

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

周晓冬^{1,2}, 赖上坤², 周 娟², 王云霞², 董桂春², 朱建国³, 杨连新², 王余龙^{2*}

(1.南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2.扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室/农业部长江中下游作物生理生态与栽培重点开放实验室, 江苏 扬州 225009; 3. 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, 南京 210008)

摘 要: 为了明确未来大气 CO₂ 浓度升高对水稻蛋白质营养品质的影响, 2009 年利用稻田开放式空气 CO₂ 浓度增高(FACE, Free Air CO₂ Enrichment)系统, 以武运粳 21、扬辐粳 8 号和武粳 15 为供试品种, 研究大田生长期 CO₂ 浓度升高 200 μmol·mol⁻¹ 对常规粳稻蛋白质营养品质的影响。结果表明: 大气 CO₂ 浓度增加使所有供试品种精米蛋白质含量平均下降 5.6%, 使氨基酸、必需和非必需氨基酸总量平均分别下降 7.6%、6.7%和 7.9%, 均达极显著水平。大气 CO₂ 浓度增加使供试品种精米必需氨基酸占氨基酸总量百分比显著增加, 使非必需氨基酸占氨基酸总量百分比显著下降, 但对精米中必需和非必需氨基酸的相对含量无显著影响。从氨基酸组分看, 大气 CO₂ 浓度增加使供试品种精米中 7 种必需氨基酸和 8 种非必需氨基酸的含量均显著或极显著下降。CO₂ 处理与品种对精米蛋白质含量、氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量以及部分氨基酸组分有一定的互作效应, 武运粳 21 上述参数对高浓度 CO₂ 的响应大于扬辐粳 8 号或武粳 15 对应参数的响应。以上结果说明本世纪中叶大气中的 CO₂ 浓度将使粳稻蛋白质营养品质下降, 不同品种下降幅度存在一定差异。

关键词: FACE(Free Air CO₂ Enrichment); 水稻; 蛋白质; 氨基酸

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)07-1264-07

The Impact of Free Air CO₂ Enrichment(FACE) on Protein and Amino Acids Concentration of Conventional Japonica Rice

ZHOU Xiao-dong^{1,2}, LAI Shang-kun², ZHOU Juan², WANG Yun-xia², DONG Gui-chun², ZHU Jian-guo³, YANG Lian-xin², WANG Yu-long^{2*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Jiangsu Province, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Crop Cultivation & Physiology of Jiangsu Province/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation in Middle and Lower Reaches of Yangtze River of Ministry of Agriculture, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 3. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Rice (*Oryza sativa* L.) is one of the most important crops in the world and the first staple food in Asia, providing nutrition to a large proportion of the world's population. Rising atmospheric carbon dioxide concentration ([CO₂]) has numerous impacts on rice production. Compared with growth and grain yield, our understanding in the response of grain quality to elevated [CO₂] is very limited. A field experiment was carried out using the FACE (Free Air CO₂ Enrichment) system to evaluate the effects of elevated CO₂ concentration on nutrient quality of three conventional japonica varieties, Wuyunjing 21, Yangfujing 18 and Wujing 15 in 2009. Plants were grown at ambient or elevated (200 μmol·mol⁻¹ higher than ambient) CO₂ concentrations. At maturity, the grains were harvested for protein and amino acids analysis. Elevated [CO₂] decreased protein concentration in milled rice of all tested varieties by 5.6% on average. The contents of total amino acids, essential

收稿日期: 2012-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(31171460); 科技部国际合作与交流项目(2010DFA22770); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(11KJA210003); 江苏省作物栽培生理重点实验室开放课题; 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 周晓冬(1974—), 女, 江苏南通人, 博士, 讲师, 主要从事作物高产生理和全球变化生物学的研究。E-mail: zhouxiaodong0118@126.com

* 通讯作者: 王余龙 E-mail: ylwang@yzu.edu.cn

amino acids and non-essential amino acids were declined under elevated[CO₂] by 7.6%, 6.7% and 7.9%, respectively. The percentage of essential amino acids increased and that of the non-essential amino acids declined significantly, but relative concentrations of essential and non-essential amino acids did not show significant changes in response to elevated[CO₂]. Concentrations of seven essential amino acids and eight non-essential amino acids were significantly decreased by elevated[CO₂]. In general, the responses of Wuyunjing 21 to elevated[CO₂] were significantly greater than that of Yangfujing 8 and Wujing 15. The above results suggested that the lower concentrations of rice protein and amino acids would be expected under the atmospheric environment in the middle of this century.

Keywords: FACE(Free Air CO₂ Enrichment); rice; protein; amino acids

人类活动加剧导致了大气 CO₂ 浓度不断增长。西方工业革命前,大气 CO₂ 浓度仅为 280 μmol·mol⁻¹,目前已上升到 380 μmol·mol⁻¹;据最新模型估计,到 2050 年大气 CO₂ 浓度将达到 550 μmol·mol⁻¹,至本世纪末将超过 700 μmol·mol⁻¹。CO₂ 是作物光合作用的底物,其快速增长影响作物产量的同时对作物品质也产生深刻影响。稻米品质主要包括碾磨品质、外观品质、蒸煮/食味品质和营养品质 4 个方面,有关大气 CO₂ 浓度升高对水稻品质的影响,前人已有一些研究^[2-8]。衡量稻米营养品质的指标主要是稻米中的蛋白质含量及其氨基酸组成^[9]。在稻米蛋白质营养品质方面,现有的研究主要集中在蛋白质含量变化上,对稻米中各种氨基酸含量的变化鲜有报道^[3,6]。Taub 等^[10]整合分析表明,CO₂ 浓度由 315~400 μmol·mol⁻¹ 上升至 540~958 μmol·mol⁻¹ 使水稻籽粒蛋白质含量平均下降了 9.9%(*n*=14),盆栽试验的响应(-15%,*n*=6)略大于大田试验的响应(-6%,*n*=8)。其后,Yang 等^[5]、吴健等^[6]以及徐长亮等^[7]的研究亦发现,大气 CO₂ 浓度升高使稻米蛋白质含量下降。但上述研究多是在封闭或半封闭条件下以单个品种为材料进行的,蛋白质含量对大气 CO₂ 浓度升高的响应是否存在品种间差异,各种氨基酸特别是重要的限制性氨基酸含量有何变化,鲜有报道^[3,6-7]。本研究利用 FACE 平台,与封闭和半封闭研究不同,FACE(Free Air CO₂ Enrichment)试验在空气自由流动的大田条件下进行,提供了研究未来作物响应的理想平台^[11],以 3 个常规粳稻品种作为供试材料,重点研究完全开放的稻田条件下不同粳稻品种稻米蛋白质和氨基酸含量对大气 CO₂ 浓度增加的响应,为未来大气 CO₂ 浓度升高对作物蛋白质营养品质的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料培育

试验以武运粳 21(常规中熟中粳稻,WYJ21)、扬辐粳 8 号(常规迟熟中粳稻,YFJ8)、武粳 15(常规早

熟晚粳稻,WJ15)3 种常规粳稻为供试品种。

试验于 2009 年在中国水稻 FACE 研究技术平台上进行。该平台位于江苏省江都市小纪镇良种场试验田(32°35.5'N,119°42'E)。土壤类型为青泥土,理化性质为:有机碳 18.4 g·kg⁻¹,全 N 1.45 g·kg⁻¹,全 P 0.63 g·kg⁻¹,全 K 14.0 g·kg⁻¹,速效 P 10.1 mg·kg⁻¹,速效 K 70.5 mg·kg⁻¹,砂粒(2~0.02 mm)578.4 g·kg⁻¹,粉砂粒(0.02~0.002 mm)285.1 g·kg⁻¹,粘粒(<0.002 mm)136.5 g·kg⁻¹,容重 1.16 g·cm⁻³,pH7.2。耕作方式为水稻-冬小麦轮作。

大气 CO₂ 浓度设对照 Ambient (370 μmol·mol⁻¹) 和比对照高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理(570 μmol·mol⁻¹)2 个水平。平台共有 3 个 FACE 实验圈和 3 个对照圈。为减少 CO₂ 释放对其他圈的影响,FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 90 m。FACE 圈设计为正八角形,外圆直径为 12.5 m,通过 FACE 圈周围的管道向 FACE 圈中心喷射纯 CO₂ 气体,根据风向、风速及昼夜交替等因素的变化,由计算机网络系统自动调节 FACE 圈内 CO₂ 浓度,使其(全生育期)的 CO₂ 浓度保持在 570 μmol·mol⁻¹ 左右,控制误差为 10%。对照田块没有安装 FACE 管道,其余环境条件与自然状态一致(详见刘钢等^[11])。

大田旱育秧,5 月 22 日播种,6 月 17 日人工移栽,行距 25 cm,株距 16.7 cm,24 穴·m⁻²,每穴 2 苗。试验小区供肥水平相同,施氮量 15 g N·m⁻²,基肥和分蘖肥占施肥总量的 60%,穗肥占施肥总量的 40%。磷、钾肥作为基肥施用,施用量均为 7 g·m⁻²。水分管理按高产田管理进行。适时进行病虫害防治,保证水稻正常生长。

1.2 测定内容

1.2.1 精米中氨基酸含量

氨基酸含量测定采用 AccQ·Tag 高效液相色谱法测定。稻谷经出糙、出精后磨粉。准确称取米粉 0.100 0 g(过 100 目筛)于 10 mL 安瓿瓶中,准确加入 6 mol·L⁻¹ HCL 5 mL,将安瓿瓶封口,并用胶布包好(防止恒温消化时安瓿瓶破裂),用注射器抽出安瓿瓶

中的空气,再向瓶中注入 N₂,将安瓿瓶置于 110 ℃ 恒温干燥箱中消化 24 h 后取出冷却至室温,打开安瓿瓶,过滤消化液(定量滤纸)至 50 mL,将其放置 3~4 h,再吸取 2 mL 滤液至 10 mL 试管中,在浓缩仪或旋转蒸发仪上减压蒸发去除 HCl,残留物用 2 mL 超纯水稀释,稀释液通过 0.45 μm 孔径的滤膜后,即得到籽粒氨基酸水解液。取 10 μL 水解液于衍生小管中,加入 AccQ·Fluor 缓冲液 70 μL,边混合边加入衍生剂(购自 Waters,美国)20 μL,置于 55 ℃ 烘箱保温 10 min,转入微量进样小瓶,于 HPLC(Waters2695,美国)检测。用 2695 分离单元、2487 紫外检测器及 Empower 色谱管理系统,反相 AccQ·Tag 分析柱为 3.9 mm×150 mm,流动相 A 为 140 mmol·L⁻¹ 乙酸钠-17 mmol·L⁻¹ 三乙胺(pH=4.95,磷酸调节),B 为乙腈(色谱纯),C 为超纯水。流速为 1.0 mL·min⁻¹,柱温 37 ℃,紫外检测波长为 248 nm,进样量为 10 μL。根据测定结果计算氨基酸含量。

HPLC(Waters2695,美国)检测系统精确测定的 15 种氨基酸包括:赖氨酸(Lys)、缬氨酸(Val)、甲硫(蛋)氨酸(Met)、苏氨酸(Thr)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、苯丙氨酸(Phe)7 种必需氨基酸,天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)、丝氨酸(Ser)、甘氨酸(Gly)、组氨酸(His)、脯氨酸(Pro)、精氨酸(Arg)、丙氨酸(Ala)8 种非必需氨基酸。

1.2.2 精米蛋白质含量

参照国家标准 GB/T 17891—1999《优质稻谷》,用凯氏定氮法测定精米含氮量,乘以换算系数 5.95。

1.3 数据处理

蛋白质含量为样品干基的百分数(%).氨基酸绝对含量为样品干基的百分数(%),乘以换算系数 10 得到每克精米中氨基酸含量(mg)。氨基酸相对含量为每克蛋白质中氨基酸的含量(mg)=(氨基酸绝对含量/蛋白质含量)×1 000。

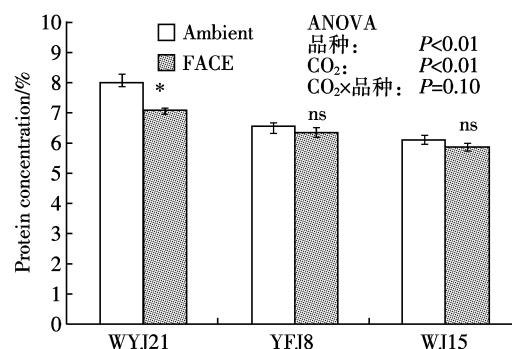
本试验为两因素随机裂区设计,其中 CO₂ 为主区,品种为裂区。试验重复 3 次。采用 Microsoft Excel 进行数据处理和作图,SPSS13.0 软件进行差异显著性分析,显著水平设 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 和 $P>0.05$,分别用 **、* 和 ns 表示。数据表示为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 精米蛋白质含量

大气 CO₂ 浓度增加对精米蛋白质含量的影响示于图 1。供试品种精米蛋白质含量存在显著差异,武

运梗 21 平均精米蛋白质含量(7.5%)显著大于扬辐梗 8 号(6.4%),两者平均蛋白质含量显著大于武梗 15(6.0%);大气 CO₂ 浓度增加使供试品种精米蛋白质含量平均下降 5.6%,达到极显著水平,不同品种下降程度存在差异,武运梗 21 精米蛋白质含量下降幅度较大(11.0%),达显著水平,扬辐梗 8 号和武梗 15 下降幅度小(2.0%~3.0%),未达显著水平。方差分析表明,CO₂ 处理与品种对精米蛋白质含量存在较弱的互作效应($P=0.10$)。



WYJ21:武运梗 21;YFJ8:扬辐梗 8 号;WJ15:武梗 15;Ambient:环境大气 CO₂ 浓度,Ambient CO₂;FACE:开放式空气 CO₂ 浓度增高,Free Air CO₂ Enrichment。下同,The same below.

图 1 开放式空气中 CO₂ 浓度增高(FACE)对不同水稻品种精米蛋白质含量的影响

Figure 1 Effect of FACE on protein concentration in milled rice of different varieties

2.2 精米氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量

大气 CO₂ 浓度增加对水稻精米氨基酸总量、必需氨基酸总量、非必需氨基酸总量的影响如图 2 所示。大气 CO₂ 浓度增加使供试品种精米氨基酸总量平均下降 7.6%,达到极显著水平;不同品种下降程度存在差异,武运梗 21 下降程度较大(12.0%),达到极显著水平,扬辐梗 8 号和武梗 15 下降程度小(5%~6%),未达 0.05 显著水平($P<0.25$)。供试品种精米中必需氨基酸和非必需氨基酸总量对大气 CO₂ 浓度增加的响应趋势与氨基酸总量的响应趋势一致,必需氨基酸总量降幅略小于非必需氨基酸。方差分析表明,CO₂ 处理与品种的互作对精米氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量均有一定影响($P\approx 0.2$),但未达 0.05 显著水平。

大气 CO₂ 浓度增加对必需氨基酸占氨基酸总量百分比的影响如图 3 所示。大气 CO₂ 浓度增加使水稻精米必需氨基酸占氨基酸总量百分比显著增加,使非必需氨基酸占氨基酸总量百分比显著下降($P=0.03$)。

武运粳 21 必需氨基酸占氨基酸总量百分比由 38.4% 增加至 38.8%, 达显著水平, 扬辐粳 8 号和武粳 15 必需氨基酸占氨基酸总量百分比无显著变化。方差分析表明, CO_2 处理与品种的互作对必需或非必需氨基酸占氨基酸总量百分比均未达到显著水平。

2.3 精米必需和非必需氨基酸相对含量

氨基酸相对含量是指每克(g)蛋白质中氨基酸的含量(mg), 表示氨基酸的平衡。图 4 表明, CO_2 处理及其与品种的互作对这两个参数的影响均未达显著水平。

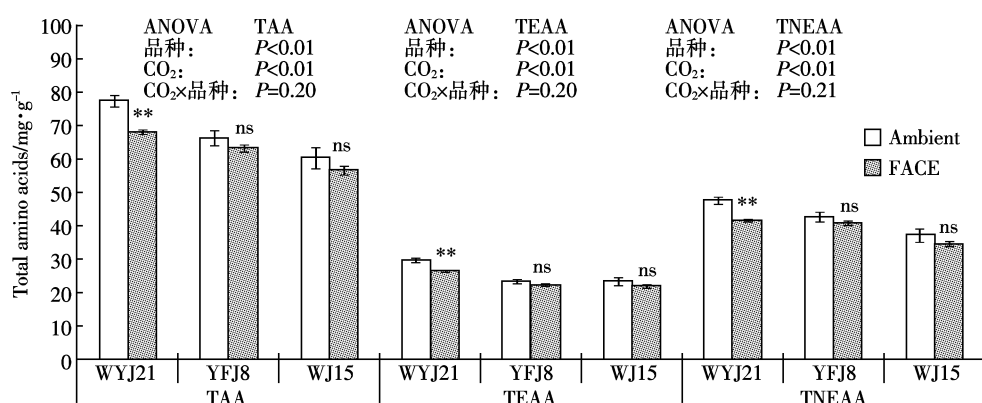
2.4 必需氨基酸含量

大气 CO_2 浓度增加对水稻精米中 7 种必需氨基酸含量的影响如表 1 所示。这 7 种必需氨基酸含量的品种间差异均达极显著水平($P<0.01$)。大气 CO_2 浓度增加使水稻精米中各必需氨基酸含量平均下降 4%~8%, 达显著或极显著水平。从不同品种差异看, 武运

粳 21 平均降幅为 5.8%~12.9%, 达极显著水平, 扬辐粳 8 号和武粳 15 平均降幅分别为 3.2%~5.2%、2.9%~6.7%, 未达显著水平。从不同必需氨基酸看, 亮氨酸和苯丙氨酸含量的平均降幅最大(8%), 其次是苏氨酸、异亮氨酸和缬氨酸, 重要限制性氨基酸赖氨酸和甲硫氨酸的降幅较小(平均下降 4%~5%), 品种趋势一致。方差分析表明, CO_2 处理与品种对精米苏氨酸、赖氨酸、亮氨酸和苯丙氨酸有一定的互作效应($P<0.20$)。

2.5 非必需氨基酸含量

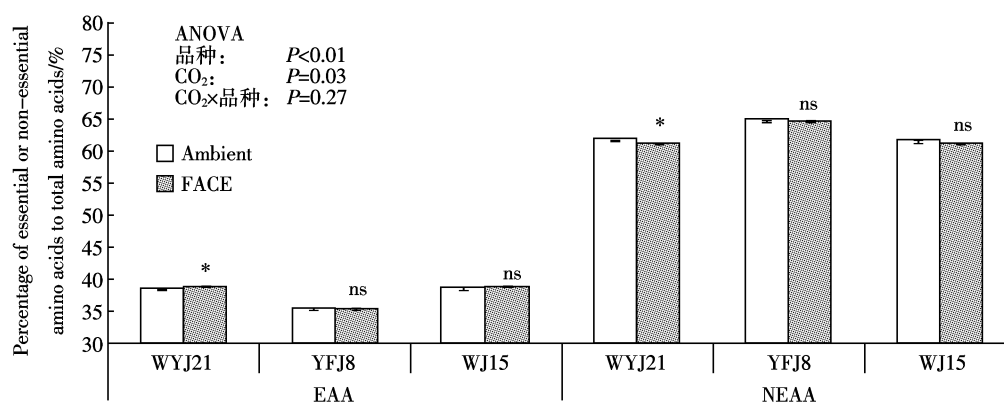
大气 CO_2 浓度增加对水稻精米中 8 种非必需氨基酸含量的影响如表 2 所示。这 8 种非必需氨基酸含量品种间均存在极显著差异($P<0.01$)。大气 CO_2 浓度增加使水稻 8 种非必需氨基酸含量下降均达显著或极显著水平。从不同品种差异看, 武运粳 21 非必需氨基酸含量降幅为 10%~14%, 达到显著或极显著水平,



TAA: Total amino acids, 氨基酸总量; TEAA: Total essential amino acids, 必需氨基酸总量; TNEAA: Total non-essential amino acids, 非必需氨基酸总量。下同, The same below

图 2 开放式空气中 CO_2 浓度增高(FACE)对不同水稻品种精米氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量的影响

Figure 2 Effect of FACE on the contents of total amino acids, essential, and non-essential in milled rice of different varieties



EAA: Essential amino acids, 必需氨基酸; NEAA: Non-essential amino acids, 非必需氨基酸。下同, The same below

图 3 开放式空气中 CO_2 浓度增高(FACE)对不同水稻品种精米必需氨基酸占氨基酸总量百分比的影响

Figure 3 Effect of FACE on percentage of essential or non-essential amino acids to total amino acids in milled rice of different varieties

扬辐粳 8 号和武粳 15 降幅分别为 2%~7%和 5%~8%,未达 0.05 显著水平。方差分析表明,CO₂ 处理与品种对精米中丝氨酸、谷氨酸、丙氨酸和脯氨酸有一定互作效应($P<0.20$)。

3 讨论

蛋白质含量不仅是衡量作物籽粒营养品质的重

要指标,对米饭的食味品质也有很大影响。蛋白质含量由品种的遗传特性决定,但外界环境条件对蛋白质含量也会产生重要影响^[12-14]。前人报道,无论是气室研究还是 FACE 研究,大气 CO₂ 浓度升高均使稻米蛋白质浓度一致下降^[2-8]。本研究在 FACE 条件下,以目前生产中蛋白质含量存在显著差异的 3 个常规高产粳稻为供试材料(图 1),研究表明大气 CO₂ 浓度增加

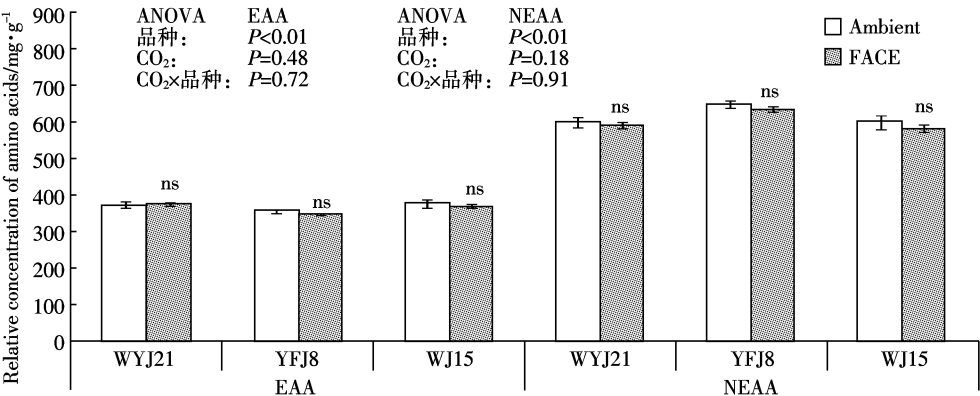


图 4 开放式空气中 CO₂ 浓度增高对不同水稻品种精米必需和非必需氨基酸相对含量的影响

Figure 4 Effect of FACE on relative concentration of essential and non-essential amino acids in milled rice of different varieties

表 1 开放式空气中 CO₂ 浓度增高(FACE)对不同水稻品种精米必需氨基酸含量的影响(mg·g⁻¹ rice)

Table 1 Effect of FACE on essential amino acid concentration in milled rice of different varieties(mg·g⁻¹ rice)

品种	CO ₂ 处理	苏氨酸	缬氨酸	甲硫氨酸	赖氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	苯丙氨酸
武运粳 21	Ambient	6.11±0.15	4.39±0.10	1.84±0.03	2.91±0.07	3.48±0.08	6.67±0.15	4.25±0.09
	FACE	5.56±0.03	3.89±0.04	1.73±0.01	2.63±0.03	3.08±0.03	5.81±0.06	3.73±0.04
扬辐粳 8 号	Ambient	2.83±0.08	3.79±0.12	1.88±0.05	2.67±0.07	3.00±0.10	5.58±0.18	3.63±0.11
	FACE	2.70±0.03	3.63±0.07	1.82±0.03	2.58±0.03	2.86±0.06	5.29±0.10	3.46±0.06
武粳 15	Ambient	4.79±0.23	3.45±0.19	1.45±0.05	2.39±0.10	2.73±0.15	5.15±0.30	3.27±0.18
	FACE	4.54±0.08	3.26±0.08	1.41±0.02	2.30±0.04	2.57±0.06	4.80±0.12	3.06±0.07
ANOVA	Cultivar	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	CO ₂	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	Cultivar×CO ₂	0.13	0.26	0.66	0.19	0.25	0.18	0.18

表 2 开放式空气中 CO₂ 浓度增高(FACE)对不同水稻品种精米非必需氨基酸含量的影响(mg·g⁻¹ rice)

Table 2 Effect of FACE on non-essential amino acid concentration in milled rice of different varieties(mg·g⁻¹ rice)

品种	CO ₂ 处理	天冬氨酸	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸	组氨酸	精氨酸	丙氨酸	脯氨酸
武运粳 21	Ambient	7.72±0.20	3.91±0.10	15.24±0.34	3.24±0.07	1.86±0.05	6.66±0.10	5.21±0.13	3.76±0.08
	FACE	6.71±0.12	3.36±0.05	13.13±0.16	2.87±0.03	1.68±0.02	5.98±0.06	4.61±0.05	3.29±0.03
扬辐粳 8 号	Ambient	8.46±0.34	3.22±0.11	12.15±0.43	3.54±0.11	1.72±0.05	6.08±0.21	4.21±0.13	3.38±0.10
	FACE	8.16±0.17	3.00±0.04	11.46±0.21	3.37±0.04	1.65±0.03	5.81±0.12	4.01±0.06	3.31±0.06
武粳 15	Ambient	5.98±0.26	3.00±0.17	11.41±0.68	2.62±0.15	1.52±0.10	5.45±0.30	4.12±0.20	2.94±0.16
	FACE	5.70±0.14	2.75±0.05	10.57±0.28	2.47±0.06	1.42±0.06	5.03±0.15	3.87±0.07	2.75±0.07
ANOVA	Cultivar	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
	CO ₂	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
	Cultivar×CO ₂	0.27	0.16	0.14	0.37	0.57	0.50	0.18	0.09

200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 使供试品种精米蛋白质含量平均下降 5.6%, 达极显著水平(图 1), 该结果略小于 Taub 等^[10] 整合分析的结果(-9.9%), 与同一 FACE 平台对粳稻武香粳 14 多年的试验结果接近^[5]。关于水稻品种蛋白质含量对高浓度 CO_2 的响应差异, 徐长亮等^[7] 研究数据表明大气 CO_2 浓度使粳稻 Asominori 和籼稻 IR24 蛋白质含量比对照分别下降了 8.6% 和 13.5% (见文献[17]表 3), 达到显著水平。本研究尽管只检测到 CO_2 与品种间较弱的互作效应($P=0.10$), 但还是可以明显看出稻米蛋白质含量对高浓度 CO_2 响应存在着品种间差异。

氨基酸组成及其含量决定了蛋白质的质量。吴健等^[6] OTC 试验发现大气 CO_2 浓度升高使杂交稻汕优 63 氨基酸总量、8 种必需氨基酸总量呈下降趋势, 必需氨基酸占氨基酸百分比呈增加趋势。本文首次开展了自由空气中 CO_2 浓度升高对不同粳稻品种精米中氨基酸含量的研究, 结果表明大气 CO_2 浓度增加使供试品种精米氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量平均下降 7%~8%, 使精米必需氨基酸占氨基酸总量的百分比平均增加 0.3%, 均达显著水平, 这与吴健等^[6] 的结果趋势一致。本研究还表明, CO_2 与品种对氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量均有一定的互作效应(图 2), 但未达 0.05 显著水平。稻米蛋白质的质量还取决于必需氨基酸的相对含量。本研究结果表明, 大气 CO_2 浓度增加对水稻精米必需氨基酸和非必需氨基酸相对含量均无显著影响, 不同品种趋势一致, 说明高浓度 CO_2 环境条件下稻米氨基酸平衡未发生明显变化。

关于大气 CO_2 浓度增加对稻米各种氨基酸组分的影响目前已有两例报道^[3,6], 其中张旭等^[3] 报道 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ CO_2 浓度使籼稻特三矮 2 号 17 种氨基酸含量平均下降了 30%~40%, 吴健等^[6] 报道 550 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ CO_2 处理使杂交稻汕优 63 的氨基酸组分下降 1%~15%, 不同氨基酸含量下降程度不同。本研究发现大气 CO_2 浓度增加使粳稻各种氨基酸含量下降达到显著水平, 降幅因品种和氨基酸种类不同而不同, 大气 CO_2 浓度升高使得不同品种精米中蛋白质含量和氨基酸含量下降, 大气 CO_2 浓度升高影响稻米蛋白质营养品质的过程可能与植株体内的碳氮代谢关系密切^[12,15-16], 其影响机理有待进一步研究。

4 结论

大气 CO_2 浓度增加使供试品种精米蛋白质含量、

氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量、测定的 7 种必需氨基酸和 8 种非必需氨基酸的含量均显著或极显著下降, 使供试品种精米必需和非必需氨基酸占氨基酸总量的百分比变化较小, 仍达显著水平。与此不同, 大气 CO_2 浓度增加对精米中必需和非必需氨基酸的相对含量无显著影响。 CO_2 处理与品种对精米蛋白质含量、氨基酸总量、必需和非必需氨基酸总量以及部分氨基酸有一定的互作效应。以上结果说明, 本世纪中叶大气中 CO_2 浓度的升高将使粳稻精米中的蛋白质与各种氨基酸含量下降, 不同品种降幅存在一定差异。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis[C]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. eds. Contribution of working group I to the fourth annual assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [2] Seneweera S P, Conroy J P. Growth, grain yield and quality of rice (*Oryza sativa* L.) in response to elevated CO_2 and phosphorus nutrition[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1997(43): 1131-1136.
- [3] 张旭, 刘彦卓, 孔清霓, 等. 高 CO_2 浓度下水稻高产品种特三矮 2 号的生长、产量与米质的研究[J]. *应用与环境生物学报*, 1998, 4(3): 238-242.
ZHANG Xu, LIU Yan-zhuo, KONG Qing-ni, et al. Growth, grain yield and kernel quality of high-yield rice variety Te-San-Ai 2 growing in a simulated CO_2 enriched habitat[J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 1998, 4(3): 238-242.
- [4] 董桂春, 王余龙, 黄建晔, 等. 稻米品质性状对开放式空气二氧化碳浓度增高的响应[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1217-1222.
DONG Gui-chun, WANG Yu-long, HUANG Jian-ye, et al. Response of rice grain quality traits to free-air CO_2 enrichment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1217-1222.
- [5] YANG Lian-xin, WANG Yu-long, DONG Gui-chun, et al. The impact of free-air CO_2 enrichment (FACE) and nitrogen supply on grain quality of rice[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102: 128-140.
- [6] 吴健, 蒋跃林. CO_2 浓度对水稻籽粒蛋白质及氨基酸含量的影响[J]. *安徽农学通报*, 2008, 14(11): 84-86.
WU Jian, JIANG Yue-lin. Effect of CO_2 levels on content of protein and amino acid in rice grain [J]. *Anhui Agriculture Science Bulletin*, 2008, 14(11): 84-86.
- [7] 徐长亮, 李军营, 谢辉, 等. 开放式空气 CO_2 浓度升高对稻米品质的影响[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(9): 391-397.
XU Chang-liang, LI Jun-ying, XIE Hui, et al. Effect of free air CO_2 enrichment to rice quality of rice[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(9): 391-397.
- [8] WANG Yun-xia, Michael Frei, SONG Qi-ling, et al. The impact of atmospheric CO_2 concentration enrichment on rice quality: A research review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011(31): 277-282.
- [9] 莫惠栋. 我国稻米品质的改良[J]. *中国农业科学*, 1993, 26(4): 8-14.

- MO Hui-dong. Quality improvement of rice grain in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1993, 26(4):8-14.
- [10] Taub D R, Miller B, Allen H. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: A meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2008, 14:565-575.
- [11] 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 constructs and control[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10):1253-1258.
- [12] Conroy J P. Influence of elevated atmospheric CO₂ concentrations on plant nutrition[J]. *Australian Journal of Botany*, 1992, 40:445-456.
- [13] Liewffering 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, 88:279-286.
- [14] Wang Y X, Michael F. Stressed food: The impact of abiotic environmental stresses on crop quality[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2011, 141:271-286.
- [15] PANG Jing, Zhu Jian-guo, Xie Zu-bin, 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.
- [16] Taub D R, WANG X Z. Why are nitrogen concentrations in plant tissues lower under elevated CO₂: A critical examination of the hypotheses [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(11):1365-1374.