大气中 O_3 和 CO_2 增加对大豆复合影响的试验研究*

黄 辉 王春乙 白月明 温 民

（中国气象科学研究院，北京 100081）

摘 要 利用 OTC-1 型开顶式气室，对大豆“中黄 14”进行了长时期不同 O_3 和 CO_2 处理的接触试验，模拟研究 CO_2 和 O_3 浓度倍增及其交互作用对大豆发育期、黄叶率和绿叶率、根瘤、生物量及其分配、产量结构、籽粒品质及叶片膜保护系统的影响，结果表明：单独 O_3 浓度倍增，发育期明显提前；生物量最多可减少近一半，产量最多减产 60%以上；粗蛋白含量增加 6.2%，粗脂肪含量降低 7.6%；叶片脂膜过氧化加剧。单独 CO_2 浓度倍增，开花后发育期有所延迟；对生物量及产量有明显的正效应，成熟时总生物量和籽粒产量分别比 T5 增加 21.0%和 20.3%；粗蛋白和粗脂肪含量分别下降 3.3%和 1.6%；结荚前叶片脂膜过氧化反应减轻。CO_2 和 O_3 持续倍增和逐渐达到倍增交互作用处理，在生物量、产量方面表现为 CO_2 的影响大于 O_3，在叶片膜保护系统方面表现为 O_3 的影响大于 CO_2，粗蛋白含量下降，粗脂肪含量上升，叶片脂质过氧化加剧。熏气处理均可造成：黄叶率上升，绿叶率下降，凋落物增加，且单独 O_3 浓度倍增的处理最明显，通气仅 10 天黄叶率就高于 50%；超氧化物歧化酶活性增强；气孔阻力增加，蒸腾速率下降，且单独 CO_2 浓度倍增的处理最明显，尤其在高湿阴天，气孔阻力和蒸腾速率变化最高分别可达增加 234.0%和下降 58.5%。

关键词：开顶式气室；臭氧；二氧化碳；大豆

文章编号 1006-9895（2004）04-0601-12 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

1 引言

人类活动对气候变化以及气候变化对生态系统的可能影响已引起人们愈来愈高的重视，气候变化的主要原因之一是由于人类活动的增加，使得近地层各种大气成分含量发生变化，其中 O_3、CO_2 浓度日益增加，对生态环境特别是农业生态环境产生影响。我国是一个人口众多、耕地相对较少的农业大国，农业生产在国民经济发展中占有举足轻重的地位。大气中 O_3、CO_2 含量的增加对农作物生长发育及产量形成有一定影响，已成为国际大气科学界关心的热点之一[1]。

从 20 世纪 70 年代起，尤其是 80 年代，国外许多学者已经利用开顶式气室进行了许多有关 O_3、CO_2 等增加对植物影响的研究，如：单一 CO_2 浓度增加[2]、O_3 污染[3]对植物的影响，O_3 与水分胁迫[4~7]、O_3 与 NO_2[8~10]、O_3 与 SO_2[11~13]及 O_3、SO_2 与 NO_2[14~16]、O_3 和酸雨[17,18]、以及 O_3 和 UV-B[19,20]等对作物的复合影响进行了大量研究，此外，还有

2003-03-17 收到，2003-09-11 收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49899270

一部分学者进行了 O_3 与 CO_2 对植物影响的研究，如：Krupa 等[21]研究了 UV-B、CO_2 和 O_3 对植被的温室效应，Rudorff 等[22]研究了 CO_2 与 O_3 增加对冬小麦和玉米的影响，Mulchi 等[23]研究了单独 CO_2 浓度增加及 O_3 与本底 CO_2 浓度对大豆的影响。

大量以往研究表明：CO_2 增加，作物生物量和产量增加（尤其是对 C_3 类作物），O_3 增加，作物生物量和产量下降。然而，这两种气体同时增加对植物的影响目前尚未有明确的定论，尤其是二者对作物的交互影响机制，有关 CO_2 与 O_3 浓度倍增及其交互作用对大豆的影响方面国内外报道也不多见。

预计到 2020 年对流层 O_3 浓度可增加 50%[24]，20 世纪 90 年代大气 CO_2 浓度增加速率为 3.2 ± 0.1 Pg a^{-1}（以碳计，下同）[25]，照目前 CO_2 浓度增加速率，到 2020 年 CO_2 浓度增加很可能可以缓解 O_3 引起的作物减产，而 CO_2 浓度增加引起的作物增产也很可能会由于 O_3 浓度的增加而受到抑制。因此，有必要对 CO_2 与 O_3 浓度增加特别是二者的交互作用对作物的影响进行研究。本文借助开顶式气室，在大豆“中黄 14”主要生育期内进行通气试验，通过对大豆主要发育期、生物量、产量结构及籽粒品质、叶片膜保护系统特征量含量等进行分析，揭示作物品种对 CO_2、O_3 倍增及其交互作用的响应特点，为国家制定农业生产计划和科学研究提供理论依据。

2 试验方法与设备及计算

2.1 试验概况

2.1.1 试验地点及设备

试验在中国气象科学研究院固城农业气象试验基地进行。该基地位于河北省保定定兴县境内，属于干旱半干旱气候区。试验点主要为壤土，主要作物为冬小麦、玉米、水稻、大豆等。夏季气温较高，昼夜温差大，降水偏少，但灌溉条件良好，适宜发展农业生产。

试验在结构和性能完全相同的 5 个 OTC-1 型开顶式[26,27]中进行，室壁为无色透明玻璃，八边形结构，高 2.4 m，每边长 1.15 m，顶部有 45°角的收缩口。CO_2 采用钢瓶装液态纯 CO_2，O_3 由高纯度 O_2 经清华大学研制的 QHG-1 型高频 O_3 发生器生成。CO_2、O_3 分别经 6 支转子流量计（北京玻璃仪器厂生产）定量后分别由 O3-12A 型风机（内置太原新华化工厂生产的 X1000-1 军用炭滤器）送入 5 个试验气室。

2.1.2 供试作物和管理

试验时间为 2001 年，供试作物为夏大豆（品种中黄 14 号）。于 6 月 22 日播种，共 280 盆，每盆 15 株。三真叶期每盆均匀定植 5 株，选长势均匀的大豆 180 盆用于本试验。每个处理 36 盆，7 月 13 日移入各气室，9 月 27～30 日收获。试验采用盆栽，花盆顶口直径 36 cm，深 26 cm，为确保各盆土质、肥力均匀，取同一地块 20 cm 厚度内表层土壤过筛拌匀后装盆播种。试验期间保证水分充足，无水、肥、病虫害、杂草等非试验因素影响，可以看成为单要素控制试验。

2.1.3 气体浓度

试验共设 5 个处理。气室 1：CO_2 浓度为 700×10^{-6}，约相当于目前大气本底状况 CO_2 浓度的 2 倍，O_3 为本底浓度（以下简称 T1）；气室 2：O_3 浓度为 100×10^{-9}，约相

当于目前大气本底状况 O_3 浓度的 2 倍，CO_2 为本底浓度（以下简称 T2）；气室 3：CO_2 为浓度 700×10^{-6}、O_3 浓度为 100×10^{-9}（以下简称 T3）；气室 4：CO_2、O_3 分别以步长 70×10^{-6}/10 d、10×10^{-9}/10 d 从本底增到 700×10^{-6}、100×10^{-9}（以下简称 T4）；气室 5：为对照，气室内不通任何气体，CO_2 和 O_3 浓度分别约为 350×10^{-6}、50×10^{-9}，均为本底浓度（以下简称 T5）。7 月 14 日开始通气，大豆成熟时结束，每天通气 7 h（北京时间 09：00～16：00）。

2.1.4　浓度监测

分别将 2 根取样管的一头置于气室中央，距栅板 1 m 高处，另一头分别连接 QGS-08 型远红外 CO_2 分析仪和 APOH-350E 型环境 O_3 分析仪，由气泵将气样抽入气体分析室。试验期内 O_3 和 CO_2 浓度控制较稳定，变幅在±5%之间。

2.2　取样和分析

从播种开始，每 5～10 天取样一次，每次各处理随机抽取 2 盆 10 株（破坏性取样），分别测定各器官生物量干重（凋落物干重为每 5～10 天收集的落叶、柄、花、荚重之和），除籽粒自然风干外其余样本用远红外线干燥箱烘干，电子分析天平称重。本文中所用生物量及产量资料均为 10 株大豆的平均值或 10 株总重量。气孔传导、叶片蒸腾速率等叶片生理参数采用美国拉哥公司生产的 LI-1600 型稳态气孔仪测定。

种子品质分析由中国农业大学作物学院种科系进行，包括粗脂肪和粗蛋白两项，测试方法均按照国家标准[28]，标准号分别为 GB/T 5512-85 和 GB/T 5511-85。叶片膜保护系统特征量含量的资料由沈阳农业大学生理生化重点试验室测定，测定方法为：超氧化自由基（O_2^-）的提取和测定采用 a-萘胺法[29, 30]、丙二醛（MDA）的提取和测定采用硫代巴比妥酸法[31]、超氧化物歧化酶（SOD）的提取和测定采用光化学还原法[29, 30]。

2.3　有关参数的数学表达式

2.3.1　黄叶率的数学表达式

黄叶率（R_Y）即黄叶干物重（L_Y）与叶片总干物重（L_W）之比，其表达式[32]为

$$R_Y = \frac{L_Y}{L_W}, \tag{1}$$

由于叶片总干物重等于黄叶重与绿叶重（L_G）之和，所以，某一时刻的黄叶率可表示为

$$R_Y = \frac{L_{Yi}}{L_{Yi} + L_{Gi}}, \tag{2}$$

式中，i=1，2，3，…，n 为黄叶率相对应的时间序列，L_{Yi} 和 L_{Gi} 分别为黄叶重和绿叶重。

2.3.2　绿叶率的数学表达式

由于绿叶重等于总叶片重与黄叶重之差，所以绿叶率（R_G）与黄叶率一样可以表示为

$$R_G = \frac{L_{Gi}}{L_{Yi} + L_{Gi}}. \tag{3}$$

2.3.3　总生物量（W）的数学表达式

任何作物在其生育过程中，干物质的积累都遵循自然增长曲线，即 Logistic 曲线，

其表达式为

$$W = \frac{W_0}{1 + a\exp(-bx)} \quad , \tag{4}$$

式中，W 为任一时刻的干物质积累量（g/10 株），W_0 为生长过程中最大干物质累积量，x 为通气时间（单位：d），a、b 为常数。

3 结果分析

由于处理和对照的试验环境除 O_3 和 CO_2 气体浓度不同外，其余小气候因子完全相同，所以，通过比较处理和对照的试验结果，即可探讨 O_3 和 CO_2 浓度倍增及其交互作用对大豆的影响。通过比较 T3 和 T4，可得到 O_3 和 CO_2 不同通气方式产生的交互作用对大豆的影响。

3.1 对发育期的影响

在试验中，对大豆发育期变化进行了观测，结果如表 1 所示。从表 1 可以看出，同对照相比：T1 开花提前 2 d，此后一直至成熟对应发育期均延迟 1～2 d，这和以往试验结果相反，可能是由于品种特性引起的，具体原因有待进一步研究；T2 由于 O_3 伤害，叶片加速老化，开花、鼓粒各提前 1 d，发育期明显提前，成熟期提前 7 d；T3 发育期有所延迟；T4 成熟期提前 1 d。

表 1 各处理发育期同对照相比

发育期	T5（对照）	T1/d	T2/d	T3/d	T4/d
开花	7 月 26 日	−2	−1	+2	0
结荚	8 月 6 日	+1	+1	+2	0
鼓粒	8 月 20 日	+2	−1	+1	0
成熟	9 月 25 日	+2	−7	+1	−1

3.2 对绿叶率和黄叶率的影响

表 2 为大豆绿叶率和黄叶绿的变化情况。

可见，移入气室前各处理均全为绿叶；8 月 23 日前，T1 主要以绿叶为主，黄叶很少，黄叶率均低于 5%，8 月 23 日以后，叶片变黄速度明显加快；T2 通气 10 d（7 月 24 日）即可观测到，黄叶迅速增加，黄叶率高于绿叶率，9 月 12 日黄叶率就达到 100%；T3 通气 10 d 后黄叶明显增加，从 9 月 12 日起，黄叶率开始高于绿叶率；T4 从通气 10 d 观测到黄叶，但黄叶率仅为 1%，在 8 月 23 日前，以绿叶为主，黄叶率均低于 5%，8 月 23 日以后，叶片变黄速度加快。

表 2 大豆绿叶率（%）和黄叶率（%）的动态变化

	绿叶率					黄叶率				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
7 月 7 日	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0
7 月 14 日	100	100	100	100	100	0	0	0	0	0
7 月 24 日	100	46	83	99	100	0	54	17	1	0
8 月 3 日	99	38	94	99	100	1	62	6	1	0
8 月 13 日	97	45	84	98	98	3	55	16	2	2
8 月 23 日	98	49	66	96	99	2	51	34	4	1
9 月 2 日	88	26	66	74	95	12	74	34	26	5
9 月 12 日	43	0	20	27	37	57	100	80	73	63
9 月 22 日	22	0	1	0	23	78	100	99	100	77

自通气 10 d 后，T1～T4 四个熏气处理黄叶率均高于同期对照（T5）处理的黄叶率，原因一方面是由于鼓粒后植株迅速生长发育，叶片中营养物质的转移及叶片的自然衰老引起；另一方面则是由于熏气处理均可对大豆叶片造成不同程度伤害，其中 O_3 伤害尤为严重，并且就本试验看来，CO_2 可以在一定程度上缓解 O_3 伤害，并且 8 月 23 日前 T4 的这种缓解作用较 T3 更为明显，8 月 23 日后，由于 T4 处理 O_3 浓度逐渐增加，对叶片的伤害加重，最终，CO_2 与 O_3 的影响接近。

3.3　对根瘤的影响

表 3 为大豆根瘤数量和干物重的观测数据。由表 3 可见，7 月 7 日（未移入气室时），各处理根瘤数及干物重一致。移入气室后，T1 的根瘤数（除 7 月 24 日）和根瘤重均高于 T5；T2 的根瘤数（除 7 月 24 日）和根瘤重均低于 T5；T3 的根瘤数 8 月 23 日低于 T5，根瘤重在 7 月 24 日和 8 月 23 日也就是开花和鼓粒前后低于 T5；T4 根瘤数在 8 月 3 日前低于 T5，总根瘤重高于 T5，并且 T4 的总根瘤重始终高于 T3。可以看出在生育末期，T1、T3 和 T4 的总根瘤数及根瘤重较 T5 均呈现了增长，且增长幅度从大到小依次为：T1、T4、T3。

表 3　根瘤数量（个）和干重（g）及相对 T5 的变化率（%）

	根瘤数					根瘤重				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
7 月 7 日	2(0)	2(0)	2(0)	2(0)	2	0.002(0)	0.002(0)	0.002(0)	0.002(0)	0.002(0)
7 月 24 日	102 (-31.1%)	167 (12.8%)	195 (31.8%)	112 (-24.3%)	148	0.89 (23.9%)	0.49 (-31.9%)	0.69 (-5.0%)	0.73 (1.2%)	0.72
8 月 3 日	444 (78.3%)	192 (-22.9%)	328 (31.7%)	217 (-12.9%)	249	2.74 (25.4%)	1.51 (-30.9%)	2.38 (8.7%)	2.58 (17.6%)	2.19
8 月 23 日	901 (20.0%)	304 (-59.5%)	652 (-13.2%)	801 (6.7%)	751	10.36 (17.7%)	4.25 (-51.7%)	8.38 (-4.8%)	8.94 (1.5%)	8.81
9 月 22 日	709 (72.5%)	0 (-100%)	605 (47.2%)	689 (67.6%)	411	6.51 (94.6%)	0 (-100%)	4.15 (23.9%)	4.45 (32.9%)	3.31

注：括号内数值为根瘤数量和干物重相对 T5 的变化率(%)，T5 为对照处理的根瘤数和根瘤重。

3.4　对总生物量的影响

图 1 为大豆总生物量干重随时间的变化曲线。可见：T1 的总生物量增加明显，成

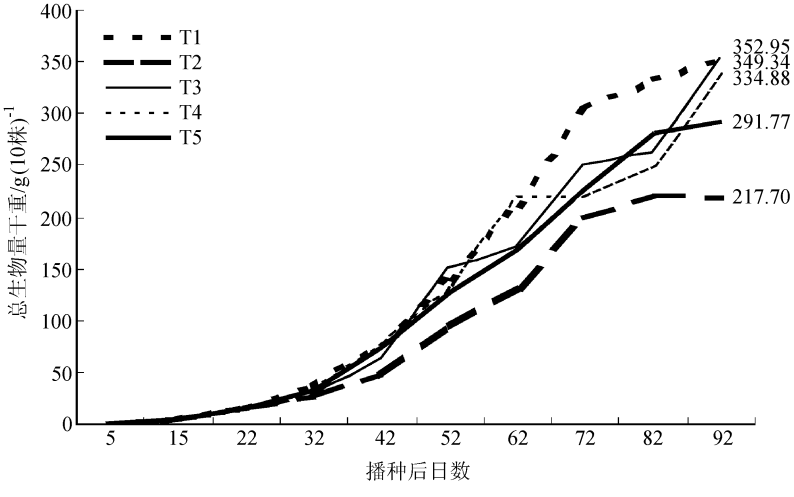


图 1　总生物量干重随时间的变化曲线

熟时总生物量比 T5 增加 21.0%；T2 的总生物量明显低于 T5，成熟时总生物量同 T5 相比下降 25.4%；T3 和 T4 两个处理的总生物量在不同时期各有高低，在盛花结荚期至鼓粒一段时期内，二者较 T5 呈现正增长，在成熟时 CO_2 的影响大于 O_3，生物量也呈正增长，分别比 T5 增加 19.7%和 14.8%。可见，T1、T2 和 T5 差别具高度显著性意义。

表 4 各处理总生物量干重相对 T5 变化率及同 T5 配对 t 检验结果

	相对 T5 变化率			
	T1	T2	T3	T4
6月27日	0	0	0	0
7月7日	0	0	0	0
7月14日	0	0	0	0
7月24日	15.4%	-20.5%	-12.0%	3.0%
8月3日	4.7%	-35.0%	-12.0%	3.8%
8月13日	10.3%	-25.3%	18.9%	5.9%
8月23日	26.1%	-21.6%	2.8%	31.2%
9月02日	34.6%	-12.3%	10.4%	-2.6%
9月12日	26.0%	-21.5%	-6.0%	-11.9%
9月22日	21.0%	-25.4%	19.7%	14.8%
T	2.67	-3.45	1.16	0.68
P	0.0321	0.0107	0.2828	0.5156

分析其原因，可能是由于盛花结荚期前营养生长占主要地位，此期间 T3 和 T4 受气室内 O_3 的影响，营养器官生长受抑；此后，生殖生长逐渐繁荣，同时 CO_2 的正效应大于 O_3，T3 和 T4 总生物量较 T5 表现出了正增长，而成熟时，T3 和 T4 凋落物增加显著，并且营养和生殖器官生物量均高于 T5，可见 CO_2 的正效应逐渐占主导地位，使得生物量和产量（见表 4）均呈正增长。

对通气后各处理总生物量与通气时间的关系进行模拟，模拟方程见表 5。可见，大豆总生物量与通气时间的关系完全符合自然增长曲线，相关检验均达到极显著水平。表 4 给出 T1、T2、T3、T4 各时期总生物量相对 T5 的变化率，以及各处理同 T5 配对 t 检验的结果。可见，T1、T2 和 T5 差别具有高度显著性意义，T3、T4 与 T5 差别不显著，T3、T4 中有相互消除影响的作用。

表 5 各处理总生物量与通气时间的拟合方程

	R^2	Logistic 拟合方程
T1	0.998	$W=\frac{351.80}{1+36.327\exp(-0.09x)}$
T2	0.997	$W=\frac{225.83}{1+30.900\exp(-0.09x)}$
T3	0.988	$W=\frac{347.96}{1+20.148\exp(-0.07x)}$
T4	0.982	$W=\frac{321.29}{1+14.750\exp(-0.06x)}$
T5	0.997	$W=\frac{302.74}{1+19.555\exp(-0.07x)}$

注：用 Logistic 方程拟合的 R^2 均通过 0.001 显著水平检验

3.5 对产量结构的影响

表 6 为大豆产量结构变化，由表可见，同 T5 相比：T1 的株荚数、株籽粒数和株籽粒重及茎秆重明显增加，瘪粒重/总粒重（‰）下降明显，但瘪粒数/总粒（‰）上升；T2 除瘪粒重/总粒重（‰）和瘪粒数/总粒（‰）明显增加，其余各项均有所下降；T3、T4 产量增加明显，瘪粒数/总粒（‰）和瘪粒重/总粒重（‰）显著下降。可以看出，T1 增产明显，但同时瘪粒也增多；T2 处理对产量有显著负效应，瘪粒增加明显；T3、T4 对产量正效应明显，并且有效缓解了单独 T1、T2 下的瘪粒情况，并且 T4 处理下瘪粒重下降较 T3 更为显著。值得一提的是，处理同对照相比，籽粒与茎秆比均有所下降，对于单独 O_3 倍增是由于籽粒产量下降显著而引起籽粒与茎秆比下降，对于单独单独 CO_2 倍增，尽管籽粒产量增加明显，但茎秆生长旺盛，从而导致籽粒与茎秆比也有所下降。

表 6　大豆产量结构及相对 T5 的变化率（%）

项　目	T1	T2	T3	T4	T5
株荚数(个)	23.4(25.3%)	12.8(−31.4%)	22.3(19.5%)	21.7(16.2%)	18.7
株籽粒数(粒)	59.4(19.3%)	29.3(−41.1%)	56.3(13.1%)	54.7(9.8%)	49.8
株籽粒重(g)	12.0(20.0%)	3.8(−62.0%)	10.6(6.0%)	10.1(1.0%)	10.0
瘪粒数/总粒(‰)	15.3(41.7%)	35.2(225.9%)	3.6(−66.7%)	3.7(−65.7%)	10.8
瘪粒重/总粒重(‰)	7.9(54.9%)	18.8(268.6%)	2.1(−58.8%)	1.2(−76.5%)	5.1
茎秆重(g)	265.3(29.8%)	123.0(−39.8%)	254.0(24.3%)	232.7(13.8%)	204.4
籽粒与茎秆比	2.9(−9.4%)	2.0(−37.5%)	2.7(−15.6%)	2.8(−12.5%)	3.2

注：括号内值为相对 T5 的变化率（%）。T5 表示对照处理的产量结构。

3.6　对气孔阻力和叶片蒸腾速率的影响

表 7 和表 8 为大豆在 8 月 5 日和 8 月 22 日的叶片气孔阻力和蒸腾速率。8 月 5 日全天为高湿阴天，8 月 22 日为高温晴天。由表可见 T1、T2、T3 和 T4 四个熏气处理下，由于 CO_2、O_3浓度的增加，使得大豆叶片部分气孔关闭，气孔阻力增加，蒸腾速率减小，可在一定程度上降低进入植物体内的 CO_2 和 O_3 通量，降低伤害。T1 的这种植物自我调节最明显，尤其是在阴天更为明显；T2 无论在晴天还是阴天，大豆叶片的自我调节都较其他处理弱一些。

表 7　大豆叶片的气孔阻力（单位：s cm^{-1}）

时段	RS(2000 年 8 月 5 日)					RS(2000 年 8 月 22 日)				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
09:00～10:00	1.45	1.21	1.35	1.11	1.06	0.72	0.66	0.72	0.43	0.38
10:00～11:00	2.38	1.22	2.99	1.53	1.03	1.08	0.54	0.66	0.47	0.29
11:00～12:00	2.52	1.11	1.81	1.80	1.11	1.60	0.70	2.32	0.89	0.55
12:00～13:00	2.86	1.07	1.66	1.32	0.97	1.03	0.61	1.93	0.92	0.77
13:00～14:00	1.83	1.23	2.17	1.74	0.97	0.57	0.37	0.56	0.40	0.25
14:00～15:00	2.80	1.09	2.02	1.74	0.93	0.77	0.75	0.76	0.95	0.61
15:00～16:00	2.82	1.09	1.54	1.32	0.84	1.28	0.72	1.00	0.72	0.38

表 8　大豆叶片的蒸腾速率（单位：μg cm^{-2} s^{-1}）

时段	TRAN(2000 年 8 月 5 日)					TRAN(2000 年 8 月 22 日)				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
09:00～10:00	8.7	10.2	9.4	10.5	10.9	20.4	22.7	18.4	30.9	34.1
10:00～11:00	7.8	12.1	6.1	10.4	13.3	21.0	29.7	26.9	34.4	42.2
11:00～12:00	8.2	14.6	10.4	10.7	14.8	15.2	24.4	10.5	22.1	28.6
12:00～13:00	8.4	17.2	13.1	16.0	19.6	18.7	29.6	11.2	19.9	24.4
13:00～14:00	12.8	17.0	11.8	14.3	20.2	35.4	46.6	36.6	46.0	51.8
14:00～15:00	8.7	17.8	13.2	14.3	21.0	28.1	29.1	26.3	21.8	27.4
15:00～16:00	9.4	18.9	16.6	16.9	21.9	18.4	27.1	21.3	30.1	43.5

3.7　对大豆籽粒品质的影响

图 2 为不同处理大豆籽粒主要成分含量，由图可见：T1 的蛋白质和粗脂肪含量分别下降 3.3%和 1.6%；T2 粗蛋白含量增加 6.2%，粗脂肪含量降低 7.6%；T3 和 T4 粗蛋白含量分别降低 3.1%和 0.7%，粗脂肪含量分别增加 7.5%和 2.2%。从蛋白质含量来看，T2 有利于大豆籽粒品质的提高；从粗脂肪含量来看，T4 最有利于品质提高。CO_2浓度倍增下大豆“中黄 14”籽粒品质略有下降；O_3浓度倍增及其与 CO_2 交互作用

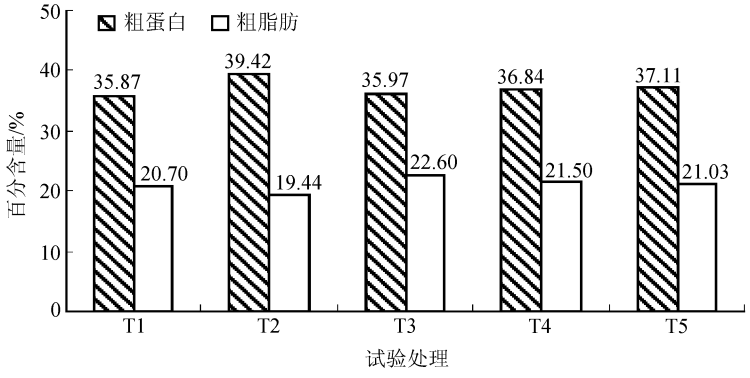


图 2 不同处理大豆主要成分含量（g /100 g 大豆）

对大豆籽粒品质的提高，究竟是利大于弊，还是弊大于利，将根据其用途有所不同。

3.8 对大豆叶片膜保护系统的影响

O_3进入植物体内，产生自由基，影响植物体内活性氧代谢系统的平衡，超氧自由基（O_2^-）属其中一种[33]。这些自由基十分活跃，能对生物体膜系统产生危害。植物体内的抗氧化系统是决定植物细胞对氧化胁迫的关键因素，它能清楚体内的活性氧和脂膜过氧化所产生的有毒物，以利于植物在逆境中生存。超氧化物歧化酶（SOD）是抗氧化系统中酶促子系统中的一种重要保护酶，可清除 O_2^- 形成的 H_2O_2。这种对活性氧的清除有利于植物维持体内活性氧产生和淬灭的动态平衡，从而抑制脂膜过氧化的进程[34]。MDA（丙二醛）是膜脂过氧化的产物，是衰老生理的重要指标，其含量高低说明了脂质过氧化的程度。因此，本文对大豆不同生育期 O_2^-、MDA 及 SOD 含量进行了分析。

3.8.1 对超氧自由基含量的影响

图 3 反映了不同时期大豆叶片中 O_2^- 含量的变化。可见：T1 在结荚之前，O_2^- 含量降低，结荚后 O_2^- 含量上升；T2 的 O_2^- 含量上升明显；T3、T4 的 O_2^- 含量上升也较明显，并且在盛花期到灌浆期 T3 的 O_2^- 含量高于 T4。

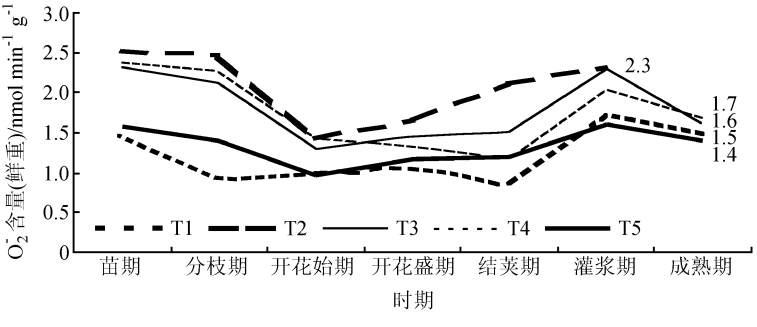


图 3 不同时期的 O_2^- 含量

3.8.2 对叶片 MDA 含量的影响

图 4 为不同时期大豆叶片 MDA 含量的变化曲线，从图中可以看出，T1 在盛花结荚期 MDA 含量升高；T2 在开花后 MDA 含量开始显著增加；T3 的 MDA 含量增加明显；

T4 在盛花至成熟阶段 MDA 含量升高。可见，开花前，适量地对大豆熏以 CO_2、O_3 气体，可缓解叶片老化；开花后，植株迅速生长发育，生殖器官开始生长，营养中心变为两个，同时由于 O_3 的作用，叶片脂膜过氧化作用加剧，叶片老化进程加速；但在持续的 CO_2 和 O_3 倍增交互作用下（即 T3 处理），大豆叶片脂膜过氧化作用始终加剧。

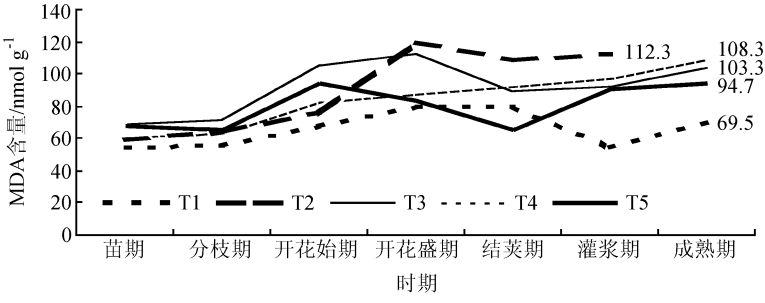


图 4　不同时期的 MDA 含量

3.8.3　对 SOD 含量的影响

图 5 表示不同时期大豆叶片的 SOD 含量，由图可见，除 T1 在灌浆成熟期 SOD 含量略降低外，各处理同对照相比 SOD 含量均有所升高。其中，T2 的 SOD 含量最高，T4 位居其次，T3 和 T1 在不同时期高低不同，在分枝到盛花期 T1 的 SOD 含量高于 T3。

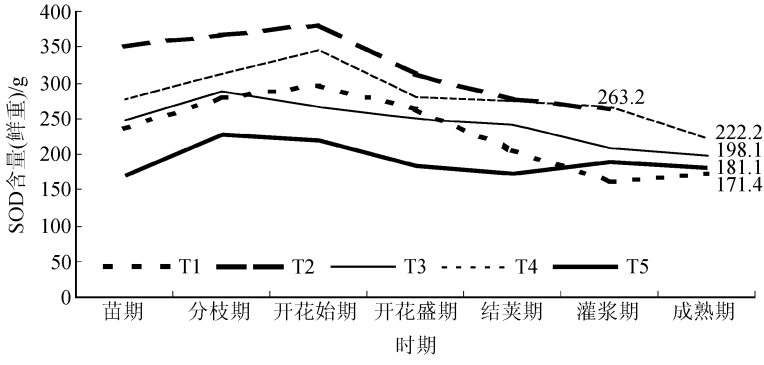


图 5　不同时期的 SOD 含量

4　讨论

C_3 植物对 CO_2 浓度增加非常敏感（大豆属于 C_3 植物），CO_2 浓度增加，C_3 的生物量和产量增加明显，但 C_4 植物仅有小幅度增加，且 C_3 植物的物种与品种差异对 CO_2 的敏感度有很大不同[22]。本试验结果（表 5、表 6 和图 1）中，单独 CO_2 浓度倍增的处理有利于作物干物质形成，对大豆生物量、籽粒产量正效应明显，无论地上还是地下部分以及总生物量基本上是呈增加趋势，这与以往结果相似。单独 CO_2 浓度倍增在鼓粒前对大豆叶片膜保护系统有明显正效应（图 3、图 4 和图 5），黄叶率低于 5%，但鼓粒后脂膜过氧化进程加快（SOD 活性下降，O_2^- 含量提高），叶片变黄速度加快，表明叶片衰老加剧。

单独 O_3倍增生物量和产量下降明显，生物量最多可减少近一半，产量最多减产60%以上；开花后，大豆叶片黄叶率上升显著（表2），叶片衰老加剧，这同图4较一致：开花后T2叶片MDA含量明显升高，脂膜过氧化加剧，加速衰老。

CO_2和O_3浓度倍增的交互作用对大豆的影响报道不多，难以进行比较，本文的试验结果是，CO_2和O_3对作物的影响并非二者单独作用的简单叠加，一定时期内，CO_2可缓解O_3对作物影响的负效应，O_3对CO_2影响的正效应有削弱作用，CO_2和O_3持续倍增和逐渐达到倍增交互作用处理（T3和T4），在生物量、产量方面表现为CO_2的影响大于O_3，在叶片膜保护系统方面表现为O_3的影响大于CO_2。鼓粒后CO_2和O_3持续倍增交互作用处理（即T3），生物量逐渐高于逐渐达到倍增交互作用处理（即T4），成熟时T3生物量和产量均高于T4。从以下三个方面，认为这个结果合理：（1）设计试验时同国内外相关试验研究做过比较，认为试验设计合理，方法正确，同以往研究有较好的可比性；取样时操作无误，指标测定方法均按国家标准或常用方法；试验结果可信；（2）尽管自然界的O_3浓度增加是逐渐变化的，但在大豆生育期这么短的一个时期内，是不可能达到如试验设计这样的步长，面对浓度增加如此之快的O_3，大豆在短时期内很难产生一定的抗逆性；而T3自始至终为O_3浓度倍增，在一个生育期内大豆都有可能增强了对O_3的抗逆性，因而在鼓粒后T3生物量增加逐渐高于T4，并在成熟时生物量和产量均高于T4；（3）图4也在一定程度上可以证明：结荚后T3 MDA含量逐渐低于T4，表明其脂膜过氧化有所缓解。

以往研究表明，CO_2浓度增加，大豆、棉花、小麦等成熟提前，对玉米影响不明显[34,35]，籽粒品质方面粗脂肪含量是上升的，本试验结果中，大豆结荚至成熟期延迟（表1），籽粒粗蛋白和粗脂肪含量均略有下降（图2），这可能是由于品种特性引起（本试验选取大豆“中黄14”，以往研究多选取大豆京冬1号[35~37]）。在本试验中，熏气处理均可造成：黄叶率上升，绿叶率下降，凋落物增加，且单独O_3浓度倍增的处理最明显；气孔阻力增加，蒸腾速率下降，这在单独CO_2浓度倍增的处理下表现得最明显，尤其在高湿阴天（表7和表8）。高O_3浓度可使大豆叶片脂质过氧化加剧，CO_2在一定程度上可以缓解这种反应（图3～5）。

对于本试验尤其是交互作用处理的结果，仍需进一步的分析和证实，因为本试验仅为一年观测资料，难以下明确的结论，仅给出试验结果并作了初步的分析和讨论。在以后的研究中，将通过进一步的试验和分析（如仍采取同样的试验方案，在不同年份间进行试验），来证明本试验结果并给出结论。如果条件允许，将多采取几个作物品种，对C_3和C_4类作物均进行研究，使该项研究更加深入一步。

参 考 文 献

1 王春乙、郭建平、郑有飞，CO_2对作物影响的研究方法及评价，二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农作物生产，北京：气象出版社，1997，3.

2 王春乙、潘亚茹、白月明等，CO_2浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究，气象学报，1997，**55**（1），86～94.

3 王春乙、郭建平、白月明等，O_3浓度增加对冬小麦影响的试验研究，气象学报，2002，**60**（1），238～242.

4 Rich, S., and N. C. Turner, importance of moisture on stomatal behavior of plants subjected to O_3, *Journal of Air Pollution Control Association*, 1972, **22** (9), 718～721.

5 Temple, P. J., O. C. Taylor, and L. F. Benoit, Cotton yield Responses to O_3 as mediated by soil moisture and evapotranspiration, *J. Environ. Qual.*, 1985, **14** (1), 55～60.

6 King, D. A., and W. L. Nelson, Assessing the impacts of soil moilsture stress on reginal soybean yield and its sensitivity to O_3, *Agri. Eco. Environ.*, 1987, **20**, 23～35.

7 Temple, P. J., Physiological and growth responses of differentially irrigated cotton to O_3, *Environ. Pollut.*, 1988, **53**, 255～263.

8 Kress, L. W., and J. M. Skelly, Response of several eastern forest tree species to chronic doses of O_3 and NO_2, *Plant Dis.*, 1982, **66** (12), 1149～1152.

9 Osamu, I., O. Kunio, K. Miyoko et al., Effects of NO_2 and O_3 alone or in combination on Kidney bean plants (Phaseolus vulgaris L.) Growth, partitioning of assimilates and root activities, *J. Experi. Bot.*, 1985, **36** (4), 652～662.

10 Goodyear, S. N., and D. P. Ormrod, Tomato response to concurrent and sequential NO_2 and O_3 exposures, *Environ. Pollut.*, 1988, **51**, 315～326.

11 Tingey, D. T., The effects of O_3 and SO_2 singly and in combination on plant growth, *Environ. Pollut.*, 1975, **9**, 117～125.

12 Olszyk, D. M., and T. W. Tibbitts, Stomatal response and leaf injury of Pisum sativum L. SO_2 and O_3 exposures, *Plant Physiol.*, 1981, **67**, 545～549.

13 Heagle, A. S., and W. W. Heck, Effects of chronic doses of O_3 and SO_2 on injury and yield of soybeans in Open－Top chambers, *Crop Sci.*, 1983, **23** (11～12), 1184～1191.

14 Reinert, R. A., and T. N. Gray, The resonses of radish to NO_2, SO_2, O_3 alone and in combination, *J. Environ. Qual.*, 1981, **10** (2), 240～243.

15 Reinert, R. A., and J. S. Sanders, Growth of radish and marigold following repeated exposure to NO_2, SO_2 and O_3, *Plant Disease.*, 1982, **66**, 122～124.

16 Adaros, G., H. J. Weigel, and H. J. Jager, Single and interactive effects of low levels of O_3, SO_2 and NO_2 on the growth and yield of spring rape, *Environ. Pollut.*, 1991, **72**, 269～286.

17 Takemoto, B. K., and D. S. Shriner, Physiological responses of soybean (Glycine max L. Merr) to simulated acid rain and ambient ozone in the field, *Water, Air Soil Pollut.*, 1987, **33**, 373～384.

18 Yunfeng Shan, Zongwei Feng, Takeshi Izuta et al., The individual and combined effects of ozone and simulated acid rain on growth, gas exchange rate and water－use efficiency of Pinus armandi Franch, *Environ. Pollut.*, 1996, **91** (3), 355～361.

19 Booker, F. W., and J. E. Miller, Effects of ozone and UV-B radiation of pigments, biomass and peroxidase activity in soybean, In Tropospheric ozone Ⅱ: Effects, Modeling and Control, Ed. R. L. Berglund, Air and Waste Management Assoc., Pittsburgh, 1992a, ansscton Series 20, 489～503.

20 Runeckels, V. C., and S. V. Krupa, The impact of UV-B radiation and ozone on terrestrial vegetation, *Environ. Pollut.*, 1994, **83**, 191～213.

21 Krupa, S. V., and R. N. Kickert, The greenhouse effect: impacts of ultraviolet-B (UV-B), carbon dioxide (CO_2), and ozone (O_3) on vegetation, *Environ. Pollut.*, 1989, **61**, 263～393.

22 Rudorff, B. F. T., C. L. Mulchi, E. H. Lee et al., Effects of enhanced O_3 and CO_2 on plant characteristics in wheat and corn, *Environ. Pollut.*, 1996, **94** (1), 53～60.

23 Mulchi, C. L., L. Slaughter, M. Saleem et al., Growth and physiological characteristics of soybean in open-top chambers in response to ozone and increased atmospheric CO_2, *Agri. Eco. Environ.*, 1992, **38**, 107～108.

24 Hough, A. M., and R. G. Derwent, Changes in the concentration of tropospheric ozone due to human activities, *Nature*, 1990, **344**, 645～648.

25 Albritton, D. L., L. G. Meira Filho, U. Cubasch et al., *Technical Summary* (*A Report Accepted by Working Group I of the IPCC*), the United States of America: Cambridge University Press, 2001, 38～41.

26 王春乙，OTC-1 型开顶式气室的结构和性能，环境科学进展，1994，**2** (3)，19～31.

27 王春乙，OTC-1型开顶式气室物理性能的测试与评价，气象，1993，**19**（5），23～26.
28 国家标准化管理委员会，中国强制性国家标准汇编，农林卷（第二版），北京：中国标准出版社，1997，5～7.
29 孙群、郎少兰、杨玉秀，郁金香衰老过程中几种保护酶活性的变化，西北植物学报，1998，**18**（4），561～565.
30 沈文飚、肖丽、狄洌等，水杨酸对NBT光化还原法测定植物SOD活性的干扰，植物生理学通讯，1999，**35**（2），133～134.
31 陈贵、胡文玉、谢甫绨等，提取植物体内MDA的溶剂及MDA作为衰老指标的探讨，植物生理学通讯，1991，**27**（1），44～46.
32 王馥棠、王石立、李友文等，春小麦黄叶率发生规律及其模拟，见：中国气候变化对农业影响的试验研究，北京：气象出版社，1991，103～109.
33 Kangasjarvi，J.，Plant defence systems induced by ozone，*Plant* ，*Cell Environ.*，1994，**17**，783～794.
34 Blokhina，O. B.，and K. V. Fagerstedt，Relationship between lipid peroxidation and anoxia tolerance in a range of species during post－anoxia reaeration，*Physiologia Plantarum*，1999，**105**，625～632.
35 郭建平，高素华，白月明等，CO_2浓度倍增对大豆叶片和总生物量的影响研究，应用气象学报，1995，**6**（11）增刊：62～68.
36 郭建平、高素华、白月明等，CO_2浓度倍增对大豆影响的试验研究，大气科学，1996，**20**（2），243～249.
37 王春乙、潘亚茹、白月明等，CO_2浓度倍增对中国主要作物影响的试验研究，气象学报，1997，**55**（1），86～93.

A Diagnostic Experiment Study of the Composite Influence of Increasing O_3 and CO_2 Concentration on Soybean

Huang Hui，Wang Chunyi，Bai Yueming，and Wen Min

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

Abstract A long time experiment inside five open top chambers is made to study the impacts of different concentrations of ozone and/or carbon dioxide on "ZHONGHUANG-14" cultivars soybean. The results show that ozone concentration doubling may lead to：contents of protein increasing 6.2%，biomass decreasing proximity 50%，yield decreasing over 60% and fat decreasing 7.6%. Under ozone concentration doubling，the lipid peroxidation is accelerated. Contrarily，carbon dioxide concentration doubling causes positive effect on biomass and yield，which increase respectively 21.0% and 20.3% at maturity period. There are inhibited lipid peroxidation before pod stage as well as decreased protein and fat under doubling carbon dioxide. The mixed ozone and carbon dioxide may alleviate the negative effect of ozone on biomass and yield of soybean. The mixed treatments also lead to promoting lipid peroxidation and fat as well as dropping protein. Exposuring treatments can all lead to increasing yellow leaf ratio，Superoxide Dismutase（SOD）and stomata resistance as well as decreasing green leaf ratio and transpiration.

Key words：open top chamber；ozone；carbon dioxide；soybean