

张继双, 唐昊冶, 刘 钢, 等. 亚热带地区水稻(*Oryza sativa* L.)气孔臭氧通量和产量的响应关系[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1857-1866.
ZHANG Ji-shuang, TANG Hao-ye, LIU Gang, et al. Stomatal ozone flux-response relationships of rice(*Oryza sativa* L.) in subtropical area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(10): 1857-1866.

亚热带地区水稻(*Oryza sativa* L.)气孔臭氧通量和产量的响应关系

张继双^{1,2}, 唐昊冶¹, 刘 钢¹, 朱建国^{1*}

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

摘要:基于开放式臭氧浓度升高 O_3 -FACE(Free-Air Concentration Elevation of O_3)实验平台,利用前期水稻 O_3 -FACE 试验的基础数据,通过建立水稻产量与不同评价指标(累积气孔 O_3 吸收通量 POD_Y 和 O_3 浓度指标 AOTX)的响应关系,比较了水稻产量损失与各评价指标的相关性差异,通过对暴露剂量、吸收通量相关参数取值与产量损失的观察和分析结果的比较,找出更为合理的农作物臭氧风险评估阈值。结果表明:随着通量阈值 $Y[0\sim 11\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}(\text{PLA: projected leaf area, 投影叶面积})]$ 和暴露浓度阈值 $X(0\sim 50\text{ nL}\cdot L^{-1})$ 的增加,回归分析 R^2 值逐渐增加,当 Y 为 $11\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}$ 和 X 为 $50\text{ nL}\cdot L^{-1}$ 时,气孔臭氧吸收通量 POD_{11} 和累积暴露剂量 AOT50 与水稻相对产量的相关性最大,当通量阈值 Y 为 $8\sim 13\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}$ 和暴露阈值 X 为 $46\sim 58\text{ nL}\cdot L^{-1}$ 时,可获得较高的 R^2 取值范围,分别为 $0.70\sim 0.75$ 和 $0.70\sim 0.745$ 。参考文献发现,目前地表臭氧污染可能引起的水稻产量损失范围为 $5\%\sim 8\%$,对照圈中 POD_{9-10} 和 AOT40~45 产量损失的预测值亦在这区间,但前者 R^2 值($0.73\sim 0.74$)明显高于后者 R^2 值($0.64\sim 0.69$),表明基于气孔臭氧通量的评价指标能更好地反映水稻产量的变化。通过进一步分析发现,当通量阈值 Y 为 $9\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}$ 时,能更准确地评估水稻产量损失,且其 R^2 值(0.73)高于通量指标 POD_6 (0.57)。以上研究结果表明,通量指标 POD_9 更适合评估亚热带地区 O_3 污染对水稻作物的影响。

关键词:气孔导度;水稻(*Oryza sativa* L.);臭氧;通量响应关系

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)10-1857-10 doi:10.11654/jaes.2016-0594

Stomatal ozone flux-response relationships of rice(*Oryza sativa* L.) in subtropical area

ZHANG Ji-shuang^{1,2}, TANG Hao-ye¹, LIU Gang¹, ZHU Jian-guo^{1*}

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

Abstract: Based on previous investigations on a fully open-air ozone(O_3) fumigation experiment(O_3 -FACE), we established dose-response relationships using O_3 dose index AOT40(accumulated [O_3] above $40\text{ nL}\cdot L^{-1}$) and POD_Y (phytotoxic O_3 dose, accumulated stomatal flux of O_3 above a threshold of $Y\text{ nmol}\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$), and compared their performance on O_3 -induced rice yield loss evaluation. The aim of this study is to find the optimum threshold for exposure-based and flux-based dose-response relationships used for ozone risk assessment on rice. Our result showed that the R^2 -value of regression analysis increased with flux threshold $Y[0\sim 11\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}(\text{PLA: projected leaf area})]$ and exposure threshold $X(0\sim 50\text{ nL}\cdot L^{-1})$ increase, respectively. When flux threshold Y was $11\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}$ and exposure threshold X was $50\text{ nL}\cdot L^{-1}$, the O_3 dose index POD_{11} and AOT50 had the strongest correlation with RY(relative yield) of rice, respectively. High R^2 -value was derived i.e. $0.70\sim 0.75$ and $0.70\sim 0.745$ when flux threshold Y was within the range of $8\sim 13\text{ nmol } O_3\cdot m^{-2}\text{ PLA}\cdot s^{-1}$ and exposure

收稿日期:2016-04-28

基金项目:科技部国际科技合作与交流项目(2010DFA22770)

作者简介:张继双(1990—),男,硕士研究生,主要从事全球变化下农田生态系统对臭氧响应的研究。E-mail:jszhang@issas.ac.cn

*通信作者:朱建国 E-mail:jgzhu@issas.ac.cn

threshold X was 46~58 $\text{nL}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. Previous studies have indicated that the rice yield loss caused by near-surface ozone pollution may range from 5% to 8%. These results were similar with our estimation on ambient $[\text{O}_3]$ treatment using POD_{9-10} and AOT40~45. The higher R^2 -value 0.73~0.74 with POD_{9-10} compared to that of 0.64~0.69 with AOT40~45 indicated that flux-based assessment may have a superior performance on O_3 -induced rice yield loss estimation. Further analysis found that when flux threshold $Y=9 \text{ nmol O}_3\cdot\text{m}^{-2} \text{ PLA}\cdot\text{s}^{-1}$, assessment of rice yield loss was more accurate, and the R^2 -value(0.73) was higher than that of POD_6 (0.57). Our results suggested that POD_9 is suitable for evaluating rice yield loss due to O_3 increase in subtropical area.

Keywords: stomatal conductance; rice (*Oryza sativa* L.); ozone; flux-response relationship

臭氧(O_3)具有强氧化性,是对流层主要的二次空气污染物之一,对植物的生长发育产生不利影响^[1-2]。近年来,伴随着我国经济的快速发展,氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和挥发性有机物(VOCs)等 O_3 前体物排放量剧增,导致地表 O_3 浓度以每年 0.5%~2% 的速率增加^[3]。对流层 O_3 浓度的日益升高,已经严重威胁到我国粮食生产安全^[4]。因此,制定科学合理并适合我国农业特点的 O_3 风险评估方法具有重要意义。

为了定量评价植物对 O_3 的响应关系,科研人员开展了大量研究工作。20 世纪 80 年代,美国农业部和环境保护局创建了全国农作物损失评价网,利用田间原位开顶式气候箱(OTCs)来研究农作物(主要有豆类、块茎类和禾本科作物等)对不同浓度 O_3 水平的响应机制,并通过建立 O_3 浓度(M7)与作物产量浓度响应模型,对作物产量损失进行评估^[5]。随着研究的持续深入,发现 O_3 对作物造成的负面影响主要是由 O_3 的累积效应引起,由此提出了 O_3 剂量的概念,并利用 AOT40、SUM06 和 W126 等不同暴露指标来反应 O_3 剂量对作物伤害的阈值^[6]。AOT40(大于 $40 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的小时平均 O_3 浓度与 $40 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 差值的累计值)将 $40 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为 O_3 对作物产生伤害的临界值,超过临界值的 O_3 将对作物产生负面效应^[7-8],因其与作物的反应有良好的拟合关系,较好地反映了 O_3 对作物的潜在威胁,所以曾被广泛用于 O_3 风险评价当中^[9]。然而,基于 AOT40 等暴露指标建立的作物产量损失的剂量响应模型,仅仅考虑了植物冠层水平的 O_3 浓度变化,忽略了生物和气候因素对气孔 O_3 吸收的调节作用^[10],用于作物产量损失的评估时,存在一定局限性和不确定性。大量研究表明, O_3 对植物的伤害主要取决于植物的气孔 O_3 吸收量^[11],而气孔是 O_3 进入植物体的主要通道,气孔开度大小对植物叶片 O_3 吸收数量起着调节和限制作用^[12]。为了准确评估 O_3 对作物生长和产量的影响,基于气孔 O_3 吸收通量的方法被提出并广泛应用于作物产量损失的评估中^[13]。该方法以Jarvis

气孔导度模型^[14]为基础,既考虑了环境因素与植物自身因素,又考虑了植物对环境改变的生理响应,更接近实际水平,可避免过高估计 O_3 污染对作物造成的伤害^[15]。目前,我国 O_3 污染研究多数是在 OTCs 实验条件下以暴露指标为主,缺乏自然环境条件下 O_3 浓度升高对作物 O_3 通量影响的研究^[16]。大量研究表明,OTCs 可以改变植物冠层的微气候条件,如温度、降雨、湿度和风速等自然环境条件,影响植物叶片气体交换、污染物吸收以及土壤养分供给等,改变植物对 O_3 的敏感性,从这种模拟环境中取得的研究结果预测 O_3 浓度升高对作物生长的影响,具有较多的不确定性。鉴于此,在开放系统下升高臭氧浓度,以尽可能接近自然环境的条件下,利用模型预测我国作物的气孔 O_3 吸收通量和产量损失将有利于臭氧风险评价方法的进一步完善。

水稻是世界上重要的粮食作物,而中国是世界上最大的水稻生产国(水稻产量占全球 30%)和消费国(年消费 1.465 亿吨)^[17]。近年来许多研究表明水稻是对 O_3 污染比较敏感的农作物品种^[2]。由于人口的增长和农田减少,社会对水稻产量和质量的需求持续上升。本文根据中日合作建立的亚洲首个稻/麦轮作 O_3 -FACE(Free-air concentration elevation of O_3)平台,利用 Jarvis 气孔导度模型和通量模型,计算水稻叶片气孔 O_3 吸收通量,建立气孔 O_3 吸收通量与水稻产量的通量关系模型,综合分析了不同 O_3 通量和水稻产量的拟合关系;同时根据计算的不同 O_3 暴露剂量,比较分析了不同 O_3 风险评价指标在水稻产量损失评估中的优劣,为政府制定相应的法律、法规、政策提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验区概况

试验于 2007—2009 年在中国 O_3 -FACE 研究基地进行。该基地位于江苏省江都市小纪镇马陵村良种场($32^\circ 35' 5''\text{N}$, $119^\circ 42' 0''\text{E}$),海拔高度 5 m,典型的亚

热带海洋气候区, 年均降雨量 980 mm 左右, 年均蒸发量大于 1100 mm, 年均温度 14.9 °C, 年日照时间大于 2100 h, 年无霜期 220 d, 耕作方式为水稻-冬小麦轮作, 典型的轮作农田生态系统。

1.2 试验平台

O₃-FACE 系统设置大气 O₃ 浓度升高圈 (FACE, E) 和对照处理圈 (Ambient, A), 每个处理各有三个重复, FACE 圈之间以及 FACE 圈与对照圈之间的间隔大于 70 m, 以减少 O₃ 释放的圈际影响。FACE 圈为直径 14 m 的正八边形, 作物冠层上方 50~60 cm 处放置 8 根放气管道, 管道上分布有锯齿状小孔, 由计算机自动控制 FACE 圈气体的喷放。晴天每天 09:00—18:00 释放 O₃, 使 FACE 圈内 O₃ 浓度始终比对照圈 O₃ 浓度高 50%, 雨天、雾天 (避免水蒸发时水滴所在处 O₃ 被浓缩)、自然环境中 O₃ 浓度低于 20 nL·L⁻¹ (低于可观察效应阈值 40 nL·L⁻¹) 或高于 250 nL·L⁻¹ (避免水稻叶片局部过度损伤) 时暂停通气。在 90% 的放气时间内, 平台控制区域 O₃ 浓度的误差在控制目标值的 20% 以内, 3 个对照圈无放气管道, 环境条件与自然状态完全一致。

1.3 供试水稻

2007 年供试品种为武运粳 15 (WYJ15, 粳稻)、扬稻 6 号 (YD6, 粳稻)、汕优 63 (SY63, 杂交稻) 和两优培九 (LYPJ, 杂交稻); 2008、2009 年供试品种相同, 为武运粳 21 (WYJ21, 粳稻)、扬稻 6 号、汕优 63 和两优培九。成熟期, 每个小区取样 2 m², 测定实产。

1.4 气孔导度模型

本文采用 Jarvis 气孔导度模型^[14]对水稻剑叶气孔导度进行模拟, 模型公式如下:

$$g_{\text{sto}} = g_{\text{max}} \times \min(f_{\text{phen}}, f_{\text{O}_3}) \times f_{\text{light}} \times \max[f_{\text{min}}, (f_{\text{VPD}} \times f_{\text{temp}})]$$

式中: g_{sto} 表示单位投影叶面积 (PLA)^[18] 实际气孔导度 (mmol O₃·m⁻² PLA·s⁻¹); g_{max} 表示最大气孔导度 (mmol O₃·m⁻² PLA·s⁻¹); f_{min} 表示最小相对气孔导度值, 为固定常数, 由最小气孔导度和最大气孔导度的比值确定 (本文取值 0.01); f_{phen} , f_{O_3} , f_{light} , f_{temp} 和 f_{VPD} 分别是水稻物候期 (phen)、O₃ 吸收通量、光照 (PPFD)、大气温度 (T) 和水汽压差 (VPD) 对气孔导度的限制函数, 并以相对值的形式表示, 取值范围为 $0 \leq f \leq 1$, 其中: O₃ 吸收通量以小时 O₃ 浓度大于 0 nmol O₃·m⁻² PLA·s⁻¹ 累积 O₃ 浓度值 (POD₀) 表示, 累积时间采用有效积温形式计算, 从开花前 -350 °C·d 至开花后 1000 °C·d, 并以 0 °C·d 为基温, 开花前为负值, 开花后为正值。

气孔导度模型公式及相关参数在表 1 中列出。

1.5 臭氧通量模型

参考 LATAP^[18] 的方法来计算水稻剑叶气孔 O₃ 通量, 公式如下:

$$F_{\text{st}} = [\text{O}_3] \times \frac{1}{r_b + r_c} \times \frac{g_{\text{sto}}}{g_{\text{sto}} + g_{\text{ext}}}$$

式中: F_{st} 表示气孔 O₃ 吸收速率 (nmol O₃·m⁻² PLA·s⁻¹); $[\text{O}_3]$ 表示冠层臭氧浓度; r_b 表示叶的边界层阻力; r_c 表示叶的气孔阻力; g_{ext} 表示叶的非气孔导度。

叶边界层阻力 r_b 和叶气孔阻力 r_c 计算公式如下:

$$r_b = \frac{1}{g_b}$$

$$r_c = \frac{1}{g_{\text{sto}} + g_{\text{ext}}}$$

式中: g_b 表示叶边界层导度, 通过冠层高度处风速 (u , m·s⁻¹) 和叶片宽度 (w , 0.02 m) 计算得到。计算公式如下^[19]:

$$g_b = 0.125 \times \left(\sqrt{\frac{u}{w}} \right) \times 1000 \text{ (mmol O}_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1})$$

累积气孔臭氧通量计算公式如下:

$$\text{POD}_Y = \sum \max(F_{\text{st}} - Y, 0)$$

式中: POD_Y 表示气孔臭氧吸收速率大于临界值 Y 时的累积气孔臭氧吸收通量 (mmol·m⁻²); Y 表示气孔臭氧吸收速率的临界值 (nmol O₃·m⁻² PLA·s⁻¹)。

1.6 数据处理

根据 Feng 等^[19]提供的方法, 利用最小二乘法对水稻产量与 O₃ 通量/剂量指标进行线性回归分析, 将回归线截矩作为理论产量, 每个处理的实际产量与回归线截矩的比值作为相对产量 (RY), 以 O₃ 通量/剂量指标为横坐标, 相对产量 (RY) 为纵坐标, 进行通量/剂量效应分析, 根据分析结果比较不同评价指标在水稻产量损失评估中的优劣。其中相对产量作为 O₃ 通量/剂量为零时的假设产量, 使得每个处理间的产量具有可比性。

通量效应分析中, 本文对水稻气孔 O₃ 吸收速率临界值 Y 从 0~18 进行连续取值, 间隔为 1, 建立 POD_Y 与水稻产量间的通量响应关系模型, 分析不同 Y 值条件下气孔 O₃ 通量 POD_Y 与相对产量之间的关系, 以确定最合理的气孔 O₃ 吸收阈值。

同时计算了臭氧浓度指标 AOTX, X 从 0~70 进行连续取值, 间隔为 5, 建立 AOTX 与水稻产量间的剂量响应关系模型, 分析不同 X 值下 AOTX 与水稻相对产量之间的关系, 其臭氧累积计算期间与通量指标 POD_Y 相同, 而不是 3 个月的累积期。

$$\text{AOTX} = \sum ([\text{O}_3] - X) \quad [\text{O}_3] \geq X \text{ (nL} \cdot \text{L}^{-1})$$

表1 水稻剑叶气孔导度计算参数

Table 1 Parameterization used to calculate rice flag leaves stomatal conductance

函数	公式	参数	单位	参数值(Tang 等 ^[21])
$g_{\max}$	—	—	$\text{mmol O}_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$	370
$f_{\min}$	—	—	Fraction	0.01
f_{phen}	when $(f_{\text{phen},f} - f_{\text{phen},e}) \leq \text{ETS} \leq f_{\text{phen},f}$ $1 + (1 - f_{\text{phen},b}) / f_{\text{phen},e} \times \text{ETS}$	$f_{\text{phen},a}$	Fraction	0.3
		$f_{\text{phen},b}$	Fraction	0.7
	when $f_{\text{phen},f} < \text{ETS} < (f_{\text{phen},f} + f_{\text{phen},g})$ 1	$f_{\text{phen},e}$	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	350
		$f_{\text{phen},f}$	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	0
	when $(f_{\text{phen},f} + f_{\text{phen},g}) < \text{ETS} \leq (f_{\text{phen},f} + f_{\text{phen},h})$ $1 - f_{\text{phen},a} \times (\text{ETS} - f_{\text{phen},g}) / (f_{\text{phen},h} - f_{\text{phen},g})$	$f_{\text{phen},g}$	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	500
		$f_{\text{phen},h}$	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	850
	when $(f_{\text{phen},f} + f_{\text{phen},h}) < \text{ETS} \leq (f_{\text{phen},f} + f_{\text{phen},i})$ $f_{\text{phen},b} - (\text{ETS} - f_{\text{phen},h}) / (f_{\text{phen},i} - f_{\text{phen},h}) \times f_{\text{phen},b}$	$f_{\text{phen},i}$	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$	1000
		$\text{ETS} (^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}) = \sum \max(0, T_d - T_b)$		
f_{light}	$1 - \exp[(-\text{light}_a) \times \text{PPFD}]$	light_a	Constant	0.002 3
f_{temp}	when $T_{\min} < T < T_{\max}$	$T_{\min}$	$^{\circ}\text{C}$	14
	$\max\left\{f_{\min}, \left[\frac{(T - T_{\min})}{(T_{\text{opt}} - T_{\min})}\right] \times \left[\frac{(T_{\max} - T)}{(T_{\max} - T_{\text{opt}})}\right]^{bt}\right\}$	T_{opt}	$^{\circ}\text{C}$	28
	when $T < T_{\min}$ or $T > T_{\max}$	$T_{\max}$	$^{\circ}\text{C}$	42
	$f_{\min} \quad bt = (T_{\max} - T_{\text{opt}}) / (T_{\text{opt}} - T_{\min})$			
f_{VPD}	$\min\left\{1, \max\left[f_{\min}, \frac{(1 - f_{\min})(\text{VPD}_{\min} - \text{VPD})}{(\text{VPD}_{\min} - \text{VPD}_{\max})} + f_{\min}\right]\right\}$	$\text{VPD}_{\max}$	kPa	1.1
		$\text{VPD}_{\min}$	kPa	2.7
		$\sum \text{VPD}$	kPa	8
f_{O_3}	$[1 + (\text{POD}_0 / f_{\text{ozone},a})^{f_{\text{ozone},b}}]^{-1}$	$f_{\text{ozone},a}$	$\text{POD}_0, \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2}$	13.5
		$f_{\text{ozone},b}$	Exponent	10
Height	—	—	m	1
Leaf dimension	—	—	m	0.02

注: PPFD, 光量子通量密度, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; T , 空气温度, $^{\circ}\text{C}$; VPD, 水汽压差, kPa; POD_0 , 气孔臭氧吸收速率高于临界值 $0 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的累积臭氧吸收通量; ETS, 有效积温, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$; $T_{\min}$, 气孔运动的最小温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\max}$, 气孔运动的最大温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{opt} , 气孔运动的最适温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

Notes: PPFD, the photosynthetic photon flux density, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; T , the air temperature, $^{\circ}\text{C}$; VPD, the atmospheric vapor pressure deficit, kPa; POD_0 is accumulated stomatal flux of O_3 above a threshold of $0 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$; ETS, effective temperature sum, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{d}$; $T_{\min}$, minimum temperature for stomata movements, $^{\circ}\text{C}$; $T_{\max}$, maximum temperature for stomata movements, $^{\circ}\text{C}$; T_{opt} , optimum temperature for stomata movements, $^{\circ}\text{C}$ 。

式中: AOTX 为有效光照条件下(太阳总辐射 $\geq 50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)大于 $X(\text{nL} \cdot \text{L}^{-1})$ 的小时平均 O_3 浓度与 $X(\text{nL} \cdot \text{L}^{-1})$ 差值的累计值($\text{nL} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}$)。

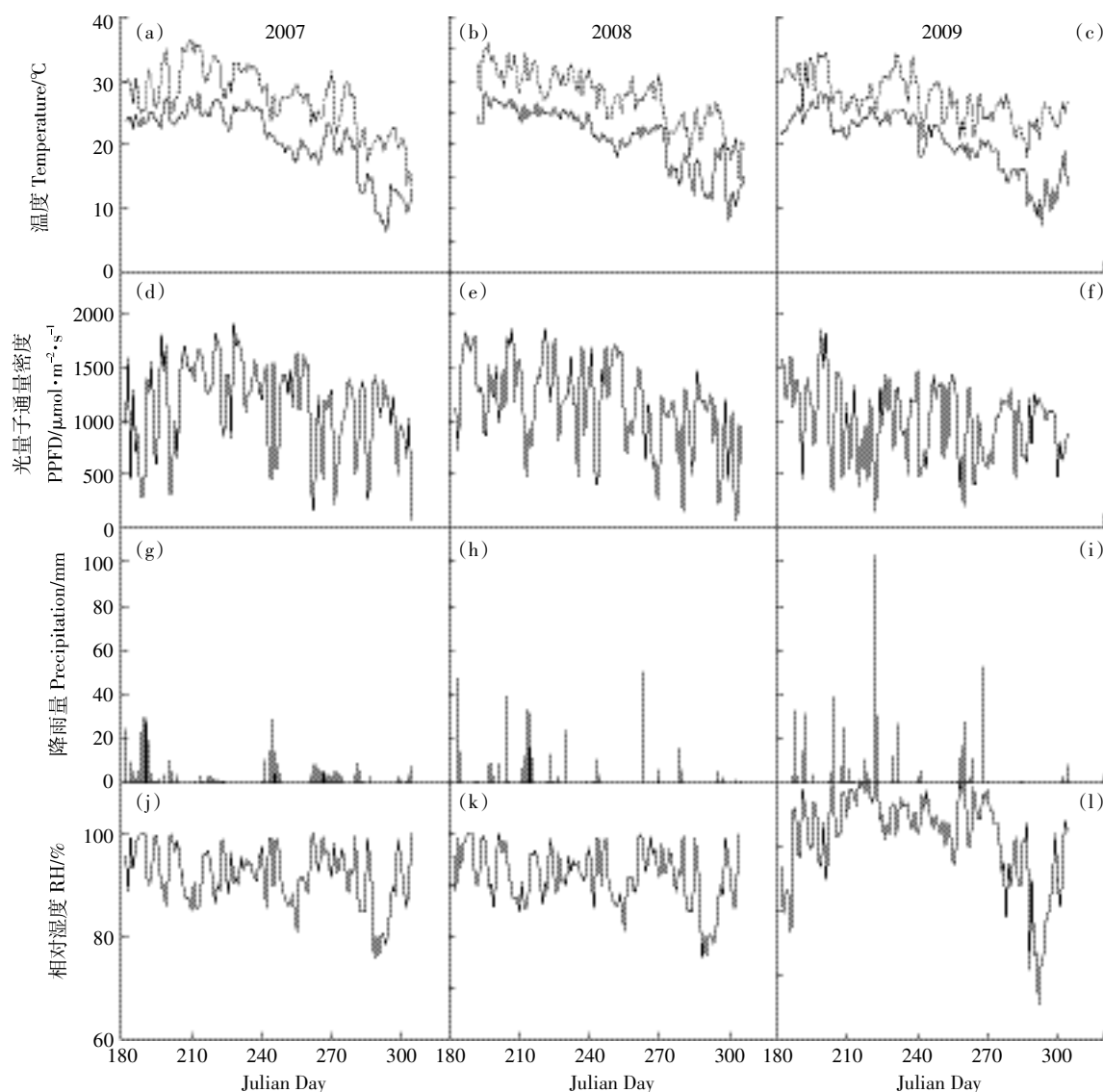
2 结果与分析

2.1 模型数据输入

气象数据是模型运行的驱动因子, 本研究所用的气象数据由 FACE 平台设置的气象监测站(Campbell Sci. North Logan, Utah, USA)监测得到(图 1), 2007、2008、2009 年三个水稻种植季节: 日均最大和最小温度分别为 27.3 、 20.7 $^{\circ}\text{C}$, 27.4 、 21.0 $^{\circ}\text{C}$, 27.2 、 20.4 $^{\circ}\text{C}$; 日均最大光量子通量密度(PPFD)分别为 1137 、 1147 、 $1001 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; 累积降雨量分别为 421 、 392 、 511

mm。其中, 2009 年水稻季降雨量比 2007 和 2008 水稻季多, 从而对 2009 年水稻季太阳辐射产生影响, 使该季大气温度(T)和光量子通量密度(PPFD)小于前两季; 水稻生长季节相对湿度(RH)保持在 $80\% \sim 100\%$ 之间, 并与降雨量正相关。

冠层高度臭氧浓度由 O_3 分析仪(Thermo Electron 49i, Thermo Scientific Co., USA)监测得到, 每隔 20 s 记录一次。在水稻生长季节内, FACE 圈的累积 O_3 剂量指标 AOT40 稳定增长, FACE 圈和对照圈 AOT40 差异明显, 且差异随时间的增加而增加, 2007、2008、2009 年 FACE 圈分别比对照圈高 93.8% 、 107% 、 136% , 日 7 h 平均 O_3 浓度 FACE 圈分别比对照圈高 23.6% 、 23.1% 、 21.2% (图 2)。



日最大(虚线)最小温度(实线)(a、b、c);日最大光量子通量密度(PPFD)(d、e、f);降雨量(g、h、i);相对湿度(RH)(j、k、l)
Maximum(dot line) and minimum(solid line) daily temperature(a, b, c),daily maximum photosynthetic photon flux density(PPFD)(d, e, f), and daily precipitation(g,h, i) and relative humidity(RH)(j, k, l)

图 1 水稻生长季内气象数据(2007—2009 年)

Figure 1 Meteorological data collected at the experiment site during the 2007, 2008, and 2009 growth seasons

图 3 表示在整个累积计算期间内各环境因子(PPFD、VPD、 T)对气孔导度的限制作用(以 YD6 为例,不同品种间曲线略有不同)。当出现光照时,气孔张开,随着光照增强,其对气孔导度限制作用减弱;日出之前,温度最低,温度对气孔导度的限制作用最强,随着温度升高,其对气孔导度的影响逐渐趋于稳定,然后随着温度的下降,其对气孔导度的限制作用增强。2009 年温度的影响强于其他年份,主要是因为当年水稻季降雨量多而导致环境温度下降造成的(图 1)。由于农田自然环境条件相对稳定,水汽压差

(VPD)对气孔导度的影响变化不大。

计算水稻气孔 O_3 通量时,所有数据集(气象数据和 O_3 浓度数据)均转换为小时均值的形式。

2.2 产量分析

参考 Zhu 等^[20]的分析方法,分别对 FACE 圈和对照圈水稻品种产量求均值,发现 O_3 处理显著减少了 14.3%的水稻产量(图 4),其中 WYJ15、WYJ21、YD6、LYPJ 和 SY63 分别减少 9.9%、10.5%、9.1%、20.5%和 16.5%。不同水稻品种产量有显著差异,其中 LYPJ 产量最高,WYJ21 产量最低,品种间产量差异随季节而

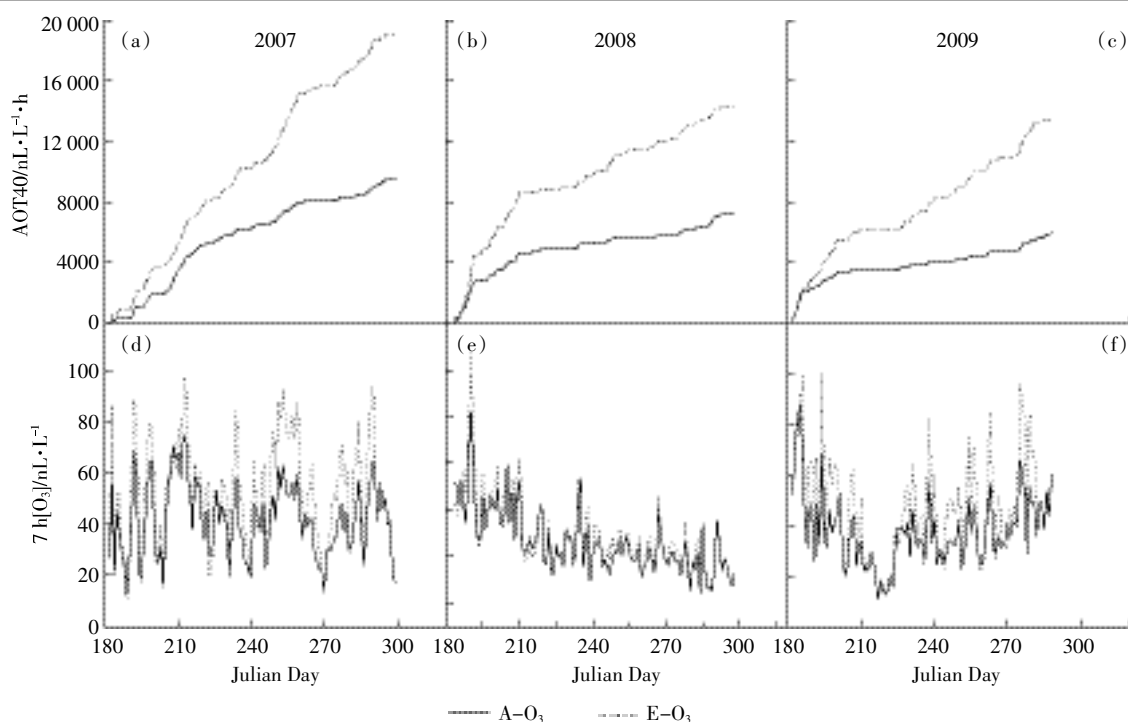


图2 2007年、2008年和2009年生长季内 AOT40(a、b、c)(大于 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 的小时 O_3 浓度与 $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 差值的累计值) 以及 7 h 均值 M7(d、e、f)的季节变化

Figure 2 AOT40(accumulated daytime $[\text{O}_3]$ above a threshold of $40 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$) in 2007(a), 2008(b), 2009(c) seasons and seasonal change in daily 7-h(9:00—16:00, Chinese Standard Time) mean $[\text{O}_3]$ in 2007(d), 2008(e), 2009(f) seasons

变化。不同品种对臭氧浓度升高表现出不同的响应,与粳稻相比,杂交稻对臭氧浓度升高更敏感,表现出更高的产量差异(图4)。方差分析结果表明(表2): $\text{O}_3 \times \text{Cultivar}$ 展现出弱显著交互作用($P=0.068$),而 $\text{O}_3 \times \text{Cultivar} \times \text{Year}$ 交互作用不显著($P=0.131$)。通过分析发现,这种现象由于 FACE 圈中 SY63 产量的不稳定性而引起,与对照圈相比,FACE 圈中 SY63 各季产量分别下降了 17.5%、27.5%和 16.3%。当忽略 SY63 时,方差分析结果表明: $\text{O}_3 \times \text{Cultivar}$ 的交互作用不显著($P=0.318$),然而 $\text{O}_3 \times \text{Cultivar} \times \text{Year}$ 或 $\text{O}_3 \times \text{Year}$ 的交互作用仍保持不显著(P 值分别为 0.878 和 0.612)。因此,考虑到 SY63 对 O_3 表现出较大的年际变化,通量/剂量效应分析中该品种 2008 年产量被忽略。

2.3 通量效应分析

图5展示了通量分析和剂量分析中 R^2 值的变化,以及 FACE 圈和对照圈的相对产量的估计值(相对产量分别表示为 A-RY 和 E-RY)。 R^2 值随阈值 Y 增加而增加,当阈值 Y 等于 $11 \text{ nmol O}_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, O_3 吸收通量(POD_{11})与水稻相对产量的相关性最大(图5a)。当通量阈值 $Y=8\sim 13 \text{ nmol O}_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,获得高 R^2 值取值范围(0.70~0.75),不同通量指标

间 R^2 值相差较小。同样,从图5b可以看出,当 X 取值为 $46\sim 58 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可以得到较高的 R^2 值范围(0.70~0.745)。

通过分析发现,随着臭氧阈值的增加,水稻的相对产量呈现明显的下降趋势(图6)。从图6可以看出,通量 POD_6 与相对产量剂量效应分析得到的 R^2 值(0.57)明显小于 POD_9 和 POD_{11} 的 R^2 值(0.73、0.75),且 AOT40 指标的剂量效应分析 R^2 值介于 POD_6 和 POD_9 两指标通量效应分析 R^2 值之间。随着通量阈值 Y 继续增加,点的聚集效应随之出现(图6c)。通过对相对产量和通量(图6a、图6b)做残差分析(图7a、图7b)发现, POD_9 的残差分布比 POD_6 更均匀。关于合理阈值的选择将在讨论部分给出。

3 讨论

目前,关于水稻气孔导度模型的研究仍然很少。本研究利用了 Tang 等^[21]基于 FACE 实验数据修正的气孔导度模型来评估水稻剑叶的臭氧通量。与开顶式气室(OTC)不同,本研究是在开放式臭氧浓度增高环境(FACE)条件下进行,可以更好地代表未来环境臭氧浓度升高的情况,避免 OTC 试验中对冠层微气候

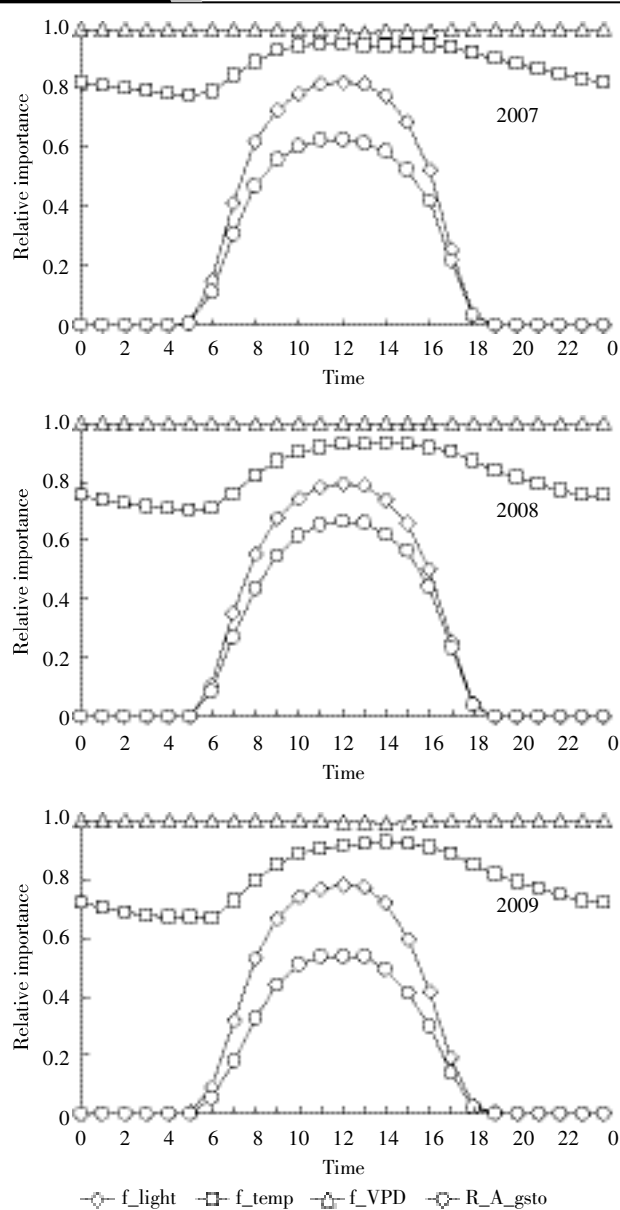
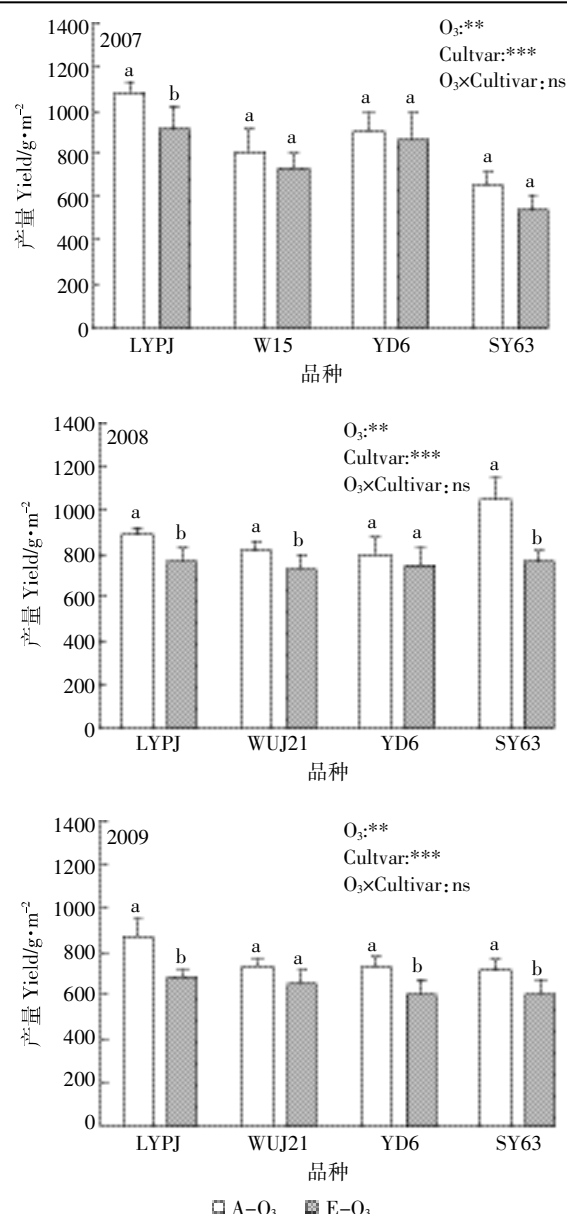


图3 水稻累积期间内环境变量(PPFD, VPD, T)对相对气孔导度(0~1, 1表示最大气孔导度)影响的日变化曲线

Figure 3 The relative importance of environmental variables (PPFD, VPD, T) for relative stomata conductance (g_{sto}) (0~1, where 1 represents g_{max}) expressed as average diurnal curves for the accumulated period of rice

的影响^[22]。

与暴露剂量指标(AOT40)相比, 通量指标最重要的提高在于对累积期间的界定^[9]。大量研究表明, 早期灌浆期间剑叶没有明显的衰老过程, 但是在灌浆后期其叶绿素含量快速下降^[23]。本研究中暴露剂量指标AOTX 累积计算期间与通量指标计算期间相同(从开花前 $-350\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$ 至开花后 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}^{-1}$)。如在 Pleijel 等^[24]实验中, 作物生育周期少于三个月, 导致其对臭



无相同字母的条形柱表示两者有显著差异($P<0.05$), 方差分析结果中*, **, *** 分别表示 $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$ 的显著性差异水平, ns 表示无显著性差异

Bars without a same letter are significantly different from each other at $P<0.05$. As ANOVA results shown, *, **, *** represent significant difference at $P<0.05$, $P<0.01$, $P<0.001$, respectively, ns, not significant

图4 对照圈和 FACE 圈水稻产量($n=3$)

Figure 4 Yield of rice (*Oryza sativa* L.) under A- O_3 and E- O_3 ($n=3$)

氧风险的评估结果具较高的不确定性。另外, 气孔导度模型综合考虑了生物和气候因素对气孔导度的影响, 揭示了气孔导度与各环境限制因子的关系, 基于气孔导度模型的气孔 O_3 通量指标在水稻产量损失的评估方面比 O_3 暴露指标更具优势。

表2 响应臭氧浓度升高的粮食产量方差分析
Table 2 Analysis of variance for grain yield in response to elevated $[O_3]$

影响 Effects	P 值	作物产量(Grain yield)
O_3	<i>P</i>	<0.001
Cultivar(C)	<i>P</i>	<0.001
Year(Y)	<i>P</i>	<0.001
$O_3 \times C$	<i>P</i>	0.068
$O_3 \times Y$	<i>P</i>	0.564
$C \times Y$	<i>P</i>	<0.001
$O_3 \times C \times Y$	<i>P</i>	0.131

注: *P* is the *P*-value for each effect in ANOVA.

对于 AOTX 和 POD_Y 来说,选择合适的阈值(*X*和 Y)对于臭氧风险评估的结果至关重要,所以本文不仅比较 R^2 值大小,而且通过分析比较水稻的产量损失来选择合适的 O_3 风险评估阈值。在欧洲,当通量阈值 Y 为 $6 \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 时(对小麦、马铃薯等评估),相对产量和 O_3 通量具有显著的相关性^[13]。本研究中,当 $Y=6 \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,相对产量和 POD_6 的相关性较低($R^2=0.57$,图 7A),不能很好反应水稻产量的变化,预测产量损失时可能存在较高的不确定性。根据 EDU 试验以及整合分析^[2,25]的结果,目前地表臭氧污染可能引起的水稻产量损失范围为 5%~8%。从图 5 可以看出,对照圈中 POD_{9-10} 和 AOT40~45 产量损失的预测值在该区间,但前者 R^2 (0.73~0.74)值要高于后者 R^2 (0.64~0.69),表明基于气孔臭氧通量的评价指标能更好地反映水稻产量的变化。并且,随着通量阈值 Y 的升高,对照圈中具有低气孔臭氧吸收通量(POD_{10})的部分数据点出现集聚效应。同时考虑对照圈中可能的产量损失和 R^2 值,通量阈值取为 $9 \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,能更好地评估亚热带地区的水稻产量损失。这与 Yamaguchi 等^[26]研究结果相似($Y=10 \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$)。尽管该通量阈值要小于 Feng 等^[19]对小麦通量阈值的研究结果($Y=12 \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$),但不能简单地认为亚热带地区水稻品种比小麦品种对 O_3 更敏感,因为两者使用了不同的模型参数值。

通量和剂量效应关系中较高的 R^2 值范围分别出现在 POD_{8-13} ($R^2=0.70\sim0.75$) 和 AOT46~58 ($R^2=0.70\sim0.74$)。但是,当考虑到合理的阈值 $Y=9\sim10 \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $X=40\sim45 \text{ nL} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,通量指标 POD_{9-10} 的 R^2 值(0.73~0.74)明显高于剂量指标 AOT40~45 的 R^2 值(0.64~0.69)。可见与暴露剂量指标相比,通量指

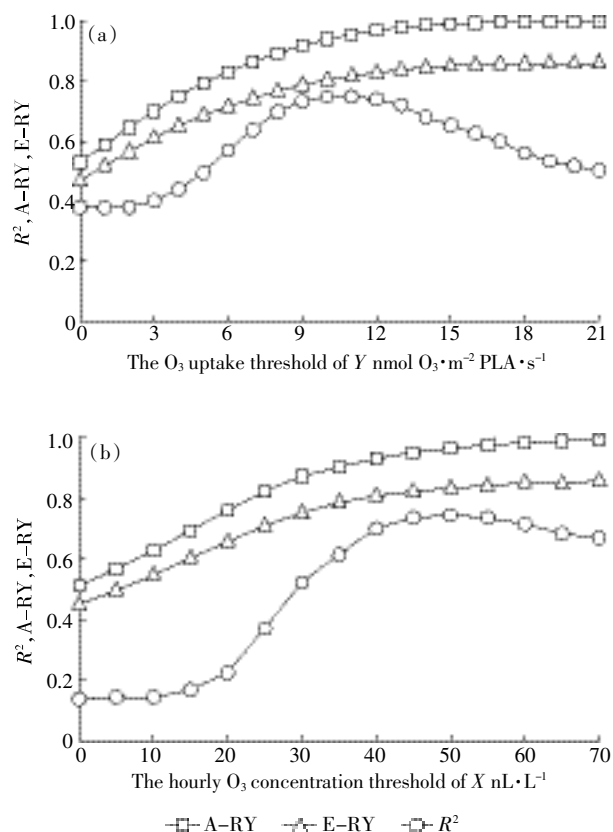


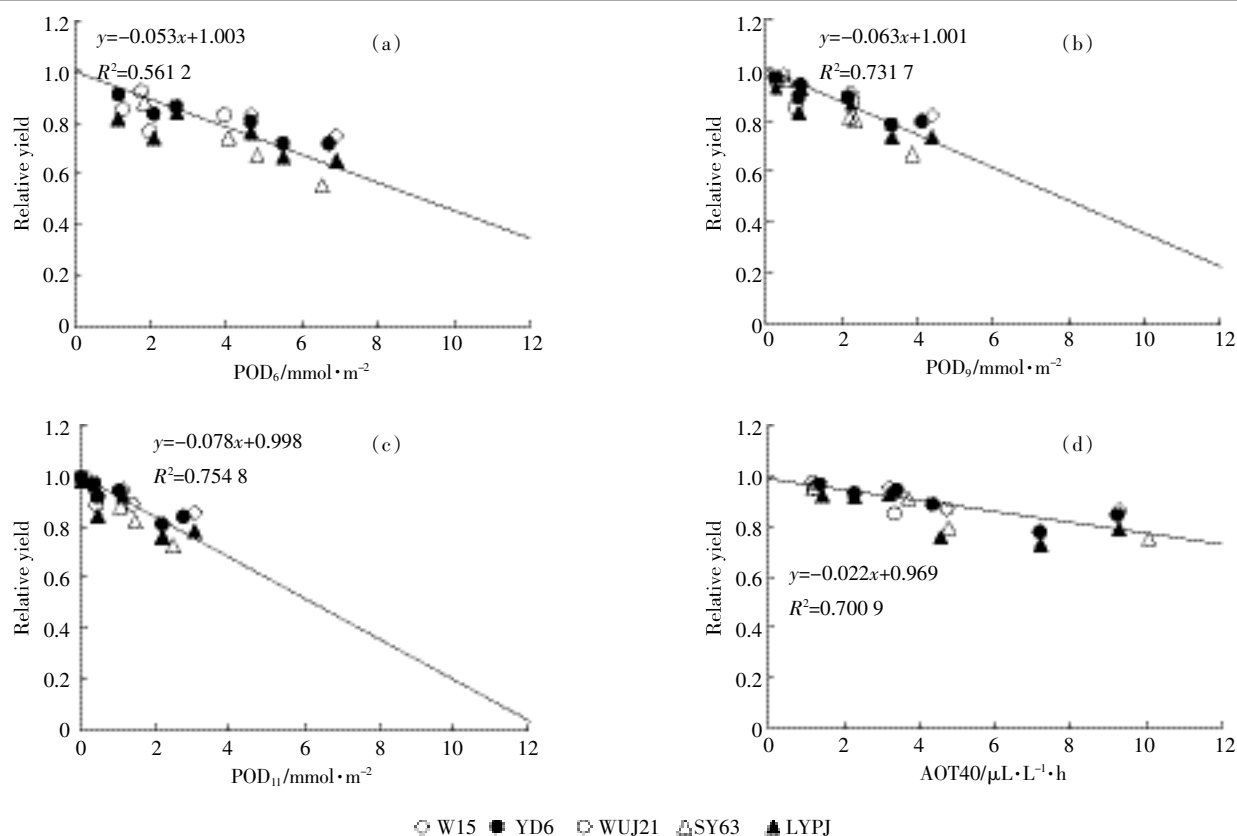
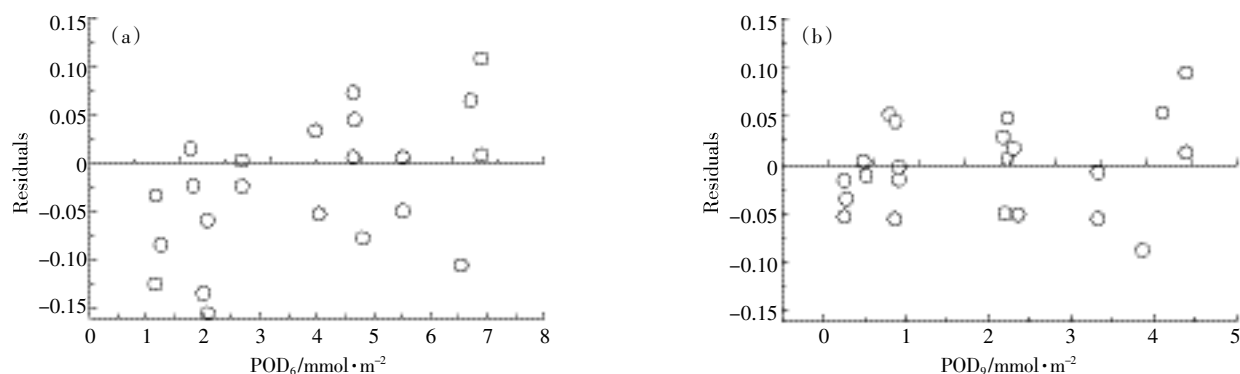
图5 相对产量和气孔 O_3 通量 POD_Y 或累积暴露剂量 AOTX 回归分析 R^2 值与 O_3 通量阈值 Y (a)或 O_3 暴露剂量阈值 X (b) 的关系,以及线性外推得到的对照圈和 FACE 圈

相对产量的预测值

Figure 5 R^2 -values of the regressions between relative yield and POD_Y over a threshold of $Y \text{ nmol } O_3 \cdot \text{m}^{-2} \text{ PLA} \cdot \text{s}^{-1}$ (x-axis) (A) or relative yield (RY; y-axis) and AOTX over an hourly threshold concentration of $X \text{ ppb}$ (x-axis) (B). Also the values of RY at ambient (A-RY) and elevated O_3 (E-RY) were shown by linear extrapolation

标与产量损失有更好的相互关系,对产量损失的评估更为准确。因此,基于累积气孔 O_3 通量的方法适合于定量评估 O_3 污染对水稻作物的影响,尤其是缺乏 O_3 风险评估方法的亚热带地区。

本研究选用了两种杂交稻和三种常规粳稻作为实验材料,通过分析发现杂交稻对 O_3 污染更敏感。通过计算三个生长季节敏感性品种产量,其产量损失达到 18%(图 4)。因此,可以判定一个地区水稻对 O_3 的敏感特性变异,不仅和年际间气候变异有关而且与水稻品种有关,当评估 O_3 污染对作物的影响时,应该充分考虑这些因素。最后,值得注意的是, O_3 风险评估的计算中忽略了一个或多个气孔导度的限制因素,都

图 6 相对产量与 POD_6 (a)、 POD_9 (b)、 POD_{11} (c) 和 AOT40(d) 的关系Figure 6 Relationship between relative yield and POD_6 (a), POD_9 (b), POD_{11} (c) and AOT40(d)图 7 相对产量和 POD_6 (a)、 POD_9 (b) 回归分析残差图Figure 7 Residual plots for the regressions between relative yield and POD_6 (a) and POD_9 (b)

会导致过高估计其潜在风险,产生不确定性。因此,需要更多的 O_3 观、监测站点和不同 O_3 处理水平试验(低于对照处理的 O_3 水平试验),以提高和改善 O_3 风险评估方法。

4 结论

研究表明,基于累积气孔 O_3 通量的方法不仅考

虑了环境 O_3 浓度的变化对气孔导度的影响,而且考虑了环境和生物因子对气孔运动的调节作用,更接近于实际水平,是目前评估 O_3 对植物伤害的更为可靠的方法。与剂量指标 AOTX 相比,通量指标 POD_Y 能更好地反映水稻产量的变化。根据试验观察的产量损失率区间,选用 POD_9 评估对亚热带地区 O_3 污染造成的水稻产量损失风险更为合适。

参考文献:

- [1] Ashmore M R. Assessing the future global impacts of ozone on vegetation [J]. *Plant Cell and Environment*, 2005, 28:949–964.
- [2] Feng Z Z, Kobayashi K. Assessing the impacts of current and future concentrations of surface ozone on crop yield with meta-analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43:1510–1519.
- [3] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38:3431–3442.
- [4] Tang H Y, Takigawa M, Liu G, et al. A projection of ozone-induced wheat production loss in China and India for the years 2000 and 2020 with exposure-based and flux-based approaches[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19:2739–2752.
- [5] Heck W C, Adams R M. Reassessment of crop loss from ozone[J]. *Environment Science and Technology*, 1983, 17:572–581.
- [6] Further J, Skarby L, Ashmore M R. Critical levels for ozone effect on vegetation in Europe[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 97:91–106.
- [7] Pleijel H, Berglen E A, Danielsson H, et al. Differential ozone sensitivity in an old and a modern Swedish wheat cultivar grain yield and quality, leaf chlorophyll and stomata conductance[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 56(1):63–71.
- [8] Mills G, Buse A, Gimeno B, et al. A synthesis of AOT40-based response functions and critical levels of ozone for agricultural and horticultural crops[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41:2630–2643.
- [9] Pleijel H, Wallin G, Karlsson P E, et al. Ozone deposition to an oat crop (*Avena sativa* L.) grown in open-top chambers and in the ambient air[J]. *Atmospheric Environment*, 1994, 28:1971–1979.
- [10] 佟磊, 王效科, 苏德·毕力格, 等. 水稻气孔臭氧通量拟合及通量与产量关系的比较分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(10):1930–1938.
TONG Lei, WANG Xiao-ke, Sudebilige, et al. Stomatal ozone uptake modeling and comparative analysis of flux-response relationships of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(10):1930–1938.
- [11] Nouchil. Responses of whole plants to air pollutants//Omasa K, Saji H, Youssefian S, et al. Eds. Air pollution and plant biotechnology-prospects for phytomonitoring and phytoremediation[M]. Springer-Verlag Tokyo, Tokyo, Japan, 2002:3–39.
- [12] Heath R L, Lefohn A S, Musselman R C. Temporal processes that contribute to nonlinearity in vegetation responses to ozone exposure and dose[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43:2919–2928.
- [13] Pleijel H, Danielsson H, Emberson L D, et al. Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe:Further development of stomata flux and flux-response relationships for European wheat and potato[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41:3022–3040.
- [14] Jarvis P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London B*, 1976, 273:593–610.
- [15] Mills G, Pleijel H, Braun S, et al. New stomata flux-based critical levels for ozone effects on vegetation[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45:5064–5068.
- [16] 吴荣军, 郑有飞, 赵泽, 等. 基于气孔导度和臭氧吸收模型的冬小麦干物质累积损失评估[J]. 生态学报, 2010, 30(11):2799–2808.
WU Rong-jun, ZHENG You-fei, ZHAO Ze, et al. Assessment of loss of accumulated dry matter in winter wheat based on stomata conductance and ozone uptake model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(11):2799–2808.
- [17] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2013.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.
- [18] LRTAP Convention. Manual on methodologies and criteria for modeling and mapping critical loads & levels and air pollution effects, risk and trends//Chapter 3. Mapping Critical Levels for Vegetation (2010 Revision). Available at: <http://icpvegetation.ceh.ac.uk>.
- [19] Feng Z Z, Tang H Y, Uddling J, et al. A stomata ozone flux-response relationship to assess ozone-induced yield of winter wheat in subtropical China[J]. *Environment Pollution*, 2012, 164:16–23.
- [20] Zhu X K, Feng Z Z, Sun T F, et al. Effects of elevated ozone concentration on yield of four Chinese cultivars of winter wheat under fully open-airfield conditions[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17:2697–2706.
- [21] Tang H Y, Pang J, Zhang G X, et al. Mapping ozone risks for rice in China for years 2000 and 2020 with flux-based and exposure-based doses[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 86:74–83.
- [22] 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, 45:6276–6282.
- [23] Pang J, Kobayashi K, Zhu J G, et al. Yield and photosynthetic characteristics of flag leaves in Chinese rice (*Oryza sativa* L.) varieties subjected to free-air release of ozone[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 132:203–211.
- [24] Pleijel H. Statistical aspects of critical levels for ozone//Kärenlampi L, Skärby L. Eds. Critical levels for ozone in Europe:Testing and Finalising the Concepts[R]. UNECE Workshop Report. University of Kuopio, Department of Ecology and Environmental Science, University of Kuopio, 1996:130–150.
- [25] Wang X P, Denise L Mauzerall. Characterizing distributions of surface ozone and its impact on grain production in China, Japan and South Korea:1990 and 2020[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38:4383–4402.
- [26] Yamaguchi M, Hoshino D, Inada H, et al. Evaluation of the effects of ozone on yield of Japanese rice (*Oryza sativa* L.) based on stomatal ozone uptake[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184:472–480.