

CO₂ 浓度倍增对大豆影响的试验研究*

郭建平 高素华 白月明 温 民 王春乙

(中国气象科学研究院农业气象研究中心, 北京 100081)

摘 要 本文利用 OTC-1 型开顶式气室研究了 CO₂ 浓度倍增对大豆的影响, 结果表明: CO₂ 浓度增加使大豆成熟期提前, 株高增加; 根瘤数量、干物重和单个根瘤的重量增加; 叶片厚度、干物重及单位面积的叶片重量增加; 总生物量、籽粒数量、籽粒产量和百粒重明显增加; 光合作用速率和气孔阻力增加, 蒸腾速率减小; 粗蛋白含量减少, 粗脂肪、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸增加。

关键词 二氧化碳浓度 倍增 大豆 影响

1 引言

由于现代工业的不断发展和人口的迅速增加, 大气中 CO₂ 浓度正以每年 1 μmol/mol 的增长率稳定增加^[1,2]。已经预测到 2080 年大气中 CO₂ 浓度将增加到工业革命前 (270 μmol/mol) 的两倍。CO₂ 浓度的增加已经对农作物的生长发育和自然生态系统产生了巨大的影响^[3]。研究大气中 CO₂ 浓度变化对农作物的直接影响, 有重要的理论意义和重大的现实意义。

关于 CO₂ 浓度增加对农作物的影响, 在 80 年代前就开始受到有关科学研究工作者的关注, 而且在一些发达的国家开展了大量的人工模拟试验研究^[4], 取得了大量的试验数据。我国也在 90 年代初开始进行不同 CO₂ 浓度对农作物直接影响的试验研究工作^[5~9]。在一般情况下, 这些研究都是在人工控制的人工气候箱、玻璃温室、开顶式气室和 FACE 环境中进行的。这些研究的管理能力都较强, 尽可能排除了其他不利因素对试验结果的干扰, 水肥条件适宜, 无杂草和病虫害等, 结果具有代表性和可比性。结果表明, CO₂ 浓度增加会促进大多数作物的光合作用速率、生长发育进程和产量的增加, 同时使叶片气孔部分关闭, 蒸腾速率减小。一般来说, 增加 CO₂ 浓度, C₄ 作物气孔阻力的增加比 C₃ 作物大, C₃ 作物光合作用速率的加强比 C₄ 作物大, 甚至在大多数情况下, C₄ 作物的光合作用速率会下降, C₃ 作物的籽粒产量的增加要比 C₄ 作物显著得多。本文将介绍我们 1994 年在开顶式气室中进行的 CO₂ 浓度倍增对大豆直接影响试验研究的结果。

2 试验方法与设备

(1) 试验地点在中国气象局农业气象试验基地, 位于河北省定兴县境内, 该区属

1995-01-27 收到, 1995-03-27 收到修改稿

* 国家自然科学基金重大资助项目

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, 降水较少, 但有较好的灌溉条件, 适宜发展农业生产。

(2) 试验时间为 1994 年, 大豆(京豆 1 号, 夏播早熟品种, 原产北京) 于 6 月 20 日播种, 6 月 30 日移入开顶式气室, 7 月 1 日开始进行不同 CO_2 浓度熏气试验, 9 月 18 日收获; 试验采用盆栽, 花盆顶口直径 36cm, 深 26cm, 盆内土壤质地均匀且一致; 全生育期内管理方法相同, 水肥条件基本满足需要, 无病虫害和杂草。

(3) 试验在 OTC-1 型开顶式气室^[5]中进行。室壁为无色透明的玻璃, 八边形结构, 高 2.4m, 每边长 1.15m, 顶部有 45 度角的收缩口。 CO_2 采用钢瓶液态 CO_2 为补充气源, 整个系统采用自动控制。光合作用速率、气孔传导、叶片蒸腾速率等采用美国拉哥公司生产的 LI-6200 光合作用系统测定。

(4) 试验共设 3 个处理, 一个为室外对照处理(以下称室外), 表明大气本底 CO_2 浓度水平下自由大气中大豆的生长发育情况; 第二个为空白对照处理(以下称空白), 只通室外空气, 而不补充 CO_2 气体, 表明在气室中大气本底 CO_2 浓度水平下大豆的生长发育情况; 第三个为 CO_2 浓度倍增处理(CO_2 浓度为 700×10^{-6} , 约相当于目前大气 CO_2 浓度的 2 倍, 以下称 700×10^{-6}), 通气时间从 7 月 1 日到 9 月 10 日, 中间昼夜不间断。

3 结果分析

通过测定上述 3 个处理的小气候因子发现, 尽管试验的环境不同, 但由于气室内通风条件好于室外(约每分钟换气 4 次), 因此, 气室内外的温度、湿度差异极小(温度约差 0.2°C , 相对湿度差异在 2% 左右), 而由于室壁的影响, 使得气室内的太阳总辐射比室外减小 15%~20%。因此, 通过 3 个不同处理的结果, 可进行如下的分析和比较: 室外和空白的比较, 表示在大气本底 CO_2 浓度水平下, 辐射差异对大豆生长发育和产量的影响; 空白和 700×10^{-6} 的比较, 表明在同一辐射强度下, 不同 CO_2 浓度对大豆生长发育和产量的影响; 室外和 700×10^{-6} 的比较, 则是辐射强度和 CO_2 浓度倍增对大豆生长发育和产量的共同影响。

本文中所用资料均为 10 株大豆的平均值或 10 株总重量。

3.1 对发育期的影响

表 1 为不同处理大豆的主要发育期。由表可见, 700×10^{-6} 从播种到成熟需要 85 天的时间, 空白需要 88 天, 而室外则需要 89 天。 700×10^{-6} 比空白提前 3 天成熟, 比室外提前 4 天成熟, 空白比室外提前 1 天成熟, 但播种至开花的差异要小于开花至成熟。

表 1 各处理的主要发育期(月-日)

发育期	播种	出苗	3 叶	分枝	开花	结荚	鼓粒	成熟
700×10^{-6}	06-20	06-25	07-03	07-20	07-28	08-08	08-19	09-13
空 白	06-20	06-25	07-03	07-19	07-29	08-11	08-21	09-16
室 外	06-20	06-25	07-03	07-23	07-28	08-10	08-19	09-17

由此可见, CO₂ 浓度增加, 大豆开花至成熟的时间缩短, 使成熟期提前, 而辐射强度增加使开花至成熟的时间延长, 成熟期推后。

3.2 对株高的影响

表 2 列出了各处理主要发育期的株高变化。从表中可看出, 在大豆的营养生长阶段, CO₂ 浓度对大豆株高的影响不明显, 而在生殖生长阶段影响较大。在成熟时, 700 × 10⁻⁶ 的株高比空白增加 6.2%, 比室外增加 21.7%, 空白比室外增加 14.6%。说明辐射强度对大豆株高的影响要大于 CO₂ 浓度对株高的影响。

表 2 各主要发育期株高 (cm)

发育期	3 叶	分枝	开花	结荚	鼓粒	成熟
700 × 10 ⁻⁶	8.8	31.1	55.5	91.8	117.4	121.6
空白	8.7	31.1	58.5	95.0	109.0	114.5
室外	9.0	38.2	51.5	80.2	96.4	99.9

3.3 对生物量的影响

(1) 对根瘤的影响: 表 3 为 8 月 20 日观测的大豆根瘤数量和干物重。由表可见, 700 × 10⁻⁶ 的根瘤数比空白增加 82.9%, 比室外增加 44.5%, 700 × 10⁻⁶ 的根瘤干物重比空白增加近一倍达 99.4%, 比室外增加 53.8%; 空白的根瘤数比室外减少 21.0%, 干物重减小 22.9%; 除此之外, 700 × 10⁻⁶、空白和室外的单个根瘤的干物重分别为 0.00784 g、0.00719 g 和 0.00737 g。由此可见, CO₂ 浓度不仅有利于增加根瘤的数量, 提高根瘤的总干物重, 而且有利于增加单个根瘤的重量。

表 3 根瘤的数量 (个) 和干物重 (g)

数 量			干 物 重		
700 × 10 ⁻⁶	空 白	室 外	700 × 10 ⁻⁶	空 白	室 外
1942	1062	1344	15.222	7.635	9.900

(2) 对叶片的影响: 表 4 列出了不同处理的叶面积 (cm²)、干物重 (g) 和单位面积积的叶片干物重 (g/cm²)。叶片的大小、厚薄直接影响到光合作用量的大小及生物量的累积。由表可见, 室外的叶片面积较大, 700 × 10⁻⁶ 与空白的差异较小, 但 700 × 10⁻⁶ 的叶片干物重大于空白和室外, 干物重空白为最小, 说明在室外生长的大豆叶片虽面积较大, 但叶片厚度小于 700 × 10⁻⁶ 处理, 这从单位叶面积的干物重中能够得到证明。单位叶面积的干物重 (8 月 10 日) 700 × 10⁻⁶ 比空白增加 34.1%, 比室外增加 24.6%, 空白比室外下降 7.0%。

(3) 对总生物量的影响: 图 1 为大豆总生物量的干物重变化曲线, 图中数据为成熟时总生物量的干物重 (g)。从图中可看出, 在大豆结荚前, 不同处理的总生物量差异较小, 在结荚后, 生物量的差异逐渐变大。700 × 10⁻⁶ 的增加迅速, 到成熟时 700 × 10⁻⁶ 的总生物量比空白增加 44.7%, 比室外增加 35.8%, 而空白比室外减小 6.2%。由

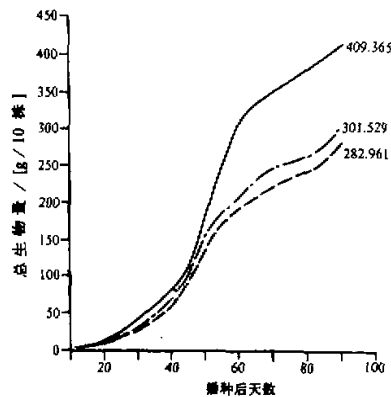


图 1 大豆总生物量干重随时间的变化曲线
—— 700 × 10⁻⁶; - - - 室外; ···· 空白

此可见, CO₂ 浓度增加有利于大豆干物质的累积。

(4) 对籽粒产量和百粒重的影响: 表 5 为不同处理大豆成熟时收获的籽粒数、籽粒产量和百粒重。由表可见, CO₂ 浓度增加有利于提高大豆的籽粒数、籽粒产量和百粒重, 700 × 10⁻⁶ 的籽粒数比空白增加 33.4%, 比室外增加 30.1%, 空白与室外相比, 差异较小, 减少 2.5%; 700 × 10⁻⁶ 的籽粒产量比空白增加 35.9%, 比室外增加 31.0%, 700 × 10⁻⁶ 的百粒重比空白增加 1.90%, 比室外增加 0.74%。

表 4 大豆叶片的面积、干物重和单位面积叶片干物重

时 间	叶面积 / cm ²			干物重 / g			单位面积干物重 / g cm ⁻²		
	700 × 10 ⁻⁶	空白	室外	700 × 10 ⁻⁶	空白	室外	700 × 10 ⁻⁶	空白	室外
07-20	4973.2	4251.5	4070.7	17.763	11.436	10.314	0.00357	0.00269	0.00253
07-30	9443.3	9365.2	10583.2	34.034	22.810	28.026	0.00360	0.00244	0.00265
08-10	17398.0	16828.9	18376.4	75.183	53.390	62.572	0.00425	0.00317	0.00341
08-20	15692.9	15260.8	16221.2	101.837	61.484	57.598	0.00649	0.00403	0.00355
08-30	16506.6	16215.0	19796.5	70.948	54.737	72.733	0.00430	0.00338	0.00367
09-10	7457.7	7619.9	7729.0	31.792	28.611	30.566	0.00426	0.00375	0.00395

表 5 各处理成熟时的籽粒数、籽粒产量和百粒重

籽 粒 数			籽粒产量 / g			百粒重 / g		
700 × 10 ⁻⁶	空 白	室 外	700 × 10 ⁻⁶	空 白	室 外	700 × 10 ⁻⁶	空 白	室 外
867.0	649.9	666.5	134.978	99.299	102.998	15.568	15.278	15.454

3.4 对光合作用速率的影响

图 2 为大豆生育过程中光合作用速率的变化。从图中可以看出, 从 3 叶到鼓粒后的半月, 大豆的生长发育旺盛, 光合作用速率较大且不同处理之间的差异明显, 700 × 10⁻⁶ 的光合作用速率最大, 空白的光合作用速率最小; 鼓粒半月后, 大豆的叶片开始衰老, 光合作用速率下降, 且不同处理之间的差异减小。

图 3 为大豆光合作用速率的日变化。由图可见, 上午日出后, 光合作用速率开始迅速上升, 至中午 12:00~14:00 达到最大值, 然后, 光合作用速率开始下降, 下午 19:00~20:00 开始转为负值; 夜间不同处理的暗呼吸作用均较小, 且不同处理间的差异较小。从日变化曲线还可看出, 700 × 10⁻⁶ 的光合作用速率最大, 空白的光合作用速率最

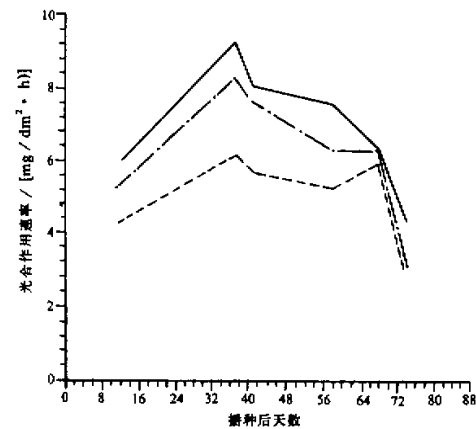


图2 大豆光合作用速率的时间进程
—— 700 × 10⁻⁶; - - - 室外; ··· 空白

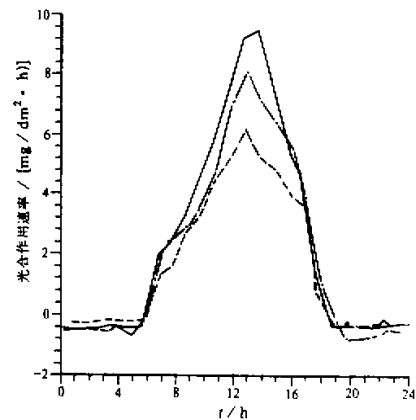


图3 大豆光合作用速率的日变化
(9月1~2日测定)
—— 700 × 10⁻⁶; - - - 室外; ··· 空白

小,空白与 700 × 10⁻⁶ 之间的差异主要是由于 CO₂ 浓度的差异引起的,而空白与室外之间的差异主要是由于辐射强度的差异引起的。

3.5 对气孔阻力和叶片蒸腾速率的影响

表 6 为大豆不同时期 CO₂ 浓度对叶片蒸腾速率 (mg/dm²·h) 和气孔阻力 (s/cm) 的影响。由表可见,由于 CO₂ 浓度的增加,使得叶片气孔部分关闭,气孔阻力增加,蒸腾速率减小,如 8 月 17 日,700 × 10⁻⁶ 的气孔阻力比空白增加 54.78%,比室外增加 27.08%,叶片蒸腾速率则分别下降 18.52%和 37.14%。辐射强度对气孔阻力和蒸腾速率的影响规律不是十分明显。

表 6 CO₂ 浓度对大豆叶片的蒸腾速率和气孔阻力的影响

处 理	07-27			08-17			09-02
	RS	TRAN	RS	TRAN	RS	TRAN	TRAN
700 × 10 ⁻⁶	18.596	0.100	15.280	0.110	9.392	0.050	
空 白	10.908	0.145	9.872	0.135	8.744	0.055	
室 外	10.352	0.210	12.024	0.175	9.132	0.055	

3.6 对大豆籽粒品质的影响

表 7 为大豆不同处理籽粒的主要成分含量。由表可见,CO₂ 浓度增加使氨基酸和粗蛋白含量下降,从蛋白质含量来看,CO₂ 浓度增加是不利的,700 × 10⁻⁶ 的蛋白质百分含量比空白减少 0.83,比室外减少 2.17,空白比室外减少 1.34;粗脂肪是大豆出油率的一个重要指标,CO₂ 浓度增加使大豆的粗脂肪百分含量增加,700 × 10⁻⁶ 比空白增

加 1.22, 比室外增加 2.25, 空白比室外增加 1.03; 饱和脂肪酸不能被人体所吸收, CO_2 浓度增加, 使饱和脂肪酸增加, 不利于大豆品质的提高, 700×10^{-6} 的饱和脂肪酸百分含量比空白增加 0.34, 比室外增加 0.53, 空白比室外增加 0.19; 不饱和脂肪酸是大豆的主要营养成分之一, CO_2 浓度增加使大豆不饱和脂肪酸增加, 700×10^{-6} 不饱和脂肪酸的百分含量比空白增加 2.02, 比室外增加 2.51, 空白比室外增加 0.49。因此, 从大豆 4 种主要成分(粗蛋白、粗脂肪、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸)来看, CO_2 浓度增加使粗蛋白含量减少和饱和脂肪酸的增加不利于提高大豆的品质, 而粗脂肪和不饱和脂肪酸的增加将有利于大豆籽粒品质的提高, 但究竟利大于弊, 还是弊大于利, 将根据其用途有所不同。

表 7 不同处理大豆籽粒主要成分含量 (g/100 g 大豆)

成 分	氨基酸	粗蛋白	粗脂肪	饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸
700×10^{-6}	34.14	38.35	22.94	3.54	20.26
空 白	36.46	39.18	21.72	3.20	18.24
室 外	38.58	40.52	20.69	3.01	17.75

4 小结

国外在大豆对 CO_2 浓度变化的响应方面做过较多的研究, 主要包括光合作用速率、温度条件、水分胁迫、矿物营养的吸收以及生理生化等方面, 涉及作物生物量的研究较少, 尤其是关于叶面积方面的报道则更少; 在国内, 王春乙、王修兰等也做过有关的研究, 但他们仅在白天补充 CO_2 气体, 因此, 无法讨论光合作用速率的日变化情况, 也未见有关叶面积变化方面的研究报道。根据我们的系统研究得到如下的主要结论:

- (1) CO_2 浓度增加使大豆全生育期缩短, 株高增加。
- (2) CO_2 浓度增加使大豆的根瘤数量增加, 干物重增加, 单个根瘤的重量也增加。
- (3) CO_2 浓度增加, 虽不能增加叶面积, 但使叶片厚度增加, 总干物重及单位面积的叶片重量增加。
- (4) CO_2 浓度增加, 使大豆总生物量、籽粒数量、籽粒产量和百粒重明显增加。
- (5) CO_2 浓度增加, 使大豆的光合作用速率增加, 叶片的气孔阻力增加, 蒸腾速率减小, 对于干旱、半干旱地区来说, 有利于提高水分利用效率, 增加粮食产量。
- (6) 从大豆 4 种主要成分(粗蛋白、粗脂肪、饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸)来看, CO_2 浓度增加, 使粗蛋白含量减少和饱和脂肪酸增加, 不利于提高大豆的品质, 而粗脂肪和不饱和脂肪酸的增加将有利于大豆籽粒品质的提高, 但究竟利大于弊, 还是弊大于利, 将根据其用途有所侧重。

参 考 文 献

- 1 Keeling, C.D., Bacastow, R.B. and Whorf, T.T., 1982, Measurement of the concentration of carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, Hawaii, in: *CO₂ Review* (Clark, W.C. Ed.), 377~385, Oxford Press, London.
- 2 Bacastow, R.B., Keeling, C.D. and Whorf, T.T., 1985, Seasonal amplitude increase in atmospheric CO₂ concentration at Mauna Loa, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, **90**, 10529~10540.
- 3 Strain, B.R., 1985, Direct effects of increasing atmospheric CO₂ on plants and ecosystems, *Trends in Ecol. Evol.*, **2**, 18~21.
- 4 Bhattacharya, N.C., 1992, Prospects of agriculture in a carbon dioxide-enriched environment, in: *A global Warming Forum Scientific, economic and Legal Overview* (Richzrd A.G. ed.), 487~505, CRC press, Boca Raton, FL.
- 5 王春乙、高素华、刘江歌, 1994, OTC-1 型开顶式气室的结构和性能, 环境科学进展, **2**(3), 19~31
- 6 王修兰、徐师华、李佑祥, 1993, 植物群体光合速率测定装置与方法, 农业工程学报, **9**(4), 62~65.
- 7 王春乙、高素华、潘亚茹、白月明、温民、刘江歌, 1993, OTC-1 型开顶式气室中对大豆影响的试验结果, 气象, **19**(7), 23~26.
- 8 王修兰、徐师华, 1994, CO₂ 浓度增加对大豆各生育期阶段的光合作用及干物质积累的影响, 作物学报, **20**(5), 520~527.
- 9 王修兰、徐师华、李佑祥, 1994, 大白菜对 CO₂ 浓度倍增的生理生态反应, 园艺学报, **21**(3), 245~250.

An Experiment Study of the Impacts of CO₂ Concentration Doubling on Soybean Growth

Guo Jianping, Gao Suhua, Bai Yueming, Wen Min and Wang Chunyi

(Research Center for Agricultural Meteorology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract In this paper, the impacts of CO₂ concentration doubling on soybean growth are studied using OTC-1 open top chamber. The results show that ambient CO₂ concentration doubling brings out early maturity stage and increases the height; the numbers and dry weight of the root nodule increase. The thickness and dry weight of the leaves increase. The total biomass, grain numbers, grain yield and 100-grain weight increase remarkably. The photosynthesis rate and stoma resistance increase, and transpiration rate decreases. The contents of proteins would decrease. The fat, saturated fatty acid and unsaturated fatty acid increase.

Key words CO₂ concentration doubling soybean impact