

# $O_3$ 对‘五月蔓’白菜生长和产量的影响

白月明 王春乙 刘 玲 郭建平 温 民

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘 要:** 利用农田开顶式气室进行不同  $O_3$  浓度处理对白菜影响的试验研究。结果表明:  $O_3$  浓度增加导致白菜黄叶率上升, 总生物量增长速率下降, 并可改变光合产物分配模式; 延长高浓度  $O_3$  熏气时间, 对白菜叶片数、叶面积、产量和外轮叶净光合速率影响较大, 对心叶和中部叶片净光合速率影响较小; 对处于不同生长期的白菜进行相同天数高浓度  $O_3$  处理, 经济产量和总生物量的响应, 前期处理大于后期, 叶面积则相反, 对叶片数无影响。

**关键词:** 白菜;  $O_3$ ; 生长; 产量

**中图分类号:** S 634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2003) 02-0167-04

有研究表明, 蔬菜对  $O_3$  的反应比油料和粮食作物敏感<sup>[1]</sup>, 首先表现为叶片受伤害。人口增加和人为活动加剧一次性污染气体氮氧化物和氧化有机挥发物向大气中排放, 导致近地层  $O_3$  浓度升高, 污染频度增大, 持续时间延长<sup>[2]</sup>, 对生态系统和农业生产产生重要影响。目前我国局部地区短时  $O_3$  浓度可达到  $4.46 \times 10^{-9} \sim 8.93 \times 10^{-9}$  mol/L, 甚至更高。国内外学者在  $O_3$  对植物和作物生长发育、光合作用、产量、生物量及同化产物分配等方面进行了广泛研究<sup>[3-6]</sup>, Adaros 研究了  $O_3$ 、 $SO_2$  和  $NO_2$  的复合效应对籽用油菜的影响<sup>[7]</sup>。 $O_3$  对白菜 (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*) 的影响方面未见报导。作者利用农田开顶式气室进行  $O_3$  对白菜生长的影响试验, 以便为科研和生产提供试验依据。

## 1 材料与方 法

试验在中国气象科学研究院农业气象试验基地 (河北定兴) 进行, 设备为 4 个 OTC-1 型农田开顶式气室<sup>[8,9]</sup>。3 个  $O_3$  浓度处理为 A,  $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L; B,  $4.46 \times 10^{-9}$  mol/L; C,  $\leq 4.46 \times 10^{-10}$  mol/L (滤掉环境大气  $O_3$  后的浓度); 对照为环境大气  $O_3$  浓度  $1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9}$  mol/L。 $O_3$  由 QHG-1 型高频  $O_3$  发生器 (清华大学研制) 电离  $O_2$  生成。将取样管一头置于各气室中央白菜上方 10 cm 处, 另一头与 APOH-350E 型环境  $O_3$  分析仪连接, 监控气室内  $O_3$  浓度, 波动范围在  $\pm 5\%$  之间。

白菜‘五月蔓’由中国农科院蔬菜花卉研究所提供。2000 年 8 月 28 日畦播, 9 月 20 日 (3 叶期) 移栽到盆口直径 36 cm、深 26 cm 的瓦盆中, 每盆 10 株, 9 月 29 日均匀定植 5 株。9 月 30 日 (4 叶) 每个气室移入 22 盆 (110 株); 熏气 5、10、15 d 时分别从 A 气室移出 2 盆, 熏气 15 d 时移入 4 盆。试验期间各处理光、温、水、肥条件一致, 无病虫害、杂草等非试验因素影响, 可视为  $O_3$  浓度单因素控制试验。10 月 1 日至 11 月 1 日, 每天通气 7 h (北京时间 9:00 ~ 16:00)。

试验分 7 次取样, 通气前 (10 月 1 日) 取 4 盆作初始值; 通气 5、10、15、20、25 d 时每个气室分别取 2 盆; 通气 30 d 时分别取 4 盆, 同时对分期移出和移入 A 气室的样本一次性取样, 2 ~ 4 个重复。测定项目为受害叶数、黄叶数、叶面积、各器官生物量鲜样质量和干样质量等。1 ~ 2 d 观测 1 次植株伤害情况。自然变黄和  $O_3$  伤害黄化的叶片均按黄叶统计 (黄叶数 = 单叶黄化面积超过一半的叶数 +  $1/2 \times$  单叶黄化面积等于一半的叶数, 黄叶率 = 黄叶干质量/总叶干质量  $\times 100\%$ )。10 月 26 日利

收稿日期: 2002-07-22; 修回日期: 2002-12-02

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (49899270)

用美国拉哥公司生产的 LI-6 200 型便携式光合作用系统对移出室外植株进行光合速率等参数测定, 叶面积由 LI-3000A 型面积仪测定, 用远红外线干燥箱烘干样本。电子分析天平称质量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同 $O_3$ 浓度对黄叶率的影响

图 1 表明, 黄叶率随  $O_3$  浓度升高明显增大, 高浓度处理黄叶率增长速率前期大于后期。A 处理 10 d 黄叶率达最大值 (70%), 以后, 由于叶片自然生长和伤害共同影响使黄叶率随熏气时间延长呈波动变化; B 与 A 变化趋势相似, 但达最大值 (43%) 略晚于 A。试验还可以看出, 环境大气  $O_3$  浓度长期慢性伤害也可加速叶片衰老进程, 当  $O_3$  浓度由 C 升高到对照时, 黄叶率可增加 0.3 ~ 6.7 个百分点, 直接影响白菜经济产量和品质。

### 2.2 不同 $O_3$ 浓度对总生物量增长速率的影响

图 2 显示, C 与对照总生物量增长速率变化趋势相近, 一般随生育期增加而增大; A 和 B 随熏气天数增加呈波动状态, 最大变幅分别为 0.054 g/d 和 0.107 g/d。与对照比, 增加或降低  $O_3$  浓度, 总生物量增长速率差异极显著 ( $P < 0.01$ ), A、B 比对照最大减少 0.382 g/d 和 0.268 g/d, C 减少 0.088 g/d。

### 2.3 不同 $O_3$ 浓度对同化产物分配的影响

表 1 显示,  $O_3$  由对照浓度降到 C 和升到 A, 根冠比 (RTR) 分别下降 5.7% ~ 41.4% 和 1.1% ~ 49%, 表明  $O_3$  浓度降低到一定程度 (C) 时, 与高浓度  $O_3$  (A) 胁迫一样可以阻抑同化产物向根的输送。 $O_3$  由对照浓度升到 B, RTR 有增有减, 不同时段影响不同。还可以看出, C 和对照的 RTR 都有一个最大值, 分别出现在熏气 10 d (17%) 和 25 d (22%); 在熏气 5 ~ 10 d 和 25 d 时, A 和 B 的 RTR 都有两个明显高值区, 表明同化产物有两个明显向根输送的时段。

表 1  $O_3$  浓度变化对白菜同化产物分配的影响

Table 1 The effects of changing  $O_3$  concentration on assimilation distributions (the average of 10 plants)

处理天数 Treatment days(d)	$O_3$ $8.93 \times 10^{-9}$ mol/L (A)		$O_3$ $4.46 \times 10^{-9}$ mol/L (B)		$O_3 \leq 4.46 \times 10^{-10}$ mol/L (C)		$O_3$ $1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9}$ mol/L (对照 Control)	
	RTR	LWR	RTR	LWR	RTR	LWR	RTR	LWR
0	0.101	0.598	0.101	0.598	0.101	0.598	0.101	0.598
5	0.160 bB	0.532 bB	0.217 aA	0.482 cC	0.094 cC	0.553 aA	0.173 bB	0.490 cC
10	0.164 bA	0.543 aA	0.136 cB	0.533 bA	0.172 aA	0.466 dC	0.174 aA	0.513 cB
15	0.155 bB	0.529 aA	0.132 cC	0.510 bB	0.121 dD	0.451 cC	0.183 aA	0.439 dD
20	0.116 cC	0.559 aA	0.151 bB	0.442 bB	0.118 cC	0.403 dC	0.198 aA	0.417 cC
25	0.160 cB	0.544 aA	0.232 aA	0.450 bB	0.114 dC	0.434 cB	0.224 bA	0.439 cB
30	0.143 cB	0.551 aA	0.177 aA	0.530 bB	0.120 dC	0.447 cC	0.152 bB	0.406 dD

注: (1) RTR 为根冠比, LWR 为叶质量比。(2) 数字后不同大、小写字母分别表示差异达 1%、5% 显著水平。

Note: (1) RTR is root top ratio, LWR is the ratio of leaf to total mass. (2) The different capital and small letter after figures indicated significance at  $P = 0.01$  or  $P = 0.05$  level, respectively.

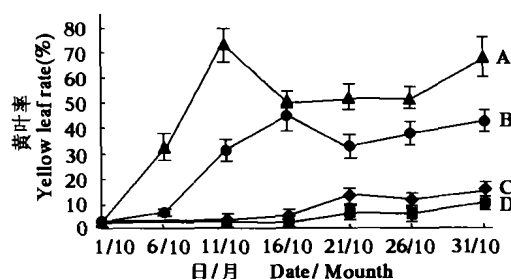


图 1 不同  $O_3$  浓度下黄叶率动态变化

Fig. 1 The changes of yellow leaf rate under different  $O_3$  concentrations

A.  $O_3$   $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L, B.  $O_3$   $4.46 \times 10^{-9}$  mol/L,  
C.  $O_3 \leq 4.46 \times 10^{-10}$  mol/L,  
D.  $O_3$   $1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9}$  mol/L (对照 Control)

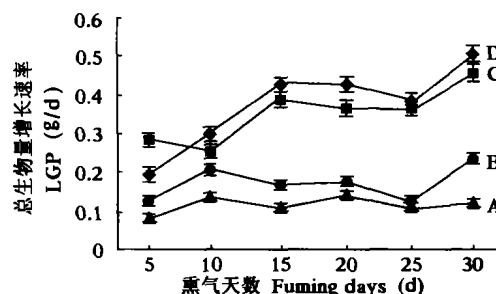


图 2 不同  $O_3$  浓度下白菜总生物量增长速率变化曲线

Fig. 2 The curves of increasing rate of total mass under different  $O_3$  concentrations

A.  $O_3$   $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L, B.  $O_3$   $4.46 \times 10^{-9}$  mol/L,  
C.  $O_3 \leq 4.46 \times 10^{-10}$  mol/L,  
D.  $O_3$   $1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9}$  mol/L (对照 Control)

C 和对照的叶质量比 (LWR) 随生育期的延长而减小, A 和 B 随熏气时间呈波动变化。3 个浓度处理除 B 熏气 5 d 和 C 熏气 25 d 与对照无明显差异外, 其余均可达到显著水平。A、B 比对照分别提高 5.8% ~ 35.7% 和 -1.6% ~ 30.5%, 表明  $O_3$  浓度增加使同化产物向叶片分配比例增大, 有利于叶片光合作用, 是植株对  $O_3$  胁迫逆境的一种适应反应。

## 2.4 白菜叶片参数和产量对高 $O_3$ 浓度处理的响应

白菜在高浓度  $O_3$  (A) 下熏气时间长短、受害程度以及受害后恢复天数是影响其生长和产量的重要因素。表 2 表明, 同一天暴露于 A 处理下的白菜, 功能叶片数、叶面积、经济产量 (可食部分鲜质量) 和生物产量随熏气天数变化差异显著, 达极显著水平 (熏气 15 和 30 d 的生物产量无明显差异除外)。熏气 30、15、10、5 d 功能叶片数依次减少 1 片, 有效叶面积依次下降 305、76、259  $cm^2$ 。熏气 30、15、10 d 的经济产量比 5 d 分别下降 89%、71% 和 18%, 生物产量也呈类似的负效应。在白菜不同生长时段进行高浓度  $O_3$  (A) 相同熏气天数 (前 15 d 和后 15 d) 处理, 则对光合有效面积的影响后期大于前期, 减少 43%; 对产量的影响则是前期大于后期, 经济产量和生物产量均可减小近 60%。

表 2  $O_3$   $8.93 \times 10^{-9} mol/L$  处理时间对白菜叶片参数和产量的影响

Table 2 The effects of different exposed period of time on leaf parameters, net photosynthesis and yield of Chinese cabbage under A treatment (the average of 10 plants)

熏气天数 Fuming days(d)	恢复天数 Renew days(d)	功能叶片数 Function leaves (leaves·plant <sup>-1</sup> )	叶面积 Leaf area (cm <sup>2</sup> ·plant <sup>-1</sup> )	经济产量 Economy yields (g·plant <sup>-1</sup> )	生物产量 Biomasses (g·plant <sup>-1</sup> )
5	25	8 aA	733.6 aA	66.652 aA	11.150 aA
10	20	7 bB	474.5 bB	54.348 bB	8.481 bB
15	15	6 cC	399.0 cC	19.411 dC	3.746 cC
15(后 Latter)	15	6 cC	281.8 dD	47.357 cB	8.980 bB
30	0	5 dD	94.5 eE	7.511 eD	3.697 cC

## 2.5 光合速率 (Pn) 对高浓度 $O_3$ 的响应

10 月 26 日上午 (晴天, 光量子通量密度平均为  $945 mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ), 对高  $O_3$  (A) 处理 3 次移出的白菜全株所有功能叶片逐叶 (由内到外) 进行净光合速率测定表明 (图 3), 熏气 5、10、15 d 分期移出白菜的心叶及中部叶净光合速率差异较小, 外部叶片差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 熏气 10、15 d 比熏气 5 d 净光合速率最大可降低 83% 和 93%, 平均值降低 24% 和 27%。

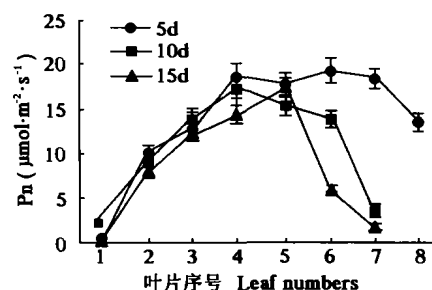


图 3 光合速率对高浓度  $O_3$  的响应曲线

Fig. 3 The response curves of photosynthesis on high  $O_3$  concentration

## 3 讨论

已往研究表明,  $O_3$  主要通过气孔进入叶片, 可直接破坏敏感植物叶片组织、叶绿体, 使细胞质外渗, 叶绿素含量下降, 导致黄叶率增大<sup>[10]</sup>。我们的结果同样表明,  $O_3$  浓度越高, 黄叶率越大。Chevone 等<sup>[11]</sup>报道,  $O_3$  浓度增加使气孔阻力增大,  $CO_2$  吸收量减少, 光合速率降低, 总生物量增长速率减慢。本试验结果是, 在对照基础上 (图 2) 增加  $O_3$  浓度, 可减小总生物量增长速率; 降低  $O_3$  浓度 (到 C) 也可抑制白菜生长, 总生物量减少, 可能与作物品种培育条件及对目前  $O_3$  的适应有关。Cooley 等研究认为<sup>[12]</sup>,  $O_3$  可改变苜蓿干物质分配, 对根的影响大于叶片, 我们的结果是,  $O_3$  浓度降低到一定程度 (C) 与高浓度  $O_3$  (A) 胁迫一样, 可以减少同化产物向根的输送;  $O_3$  浓度增加使同化产物向叶片分配的比例增大, 是受害植株保持一定的光合潜力、在逆境中维持生长的原因之一。

研究阶段性熏气对冬小麦产量的影响表明, 在  $O_3$   $8.93 \times 10^{-9} mol/L$  (A) 处理下, 熏气 39 d 比

19 d 产量下降 26.7%<sup>[13]</sup>, 本文 A 处理下白菜经济产量, 熏气 30 d 比 10 d 可减少 86.2%, 表明白菜对 O<sub>3</sub> 的响应比冬小麦敏感。植物品种特性 (如叶片数) 一般不易改变, 试验发现, 熏气时间较短的植株在暴露期内没有达到品种最大叶片数, 移出后受害叶不能恢复, 新萌发的叶片可迅速生长, 对前期伤害起到补偿作用 (如 5 d); 熏气时间较长的植株受害较重, 在暴露期内已达到或接近品种最多叶片数, 移出后几乎不再萌生新叶, 叶面积、净光合速率、经济产量、总生物量较小 (10 d、15 d); 不同生长时段的白菜对 O<sub>3</sub> 响应不同, 高浓度 O<sub>3</sub> 对白菜前期经济产量、总生物量影响较大, 对后期影响较小。

#### 参考文献:

- 1 Walter W Heck. Assessment of crop loss from ozone. Journal of the air pollution. Control Association, 1986, 34: 6~7
- 2 Fishman J. The global consequence of increasing tropospheric ozone concentration. Chemosphere, 1991, 22: 685~695
- 3 Furukawa A, Kadota M. Effects of ozone on photosynthesis and respiration in poplar leaves. Environmental Control in Biology, 1975, 13: 1~7
- 4 沈英娃, 刘厚田. 臭氧对植物的影响. 生态学进展, 1988, 5 (4): 242~251
- 5 黄韵珠, 王勋陵. 臭氧对辣椒不同发育时期光合作用的影响. 农业环境保护, 1991, 10 (2): 60~63
- 6 白月明, 郭建平, 刘 玲, 等. 臭氧对水稻叶片伤害、光合作用及产量的影响. 气象, 2001, 27 (6): 17~21
- 7 Adaros G, Weigel H J, Jager H J. Impact of ozone on growth and yield of two spring wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.). Z. Pflanzenkr. Pflanzenschutz, 1990, 98 (2): 113~124
- 8 王春乙, 高素华, 潘玉茹, 等. OTC-1 型开顶式气室的结构和数据采集系统. 气象, 1993, 19 (4): 15~19
- 9 王春乙, 郭建平, 白月明, 等. OTC-1 型开顶式气室的臭氧发生、控制与测量系统及物理性能评价. 应用气象学报, 2000, 8 (3): 383~384
- 10 Mikkelsen T N, Dodell B, Lutz C. Change in pigment concentration and composition in Norway spruce induced by long-term exposure to low levels of ozone. Environ. Pollut., 1995, 87: 197~205
- 11 Chevone B I, Yang Y S. CO<sub>2</sub> exchange rates and stomatal diffusive resistance in soybean exposed to O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub>. Canadian Journal of Plant Sciences, 1985, 65: 267~274
- 12 Cooley D R, Manning W J. Ozone effects on growth and assimilate partitioning in alfalfa, *Medicago sativa* L. Environ. Pollut., 1988, 49: 19~36
- 13 王春乙, 郭建平, 白月明, 等. O<sub>3</sub> 浓度增加对冬小麦影响的试验研究. 气象学报, 2002, 60 (2): 238~242

## Effects of Ozone on Growth and Yield of Chinese Cabbage

Bai Yueming, Wang Chunyi, Liu Ling, Guo Jianping, and Wen Min

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** This study was conducted to determine the effects of different O<sub>3</sub> concentrations (A,  $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L; B,  $4.46 \times 10^{-9}$  mol/L; C,  $\leq 4.46 \times 10^{-10}$  mol/L; Control, ambient O<sub>3</sub> concentrations were about  $1.12 \times 10^{-9}$  –  $1.79 \times 10^{-9}$  mol/L) and different exposure last times (fumigating 5 d, 10 d, former 15 d, later 15 d and 30 d) at  $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L on Chinese cabbage by using 4 farmland open top chambers OTC-1. The results showed that yellow leaf rate increased, daily increase of total biomass decreased and the ways of assimilation products distribute to organs changed with O<sub>3</sub> concentrations increase. Leaf number, leaf area, net photosynthesis of the outer leaves and yield of Chinese cabbage were reduced greatly as the exposure last time at  $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L was prolonged during experiment. And there was little effect to the other leaves. At the same O<sub>3</sub> concentration ( $8.93 \times 10^{-9}$  mol/L) and exposure last time during different growth time of Chinese cabbage, the responses of economy yield and total biomass to O<sub>3</sub> concentration prophase treatment were more heavier than that of anaphase. Leaf area was contrary. But there was no effect to leaf numbers.

**Key words:** Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*); Ozone; Growth; Yield