

臭氧浓度升高对大豆光合作用及产量的影响

金东艳,赵天宏,付宇,孙加伟,黄爽

(沈阳农业大学农学院,辽宁 沈阳 110161)

摘要:研究大气 O₃ 浓度升高对大豆光合作用及籽粒产量的影响,利用开顶式气室对大豆进行熏蒸,测定大豆叶片净光合速率、气孔导度等光合指标,以及大豆叶片的 Chla、Chlb、Chl(a+b) 及 Chla/b 值。结果表明:在整个生育期中,与对照相比,高浓度 O₃ (110 nmol·mol⁻¹) 熏蒸下,大豆叶片 *Pn* 呈极显著下降($P<0.01$),*Gs*、*Ci*、*Tr* 均先增高后降低,叶绿素含量下降。大豆百粒重下降不显著($P>0.05$),而单株荚数、单株粒重和单株粒数下降达极显著水平($P<0.01$)。说明大气 O₃ 浓度升高对大豆植株具有伤害作用,通过减弱叶片光合作用强度,减少大豆开花数量、阻碍花粉受精过程,从而降低大豆产量。

关键词:臭氧浓度升高;大豆;光合作用;产量

中图分类号:S565.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-9841(2009)04-0632-04

Effects of Elevated Ozone Concentration on Soybean Photosynthesis and Yield

JIN Dong-yan,ZHAO Tian-hong,FU Yu,SUN Jia-wei,HUANG Shuang

(College of Agronomy,Shenyang Agricultural University,Shenyang 110161,Liaoning,China)

Abstract:In recent years,the elevated ozone has some significant effects on plant photosynthesis,respiration,water availability and so on. In this paper,the effects of the elevated ozone concentrations on soybean photosynthesis and yield were studied in use of open-top chambers. Photosynthetic traits of *Pn*,*Gs*,*Ci*,*Tr* and contents of Chla,Chlb,Chl(a+b) and Chla/b were determined. The results showed that *Pn* reduced significantly($P<0.01$),*Gs*,*Ci* and *Tr* ascended firstly and declined following,the contents of Chla,Chlb,Chl(a+b) and Chla/b of soybean leaves under elevated ozone (110 nmol·mol⁻¹) were lower than that of control. The decrease of 100-seed weight of soybean was not significant($P>0.05$),but the decrease of grain weight per plant and grains per plant was significant($P<0.01$). It indicates that elevated ozone has more negative influence to the soybean,which reduces the soybean photosynthesis intensity and the amount of flowers and inhibits the process of pollen fertilization,thus reduces the yield on soybean.

Key words:Elevated ozone;Soybean;Photosynthesis;Yield

近年来,对流层中 O₃ 浓度日益提高,每年以 0.5%~2.5% 速率增长,北半球中纬度地区(36°~59°N)的近地表 O₃ 浓度已从工业期前的 10 nmol·mol⁻¹ 上升到现在的平均区域浓度近 60 nmol·mol⁻¹,预计到 2100 年对流层中 O₃ 浓度将增加一倍^[1]。因此,O₃ 浓度升高对植物的危害日益受到人们的关注。大量模拟试验表明,O₃ 浓度升高对植物的光合作用产生不同程度的影响^[2-3]。高浓度 O₃ 处理使银杏叶片净光合速率下降^[4];O₃ 浓度升高可显著降低小麦(*Triticum aestivum*)^[5] 与水稻(*Oryza sativa*)^[6] 叶片叶绿素含量。目前,对大豆的抗逆性

研究主要集中在水分、温度、重金属等方面,但对 O₃ 浓度升高条件下,大豆不同生育时期光合作用变化及其对产量影响机制的研究报道较少。采用开顶式气室对大豆进行熏蒸处理,通过对臭氧胁迫下相关光合生理指标的测定,探讨了 O₃ 胁迫下大豆产量降低的生理机制问题,为研究植物抗逆适应性机制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试材

大豆品种为铁丰 31。

收稿日期:2009-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30500069,30570348)。

作者简介:金东艳(1984-),女,在读硕士,研究方向为植物生理生态。E-mail:rose27242003@yahoo.com.cn。

通讯作者:赵天宏,博士,副教授。E-mail:zth1999@163.com。

试验于2008年4月播种大豆,试验地点在中国科学院沈阳野外农田生态系统生态站。将大豆均匀种植在6个结构和性能完全相同的开顶式气室(OTC)中(边长1.15 m,高2.4 m,玻璃室壁,正八边形),每个气室保苗100~120株。气室中安装监控开顶箱内O₃浓度的臭氧发生器(GP-5J,中国)和臭氧传感器(S-900,新西兰),用于采集开顶箱内温湿度数据的温湿度传感器以及数据分析与自动控制充气系统。

1.2 试验设计及处理方法

试验设2个处理,即臭氧浓度升高(O₃浓度为110±10 nmol·mol⁻¹)处理和对照(自然空气中O₃浓度,约45 nmol·mol⁻¹,CK)处理。待大豆进入分枝期开始对气室通气,通气时间为8 h·d⁻¹(8:00~16:00)。分别在分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期取样,选择大豆植株全展叶为试材测定光合生理指标,每个处理气室间重复3次,气室内重复3次。

1.3 测定方法

1.3.1 光合指标测定 利用美国LI-COR公司生产的LI-6400型便携式光合作用测定仪测定各处理生长环境和对照环境中供试植物的气体交换参数,包括叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、和细胞间隙CO₂浓度(C_i)。在分枝期、开花期、结荚期、鼓粒期选取完全展开功能叶10片,测定叶片中间部位,每叶重复3次,于晴天上午9:00~11:00测定完成。

1.3.2 叶绿素含量 用80%的丙酮提取,于646 nm、663 nm和470 nm处测定吸光度,根据 Lichtenthaler 和 Wallbum^[7]的修正公式计算叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)、叶绿素(a+b)(Chl(a+b))的含量及叶绿素a/b(Chl a/b)的值。气室内重复测定3次。

1.3.3 籽粒产量 植株收获后,选取大豆15株,籽粒自然风干,分别测定籽粒的百粒重、单株粒重及单株粒数等大豆籽粒产量的相关指标,用电子分析天平(感量0.001)称重,气室内3次重复。

1.4 统计分析

数据采用DPS数据处理系统和Microsoft Excel 2003软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 O₃浓度升高对大豆叶片光合作用的影响

2.1.1 净光合速率(P_n) 由图1可以看出,O₃浓

度升高可降低大豆叶片净光合速率(P_n)。整个生育期中,大豆P_n呈先升高后降低的趋势,分枝期中O₃浓度升高条件下的大豆叶片净光合速率与对照无显著差异。随着生育期的延长,高浓度O₃处理下的大豆叶片P_n与CK差异极显著(P<0.01),分别降低47.21%,50.29%,47.78%。

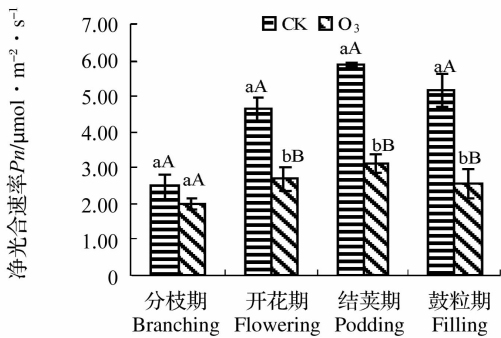


图1 O₃浓度升高对大豆叶片P_n的影响

Fig. 1 Effect of elevated ozone concentration on the net photosynthetic rate of soybean leaves

2.1.2 气孔导度(G_s) O₃处理下的大豆叶片G_s均低于CK(图2),并同样呈先升高后降低的趋势。比较不同生育时期,CK在结荚期G_s达到最高,而O₃处理下的G_s在开花期就已达到最高值。同时,从结荚期开始CK与O₃处理G_s值极显著差异(P<0.01),分别比CK降低18.53%和24.30%。

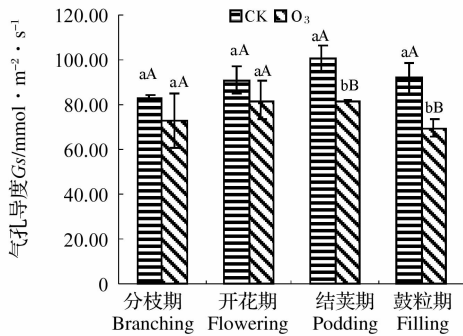


图2 O₃浓度升高对大豆叶片G_s的影响

Fig. 2 Effect of elevated ozone concentration on the stomatal conductance of soybean leaves

2.1.3 胞间CO₂浓度(C_i) 从图3可知,CK和O₃处理在整个生育期均呈相同生长趋势,即先升高后降低,并且O₃>CK。其中分枝期和鼓粒期两处理的差异不显著,开花期呈显著趋势(P<0.05),O₃相对CK升高7.75%。结荚期极显著(P<0.01),O₃相对CK升高21.8%。

2.1.4 蒸腾速率(T_r) 在整个生长季中,O₃处理

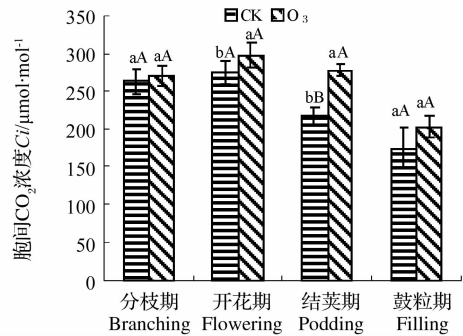


图3 O₃浓度升高对大豆叶片 *C_i* 的影响
Fig.3 Effect of elevated O₃ on transpiration rate concentration in soybean leaves

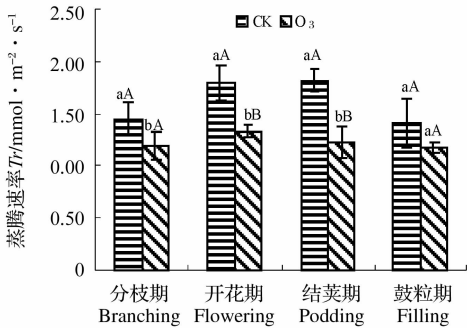


图4 O₃浓度升高对大豆叶片 *T_r* 的影响
Fig.4 Effect of elevated O₃ on intercellular CO₂ in soybean leaves

的 *T_r* 始终低于 CK。在四个生育时期中,CK 在鼓粒期的 *T_r* 下降较大,而 O₃则变化不大,导致鼓粒期 O₃ 处理和 CK 差异不显著($P>0.05$)。在其他 3 个生育时期分别达到显著($P<0.05$)和极显著($P<0.01$),分别为 17.93% ,25.7% 和 32.97%。

2.2 O₃浓度升高对大豆叶片叶绿素含量的影响

从整体趋势可以看出 O₃处理下大豆叶片的

Chla、Chlb、Chl(a + b) 和 Chla/b 平均含量均低于 CK (表 1)。Chla 的降低幅度为 15.46% ~ 23.97% ;Chlb 除鼓粒期外,下降幅度为 2.74% ~ 12% ;Chl (a + b) 的降低幅度为 13.95% ~ 15.61% ;Chla/b 的降低幅度为 3.08% ~ 29.73%。除分枝期外,O₃处理下的 Chla/b 呈显著下降趋势($P<0.05$)。

表1 O₃浓度升高对大豆叶片叶绿素含量的影响
Table 1 Effects of elevated O₃ on chlorophyll content in soybean leaves

生育时期 Growing stage	处理 Treatment	Chl a /mg · g ⁻¹ FW	Chl b /mg · g ⁻¹ FW	Chl (a + b) /mg · g ⁻¹ FW	Chl a / b
分枝期 Branching	CK	0.97 ± 0.02 aA	0.75 ± 0.03 aA	1.72 ± 0.04 aA	1.30 ± 0.05 aA
	O ₃	0.82 ± 0.04 bB	0.66 ± 0.11 aA	1.48 ± 0.15 bA	1.26 ± 0.16 aA
开花期 Flowering	CK	1.24 ± 0.14 aA	0.73 ± 0.02 aA	1.98 ± 0.13 aA	1.70 ± 0.20 aA
	O ₃	0.97 ± 0.03 bA	0.71 ± 0.06 aA	1.69 ± 0.03 bA	1.37 ± 0.14 bA
结荚期 Podding	CK	1.34 ± 0.03 aA	0.83 ± 0.03 aA	2.17 ± 0.05 aA	1.61 ± 0.04 aA
	O ₃	1.04 ± 0.10 bA	0.80 ± 0.18 aA	1.84 ± 0.08 bB	1.37 ± 0.03 bA
鼓粒期 Filling	CK	1.46 ± 0.08 aA	0.59 ± 0.13 aA	2.05 ± 0.27 aA	2.59 ± 0.38 aA
	O ₃	1.11 ± 0.02 bB	0.62 ± 0.11 aA	1.73 ± 0.12 aA	1.82 ± 0.29 bA

不同大、小写字母分别表示不同处理的差异达到 0.01 和 0.05 显著性水平
Different capital and small letters in the columns show the significance of different treatments at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively.

2.3 O₃浓度升高对大豆产量的影响

表2 O₃浓度升高对大豆产量的影响

Table 2 Effects of elevated O₃ on grain yield of soybean

处理 Treatment	单株粒数 Grains per plant	单株荚数 Number of pods per plant	百粒重 100- seed weight/g	单株粒重 Seed weight per plant/g
CK	738.15 ± 206.54 aA	49.70 ± 4.62 aA	24.88 ± 1.20 aA	182.25 ± 46.57 aA
	155.33 ± 16.17 bB	32.22 ± 4.03 bB	22.33 ± 2.26 aA	34.48 ± 1.82 bB

由表 2 可以看出,CK 与 O₃ 处理下的大豆百粒重差异不显著($P>0.05$),而高浓度 O₃处理下大豆单株粒数、单株粒重和单株荚数与 CK 差异极显著($P<0.01$),说明臭氧浓度升高能够导致大豆籽粒

产量下降。

3 结论与讨论

结果表明:O₃浓度升高能够抑制大豆的光合作用,降低其净光合速率,即高浓度 O₃熏蒸对大豆光合作用呈显著的负效应。

进入植物叶片的 O₃浓度积累到一定程度时,可破坏细胞膜和叶绿体^[8-10],O₃浓度增加可诱导叶片气孔关闭、气孔阻力增大^[11-12]。由 *P_n*、*G_s* 和 *C_i* 可以看出,三者均出现先上升后下降的趋势。这主要是由于 O₃熏蒸初期,植株通过调节气孔来适应 O₃胁迫,随着通气时间的延长,由于得不到充足 CO₂供应的叶片持续照光而造成光合器官的破坏,此时 *P_n*

降低的主要原因转化为非气孔限制。由于大豆叶片鼓粒期 Pn 显著下降,光合器官被破坏,通过光合作用消耗的 CO_2 量减少,细胞内 CO_2 滞留增加,从而使得外界的 CO_2 更加不易进入叶肉细胞,这种恶性循环最终使光合作用量下降,从而导致产量的下降。植物的蒸腾速率与气孔导度在一般情况下表现出一定的相关性^[7,13-14]。在试验中, O_3 熏蒸下,植株 T_r 一直显著低于 CK,说明植株蒸腾速率一直相对很低,并且从开花期就开始下降。这种蒸腾速率的下降有利于植株的抗旱性,但对于 O_3 胁迫则起到伤害作用。 O_3 能够减少大豆叶片中的叶绿素含量,从而抑制大豆光合作用。这也同样证明了高浓度 O_3 使大豆受到伤害并且伤害机制是由气孔限制转化为非气孔限制。

白月明等^[15]研究表明, O_3 浓度增加对水稻有效穗数有正效应,但穗粒数、穗粒重、一次枝梗数量和千粒重均低于对照,其总效果是产量比对照减少。结果表明 O_3 处理对百粒重影响不显著,而单株粒数、单株荚数和单株粒重明显下降,说明 O_3 熏蒸对干物质从叶片、茎秆等营养器官向籽粒转移过程的影响较小,而对大豆开花期影响显著, O_3 处理使大豆的开花数量减少,并影响花期的受精过程,使得结荚期大豆荚数明显低于 CK,从而使大豆籽粒减少,导致籽粒产量降低。综上所述,高浓度 O_3 通过抑制大豆植株的光合作用及授精过程使大豆产量降低。本试验仅限于研究大豆在 O_3 浓度为 $110 \text{ nmol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时其光合作用和产量的变化,关于不同 O_3 浓度对不同作物光合作用的影响机理还需要更深入、更广泛的研究。

参考文献

- [1] Prentice I, Farquhar G, Fasham M, et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide [C] // Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The scientific basis. contributions of working group I to the third assessment report of the intergovernment panel on climate change. 2001, 183-238, Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press.
- [2] Farage P K, Long S P. The effect of O_3 fumigation during leaf development on photosynthesis of wheat and pea: An invivo analysis [J]. Photosynthesis Research, 1999, 59: 1-7.
- [3] 白月明, 王春乙, 刘玲, 等. O_3 对“五月蔓”白菜生长和产量的影响[J]. 园艺学报, 1999, 30(2): 167-170. (Bai Y M, Wang C Y, Liu L, et al. Effects of ozone on growth and yield of Chinese cabbage[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1999, 59: 1-7.)
- [4] 张巍巍, 赵天宏, 王美玉, 等. 臭氧浓度升高对银杏光合作用的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(5): 645-649. (Zhang W W, Zhao T H, Wang M Y, et al. Effects of elevated ozone concentration on Ginkgo biloba photosynthesis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(5): 645-649.)
- [5] 金明红, 冯宗炜. 臭氧对冬小麦叶片膜保护系统的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 444-447. (Jin M H, Feng Z W. Effects of ozone on membrane protective system of winter wheat leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(3): 444-447.)
- [6] 金明红, 冯宗炜, 张福珠. 臭氧对水稻叶片脂膜过氧化和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学, 2000, 21(3): 1-5. (Jin M H, Feng Z W, Zhang F Z. Effects of ozone on membrane lipid peroxidation and antioxidant system of rice leaves[J]. Journal of Environmental Sciences, 2000, 21(3): 1-5.)
- [7] Lichtenthaler H K, Wallbum A R. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents [J]. Biochemical Society Transactions, 1983, 600: 591-592.
- [8] Anttonen S, Herranen J, Penura P, et al. Fatty acids and ultrastructure of ozone-exposed Aleppo Pine (*Pinus halepensis* MILL.) needles [J]. Environment Pollution, 1995, 7: 235-242.
- [9] Pratt G C, Kromroy KW, Krupa S V, et al. Effects of ozone and sulphur dioxide on injury and foliar concentrations of sulphur and chlorophyll in soybean *Glycine max* [J]. Environment Pollution, 1983, 32: 91-99.
- [10] 赵天宏, 史奕, 黄国宏. CO_2 和 O_3 浓度倍增及其交互作用对大豆叶绿体超微结构的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2229-2232. (Zhao T H, Shi Y, Huang G H. Effect of doubled CO_2 and O_3 concentration and their interactions on ultrastructure of soybean chloroplast[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2229-2232.)
- [11] 白月明, 王春乙, 郭建平, 等. 大气臭氧变化对油菜影响的模拟试验[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 407-411. (Bai Y M, Wang C Y, Guo J P, et al. Simulation experiment of the effects of airborne ozone changed on Chinese cabbage[J]. China Environmental Science, 2003, 23(4): 407-411.)
- [12] Heggstad H E, Gish T J, Lee E H, et al. Interaction of soil moisture stress and ambient ozone on growth and yields of soybeans [J]. Phytopathology, 1985, 75(4): 472-477.
- [13] 李初英, 孙祖东, 陈怀珠, 等. 不同遮光胁迫对大豆产量性状及产量的影响[J]. 大豆科学, 2006, 25(3): 294-298. (Li C Y, Sun Z D, Chen H Z, et al. Study of the influence of shading stress on yield and yield characters of soybean[J]. Soybean Science, 2006, 25(3): 294-298.)
- [14] 李玉梅, 李建英, 王根林, 等. 水分胁迫对大豆幼苗叶片内源激素的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(4): 627-636. (Li Y M, Li J Y, Wang G L, et al. Studies on mechanism of endogenous hormones in soybean seedling under water stress[J]. Soybean Science, 2007, 26(4): 627-636.)
- [15] 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[J]. 气象, 2005, 27(6): 17-21. (Bai Y M, Guo J P, Liu L, et al. Influences of O_3 on the leaf injury photosynthesis and yield of rice[J]. Meteorological Monthly, 2005, 27(6): 17-21.)