

CO₂ 浓度增加对 C₃、C₄ 作物生理特性影响的实验研究^X

王春乙¹ 郭建平¹ 王修兰² 徐师华² 崔读昌² 梁红²

(¹中国气象科学院, 北京 100081; ²中国农业科学院农业气象研究所, 北京 100081)

提 要 通过对 C₃ 小麦、大豆、大白菜和 C₄ 玉米在不同 CO₂ 浓度 (350 × 10⁻⁵、500 × 10⁻⁶、600 × 10⁻⁶、700 × 10⁻⁶) 条件下的生长模拟实验和生理特性研究表明, CO₂ 浓度增加, 促使作物光合速率增长, 光合时间略有延长, 光补偿点明显下降, 蒸腾系数减小, 叶气温差增大, 叶温升高。700 × 10⁻⁶ 和 500 × 10⁻⁶ 比 350 × 10⁻⁶ 小麦光合速率分别增长 30.7% 和 11.7%, 大豆增长 63.4% 和 42.7%, 大白菜增长 68.0% 和 39.0%, 玉米增长 15.7% 和 4.7%, C₃ 作物比 C₄ 反应明显; 蒸腾系数小麦下降 14.3% 和 7.7%, 大白菜下降 27.1% 和 23.1%, 玉米下降 16.8% 和 10.4%。

关键词 CO₂ 增加; 实验; 作物; 生理特性

The Experimental Study of the Effects of CO₂ Concentration Enrichment on Physiological Feature of C₃ and C₄ Crops

WANG ChunYi¹ GUO JianPing¹ WANG XiuLan² XU ShiHua² CUI DuChang²
LIANG Hong²

(¹Institute of Agronomy, CAA S, Beijing, 100081; ²Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract The experimental study in different CO₂ concentration conditions (350 × 10⁻⁶, 500 × 10⁻⁶, 600 × 10⁻⁶, 700 × 10⁻⁶) for C₃ wheat, soybean, Chinese cabbage and C₄ maize showed that as CO₂ concentration went up, then photosynthetic rate was increased, photosynthetic period of time was extended, but light compensation point and transpiration ratio were decreased, the difference between leaf and air temperature, as well as leaf temperature rise. Compared with 350 × 10⁻⁶ treatment, the increasing rate of photosynthetic rate were 30.7% and 11.7% for wheat, 63.4% and 42.7% for soybean, 68.0% and 39.0% for Chinese cabbage, 15.7% and 4.7% for maize; the decreasing rate of transpiration ratio were 14.3% and 7.7% for wheat, 27.1% and 23.1% for Chinese cabbage, 16.8% and 10.4% for maize at 700 × 10⁻⁶ and 500 × 10⁻⁶ treatments.

Key words CO₂ enrichment; Experiment; Crop; Physiological feature

大气中 CO₂ 浓度迅速增长, 影响着全球气候和农业生态环境。为了评估未来 CO₂ 浓度倍增对农业影响的程度, 不少学者在控制环境下进行不同 CO₂ 浓度—作物生长的模拟试验, 研究 C₃、C₄ 作物对 CO₂ 浓度增加的不同反应^[1], 为 IPCC 的评估报告提供了有价值实验资料^[2]。为了进一步获取中国的实验数据, 我们于 1992~1995 年对中国主要粮食和蔬菜作物 (C₃ 小麦、大豆、大白菜和 C₄ 玉米) 进行了不同 CO₂ 浓度处理的模拟实验, 研究了 CO₂ 浓度

X 国家“八五”攻关项目

收稿日期: 1999202210, 接受日期: 1999209203

增加对其生育性状和产量的影响^[3], 本文着重研究上述作物的生理特性(光合和蒸腾)对 CO₂ 浓度倍增的反应, 为探讨 CO₂ 浓度倍增的作物增产机理寻求新的论据。

1 材料和方法

采用盆栽实验, 盆直径 26 cm、高 30 cm, 土壤为砂壤土, 肥水条件为中等水平。供试作物品种: 小麦中麦 3 号、大豆烟黄 3 号、玉米中单 14 号、大白菜中白 4 号。从苗期分别至乳熟、结荚、抽雄、莲座期进行 3~4 种 CO₂ 浓度处理, 每个处理 15 盆, 白天自 7 时至 18 时适时补充设定浓度的 CO₂ 气体。

CO₂ 浓度调控在 4 个同化箱中进行, 每个箱体体积为 2m × 2m × 2.15m, 箱内 CO₂ 浓度分别保持在 700 × 10⁻⁶、600 × 10⁻⁶、500 × 10⁻⁶ 和 350 × 10⁻⁶。利用 CO₂ 红外气体分析仪、干湿球温度表、热电偶温度表、Li2CO₂ 量子传感器、土壤湿度表、气压表和风速计分别测定 CO₂ 浓度、空气温湿度、叶面温度、光量子通量密度、土壤湿度、大气压和风速^[4]。

在作物不同的生育阶段, 即小麦拔节、孕穗、抽穗、开花、乳熟期, 玉米 6 叶、8 叶、10 叶、12 叶、抽雄期, 大豆 3 叶、5 叶、开花、结荚期, 大白菜莲座期, 连续 2~5 天, 从 7 时至 18 时每小时测量 4~5 次 CO₂ 浓度和 1 次温、湿、风、光等环境因子, 每个生育阶段测量 1 次(株高、叶面积、干物重)、土壤湿度以及灌水量, 并测定群体净光合速率和蒸腾系数^[5]。

表 1 不同 CO₂ 浓度净光合速率及其相对 350 × 10⁻⁶ 处理的增长率

Table 1 The net photosynthetic rate and its increasing rate (compared with 350 × 10⁻⁶) in different CO₂ concentration

作物 Crop	生育阶段 Growth Stage	CO ₂ (10 ⁻⁶)	P _n (mgCO ₂ · dm ⁻² · h ⁻¹)	P _n (%)
小麦 Wheat	拔节~乳熟 Jointing~milk stage	700	29.3	30.7
		500	25.1	11.7
		350	22.4	0
玉米 Maize	6叶~抽雄 6Leaves~tasseling stage	700	34.7	15.7
		600	32.4	7.6
		500	31.5	4.7
		350	30.0	0
大豆 Soybean	3叶~结荚 3leaves~pond stage	700	20.6	63.4
		500	18.0	42.7
		350	12.6	0
大白菜 Chinese cabbage	莲座 Rosette stage	700	16.3	68.0
		500	13.5	39.0
		350	9.7	0

2 结果

2.1 CO₂ 浓度与光合作用

2.1.1 CO₂ 浓度与平均净光合速率 表 1 为不同 CO₂ 浓度水平的净光合速率 P_n 及其相对于 350 × 10⁻⁶ 处理的增长率 P_n (%)。表中数值代表各生育阶段的平均值。表 1 表明, 随着 CO₂ 浓度增加, C₃、C₄ 作物的净光合速率随之增长。与 350 × 10⁻⁶ 处理相比, 700 × 10⁻⁶ 小麦、大豆、大白菜和玉米的增长率分别为 30.7%、63.4%、68.0% 和 15.7%; 500 × 10⁻⁶ 处

理分别为 11.7%、42.7%、39.0% 和 4.7%。C₃ 小麦、大豆、大白菜 P_n 增长幅度明显高于 C₄ 玉米。这与 C₃、C₄ 作物各自不同的光合途径有关。C₃ 作物的 CO₂ 补偿点(约 50 × 10⁻⁶) 比 C₄ (约 5 × 10⁻⁶) 高得多^[6], 在低 CO₂ 浓度下 C₃ 作物因光合原料供应不充足, 光合作用受到明显抑制, 光合速率低于 C₄ 作物, 一旦 CO₂ 浓度升高, 光合速率便迅速增长; C₄ 作物则不同, 因其自身“CO₂ 泵”的作用, 即使在低 CO₂ 浓度下仍能进行同化作用, 光合速率显著高于 C₃ 作物而当 CO₂ 浓度升高, 光合速率的增长率也不及 C₃ 那样高、那样迅速。

2.1.2 CO₂ 浓度与光合速率动态变化 图(12)为 700 × 10⁻⁶ 相对 350 × 10⁻⁶ CO₂ 浓度 P_n 增长率动态变化曲线, 横坐标代表小麦返青(大豆、玉米出苗)后的天数。可以看出它们在各

生育阶段对 CO₂ 浓度增高有不同的反应。大豆从苗期~ 结荚、玉米从苗期~ 抽雄, 随着 CO₂ 浓度处理期的增长, 曲线逐渐上升; 小麦从苗期~ 抽穗前期呈现为上升趋势, 抽穗~ 乳熟为下降趋势。P_n 增长率的这种变化与叶面积指数 LAI 的变化是一致的。实验表明, 小麦抽穗期、大豆开花结荚期、玉米抽雄期的 LAI 最大^[5], P_n 及其相对 350 × 10⁻⁶ 的增长率也随之增大; 其后, 随着 LAI 的下降, P_n 及其增长率逐渐减小。需要说明的是, 受实验条件的限制, 大豆结荚、玉米抽雄后正值盛夏高温季节, 同化箱内的温度过高, 迫使 CO₂ 浓度处理停止, 曲线未能延续。500 × 10⁻⁶ 处理的变化趋势与图(121) 完全一致, 仅仅是变化幅度稍小。

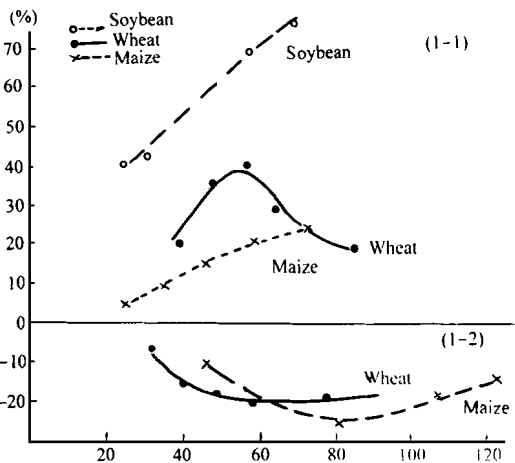


图1 700 × 10⁻⁶ CO₂ 浓度相对 350 × 10⁻⁶ 的光合速率增长率 P_n(%) 和蒸腾系数增长率 E_k(%) 动态变化

Fig. 1 The variation curves of increasing rate (compared with 350 × 10⁻⁶) in 700 × 10⁻⁶ CO₂ concentration for P_n and E_k

图(121) 还表明, C₃ 大豆、小麦 P_n 增长率及其动态变化曲线的幅度都高于 C₄ 玉米。说明在生育进程中, C₃ 比 C₄ 作物对 CO₂ 浓度增加的反应更加敏感, 受益更大。

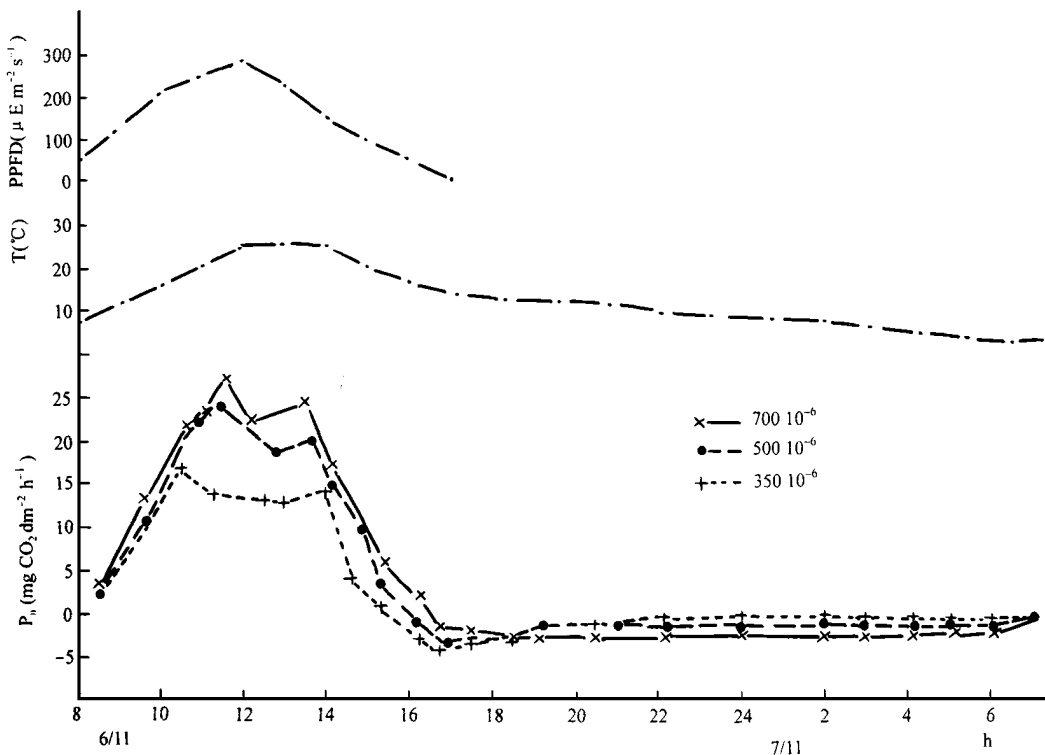


图2 不同 CO₂ 浓度下大白菜净光合速率(P_n)、气温(T)、光子通量密度(PPFD)日变化曲线

Fig. 2 The diurnal variation curves of net photosynthetic rate (P_n), photon flux density (PPFD) and temperature (T) in different CO₂ concentrations

2.1.3 CO₂ 浓度与光合速率日变化 图2为1992年11月6~7日大白菜莲座期不同CO₂浓度的光合速率P_n日变化曲线。由图可见, P_n和光量子通量密度PPFD、温度T的日变化总趋势一致, 即P_n随PPFD和T的增高而增长, 只是在中午前后P_n下降, 出现一段光合“午休”时间。小麦和大豆光合日变化与图2大体相似。

CO₂浓度对光合作用日变化过程诸因子的影响如表2所示。表2为小麦抽穗期、大白菜莲座期、大豆结荚期晴天条件下不同CO₂浓度相对于350×10⁻⁶的诸因子增长率, P_n为白天净光合速率, P_n为夜间呼吸速率, LC为光补偿点, \$P_{nt}为不同CO₂浓度与350×10⁻⁶处理光合作用持续时间的差值。正号代表增长或延长, 负号代表下降或缩短。

表2 CO₂浓度对光合作用因子的影响
Table 2 The effects of CO₂ concentration on photosynthetic factors

作物 Crop 年日月日 YearMonthDay	小麦 W heat 930615~ 16			大白菜 Chinese cabbage 926116~ 7			大豆 Soybean 9266626		
CO ₂ (10 ⁻⁶)	700	500	350	700	500	350	700	500	350
P _n (%)	43.2	16.2	0	68.8	39.6	0	72.1	51.4	0
P _n (%)	-28.2	-13.0	0	27.9	1.6	0			
\$P _{nt} (h)	0.9	0.6	0	0.9	0.4	0	1.1	0.6	0
LC(%)	-73.2	-34.1	0	-71.6	-32.8	0	-79.1	-35.8	0

表2表明, 在CO₂浓度升高的情况下(1)P_n明显增大, 小麦、大白菜、大豆700×10⁻⁶分别增长43.2%、68.8%、72.1%; 500×10⁻⁶分别增长16.2%、39.6%和51.4%; (2)P_n因作物而异, 小麦700×10⁻⁶和500×10⁻⁶分别下降28.2%和13.0%, 而大白菜却相反, 分别增长27.9%和1.6%; (3)白天光合作用终止(P_n=0)时间延后, 光合作用持续时间延长, 光合“午休”受到一定程度的抑制(时间缩短), 700×10⁻⁶比350×10⁻⁶光合时间延长0.9~1.1h, 500×10⁻⁶延长0.4~0.6h; (4)光补偿点下降, 700×10⁻⁶比350×10⁻⁶下降72%~79%, 500×10⁻⁶下降33%~36%。上述诸因素的综合作用, 导致作物的同化能力随着CO₂浓度的增长而得到显著提高, 这也是CO₂倍增(和CO₂施肥)促使作物增产的重要原因。

表3 不同CO₂浓度处理的蒸腾系数E_K及其相对350×10⁻⁶处理的增长率E_K(%)

Table 3 The transpiration ratio E_K and its increasing rate E_K(%) (compared with 350×10⁻⁶) in different CO₂ concentration

作物 Crop	生育阶段 Growth phase	CO ₂ (10 ⁻⁶)	E _K	E _K (%)	\$T ()
小麦 W heat	拔节~收获 Jointing~harvest	700	452	-14.3	
		500	487	-7.7	
		350	527	0	
玉米 M aize	苗期~收获 Plant let~harvest	700	251	-16.8	
		600	260	-13.5	
		500	270	-10.4	
大白菜 Chinese cabbage	莲座 Rosette stage	700	312	-27.1	0.67
		500	329	-23.1	0.30
		350	428	0	0.17

2.2 CO₂浓度与蒸腾

表3为不同CO₂浓度水平的蒸腾系数E_K及其相对350×10⁻⁶的平均增长率E_K(%)。正值代表增长, 负值代表下降。由表可见: (1)从350×10⁻⁶~700×10⁻⁶CO₂浓度, C₄玉米的E_K比C₃小麦、大白菜小, 表明玉米生育期生产1g干物质的需水量较小, 有较强的耐旱性, 且水分利用率高; (2)随着CO₂浓度升高, E_K随之减小, 小麦拔节~收获700×10⁻⁶和500×10⁻⁶分比

350 × 10⁻⁶ 下降 14.3% 和 7.7%; 玉米苗期~ 收获分别下降 16.8% 和 10.4%; 大白菜莲座期为生长较旺盛、蒸腾作用较强的时期, 700 × 10⁻⁶ 和 500 × 10⁻⁶ 分别下降 27.1% 和 23.1%。

图(12)为 700 × 10⁻⁶ 相对 350 × 10⁻⁶ CO₂ 浓度的蒸腾系数增长率动态变化曲线。可以看出, 作物在不同生育阶段 E_K 对 CO₂ 浓度升高有不同的反应。小麦从拔节到开花 E_K 下降率逐渐增大, 开花期达到最大(-16.8%), 其后略有回升; 玉米苗期至抽雄曲线呈下降, 抽雄下降最大(-23.7%), 其后至收获逐渐回升。

通常, 蒸腾系数与叶面积指数及气孔导度成正相关, 与干物重成负相关。实验表明^[5], 在高 CO₂ 浓度条件下, 叶片数和叶面积增加, 蒸腾作用加剧; 而气孔导度减小, 且干物质积累增加, 又会使 E_K 减小。三者的共同作用导致 E_K 下降, 水分利用率提高。就全生育期而言, C₄ 玉米比 C₃ 小麦对 CO₂ 浓度增加的反应表现略强。

2.3 CO₂ 浓度与叶温

叶面温度是反应作物生理特性的又一个重要因子。叶温的高低不仅直接与气温有关, 而且受气孔开度、气孔导度、水气扩散阻力等影响。实验表明, 当 CO₂ 浓度增加, 叶片气孔开度减小, 气孔阻力增大, 水气输送能力降低, 蒸腾减弱, 故而使叶温升高。

表 3 中的 ΔT 代表不同 CO₂ 浓度水平大白菜的叶气温差, 叶温 > 气温为正, 叶温 < 气温为负。表中数值为 4 天(每天 7h~18h, 每小时测定 1 次)的平均值。由表可见, 当 CO₂ 浓度增加, 大白菜叶温随之增高, 叶气温差增大, 700 × 10⁻⁶、500 × 10⁻⁶ 和 350 × 10⁻⁶ 处理的叶气温差分别为 0.67、0.30 和 0.17, 与 350 × 10⁻⁶ 相比, 700 × 10⁻⁶ 叶温增高 0.5、500 × 10⁻⁶ 增高 0.13。进一步证实 CO₂ 浓度增高对蒸腾有一定的抑制作用。

3 结论与讨论

实验研究表明: (1) CO₂ 浓度增加, 提高了作物的光合能力, 净光合速率增大, 夜间呼吸速率相对减弱, 对干物质积累有利, C₃ 小麦、大豆、大白菜的增长率明显高于 C₄ 玉米; (2) 小麦、大豆、大白菜光合作用时间有所延长, 光补偿点显著降低; (3) 叶温升高, 叶气温差增大, 蒸腾系数下降, 水分利用率提高, C₄ 玉米比 C₃ 小麦的反应略为敏感; (4) 作物对 CO₂ 浓度增加的上述生理反应, 为研究 CO₂ 浓度增高, 促进作物增多机理, 提供了新的论据; (5) CO₂ 浓度增加, 叶气温差增大, 叶温增高; (6) 作物生理特性对 CO₂ 浓度增加的上述反应, 为研究浓度增高促进作物增产机理提供了新的论据。

参 考 文 献

- 1 Keith E I, B I Sherwood, *Agric For Meteorol*, 1994, 69, 153~203
- 2 IPCC. 1992, *IPCC supplement scientific assessment of climate change*, Printed in Great Britain, 1992, 12~19
- 3 王修兰, 徐师华, 梁红. 中国农业科学, 1995, 31(1): 55~61
- 4 王修兰, 徐师华, 李佑祥. 农业工程学报, 1993, 4: 62~66
- 5 王修兰等. 二氧化碳、气候变化与农业, 北京: 气象出版社, 1996, 22~95
- 6 沈允钢, 王天铎. 光合作用~从机理到农业, 上海: 上海科学技术出版社, 1974, 44~81