

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2013.00566

# 自由空气中臭氧浓度升高对“武运粳 21”稻米物性及食味品质的影响\*

宋琪玲<sup>1</sup> 齐义涛<sup>1</sup> 赵轶鹏<sup>1</sup> 王云霞<sup>1</sup> 李潘林<sup>1</sup> 朱建国<sup>2</sup>  
王余龙<sup>1</sup> 杨连新<sup>1\*\*</sup>

(1. 扬州大学农学院 江苏省作物遗传生理重点实验室 扬州 225009; 2. 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008)

**摘 要** 研究表明不断升高的地表臭氧浓度使作物生长受抑、产量下降,但对作物品质的影响则不太清楚,特别是食味品质。本文于2009年和2010年在江苏省江都市小纪镇依托自由空气中臭氧浓度增高(free air ozone concentration enrichment, O<sub>3</sub>-FACE)技术平台,以本地主栽水稻品种“武运粳 21”为供试材料,设置大气背景臭氧浓度和高臭氧浓度(比大气背景臭氧浓度高50%)2个水平,研究了地表臭氧浓度升高对粳稻物性和食味品质的影响。物性分析仪测定结果表明,高浓度臭氧使熟米硬度平均增加13.6%,达显著水平。食味计测定结果显示,高浓度臭氧使稻米香气、光泽、味道、口感和综合值分别下降0.8%( $P>0.1$ )、6.2%( $P<0.1$ )、2.6%( $P<0.1$ )、5.1%( $P<0.05$ )、4.3%( $P<0.05$ ),使完整性增加2.0%( $P<0.05$ )。不同年度间稻米物性和食味品质的差异较大,但年度与臭氧间的交互作用未达显著水平。以上结果表明,未来高浓度臭氧环境下生长的稻米蒸煮后将呈变硬趋势,食味品质总体变劣。

**关键词** 臭氧 自由空气中臭氧浓度增高(O<sub>3</sub>-FACE) 水稻 物性 食味品质

**中图分类号**: X503.231 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-3990(2013)05-0566-06

## Impact of free air ozone concentration enrichment on cooked rice (Wuyunjing 21) texture and palatability

SONG Qi-Ling<sup>1</sup>, QI Yi-Tao<sup>1</sup>, ZHAO Yi-Peng<sup>1</sup>, WANG Yun-Xia<sup>1</sup>, LI Pan-Lin<sup>1</sup>, ZHU Jian-Guo<sup>2</sup>,  
WANG Yu-Long<sup>1</sup>, YANG Lian-Xin<sup>1</sup>

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

**Abstract** Without appropriate control of ozone precursor emissions, tropospheric ozone concentration will be projected to increase significantly by the middle of this century. Rice (*Oryza sativa* L.), the most important food crop, has provided nutrition for more than half of the world's population over the centuries. Elevated ozone concentration has been noted to induce a series of physiological changes in rice crop. Such changes have included changes in the processes of photosynthesis, water relation, nutrient absorption/translocation and grain filling. Such altered physiological processes due to ozone exposure have likely affected the physical and chemical properties of rice grain and thus grain quality. To date, most studies on rice response to ozone stress have focused on growth and yield with little known issues on the effects of ozone on grain quality, especially the taste of edible crops. To investigate the effects of elevated ozone concentration on the texture and taste of cooked rice, a unique free air ozone concentration enrichment (ozone-FACE) experiment was conducted in two consecutive rice growing seasons (2009 and 2010). The FACE experiment was located in Xiaoji Town in Jiangdu County of Jiangsu Province, China (119°42'0"E, 32°35'5"N). A native *Japonica* rice cultivar “Wuyunjing 21” was exposed to ambient or elevated ozone concentration of 50% above ambient value. Texture analyzer measurements showed that the hardness of cooked rice

\* 国家重点实验室开放基金(0812201233)、中国科学院知识创新方向项目(KZCX2-EW-414)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目、江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11\_1022)和扬州大学科技创新培育基金项目(2012CXJ054)资助

\*\* 通讯作者: 杨连新(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事作物栽培、生理和生态方面的研究。E-mail: lxyang@yzu.edu.cn  
宋琪玲(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事农产品安全与环境研究。E-mail: sql121314@126.com

收稿日期: 2012-10-30 接受日期: 2013-01-05

increased by 13.6% ( $P < 0.05$ ) under elevated ozone concentration. Sensory analyzer evaluation of taste also showed that elevated ozone concentration respectively decreased aroma, luster, flavor, taste and integrated value by 0.8% ( $P > 0.1$ ), 6.2% ( $P < 0.1$ ), 2.6% ( $P < 0.1$ ), 5.1% ( $P < 0.05$ ) and 4.3% ( $P < 0.05$ ) and increased intactness by 2.0% ( $P < 0.05$ ). While the yearly effect was significant for all texture and taste variables of cooked rice, the interaction between year and ozone was in the most cases not detected. The above results suggested that rice grown under future high ozone environments will have greater hardness and deteriorated taste properties after cooking.

**Key words** Ozone, Free air ozone concentration enrichment (ozone-FACE), Rice, Texture, Taste quality

(Received Oct. 30, 2012; accepted Jan. 5, 2013)

在许多亚洲国家,近年来快速的经济增长伴随空气污染物  $\text{NO}_x$ 、CO 和挥发性有机化合物的排放,这些气体在高温和高辐照条件下转化为臭氧<sup>[1-3]</sup>,结果导致许多亚洲国家地表臭氧浓度迅速上升,其中包括中国和印度<sup>[4-6]</sup>。据预测,在未来 40 年里,东亚和南亚地区地表平均臭氧浓度将比现在高  $25 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[1,3]</sup>。水稻是世界上最重要的粮食作物之一,为全球半数以上的人口提供了 35%~60% 的饮食热量<sup>[7]</sup>。目前关于臭氧胁迫下水稻响应的研究大多集中于生长发育和产量形成方面,而对稻米品质的研究甚少<sup>[8-9]</sup>。仅有的几例研究表明,高浓度臭氧环境下收获的稻米<sup>[10-12]</sup>或稻草品质<sup>[12-13]</sup>总体表现出变劣的趋势。随着人们对稻米物理和化学品质的要求日益提高,加强这一领域的研究非常重要<sup>[8-9]</sup>。

蒸煮食味品质是稻米品质中最重要的性状之一。长期以来对稻米食味品质的评价以感官品尝为主,但该方法费时费力,且不易标准化,评定结果常受评价员个人因素的影响,难以保证试验的准确性。物性分析仪(Texture Analyser)是近年来用于客观评价稻米质构特性的一种仪器,其通过探头以稳定速度进行下压、穿透样品时受到的阻力来表示<sup>[14]</sup>,可以测定稻米的黏性、硬度、弹性等指标<sup>[15-18]</sup>。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亦取得重要进展。例如,根据 NIR 的原理研制出来的食味计,主要是通过测量与食味有关的指标来衡量稻米的食味品质。与感官鉴定相比,食味计测定法具有样品用量少、快捷、可靠以及可比性好等特点,越来越多地被用于国内稻米食味特性的鉴定中<sup>[15,19-20]</sup>。

本文依托全球首个稻田臭氧 FACE 系统平台,利用物性分析仪和 SATAKE 食味计,连续两年研究臭氧胁迫对“武运梗 21”稻米物性及食味品质的影响,以期对近地层臭氧浓度增高情形下稻作生产适应策略的制定提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验平台

本试验于 2009—2010 年在中国水稻臭氧 FACE

研究技术平台上进行。该平台建于江苏省江都市小纪镇( $119^{\circ}42'0''\text{E}$ ,  $32^{\circ}35'5''\text{N}$ )良种场试验田中。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  $14.9^{\circ}\text{C}$ ,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—冬小麦轮作。土壤理化性质为:有机碳  $18.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全磷  $0.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全钾  $14.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷  $10.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $70.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,砂粒( $2 \sim 0.02 \text{ mm}$ )  $578.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,粉砂粒( $0.02 \sim 0.002 \text{ mm}$ )  $285.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,黏粒( $<0.002 \text{ mm}$ )  $136.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,容重  $1.16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,pH 7.2<sup>[21]</sup>。

平台共有 3 个 FACE 实验圈和 3 个对照(Ambient)圈。FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 70 m,以减少臭氧释放对其他圈的影响。FACE 圈设计为直径 14 m 的正八角形,通过 FACE 圈周围的管道向 FACE 圈中心喷射纯臭氧气体,利用计算机网络对平台的臭氧浓度进行检测和控制,根据大气中的臭氧浓度、风向、风速、作物冠层高度的臭氧浓度及昼夜变化等因素自动调节臭氧的释放速度及方向,使水稻全生育期 FACE 圈内臭氧浓度保持比大气中臭氧浓度高 50%<sup>[22]</sup>。当对照圈  $\text{O}_3$  浓度低于  $20 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、下雨和露水等造成叶片湿润以及校正  $\text{O}_3$  分析仪、检修设备等的时候暂停放气,因此水稻生长季 FACE 圈内实际平均  $\text{O}_3$  浓度比对照圈  $\text{O}_3$  浓度只增加 25%左右。对照田块没有安装 FACE 管道,其余环境条件与自然状态一致。处理时间为 7 月 1 日至成熟期(2009 年、2010 年分别为 10 月 4 日、10 月 5 日),晴天或多云天气的每日 9:00—19:00 排放臭氧,阴雨天气停止排放。

### 1.2 材料培育

供试品种为常规粳稻“武运梗 21”。大田旱育秧,5 月 21 日播种,6 月 18 日移栽,10 月 5 日(2009 年)或 10 月 6 日收获(2010 年);行距为 25 cm,株距为 16.7 cm,每穴 3 苗。总施氮量为  $20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其中 6 月 17 日施基肥(占总施氮量的 50%),6 月 25 日施分蘖肥(占总施氮量的 10%),8 月 6 日施穗肥(占总施氮量的 40%)。磷、钾肥均作为基肥全部施用。施磷、钾量均为  $7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。水分管理为 6 月 19 日—7 月 3 日保

持浅水层(约 5 cm), 7 月 4 日—8 月 5 日进行多次轻搁田, 8 月 6 日以后间隙灌溉, 抽穗扬花期保持浅水, 收获前 10 日断水。适时进行病虫害防治, 保证水稻正常生长发育。

### 1.3 测定内容和方法

水稻手工收获后, 风干 3 个月, 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, 每重复称得 30 g 精米备用。

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

米饭煮熟约 20 min 后, 每重复每次取 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.)载物台上进行物性(包括硬度和黏性)测定, 重复 10 次, 测定完成后套用 MICRO-TPA 模型进行分析。

稻米蒸煮后, 冷却 90 min, 测定其食味参数。采用日本佐竹公司(SATAKE)生产的米饭食味计(型号

STA1A)对稻米的香气值、光泽值、完整性、味道、口感和食味值进行测定, 前 5 个指标以 10 分为满分进行评价, 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

所有数据采用 Excel 软件进行数据处理和图表绘制, 采用 SPSS 18.0 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  $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 、 $P<0.1$ 、 $P>0.1$ , 分别用\*\*\*、\*\*、\*和 ns 表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 臭氧浓度升高对米饭物性的影响

物性分析仪测定的硬度值是指蒸煮稻米抵抗硬物压入表面的抗衡力。图 1a 表明, 2009 年和 2010 年“武运梗 21”平均熟米硬度分别是 2 845 g 和 2 401 g, 年度间差异达显著水平。与对照相比, 高浓度臭氧使熟米硬度平均增加 13.6%( $P=0.04$ ), 其中 2009 年和 2010 年分别升高 11.2%和 16.5%, 2010 年达极显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度互作对水稻熟米硬度无显著影响。可见, 未来近地层臭氧浓度升高使“武运梗 21”熟米硬度变硬, 不同年度趋势基本一致。

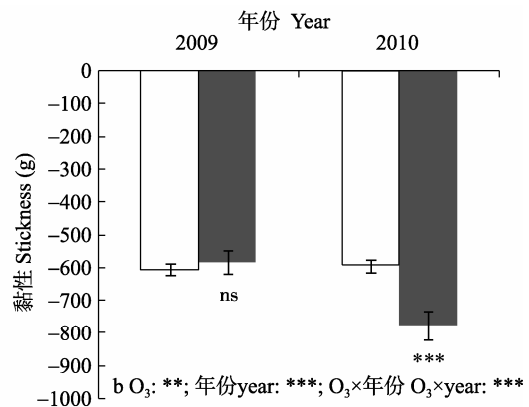
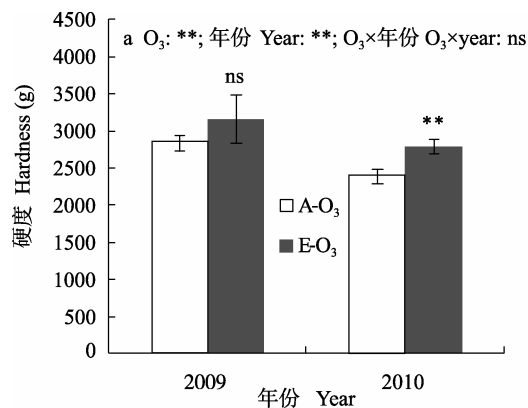


图 1 高浓度臭氧(O<sub>3</sub>)对 2009 年和 2010 年“武运梗 21”熟米硬度(a)和黏性(b)的影响

Fig. 1 Effects of elevated ozone (O<sub>3</sub>) concentration on hardness (a) and stickiness (b) of cooked rice “Wuyunjing 21” in 2009 and 2010

E-O<sub>3</sub>: 高浓度臭氧 Elevated ozone; A-O<sub>3</sub>: 大气背景臭氧浓度 Ambient ozone. ns: 差异不显著 No significance; \*:  $P<0.1$ ; \*\*:  $P<0.05$ ; \*\*\*:  $P<0.01$ . 下同 The same below.

蒸煮稻米的黏性以负值表示, 其绝对值越大, 米饭的黏性越大。高浓度臭氧对“武运梗 21”熟米黏性的影响见图 1b。由图可知, 2009 年和 2010 年“武运梗 21”平均熟米黏性分别是-606 g 和-594 g, 差异达极显著水平。与对照相比, 高浓度臭氧使熟米黏性平均升高 13.2%( $P=0.02$ )。从不同年度看, 高浓度臭氧对 2009 年熟米黏性无显著影响, 但使 2010 年熟米黏性平均增高 30.7%, 达极显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度互作对水稻熟米黏性的影响达极显著水平, 说明臭氧胁迫对稻米黏性的影响因年度

而异。

### 2.2 臭氧浓度升高对稻米食味品质的影响

高浓度臭氧对“武运梗 21”稻米香气的影响见图 2a。由图可知, 2009 年和 2010 年米饭的香气值平均分别是 6.2 和 6.0, 两年间差异达极显著水平。臭氧胁迫下两年熟米的香气均呈减弱趋势, 其中 2010 年米饭香气值降低 1.4%, 达显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度的互作对稻米香气值无显著影响。

“武运梗 21”米饭光泽度的变化见图 2b。由图表明, 2009 年和 2010 年米饭光泽度值平均分别为 5.7

和 5.2, 两年间差异达极显著水平。臭氧胁迫使“武运梗 21”米饭的光泽度降低: 两年平均, 高浓度臭氧使米饭光泽度降低 6.2%( $P=0.07$ ), 其中 2009 年和 2010

年分别下降 4.2%和 8.4%, 2010 年达 0.01 显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度的互作对米饭光泽度无显著影响。

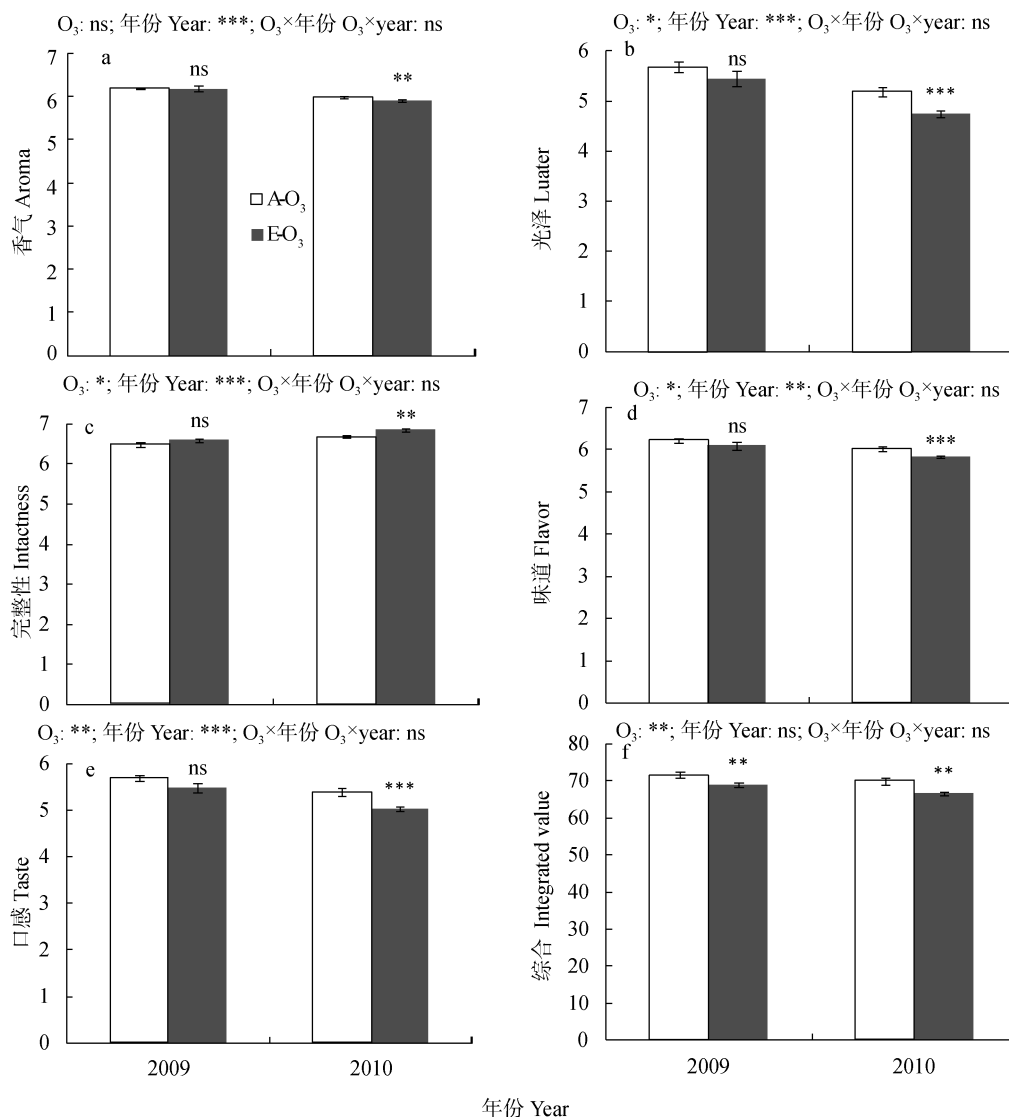


图 2 高浓度臭氧( $O_3$ )对 2009 年和 2010 年“武运梗 21”稻米香气(a)、光泽(b)、完整性(c)、味道(d)、口感(e)和综合值(f)的影响

Fig. 2 Effects of elevated ozone ( $O_3$ ) concentration on aroma (a), luster (b), intactness (c), flavor (d), taste (e) and integrated value (f) of cooked rice “Wuyunjing 21” in 2009 and 2010

“武运梗 21”米饭完整性的变化见图 2c。由图可知: 2009 年和 2010 年“武运梗 21”米饭完整性值平均分别为 6.5 和 6.7, 差异达极显著水平。与对照相比, 高浓度臭氧使两年米饭完整性平均升高 2.0%( $P=0.07$ ), 其中 2009 年和 2010 年分别升高 1.7%和 2.4%, 2010 年达显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度互作对米饭完整性无显著影响。

图 2d 为“武运梗 21”蒸煮稻米味道分值的变化。由图可知, 2009 年和 2010 年“武运梗 21”的米饭味道分值平均分别为 6.2 和 6.0, 两年间差异显著。与对照相比, 高浓度臭氧使米饭味道分值平均降低

2.6%( $P=0.09$ ), 其中 2009 年和 2010 年米饭味道分值分别下降 2.0%和 3.3%, 2010 年达极显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度互作对米饭味道无显著影响。

米饭口感值亦是稻米食味品质的重要指标。由图 2e 可知, 2009 年和 2010 年“武运梗 21”的米饭口感值平均分别是 5.7 和 5.4, 年度间差异达极显著水平。与对照相比, 高浓度臭氧使米饭口感值平均降低 5.1%( $P=0.04$ ), 其中 2009 年和 2010 年分别降低 3.6%( $P=0.1$ )、6.7%( $P<0.01$ )。方差分析表明, 臭氧与年度互作对米饭口感无显著影响。

综合值是对稻米食味品质的整合评价。由图 2f 可知: 2009 年和 2010 年“武运粳 21”的米饭食味综合值平均分别为 71.6 和 69.9, 无显著差异。与对照相比, 高浓度臭氧使米饭食味综合值平均降低 4.3%, 达 0.05 显著水平。从不同年度来看, 臭氧胁迫使 2009 年和 2010 年米饭食味综合值平均降低 3.8%、4.8%, 均达 0.05 显著水平。方差分析表明, 臭氧与年度互作对米饭食味综合值无显著影响。

### 3 讨论

粮食作物品质与粮食安全的关系越来越密切。尽管干旱和盐害等非生物逆境对稻米食味品质的研究已有报道<sup>[23-24]</sup>, 但人们对臭氧胁迫下稻米食味品质的变化知之甚少<sup>[8-9]</sup>。本研究采用物性分析仪和 SATAKE 食味计, 研究了臭氧胁迫对稻米物性和食味品质的影响, 结果表明近地层臭氧浓度升高使“武运粳 21”熟米硬度显著增加, 食味品质总体变劣。这种变化趋势可能与臭氧胁迫下稻米蛋白质和 RVA 谱的响应有关。气室<sup>[11,25]</sup>和 FACE 研究<sup>[10]</sup>均表明臭氧胁迫下稻米的蛋白质含量均明显增加, 其他植物食用部位亦是如此<sup>[9]</sup>。一般认为蛋白质含量高的稻米, 米粒结构紧密, 淀粉粒之间的空隙小, 吸水速度慢, 吸水量少, 米饭硬度大<sup>[26]</sup>。与此不同, 大米蛋白质含量与其食味品质间存在显著负相关关系<sup>[27-30]</sup>。因此, 臭氧胁迫下蛋白质含量增加可能是蒸煮米变硬和食味变劣的一个重要原因。另一方面, 米饭质地和食味品质亦与 RVA 谱特征值存在密切关系。一般认为, 米饭硬度与消解值呈极显著正相关, 与崩解值呈极显著负相关<sup>[31]</sup>; 食味值与最高黏度和崩解值呈显著正相关, 而与消减值呈显著负相关<sup>[32-33]</sup>。Wang 等<sup>[10]</sup>最新 FACE 研究表明, 地表臭氧浓度升高使“汕优 63”米粉的最高黏度值、崩解值显著减少, 而消解值显著增加, 这一变化与本试验观察到臭氧胁迫下稻米硬度增加食味品质总体变劣的结果一致。

两年试验比较还发现, 尽管 2009 年和 2010 年稻米物性和食味指标对臭氧胁迫的响应方向相同(黏性除外), 但两年响应的程度存在差异: 2010 年的变幅明显大于 2009 年。FACE 平台数据表明, 2009 年和 2010 年臭氧熏气期间日 7 h 平均臭氧浓度对照圈分别为  $35.9 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $41.1 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ , FACE 圈分别为  $43.5 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $51.5 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[34]</sup>。无论是对照圈的平均臭氧浓度, 还是 FACE 圈平均臭氧浓度较对照圈的增幅, 均表现为 2010 年大于 2009 年, 这可能是两年稻米品质对臭氧胁迫响应差异的重要原因。

结合前期 FACE 研究可知, 开放条件下作物冠

层臭氧浓度升高对常规粳稻生长、产量和抗倒性均无显著影响<sup>[35-37]</sup>, 但对稻米品质有一定负面影响, 表现在臭氧胁迫下生长的稻米蒸煮后呈变硬趋势, 食味品质总体变劣, 但这种趋势是否因不同类型水稻品种或不同栽培条件而异尚不清楚。FACE 试验特有的空间优势为科学家们提供了一个非常好的机会来进一步开展这方面的研究。

**致谢** 中国科学院南京土壤研究所刘钢研究员和唐昊冶博士对臭氧 FACE 系统的日常维持, 为本试验实施提供了硬件保障, 特此感谢。

### 参考文献

- [1] The Royal Society. Ground-level ozone in the 21st century: Future trends, impacts and policy implications[M]. London: Franziska Hinz, 2008: 15-16
- [2] Zang H S, Ki H K, Sang K S. Long-term trend in  $\text{NO}_2$  and  $\text{NO}_x$  levels and their emission ratio in relation to road traffic activities in East Asia[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(18): 3120-3131
- [3] Xing J, Wang S X, Chatani S, et al. Projections of air pollutant emissions and its impacts on regional air quality in China in 2020[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(7): 3119-3136
- [4] Wang X P, Mauzerall D L. Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea: 1990 and 2020[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(26): 4383-4402
- [5] Engardt M. Modelling of near-surface ozone over South Asia[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2008, 59(1): 61-80
- [6] Wang Y, Zhang Y, Hao J, et al. Seasonal and spatial variability of surface ozone over China: Contributions from background and domestic pollution[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(6): 3511-3525
- [7] Maclean J L, Dawe D C. Rice almanac: Source book for the most important economic activity on earth[M]. 3rd ed. Oxon: CABI Publishing, 2002
- [8] 杨连新, 王余龙, 石广跃, 等. 近地层高臭氧浓度对水稻生长发育影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 901-910  
Yang L X, Wang Y L, Shi G Y, et al. Responses of rice growth and development to elevated near-surface layer ozone ( $\text{O}_3$ ) concentration: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 901-910
- [9] Wang Y X, Frei M. Stressed food—The impact of abiotic environmental stresses on crop quality[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 141(3/4): 271-286
- [10] Wang Y X, Yang L X, Han Y, et al. The impact of elevated tropospheric ozone on grain quality of hybrid rice: A free-air gas concentration enrichment (FACE) experiment[J]. Field Crops Research, 2012, 129: 81-89
- [11] Frei M, Kohno Y, Wissuwa M, et al. Negative effects of tropospheric ozone on the feed value of rice straw are mitigated by an ozone tolerance QTL[J]. Global Change Biology, 2011, 17(7): 2319-2329
- [12] Frei M, Yoshihisa K, Stefan T, et al. The response of rice

- grain quality to ozone exposure during growth depends on ozone level and genotype[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 163: 199–206
- [13] Frei M, Makkar H P S, Becker K, et al. Ozone exposure during growth affects the feeding value of rice shoots[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2010, 155(1): 74–79
- [14] 林芳栋, 蒋菊珍, 廖珊, 等. 质构仪及其在食品品质评价中的应用综述[J]. *生命科学仪器*, 2009, 7(5): 61–63  
Lin F D, Jiang J Z, Liao S, et al. The summary of texture analyzer and its application in the evaluation for food quality[J]. *Life Science Instrument*, 2009, 7(5): 61–63
- [15] 赵铁鹏, 宋琪玲, 王云霞, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高对粳稻稻米物性及食味品质的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(8): 1475–1482  
Zhao Y P, Song Q L, Wang Y X, et al. Impacts of elevated CO<sub>2</sub> concentration on texture and palatability of cooked Japonica rice[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2012, 31(8): 1475–1482
- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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 X F, Mu Y D. 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
- [19] 陈皓. 大米食味及食味计[J]. *粮食与饲料工业*, 2000(4): 13–14  
Chen H. Rice taste and taste analyzer[J]. *Grain and Feed Industries*, 2000(4): 13–14
- [20] 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 S C, Kawano M, Wang Z D, et al. Cooking and eating quality of Indica rice varieties from south China by using rice taste analyzer[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 25(4): 435–438
- [21] 王云霞, 王晓莹, 杨连新, 等. 臭氧胁迫使两优培九倒伏风险增加—FACE 研究[J]. *生态学报*, 2011, 31(20): 6098–6107  
Wang Y X, Wang X Y, Yang L X, et al. Ozone stress increases on lodging risk of rice cultivar Liangyoupeijiu: A FACE study[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(20): 6098–6107
- [22] 唐昊冶, 刘钢, 韩勇, 等. 农田开放体系中调控臭氧浓度装置平台(O<sub>3</sub>-FACE)研究[J]. *土壤*, 2010, 42(5): 833–841  
Tang H Y, Liu G, Han Y, et al. Ozone concentration enrichment system under fully free-air condition in agricultural field (O<sub>3</sub>-FACE)[J]. *Soils*, 2010, 42(5): 833–841
- [23] Buttery R G, Ling L C, Juliano B O, et al. Cooked rice aroma and 2-acetyl-1-pyrroline[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1983, 31(4): 823–826
- [24] Maraval I, Mestres C, Pernin K, et al. Odor-active compounds in cooked rice cultivars from Camargue (France) analyzed by GC-O and GC-MS[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(13): 5291–5298
- [25] 郭建平, 王春乙, 温民, 等. 大气中 O<sub>3</sub> 浓度变化对水稻影响的试验研究[J]. *作物学报*, 2001, 27(6): 822–826  
Guo J P, Wang C Y, Wen M, et al. The experimental study on the impact of atmospheric O<sub>3</sub> variation on rice[J]. *Acta Agromonica Sinica*, 2001, 27(6): 822–826
- [26] 吴殿星, 舒小丽. 稻米蛋白质研究与利用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 23  
Wu D X, Shu X L. Research and utilization of rice protein[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 23
- [27] Juliano B O, Onate L U, del Mundo M. Relation of starch composition, protein content, and gelatinization temperature to cooking and eating qualities of milled rice[J]. *Food Technology*, 1965, 19: 116–121
- [28] Ong M H, Blanshard J M V. Texture determinants in cooked, parboiled rice. I: Rice starch amylose and the fine structure of amylopectin[J]. *Journal of Cereal Science*, 1995, 21(3): 251–260
- [29] 林建荣, 詹勇强, 闵捷, 等. 粳稻稻米食味仪测定值与理化指标的关系[J]. *中国稻米*, 2011, 17(3): 5–8  
Lin J R, Zhan Y Q, Min J, et al. The relationship between the value of taste analyzer and physicochemical properties of Japonica rice[J]. *Chinese Rice*, 2011, 17(3): 5–8
- [30] 芮闯, 刘莹, 孙建平. 蛋白质与大米食味品质的相关性分析[J]. *食品科技*, 2012, 37(3): 164–171  
Rui C, Liu Y, Sun J P. The correlation analysis of protein and eating quality of rice[J]. *Food Science and Technology*, 2012, 37(3): 164–171
- [31] 舒庆尧, 吴殿星, 夏英武, 等. 稻米淀粉 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 Q Y, Wu D X, Xia Y W, et al. Relationship between RVA Profile character and eating quality in *Oryza sativa* L.[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1998, 31(3): 25–29
- [32] Allahgholipour M, Ali A J, Alinia F, et al. Relationship between rice grain amylose and pasting properties for breeding better quality rice varieties[J]. *Plant Breeding*, 2006, 125(4): 357–362
- [33] 施利利, 张欣, 丁得亮, 等. 稻米理化特性与食味品质的相关性研究[J]. *种子*, 2010, 29(11): 82–84  
Shi L L, Zhang X, Ding D L, et al. Study on the correlation of rice physicochemical properties and palatability quality[J]. *Seed*, 2010, 29(11): 82–84
- [34] Tang H Y, Liu G, Han Y, et al. A system for free-air ozone concentration elevation with rice and wheat: Control performance and ozone exposure regime[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(35): 6276–6282
- [35] Shi G Y, Yang L X, Wang Y X, et al. Impact of elevated ozone concentration on yield of four Chinese rice cultivars under fully open-air field conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131(3/4): 178–184
- [36] 王云霞, 杨开放, 杨连新, 等. 近地层臭氧浓度升高对常规稻颖花形成的影响: FACE 研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(8): 1482–1488  
Wang Y X, Yang K F, Yang L X, et al. Effects of increased surface ozone concentration on spikelet formation of inbred rice cultivars: a free air gas concentration enrichment (FACE) experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8): 1482–1488
- [37] 王云霞, 王晓莹, 周晓冬, 等. 近地层臭氧 O<sub>3</sub> 浓度升高对水稻武运梗 21 抗倒性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2011, 27(6): 1167–1173  
Wang Y X, Wang X Y, Zhou X D, et al. Impacts of tropospheric ozone concentration enrichment on lodging resistance of rice Wuyunjing 21[J]. *Jiangsu Journal of Agriculture Science*, 2011, 27(6): 1167–1173