

# 臭氧浓度和熏气时间对菠菜生长和产量的影响

白月明, 王春乙, 温 民, 郭建平

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 以菠菜为试验材料, 在开顶式气室中研究了不同  $O_3$  浓度和熏气时间对植株伤害、生长发育和产量形成的影响。结果表明, 菠菜在  $2.23 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$   $O_3$  浓度以下无明显伤害症状, 在  $8.93 \times 10^{-9}$  和  $4.46 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$   $O_3$  处理下出现失水、萎蔫和干枯等急性伤害症状, 伤害程度与  $O_3$  浓度和熏气时间有关;  $O_3$  浓度增加导致菠菜株型缩小、衰老提前、气孔阻力增大、净光合速率降低、经济产量和总生物量下降, 并表现出明显的时间差异性。与炭过滤处理( $\leq 4.46 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ )对比发现, 目前大气本底  $O_3$  浓度( $1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$ )对菠菜生长已经产生抑制作用。

**关键词:** 菠菜 (*Spinacia oleracea* L.); 臭氧浓度; 熏气时间; 生长; 产量

## Influences of Different Ozone Concentrations and Fumigation Days on Spinach Growth and Yield

BAI Yue-ming, WANG Chun-yi, WEN Min, GUO Jian-ping

(China Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** To examine the effects of ozone on spinach injury, development and yield, the seedlings of *Spinacia oleracea* L. cv. Zhongbo1 were exposed to 5 concentrations of  $O_3$  in the OTC-1 open top chambers for 5, 10, 15, 20, 25 30 days, respectively. The results showed that spinach fumigated with  $2.23 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$   $O_3$  had no visible symptoms.  $8.93 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$  and  $4.46 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$   $O_3$  concentrations induced acute injury symptoms such as water loss, wilting and withered. Injury degrees are related to  $O_3$  concentrations and fumigation days. Increase of  $O_3$  concentrations resulted in the dwarfing plant, early senescence. Various degrees of decrease in leaf area, net photosynthesis rate, biomass and economic yield were observed. And there were also time differences. Compared with  $\leq 4.46 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ , the present background  $O_3$  concentration of  $1.12 \times 10^{-9}$ - $1.79 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$  have produced suppresses to spinach.

**Key words:** Spinach; Ozone( $O_3$ ) concentration; Fumigation days; Growth; Yield

国外有关  $O_3$  浓度增加对作物影响的研究已有较多报道<sup>[1-3]</sup>, 我国在这方面的研究相对较少<sup>[4]</sup>。蔬菜对  $O_3$  的响应比粮食和油料作物敏感<sup>[5]</sup>, 尤其是叶菜类蔬菜, 可直接影响经济产量和品质。 $O_3$  浓度和熏气时间变化对菠菜影响的研究尚未见报道。作者利用农田开顶式气室以菠菜‘中菠1号’为材料, 研究  $O_3$  对菠菜植株伤害、叶片气孔阻力、净光合速率、生长和产量的影响, 为蔬菜抗逆品种培育、调整种植布局等研究工作提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

菠菜 (*Spinacia oleracea* L.) 品种‘中菠1号’, 由中国农业科学院蔬菜花卉研究所提供。2000年8月28日播入口直径36 cm、深26 cm的瓦盆中, 土壤(壤土, 中等肥力)为气室附近农田表土, 过筛后搅匀装盆。9月29日每盆均匀定植10株, 9月30日每气室移入18盆。各处理植株长势均匀, 无光、温、水、肥、病虫害、

收稿日期: 2003-05-26

基金项目: 国家自然科学基金重大资助项目(49899270)

作者简介: 白月明(1959-), 女, 蒙古族, 辽宁喀左人, 高级工程师, 主要从事农业气象和生态环境方面的研究。Tel: 010-68409755; E-mail: baiyue ming2400@sina.com

杂草等非试验因素影响。

## 1.2 试验环境及处理

试验在中国气象科学研究院农业气象试验基地(河北省定兴县)进行,设备为结构和性能相同的5个OTC-1型农田开顶式气室。气室主体为边长1.15 m,高2.4 m的正8棱柱体,玻璃室壁。浓度处理分别为A( $8.93 \times 10^{-9} \pm 4.465 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ )、B( $4.46 \times 10^{-9} \pm 2.230 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ )、C( $2.23 \times 10^{-9} \pm 1.115 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ )、D( $\leq 4.46 \times 10^{-10} \text{ mol L}^{-1}$ ,滤掉本底大气部分 $\text{O}_3$ ),对照(CK)为本底 $\text{O}_3$ 浓度( $1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9} \text{ mol L}^{-1}$ )。熏气时间分别为5、10、15、20、25和30 d。 $\text{O}_3$ 由高纯度 $\text{O}_2$ 经QHG-1型高频 $\text{O}_3$ 发生器(清华大学研制)生成,分3路由玻璃转子流量计(北京玻璃仪器厂)定量和控制后由风机(O3-12A,内置太原新华化工厂X1000-1型炭滤器)送入A、B、C气室。取样管一头置于各气室中央、菠菜上方10 cm处,另一头连接APOH-350E型环境 $\text{O}_3$ 分析仪(日本株式会社),分析结果由MCS-51型单片机送入计算机转储并处理。10月1日开始熏气,每天7 h(北京时间09:00~16:00),11月1日结束。

## 1.3 取样与分析

菠菜移入气室时取样40株(4个重复)作为熏气前的初始值;熏气5、10、15、20、25和30 d后,各处理和CK分别取样30株,3个重复。方法:用水将盆中土浸透并冲掉,将菠菜整株取出,洗净根中泥土,用纱布拭干。测定项目:根长、株高、各器官鲜(干)重、叶面积、受害叶片数等。植株样本用远红外线干燥箱烘干,电子分析天平(感量0.001)称重。10月26日用LI-6200

型便携式光合作用系统(美国LI-COR公司)测定了净光合速率、气孔阻力、光量子通量密度、冠层温度等生理生态因子(每个气室测定6片叶,每片叶3重复)。叶面积由LI-3000A型面积仪(LI-COR公司)测定。每1~2 d观测1次伤害症状和程度,本文中受害叶片数为叶片上出现可见症状,且单叶可见症状面积 $\geq 5\%$ 。群体受害程度用植株受害叶数占总叶数的百分率表示。

取样结果均取平均值,并进行方差分析和差异显著性检验(SSR法)。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\text{O}_3$ 浓度和熏气时间对菠菜的伤害程度

试验发现(表1), $\text{O}_3$ 浓度增加和熏气时间延长可导致菠菜受害。A处理的菠菜出现明显的失水、萎蔫、干枯等急性伤害症状,3 d时受害达60%,失去食用价值;B处理的菠菜伤害症状与A相同,受害时间略晚,程度略轻;C以下浓度处理无急性伤害症状,但表现出株型缩小、衰老提前等慢性伤害特征。

### 2.2 $\text{O}_3$ 浓度和熏气时间对株高的影响

图1表明,菠菜株高随 $\text{O}_3$ 浓度增加呈下降趋势,与CK比,除熏气10 d的C处理下降较小外,其余均达0.05显著水平。A、B、C处理的株高在熏气5 d时无明显差异,15 d以上长期熏气差异显著( $P < 0.05$ )。降低 $\text{O}_3$ 浓度株高差异不明显,变幅均小于2 cm。从株高增长趋势看,C、D和CK随生育期延长而增大,B处理呈波动变化,A处理熏气5 d达最大值,5~15 d呈下降趋势。

表1 不同 $\text{O}_3$ 浓度和熏气时间对菠菜的伤害

Table 1 The injury of different  $\text{O}_3$  concentrations and fumigation days to spinach

$\text{O}_3$ 浓度 Concentration ( $\text{mol L}^{-1}$ )	伤害症状及程度 Injury symptoms and degrees
$8.93 \times 10^{-9}$	熏气1 d 叶片局部出现失水斑,群体受害 $< 5\%$ ; 2 d 失水加重,群体受害20%左右; 3 d 叶片边缘卷曲、干枯,叶柄少 群体受害60%,不能食用; 4~8 d 植株展开叶片枯落,仅剩心叶和叶柄,群体受害达80%~90%以上 After spinach was fumed one day, spot induced by water loss appeared on part of leaf; After two days, water loss aggravated; After three days, edge of leaf was crimped and withered. Petiole lost water and whole plant was inedible; After four to eight days, colony suffered injury more than 80%-90%
$4.46 \times 10^{-9}$	熏气2~3 d 叶片开始失水,4~5 d 叶片变小、边缘干枯,6~8 d 群体受害达50%~70% After spinach was fumed two to three days, leaf started to lose water; After four to five days, leaf shorten and dried; After six to eight days suffered injury colony was 50%-70%
$2.23 \times 10^{-9}$	熏气5 d 叶面积、株高开始下降,无其它明显的急性症状 After spinach was fumed five days, leaf area and plant height started decrease
$\leq 4.46 \times 10^{-10}$	无 None
$1.12 \times 10^{-9} \sim 1.79 \times 10^{-9}$	无 None

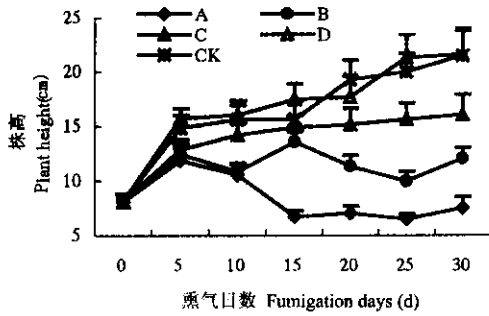


图1 O<sub>3</sub>浓度和熏气时间对菠菜株高的影响(平均值±SE, n=3)  
Fig.1 The effects of O<sub>3</sub> concentrations and fumigation days on plant height of spinach (mean±SE, n=3)

2.3 O<sub>3</sub>浓度和熏气时间对叶面积的影响

表 2 表明, 除熏气 20 d 的 C 处理叶面积与 CK 无明显差异外, 其余处理均随 O<sub>3</sub> 浓度增加显著降低 ( $P < 0.01$ )。熏气 5 d, A、B 处理叶面积比 CK 分别下降 92% 和 53%, 延长熏气时间最大可降低 98% 和 83%; C 处理熏气 25 d 和 30 d 也可降低 50% 以上; D 处理在熏气的前 10 d 内叶面积变化较小, 后 20 d 显著增大。

表 2 O<sub>3</sub>浓度和熏气时间对菠菜叶面积的影响(n=3)  
Table 2 The changes of spinach leaf area affected by different O<sub>3</sub> concentrations and fumigation days

熏气天数 Fumigation days	叶面积 Leaf area (cm <sup>2</sup> per plant)				
	A	B	C	D	CK
0	37.25	37.25	37.25	37.25	37.25
5	7.56C	42.36B	46.50B	91.50A	89.57A
10	7.02D	28.91C	105.55B	102.31B	157.63A
15	14.94E	31.50D	128.37C	227.50A	144.89B
20	2.97D	43.90C	171.49B	208.20A	169.47B
25	6.28E	64.70D	145.44C	388.59A	325.33B
30	20.95E	56.88D	151.44C	352.55A	329.67B

同行数字后的大写字母表示差异达 1% 显著水平  
The different capital letters in the same row indicated significance at 0.01 level

2.4 不同 O<sub>3</sub>浓度下叶片气孔阻力和净光合速率变化

图 2 表明, O<sub>3</sub> 浓度对菠菜气孔阻力和净光合速率影响显著。光子通量密度平均为 590 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, 冠层辐射温度平均为 23.0 °C 时, O<sub>3</sub> 浓度增加到 A、B、C 时气孔阻力分别增加 62.3%、36.9% 和 30.2%; 净光合速率下降 71.1%、51.1% 和 34.8%。O<sub>3</sub> 浓度下降到 D, 气孔阻力和净光合速率分别增加 5.9% 和 27.8%。

2.5 O<sub>3</sub>浓度和熏气时间对总生物量的影响

表 3 表明, O<sub>3</sub> 浓度由 CK 增加到 C、B、A, 总生物量均呈下降趋势, 与 CK 相比差异均达到 0.01 显著水平。除熏气 5 d 的 A、B、C 之间和 10 d 的 B 与 C 间的

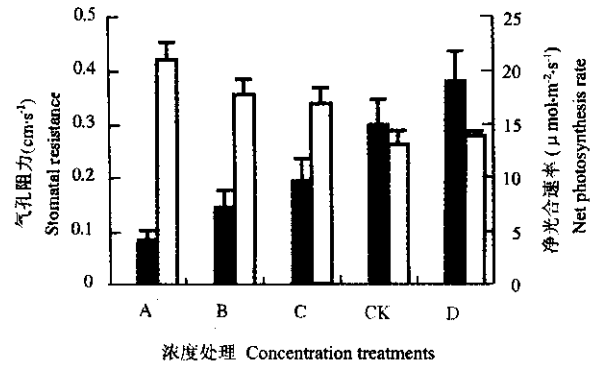


图 2 不同 O<sub>3</sub>浓度下菠菜叶片的气孔阻力和净光合速率的变化 (平均值±SE, n=3)  
Fig.2 The changes of stoma resistance and net photosynthesis rate of spinach leaves affected by 5 O<sub>3</sub> concentrations

差异不明显外, 其它时段 A、B、C 间生物产量差异明显 ( $P < 0.01$ ); D 处理总生物量与同期 CK 相比, 随熏气天数的变化有增有减, 差异显著性无明显规律。

表 3 不同 O<sub>3</sub>浓度和熏气时间处理下菠菜总生物量的变化(n=3)  
Table 3 Changes of spinach total biomass affected by different O<sub>3</sub> concentrations and fumigation days

熏气天数 Fumigation days	总生物量 Total biomass (g per plant)				
	A	B	C	D	CK
0	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128
5	0.269dC	0.289cdC	0.345cC	0.653aA	0.455bB
10	0.508cC	0.749bB	0.785bB	0.906aAB	0.955aA
15	0.240eE	0.366dD	0.729cC	1.141aA	1.005bB
20	0.390dC	0.652cB	1.375bA	1.354bA	1.464aA
25	0.303eE	0.900dD	1.228cC	3.140aA	2.789bB
30	0.746eE	1.860dD	2.092cC	4.027aA	3.406bB

同行数字后不同大、小写字母分别表示差异达 1%、5% 显著水平。下同  
The different capital and small letters in the same row indicated significance at 0.01 and 0.05 levels, respectively. The same as below

2.6 O<sub>3</sub>浓度和熏气时间对经济产量的影响

从熏气 5 d 的第 1 次取样结果即可发现 (表 4), O<sub>3</sub> 浓度变化对菠菜经济产量 (可食部分鲜重) 已产生显著影响 ( $P < 0.01$ )。O<sub>3</sub> 浓度增加, 各熏气时段的经济产量均呈明显下降趋势; 降低 O<sub>3</sub> 浓度到 D, 除熏气 10~20 d 的处理经济产量增加较小外, 其余时段增加显著 ( $P < 0.05$ )。与熏气前的初始值相比, 熏气 30 d 时, D、CK、C、B 和 A 单株经济产量增量分别为 18.041、16.644、5.635、2.360 和 -0.510 g。试验还发现, 低 O<sub>3</sub> 浓度处理的 C、D 和 CK 的经济产量中, 叶片重量大于叶柄的,

高浓度处理 A、B 则相反, 说明叶片对 O<sub>3</sub> 的响应比叶柄敏感。

表 4 不同 O<sub>3</sub> 浓度和熏气时间处理下菠菜经济产量及主要构成因子的变化 (n=3)

Table 4 The influence of different O<sub>3</sub> concentrations and fumigation days on economic yield and its main compositional factors (g per plant)

熏气天数 Days	项目 Items	A	B	C	D	CK
0	经济产量 Economic yield	1.275	1.275	1.275	1.275	1.275
	叶片重 Leaf weight	0.896	0.896	0.896	0.896	0.896
	叶柄重 Stem weight	0.306	0.306	0.306	0.306	0.306
5	经济产量 Economic yield	1.276eE	2.484dD	3.104cC	5.556aA	4.731bB
	叶片重 Leaf weight	0.191eD	0.765dC	1.692cB	3.377aA	2.960bA
	叶柄重 Stem weight	0.572dC	0.848cC	1.167bB	1.172bB	1.469aA
10	经济产量 Economic yield	1.386dD	3.097cC	5.813bB	7.308aA	6.861aA
	叶片重 Leaf weight	0.067cC	0.507cC	3.711bAB	4.365aA	3.480bB
	叶柄重 Stem weight	1.121dD	2.296bB	1.811cC	2.565bAB	2.981aA
15	经济产量 Economic yield	1.176dD	1.955cC	4.774bB	8.044aA	7.646aA
	叶片重 Leaf weight	0.213cC	0.744cC	2.838bB	5.025aA	4.693aA
	叶柄重 Stem weight	0.740cC	1.012cC	1.554bB	2.454aA	2.468aA
20	经济产量 Economic yield	0.958dD	2.622cC	8.982bB	10.965aA	10.812aA
	叶片重 Leaf weight	0.031cC	0.414cC	5.860bB	7.326aA	7.384aA
	叶柄重 Stem weight	0.747bB	1.235bB	2.645aA	2.814aA	2.761aA
25	经济产量 Economic yield	0.765eD	3.635dC	6.910cB	19.316aA	17.919bA
	叶片重 Leaf weight	0.000dC	0.739dC	4.426cB	12.378aA	10.499bA
	叶柄重 Stem weight	0.520cC	1.73bB	1.858bB	6.018aA	6.540aA
30	经济产量 Economic yield	1.551eE	4.894dD	7.921cC	19.973aA	16.558bB
	叶片重 Leaf weight	0.282dD	0.972dD	4.227cC	13.848aA	10.890bB
	叶柄重 Stem weight	0.910cC	2.801bB	3.126bB	5.175aA	4.836aA

### 3 讨论

O<sub>3</sub> 是影响作物生长和产量的首要大气污染物之一, 主要伤害敏感植物的叶片细胞<sup>[2]</sup>, 导致植株受害, 光合速率降低, 生长和产量下降。

当进入菠菜植株细胞的 O<sub>3</sub> 浓度积累超过一定阈值时, 过高的活性氧积累就会破坏其防御系统, 改变与膜有关的 pH、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>, 破坏膜蛋白质的巯基, 使膜透性增加, 细胞液和细胞质外渗<sup>[6,7]</sup>, 出现失水、萎蔫、干枯、叶片褐斑等可见症状, O<sub>3</sub> 浓度越高, 熏气时间越长, 伤害越重, 对干物质积累和经济产量影响越大。

O<sub>3</sub> 进入植物体破坏了叶绿体结构, 叶绿素含量下降, 叶绿体数目减少<sup>[8,9]</sup>; 叶片自身调节使部分气孔关闭, 抵御 O<sub>3</sub> 进入细胞的同时也降低了光合原材料 CO<sub>2</sub> 的摄入。两方面因素都可导致光合速率降低, 直接影响菠菜生长和产量。

此外, 与过滤 ( $\leq 4.46 \times 10^{-10}$  mol L<sup>-1</sup>) 处理对比发现, 低浓度 O<sub>3</sub> ( $2.23 \times 10^{-9}$  mol L<sup>-1</sup>) 和目前本底大气 O<sub>3</sub> 浓度长期熏气也可抑制菠菜生长发育, 主要表现为株高降低、叶面积减小和早衰, 与 Tingey 等<sup>[10]</sup>研究低浓度 O<sub>3</sub> 对萝卜影响的结果相似, 对菠菜生长已经产生一定影响。

### References

- [1] Nouchi I, Ito O, Harazono Y, Kouchi H. Acceleration of <sup>13</sup>C-labelled photosynthate partitioning from leaves to panicles in rice plants exposed to chronic ozone at the reproductive stage. *Environmental Pollution*, 1995,88:253-260.
- [2] Krupa S V, Manning W J. Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation. *Environmental Pollution*, 1988, 50:101-137.
- [3] Massman W J, Musselman R C, Lefohn A S. A conceptual ozone dose-response model to develop a standard to protect vegetation. *Atmospheric Environment*, 2000,34:745-759.
- [4] 王春乙, 郭建平, 白月明, 温民, 刘骥平, 刘江歌, 李雷. 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.  
Wang C Y, Guo J P, Bai Y M, Wen M, Liu J P, Liu J G, Li L. Experimental study of impacts by increasing ozone concentration on winter wheat. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60 (2):238-242.(in Chinese)
- [5] Heck W W, Taylor O C, Adams R, Bingham G, Miller J, Preston E, Weinstein L. Assessment of crop loss from ozone. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1982, 32(4): 353-361.
- [6] Mulchi C L, Slaughter L, Saleem M, Lee E H, Pausch R, Rowland R. Growth and physiological characteristics of soybean in open-top chambers in response to ozone and increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1992,38:107-118.
- [7] Kangasjärvi, Talvinen, J, Utriainen M, Karjalainen R. Plant defence

- systems induced by ozone. *Plant Cell and Environment*, 1994,17:783- 794.
- [8] Mikkelsen T N, Dodell B, Liitz C. Changes in pigment concentration and composition in Norway spruce induced by long-term exposure to low levels of ozone. *Environmental Pollution*, 1995, 87:197-205.
- [9] Annttonen S, Herranen J, Peura P, Kärenlampi, L. Fatty acids and ultrastructure of ozone-exposed Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) needles. *Environmental Pollution*, 1995, 87:235-242.
- [10] Tingey D T, Heck W W, Reinert R A. Effect of low concentrations of ozone and sulfur dioxide on foliage, growth and yield of radish. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1971, 96(3): 369-371.

(责任编辑 曲来娥)

田 万方数据  
WANFANG DATA