

大气 CO₂ 浓度升高对粳稻稻米物性及食味品质的影响

赵轶鹏¹, 宋琪玲¹, 王云霞¹, 赖上坤¹, 周娟¹, 朱建国², 杨连新¹, 王余龙^{1*}

(1.扬州大学江苏省作物栽培生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; 2.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:在 2009 和 2010 年利用独特的稻/麦轮作系统 FACE(Free Air CO₂ Enrichment, 开放式空气 CO₂ 浓度增高)平台, 以武运粳 21、扬辐粳 8 号、武香粳 14 和武粳 15 为供试材料, 研究了高浓度 CO₂(比大气背景 CO₂ 浓度高 200 μmol·mol⁻¹)对粳稻蒸煮米的硬度、粘性、香气、光泽、完整性、味道和口感等的影响。物性分析仪测定结果表明, 高浓度 CO₂ 环境下粳稻熟米的硬度和粘性总体呈增加趋势, 其中扬辐粳 8 号两指标的增幅均达显著水平。食味计测定结果显示, 高浓度 CO₂ 对蒸煮稻米香气、光泽度、完整性、味道和口感等食味品质指标均没有影响。相关分析表明, CO₂ 与品种的互作对米饭硬度和粘性有显著影响, 但对食味品质参数均没有影响。CO₂ 与年度、CO₂ 与年度和品种间的互作对所有测定参数均无显著影响。两年数据一致表明, 未来高浓度 CO₂ 环境下粳稻蒸煮米的硬度和粘性将呈增加趋势, 增幅因品种而异, 但米饭食味品质无显著变化。

关键词: 粳稻; FACE(Free Air CO₂ Enrichment); 物性; 食味品质

中图分类号: X503.231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)08-1475-08

Impacts of Elevated CO₂ Concentration on Texture and Palatability of Cooked Japonica Rice

ZHAO Yi-peng¹, SONG Qi-ling¹, WANG Yun-xia¹, LAI Shang-kun¹, ZHOU Juan¹, ZHU Jian-guo², YANG Lian-xin¹, WANG Yu-long^{1*}

(1.Key Laboratory of Crop Genetics & Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou 225009, China; 2.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Rising atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration promotes plant growth and enhances crop yield, however, it's impacts on crop quality is unclear. To investigate the effects of elevated CO₂ concentration on the cooking and eating quality of japonica rice, free-air CO₂ enrichment (FACE) experiments were conducted at Jiangdu, Jiangsu, China in 2009 and 2010. Four varieties of japonica rice were exposed to ambient and elevated (ca. 200 μmol·mol⁻¹ above ambient) concentrations of CO₂. At maturity, rice grains were dehulled and then milled, and milled rice were cooked. The cooked rice were assessed for hardness, stickiness, aroma, luster, intactness, flavor, taste and the overall palatability. Elevated CO₂ concentration tended to increase the hardness and stickiness of cooked rice, but the response was different between varieties. Among all tested varieties, only Yangfujing 8 showed significantly increase in hardness and stickiness under elevated CO₂ concentration. Elevated CO₂ concentration did not change eating quality of cooked rice, such as aroma, luster, intactness, flavor, taste, as well as overall palatability on an index by integrating the individual traits. Significant CO₂ by variety interactions occurred in hardness and stickiness, but not in other taste traits. These results indicated that rice grains grown in high CO₂ environments tend to be more hardy and sticky after cooking, and the texture changes were variety-dependent. The rice palatability may not change in the future high CO₂ environment.

Keywords: japonica rice; FACE(Free Air CO₂ Enrichment); texture; palatability

收稿日期: 2012-04-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31171460); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目(11KJA210003); 江苏高校优势学科建设工程资助项目
作者简介: 赵轶鹏(1980—), 男, 吉林白城人, 博士研究生, 主要从事全球气候变化生态学研究。E-mail: zhaoyipeng@yeah.net

* 通讯作者: 王余龙 E-mail: ylwang@yzu.edu.cn

工业革命以来,由于矿石燃料消费的增速和土地利用模式的改变,导致全球大气二氧化碳(CO₂)浓度不断升高,预测到 2050 年,大气 CO₂ 浓度将从当前的 380 μmol·mol⁻¹ 至少上升至 550 μmol·mol⁻¹。水稻是世界上最重要的粮食作物之一,有超过半数的人口以稻米为主食^[2],由于人口的持续增加和有效耕地面积的减少,人类对稻米特别是优质稻米的需求量将不断增加。定量评估高浓度 CO₂ 对水稻的影响对减少全球气候变化背景下世界粮食安全的不确定性具有重要意义。

目前关于高浓度 CO₂ 条件下水稻响应的研究大多集中于生长和产量方面^[3],而对品质响应的报道较少,且这些有限的研究主要集中在稻米加工、外观、蒸煮和营养品质等方面^[6],目前直接评价高浓度 CO₂ 对食味品质影响的报道仅有一例^[7]。Terao 等曾利用感官评价法研究了两季稻米食味特性对开放式 CO₂ 浓度增高(FACE, Free Air CO₂ Enrichment)的响应。

传统的官能检查实验法因为缺乏统一的标准,评定结果常受参试者的年龄、性别和喜好等因素的影响,难以保证实验的准确性。

近年来,应用近红外分光分析仪 NIR (Near infrared analyzer) 进行物质性状方面的研究已趋于成熟,此法可检出组织成分、原子间结合的差异及官能团的状况等,现已广泛应用的食味计采用的就是可见光-近红外光谱技术^[8]。运用食味检测仪器并结合科学的分析方法对稻米食味进行评价,结果重演性好,与常规感官评价一致性高,相关性好^[10]。质地特性在食味评价中所占的比重非常大,物性分析仪可替代传统的感官评价法分析蒸煮大米的质构特性^[14]。物性分析仪可精确地分析与力学特性有关的稻米品质特征(例如硬度和粘性),定量评价稻米的食用品质,避免了人为因素在对品质评价过程中产生的主观影响。

本文依托独特的稻/麦轮作系统 FACE 平台,首次利用物性分析仪和食味计分析高浓度 CO₂ 对不同粳稻品种蒸煮稻米的物性特征及食味品质的影响,以期对未来大气 CO₂ 浓度增高条件下的品种选育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验平台

本试验于 2009 年和 2010 年在江苏省江都市小纪镇良种场试验田稻麦轮作 FACE 系统平台(119°42'0"E, 32°35'5"N) 上进行。试验田土壤类型为青泥

土,当地年均降雨量约 980 mm,年均蒸发量约 1100 mm,年平均温度 14.9 ℃,年日照时间 2100 h 左右,年平均无霜期约 220 d。平台共有 3 个 FACE 试验圈和 3 个对照圈。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔>90 m,以减少 CO₂ 释放对其他圈的影响。FACE 圈为正八角形,直径约 12.5 m,通过分布在 FACE 圈周围的 PPR 管道,在水稻冠层 0.5 m 处以逆风向向圈内释放 CO₂ 气体,通过分析风向、风速及昼夜交替等因素的变化,由反馈系统自动调节 FACE 圈 CO₂ 气体释放量,使全生育期 FACE 圈内的 CO₂ 平均浓度保持在 570 μmol·mol⁻¹ 左右,控制误差为 10%。对照田块没有安装气体释放管道,环境条件与自然状态一致^[18]。供试土壤理化性质见表 1。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of test soil

全氮/ g·kg ⁻¹	速效磷/ mg·kg ⁻¹	速效钾/ mg·kg ⁻¹	土壤颗粒组成/%		
			砂粒	粉砂粒	粘粒
0.2	10.4	74.2	57.9	28.4	13.7

1.2 供试材料

本试验为裂区设计,以 CO₂ 为主区因素,品种为裂区因素。供试品种为武运粳 21、扬辐粳 8 号、武香粳 14、武粳 15 共 4 个品种。大气 CO₂ 浓度设对照(Ambient, 约 370 μmol·mol⁻¹)和比对照高 200 μmol·mol⁻¹ 的 FACE 处理 2 个水平。大田旱育秧,每年均于 5 月 23 日播种,分别于 6 月 17 日和 20 日移栽,行距 0.25 m,株距 0.167 m,每平方米 24 穴,每穴 2 苗。试验小区供肥水平见表 2。田间管理与当地方法保持一致^[19]。

表 2 2009—2010 年稻田肥料运筹

Table 2 Fertilizer application for rice in 2009—2010

年度	施肥时间	肥料运筹	P ₂ O ₅ /g·m ⁻²	K ₂ O/g·m ⁻²	N/g·m ⁻²
2009	6 月 16 日	基肥	7	7	9
		穗肥	0	0	6
		总量	7	7	15
2010	6 月 19 日	基肥	7	7	9
		穗肥	0	0	6
		总量	7	7	15

1.3 测定方法与步骤

使用出糙机(OHYA-25,日本)脱壳获得糙米,而后用 CPC-3 型精米机精加工约 1.2 min,去除皮层和胚,获得精米。过 100 目筛,每一重复称得 30 g 精米备用。

1.3.1 煮饭

将准备好的精米放入铝制圆筒内，加水 40.5 g，覆上滤纸，用胶皮圈盖紧封好，进行 30 min 的浸泡，置于配套电饭煲中加热蒸煮 30 min，切断电源，保温 10 min。取出钢罐，将其中米饭轻轻搅拌呈翻起状态，拌后盖上滤纸，放入冷却装置冷却 20 min。

1.3.2 物性分析方法

米饭煮熟约 20 min 后，每处理每次取 3 粒较完整的饭粒置于已校正的物性分析仪（型号 TA.XT plus, Stable Micro Systems Inc., 英国）载物台上，每样品重复测定 10 次，测定完成后套用 MICRO-TPA 模型进行分析，MICRO-TPA 模型解析的是探头下压时的最大峰值（硬度）及第一次压缩曲线达到零点到第二次压缩曲线开始之间的曲线负面积（反映的是探头由于测试样品的粘着作用所消耗的功）。

1.3.3 食味测定方法

稻米蒸煮后，冷却 90 min，测定其食味参数。采用日本佐竹公司生产的米饭食味计（型号 STA1A, SA-TAKE Co., Ltd），对稻米的香气值、光泽值、完整性、味道、口感和食味值（综合）进行测定，前 5 个指标以 10 分为满分分别进行评价，食味值则是综合评价值，以 100 分为满分进行评价，分值越高米饭食味越好。

1.4 统计分析方法

应用 SPSS（版本 19.0）软件对各处理间差异进行显著性分析，凡 P 值小于 0.05（或 0.01）水平视为显著（或极显著）， $P>0.05$ 视为不显著；使用 Excel（版本 2010）软件制图。

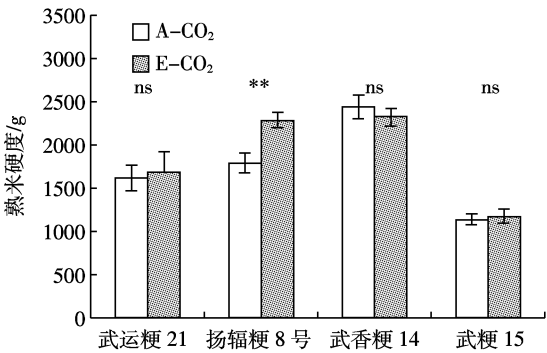
2 结果与分析

2.1 米饭物性

2.1.1 熟米硬度

高浓度 CO₂ 对 4 个不同粳稻品种熟米硬度的影

响示于图 1。从图 1 可知：(1)武运粳 21、扬辐粳 8 号、武香粳 14、武粳 15 的熟米硬度分别为 1660、2049、2394、1164 g，不同品种间的差异很大($P<0.01$)，其最大熟米硬度是最小硬度的 2.1 倍；(2)2009、2010 年熟米硬度平均分别为 1785、1849 g，年度间无显著差异（表 3）；(3)高浓度 CO₂ 使所有品种的熟米硬度平均增加 7.1%($P=0.10$)。从品种看，高浓度 CO₂ 使扬辐粳 8 号、武运粳 21 和武粳 15 的熟米硬度分别增加了 27.5%、3.9%和 4.1%，武香粳 14 的熟米硬度略有下降，其中，扬辐粳 8 号与对照的差异达极显著水平($P<0.01$)；从年度看，高浓度 CO₂ 使 2009、2010 年熟米硬度平均分别增加 8.4%和 5.8%，差异不显著。方差分析表明，尽管 CO₂ 与品种的互作对熟米硬度的影响达显著水平 ($P=0.05$)，但 CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种的互作对熟米的硬度均无显著影响。综上可知，未来大气 CO₂ 浓度升高使粳稻的熟米硬度增加，但增幅因品种而异。



图中所示为 6 次取样的均值及标准误差；
A-CO₂ 为对照，E-CO₂ 指高浓度 CO₂；
ns: not significant, 差异不显著；*: $P<0.05$ ；**: $P<0.01$ 。下同

图 1 高浓度 CO₂ 对不同水稻品种熟米硬度的影响

Figure 1 Effects of elevated CO₂ concentration on hardness of cooked rice of four japonica rice varieties

表 3 高浓度 CO₂ 对稻米物性和适口性的影响
Table 3 Effects of elevated CO₂ on texture and eating quality of rice

食味品质	CO ₂	品种	年度	CO ₂ ×品种	CO ₂ ×年度	品种×年度	CO ₂ ×品种×年度
硬度	0.105	0.003	0.433	0.052	0.666	0.249	0.895
粘性	0.175	0	0.169	0.030	0.154	0.215	0.944
香气	0.258	0.065	0.642	0.826	0.791	0.446	0.194
光泽	0.333	0.108	0.372	0.175	0.405	0.019	0.734
完整性	0.193	0.232	0.022	0.418	0.770	0.137	0.095
味道	0.560	0.111	0.566	0.323	0.456	0.115	0.617
口感	0.899	0.065	0.572	0.144	0.230	0.075	0.644
综合	0.522	0.106	0.879	0.037	0.160	0.007	0.852

注：表中数据为方差分析的 P 值， $n=12$ 。

2.1.2 熟米粘性

蒸煮大米粘性以负值表示,其绝对值越大表明米饭的粘性越大。图 2 和表 3 表明:(1)武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 等米饭粘性分别为-535、-828、-919 g 和-500 g,品种间差异很大($P<0.01$),其最大值为最小值的 1.8 倍;(2)两年熟米粘性平均分别为-679 g 和-712 g,年度间无显著差异;(3)高浓度 CO₂ 使熟米的粘性平均增加 6.0%,未达到显著水平($P=0.175$)。从品种看,高浓度 CO₂ 对武运梗 21 米饭粘性没有影响,但使扬辐梗 8 号、武香梗 14 和武梗 15 的蒸煮大米粘性分别增加 12.5%、6.9%和 2.1%,其中扬辐梗 8 号达极显著水平;从年度看,大气 CO₂ 浓度升高使 2009、2010 年熟米粘性平均分别增加 3.0%和 6.3%,差异不显著。方差分析表明,CO₂ 与品种的互作对蒸煮稻米的粘性有显著影响($P=0.03$),而 CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种的互作效应均不显著。由此可知,大气 CO₂ 浓度升高条件下,粳稻米饭粘性有增加的趋势,但增幅因品种而异。

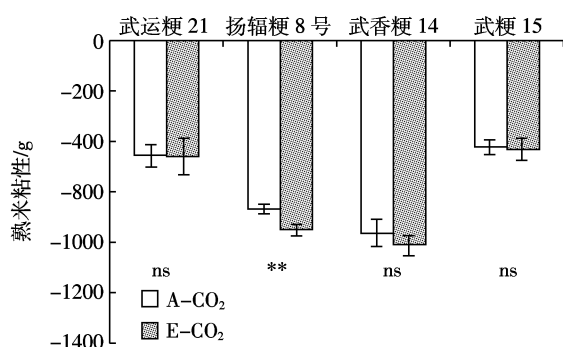


图 2 高浓度 CO₂ 对不同水稻品种熟米粘性的影响

Figure 2 Effects of elevated CO₂ concentration on stickiness of cooked rice of four japonica rice varieties

2.2 稻米食味品质

2.2.1 米饭香气

如图 3 所示:(1)武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 等 4 个粳稻品种的香气值分别为 6.4、6.7、6.5 和 6.5,品种间差异较小($P=0.06$);(2)2009、2010 年米饭香气值分别是 6.8 和 6.3,年度间差异不显著(表 3);(3)与对照相比,高浓度 CO₂ 使米饭香气值平均降低 1%,未达显著水平。从品种看,高浓度 CO₂ 对武运梗 21、扬辐梗 8 号、武梗 15 和武香梗 14 的香气值(变幅为 0%~1.5%)均无显著影响;从年度看,2009、2010 年高浓度 CO₂ 环境下米饭香气值平均降幅均小于 1%,未达显著水平。方差分析结果表明,

CO₂ 与品种、CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种的互作对香气值均无显著影响。综上所述,高浓度 CO₂ 对粳稻米饭的香气值没有影响,不同品种不同年度趋势一致。

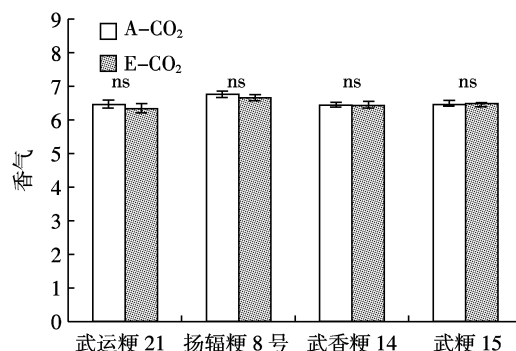


图 3 高浓度 CO₂ 对不同水稻品种稻米香气的影响

Figure 3 Effects of elevated CO₂ concentration on aroma of four japonica rice varieties

2.2.2 米饭光泽度

米饭光泽度与其他指标不同,分值为 5 时表示光泽度最好。图 4 表明:(1)武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 的光泽度分别为 5.8、7.0、6.4 和 6.4,经检验品种间差异不显著(表 3);(2)2009、2010 年光泽值平均分别为 6.3 和 6.5,年度间差异不显著;(3)高浓度 CO₂ 使光泽度降低 1.5%,未达显著水平。从品种看,高浓度 CO₂ 使武运梗 21、扬辐梗 8 号和武梗 15 蒸煮大米的光泽度分别降低了 1.1%、3.4%和 2.6%,武香梗 14 的光泽度略有上升(2.6%),差异均未达显著水平;从年度看,2009、2010 年高浓度 CO₂ 环境下米饭的光泽度平均分别降低 2.0%、0.5%,差异不显著。CO₂ 与品种、CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种的互作对米饭光泽度的影响不大。综上所述,高浓度 CO₂ 对粳稻米饭的光泽度没有影响,不同品种不同年度趋势一致。

2.2.3 米饭完整性

图 5 表明:(1)武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 的完整性分值依次为 7.0、6.5、6.7 和 6.6,品种间差异不显著(表 3);(2)两年熟米完整性分值分别为 7.2 和 6.1,年度间差异达显著水平($P=0.02$);(3)高 CO₂ 浓度使熟米米粒的完整性增加 1.2%,差异不显著。从品种看,高 CO₂ 浓度使武运梗 21、扬辐梗 8 号、武梗 15 完整性平均分别增加 4.5%、1.1%和 0.2%,使武香梗 14 完整性略有降低(1.3%),但与对照间差异均未达显著水平;从年度看,大气 CO₂ 浓度

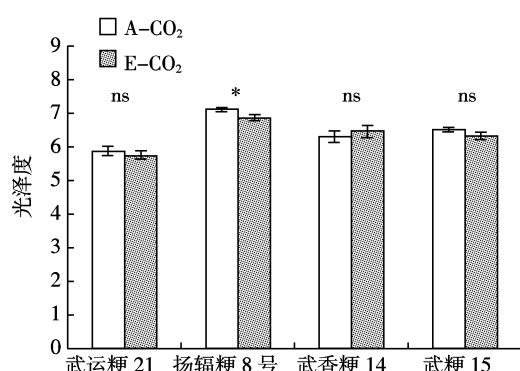
图 4 高浓度 CO₂ 对不同品种稻米光泽度的影响

Figure 4 Effects of elevated CO₂ concentration on luster of four japonica rice varieties

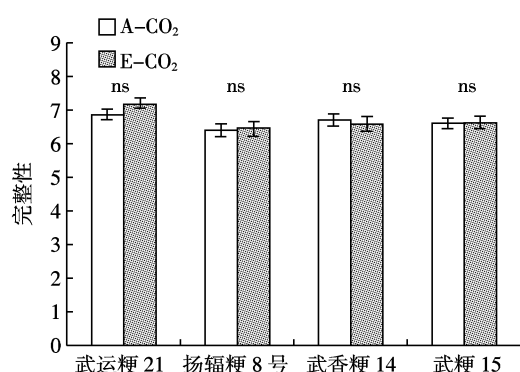
图 5 高浓度 CO₂ 对不同品种稻米完整性的影响

Figure 5 Effects of elevated CO₂ concentration on intactness of four japonica rice varieties

升高使 2009、2010 年米饭的完整性均值分别提高 0.7%、1.6%，差异不显著。虽然品种与 CO₂、CO₂ 与年度以及年度与品种的互作对米饭完整性没有显著的影响，但 CO₂ 与年度和品种的互作 ($P=0.10$) 对米饭完整性的影响接近显著水平。综上所述，高浓度 CO₂ 对粳稻米饭完整性基本没有影响，不同品种不同年度趋势一致。

2.2.4 米饭味道

高浓度 CO₂ 对米饭味道的影响示于图 6，结果表明：(1) 武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 等 4 个品种味道分值分别为 6.5、7.0、6.7 和 6.7，品种间差异不显著 (表 3)；(2) 2009 和 2010 两年蒸煮大米味道分值分别是 6.4 和 6.3，年度间差异不显著；(3) CO₂ 浓度升高使蒸煮稻米味道分值降低了 1.3%，未达显著水平。从品种看，高浓度 CO₂ 使扬辐梗 8 号、武梗 15 米饭味道分值平均分别下降 2.2% 和 1.4%，与对照相比差异分别达极显著 ($P<0.01$) 和接近显著水平 ($P=0.10$)，使武运梗 21、武香梗 14 味道分值平均分别提

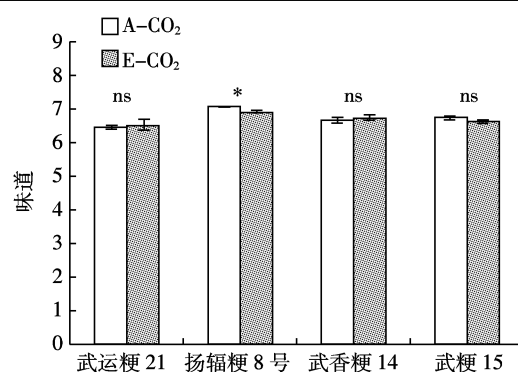
图 6 高浓度 CO₂ 对不同品种稻米味道的影响

Figure 6 Effects of elevated CO₂ concentration on flavor of four japonica rice varieties

高 1.0%，差异不显著；从年度看，高浓度 CO₂ 对 2010 年味道值没有影响，使 2009 年米饭的味道值平均降低 1.0%，差异不显著。CO₂ 与品种、CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种的互作效应对米饭味道均无显著影响。综上所述，高浓度 CO₂ 对粳稻米饭的味道影响不大，不同年度趋势一致。

2.2.5 米饭口感

高浓度 CO₂ 对稻米口感的影响示于图 7：(1) 武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 等 4 个品种口感分值依次为 6.0、6.7、6.4 和 6.4，方差分析显示，品种间差异接近显著水平 ($P=0.06$)，最大值比最小值高 12.5%；(2) 2009 与 2010 年两年间的差异不显著 (表 3)；(3) CO₂ 浓度升高使蒸煮稻米口感变差，降幅为 1.3%，与对照无显著差异。从品种看，受高浓度 CO₂ 的影响武运梗 21、武香梗 14 口感值平均分别提升 2.0% 和 2.4%，与对照相比差异不显著，扬辐梗 8 号、武梗 15 口感平均分别下降 1.7% 和 2.9%，其中，武梗 15 与对照的差异达极显著水平 ($P<0.01$)；从年度看，高浓度 CO₂ 使 2009 年米饭口感下降 1.1%，使 2010 年口感值提高 0.9%，差异均未达显著水平。方差分析表明，品种与 CO₂、CO₂ 与年度以及 CO₂ 与年度和品种的互作对米饭口感的影响不大，年度与品种的互作对米饭口感的影响接近显著水平 ($P=0.07$)。综上所述，高浓度 CO₂ 对粳稻米饭的口感的影响不大。

2.2.6 食味综合值

综合值是对稻米适口性的整合评价，从图 8 可知：(1) 武运梗 21、扬辐梗 8 号、武香梗 14、武梗 15 等 4 个品种食味综合值分别为 65.5、72.0、70.0 和 69.9，品种间差异不显著 (表 3)；(2) 2009、2010 年食味值均

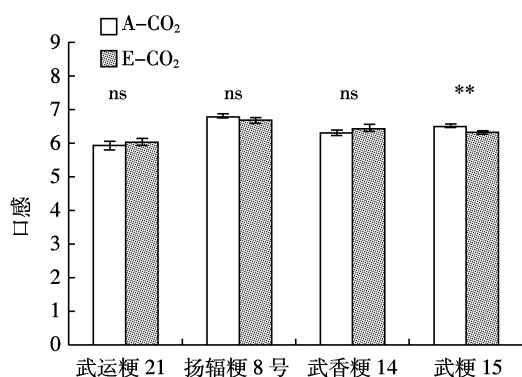
图 7 高浓度 CO₂ 对不同品种稻米口感的影响

Figure 7 Effects of elevated CO₂ concentration on taste of four japonica rice varieties

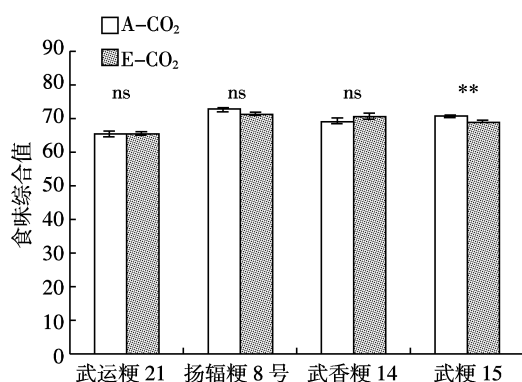
图 8 高浓度 CO₂ 对不同品种蒸煮稻米食味值的影响

Figure 8 Effects of elevated CO₂ concentration on the index of taste value of four japonica rice varieties

值平均分别为 69.3 和 69.5, 年度间无显著差异; (3) 高浓度 CO₂ 使蒸煮稻米适口性降低 0.5%, 差异未达显著水平。从品种上看, 高浓度 CO₂ 使武运梗 21、扬辐梗 8 号和武梗 15 的米饭食味综合值平均分别降低 0.1%、1.7% 和 2.2%, 其中武梗 15 降幅最大 ($P < 0.01$), 扬辐梗 8 号降幅较小 ($P = 0.09$), 使武香梗 14 食味值提高 2.0%, 未达显著; 从年度看, 高浓度 CO₂ 对 2010 年米饭适口性没有影响, 但使 2009 年米饭适口性平均降低 1.0%, 差异未达显著水平。虽然 CO₂ 与品种的互作对食味综合值有显著的影响 ($P = 0.04$), 但 CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种的互作对米饭食味综合值的影响均不显著。综上所述, 高浓度 CO₂ 对粳稻米饭食味综合值的影响因品种而异。

3 讨论

应用物性分析仪可以测定蒸煮稻米的硬度与粘性等两个关键性品质指标, 其中, 硬度值是指米粒抵

抗硬物压入表面的抗衡力^[17]。本研究表明, 未来高浓度 CO₂ 环境下粳稻蒸煮稻米的硬度呈增加趋势 (图 1 和表 3)。一般认为, 米饭硬度与直链淀粉和钙含量呈正相关, 稻米中直链淀粉含量增加会提高稻米的硬度^[20]; Seneweera 等^[21]的气室实验发现高浓度 CO₂ 使不同施磷量条件下早稻 Jarrah 籽粒的直链淀粉含量和钙浓度均显著增加, 认为这是蒸煮稻米变硬的主要原因, 但 FACE 试验亦有不同的报道^[7]。前人相关研究多为一个品种^[21], 本文对 4 个供试粳稻品种的研究还发现, 蒸煮稻米的硬度对高浓度 CO₂ 的响应存在基因型差异, 表现在 CO₂ 与品种的互作达极显著水平 (表 3), 其中扬辐梗 8 号硬度的增幅高达 7.1% (图 1)。与此不同, CO₂ 与年度、品种与年度、CO₂ 与年度和品种间的互作对米饭硬度均无显著影响 (表 3), 说明高浓度 CO₂ 环境下蒸煮稻米变硬两年趋势一致。

米饭粘性是表示蒸煮稻米分子间产生的摩擦力大小^[17]。综合两年的数据, FACE 处理下稻米的粘性有增加趋势 (图 2), 不同年度表现一致 (表 3)。稻米粘性与 RVA 谱和蛋白质含量有关。一般认为, 米饭粘性与 RVA 谱的崩解值极显著正相关, 与消减值^[23]和蛋白质含量^[24]呈负相关, 前人 FACE 研究一致表明在高浓度 CO₂ 环境中生长的水稻稻米的崩解值显著升高, 消减值和蛋白质含量显著降低^[7], 这可能也是本试验观察到米饭粘性增加的主因。与蒸煮稻米的硬度相似, 本研究发现稻米粘性对 CO₂ 的响应在品种间存在一定差异 (表 3), 而 CO₂ 与年度、年度与品种以及 CO₂ 与年度和品种间均无互作效应。

本实验首次使用食味计测定了 FACE 蒸煮稻米的食味特性。高浓度 CO₂ 环境蒸煮稻米的香气 (图 3)、光泽度 (图 4)、味道 (图 6) 和口感 (图 7) 等食味品质指标均未达显著水平 (表 3), 这与 Terrao 等^[7]用人工品尝的方法得到的结论基本一致, 该研究发现高浓度 CO₂ 环境下蒸煮稻米的鲜味和综合适口性指数略有增加或没有变化, 而稻米外观、香味和硬度指标的响应方向两年正好相反, 但统计表明上述指标的变化均未达 0.1 显著水平。

本研究对 4 个供试品种连续两年的观察结果表明, 高浓度 CO₂ 环境下生长的稻米适口性没有变化, 但米饭的硬度和粘性呈增加趋势, 增幅因品种而异。本文仅研究了高浓度 CO₂ 对不同粳稻品种食味品质的影响, 接下来的试验中, 参照相关的食味回归方程^[25], 应进一步引入包括籼稻及杂交稻在内的更多的品种 (系), 以全面了解未来大气背景环境中稻米食味

品质可能发生的变化。

4 结论

研究表明,FACE 条件下,粳稻蒸煮稻米的硬度及粘性均有所增加,其中扬辐粳 8 号增幅较大。蒸煮稻米的适口性对大气 CO₂ 浓度升高的响应不明显。前人的研究虽然涉及了稻米的加工品质、外观品质、蒸煮品质和营养品质等多个方面,但还不足以全面说明未来高浓度 CO₂ 环境中稻米品质可能发生的变化,本文进一步明确了高浓度 CO₂ 对粳稻稻米物性及适口性等食味品质特征的影响,是对高浓度 CO₂ 环境中稻米品质性状相关研究的有力补充,从而为未来粮食安全政策的制定提供了参考。

参考文献:

- [1] Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. Global climate projections [R]. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2007: 747-845.
- [2] Maclean J L, Dawe D C. Rice almanac; Source book for the most important economic activity on Earth[M]. (3rd edn). Oxon, UK, CABI Publishing, 2002.
- [3] 杨连新, 王余龙, 黄建晔, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高对水稻生长发育影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(7): 1331-1337.
YANG Lian-xin, WANG Yu-long, HUANG Jian-ye, et al. Responses of rice growth and development to free-air CO₂ enrichment (FACE): A research review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(7): 1331-1337.
- [4] 杨连新, 王云霞, 朱建国, 等. 十年水稻 FACE 研究的产量响应[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1486-1497.
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 CO₂ and grain yield[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1486-1497.
- [5] 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, 30(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, 30(6): 1573-1585.
- [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] Terao 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: 1861-1868.
- [8] 陈浩. 大米食味及食味计[J]. 粮食与饲料工业, 2000, 4: 13-14.
CHEN Hao. Rice taste and taste analyzer[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2000, 4: 13-14.
- [9] 三上隆司. 水稻检测仪器的开发与利用[J]. 北方水稻, 2008, 38(5): 78-80.
- [10] Takashi Mikami. Development and application of rice detectors[J]. *North Rice*, 2008, 38(5): 78-80.
- [11] 张小明, 石春海, 富田桂. 粳稻米淀粉特性与食味间的相关性分析[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(2): 157-161.
ZHANG Xiao-ming, SHI Chun-hai, Tomita Katsura. Correlation analysis between starch characteristics and taste quality in japonica rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2002, 16(2): 157-161.
- [12] 孟庆虹, 李霞辉, 三上隆司, 等. 可见光-近红外光谱预测粳稻食味的适应性研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(5): 90-99.
MENG Qing-hong, LI Xia-hui, Takashi Mikami, et al. Predicting eating quality of short grain rice by using visible and near infrared spectroscopy[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2010, 25(5): 90-99.
- [13] 赖穗春, 河野元信, 王志东, 等. 米饭食味计评价华南籼稻食味品质[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(4): 435-438.
LAI Sui-chun, Motonobu Kawano, WANG Zhi-dong, et al. Cooking and eating quality of indicarice varieties from South China by using rice taste analyzer[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(4): 435-438.
- [14] 周显青, 张玉荣. 大米食味品质评价技术进展[J]. 粮食与饲料工业, 2011, 5: 37-41.
ZHOU Xian-qing, ZHANG Yu-rong. Advances in rice taste evaluation technique[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2011, 5: 37-41.
- [15] Champagne E T, Lyon B G, Min B K, et al. Effects of post harvest processing on texture profile analysis of cooked rice[J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75(2): 181-186.
- [16] Meullenet J F, Champagne E, Bett K L, et al. Instrumental assessment of cooked rice texture characteristics: A method for breeders[J]. *Cereal Chemistry*, 2000, 77(4): 512-517.
- [17] 郭兴凤, 慕运动. 蒸煮大米质构特性测定方法分析[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(2): 9-11.
GUO Xing-feng, MU Yun-dong. Evaluation of a method for determining texture characteristics of cooked rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2006, 21(2): 9-11.
- [18] 高远, 周骥平, 姜楠, 等. 米饭硬度和黏度测量方法及技术的分析[J]. 扬州大学学报, 2010, 31(1): 91-94.
GAO Yuan, ZHOU Ji-ping, JIANG Nan, et al. Analysis of methodology and technology in measurement of hardness and viscosity of cooked rice [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2010, 31(1): 91-94.
- [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] Yang L X, Huang J Y, Yang H J, et al. Seasonal changes in the effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on dry matter production and distribution of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Field Crops Research*, 2006, 98(1): 12-19.
- [21] 朱庆森, 杜永, 王志琴, 等. 杂交稻米的直链淀粉含量与米饭口感

- 粘度硬度关系的研究[J]. 作物学报, 2001, 27(3):377-382.
- ZHU Qing-sen, DU Yong, WANG Zhi-qin, et al. Relationship between amylose content and edible stickiness and softness of cooked rice of hybrids[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(3):377-382.
- [21] Seneweera S, 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.
- [22] 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.
- [23] 舒庆尧, 吴殿星, 夏英武, 等. 淀粉 RVA 谱特征与食用品质的关系[J]. 中国农业科学, 1998, 31(3):25-29.
- SHU Qing-yao, WU Dian-xing, XIA Ying-wu, et al. Relationship between RVA profile character and eating quality in *Oryza sativa* L[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(3):25-29.
- [24] 黄发松, 孙宗修, 胡培松, 等. 食用稻米品质形成研究的现状与展望[J]. 中国水稻科学, 1998, 12(3):172-176.
- HUANG Fa-song, SUN Zong-xiu, HU Pei-song, et al. Present situations and prospects for the research on rice grain quality forming[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 1998, 12(3):172-176.
- [25] 吕庆云, 三上隆司, 河野元信, 等. 适合中国南方产籼米米饭食味评价方法的研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(5):13-16.
- LÜ Qing-yun, Takashi Mikami, Motonobu Kawano, et al. The evaluation methods for long-grain rice produced in South China[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2006, 21(5):13-16.