	700±12	610±10	83.4±0.4	84.0±0.9	817±63	686±46
	高 CO_2 浓度	84.1±0.3	83.5±2.6	741±15	618±31	83.3±0.2	84.7±1.2	948±44	803±47

表 2 CO_2 浓度升高对水稻 IIY084、WYJ21(23) 糙米率、精米率以及糙米产量、精米产量影响的方差分析

Table 2 Variance analysis for the effect of elevated CO_2 on the percentage of brown rice and white rice and the yield for IIY084 and WYJ21(23)

项目	2012 年				2013 年			
	F 值				F 值			
高 CO_2 浓度	20.3 **	4.4 *	9.1 *	6.9 *	0.9	2.1	50.9 **	44.3 **
品种	400.9 **	8.7 *	6.7 *	8.1 *	27.0 **	3.6 *	1.7	3.9 *
高 CO_2 浓度×品种	18.5 **	4.5 *	5.1 *	6.0 *	1.2	0.9	6.3 *	6.7 *

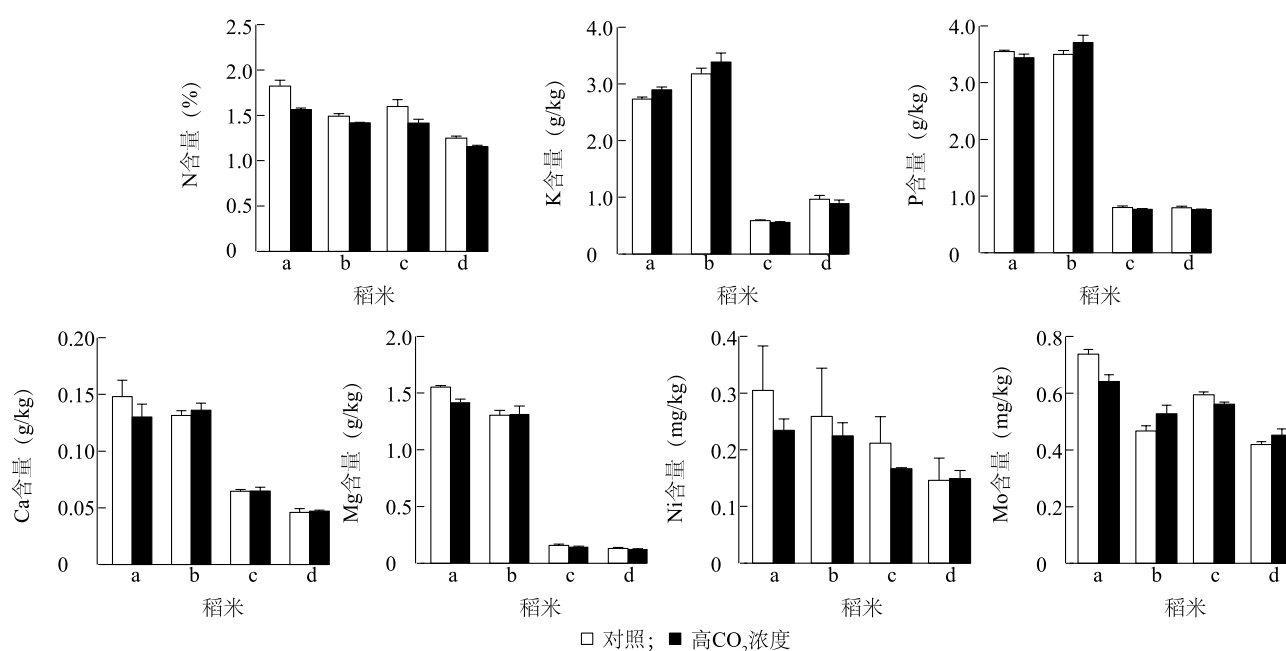
**、*、+ 分别表示差异达到 0.01、0.05、0.10 显著水平。



a: IIY084 糙米; b: WYJ21 糙米; c: IIY084 精米; d: WYJ21 精米。

图 1 2012 年水稻 IIY084、WYJ21 糙米与精米中矿质元素含量对 CO_2 浓度升高的响应

Fig.1 Effects of elevated CO_2 on concentrations of mineral elements in brown rice and white rice of IIY084 and WYJ21 in 2012



a: IYY084 糙米; b: WYJ23 糙米; c: IYY084 精米; d: WYJ23 精米。

图2 2013年 IYY084、WYJ23 糙米与精米中矿质元素含量对 CO₂ 浓度升高的响应

Fig.2 Effects of elevated CO₂ on concentrations of mineral elements in brown rice and white rice of IYY084 and WYJ23 in 2013

与 N 含量不同, CO₂ 浓度升高对籼稻、粳稻品种的糙米与精米中 K、P、Mg、Ca、Ni、Mo 含量没有显著影响,但存在不同程度的正、负影响趋势(图 1、图 2)。与对照相比,大气 CO₂ 浓度升高处理的籼稻 IYY084 糙米 2 年的 P、Ca、Mg、Mo 含量表现出下降趋势,变化百分率分别为: -2.5%、-3.3%、-5.4%、-5.3% (2012); -3.1%、-12.1%、-8.7%、-13.1% (2013)。然而,粳稻 WYJ21(23)糙米中 P、Ca、Mg 含量则分别高于对照 6.8%、3.9%、7.7% (2012); 6.0%、3.7%、0.9% (2013); Mo 含量则有减有增 -3.9% (2012)、13.0% (2013)。此外,籼稻与粳稻糙米 K 含量分别增加 0.2%、4.0% (2012) 和 5.9%、6.5% (2013), Ni 含量却分别下降 4.3%、1.8% (2012) 以及 23.1%、13.2% (2013)。

与糙米类似,大气 CO₂ 浓度升高处理下,籼稻 IYY084 精米 P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量 2 年平均值也分别下降了 2.8%、3.3%、1.8%、14.7%、9.1%。粳稻 WYJ21(23)精米中 P、Mg、Ni 含量仍为下降趋势,2 年均值分别降低了 2.3%、6.4%、13.2%,而 Ca 与 Mo 则分别高于对照 0.4%、2.0%。此外,高 CO₂ 浓度条件下, IYY084 精米中 K 含量的 2 年均值仍然增加了 1.4%,但 WYJ21(23)则下降了 5.0%。

籼、粳稻品种的差异性也显著影响糙米中 K ($P <$

0.010, 2012 与 2013)、Mg ($P < 0.10$, 2012; $P < 0.01$, 2013)、Mo ($P < 0.10$, 2012; $P < 0.01$, 2013)、P ($P < 0.01$, 2012) 和 Ca ($P < 0.01$, 2012) 含量(图 1、图 2、表 3)。此外,品种效应显著影响精米中 K ($P < 0.10$, 2012 与 2013)、P ($P < 0.10$, 2012 与 2013)、Ca ($P < 0.01$, 2012; $P < 0.05$, 2013)、Mo ($P < 0.01$, 2013) 含量。CO₂ 与品种的交互作用对糙米中的 P ($P < 0.10$, 2013)、Ca ($P < 0.01$, 2012; $P < 0.10$, 2013)、Mo ($P < 0.01$, 2013) 含量以及精米中 Mo ($P < 0.05$, 2013) 含量有显著影响(图 1、图 2、表 3)。

3 讨论

本试验中,与对照相比,大气 CO₂ 浓度升高处理显著增加了 2012 和 2013 年籼稻 IYY084 和粳稻 WYJ21(23)糙米与精米产量,而且 IYY084 糙米、精米产量增加幅度明显高于 WYJ21(23)。该结果与前人的报道^[21-23]一致。中国水稻 FACE 平台的前期研究结果同样表明, IYY084 的增产幅度超过粳稻 WYJ21(23)1 倍^[7,18]。此外,糙米率与精米率是优质大米加工品质性状^[24-25],目前仅有少数文献报道了它们对 CO₂ 浓度升高的响应。本研究结果表明,大气 CO₂ 浓度升高条件下,2012 年水稻糙米率和精米率显著下降。同样,在 FACE 条件下,粳稻武香梗

14 的糙米率、精米率对 CO_2 浓度升高有明显的负响应^[26]。然而,2013 年水稻糙米率和精米率却没有受到 CO_2 浓度升高的显著影响。这种年际间的不同有可能是 FACE 大田试验温度、降水量等自然条件在年际间的差异引起的。同样,李春华等^[4,27]认为 FACE 平台基础气温和降雨量的年际间差异,是引

起水稻干物质积累与分配,以及微量元素累积在连续 2 年间存在较明显差异的重要原因之一。据报道,糙米的皮层含有均衡的营养元素,导致糙米与精米间营养元素含量存在较大差异^[28]。因此, CO_2 浓度升高条件下,研究籼稻和粳稻品种糙米与精米中矿质元素含量的差异具有重要意义。

表 3 2012 年和 2013 年 IY084、WYJ21(23) 的糙、精米中矿质元素含量对 CO_2 浓度升高、品种以及其交互作用响应的方差分析

Table 3 Variance analysis for the effect of elevated CO_2 , cultivar, and their interactions on concentrations of mineral elements in brown rice and white rice of IY084 and WYJ21(23) in 2012 and 2013

年份	处理	糙米							精米						
		N	K	P	Ca	Mg	Ni	Mo	N	K	P	Ca	Mg	Ni	Mo
2012	高 CO_2 浓度	4.2 ⁺	0.2	0.2	0.1	0	0	1.0	5.3 [*]	0	0.1	1.8	0.1	1.4	1.3
	品种	8.2 [*]	11.6 ^{**}	20.7 ^{**}	65.3 ^{**}	3.5 ⁺	1.1	3.7 ⁺	65.3 ^{**}	5.0 ⁺	4.3 ⁺	12.0 ^{**}	0	0.1	2.0
	高 CO_2 浓度×品种	4.2 ⁺	0.1	0.7	1.8 ^{**}	1.1	0	0	0	0.2	0	0.6	0.4	0.2	0.7
2013	高 CO_2 浓度	25.0 ^{**}	3.3	0.4	0.4	2.1	0.8	0.6	8.0 [*]	0	0.1	0.1	0.1	0.4	1.2
	品种	49.0 ^{**}	21.5 ^{**}	1.8	0.3	15.7 ^{**}	0.2	69.8 ^{**}	40.5 ^{**}	4.9 ⁺	4.8 ⁺	56.3 [*]	0.1	1.7	304.7 ^{**}
	高 CO_2 浓度×品种	4.0 [*]	0.1	3.9 ⁺	1.3 ⁺	2.8	0.1	11.6 ^{**}	2.0	0.2	0	0.1	0.3	0.6	7.0 [*]

数值为 F 值。^{**}、^{*}、⁺ 分别表示差异达到 0.01、0.05、0.10 显著水平。

大气 CO_2 浓度升高显著降低 2012 与 2013 年 IY084 和 WYJ21(23) 糙米 N 含量。与对照相比,2012 和 2013 年 IY084 糙米 N 含量分别降低 7.9%、14.3%,而 WYJ21(23) 降低幅度较小,分别为 3.4% 和 5.0%。这一结果与目前有关 CO_2 浓度升高条件下,水稻糙米 N 含量的研究结论^[13,21] 一致。在 OTC (Open-top field chambers) 平台,籼稻 IR72 在 CO_2 浓度高出对照 300 $\mu\text{mol/mol}$ 时,其蛋白质含量 2 年平均下降了 8.3%^[21]。日本 FACE 平台的研究结果显示,粳稻 Akitakomachi 糙米中氮含量显著下降^[14]。本研究结果表明,高 CO_2 浓度处理下,2012 和 2013 年 IY084 精米中 N 含量分别下降 3.9%、11.4%,WYJ21(2012) 与 WYJ23(2013) 则分别降低 4.4%、7.4%,差异均达到显著性水平。中国 FACE 平台的研究结果同样表明,在高 CO_2 浓度条件下 WYJ21 的精米蛋白质含量显著下降 11.0%^[29]。日本 FACE 平台的研究结果也显示在高 CO_2 浓度条件下 Akitakomachi 精米蛋白质 2 年平均值降低了 9.1%^[9]。显然,大气 CO_2 浓度升高条件下,糙米与精米 N 含量的下降幅度不同。可见,稻米麸皮积累了较多的 N,其营养价值不容忽视。另外,大气 CO_2 浓度升高对稻米麸皮中 N 含量亦有着较为明显的影响,从而导致同一品种糙米和精米 N 含量对 CO_2 浓度升高的响

应程度存在差异,而且较之粳稻 WYJ21(23),这种影响在籼稻 IY084 中更为明显。由于精米制成的米饭观感和口感优于糙米,以水稻为主食的人们普遍食用精米。这导致人们从稻米中摄取的 N 量降低,从而影响大众健康。目前, CO_2 浓度升高条件下,糙米、精米中 N 含量下降的主要原因可概述为以下 3 个方面:(1) CO_2 浓度升高促进了植物生长和生物量增加,导致 N 含量下降,形成了植物中 N 的稀释效应^[30];(2) CO_2 浓度升高降低了叶片蒸腾速率,减少了植物 N 需求或降低硝酸盐质量流,最终降低了根对 N 的吸收率^[31];(3) 由于植物 N 损失, CO_2 浓度升高显著增加了水稻总 N 吸收量但并未引起总 N 收益的明显增加^[32]。

FACE 平台下,2012 和 2013 年籼稻 IY084 糙米中 P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量较对照均有下降趋势,但差异未达显著水平。在 OTC(Open top chambers) 试验平台, CO_2 浓度分别高于对照 200 $\mu\text{mol/mol}$ 与 300 $\mu\text{mol/mol}$ 条件下,籼稻 IR72 籽粒中 K、Ca 含量同样未受到显著影响^[21]。然而,有研究结果表明 CO_2 浓度升高处理的籼稻 IY084 稻米中 Fe、Zn 等含量显著低于对照^[33]。 CO_2 浓度升高条件下,2012 和 2013 年粳稻 WYJ21(23) 糙米中 K、P、Ca、Mg、Mo 的含量有增加趋势,但均未达到显著水平。这与日本

FACE 平台大气 CO₂ 浓度升高处理的梗稻 (Akitakomachi) 糙米中 K、P、Mg、Mo 含量增加的研究结论^[13] 一致。但是,与同一平台的盆栽试验结果不同,CO₂ 浓度升高处理的梗稻武香梗 14 籽粒中 K、P、Ca、Mg 含量有下降趋势,并且 K 含量下降达到显著水平^[12]。主要原因可能是大田试验较盆栽试验矿质元素供给充足^[34]。与糙米类似,大气 CO₂ 浓度升高处理下,籼稻 IY084 精米 P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量也存在下降趋势。除 Ca 与 Mo 外,梗稻 WYJ21(23) 精米中 P、Mg、Ni 含量同样有下降趋势。而且,与 N 含量相似,籼稻和梗稻品种糙米中 K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量对 CO₂ 浓度升高的响应强于精米。

目前,尽管未见到 CO₂ 升高导致这些矿质元素在土壤-水稻系统中迁移差异的报道,但是常规条件下,这些元素的迁移能力确实不同^[35]。因此,元素的迁移能力、水稻品种、试验平台 (FACE、OTC、GC)、种植方式 (盆栽与大田)、甚至加工程度 (籽粒、糙米、精米) 都可能会引起结论差异^[16]。矿质元素含量下降可能由水稻干物质增加导致的稀释效应^[36] 引起,也有可能由矿质元素在水稻各器官中的不平衡分配引起^[37]。此外,糙米中 N、K、P、Ca、Mg、Ni、Mo 含量在本试验中平均值分别高于精米 1.10、3.62、4.29、2.02、9.20、1.45 和 1.24 倍 (IY084), 以及 1.18、3.29、4.73、2.40、9.89、1.33 和 1.09 倍 (WYJ)。这为缓解 CO₂ 浓度升高条件下,食用精米人群部分矿质元素下降引起的营养匮乏问题提供了一个有效途径,即采用糙米和精米搭配的食用方式。下一步研究,将阐明这些矿质元素在土壤-水稻系统中的迁移与分配机制以解释其含量对 CO₂ 浓度升高响应的差异。

致谢: 感谢中国科学院南京土壤研究所土壤与环境分析测试中心龚华、孙晓丽、孙玉芳等老师的分析技术支持!

参考文献:

- [1] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Trends in carbon dioxide [EB/OL]. (2018-10-05) [2018-10-16] <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/gr.html>.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 谢晓金,李仁英,张耀鸿,等.CO₂ 浓度升高对水稻和玉米叶片光合生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 120-123.
- [4] 李春华,曾 青,沙霖楠,等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对水稻地上部干物质积累和分配的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1336-1342.
- [5] 刘 瑜,尹飞虎,高志建,等. 大气 CO₂ 浓度增加对新疆绿洲膜下滴灌棉花生长发育的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 108-110.
- [6] LONG S P, AINSWORTH E A, LEAKEY A D B, et al. Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations [J]. Science, 2006, 312: 1918-1921.
- [7] CHEN C, JIANG Q, ZISK L H, et al. Seed vigor of contrasting rice cultivars in response to elevated carbon dioxide [J]. Field Crops Research, 2015, 178: 63-68.
- [8] HASEGAWA T, SAKAI H, TOKIDA T, et al. Rice cultivar responses to elevated CO₂ at two free-air CO₂ enrichment (FACE) sites in Japan [J]. Functional Plant Biology, 2013, 148: 148-159.
- [9] TERAOKA T, MIURA S, YANAGIHARA T, et al. Influence of free-air CO₂ enrichment (FACE) on the eating quality of rice [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(11): 1861-1868.
- [10] 柴如山,牛耀芳,朱丽青,等. 大气 CO₂ 浓度升高对农产品品质影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2765-2775.
- [11] MYERS S S, ZANOBBETTI A, KLOOG I, et al. Increasing CO₂ threatens human nutrition[J]. Nature, 2014, 510(7503): 139-142.
- [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.
- [13] LIEFFERING 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.
- [14] 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]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 1997, 43: 1131-1136.
- [15] LOLADZE I. Rising atmospheric CO₂ and human nutrition: towards globally imbalanced plant stoichiometry [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2002, 17: 457-461.
- [16] WANG Y X, MICHAEL F, 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.
- [17] 中国粮油学会. 粮油食品营养与健康知识百问[M]. 北京: 科学普及出版社, 2005.
- [18] LI C H, ZHU J G, SHA L N, et al. Rice (*Oryza sativa* L.) growth and nitrogen distribution under elevated CO₂ concentration and air temperature [J]. Ecological Research, 2017, 32: 405-411.

- [19] XIE B H, ZHOU Z X, MEI B L, et al. Influences of free-air CO₂ enrichment (FACE), nitrogen fertilizer and crop residue incorporation on CH₄ emissions from irrigated rice fields [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2012, 93: 373-385.
- [20] 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.
- [21] ZISKA L H, NAMUCO O, MOYA T, et al. Growth and yield response of field grown tropical rice to increasing carbon dioxide and air temperature [J]. *Agronomy Journal*, 1997, 89(1): 45-53.
- [22] BAKER J T, ALLEN L H. Contrasting crop species responses to CO₂ and temperature: rice, soybean and citrus, soybean and citrus [J]. *Vegetation*, 1993, 104/105: 239-260.
- [23] KIM H Y, LIEFFERING M, KOBAYASHI K, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment and nitrogen supply on the yield of temperate paddy rice crops [J]. *Field Crops Research*, 2003, 83: 261-270.
- [24] 全东兴, 张 强, 陈温福, 等. 吉林省新育水稻品种(系)的品质性状与产量的相关分析[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(14): 4146-4164, 4184.
- [25] 林 海, 庞乾林, 阮刘青, 等. 2010 年我国通过审定的水稻品种产量和品质性状分析[J]. *中国稻米*, 2011, 17(6): 59-62.
- [26] 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(2): 128-140.
- [27] 李春华, 曾 青, 沙霖楠, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对水稻体内微量元素累积的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(6): 1021-1026.
- [28] 于 巍, 周 坚, 徐群英, 等. 糙米与精米的营养价值与质构特性比较研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(9): 95-99.
- [29] 周晓冬, 赖上坤, 周 娟, 等. 开放式空气中 CO₂ 浓度增高 (FACE) 对常规粳稻蛋白质和氨基酸含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1264-1270.
- [30] COLEMAN J S, MCCONNAUGHAY K D M, BAZZAZ F A. Elevated CO₂ and plant nitrogen-use: is reduced tissue nitrogen concentration size-dependent? [J]. *Oecologia*, 1993, 93: 195-200.
- [31] CONROY J P, HOCKING P. Nitrogen nutrition of C3 plants at elevated atmospheric CO₂ concentrations [J]. *Physiologia Plantarum*, 1993, 89: 570-576.
- [32] PANG J, ZHU J G, XIE Z B, et al. A new explanation of the N concentration decrease in tissues of rice (*Oryza sativa* L.) exposed to elevated atmospheric pCO₂ [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 57: 98-105.
- [33] 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): 1012.
- [34] 石元豹, 曹 兵, 宋丽华. CO₂ 浓度倍增对宁夏枸杞种植地土壤养分及微生物的影响[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(1): 201-206.
- [35] 杨树明, 曾亚文, 杜 娟, 等. 云南水稻土中主要矿质元素对水稻籽粒矿质元素积累的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2009, 35(6): 583-587.
- [36] GIFFORD R M, BARRETT D J, LUTZE J L. The effects of elevated [CO₂] on the C: N and C: P mass ratios of plant tissues [J]. *Plant Soil*, 2000, 224(1): 1-14.
- [37] GUO J, ZHANG M Q, WANG X W, et al. A possible mechanism of mineral responses to elevated atmospheric CO₂ in rice grains [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(1): 50-57.

(责任编辑: 张震林)