

臭氧对原位条件下水稻叶片光合、穗部性状 及产量构成的影响

谢居清¹, 郑启伟², 王效科², 张保军^{1*}

(1. 西北农林科技大学农学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

摘要: 利用开顶式气室(OTCs)研究了4个水平的O₃处理: 过滤(charcoal filter air CF)、2×10⁻⁶ mol/L(A处理)、4×10⁻⁶ mol/L(B处理)和8×10⁻⁶ mol/L(C处理)对原位条件下水稻叶片光合速率、气孔导度、蒸腾速率、穗部性状和产量构成的影响。结果表明, 随着臭氧浓度的升高, 水稻叶片的光合速率、气孔导度、蒸腾速率显著降低($P<0.05$); 稻穗的一次枝梗数、二次枝梗数、穗长、穗粒数明显下降($P<0.05$), 而小花败育率则显著上升($P<0.05$); 有效穗数和产量明显降低, 千粒重变化不大; 收获系数在低浓度O₃条件下略高于CF, C处理降低7.6%; 相对于CF, A处理、B处理和C处理的水稻产量分别下降了28.7%、31.8%和57.9%。由试验结果可以看出臭氧对水稻的影响是多方面的, 特别是高浓度的臭氧对穗部的一次枝梗和二次枝梗分化的影响比较显著, 从而影响到水稻的产量构成和产量。

关键词: 原位; 臭氧; 水稻; 光合速率; 穗部性状; 产量构成

中图分类号: S181 文献标识码: A 文章编号: 1004-1389(2006)03-0027-04

Effect of Ozone on Photosynthesis of Rice Leaves, Ear Character and Yield Component in Situe

XIE Ju-qing¹, ZHENG Qi-wei², WANG Xiao-ke² and ZHANG Bao-jun^{1*}

(1. College of Agronomy, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China;

2. Research Center for Eco-Environment Science, Chinese Academy of Science, Beijing 100085, China)

Abstract: Field study was carried out by using open top chamber (OTCs), Rice (*Oryza Sativa*, L) was screen for their photosynthesis rate(Pn)、transpiration rate(Tr)、stomatal conductance(Gs)、ear character and yield component relative sensitivity to ozone by exposing seedling to charcoal- filtered air (CF), A treatment, B treatment, C treatment. Results revealed that: with ozone concentration rising, Pn, Tr, Gs, the trend of numbers of the primary rachis, numbers of the secondary rachis, length of ear, per panicle total grain decreased. No significant change was detected about weight of one thousand grain of rice under four ozone exposures. But the percentage of abortive pollen increased remarkably. Besides, harvest indexes of rice under exposure to A treatment and B treatment were slight higher than that of CF, and that the index of rice under exposure to C treatment was slight lower than that of CF. Compared to the CF treatment, A treatment, B treatment, C treatments caused a 28.7%, 31.8% and 57.8% decrease in grain yield respectively. From all above, we can see that the effects of the ozone on rice are many aspects, especially, the effect of the high concentration ozone on the differentiation of the primary rachis and the secondary rachis is distinct. So it affects the grain yield and the yield component.

Key words: In situe; Ozone; Rice; Photosynthesis rate(Pn); Ear character; Yield component

* 收稿日期: 2005-08-20 修回日期: 2005-12-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(2002CB410803)。

作者简介: 谢居清(1968-), 男, 河南周口人, 在读硕士, 主要从事作物高产高效栽培生理研究。Email: xiejq@126.com。

* 通讯作者

臭氧(O₃)目前是世界最严重的大气污染物之一,有关它对农作物生长影响的研究,美国开始的较早,其次是一些其他经济发达地区,诸如欧洲,中北美洲,远东等^[1],近年来一些发展中国家也开始了对 O₃ 的研究。O₃ 主要导致农作物叶片可见伤害、老化加速、环境胁迫敏感性增加、生长抑制和产量降低等^[2,3]。据估计美国每年因 O₃ 影响而造成的谷物减产带来的经济损失就达 43 亿美元之多^[3],且随着工业化和城市化的提高, O₃ 浓度还有进一步上升加重危害的趋势^[4]。在我国的华南、江南地区,由于经济的快速发展,人为排放的 NO_x 和 VOCs 逐年上升,这些排放物经一系列光化学反应产生 O₃^[5],提高了对流层 O₃ 浓度。研究发现长江三角洲地区,对流层 O₃ 浓度平均为 3×10⁻⁶ mol/L,最高达到了 8×10⁻⁶ mol/L,高峰值主要出现在 5 月和 9 月份^[6],造成了该地区小麦年产量损失约 66.9 万 t,水稻约为 59.9 万 t,经济损失达 15 亿元人民币^[7],已成为该区突出的生态环境问题。

O₃ 对农作物生长的影响,国外学者作了大量的研究报道^[8],国内研究则多侧重盆栽试验和生理指标的测定^[9],且 O₃ 熏气时间短浓度高^[10,11],而原位条件下 O₃ 对农作物农艺性状的影响报道较少。本试验就 O₃ 对原位条件下的水稻叶片光合、气孔导度、蒸腾速率和穗部性状及产量构成的影响作了一些探讨。

1 材料与方法

试验设于浙江省嘉兴市双桥农场内。OTC-1 型开顶式气室用钢筋和聚乙烯塑料膜构建,主要包括过滤系统、通风及布气系统、框架等^[12]。O₃ 由浙江省余姚市圣莱特电器有限公司生产的 O₃ 发生器产生,用美国 MONITOR 公司生产的 ML9810BO₃ 分析仪对 OTC 内 O₃ 浓度进行即时监测。试验共 12 个小区,每小区为 4 m² (2 m×2 m),小区四周用聚乙烯塑料膜进行深 1 m 的防侧渗处理,小区间间隔 3 m。

水稻(*Oryza sativa* L.) 于 2004 年 5 月 29 日播种,品种为“嘉花 1 号”(嘉兴市农科院提供),秧龄 35 d,2004 年 7 月 3 日插秧。移栽前施纯氮 60 kg/hm², P₂O₅ 和 K₂O 各 60 kg/hm²,插秧密度为 120 万/hm²,生长期于分蘖期和孕穗期各追施纯氮 69.3 kg/hm²,其他管理按常规进行,以

保证肥水和其他因素不是限制因素。试验共设 4 个 O₃ 水平,分别为过滤(charcoal-filter air, CF, O₃ 浓度约 2×10⁻⁷~6×10⁻⁷ mol/L)、A 处理(O₃ 浓度约 1.8×10⁻⁶~2.2×10⁻⁶ mol/L)、B 处理(O₃ 浓度约 3.9×10⁻⁶~4.3×10⁻⁶ mol/L)和 C 处理(O₃ 浓度约 8×10⁻⁶~8.5×10⁻⁶ mol/L),每个处理 3 次重复。2004 年 7 月 14 日架设 OTCs,并开始适应性熏气 3 d,2004 年 7 月 18 日正式熏气,2004 年 10 月 10 日停止熏气。其间阴雨天停止熏气,共熏气 60 d。在水稻灌浆期一晴朗日的上午 9:00~10:00,用 CIRAS-1 型便携式光合系统,测定水稻旗叶的气孔导度、蒸腾速率和光合速率,每处理测 10 片叶。水稻于 2004 年 10 月 25 日收获,同时每气室收取 20 株进行考种,穗长用直尺量取,穗粒数、一次枝梗数、二次枝梗数、小花败育率采用人工计数法进行。

用 SPSS 统计分析系统进行数据处理及分析。

2 结果与分析

2.1 O₃ 对水稻叶片光合、蒸腾和气孔导度的影响

从表 1 看出,在 B 处理和 C 处理下水稻叶片气孔导度和蒸腾速率显著降低($P<0.05$),相对于 CF 分别降低 50.3%、17.8%和 53.7%、20.0%,A 处理和 CF 相比没有显著差异但略有升高,分别升高 2.9%和 8.9%。O₃ 对水稻叶片光合速率的影响也有相同的变化趋势,和 CF 相比较,B 处理和 C 处理下水稻叶片光合速率分别降低 14.8%和 17.8%,A 处理水稻叶片的光合速率变化不明显($P>0.05$)。

表 1 O₃对水稻叶片光合、蒸腾和气孔导度的影响
Table 1 Effect of ozone on Pn, Tr and Gs of rice leaves

处理 Treatment	气孔导度 Stomatal conductance (Gs mmol H ₂ O m ⁻² S ⁻¹)	蒸腾速率 Transpiration rate ^a (Tr mmol H ₂ O m ⁻² S ⁻¹)	光合速率 Photosynthesis rate ^a (Pn μmol CO ₂ m ⁻² S ⁻¹)
CF	555.4±104.0 a	4.5±0.8 a	16.9±1.3 a
A 处理	571.1±71.5 a	4.9±0.7 a	17.1±2.2 a
B 处理	276.1±60.1 b	3.7±0.1 b	14.4±2.2 b
C 处理	257.3±64.6 b	3.6±0.6 b	13.9±2.8 b

注: a, b, c, d 分别为 0.05 水平上的差异显著性(下同)。
Note: a, b, c, d represent correlation significance at 0.05 level (following is same) .

2.2 O₃ 对穗部性状的影响

稻穗是水稻的经济器官,它发育的好坏直接

影响到水稻的产量和品质。由表 2 可以看出随着 O₃ 浓度的升高,穗长、一次枝梗数、二次枝梗数及穗粒数都有下降趋势。①穗长 相对于 CF, A、B 和 C 处理下,水稻穗长分别降低 12.6%、13.2% 和 30.7%;②一次枝梗数和二次枝梗数 CF 和 A 二个处理间的差异都不显著,在 O₃ 浓度达到 4×10⁻⁶ mol/L 时,一次枝梗数,二次枝梗数与对照 (CF)相比,分别降低 12.1%和 30.7%,且二次枝梗数的降低幅度更加明显;在 B 和 C 处理间,一次枝梗数差异不明显,而二次枝梗数的减少达到

33.0%,这与前面反映的趋势是一致的,即在 O₃ 浓度梯度每上升 4×10⁻⁶ mol/L 时,二次枝梗数下降 30%以上,而一次枝梗数下降不明显,说明一次枝梗的分化对低浓度 O₃ 反应不敏感。③小花败育率与穗粒数 二者之间是一种负相关关系,随着 O₃ 浓度的升高,以 CF 为对照, A、B 和 C 处理的小花败育率分别上升了 49.9%、82.6%、109.3%;而穗粒数呈下降趋势,以 CF 为对照, A、B、C 处理分别下降 19.8%、20.4%和 48.3%。

表 2 O₃ 对水稻穗部性状的影响

Table 2 Effects of ozone on ear character of rice

处理 Treatment	穗长/ cm Length of ear	一次枝梗数/ 个 Numbers of the primary rachis	二次枝梗数/ 个 Numbers of the secondary rachis	小花败育率/ %/ Percentage of abortive pollen	穗粒数/ 粒 Grains of per panicle
CF	15.5±0.6a	10.7±0.8 a	20.5±2.9 a	10.2±4.0 c	108.7±6.3 a
A 处理	13.6±0.7 bc	9.9±1.1 a	15.2±4.3 ab	15.0±4.0 b	85.0±10.2 b
B 处理	13.5±1.4 c	9.4±1.1 b	14.2±4.0 b	18.6±5.4 ab	84.4±7.7 b
C 处理	10.8±0.7 d	8.9±1.0 b	9.4±2.2 c	21.3±2.9 a	55.7±6.5 c

2.3 O₃ 对产量构成的影响

由表 3 可以看出, O₃ 胁迫对水稻的产量构成及产量产生了很大影响。以 CF 为对照, A、B、C 处理的每株有效穗数分别下降了 13.5%、19.5%、39.9%,单株产量分别下降 20.4%、34.8%、65.6%,每公顷穗数和产量分别降低 10.7%、16.4%、37.6% 和 31.8%、61.5%、

71.2%,结合表 2 的穗粒数变化,可见 O₃ 已经对水稻的产量构成产生了明显影响。但千粒重表现相对稳定,只有 C 处理比对照降低了 7.8%,其他处理对粒重影响不大。另外,表 3 还表明水稻在低浓度 O₃ 处理下收获指数略有升高, A 和 B 处理分别高于 CF 5.5%和 7.3%,而 C 处理的则低于对照 7.6%。

表 3 O₃ 对水稻产量及产量构成的影响

Table 3 Effects of ozone on yield and yield component of rice

处理 Treatment	穗数/ 株 Number of ear/plant	单株产量/ g Grain weight of plant	穗数 (/万穗/ hm ²) Number of ear	千粒重/ g Weight of one thousand grain	产量/(kg/ hm ²) Grain yield	收获指数/ % Harvest index
CF	2.7	8.0	289.1	27.7	8944.2	50.7
A 处理	2.3	6.3	258.2	27.6	6104.4	53.5
B 处理	2.1	5.2	241.8	26.5	5538.5	54.4
C 处理	1.6	2.7	180.3	25.6	2572.8	46.9

3 讨论

绿色植物的光合作用是自然界中有机物质循环和能量转换的基础,同时光合能力的变化也是植物体生理状况的具体反映。本试验发现在 B 和 C 处理下,水稻叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率显著降低 (P<0.05),三者之间存在正相关关系,这和前人的研究结果一致^[13,14]。以往研究有人认为是光合降低导致气孔导度的降低^[15],有人则持相反的观点^[16],还有人认为 O₃ 气孔关闭是由于 O₃ 导致气孔保卫细胞膜的透性增加,抑制了离子泵活动所致^[17]。笔者认同后一种解释,因为膜透性的增加和离子泵活动的抑制导致

保卫细胞内水势升高,细胞内水流出增加带动细胞壁运动,从而导致气孔孔径变小。O₃ 能导致植物叶片中核酮糖二磷酸羧化酶/加氧酶 (Rubisco) 含量和活性降低是光合速率降低的主要原因^[18,19]。

O₃ 除对水稻生理上有影响外,在生物学和产量上也有所表现。就穗部特征来看,高浓度 O₃ 处理下的水稻植株,其穗长变短,枝梗数和穗粒数减少,特别是随着 O₃ 浓度梯度的增大,这种变化趋势尤为显著。研究发现 O₃ 胁迫下,水稻在幼穗形成期,功能叶组织的膜伤害及 Rubisco 活性降低,导致叶片的同化功能下降,光合产物的运转受阻^[20,21],影响了穗轴及枝梗的形成,使得穗轴

变短, 枝梗减少。在花粉母细胞的减数分裂期光合产物供应不足, 则会导致花粉粒的败育, 结实小花数减少, 穗粒数下降等现象^[22]。研究还发现 O_3 能诱导花粉萌发率降低和花粉管生长受抑制, 使合子的产生受阻^[23], 这可能是花粉粒的败育和穗粒数下降的重要原因。有效穗数和穗粒数的降低, 说明在水稻生长的中前期特别是在有效分蘖期和孕穗期, O_3 胁迫造成的叶绿素分解^[9] 和光合效率的下降, 对光合产物的积累造成极为不利的影响, 而影响了成穗数和穗粒数。到了生长后期, 由于自身的衰老的原因, 水稻对 O_3 胁迫反应, 没有幼嫩组织那么敏感, 再加上自身的适应性提高, 对粒重的影响相对降低。

参考文献:

- [1] Yunus M, Singh N, Iqbal M. Global status of air pollution: an overview [A]. plant response to air pollution[C]. John Wiley and sons London; Yunus M; Iqbal M. (Eds), 1996. 1~34.
- [2] Adams R M, Glycer J D, McCarl B A. The NCLAN economic assessment: approach and findings and implications [R]. Assessment of crop loss from Air pollutions Elsevier, London; In: Heck W. W; Tingey, D. T., (Eds), 1998. 73~504.
- [3] Sandermann H. Ozone/biotic disease interactions: molecular biomarkers as a new experimental tool[J]. Environ. Pollut., 2000, 108: 327~332.
- [4] Houghton J T, Meira Filho L G, Callander B A. The Science of Climate Change IPCC [R]. Cambridge University Press Cambridge; A. Kattenberg, K. Maskell (Eds.), 1996. 572.
- [5] Ollerea J H, Shaw T, Lyons J D, *et al.* Impacts of ozone on the growth and yield of field-grown winter oilseed rape [J]. Environment pollution, 1999, 104: 53~59.
- [6] Lawson T, Craigan J, Black C R, *et al.* Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of potatoes (*Solanum tuberosum*) grown in open-top chambers [J]. Environment pollution, 2001, 2001. 479~491.
- [7] Feng Zong-wei, Jin Ming-hong. Effects of ground-level ozone pollution on the yields of rice and winter wheat in Yangtze River Delta [J]. Journal of Environmental science, 2003, 15(3): 362~367.
- [8] 金明红. 大气臭氧浓度变化对农作物影响的试验研究 [D]. 北京: 中国科学院, 2003. 8~12.
- [9] 金明红, 冯宗伟, 张福珠. 臭氧对水稻叶片膜脂过氧化和抗氧化系统的影响 [J]. 环境科学, 2000, 21(3): 1~5.
- [10] 安黎哲, 王勋陵. 臭氧对春小麦生长的影响几稀土的防护效应 [J]. 生态学报, 1994, 14: 95~98.
- [11] 黄韵珠, 王勋陵. 臭氧对辣椒不同发育时期光合作用的影响 [J]. 农业环境保护, 1991, 10(2): 60~63.
- [12] 王春乙, 郭建平, 郑有飞. CO_2 、臭氧、紫外线与作物生产 [M]. 北京: 气象科学出版社, 1997. 1~49.
- [13] Johanna Gelang, Gun Sellen, Suhaila Younis. Effects of ozone on biomass, non-structural carbohydrates and nitrogen in spring wheat with artificially manipulated source/sink ratio [J]. Environment and Experimental Botany, 2001, 46: 155~169.
- [14] Samia A, Madkoar J A, Lauience. Egyptain plant species as new ozone indicators [J]. Environmental pollution, 2002, 120: 339~353.
- [15] Farage W M, Long S P, Lechner E G, *et al.* The sequence of change within the photosynthetic apparatus of wheat following short-term exposure to ozone [J]. Plant physiology, 1991, 95: 529~535.
- [16] Reiling K, Davison A W. Effects of ozone on stomatal conductance and photosynthesis in populations of *Plantago major* L [J]. New phytol., 1995, 129: 587~594.
- [17] Heath R L. Alterations of plant metabolism by ozone exposure [A]. Alscher RG, Weckburn A R, *et al.* plant responses to gaseous environment [C]. London, UK: Chapman & Hall, 1988. 121~145.
- [18] Miller J D, Arteca R N, Pell E J. Senescence-associated gene expression during ozone-induced leaf senescence in *Arabidopsis* [J]. Plant Physiol., 1999, 120: 1015~1023.
- [19] Pell E J, Eckardt N, Glick R E. Biochemical and molecular basis for impairment of photosynthetic potential [M]. Photosynth. Res., 1994, 9: 53~462.
- [20] Jurg Fuhrer. Fitzgerald Booker Ecological issues related to ozone [J]. agricultural issues environment international, 2003, 9: 141~154.
- [21] 金明红, 黄益宗. 臭氧污染胁迫对农作物生长与产量的影响 [J]. 生态环境, 2003, 12(4): 82~486.
- [22] 苏广达主编. 作物学 [M]. 广东: 高等教育出版社, 2000. 167~179.
- [23] 王勋陵, 门晓棠. 臭氧对几种园艺植物花粉萌发和花粉管生长的影响 [J]. 西北植物学报, 1991, 1(1): 50~56.