

CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用对华山松生长及光合日变化的影响

王兰兰^{1,2,3}, 何兴元¹, 陈玮¹

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 沈阳师范大学化学与生命科学学院, 沈阳 110034; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以生长在沈阳市区内的 5 年生华山松幼树为实验材料, 采用开顶箱法, 研究高浓度 CO₂ 和高浓度 O₃ 下华山松生长变化、光合速率的日变化动态以及日光合总量季节变化, 进而了解大气 CO₂ 浓度升高、O₃ 浓度升高及其复合作用对华山松光合作用及生长的影响。结果表明, ①高浓度 O₃ 处理后, 华山松 20~90 d 针叶鲜重、干重增长量以及 90 d 针叶叶长较对照分别降低 45.8%、38.9% 和 15.3%。主侧枝生长与对照相比无显著差异。高浓度 O₃ 降低了华山松日光合总量, 处理 30 d 后, 针叶净光合速率均显著低于对照, 光合速率日变化曲线表现为双峰型, 光合“午休”程度强于对照。②高浓度 CO₂ 处理后, 华山松针叶鲜重、干重 20~90 d 增长量分别高于对照 41.7% 和 22.2%, 而针叶叶长以及主侧枝长未受显著影响。华山松日光合总量高于对照处理。处理 30 d、60 d 时, 净光合速率普遍高于对照。CO₂ 处理 90 d 时, 日变化曲线由双峰变为单峰曲线, 极大缓解了光合“午休”现象。③高浓度 O₃ 和 CO₂ 复合处理后, 针叶干重、鲜重增量均低于对照, 表明了复合处理后 O₃ 伤害的发生, 但针叶干重高于 O₃ 单因子处理, 这表明高浓度 CO₂ 可以一定程度上缓解高浓度 O₃ 对华山松针叶生长的抑制作用。针叶叶长、主侧枝生长未见明显效应。复合处理后, 针叶净光合速率普遍低于对照, 华山松日光合总量低于对照而高于 O₃ 单独处理, 说明高浓度 CO₂ 可以通过减缓 O₃ 对植物光合的抑制而减少 O₃ 伤害。光合速率日变化曲线表现为双峰型。

关键词: 华山松; CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用; 生长; 光合日变化

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)01-0036-05

Effects of Elevated CO₂ or/and O₃ on Growth and Daily Changes of Photosynthesis in Leaves of *Pinus armandi*

WANG Lan-lan^{1,2,3}, HE Xing-yuan¹, CHEN Wei¹

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. College of Chemical and Life Science, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To study the responses of growth and daily changes of photosynthesis in leaves of *Pinus armandi* to elevated O₃, elevated CO₂ and elevated O₃ + CO₂ in urban area, experiment was conducted in Shenyang Arboretum located at the center of the city. Five-year-old trees grown in open-top chambers (OTC) were exposed to control, elevated O₃ and elevated O₃ + elevated CO₂ for a growing season, and the growth (fresh weight, dry weight, leaf length, axial shoot, lateral shoot), daily changes and diurnal assimilation amounts of *Pinus armandi* leaves were measured. The results showed that ① the increments of fresh weight and dry weight in 70 days were reduced 45.8% and 38.9% by elevated O₃ compared to the control. After 90 days, leaf length decreased 15.3%, but there were no significant difference detected in axial shoot and lateral shoot compared to the control. Diurnal assimilation amounts were decreased in elevated O₃ treatment, and after 30 days exposure, net photosynthesis rate (P_n) of leaves was decreased significantly compared to the control. Under O₃ exposure, the diurnal pattern of net photosynthetic rate curve was two peaks, and a midday depression at noon was lower than control. ② Under elevated CO₂ exposure, the increments of fresh weight and dry weight in 70 days were increased 41.7% and 22.2%, but leaf length, axial shoot and lateral shoot after 90 days were not changed compared to control. Diurnal assimilation amounts were increased after elevated CO₂ exposure in total, and in 30 and 60 days, net photosynthesis rates (P_n) of leaves were higher than that of control mostly. From diurnal variation of P_n, the diurnal pattern of net photosynthetic rate curves of *Pinus armandi* leaf was changed from two-peaks to one-peak curve after 90 days elevated CO₂ exposure, that means the midday depression was relieved by high CO₂. ③ When trees were exposed to both elevated O₃ and elevated CO₂, the increments of fresh weight and dry weight in 70 days were all decreased compared to the control, which indicates that season-long exposure to elevated O₃ had a greater effect on *Pinus armandi* leaves than elevated CO₂, but dry weight was significantly higher than the only elevated O₃ treatment, that

收稿日期: 2009-01-19; 修订日期: 2009-06-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (90411019)

作者简介: 王兰兰 (1978~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为城市森林对全球变化的响应, E-mail: wangqi5387402006@yahoo.com.cn

means the O₃-induced negative effect to growth of leaves can be ameliorated by elevated CO₂. There were also no effects on leaf length, axial shoot and lateral shoot after 90 days exposure. When elevated O₃ and CO₂ were combined, net photosynthesis rate (P_n) of leaves was lower than that of control mostly. Diurnal assimilation amounts were significantly lower than control but higher than only elevated O₃ treatment, which indicated that high CO₂ can largely relieve the damage of high O₃ to photosynthesis of *Pinus armandi* leaves. The diurnal pattern of net photosynthetic rate curves of *Pinus armandi* leaf were also two-peak curves.

Key words : *Pinus armandi*; elevated CO₂ or/and O₃; growth; daily changes of net photosynthetic rate

CO₂ 是最主要的温室气体,工业革命以来,大气 CO₂ 浓度不断升高,这主要是由于人类使用化石燃料和毁林等活动引起的^[1],2007 年 11 月 23 日世界气象组织发布的《2006 年温室气体公报》指出,2006 年大气中的 CO₂ 浓度为 381.2×10^{-6} ,比前一年上升了 0.53%,是有记录以来的最高值。O₃ 在平流层起到保护人类和环境的重要作用,但是,如果对流层大气中 O₃ 浓度增高,就会对自然环境及生态系统造成一系列的不利影响。从 19 世纪中叶开始,对流层中的 O₃ 水平增加了 35%^[2]。今后 20 a 中国 O₃ 前体的释放会成倍增加,因此 O₃ 浓度也会随之增大^[3]。那么这 2 种温室气体浓度的升高将给植物以及整个生态系统带来怎样的影响?许多国内外研究者对此展开了大量的研究。大气 CO₂ 和 O₃ 浓度的上升对生态系统最直接也是最重要的影响是其引起的光合作用的变化,进而对植物生长产生影响。高浓度 CO₂ 通常促进植物光合及生长,相反, O₃ 浓度的升高却会对植物产生负面影响^[4-6]。以往研究比较多地针对 CO₂ 和 O₃ 的单一因子的作用影响,国外一些研究者研究过有关 CO₂ 和 O₃ 的相互作用对植物光合生理的影响^[2,7,8],但究竟高浓度 O₃ 多大程度上抑制植物生长及光合,以及高浓度 CO₂ 能否缓解 O₃ 对植物叶片光合、生长的抑制作用尚无定论。且国外研究主要针对其本土植物,而适合中国的品种及其在中国环境下的研究显得不足,从国内研究现状来看,相关研究较少,且主要是针对作物的研究^[9]。

另外,城市是温室气体的主要排放源,城市化将加剧全球气候的变化,同时城市也是感受气候变化最敏感的区域,因此本研究将实验地设在沈阳市区,采用开顶箱法研究高浓 CO₂、O₃ 及其复合作用下城市华山松生长和光合日动态变化,揭示了 CO₂ 和 O₃ 浓度升高及其复合作用对华山松光合生长变化的影响,以期为研究城市森林对全球变化的响应提供重要理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域与实验设备

研究区位于中国科学院沈阳树木园内,是沈阳市人口密集商业文化中心地带。在地理上,位于 41°46'N,123°26'E,占地面积约 5 hm²。

2005 年,在沈阳树木园内,建立了一套适用于木本植物生长的 OTC-I 型开顶式气室(the open-top chamber)气体监控测试系统,气室完全采用钢制骨架,底面为正六边形直径为 400 cm,高为 300 cm,气室上部为向内倾斜 45°斜面,以减少充入气体从顶部飘出。钢梁之间全部镶玻璃,玻璃表面时时保持清洁,以达到较高的透光率。以环保型玻璃胶密封各处接缝,保持气室下部良好的气密性,防止气体散失。各气室之间的距离为 400 cm,避免气室之间相互遮光。

实验共设 4 个处理(T1~T4),每个处理设 3 次重复,共 12 个开顶箱。

T1(AA,ambient air)为 OTC 对照箱,气室内不通过任何气体,CO₂ 浓度约为 $380 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,O₃ 浓度为 $40 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$,均为本底浓度;T2(EO,elevated O₃)中 O₃ 浓度为 $80 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$,约为目前本底 O₃ 浓度的 2 倍,CO₂ 为本底浓度;T3(EC,elevated CO₂)中 CO₂ 浓度为 $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,约为目前大气本底 CO₂ 浓度的 2 倍,O₃ 为本底浓度;T4(EO+EC,elevated CO₂ and O₃)中 CO₂ 浓度为 $700 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,O₃ 浓度为 $80 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

CO₂ 气体以钢瓶装纯 CO₂ 提供气源。O₃ 气体利用 O₃ 发生器供给气源。本实验选用的发生器为 GP-5J 型高频 O₃ 发生器。采用高性能瑞典 SenseAir CO₂ 传感器与新西兰 Series 900 O₃ 分析仪直接吸入气体,分别实现对 CO₂ 与 O₃ 的监测,输出标准电压及电流信号,进入气室控制系统。

1.2 实验材料

选取 5 年生华山松为实验材料,于 2007 年 4 月将其移栽于开顶箱内。每箱各 8 株,随机分布。实验采用露地栽培,为确保各箱土质、肥力均匀,取出 30 cm 厚度内表层土壤拌匀灭菌后回填。实验期间保证水分充足,无水、肥、病虫害等非实验因素影响。2007-06-18~2007-09-20 通气,CO₂ 每天 24 h 不间断通气,O₃ 每天 9 h 熏蒸(08:00~17:00)。

1.3 测定指标及实验方法

1.3.1 生长参数

通气 20 d、90 d 后分别测定华山松针叶鲜重(五针一束)干重(五针一束)09 100 采摘针叶,迅速测定其鲜重后,然后在 80℃ 烘干 8 h,测定其干物质重.通气 90 d 后分别测定华山松针叶叶长及主侧枝长.每个开顶箱随机取 10 个针叶测定针叶叶长,主枝每个处理测定 9 次重复,侧枝测定 27 次重复.

1.3.2 光合日变化的测定

采用 Li-6400 便携式光合测定仪,从 6 月 18 日开始,大约每 30 d 选取晴好、无风的典型观测日,对开顶箱内华山松针叶净光合速率进行控制条件下的日变化定位观测.取样方法:随机选取测试树木东南方向向阳枝条中部叶,待系统稳定后,读取 3~5 个瞬时光合速率,每个处理重复 3 次,计算其平均值.

1.3.3 日光同化总量

在树木光合作用日变化曲线中,其同化量是净光合速率曲线与时间横轴围合的面积,即图 1 中的阴影部分.以此为基础,设净同化量为 p ,各树种在测定当日的净同化量计算公式为:

$$p = \sum_{i=1}^j [(P_{i+1} + P_i) \div 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 3\,600 \div 1\,000]$$

式中, p 为测定日的同化总量,单位为 $\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, P_i 指初测点的瞬时光合速率, P_{i+1} 为下一测点的瞬时光合速率,单位为 $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, t_i 为初测点的瞬时时间, t_{i+1} 为下一测点的时间,单位为 h, j 为测试次数,3 600 指每小时 3 600 s,1 000 指 1 mmol 为 1 000 μmol .

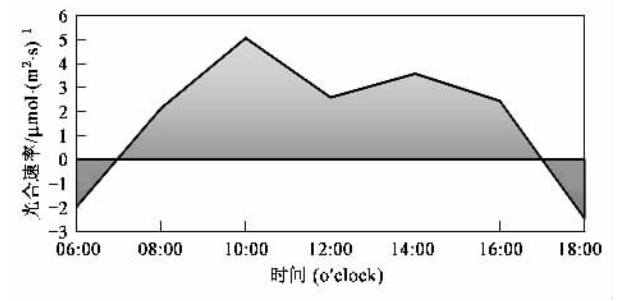


图 1 植物光合作用日同化量计算示意

Fig. 1 Calculation of diurnal assimilation amounts of plant

1.3.4 数据处理

部分数据采用方差分析(one-way ANOVA)和 LDS 多重比较检验进行统计分析,并以平均值±标准差表示, $p < 0.05$ 为差异显著.

2 结果与讨论

2.1 华山松生长变化

普遍认为大气 O_3 浓度升高可降低植物生物量,使农作物减产^[10-12],而植物对 O_3 胁迫的反应程度也因植物种类、发育阶段、以及环境条件的不同而存在差异^[13].本研究结果表明高浓度 O_3 显著降低了华山松针叶生长量,针叶鲜重、干重 20~90 d 增长量显著低于对照,下降比率分别为 45.8% 和 38.9% (如表 1).生长季末(90 d)针叶叶长与对照相比下降 15.3%,而华山松主侧枝生长未见显著影响(如表 2). CO_2 是植物光合作用唯一碳源,高质量浓度 CO_2 通过提高净光合速率,增加光合产物而影响植物生长,增加生物量^[14,15].本研究结果表明高浓度 CO_2 处理后,华山松针叶鲜重、干重 20~90 d 增长量显著高于对照,分别上升 41.7% 和 22.2% (如表 1).而处理 90 d 后,其针叶叶长以及主侧枝长较对照无显著差异(如表 2).由此可见,经过一个生长季处理后,高浓度 O_3 和 CO_2 分别对华山松幼树在叶片水平上产生了显著影响.有关 2 种气体同时增加对树木生长的影响的机制目前尚未有明确的定论,有关对松树的研究中指出: O_3 和 CO_2 的混合气体对生长的影响和单独 O_3 气体双倍浓度处理很相似^[16].而对北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera* L.)的研究表明复合作用促进了叶的生长,高浓度 CO_2 缓解了 O_3 对鹅掌楸生长和根的生物量的抑制作用^[17].本试验结果表明 2 种气体复合处理后,华山松针叶鲜重显著低于对照,而与 O_3 处理差异不显著(如表 1),表明了复合处理后 O_3 伤害的发生.而针叶干重在则低于对照而高于 O_3 单因子处理(如表 1),这表明高浓度 CO_2 可以一定程度上缓解高浓度 O_3 对华山松针叶生长的抑制作用.而与对照相比,二者的复合对针叶叶长、主侧枝生长未见明显效应(如表 2).

表 1 CO_2 、 O_3 浓度升高及其复合作用对华山松针叶鲜重和干重的影响/g

Table 1 Effects of elevated O_3 , elevated CO_2 and elevated $\text{O}_3 + \text{CO}_2$ exposure on leaf weight of *Pinus armandi* needles/g

处理	针叶鲜重(五针一束) 增量(20~90 d)	针叶干重(五针一束) 增量(20~90 d)
AA	0.024 ± 0.003 1a	0.005 4 ± 0.000 305a
EO	0.013 ± 0.003 3b	0.003 3 ± 0.000 486b
EC	0.034 ± 0.003 5c	0.006 6 ± 0.000 309c
EO + EC	0.016 ± 0.003 1b	0.004 2 ± 0.000 369d

1) 相同小写字母表示差异不显著($p \geq 0.05$),不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$),下同

表 2 CO₂、O₃浓度升高及其复合作用对华山松叶长
及主侧枝生长的影响/cm

Table 2 Effects of elevated O₃ , elevated CO₂ and elevated
O₃ + CO₂ exposure on leaf length and axial and lateral
shoot of *Pinus armandi* needles after 90 d/cm

处理	叶长(90 d)	主枝长(90 d)	侧枝长(90 d)
AA	11.816 ± 0.454a	101.607 ± 10.694a	21.324 ± 1.956a
EO	10.014 ± 0.454b	102.069 ± 11.269a	20.390 ± 1.965a
EC	11.907 ± 0.549a	105.792 ± 9.128a	21.135 ± 2.546a
EO + EC	11.813 ± 0.542a	104.611 ± 10.488a	22.745 ± 2.055a

2.2 华山松光合日变化的季节动态

由于影响叶片光合作用的环境因子(温度、光照、水分等) 在 1 d 中发生明显的变化, 因此叶片光合速率也呈现出相应的变化规律. 叶片光合速率在晴天的日变化进程典型曲线一般为单峰或双峰曲线. 逆境时, 叶片光合速率的日进程可以变成一条双峰曲线, 上、下午各有一个高峰, 在两峰之间形成一个低谷. 这个低谷被称为光合作用的中午降低或“ 午休”. 国内有学者对部分树种的光合作用日变化进行了研究, 如在有关麻栎净光合速率的日变化的研究表明, 在生长初期和末期单峰曲线, 而在生长盛期为双峰型^[18]. 张小全^[19]对杉木光合作用日变化进行研究, 认为在夏季晴天为双峰曲线, 在阴天为单峰曲线. 对于有关光合“ 午休” 的现象, 人们已经做过不少研究, 并提出许多假说, 许大全^[20]对有关研究进行综合分析, 认为低空气湿度、气孔导度降低、ABA 合成增加、光系统 II 光化学效率下降、光呼吸升高、RUBP 羧化酶活性降低等因素是导致光合“ 午休” 现象的可能原因. 然而, 光合“ 午休” 现象发生的机制迄今还不很确定. 有关 CO₂ 和 O₃ 浓度升高条件下树木光合日变化季节动态的研究还鲜见报道. 本实验从 6 月 18 日开始, 每 30 d 选择晴朗的天气测定华山松光合速率日变化曲线. 由图 2 所示, 处理 0 d 时, 各处理华山松针叶光合速率日变化曲线均为单峰型, 早晚低, 中午高, 峰值出现在 11 00 左右, 最大峰值为 6.4 μmol·(m²·s)⁻¹. 高浓度 O₃ 处理 30 d 后, 华山松针叶净光合速率全天普遍显著低于对照(*p* < 0.05), 光合“ 午休” 程度加重, 表现为降幅增大, 光合速率日变化曲线表现为双峰型. CO₂ 处理 30 d、60 d 时, 华山松净光合速率普遍高于对照, 光合速率日变化曲线为双峰型, 最大峰值分别出现在 09 30 左右, 且曲线峰型与对照基本一致. 随着处理时间的延长, CO₂ 处理 90 d 时, 日变化曲线变为单峰曲线, 极大缓解了中午的, 光合“ 午休” 现象, 而其它处理曲

线仍表现为双峰型. 复合处理下, 华山松针叶净光合速率普遍低于对照, 光合速率日变化曲线表现为双峰型, 与对照相比, 光合“ 午休” 程度加重, 如处理 30 d、60 d 中午时间 13 00 左右出现最低值, 且显著低于对照(*p* < 0.05), 但高于单因子 O₃ 处理.

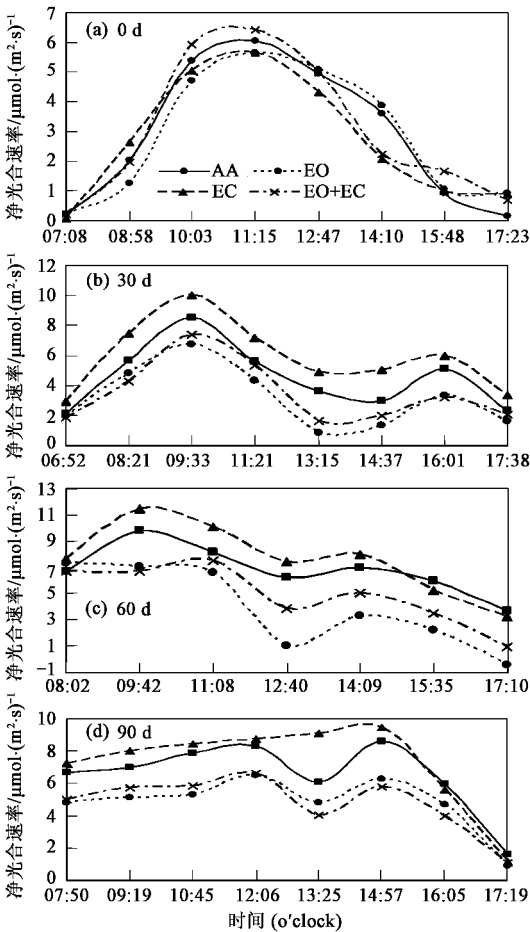


图 2 CO₂、O₃浓度升高及其复合作用对华山松光合日变化的影响

Fig.2 Effects of elevated O₃ ,elevated CO₂ and elevated CO₂ + O₃ on daily changes of net photosynthetic rate(*P_n*) of *Pinus armandi* needles

2.3 华山松日光合总量季节变化

如图 3 所示, 华山松针叶日光合总量表现为: 高浓度 O₃ 处理下低于对照, 高浓度 CO₂ 处理下高于对照, 复合处理下 90 d 前则低于对照高于 O₃ 单独处理. 可见, 经过整个生长季处理后, 高浓度 O₃ 降低了华山松光合总量, 进而抑制了针叶的生长量, 相反, 高浓度 CO₂ 处理下, 华山松日光合总量高于对照处理, 进而促进针叶总同化量, 使其季末干鲜重高于对照. 而复合处理下, 日光合总量则低于对照而高于 O₃ 单独处理说明高浓度 CO₂ 可以通过减缓 O₃ 对植

物光合的抑制进而减少 O₃ 伤害,这一点也可以从华山松针叶干重变化上得以体现.

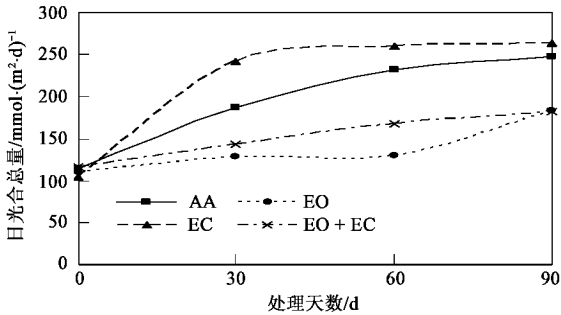


图3 CO₂、O₃浓度升高及其复合作用对华山松针叶日光合总量变化的影响

Fig.3 Effects of elevated O₃, elevated CO₂ and elevated CO₂ + O₃ on diurnal assimilation amounts of *Pinus armandi* needles

3 结论

(1)高浓度 O₃ 显著降低了华山松针叶鲜重、干重生长量,并使针叶叶长季末低于对照,但未对主侧枝生长显示明显效应.高浓度 O₃ 处理 30 d 后,华山松针叶净光合速率均显著低于对照,光合速率日变化曲线表现为双峰型,光合“午休”程度强于对照.高浓度 O₃ 降低了华山松针叶日光合总量,进而抑制华山松针叶生长.

(2)高浓度 CO₂ 处理下,华山松针叶鲜重、干重 20~90 d 增长量显著高于对照.而针叶叶长以及主侧枝长未受显著影响.CO₂ 处理时,华山松净光合速率普遍高于对照,且处理 90 d 时光合“午休”现象得到极大缓解了.高浓度 CO₂ 处理下,华山松针叶日光合总量高于对照,促进了针叶总同化量.

(3)高浓度 O₃ 和 CO₂ 复合处理下,华山松针叶净光合速率普遍低于对照高于单因子 O₃ 处理,针叶干重、鲜重增量(20~90 d)均低于对照,但针叶干重高于 O₃ 单因子处理,表明高浓度 CO₂ 可以通过减缓 O₃ 对植物光合的抑制进而一定程度上缓解高浓度 O₃ 对针叶干物质生长的抑制.

参考文献:

[1] 方精云. 全球生态学:气候变化与生态响应[M].北京:高等教育出版社,2000.
[2] IPCC Climate change 2001: the scientific basis. Report of working group I of the intergovernmental panel on climate Change[M]. Geneva: IPCC Secretariat, 2001.

[3] Aunan K, Bernsten T K, Seip H M. Surface ozone in china and its possible impact on agricultural crop yields[J]. AMBIO, 2000, 29 (6): 194-301.
[4] Percy K E, Awmack C S, Lindroth R L, et al. Altered performance of forest pests under atmospheres enriched by CO₂ and O₃[J]. Nature, 2002, 420: 403-407.
[5] Drake B G, González-Meler M A, Long S P. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO₂?[J]. Annu Rev, Plant Physiol Plant Mol Biol, 1997, 48: 609-639.
[6] Pell E J, Eckardt N, Glick R E. Biochemical and molecular basis for impairment of photosynthetic potential[J]. Photosynth Res, 1994, 39: 453-462.
[7] Karnosky D F, Zak D R, Pergitzer K S, et al. Tropospheric O₃ moderates responses of temperate hardwood forests to elevated CO₂: a synthesis of molecular to ecosystem results from the Aspen FACE project[J]. Funct Ecol, 2003, 17: 289-304.
[8] Paoletti E. Impact of ozone on Mediterranean forest: a review[J]. Environ Pollut, 2006, 144: 463-474.
[9] 黄辉. 近地层 CO₂ 和 O₃ 浓度增加对作物影响的试验研究[D].北京:中国气象科学研究院, 2003.
[10] Schuize E D, Ogren R, Lange O L. Processes leading to forest decline: A Synthesis in Forest Decline and Air Pollution[A]. In: Schulze E D, Lange O L, Ogren R (eds). A Study of Spruce(*Picea abies*) on Acid Soils[M]. Ecological Studies Springer Verlag, Berlin, 1989, 77: 459-467.
[11] Treshow M, Anderson F K. Plant Stress from Air Pollution[M]. New York: John W. & Sons., 1989.
[12] Lesser V M, Rawlings J O, Spruill S E, et al. Ozone effects on agricultural crops: Statistical methodologies and estimated dose-response relationships[J]. Crop Sci, 1990, 30: 148-155.
[13] Heck W W, Miller J E. Air pollution: plant growth and productivity[M]. In: Amtyen C J (ed). Encyclopedia of Agricultural Science[C]. San Diego, CA: Academic Press, 1994. 27-39.
[14] Kimhali B A, Rosenberg N J, Allen L H, et al. Impacts of carbon dioxide, trace gases and climate change on global agriculture[M]. Madison, USA: American Society of Agronomy, 1990.
[15] 王春乙, 潘亚茹, 白月明, 等. CO₂ 倍增对几种主要农作物影响的实验研究[J]. 气象学报, 1997, 55: 86-94.
[16] Kellomaki S, Wang K Y. Daily and seasonal CO₂ exchange in Scots pine grown under elevated O₃ and CO₂: experiment and simulation[J]. Plant Ecol, 1998, 136: 229-248.
[17] Rebbeck J, Scherzer A J. Growth responses of yellow-poplar (*Liriodendron tulipifera* L.) exposed to 5 years of O₃ alone or combined with elevated CO₂[J]. Plant Cell Environ, 2005, 25 (11): 1527-1537.
[18] 谢会成. 栓皮栎光合生理生态研究[D].南京:南京林业大学, 2002.
[19] 张小全. 杉木中龄林不同部位和叶龄针叶光合特性的日变化和季节变化[J]. 林业科学, 2000, 36(3): 19-26.
[20] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2002.