

O₃ 浓度增加对油菜影响的诊断试验研究*

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)

提 要

利用 OTG-1 型农田开顶式气室对油菜进行了不同臭氧浓度 200×10^{-9} 、 100×10^{-9} 、 50×10^{-9} 、未过滤($25 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$)和过滤掉自然大气的 O₃ 后(约为 10×10^{-9})5 个处理的长期接触试验,结果表明:目前大气本底($25 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$)和 50×10^{-9} 的低浓度臭氧对油菜有慢性伤害作用。臭氧浓度增加到 100×10^{-9} 、 200×10^{-9} 时油菜出现退绿、失水等急性伤害症状。臭氧浓度增加可导致植株矮化,株型缩小,叶片数和叶面积减少,光合速率、生物产量和经济产量下降。试验还表明,正常生长的油菜移入浓度为 100×10^{-9} 、 200×10^{-9} 的臭氧环境下,首先受影响的是叶肉和表皮,而此环境下的新生叶片其叶脉将首先扭曲变形。

关键词: 臭氧浓度 油菜产量 开顶式气室

引 言

O₃ 浓度增加对作物的影响早在 20 世纪 40 年代美国洛杉矶烟雾事件时就引起人们极大关注^[1],此后,欧美一些工业发达国家相继开展了这方面的研究工作,1980 年美国农业部和环保局联合制定了全国农作物损失评价网(The National Crop Loss Assessment Network)^[2],使这方面的研究前进了一大步。近年来,在试验研究的基础上,又开展了 O₃ 浓度对作物影响的模拟模式研究,并且还由单一的 O₃ 浓度扩展到与 CO₂、SO₂、温度和水分等多因子对作物综合影响的研究^[3~7]。我国在 O₃ 浓度增加对作物的影响方面的研究也早已起步,并且做了不少工作^[8~11]。

半个多世纪以来,美国、日本、德国、加拿大、荷兰、丹麦等国家曾利用封闭式气室、开顶式气室、田间暴露法等多种方法对粮食作物、经济作物、油料作物、蔬菜及松柏科植物和果树等进行了大量的试验研究,而利用开顶式气室进行 O₃ 浓度增加对油菜长期接触试验的研究未见报导。本文主要介绍利用我国自行研制的 OTG-1 型开顶式气室进行 O₃ 浓度增加对油菜影响的部分试验结果,探讨不同臭氧浓度对油菜植株伤害、株高、叶面积、光合速率、经济产量和生物产量等方面的影响,为有关部门宏观调控蔬菜生产提供科学试验依据。

油菜(Brassica chinensis L)也称为小白菜,十字花科,含大量的维生素 A、维生素 C 和钙、铁等人体必需的矿物元素,适口性强,我国南北方均有广泛种植^[12]。Walter W. Heck 等人(1986)研究表明,蔬菜(黄瓜、莴苣等)对臭氧的反应比油料作物和粮食作物更敏

* 本文由国家自然科学基金重大项目资助,批准号(49899270)。

2001-03-07 收到,2001-09-17 收到修改稿。

感^[13],首先表现为对叶片的伤害。油菜为叶菜类蔬菜,可食部分主要为叶片和叶柄,因此,研究臭氧对油菜的影响具有重要的意义。

1 试验材料和方法

1.1 试验设计

该项试验于 2000 年在中国气象科学研究院固城农业气象试验站(河北)内完全相同的 5 个 OTC-1 型开顶式气室内^[14]进行,试验设三个浓度处理, O₃ 浓度分别为 200×10^{-9} 、 100×10^{-9} 、 50×10^{-9} (本文中分别以 A、B、C 代表),两个对照,一个是将环境大气经过炭滤器过滤后的对照 CK1(O₃ 浓度小于 10×10^{-9}),另一个是未经过滤的环境大气的对照 CK2(O₃ 浓度约 $25 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$)。

1.2 O₃ 来源和浓度监测

O₃ 来源:用钢瓶装高纯度 O₂ 经 QHG-1 型高频 O₃ 发生器(清华大学研制)生成。生成后的 O₃ 分别经过 3 支转子流量计定量后通过送气管路送入风机,在此与经过炭滤器过滤掉杂质的空气配成不同浓度的试验气体,再由风机送入各自气室。O₃ 浓度监测:将取样管一头置于各气室中央,油菜上方 10 cm 处,另一头连接 APOH-350E 型环境 O₃ 分析仪,由气泵将气样抽入 O₃ 分析室(经过电磁阀控制开关自动切换可循环分析各气室的 O₃ 浓度),分析结果送入 MCS-51 型单片机存储,最后再送入计算机转储并进行处理。试验期内浓度控制较稳定,各处理浓度波动在 $\pm 5 \times 10^{-9}$ 以内。

1.3 供试作物及管理

油菜(五月蔓)于 2000 年 8 月 28 日播种,9 月 20 日移栽到口径 36 cm 深 26 cm 的瓦盆中,盆内土质均匀。试验期为 10 月 1 日~11 月 1 日,每天通气 7 h(北京时间 09:00~16:00)。试验期间施肥和浇水等管理方法相同,同一气室内油菜长势均匀,无明显差异,无杂草和病虫害影响,可看作 O₃ 浓度单要素控制试验。

1.4 观测项目和仪器

试验期内每 5 d 取样一次(共 7 次),每次 2 盆(10 株),收获时取 4 盆(20 株),测量主根长、株高、受害叶数、叶面积、各器官生物量鲜重和干重;每 1~2 d 观测一次伤害情况;试验中后期对光合速率、气孔阻力、叶温、蒸腾速率、辐射气温、光量子通量密度、CO₂ 浓度等生理生态因子进行了测定。试验测量仪器为美国拉哥公司生产的 LF-6200 型便携式光合作用仪、LF-3000A 型叶面积仪、电子分析天平等。本文仅对其中部分资料进行分析。

1.5 叶片伤害程度的定量划分方法

根据生理特点和食用性,本文将叶片伤害程度划分为 4 个等级,分别以 J (受害部分面积占该叶面积的百分率)和 J_s (气室内大部分植株的受害叶数占总叶数的百分率)表示单个叶片和群体的受害程度,见表 1。

表 1 油菜叶片个体和群体受害程度的等级划分

	0 级	1 级	2 级	3 级
个体受害	$J \leq 5\%$	$5\% < J \leq 10\%$	$10\% < J \leq 30\%$	$J > 30\%$
群体受害	$J_s \leq 10\%$	$10\% < J_s \leq 30\%$	$30\% < J_s \leq 50\%$	$J_s > 50\%$

2 试验结果与分析

2.1 O_3 浓度增加对油菜的伤害作用

叶片伤害是 O_3 对油菜影响的重要外在体现。 O_3 对油菜的伤害表现为慢性伤害和急性伤害。急性伤害指较短时段高浓度处理即可见色斑、退绿、失水、干枯老化、叶脉畸形等可见症状,可使光合速率剧降和严重减产,慢性伤害则是较长时段低浓度处理表现出一定程度的衰老加速、矮化、光合速率和产量下降等。表 2 分别以 A(200×10^{-9}) 和 C(50×10^{-9}) 为例讨论急性伤害和慢性伤害情况。由表 2 可知,在 A 处理下,通气 1 d 即可见褐色小斑点 ($J < 5\%$),3~4 d 群体伤害程度达 2~3 级,C 处理约 20~30 d 出现 2 级伤害,不可食用。

前人研究表明,叶肉对 O_3 的反应最敏感,表皮次之,叶脉具有抗性^[15]。本试验观测到,油菜移入 A 浓度下叶片达 3 级伤害时叶脉完好,与上述观点基本吻合。值得一提的是,在 A 浓度下发育的新叶片,首先表现为叶脉扭曲畸形,2~3 d 后,整叶局部卷缩造成凹凸不平、薄厚不均,一周后出现退绿、失水等。表明高浓度刺激下发育的叶片可延迟退绿,这可能是高浓度臭氧下油菜能够维持一定的光合强度且能生长的重要原因之一。

表 2 不同 O_3 浓度下油菜的伤害情况

处理	伤害时间(d)	伤害症状	级别	食用性
急性伤害 (200×10^{-9})	1	个别叶片褐斑, $J < 5\%$, 大部分植株 $J_S < 10\%$	0	可食
	2	叶片退绿、失水, J 约 8%, J_S 达 20% 左右	1	可食
	3	老叶局部干枯, J_S 达 40%	2	不可食
	4~5	伤害加重, 新叶叶脉扭曲, J_S 达 50% 以上	3	不可食
	5~10	新叶凹凸不平、薄厚不均、卷缩	3	不可食
	10~30(收获)	基本与 5~10 天时的状态相同	3	不可食
慢性伤害 (50×10^{-9})	15~20	叶片出现褐色小斑点, 早衰, $J_S < 10\%$	1	可食
	20~30	黄化加重, 提前衰老	2	不可食

2.2 O_3 浓度增加对油菜株高的影响

与禾本科作物不同,油菜经济产量直接取自叶片部分,受株高影响较大。表 3 是不同 O_3 浓度下油菜株高的变化。从表 3 可知,油菜移入气室后其株高发生明显变化。一般地, O_3 浓度越高植株越矮,CK2、C、B、A 处理下株高分别比 CK1 下降约 0~1.1、1.5、2~7、5~9 cm,油菜生长后期,由于叶片老化,部分叶片枯黄脱落,各处理株高均有所下降。

表 3 O_3 浓度增加对株高的影响

移栽后天数 (d)	通气天数 (d)	O_3 浓度处理				
		A	B	C	CK1	CK2
114	0	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2
119	5	17.5	18.1	19.3	22.8	21.5
124	10	18.6	18.9	21.5	25.3	24.5
129	15	19.0	20.4	23.8	27.6	26.2
134	20	19.6	21.6	22.5	27.3	26.4
139	25	18.7	21.7	22.4	23.2	23.0
144	30	15.7	20.5	24.2	25.0	25.1

可见, O₃ 浓度增加, 使植株矮化; 通气时间长短, 对株高影响无明显规律性, 主要与叶片卷缩、枯黄脱落和自然生长综合影响有关。

2.3 O₃ 浓度增加对油菜叶面积的影响

叶片是作物进行光合和呼吸的主要器官, 也是作物与大气进行气体交换的主要场所。叶面积的大小将直接影响到光合产量, 从而影响作物干物质积累和经济产量。表 4 给出了不同 O₃ 浓度处理和不同通气时间油菜单株叶面积的变化。由表 4 可以看出, 试验前 10 d 中, C、CK2 与 CK1 三者差异不大, 约是 B 的 2 倍, A 的 3~8 倍; 后 20 d CK2 与 CK1 相差不大, 是 C 的 1.5 倍, B 的 3 倍, A 的 4~7 倍左右。慢性、急性伤害使叶片扩大受抑, 部分叶片卷缩干枯, A 和 B 分别在通气 10 d、15 d, C 和 CK2 在 25 d 叶面积降到最小值, 此时, 上述 4 个处理不足 CK1 的 1/8、1/5、1/2 和 4/5。

表 4 不同 O₃ 浓度对油菜单株叶面积的影响 cm²

通气天数 (d)	O ₃ 浓度处理				
	A	B	C	CK1	CK2
0	127.00	127.00	127.00	127.00	127.00
5	73.22	136.50	278.04	304.44	207.02
10	55.28	203.55	402.23	435.00	463.58
15	94.09	127.22	413.27	665.70	641.34
20	181.50	247.95	532.35	743.03	803.60
25	158.66	239.84	398.36	799.19	644.65
30	94.52	325.96	638.92	895.38	867.04

总的来看, O₃ 浓度增加使叶面积减少, 通气时间越长减少得越多, 影响最大的时段(敏感时段)随浓度增加而提前; 另外, 随生育期延长, 同一高浓度处理的叶面积并不总是增加的, 而是波动的, 这是 O₃ 伤害使叶面积减少和作物生长使叶面积增加综合影响的结果, 当减少的速率大于增加的速率时, 叶面积就会出现负增长。

2.4 O₃ 浓度增加对油菜光合速率的影响

10 月 30 日上午(晴天)对不同 O₃ 浓度处理油菜的单株所有功能叶的光合速率进行了测定, 此时, 量子传感器读数平均为 530 μmol·m⁻²·s⁻¹, 冠层辐射温度为 19.0 °C, 表 5 给出了不同 O₃ 浓度下油菜的功能叶片数、全株总叶面积和单株光合速率最大值。从表 5 可以看出, CK2 与 CK1 叶片数相同, 随 O₃ 浓度增加功能叶片数减少 1~3 片; 与 CK1 相比, 叶面积分别下降 7.0%、20.6%、50.7%、64.3%; CK1 和 CK2、B 和 A 各自具有相同的叶片数, 叶面积却分别减少 54 和 105 cm²。表明, O₃ 对光合量的影响一方面是通过影响光合速率, 另一方面是通过影响叶片数和叶片大小来实现的。

表 5 O₃ 浓度增加对油菜光合速率的影响

项目	A	B	C	CK1	CK2
功能叶片数(片)	7	7	9	10	10
光合速率(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	10.450	8.821	15.980	21.897	17.080
全株总叶面积(cm ²)	273.99	379.05	610.15	768.22	714.12

图 1 为不同 O₃ 浓度处理下单株所有功能叶光合速率曲线(由心叶向外轮叶测定)。可以看出, 同一浓度处理, 心叶敏感性强而外轮叶伤害较重, 其光合速率值均减小, 处于旺

盛生长的中龄叶抗性较强,其光合速率值较大。一般来说,不同浓度处理相同叶龄的叶片光合速率值随 O_3 浓度增加而降低,外轮叶相差较小,心叶和中龄叶相差较大。CK1 从第 4 心叶出现光合速率最大值起,有 5 个连续叶片大于 $15 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;与其相比,浓度增加到 CK2、C、B、A 时,光合速率分别下降 8.9%~38.0%、14.4%~87.8%、59.7%~100%、19.0%~100%。随 O_3 浓度增加光合速率最大值与 CK1 相比可分别下降 22.0%、27.0%、59.7%、52.2%。

一般地, O_3 浓度增加使功能叶片数减少、叶片变小,单株总叶面积降低;相同叶龄的叶片光合速率值减小,光合速率最大值的叶龄增大;目前大气本底的 O_3 浓度对油菜的净光合速率已经产生了影响。

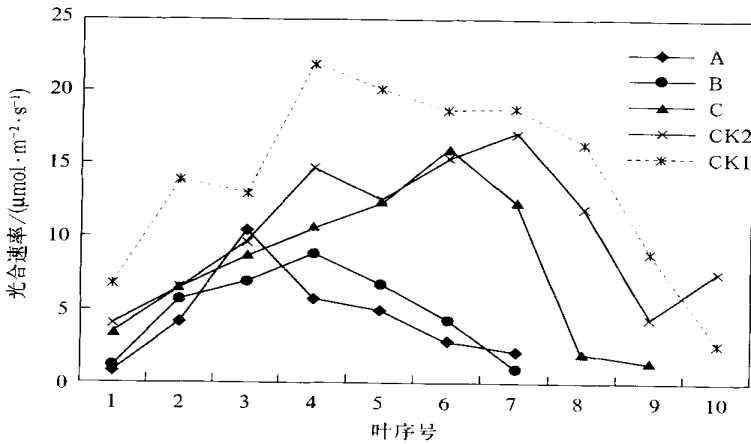


图 1 油菜各功能叶的光合速率变化曲线

2.5 O_3 浓度增加对油菜产量的影响

油菜是可分期采收的叶菜类蔬菜,与粮食作物不同,其产量是动态变化的。从食用和生理角度可分为经济产量和生物产量^[12]。

2.5.1 O_3 浓度增加对油菜经济产量的影响

表 6 给出了油菜平均单株的经济产量,从表 6 可以看出, O_3 浓度从 CK1 到 CK2, 试验前 15 d 影响不大, 后 15 d 产量最大可减少 18%; O_3 浓度升到 C 时, 前 10 d 影响较小, 后 20 d 可减产 36%~50%; O_3 浓度升到 B 和 A 时, 可减产 38%~84%和 69%~86%。

表 6 O_3 浓度增加对油菜经济产量的影响 g/株

通气天数 (d)	O_3 浓度处理				
	A	B	C	CK1	CK2
0	5.232	5.232	5.232	5.232	5.232
5	5.162	10.295	17.168	19.551	16.781
10	5.138	13.498	32.105	34.843	34.415
15	9.542	10.290	30.387	56.322	66.294
20	16.277	29.747	40.917	70.055	57.302
25	12.346	18.149	32.569	83.631	71.797
30	7.511	28.520	53.720	87.672	89.270

可见,目前大气的 O₃ 浓度对油菜的生长有抑制作用,影响其经济产量,应引起重视;油菜的经济产量随 O₃ 浓度的增高而降低,但并不是熏气时间越长产量降低得越多,而是波动的。这一点从表 4 油菜的叶面积变化中也可得到证实。

2.5.2 O₃ 浓度增加对油菜生物产量的影响

对蔬菜来讲,经济产量是其可食部分的鲜重,体现其食用价值和商品价值,生物产量比经济产量能更正确的表示其合成有机物的过程。图 2 是 O₃ 浓度增加对油菜生物产量(地上+地下部分总干重)的影响,可以看出,生物产量前 10 d 差异不大,以后差异明显。C、CK2 和 CK1 处理总趋势一致,与 CK1 相比,C、B、A 处理生物产量依次降低(CK2 增加)。试验期内,A、B、C、CK2 和 CK1 单株平均日增量分别为 0.108 g,0.222 g,0.395 g,0.490 g 和 0.438 g。

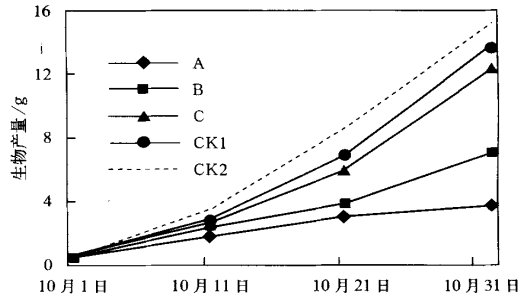


图 2 不同 O₃ 浓度对油菜生物产量的影响曲线

3 初步结论

试验表明:

(1) O₃ 浓度增加,油菜的株高、叶面积、光合速率、经济产量和生物产量均呈下降趋势。

(2) O₃ 对油菜生物产量的影响随熏气时间延长而增大;但经济产量对熏气时间的响应则不甚明显。

(3) 高浓度臭氧对油菜伤害表现为:失水、褪绿、枯斑、叶脉扭曲、叶片凹凸不平、植株矮化等。在高臭氧环境下的新生叶片对臭氧有抗性,这也是油菜在高浓度臭氧环境下能够维持生长发育的重要原因之一。

(4) 目前大气本底($25 \times 10^{-9} \sim 40 \times 10^{-9}$)的 O₃ 浓度对油菜有负效应,其慢性伤害作用比较明显。

(5) O₃ 浓度达到 100×10^{-9} 时,约 10 d 可使油菜的经济产量下降 60% 以上,失去食用性和商品价值,因此,降低污染气体的排放浓度,保护生态环境是当前亟待解决的重要问题,应引起社会的广泛关注。

参考文献

- Middleton J T. Effect of air pollutants on plant. *Plant Disease Pepr.*, 1950, **34**: 245 ~ 252.
- Welter W H. Assessment of crop loss from ozone. *Journal of Air Pollution Control Association*, 1982, **32**: 353 ~ 361.
- Miller J E. Growth of under chronic ozone stress at two levels of soil moisture. *J. Environ. Qual.*, 1988, **17**: 635 ~ 843.
- Olszyk D M. Effects of sulfur dioxide and ambient ozone on winter wheat and littree. *J. Environ. Qual.*, 1986, **15**:

- 363 ~ 369 .
- 5 Pell E J. Qualitative and quantitative effects of ozone and/ or sulphur dioxide on field-grown potato plants. *Environmental Pollution*, 1988, **53**: 171 ~ 186 .
 - 6 Adaros G. Single and interactive effects of low levels O_3 , SO_2 , and NO_2 on the growth and yield of spring rape. *Environmental Pollution*, 1991, **72**: 269 ~ 286 .
 - 7 Mulchi C L. Growth and physiological characteristics of soybean in open-top chambers in response to ozone and increased atmospheric CO_2 . *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1992, **38**: 107 ~ 108 .
 - 8 王勋陵. 臭氧对植物的影响及保护. *环境科学*, 1983, **4**: 67 ~ 70 .
 - 9 唐孝炎. 大气环境质量标准中的光化学氧化剂. *中国环境科学*, 1984, **4**: 68 ~ 72 .
 - 10 沈英娃. 臭氧对植物的影响. *生态学进展*, 1988, **5**(4): 242 ~ 251 .
 - 11 王春乙, 关福来. O_3 浓度变化对我国主要作物产量的可能影响. *应用气象学报*, 1995, **6** (增刊): 69 ~ 74 .
 - 12 浙江农业大学主编. 蔬菜栽培学总论. 北京: 农业出版社, 1981. 1 ~ 49 .
 - 13 Heck W W. Assessment of crop loss from ozone. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 1986, **34**: 6 ~ 7 .
 - 14 王春乙. 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 .
 - 15 松冈义浩. 农作物的光化过氧化物的危害与对策. *国外农学——植物保护*, 1988, **4**: 16 ~ 18 .

A DIAGNOSTIC EXPERIMENT AND STUDY OF THE INFLUENCE OF O_3 ON PAKCHOI

Bai Yue ming Wang Chunyi Liu Ling Guo Jianping Wen Min
(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

A long time experiment on pakchoi in five O_3 concentration treatments is made by using the OTC-1 open top chamber. The results show that lower O_3 concentrations (25×10^{-9} ~ 40×10^{-9} and 50×10^{-9}) have chronic injury to pakchoi. When O_3 concentration is up to 100×10^{-9} or 200×10^{-9} , green pakchoi leaves faded and lost water. Increasing O_3 content in ambient air may lead to shorter plant height and smaller plant pattern as well as the decreased leaf number, leaf area, photosynthesis rate, biological yield and economy yield. In addition, the experiment shows that pakchoi mesophyll and epidermis was influenced first when pakchoi in normal growing condition moved into the chamber with the O_3 concentration being 100×10^{-9} or 200×10^{-9} , but the veins of new leaves in the chamber twisted and changed form first.

Key words: Ozone concentration Pakchoi yield Open-top chamber