

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190329

章燕柳, 穆海蓉, 邵在胜, 景立权, 王余龙, 杨连新, 王云霞. 臭氧胁迫对稻米淀粉热力学特征值影响及其强弱势粒间差异[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1812–1822

ZHANG Y L, MU H R, SHAO Z S, JING L Q, WANG Y L, YANG L X, WANG Y X. Impact of ozone stress on thermodynamic characteristic values of rice starch and the differences between superior and inferior grains[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1812–1822

## 臭氧胁迫对稻米淀粉热力学特征值影响 及其强弱势粒间差异\*

章燕柳<sup>1</sup>, 穆海蓉<sup>1</sup>, 邵在胜<sup>1</sup>, 景立权<sup>1</sup>, 王余龙<sup>1</sup>, 杨连新<sup>1\*\*</sup>, 王云霞<sup>2</sup>

(1. 江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/  
扬州大学 扬州 225009; 2. 扬州大学环境科学与工程学院 扬州 225009)

**摘要:** 地表臭氧浓度增高情形下水稻减产, 米质呈变劣趋势, 但稻米热力学特征值的变化及其与生长季、品种以及籽粒着生部位的关系均不清楚。本研究利用自然光气体熏蒸平台, 以8个水稻品种为材料, 设置高臭氧浓度为 $100 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对照浓度为 $9 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。连续两年系统研究了高臭氧浓度熏蒸对成熟稻穗不同部位糙米热力学特性(DSC)的影响。与对照相比, 臭氧胁迫使稻米热焓值极显著下降4.15%, 但对糊化起始温度、糊化峰值温度、糊化终止温度、DSC曲线峰宽和峰高均无显著影响; 2017年度稻米热焓值、糊化峰值温度、糊化起始温度和峰高极显著大于2016年, 但DSC曲线峰宽表现相反; 稻米所有6个DSC特征值的品种间差异均达极显著水平。从稻穗不同位置看, 所有测定参数均表现为稻穗上部>中部>下部, 除糊化起始温度外差异均达极显著水平。方差分析表明, 臭氧×年度对热焓值、糊化峰值温度和糊化终止温度的影响均达显著或极显著水平, 臭氧×品种对糊化峰值温度、糊化终止温度、DSC曲线峰宽和峰高均有极显著影响, 而臭氧×部位仅对DSC曲线峰宽有显著影响。以上数据表明, 稻米淀粉DSC热力学参数因生长季、供试品种以及籽粒着生部位而异, 臭氧胁迫环境下稻穗不同部位稻米的热焓值总体上均呈下降趋势, 表现为更易糊化的特点。

**关键词:** 臭氧胁迫; 水稻; 基因型差异; 强弱势粒; 热力学特性(DSC); 稻米品质

中图分类号: S511.21

文章编号: 2096-6237(2019)12-1812-11

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Impact of ozone stress on thermodynamic characteristic values of rice starch and the differences between superior and inferior grains\*

ZHANG Yanliu<sup>1</sup>, MU Hairong<sup>1</sup>, SHAO Zaisheng<sup>1</sup>, JING Liquan<sup>1</sup>, WANG Yulong<sup>1</sup>,  
YANG Lianxin<sup>1\*\*</sup>, WANG Yunxia<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology / Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops / Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

\* 国家自然科学基金项目(31471437, 31371563)和江苏高校优势学科建设工程项目资助

\*\* 通信作者: 杨连新, 主要研究方向为水稻栽培、生理和生态。E-mail: lxyang@yzu.edu.cn

章燕柳, 主要从事大气变化与作物响应的研究。E-mail: 861509462@qq.com

收稿日期: 2019-04-30 接受日期: 2019-07-23

\* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31471437, 31371563) and the Priority Academic Program of Jiangsu Higher Education Institutions.

\*\* Corresponding author, E-mail: lxyang@yzu.edu.cn

Received Apr. 30, 2019; accepted Jul. 23, 2019

**Abstract:** As a strong oxidant, ozone pollution not only threatens human health but also negatively affects plant life. Elevated concentrations of ground-level ozone reduces rice yield and tends to deteriorate grain quality traits, including appearance, nutritional value and taste. However, the effect of ozone stress on the thermodynamic characteristics (DSC) of rice starch in respect of growth season, variety, and grain position on a panicle is not well-known. In this study, a glasshouse-type gas fumigation platform was used to examine how ozone stress affected the DSC of rice grains located at different positions on a panicle. Plants of eight rice varieties were exposed to ozone fumigation from the plant tilling stage until plant maturity. Two levels of ozone concentration,  $100 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $9 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$  were applied to rice plants as ozone stress treatment and control, respectively. At harvest, according to their positions on a panicle, rice grains were separated into three groups: superior grains, inferior grains, and medium grains, according to their position in a panicle — upper part, lower part and middle part of panicle. The DSC values of rice starch from the different groups were measured. The study showed that ozone stress significantly reduced the enthalpy value of brown rice by 4.15% compared with the control, but it had no significant effect on the gelatinization starting temperature, the peak gelatinization temperature, the gelatinization termination temperature, and the peak width and peak height of the DSC curve. In 2017, the enthalpy value, gelatinization peak temperature, gelatinization starting temperature, and peak height of brown rice were significantly higher than the values in 2016. However, the opposite trend was observed for the peak width of the DSC curve. There were significant differences among rice varieties in respect of the DSC characteristic values of rice starch. All the DSC values of grains at different positions on a panicle were in the order of upper part > middle part > lower part, and the differences were statistically significant, apart from the case of the gelatinization starting temperature. Results of ANOVA revealed significant ozone by year interactions for enthalpy value, gelatinization peak temperature, and gelatinization termination temperature, and significant ozone by variety interactions for gelatinization peak temperature, gelatinization termination temperature, and peak width and peak height of the DSC curve. Meanwhile, ANOVA revealed significant ozone by grain position interactions only for the peak width of DSC curve. The findings demonstrated that the DSC thermodynamic parameters of rice grains varied with the growing season, the varieties tested, and the grain position on a panicle. Ozone fumigation during the rice growing season reduced the enthalpy value of grains at different positions on a panicle, which indicated ozone-stressed rice grains are prone to gelatinization.

**Keywords:** Ozone stress; Rice; Genotypic variation; Superior and inferior grains; Thermodynamic characteristics; Rice quality

在过去的 150 年里, 由于臭氧前体物的人为排放量增加, 以及平流层中臭氧混合进入低层大气, 导致对流层平均臭氧浓度从  $20\sim 30 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$  上升到  $30\sim 50 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[1-2]</sup>。水稻(*Oryza sativa*)是世界上最重要的粮食作物之一, 全球生产的稻米约 80%被人类直接消费。近年来国内外开展了大量有关臭氧浓度增加对水稻影响的研究, 但多数集中在生长发育和产量形成方面<sup>[3-4]</sup>, 少有涉及稻米品质方面的报道<sup>[5-6]</sup>。已有的品质研究表明, 臭氧胁迫环境下稻米的外观和食用品质均有变劣趋势, 且单位面积收获的蛋白质或微量元素产量减少<sup>[6]</sup>。因此, 针对地表臭氧浓度持续上升, 系统研究稻米品质对臭氧胁迫的响应及其调控非常重要。

水稻、小麦(*Triticum aestivum*)等禾谷类作物淀粉是人类重要的食物来源。糊化是淀粉固有的物理特性之一, 无论是直接用作食品, 还是用于加工, 糊化特性都具有重要的实际意义<sup>[7]</sup>。淀粉糊化过程中伴随有热力学性质包括能量的变化, 这些变化可以用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)进行检测<sup>[8]</sup>。该法在程序升温的过程中,

连续检测通过样品的热流量对应的时间或温度的变化, 较全面地反映淀粉的糊化特性<sup>[7]</sup>, 观察到的指标包括样品糊化过程中的起始温度、终止温度、峰值温度、热焓值以及糊化范围等。然而, 目前鲜有臭氧胁迫对稻米热力学特征值影响及其品种间差异的报道。另外, 水稻是典型的穗状花序, 稻穗上部开花早的强势粒, 一般灌浆快, 充实好且粒重高, 而着生在稻穗下部的弱势花则相反<sup>[9-10]</sup>, 强、弱势粒这种灌浆特性的差异可能影响稻米热力学特征对臭氧的响应, 但迄今为止尚鲜见这方面的报道。因此, 针对地表臭氧浓度持续上升, 系统研究稻穗强、弱势粒间稻米品质对臭氧胁迫的响应及其调控非常重要。

本研究利用自然采光和群体土培培育植株的气体熏蒸平台<sup>[11-12]</sup>, 以8个不同类型水稻品种为供试材料, 设置对照( $9 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ )和高浓度臭氧( $100 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ )两个处理, 2016年和2017年连续两个生长季节, 研究臭氧胁迫对稻米热力学特性的影响, 并明确这种影响与水稻生长季、供试品种以及籽粒着生部位的关系, 以期高浓度臭氧环境下稻米蒸煮/食味品质

的调控提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验分别于 2016 年和 2017 年在扬州大学农学院(119.42°E, 32.39°N)人工气体熏蒸平台上进行栽培。土壤类型是清泥土, 当地年均降水量 1 000 mm 左右, 年均蒸发量 940 mm 左右, 年均温度 15 ℃, 年日照时长大于 2 100 h, 年平均无霜期为 220 d 左右。土壤化学性质为: 有机质 17.32 g·kg<sup>-1</sup>, 全氮 1.03 g·kg<sup>-1</sup>, 碱解氮 84.48 mg·kg<sup>-1</sup>, 全磷 0.90 g·kg<sup>-1</sup>, 速效磷 40.97 mg·kg<sup>-1</sup>, 速效钾 51.46 mg·kg<sup>-1</sup>, pH 为 7.51。

### 1.2 试验平台

本试验依托一种新型自然光气体熏蒸平台, 平台建于 2010 年, 结构和性能详见赵轶鹏等<sup>[12]</sup>和邵在胜等<sup>[13]</sup>的介绍。本平台是动态熏气系统, 由平台附

属气象站实时监测和采集室内外温度、湿度、光照、臭氧浓度和大气压力等信息。此外, 臭氧是以纯氧为气源, 由佳环臭氧发生器 QD-001-3A 产生。通过 Model 49i 臭氧分析仪对 O<sub>3</sub> 浓度进行实时检测。

试验室内对照处理(9 nL·L<sup>-1</sup>, C-O<sub>3</sub>)和高浓度臭氧处理(100 nL·L<sup>-1</sup>, E-O<sub>3</sub>), 每处理两个气室, 每个气室面积约 3.72 m<sup>2</sup>。臭氧熏气时间为每天 9:00—17:00。两季的相对湿度 7 月 6 日至 8 月 1 日设定为 70%, 根据室外平均湿度将气室湿度在 8 月 2 日至 9 月 16 日设定为 65%, 9 月 17 日之后设定为 55%。温度、光照和大气压力动态模拟外界环境。2016 年、2017 年分别于 6 月 20 日、6 月 21 日将秧苗移栽至气室内, 在水稻返青后开始进行臭氧熏气处理, 于 7 月 6 日(分蘖始期)开始熏气, 10 月 5 日(收获期)停止熏气。平台运行期间, 因设备故障、雷雨天气以及臭氧分析仪校准等原因暂停布气外, 其余时间正常熏气。各处理试验期间臭氧浓度变化见图 1。

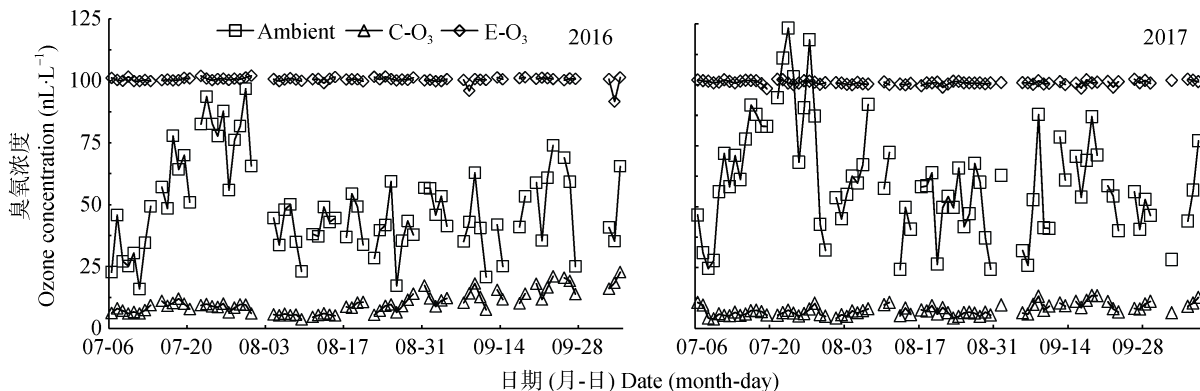


图 1 2016 年和 2017 年度水稻生长季臭氧熏蒸期间每日 8 h(9:00—17:00)平均臭氧浓度变化

Fig. 1 Dynamic changes of daily 8 h (9:00–17:00) mean ozone concentration during rice growing season in 2016 and 2017

Ambient: 室外环境; C-O<sub>3</sub>: 室内对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。Ambient: outdoor environment; C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration.

### 1.3 臭氧熏蒸平台的控制

臭氧熏蒸期试验平台的主要控制参数示于表 1。熏蒸平台的控制精度一般用 TAR(实际测定值/设定目标值)值来表示, 该值越接近 1, 则说明控制精度越高。两年结果平均, 室外对照(Ambient)、室内对照(C-O<sub>3</sub>)和高浓度臭氧处理(E-O<sub>3</sub>)熏蒸期间平均臭氧浓度分别为 54.7 nL·L<sup>-1</sup>、9.0 nL·L<sup>-1</sup>和 100.7 nL·L<sup>-1</sup>, 臭氧精度控制的 TAR 值达到 1.0。从温度看, 2016 年、2017 年整个臭氧熏蒸期间各室平均温度的变化幅度分别为 31.0~31.5 ℃、30.6~31.2 ℃, TAR 值的变幅为 0.98~1.00。两年各气室熏蒸期间相对湿度值、大气气压的变幅较小, TAR 值均达到或接近 1.0。以上数据表明, 自然光气体熏蒸平台控制相对准确, 满足试验要求。

### 1.4 材料培育

本试验以当前生产上广泛种植的 8 个水稻品种为材料, 分别是‘Y 两优 900’(YLY900)、‘Y 两优 1998’(YLY1998)、‘甬优 538’(YY538)、‘甬优 15’(YY15)、‘南粳 9108’(NJ9108)、‘武运粳 27’(WYJ27)、‘淮稻 5 号’(HD5)、‘扬稻 6 号’(YD6)。试验采用大田旱育秧, 5 月 18 日播种, 6 月 20 日(2016 年)和 6 月 21 日(2017 年)移栽, 每室 12 穴, 两个重复, 密度为 29 穴·m<sup>-2</sup>, 收获期集中在 10 月中上旬。两年施肥量与施肥时期一致: 全生育期总施氮量为 22.5 g·m<sup>-2</sup>。其中基肥占 40%(6 月 19 日), 分蘖肥占 30%(6 月 29 日), 穗肥占 30%(7 月 28 日)。P、K 肥总施用量均为 9.0 g·m<sup>-2</sup>, 全做基肥撒施。基肥施用复合肥(N-P-K: 15-15-15), 分蘖肥和穗肥均使用尿

表 1 2016—2017 年水稻季平台控制情况

Table1 Performance of greenhouse-type gas fumigation chambers during rice growing season in 2016 and 2017

年度 Year	处理 Treatment	臭氧浓度 Ozone concentration ( $\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$ )	AOT40 ( $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	温度 Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	湿度 Relative humidity (%)	大气压力 Atmosphere pressure (kPa)
2016	Ambient	49.1	8.5	31.5	61.9	99.7
	C-O <sub>3</sub>	10.3	0.0	31.0 (0.98)	66.0 (0.97)	100.1 (1.00)
	E-O <sub>3</sub>	100.4 (1.00)	33.0	31.0 (0.99)	65.4 (0.98)	99.6 (1.00)
2017	Ambient	60.2	16.9	31.2	55.5	100.0
	C-O <sub>3</sub>	7.6	0.0	30.6 (1.00)	66.2 (0.99)	100.1 (1.00)
	E-O <sub>3</sub>	100.9 (1.00)	36.3	30.6 (0.99)	65.6 (0.99)	99.8 (1.00)

Ambient: 室外环境; C-O<sub>3</sub>: 室内对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。括号内数据为 TAR(target achievement ratio), 即实际测定值/设定目标值; AOT40: 大气中 O<sub>3</sub> 浓度超过 40  $\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$  时的小时累积效应指数。Ambient: outdoor environment; C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. Data in the parentheses are TAR (target achievement ratio), which is the ratio of the actual measured value to the target value. AOT40 is accumulated dose over the threshold values of 40  $\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$  for 8 hours.

素(含氮率为 46.7%)。6 月 20 日至 8 月 3 日保持水层(约 3 cm), 8 月 4 日后干湿交替, 控水搁田。

### 1.5 测定内容和方法

于成熟期, 每室每品种随机选取代表性植株 5 穴, 重复 2 次。将所有稻穗分为上、下和中 3 个部位, 即先将穗轴一分为二(一次枝梗数为奇数则上部比下部多一个一次枝梗), 再将稻穗上部一次枝梗和下部二次枝梗上的籽粒以及全部的剩余籽粒分别作为稻穗上、下和中部籽粒, 以此对应强、弱和中势粒<sup>[14]</sup>。

稻米热特性采用德国生产的差示扫描量热仪(Differential Scanning Calorimetry, DSC 200 F<sub>3</sub> Maia, NETZSCH 公司)测定。参照张大鹏等<sup>[15]</sup>的方法, 并稍作改变。具体方法如下: 准确称取过 100 目筛的糙米粉 5.0 mg, 放入铝制坩埚中, 并加入二倍质量的超纯水, 密封后置于 4  $^{\circ}\text{C}$  冰箱内, 平衡过夜, 测定前回温 30~60 min。测定时以密封的空铝制坩埚为参照, 升温速率为 10  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , 温度从 20  $^{\circ}\text{C}$  升至 100  $^{\circ}\text{C}$ 。采用仪器自带软件计算热焓值( $\Delta H_{\text{gel}}$ )、起始温度( $T_0$ )、峰值温度( $T_p$ )、终止温度( $T_c$ )以及糊化范围  $R=2 \times (T_p - T_0)$  和峰高指数  $\text{PHI}=\Delta H/(T_p - T_0)$  分析米粉热力学特性。

### 1.6 统计分析方法

使用 Microsoft Excel 软件进行基础统计和图表绘制。应用 SPSS 19.0 软件进行数据方差分析,  $P < 0.01$  为极显著水平、 $P < 0.05$  为显著水平, 分别用\*\*、\*表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 臭氧胁迫对供试水稻品种稻穗不同部位稻米热焓值的影响

臭氧胁迫对供试品种稻穗不同部位糙米热焓值

的测定结果如表 2 和表 3 所示。将 2 个臭氧处理、8 个品种和 3 个稻穗部位平均, 2016 年、2017 年稻米热焓值平均分别为 6.7  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ 、9.8  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ , 年度间差异达极显著水平。从品种看, 糙米平均热焓值以‘HD5’最小(7.5  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ), ‘NJ9108’最大(9.1  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ ), 品种间差异达极显著水平。稻穗不同部位间稻米热焓值的差异亦达极显著水平: 强、中和弱勢粒热焓值平均分别为 8.4  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ 、8.3  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$  和 8.0  $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ , 表现为强势粒>中势粒>弱勢粒。与对照相比, 臭氧胁迫使稻米热焓值平均下降 4.15% ( $P < 0.01$ ), 这主要与 2016 年热焓值明显下降有关; 从不同品种看, 臭氧胁迫下热焓值平均降幅为 1.3%~8.0%, 其中‘YY538’、‘HD5’和‘YD6’的降幅均达极显著水平; 从稻穗不同部位看, 臭氧胁迫使稻穗上部、中部和下部热焓值分别下降 2.6%、3.9% ( $P < 0.05$ ) 和 6.0% ( $P < 0.01$ )。方差分析表明, 臭氧×年度、臭氧×年度×部位对稻米热焓值的影响分别达极显著和显著水平。

### 2.2 臭氧胁迫对供试水稻品种稻穗不同部位稻米糊化起始温度的影响

稻米糊化起始温度对臭氧胁迫的响应见表 2 和表 4 所示。2016 年、2017 年稻米糊化起始温度平均分别为 67.6  $^{\circ}\text{C}$ 、69.7  $^{\circ}\text{C}$ , 两年差异达极显著水平。

从品种看, 糊化起始温度以‘YY538’最小(64.0  $^{\circ}\text{C}$ ), ‘YLY900’最大(72.7  $^{\circ}\text{C}$ ), 品种间差异达极显著水平。

从稻穗不同位置看, 强势粒糊化起始温度略大于中势粒和弱勢粒 ( $P = 0.10$ )。与对照相比, 臭氧胁迫使稻米糊化起始温度平均下降 0.4% ( $P = 0.14$ ), 两年降幅接近; 从品种看, 臭氧胁迫只对‘YY538’糊化起始温度的影响达显著水平(-1.7%); 从不同部位看, 臭氧胁迫只对弱勢粒起始温度有显著影响(-1.0%)。方差分析表明, 臭氧×年度×品种×部位对稻米糊化起始温度的影响达极显著水平。

表 2 臭氧胁迫对稻米热力学特性(DSC)参数影响的显著性检验(P 值)

Table 2 ANOVA results of the effect of ozone stress on differential scanning calorimetry (DSC) parameters of rice grains (P value)

ANOVA	热焓值( $\Delta H_{gel}$ ) Heat enthalpy	起始温度( $T_o$ ) Onset temperature	峰值温度( $T_p$ ) Peak temperature	终止温度( $T_c$ ) Conclusion temperature	峰宽 Peak width	峰高 Peak height
臭氧 O <sub>3</sub>	<0.001	0.138	0.100	0.742	0.328	0.098
年度 Year (Y)	<0.001	<0.001	<0.001	0.372	<0.001	<0.001
品种 Variety (V)	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
部位 Position (P)	<0.001	0.104	<0.001	<0.001	<0.001	0.008
臭氧×年度 O <sub>3</sub> × Y	<0.001	0.770	<0.001	0.042	0.877	0.250
臭氧×品种 O <sub>3</sub> × V	0.695	0.404	<0.001	<0.001	<0.001	0.003
臭氧×部位 O <sub>3</sub> × P	0.395	0.106	0.869	0.768	<0.001	0.132
品种×年度 V × Y	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003
品种×部位 V × P	0.263	0.118	0.006	0.006	0.069	0.547
部位×年度 P × Y	0.004	0.584	0.803	0.414	0.001	0.304
臭氧×年度×品种 O <sub>3</sub> × Y × V	0.116	0.792	0.018	0.022	0.002	0.006
臭氧×年度×部位 O <sub>3</sub> × Y × P	0.028	0.287	0.733	0.158	0.329	0.135
臭氧×品种×部位 O <sub>3</sub> × V × P	0.115	0.151	0.313	0.231	0.001	0.005
品种×年度×部位 V × Y × P	0.130	0.027	0.374	0.175	0.001	0.401
臭氧×年度×品种×部位 O <sub>3</sub> × Y × V × P	0.160	0.005	0.683	0.004	0.384	0.014

表 3 臭氧胁迫对稻穗不同部位稻米热焓值的影响

Table 3 Effect of ozone stress on heat enthalpy of grains located at different positions of a panicle of different rice varieties J·g<sup>-1</sup>

品种 Variety	处理 Treatment	2016			2017		
		上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains	上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains
Y 两优 900 YLY900	C-O <sub>3</sub>	8.23±0.26a	7.44±0.41ab	7.10±0.11b	9.10±0.10a	10.21±0.67a	10.20±0.94a
	E-O <sub>3</sub>	7.32±0.06ab	7.03±0.11b	7.06±0.09b	9.92±0.63a	10.21±0.48a	10.06±0.48a
Y 两优 1998 YLY1998	C-O <sub>3</sub>	7.81±0.11a	7.55±0.12a	7.58±0.10a	10.33±0.79a	10.92±0.65a	9.55±0.39a
	E-O <sub>3</sub>	7.62±0.18a	6.94±0.06b	6.52±0.13b	10.56±0.68a	9.60±0.35a	10.69±0.71a
甬优 538 YY538	C-O <sub>3</sub>	7.07±0.21a	6.33±0.15bc	6.05±0.08b	9.69±0.32ab	10.22±0.25a	9.61±0.18ab
	E-O <sub>3</sub>	6.89±0.07ab	6.14±0.12b	5.87±0.08c	9.14±0.19b	9.62±0.20ab	9.33±0.58ab
甬优 15 YY15	C-O <sub>3</sub>	7.01±0.04a	6.98±0.11c	7.05±0.12c	10.01±0.61a	9.72±0.66a	9.84±0.56a
	E-O <sub>3</sub>	6.85±0.06ab	6.94±0.10a	6.31±0.22b	9.73±0.89a	9.62±0.49a	9.46±0.42a
南粳 9108 NJ9108	C-O <sub>3</sub>	8.67±0.16a	8.21±0.14b	7.23±0.04c	10.34±0.52a	10.61±0.56a	10.43±0.53a
	E-O <sub>3</sub>	8.38±0.21ab	7.51±0.38bc	6.72±0.14c	10.61±0.43a	9.81±0.20a	10.51±0.50a
武运粳 27 WYJ27	C-O <sub>3</sub>	6.53±0.22ab	6.50±0.32ab	6.66±0.33b	10.08±0.85a	10.14±0.53a	9.25±0.93b
	E-O <sub>3</sub>	5.38±0.07bc	6.33±0.21ab	4.81±0.35c	10.01±0.15ab	11.44±0.54ab	9.43±0.28b
淮稻 5 号 HD5	C-O <sub>3</sub>	7.42±0.14a	5.83±0.21ab	6.09±0.24ab	9.08±0.12ab	8.91±0.13a	9.19±0.36ab
	E-O <sub>3</sub>	6.02±0.36ab	5.49±0.31ab	5.31±0.93b	8.73±0.27a	8.72±0.23a	8.72±0.33a
扬稻 6 号 YD6	C-O <sub>3</sub>	6.11±0.17ab	6.68±0.39ab	6.97±0.11a	9.19±0.52a	9.60±0.17a	9.32±0.67a
	E-O <sub>3</sub>	5.84±0.18b	6.34±0.09ab	3.77±0.00c	9.65±0.15a	8.77±0.32a	9.65±0.63a

C-O<sub>3</sub>: 对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。上部粒、中部粒和下部粒对应的强势粒、中势粒和弱势粒。不同小写字母表示同一品种 2 个臭氧处理 3 个部位间差异达 0.05 显著水平。C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. The upper part, middle part and lower parts grains correspond to superior, medium and inferior grains, respectively. Different lowercase letters refer to significant differences among two ozone treatments and three grain positions for one variety at 0.05 level.

表 4 臭氧胁迫对稻穗不同部位稻米糊化起始温度的影响

Table 4 Effect of ozone stress on onset temperature of grains located at different positions of a panicle of different rice varieties

品种 Variety	处理 Treatment	2016			2017		
		上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains	上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains
Y 两优 900	C-O <sub>3</sub>	73.55±0.66a	67.45±0.61b	70.98±1.55ab	75.35±0.31a	74.60±0.62a	74.98±0.92a
YLY900	E-O <sub>3</sub>	69.98±1.50ab	69.65±0.77ab	70.85±1.66ab	75.48±0.38a	75.68±0.99a	74.13±0.47a
Y 两优 1998	C-O <sub>3</sub>	70.85±1.45a	72.25±2.06a	69.23±1.46a	74.25±0.54ab	71.38±2.87b	76.18±0.30a
YLY1998	E-O <sub>3</sub>	70.93±1.00a	69.85±0.70a	70.58±1.61a	74.95±0.46ab	76.10±0.62a	73.80±0.38ab
甬优 538	C-O <sub>3</sub>	64.80±0.31a	63.85±0.40ab	63.98±0.70ab	65.58±0.30a	64.53±0.12ab	64.88±0.17ab
YY538	E-O <sub>3</sub>	63.83±0.43ab	63.03±0.62b	63.25±0.70b	64.10±0.21bc	62.93±0.68c	63.75±0.52bc
甬优 15	C-O <sub>3</sub>	68.53±0.38b	71.53±0.64a	72.88±0.56a	73.80±0.76ab	72.68±1.29ab	74.80±0.68a
YY15	E-O <sub>3</sub>	70.35±1.49ab	70.35±0.57ab	72.10±0.56a	74.73±0.76a	73.88±0.79ab	71.55±1.06b
南粳 9108	C-O <sub>3</sub>	67.68±0.19ab	67.60±0.25ab	67.30±0.25b	69.10±0.23a	68.55±0.47a	67.83±0.29a
NJ9108	E-O <sub>3</sub>	68.13±0.19a	67.83±0.22ab	67.38±0.33ab	67.95±0.47a	68.18±0.70a	68.73±0.57a
武运粳 27	C-O <sub>3</sub>	66.95±0.23ab	66.23±0.13abc	64.90±0.55c	69.13±0.28a	68.03±0.21ab	67.35±0.70b
WYJ27	E-O <sub>3</sub>	67.13±0.17a	66.20±0.25abc	65.55±0.87bc	69.15±0.26a	67.88±0.34b	67.85±0.29b
淮稻 5 号	C-O <sub>3</sub>	64.13±0.98a	64.83±0.69a	65.85±0.44a	66.48±0.56ab	67.28±0.57a	66.43±0.37ab
HD5	E-O <sub>3</sub>	64.75±0.69a	64.93±0.31a	63.95±2.55a	64.65±0.85b	65.90±0.56ab	65.95±0.48ab
扬稻 6 号	C-O <sub>3</sub>	66.13±0.46a	65.85±0.52a	68.05±2.67a	67.75±0.21a	67.40±0.15a	67.80±0.41a
YD6	E-O <sub>3</sub>	67.05±0.17a	66.53±0.25a	66.30±0.00a	67.55±0.50a	67.80±0.17a	66.15±0.50b

C-O<sub>3</sub>: 对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。上部粒、中部粒和下部粒对应的强势粒、中势粒和弱势粒。不同小写字母表示同一品种 2 个臭氧处理 3 个部位间差异达 0.05 显著水平。C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. The upper part, middle part and lower parts grains correspond to superior, medium and inferior grains, respectively. Different lowercase letters refer to significant differences among two ozone treatments and three grain positions for one variety at 0.05 level.

### 2.3 臭氧胁迫对供试水稻品种稻穗不同部位稻米糊化峰值温度的影响

臭氧胁迫对稻穗各部位糙米糊化峰值温度的影响如表 2 和表 5 所示。2016 年、2017 年稻米糊化峰值温度平均分别为 74.6、75.5，达极显著水平。从品种看，糙米糊化峰值温度以‘YY538’最小(69.9)，‘YLY1998’最大(80.3)，品种间差异达极显著水平。强、中和弱势粒稻米糊化峰值温度平均分别为 75.4、75.0 和 74.7，部位间差异达极显著水平。臭氧胁迫对米粉糊化峰值温度无显著影响，这与两个生长季或不同品种峰值温度对臭氧的响应方向相反有关，但响应幅度均很小(多小于 1%); 从位置看，臭氧胁迫对稻穗 3 个部位糊化峰值温度均无显著影响。方差分析表明，臭氧×年度、臭氧×品种和臭氧×年度×品种对糊化峰值温度的影响达显著或极显著水平。

### 2.4 臭氧胁迫对供试水稻品种稻穗不同部位稻米糊化终止温度的影响

糙米糊化终止温度对臭氧的响应如表 2 和表 6 所示。两年稻米的糊化终止温度没有显著差异，但品种间差异以及稻米不同位置间的差异均达极显著水平，其中位置差异表现为稻穗上部>中部>下部。

平均而言，臭氧胁迫对稻米糊化终止温度没有显著影响，两个生长季和稻穗不同位置表现一致。从不同品种看，臭氧胁迫使‘YLY900’和‘YLY1998’糊化终止温度增加，使‘YY538’‘WYJ27’和‘HD5’减少，但其他品种无显著响应。方差分析表明，臭氧×年度、臭氧×品种、臭氧×年度×品种、臭氧×年度×品种×部位互作对糊化终止温度的影响均达显著或极显著水平。

### 2.5 臭氧胁迫对供试水稻品种稻穗不同部位稻米 DSC 曲线峰宽的影响

稻米 DSC 曲线峰宽的测定结果如表 2 和表 7 所示。2016 年、2017 年稻米 DSC 曲线峰宽平均分别为 11.2、10.3，差异达极显著水平。水稻品种间以及稻穗不同部位间 DSC 曲线峰宽的差异也均达极显著水平，后者表现为稻穗上部>中部>下部。与对照相比，臭氧胁迫使两年糙米 DSC 曲线峰宽平均增加 0.74%，2016 年、2017 年增幅接近，但均未达显著水平。从品种看，臭氧胁迫使‘YLY900’和‘YLY1998’DSC 曲线峰宽显著或极显著增加，使‘NJ9108’和‘WYJ27’显著或极显著降低；从部位看，臭氧胁迫使稻穗上部和中部稻米 DSC 曲线峰宽无显著影响，但使下部显著增加 4.9%。方差分析表明，

表 5 臭氧胁迫对稻穗不同部位稻米糊化峰值温度的影响

Table 5 Effect of ozone stress on peak temperature of grains located at different positions of a panicle of different rice varieties

品种 Variety	处理 Treatment	2016			2017		
		上部粒	中部粒	下部粒	上部粒	中部粒	下部粒
		Upper part grains	Middle part grains	Lower part grains	Upper part grains	Middle part grains	Lower part grains
Y 两优 900	C-O <sub>3</sub>	79.70±0.23b	78.50±0.24c	78.33±0.12c	80.08±0.11c	79.93±0.35c	80.25±0.05bc
YLY900	E-O <sub>3</sub>	80.83±0.38a	80.25±0.18ab	79.73±0.29b	81.15±0.36a	81.03±0.15ab	80.93±0.38ab
Y 两优 1998	C-O <sub>3</sub>	79.45±0.37bcd	79.18±0.50cd	79.03±0.13d	80.70±0.20a	80.30±0.34b	80.53±0.40b
YLY1998	E-O <sub>3</sub>	80.55±0.19a	79.95±0.17abc	80.13±0.11ab	81.68±0.24ab	80.95±0.27ab	80.83±0.35ab
甬优 538	C-O <sub>3</sub>	69.45±0.18a	69.08±0.28a	69.03±0.16a	71.40±0.23a	70.95±0.18a	70.88±0.27a
YY538	E-O <sub>3</sub>	69.73±0.21a	69.75±0.24a	69.70±0.16a	69.98±0.39b	69.05±0.43b	69.25±0.19b
甬优 15	C-O <sub>3</sub>	78.03±0.09a	77.20±0.16b	76.63±0.05b	79.75±0.31a	79.60±0.20a	79.30±0.16a
YY15	E-O <sub>3</sub>	78.48±0.30a	77.93±0.33a	76.83±0.35b	80.10±0.20a	79.80±0.41a	78.00±0.47b
南粳 9108	C-O <sub>3</sub>	73.78±0.11a	73.83±0.12a	73.73±0.15a	75.15±0.12a	73.88±0.18b	73.48±0.21b
NJ9108	E-O <sub>3</sub>	74.05±0.12a	73.83±0.27a	73.20±0.11b	73.93±0.17b	73.58±0.41b	73.40±0.31b
武运粳 27	C-O <sub>3</sub>	73.93±0.21a	73.15±0.13b	72.28±0.11c	75.45±0.32a	74.63±0.32ab	73.45±0.26c
WYJ27	E-O <sub>3</sub>	74.00±0.06a	73.23±0.12b	73.28±0.09b	74.98±0.21a	74.00±0.46bc	73.90±0.21bc
淮稻 5 号	C-O <sub>3</sub>	72.08±0.42a	71.60±0.25ab	71.48±0.09ab	72.83±0.58a	72.35±0.38ab	72.18±0.39ab
HD5	E-O <sub>3</sub>	71.13±0.35b	70.88±0.19b	71.10±0.31b	71.23±0.45b	72.00±0.35ab	72.00±0.28ab
扬稻 6 号	C-O <sub>3</sub>	71.43±0.14a	71.65±0.19a	71.65±2.31a	72.78±0.23ab	72.85±0.16ab	72.63±0.28ab
YD6	E-O <sub>3</sub>	72.55±0.28a	71.70±0.11a	72.60±0.00a	72.68±0.17ab	73.10±0.11a	72.33±0.34b

C-O<sub>3</sub>: 对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。上部粒、中部粒和下部粒对应的强势粒、中势粒和弱势粒。不同小写字母表示同一品种 2 个臭氧处理 3 个部位间差异达 0.05 显著水平。C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. The upper part, middle part and lower parts grains correspond to superior, medium and inferior grains, respectively. Different lowercase letters refer to significant differences among two ozone treatments and three grain positions for one variety at 0.05 level.

表 6 臭氧胁迫对稻穗不同部位稻米糊化终止温度的影响

Table 6 Effect of ozone stress on conclusion temperature of grains located at different positions of a panicle of different rice varieties

品种 Variety	处理 Treatment	2016			2017		
		上部粒	中部粒	下部粒	上部粒	中部粒	下部粒
		Upper part grains	Middle part grains	Lower part grains	Upper part grains	Middle part grains	Lower part grains
Y 两优 900	C-O <sub>3</sub>	85.15±0.38ab	84.48±0.13bc	84.03±0.25c	84.05±0.79c	84.43±0.35bc	85.93±0.35abc
YLY900	E-O <sub>3</sub>	85.43±0.59ab	86.10±0.30a	86.08±0.15a	86.90±1.23a	86.83±0.50a	86.33±0.30ab
Y 两优 1998	C-O <sub>3</sub>	84.78±0.41b	87.38±1.73a	83.98±0.50b	86.88±0.44a	85.78±0.91b	86.48±0.35ab
YLY1998	E-O <sub>3</sub>	86.45±0.41ab	86.28±0.28ab	86.15±0.32ab	87.90±0.26ab	86.98±0.63ab	86.23±0.06ab
甬优 538	C-O <sub>3</sub>	76.50±0.79a	75.28±0.47a	75.68±0.36a	77.20±0.42a	76.08±0.33ab	76.10±0.27ab
YY538	E-O <sub>3</sub>	75.40±0.54a	75.40±0.26a	75.48±0.36a	75.40±0.44bc	73.90±0.47d	74.60±0.39cd
甬优 15	C-O <sub>3</sub>	84.18±0.19ab	83.08±0.21b	83.85±0.21ab	85.00±0.47a	84.83±0.43a	85.43±0.09a
YY15	E-O <sub>3</sub>	84.38±0.75a	83.93±0.34ab	83.40±0.12ab	85.85±0.36a	85.68±0.80a	84.53±0.61a
南粳 9108	C-O <sub>3</sub>	80.98±0.18ab	81.30±0.11a	80.88±0.78ab	79.95±0.41a	79.13±0.69a	78.68±0.59a
NJ9108	E-O <sub>3</sub>	81.13±0.21a	80.88±0.37ab	79.78±0.29b	79.25±0.37a	79.00±0.52a	78.78±0.68a
武运粳 27	C-O <sub>3</sub>	81.05±0.20a	79.60±0.15bc	78.33±0.26d	80.85±0.34a	80.00±0.48ab	79.03±0.35bc
WYJ27	E-O <sub>3</sub>	80.68±0.23ab	79.18±0.71cd	78.15±0.39d	80.08±0.11ab	79.00±0.53bc	78.65±0.53c
淮稻 5 号	C-O <sub>3</sub>	78.65±0.53a	77.30±0.60abc	78.30±0.18ab	78.65±0.52a	77.45±0.55a	77.20±0.42ab
HD5	E-O <sub>3</sub>	78.28±0.49ab	76.50±0.45c	76.93±0.15bc	75.93±0.29b	77.33±0.40ab	77.40±0.53ab
扬稻 6 号	C-O <sub>3</sub>	77.65±0.17ab	77.48±0.31ab	75.30±2.12b	77.85±0.26a	77.98±0.26a	77.90±0.47a
YD6	E-O <sub>3</sub>	78.03±0.47ab	78.18±1.05ab	79.20±0.00a	77.10±0.24a	77.65±0.15a	77.08±0.42a

C-O<sub>3</sub>: 对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。上部粒、中部粒和下部粒对应的强势粒、中势粒和弱势粒。不同小写字母表示同一品种 2 个臭氧处理 3 个部位间差异达 0.05 显著水平。C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. The upper part, middle part and lower parts grains correspond to superior, medium and inferior grains, respectively. Different lowercase letters refer to significant differences among two ozone treatments and three grain positions for one variety at 0.05 level.

表 7 臭氧胁迫对稻穗不同部位稻米热力学特性(DSC)曲线峰宽的影响

Table 7 Effects of ozone stress on peak width of grains located at different positions of a panicle of different rice varieties

品种 Variety	处理 Treatment	2016			2017		
		上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains	上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains
Y 两优 900 YLY900	C-O <sub>3</sub>	13.30±1.21ab	13.98±0.39ab	12.80±0.29b	12.20±0.36ab	11.38±0.34b	11.85±0.31ab
	E-O <sub>3</sub>	14.23±0.21ab	14.85±0.19a	14.55±0.20ab	12.95±0.39a	12.85±0.32a	12.50±0.45ab
Y 两优 1998 YLY1998	C-O <sub>3</sub>	15.28±0.33a	13.75±0.26bc	13.30±0.24c	12.13±0.81ab	11.65±0.31ab	10.90±0.68b
	E-O <sub>3</sub>	14.53±0.56ab	13.85±0.38bc	14.60±0.12ab	12.28±0.45ab	12.53±0.39ab	13.08±0.36a
甬优 538 YY538	C-O <sub>3</sub>	9.18±0.28a	9.20±0.11a	9.53±0.21a	9.18±0.23abc	9.55±0.09a	9.53±0.06ab
	E-O <sub>3</sub>	9.65±0.23a	9.30±0.22a	9.60±0.21a	8.95±0.18c	9.13±0.22abc	9.03±0.09bc
甬优 15 YY15	C-O <sub>3</sub>	15.03±0.29a	13.18±0.82abc	12.08±0.68bc	13.43±0.37a	13.40±0.15a	13.20±0.24ab
	E-O <sub>3</sub>	13.40±0.76abc	13.95±0.19ab	11.63±0.59c	11.88±0.88b	13.65±0.52a	13.70±0.12a
南粳 9108 NJ9108	C-O <sub>3</sub>	10.40±0.21a	9.98±0.32a	10.28±0.38a	9.48±0.10a	9.35±0.09a	8.90±0.24ab
	E-O <sub>3</sub>	10.43±0.13a	9.85±0.31a	9.73±0.19a	8.88±0.23ab	8.58±0.23b	8.40±0.21b
武运粳 27 WYJ27	C-O <sub>3</sub>	11.08±0.10a	10.25±0.13abc	10.00±0.26bc	9.35±0.30a	9.60±0.25a	9.43±0.23a
	E-O <sub>3</sub>	10.63±0.25ab	9.63±0.13c	9.88±0.54bc	8.60±0.41a	8.88±0.39a	8.80±0.32a
淮稻 5 号 HD5	C-O <sub>3</sub>	11.33±0.33a	10.03±0.17b	9.55±0.51b	9.30±0.20ab	8.58±0.17c	8.30±0.14c
	E-O <sub>3</sub>	9.83±0.24b	8.93±0.06b	9.75±0.48b	9.78±0.17a	9.20±0.08b	9.13±0.25b
扬稻 6 号 YD6	C-O <sub>3</sub>	8.58±0.06ab	9.25±0.19a	6.48±1.79b	7.90±0.11c	8.48±0.09ab	8.45±0.24ab
	E-O <sub>3</sub>	8.83±0.33ab	8.58±0.14ab	9.80±0.00a	8.05±0.06bc	7.78±0.08c	8.53±0.20a

C-O<sub>3</sub>: 对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。上部粒、中部粒和下部粒对应的强势粒、中势粒和弱势粒。不同小写字母表示同一品种 2 个臭氧处理 3 个部位间差异达 0.05 显著水平。C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. The upper part, middle part and lower parts grains correspond to superior, medium and inferior grains, respectively. Different lowercase letters refer to significant differences among two ozone treatments and three grain positions for one variety at 0.05 level.

臭氧×品种、臭氧×部位、臭氧×年度×品种和臭氧×品种×部位对稻米 DSC 曲线峰宽的影响均达极显著水平。

## 2.6 臭氧胁迫对供试水稻品种稻穗不同部位稻米 DSC 曲线峰高的影响

稻米 DSC 曲线峰高结果如表 2 和表 8 所示。2017 年稻米 DSC 曲线峰高极显著大于 2016 年。不同品种间稻米 DSC 曲线峰高的差异达极显著水平。稻穗不同位置曲线峰高亦存在极显著差异, 表现为稻穗上部和中部大于稻穗下部。与对照相比, 臭氧胁迫使稻米 DSC 曲线峰高平均减少 2.1%, 其中 2016 年、2017 年分别减少 4.4%、0.5%, 但均未达显著水平; 从品种看, 臭氧胁迫下稻米 DSC 曲线峰高有增有减, 其中‘YLY1998’和‘HD5’极显著降低, 而‘WYJ27’极显著增加; 从部位看, 臭氧胁迫使稻穗上部和中部 DSC 曲线峰高没有影响, 但使下部减少 5.2% ( $P<0.1$ )。臭氧×品种、臭氧×年度×品种、臭氧×品种×部位和臭氧×年度×品种×部位间的互作对稻米 DSC 曲线峰高均达显著和极显著水平。

## 3 讨论

前人对臭氧胁迫环境下稻米食味的变化已有较多报道, 但稻米蒸煮品质包括稻米热力学特性的响

应少见报道。本研究以 8 个水稻品种为供试材料, 研究了臭氧浓度增加(100 nL·L<sup>-1</sup>)对糙米 6 个热力学参数的影响及其与生长季、供试品种以及籽粒着生位置的关系。两年数据表明, 臭氧浓度增高的环境下, 稻米热焓值、起始温度以及峰高均呈明显下降的趋势, 其中热焓值的降幅(-4.15%)达极显著水平; 与此不同, 峰值温度、终止温度、DSC 曲线峰宽均无明显变化。热焓值是重要的 DSC 特征参数, 代表了熔化淀粉分子的氢键, 使淀粉半结晶状变成可溶于水的状态所消耗的能量<sup>[16]</sup>。本研究表明, 臭氧胁迫使稻米淀粉糊化过程所需的糊化热焓值显著降低, 这说明稻米蒸煮过程变得更为容易。有证据表明, 臭氧胁迫稻米的食味品质呈总体变劣的趋势, 表现崩解值减小、消解值增加以及食味综合值下降<sup>[6,17-18]</sup>。可见, 地表臭氧浓度升高尽管导致稻米食味品质下降, 但蒸煮品质可能存在有利的变化。

前期研究表明, 臭氧胁迫使稻米淀粉或直链淀粉含量呈下降趋势, 但蛋白质含量增加<sup>[6,11,17-19]</sup>。臭氧胁迫下稻米热焓值显著下降是否与这些主要化学成分的变化有关值得深入探究。国外学者研究了直链淀粉含量对大米淀粉流变特性的影响, 发现直链淀粉可以增加淀粉粒的致密性, 会对淀粉糊的黏性



表 8 臭氧胁迫对稻穗不同部位稻米热力学特性(DSC)曲线峰高的影响

Table 8 Effects of ozone stress on peak height of grains located at different positions of a panicle of different rice varieties  $\mu\text{V}\cdot\text{mg}^{-1}$ 

品种 Variety	处理 Treatment	2016			2017		
		上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains	上部粒 Upper part grains	中部粒 Middle part grains	下部粒 Lower part grains
Y 两优 900	C-O <sub>3</sub>	0.12±0.01a	0.11±0.01ab	0.11±0.00ab	0.16±0.00a	0.18±0.01a	0.17±0.01a
YLY900	E-O <sub>3</sub>	0.10±0.00b	0.10±0.00b	0.11±0.00ab	0.17±0.01a	0.16±0.01a	0.16±0.01a
Y 两优 1998	C-O <sub>3</sub>	0.10±0.01b	0.12±0.00a	0.12±0.00a	0.17±0.01ab	0.18±0.01a	0.17±0.01ab
YLY1998	E-O <sub>3</sub>	0.11±0.01ab	0.10±0.00ab	0.09±0.00b	0.17±0.01ab	0.15±0.01b	0.16±0.00b
甬优 538	C-O <sub>3</sub>	0.14±0.00a	0.13±0.00bc	0.12±0.00cd	0.19±0.00a	0.19±0.00a	0.18±0.01a
YY538	E-O <sub>3</sub>	0.13±0.00b	0.13±0.00bc	0.12±0.00d	0.18±0.00a	0.18±0.01a	0.19±0.01a
甬优 15	C-O <sub>3</sub>	0.10±0.00a	0.11±0.00a	0.05±0.03b	0.16±0.01a	0.15±0.01a	0.15±0.01a
YY15	E-O <sub>3</sub>	0.10±0.00a	0.10±0.00a	0.11±0.00a	0.15±0.01a	0.15±0.01a	0.15±0.01a
南粳 9108	C-O <sub>3</sub>	0.15±0.01a	0.14±0.01a	0.13±0.00a	0.20±0.01a	0.20±0.01a	0.20±0.01a
NJ9108	E-O <sub>3</sub>	0.15±0.01a	0.15±0.01a	0.13±0.00a	0.22±0.01a	0.20±0.01a	0.22±0.01a
武运粳 27	C-O <sub>3</sub>	0.09±0.00a	0.12±0.00a	0.12±0.01b	0.19±0.01bc	0.19±0.01bc	0.17±0.01c
WYJ27	E-O <sub>3</sub>	0.11±0.00a	0.12±0.00a	0.09±0.00b	0.20±0.01ab	0.22±0.01a	0.19±0.01bc
淮稻 5 号	C-O <sub>3</sub>	0.11±0.00ab	0.11±0.00ab	0.12±0.00a	0.18±0.00abc	0.19±0.00ab	0.19±0.01a
HD5	E-O <sub>3</sub>	0.11±0.00ab	0.12±0.01ab	0.10±0.01b	0.17±0.00b	0.17±0.01b	0.18±0.00bc
扬稻 6 号	C-O <sub>3</sub>	0.13±0.01ab	0.13±0.00ab	0.15±0.06a	0.20±0.01ab	0.20±0.01ab	0.19±0.01ab
YD6	E-O <sub>3</sub>	0.12±0.01ab	0.14±0.00ab	0.07±0.00b	0.21±0.00a	0.19±0.01ab	0.19±0.01b

C-O<sub>3</sub>: 对照; E-O<sub>3</sub>: 高臭氧浓度。上部粒、中部粒和下部粒对应的强势粒、中势粒和弱势粒。不同小写字母表示同一品种 2 个臭氧处理 3 个部位间差异达 0.05 显著水平。C-O<sub>3</sub>: control; E-O<sub>3</sub>: elevated ozone concentration. The upper part, middle part and lower parts grains correspond to superior, medium and inferior grains, respectively. Different lowercase letters refer to significant differences among two ozone treatments and three grain positions for one variety at 0.05 level.

和流淌性产生抑制作用<sup>[20]</sup>。李莎莎等<sup>[21]</sup>对 5 个品种糙米粉热力学特性的研究表明,直链淀粉含量和蛋白质含量越高,其糊化所需能量越多,热焓值越大,越难糊化。刘奕等<sup>[22]</sup>分析了多个水稻品种脱蛋白处理前后 DSC 参数的变化,发现经脱蛋白处理后米粉样品糊化过程中的热焓值较未经脱蛋白的对照样品显著升高。可见,臭氧胁迫下稻米热焓值下降可能与直链淀粉下降有关,但与蛋白质的关系尚有不确定性。

本研究表明,除终止温度,稻米热力学特征参数的年度差异均达极显著水平。说明气象条件对稻米 DSC 参数有较大的影响,这种年度差异在玉米 (*Zea mays*) 上亦有报道<sup>[23]</sup>。本研究还发现,气象条件还影响 DSC 参数对臭氧处理的响应:臭氧胁迫对稻米热力学特征参数的影响多表现为 2016 年大于 2017 年,其中臭氧处理与年度的互作对热焓值、糊化峰值温度和糊化终止温度的影响达显著水平,说明臭氧胁迫对这些参数的影响因生长季而异。气象数据显示,两年水稻生长期气温相近,但 2017 年水稻灌浆期阴雨天数同比 2016 年增加了 20 d。明显增加的阴雨天数导致水稻叶片气孔开张程度减小,

使水稻植株对臭氧的吸收减少,这可能是 2016 年稻米热力学特征值的响应明显大于 2017 年的主要原因。

前人对淀粉热力学特性的品种间差异已有大量报道。本研究发现稻米 DSC 各特征值的品种差异均达极显著水平,这与前人对水稻<sup>[21-22]</sup>或玉米<sup>[24-25]</sup>的报道一致。本文还发现,除热焓值与糊化起始温度外,臭氧与品种互作对多数 DSC 参数包括糊化峰值温度、糊化终止温度、DSC 曲线峰宽和峰高的影响均达极显著水平。综合前人和本研究结果可知,与其他品质性状相比<sup>[6]</sup>,臭氧胁迫对稻米热力学特性的影响相对较小,但一定程度上受气象条件和供试品种的影响。

水稻是穗状花序,一般位于稻穗上部的强势粒开花早,灌浆启动快,灌浆时间短,而弱势粒则相反<sup>[26]</sup>。本研究根据籽粒在稻穗上的着生位置分为上、中和下 3 个部位,分别对应强势粒、中势粒和弱势粒<sup>[14,27]</sup>。研究发现稻穗不同部位 6 个 DSC 参数均表现为稻穗上部>中部>下部,部位间的差异除起始温度外均达极显著水平。这一结果说明后开花的弱势粒糊化所需的热能和时间可能小于先开花的强势粒,表现出容易糊化的基本特征。上述现象可能与强势

粒的成熟度大于弱势粒有关<sup>[28]</sup>。结合前期研究可知, 尽管强势粒在食味品质<sup>[29-30]</sup>和营养品质方面<sup>[27,31-32]</sup>优于弱势粒, 但蒸煮特性方面可能存在劣势。

尽管籽粒着生部位对稻米品质有重要影响, 但是否影响稻米品质对臭氧胁迫的响应报道甚少。本组前期研究发现, ‘南粳 9108’ 稻米 17 种氨基酸含量对臭氧胁迫的响应与籽粒着生部位有关, 弱势粒的响应总体上大于强势粒和中势粒<sup>[14]</sup>。本试验研究了稻穗不同部位米粉热力学特征参数对臭氧浓度升高的响应, 结果发现, 尽管臭氧×部位只对 DSC 曲线峰宽的影响达显著水平, 但多数 DSC 特征参数在臭氧胁迫对环境下表现出弱势粒响应大于中势粒或强势粒。这一现象可能与强弱势粒的灌浆特性不同有关联: 弱势粒较强势粒灌浆慢、历期长, 故生长过程更多地受到逆境(如臭氧胁迫)的影响<sup>[9,26]</sup>。

#### 4 结论

利用差示扫描量热仪, 本文研究了 8 个品种稻米淀粉热力学特性对臭氧胁迫的响应及其与生长季、供试品种以及籽粒着生位置的关系。研究发现, 稻米 DSC 热力学参数因生长季、供试品种以及籽粒着生部位而异, 强势粒明显表现出难以糊化的基本特征; 臭氧胁迫环境生长的稻米热焓值下降, 呈现出容易糊化的趋势, 但这一趋势在不同生长季、不同供试品种间存在较大差异; 与此不同, 籽粒着生部位对臭氧胁迫下稻米 DSC 参数的响应较小, 但趋势一致。

#### 参考文献 References

- [1] IPCC. Climate Change, 2013 — The Physical Science Basis: Working Group Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014
- [2] KOEHLER P. Concentrations of low and high molecular weight thiols in wheat dough as affected by different concentrations of ascorbic acid[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(17): 4948–4953
- [3] AINSWORTH E A. Rice production in a changing climate: A meta-analysis of responses to elevated carbon dioxide and elevated ozone concentration[J]. Global Change Biology, 2008, 14(17): 1642–1650
- [4] 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 (O<sub>3</sub>) concentration: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 901–910
- [5] 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
- [6] YANG L X, WANG Y X. Rice: Chemistry and Technology[M]. 4th ed. Elsevier Inc. and AACCC International, Technology. 2019: 427–441
- [7] 池晓菲, 舒庆尧. 稻米糊化温度特性形成规律研究[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(5): 548–550  
CHI X F, SHU Q Y. A study on the formation in the character of gelatinization temperature of rice grains[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(5): 548–550
- [8] 王良东, 顾正彪. DSC、EM、NMR 及 X-射线衍射在淀粉研究中的应用[J]. 西部粮油科技, 2003, 28(4): 39–44  
WANG L D, GU Z B. The uses of differential scanning calorimetry, electron microscope, nuclear magnetic resonance and X-ray diffraction in starch research[J]. China Western Cereals & Oils Technology, 2003, 28(4): 39–44
- [9] YANG J C, PENG S B, VISPERAS R M, et al. Grain filling pattern and cytokinin content in the grains and roots of rice plants[J]. Plant Growth Regulation, 2000, 30(3): 261–270
- [10] 黄敏, 莫润秀, 邹应斌, 等. 超级稻的产量构成特点和籽粒灌浆特性分析[J]. 作物研究, 2008, 22(4): 249–253  
HUANG M, MO R X, ZOU Y B, et al. Yield components and grain filling characters of super hybrid rice[J]. Crop Research, 2008, 22(4): 249–253
- [11] 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
- [12] 赵轶鹏, 邵在胜, 宋琪玲, 等. 一种新型自然光气体熏蒸平台: 系统结构与控制精度[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2082–2093  
ZHAO Y P, SHAO Z S, SONG Q L, et al. System structure and control accuracy of a solar-illuminated gas fumigation platform[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11): 2082–2093
- [13] 邵在胜, 沈士博, 贾一磊, 等. 臭氧浓度增加对不同敏感型水稻元素吸收与分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1642–1652  
SHAO Z S, SHEN S B, JIA Y L, et al. Impact of ozone stress on element absorption and distribution of rice genotypes with different ozone sensitivities[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(9): 1642–1652
- [14] 穆海蓉, 邵在胜, 沈士博, 等. 臭氧浓度增加对超级稻南粳 9108 稻穗不同部位籽粒氨基酸含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 420–427  
MU H R, SHAO Z S, SHEN S B, et al. Impacts of ozone stress on grain amino acids of super rice cultivar Nanjing 9108 differ with grain positions on a panicle[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(3): 420–427
- [15] 张大鹏, 吴建国, 石春海. 稻米糊化温度 DSC 试验条件的优化及相关分析[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(11): 1–4  
ZHANG D P, WU J G, SHI C H. Optimization of DSC experimental conditions and correlation analysis for gelatinization temperature traits of rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(11): 1–4

- [16] CHATAKANONDA P, VARAVINIT S, CHINACHOTI P. Effect of crosslinking on thermal and microscopic transitions of rice starch[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2000, 33(4): 276–284
- [17] 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
- [18] 宋琪玲, 齐义涛, 赵轶鹏, 等. 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[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(5): 566–571
- SONG Q L, QI Y T, ZHAO Y P, et al. Impact of free air ozone concentration enrichment on cooked rice (Wuyunjing 21) texture and palatability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(5): 566–571
- [19] FREI M. Breeding of ozone resistant rice: Relevance, approaches and challenges[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 197: 144–155
- [20] LII C Y, TSAI M L, TSENG K H. Effect of amylose content on the rheological property of rice starch[J]. *Cereal Chemistry*, 1996, 73(1): 415–420
- [21] 李莎莎, 吴娜娜, 李兴峰, 等. 不同品种糙米粉糊化特性比较研究[J]. *粮油食品科技*, 2016, 24(4): 15–18
- LI S S, WU N N, LI X F, et al. Compare of the paste properties of different varieties of brown rice flour[J]. *Science and Technology of Cereals Oils and Foods*, 2016, 24(4): 15–18
- [22] 刘奕, 张其芳, 程方民. 蛋白质对稻米米粉热力学和黏滞特性的影响效应[J]. *中国粮油学报*, 2006, 21(6): 9–13
- LIU Y, ZHANG Q F, CHENG F M. Influence of protein in milled rice on DSC parameters and RVA properties[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2006, 21(6): 9–13
- [23] 陆大雷, 郭换粉, 董策, 等. 生长季节对糯玉米淀粉粒分布和热力学特性的影响[J]. *作物学报*, 2010, 36(11): 1998–2003
- LU D L, GUO H F, DONG C, et al. Starch granule size distribution and thermal properties of waxy maize cultivars in growing seasons[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1998–2003
- [24] 赵前程, 吴素文, 李新华, 等. 磷酸酯化改性对玉米杂交种淀粉糊化过程中热力学性质的影响[J]. *食品与生物技术学报*, 2008, 27(3): 18–20
- ZHAO Q C, WU S W, LI X H, et al. Influence of modification by phosphate on the thermal properties of starches from normal corn hybrids during pasting[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2008, 27(3): 18–20
- [25] 唐明霞, 陈惠, 顾拥建, 等. 乳熟期玉米糊化热力学性质的分析[J]. *食品与生物技术学报*, 2015, 34(3): 291–294
- TANG M X, CHEN H, GU Y J, et al. Pasting thermodynamic analysis of maize in milky stage[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2015, 34(3): 291–294
- [26] 杨建昌. 水稻弱势粒灌浆机理与调控途径[J]. *作物学报*, 2010, 36(12): 2011–2019
- YANG J C. Mechanism and regulation in the filling of inferior spikelets of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(12): 2011–2019
- [27] 张庆, 王娟, 景立权, 等. 叶面施用不同形态锌化合物对稻米锌浓度及有效性的影响[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(6): 610–618
- ZHANG Q, WANG J, JING L Q, et al. Effect of foliar application of different Zn compounds on Zn concentration and bioavailability in brown rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(6): 610–618
- [28] 穆海蓉. 稻米品质对臭氧胁迫的响应及其影响因子[D]. 扬州: 扬州大学, 2018: 145–150
- MU H R. The response of rice grain quality to ozone stress and its regulation factors[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2018: 145–150
- [29] 陈书强, 金峰, 董丹, 等. 两种穗型粳稻穗上不同粒位籽粒几个营养和蒸煮品质性状的比较分析[J]. *作物学报*, 2008, 34(4): 641–652
- CHEN S Q, JIN F, DONG D, et al. Comparisons of several nutritional and cooking qualities of grains at different grain positions of panicle between two panicle types of Japonica rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 641–652
- [30] 薛菁芳, 陈书强, 潘国君, 等. 粳稻不同粒位上粒重和食味与其他品质性状的关系[J]. *华北农学报*, 2015, 30(3): 129–135
- XUE J F, CHEN S Q, PAN G J, et al. Relationship between grain weight, taste quality and other quality traits at different grain positions of japonica rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2015, 30(3): 129–135
- [31] 汪巧菊, 陈昕钰, 冉莉萍, 等. 小麦强弱粒胚乳淀粉体和蛋白体发育及物质积累研究[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(1): 89–95
- WANG Q J, CHEN X Y, RAN L P, et al. Study on amyloid and protein development and their accumulation in endosperm between superior and inferior wheat grains[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(1): 89–95
- [32] SU D, SULTAN F, ZHAO N C, et al. Positional variation in grain mineral nutrients within a rice panicle and its relation to phytic acid concentration[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2014, 15(11): 986–996