

环境 CO₂ 浓度增加对 玉米生育生理及产量的影响

王修兰^① 徐师华 李佑祥 崔读昌

(中国农业科学院农业气象研究所)

提 要 研究了盆栽玉米在 700、600、500 和 350 ppm 的 CO₂ 浓度处理下,生育、生理及产量形成的动态变化和反应。结果表明,CO₂ 浓度增加促进了玉米的生长和发育,物候期提前,光合速率增大,蒸腾系数减少,加快了根、茎、叶等干物质积累,提高了生物产量和经济产量。实验还表明:从苗期、抽雄、吐丝、乳熟到收获的各生育阶段,CO₂ 浓度对玉米的影响有所不同,以抽雄阶段影响最大;对植株的产量性状影响程度也不一致(穗>茎叶>根),收获指数也随 CO₂ 浓度增加而有所提高。此外,CO₂ 浓度增加还可增强玉米抗短期高温(>40℃)和低光(常量的 1/2)胁迫的能力。

关键词 玉米 CO₂ 增加 生育 生理 产量

Responses of Growth and Development, Physiology and Yield of Maize to Increasing CO₂ Concentration

Wang Xiulan Xu Shihua Li Youxiang Cui Duchang

(Institute of Agrometeorology, CAAS)

Abstract Dynamic changes and responses of growth and development, physiology and yield result for pot maize were studied by controlling CO₂ concentraion with different levels of 700, 600, 500 and 350 ppm. The experiments show that increasing CO₂ concentration can promote growth and development of maize, shorten phenophase, enhance photosynthetic rate, decrease evaporation rate, step up biomass accumulation of roots, stems and leaves, and increase biological and economic yields. Effects of CO₂ concentration on maize vary in different growth phases. And the effects in the male flower phase are the most. CO₂ concentration effects on characters of plant-growth and yield is also different. Effects of CO₂ concentration on ear flower is greater than on stems and leaves, which is greater than on roots. The harvest index increases with raising CO₂ concentration. In addition, the experiments also show that high CO₂ concentration can enhance the capability of resisting stresses in high temperature and weak light.

Key words Maize CO₂ concentration Physiology Yield character Growth character

收稿日期:1995-02-24

①王修兰,副研究员,北京市西郊白石桥路 30 号 中国农业科学院农业气象研究所,100081

由于 C₃ 和 C₄ 作物其光合途径和吸收 CO₂ 的能力不同,对 CO₂ 浓度增加的反应有显著差异^[1]。CO₂ 浓度增加对 C₃ 作物影响的实验开展较多,但对 C₄ 玉米的研究却较少^[2]。本文通过两年 CO₂ 浓度控制实验,研究 4 种 CO₂ 浓度水平下玉米从苗期到成熟各阶段的生育性状、生理特性、干物质积累的动态变化,以及对产量形成的影响。

1 材料和方法

1.1 材料·方法

供试品种为中单 64 号,采用盆栽实验,盆直径 26cm、高 30 cm,内装砂壤土,肥水条件保持中等水平。实验分 5 个处理:A(700 ppm)、B(600 ppm)、C(500 ppm)、D(350 ppm),4 个 CO₂ 浓度处理分别在 4 个同化箱中进行(每个箱体体积 2×2×2.15 m³),另设 E 在大气环境下生长(CO₂ 浓度约 350 ppm)。每个处理 15 盆,每盆 1 株,共 75 盆。CO₂ 浓度处理从苗期开始,至抽雄阶段结束,每天 7~18 时供给设定浓度的 CO₂ 气体,利用半封闭式同化箱测量系统^[3]监测各箱的 CO₂ 交换速率。

1.2 测量

生长量测量:①从苗期至乳熟,每隔 10 天定株测量株高、叶面积;②从苗期至收获取样测量株高、干物重(根、茎、叶、穗)、叶面积。

生理特性测量:①不同叶龄期的 CO₂ 交换速率和光合速率,从 8~18 时每小时测量 5 次,每期测量 2~6 天;②从出苗到收获各生育阶段的蒸腾系数。

物候期调查:记录各生育阶段出现日期。

环境因子测量:与 CO₂ 交换速率测量相对应,每小时测量 1 次温度、光量子通量密度,以及气压和风速;每生育期测量 1 次土壤湿度并记录该时期的灌水量和降水量。

根据上述测量数据,利用下式得到群体光合速率(P_n)及蒸腾系数(E_t)。

$$P_n = \frac{10^2}{S} (V \times 10^3 \times 60) \frac{\Delta C}{\Delta t} \left(\frac{44}{22.4} \times \frac{P}{101.3} \times \frac{273}{273 + T} \times 10^{-6} \right) \quad (1)$$

式中 P_n 为群体净光合速率, mg CO₂ · dm⁻² · h⁻¹; $\frac{\Delta C}{\Delta t}$ 为 CO₂ 交换速率, ppm/min; V 为箱内空气容积, L; S 为群体叶面积, cm²; T 为气温(°C); P 为大气压, Pa。

$$E_t = (W + r + \Delta S_w) / (D_w - R_w) \quad (2)$$

式中 E_t 为蒸腾系数; W 为灌水量, g;

r 为降水量, g; ΔS_w 为土壤失水量, g; D_w 为总干物重, g; R_w 为根重, g。

表 1 不同 CO₂ 浓度水平的物候期 月/日

处理	6 叶	抽雄	吐丝	乳熟	蜡熟
A	5/10	6/30	7/6	7/21	8/10
B	5/10	7/1	7/7	7/23	8/13
C	5/11	7/3	7/9	7/25	8/14
D	5/10	7/4	7/10	7/26	8/15
E	5/10	7/6	7/11	7/26	8/14

2 结果及分析

2.1 CO₂ 浓度与物候期

CO₂ 浓度增加,促进了玉米的生长发育,提高了植株发育的整齐度,从而使物候期提前。表 1 为不同 CO₂ 浓度下玉米(12~15 株)物候期。从 6 叶期开始 CO₂ 处理,除 C 处理长势稍弱外,其他处理基本一致。由表可见,从 6 叶至抽雄 CO₂ 浓度处理期间,生育进程随 CO₂ 浓度增加而提前,这一趋势一直保持到成熟期。从抽雄至乳熟,700 ppm (A)比 350 ppm (D)生育

期提前 4~5 天;600 ppm (B)提前 2—3 天;500 ppm (c)约提前 1 天左右。

2.2 CO₂ 浓度与生长和干物质积累

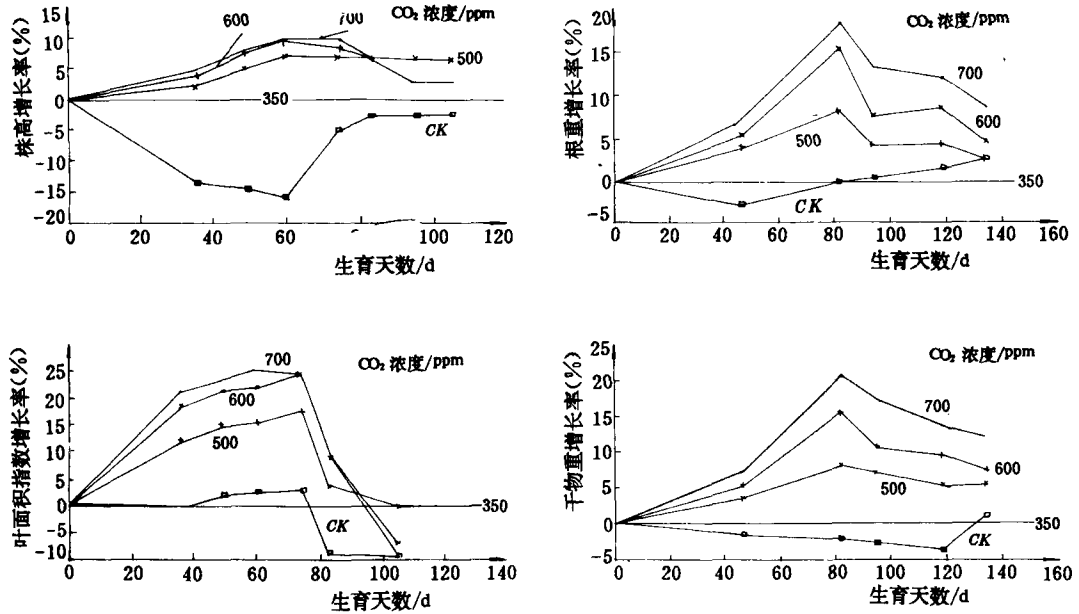


图1 不同 CO₂ 浓度处理下株高、叶面积指数、根重和干物重增长率(相对 350 ppm 处理的)的动态变化

从图 1 可以看出。株高、叶面积指数、根重和干物重随生育天数和 CO₂ 处理天数延续而增大,至抽雄阶段(80 天左右)达到最大;CO₂ 浓度愈高,相对增长率也愈高。由此表明,CO₂ 浓度增加,加速了玉米茎秆伸长、新叶早发,叶面积扩展、干物质积累增高,这种作用随着 CO₂ 浓度的增加而增大。

2.3 CO₂ 浓度与光合作用

作物进行光合作用所需的 CO₂ 主要通过气孔向叶内扩散。空气中的 CO₂ 浓度愈高,叶片内外的 CO₂ 浓度梯度愈大,经气孔向内扩散更多的 CO₂ 进行光合作用,这是光合速率增加的原因之一。尽管这种作用在 C₄ 作物中不及 C₃ 那样明显,但本试验表明,提高 CO₂ 浓度对玉米光合作用仍有一定的影响。由图 2 可见,从 6 叶到 14 叶期间,净光合速率 P_n 随生育天数(叶龄)的增加逐渐加大,CO₂ 浓度愈高增长愈快。

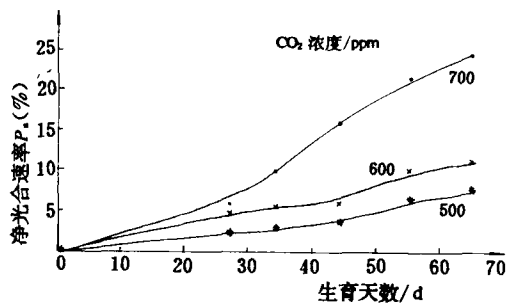


图2 不同 CO₂ 浓度相对 350 ppm P_n 动态变化

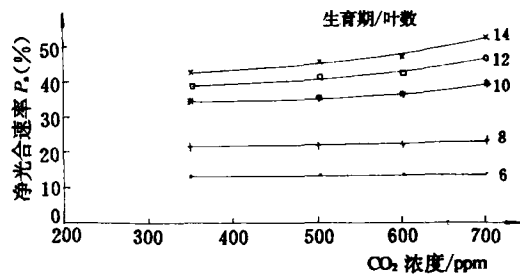


图3 不同叶龄期 CO₂ 浓度与 P_n 关系

由图 3 可以看出,曲线的斜率 K 值随叶龄加大而上升,从 6 叶到 14 叶, K 由 0.003 增至 0.030,10 叶期以前, P_n 随 CO_2 浓度呈近线性变化,随着叶龄的增加, P_n 增长率逐渐加快。10 叶期以后,高浓度的 P_n 增长较快, P_n 与 CO_2 浓度关系由准直线向曲线转变。

CO_2 浓度增加,提高了玉米的同化能力,加速了光合产物的积累,从而促进了茎叶生长和干物质增加;而茎叶生长又有利于进行光合,相互促进。

2.4 CO_2 浓度与蒸腾

作物蒸腾作用主要通过气孔。在高温干燥环境中,作物蒸腾强,而当体内水分散失过多时,其叶片便通过缩小气孔开度来抑制蒸腾,减少体内水分流失。同时 CO_2 浓度增高,叶片边界层气孔阻抗加大,使蒸腾受抑,这种作用对 C_4 作物较为明显^[2]。

本实验从出苗分别到 10 叶、抽雄、吐丝、乳熟、收获各阶段的不同 CO_2 浓度下玉米的蒸腾系数 E_k 可知, E_k 在 10 叶期最大,随着生育期的推移及干物质积累量的增加, E_k 逐渐减小;同时,随着 CO_2 浓度的增高, E_k 也减小。

从图 4 可见,从苗期到抽雄,各处理的曲线明显下降,浓度愈高,下降幅度愈大,抽雄阶段下降最大。抽雄以后,因叶面积指数逐渐减小,叶片蒸腾减弱,而干物量却持续增加,故其蒸腾系数的下降率随之减缓。

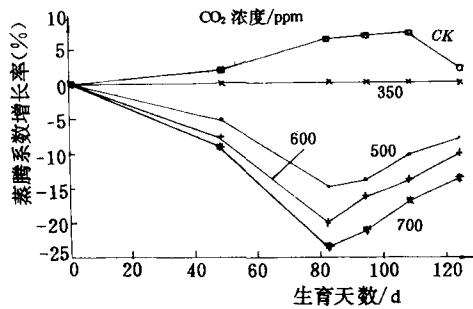


图 4 不同 CO_2 浓度下蒸腾系数(E_k)增长率(相对于 350 ppm)的动态变化

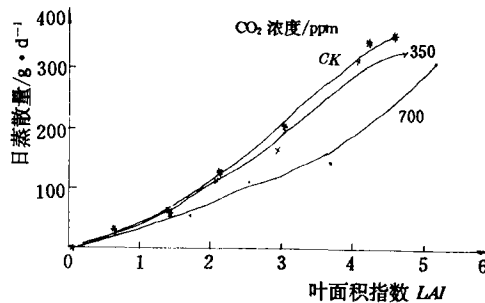


图 5 不同 CO_2 浓度下日蒸散量与叶面积指数关系曲线

从图 5 可知,各处理的日耗水量都随叶面积指数上升而增长,抽雄前后叶面积指数高达 5 左右,日耗水量最大。各处理比较, CO_2 浓度愈高,日蒸散量则愈小,且浓度对蒸腾量的影响也随着 LAI 增大而加剧,抽雄阶段差异最显著,其后随着 LAI 和日蒸散量的下降,由浓度引起的耗水量的差异也随之减小。

2.5 CO_2 浓度与产量

高 CO_2 浓度使生育期提前,促进穗的形成和发育,成穗早,穗长、穗重和千粒重都有提高。700 比 350 ppm 穗长、穗重和千粒重分别增长 11.6%、19.4%、5.3%;600 ppm 增长 10.1%、15.2%和 5.1%;500 ppm 增长 9.4%、

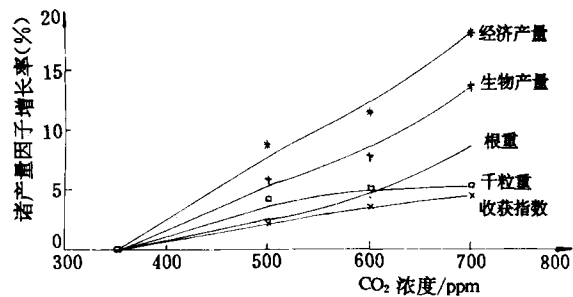


图 6 CO_2 浓度与诸产量因子增长率(相对于 350 ppm)的关系曲线

13.3%和4.2%。但是CO₂对根重、茎叶重的影响不及穗,表现为其经济产量增长率(如图6所示)。由此可见,CO₂浓度对玉米各器官的影响程度是不一样的,穗较大,茎叶次之,根较小。说明高CO₂浓度不仅促进了茎、叶、根的生长和干物质积累,更增加了光合产物及养分向穗和籽粒输送的能力,经济产量比生物产量提高较大。

2.6 CO₂浓度、温光环境与光合、蒸腾及产量

作物的生育性状、生理特性和产量形成是温、光、水及CO₂等因子综合作用的结果。实验期间不同CO₂浓度在箱内的温光条件基本一致(用箱内代表A、B、C、D),箱外条件有所不同(代表E)。表2中T、R分别代表温度和光量子通量密度在该叶龄期内每天7~18时2~6天的平均值、下标m为该时段的最高值。表2⁷表明,箱内比箱外白天平均温度高5~6℃、最高温度高9~15℃、光量子通量密度低1/2。

CO₂浓度与光温等条件对玉米光合作用有十分重要的影响。10叶期以后,箱内T_m>40℃,在正常CO₂浓度下(约350 ppm)玉米光合作用因高温胁迫受阻^[4]。但在高CO₂浓度下情况有所改变,据12叶期6月12日(晴天)10~14时(箱内气温>40℃)的实验资料,700(A)、600(B)、500(C)和350 ppm(D)的P_n

表2 箱内、外温光条件

叶龄	箱内				箱外			
	温度		光		温度		光	
	℃		/μE _m ⁻² ·s ⁻¹		℃		/μE _m ⁻² ·s ⁻¹	
叶	T	T _m	R	R _m	T	T _m	R	R _m
6	24.1	33.2	196	227	18.9	23.8	314	405
7	26.2	37.3	197	250	21.3	28.0	328	442
10	28.8	40.7	241	297	21.9	28.2	504	680
12	29.6	41.5	184	431	24.1	29.0	406	215
14	29.8	45.7	222	539	24.2	31.2	501	1026

分别为60.9、53.8、47.3、22.8 mg CO₂/dm²·h,与同期(平均气温29.6℃)的P_n平均值(即700、600、500、350 ppm的47.1、42.6、41.2和38.7 mg CO₂/dm²·h)相比,在高温条件下350 ppm(D)的P_n值大大减小,而高浓度处理的P_n却在增大,浓度愈高增长愈烈,说明CO₂浓度升高增强了玉米抵抗高温胁迫的能力。

温光环境对蒸腾的作用也不容忽视。参照图4,在整个生育期内,处理D与大气环境下的E,其CO₂浓度水平(350 ppm左右)相近,由于箱内外温、光环境的差异,E的蒸腾系数高于D,这是因为箱内温度较高,有利于蒸腾;但是其太阳辐射较弱、相对温度较大,则对蒸腾不利;同时,从苗期至抽雄,D处理的干物质累积量比E高1.6%~2.0%,致使E蒸腾系数大于D处理的蒸腾系数抽雄以后,各处理移至箱外,虽然环境相同,受前期浓度处理的影响,抽雄至乳熟E的干物质积累仍比D少3.4%,所以E的蒸腾系数E_k较大;乳熟至收获,随着干物质积累增长,两者的差距逐渐缩小。全生育期内,700、600、500、350 ppm的E_k比自然环境下分别减少15.9%、12.2%、10.2%、2.3%。提高了水分利用率。

CO₂浓度、温光环境条件直接影响到玉米的生长、发育和产量。从图1可见,尽管D、E处于同一CO₂浓度水平,由于箱内外温、光条件不同,抽雄(80天)以前,株高、根重和总干物重E<D,箱内温度较高有利茎秆伸长和干物质积累,但因光照较弱叶面积扩展较慢,使发育速度D比E略有提前(表1);收获期总干物重E>D,物候期E比D提前1天。说明浊度升高、光照减弱,在玉米生育前期加快了营养生长,不利于后期产量形成。特别是10叶期以后,箱内出现40℃以上高温,玉米光合作用受阻,尤其是抽雄开花期,长时间(连续8小时)高温胁迫影响正常受粉^[5],导致减产。然而,CO₂浓度增加后,温度和光照的不利影响大为减弱,

700~500 ppm CO₂ 浓度处理下的株高、叶面积指数、干物重及产量比自然环境下的 E 都有不同程度的增长,浓度愈高,增长愈大。

由此可见,CO₂ 浓度上升,减弱了温度升高、光照不足对玉米生育不利影响,光合作用增强,蒸腾系数减少,提高了水分利用率和抗高温胁迫的能力,有利于产量的提高。

3 结论与讨论

实验证明,从苗期到抽雄阶段的高 CO₂ 浓度处理,对 C₄ 玉米的生育和产量形成有积极作用。它不仅能促进茎、叶、根的生长和干物质积累,加快玉米发育,提高光合速率,抑制蒸腾,而且增加干物产量和经济产量。

1) CO₂ 浓度增高,加速了玉米的生长和发育,新叶早发,成穗早,生育期缩短,从抽雄至乳熟期,700、600、500 比 350 ppm 分别提前 4~5 天、2~3 天和 1 天左右。从苗期至收获各生育阶段干物重分别增长 7.4%~20.8%、5.4%~15.7%、3.7%~8.4%,其中茎叶增长较大、根增长较少,全生育期内以抽雄阶段的增长率最高。

2) CO₂ 浓度增高,有利于产量形成,700、600、500、比 350 ppm 穗长增长 11.6%、10.1%、9.4%;穗重增长 19.4%、15.2%、13.3%;千粒重增长 5.3%、5.1%、4.2%;生物产量增加 13.7%、7.9%、5.9%;经济产量增加 18.2%、11.5%、8.7%;收获指数提高 4.6%、3.6%、2.3%。高 CO₂ 浓度对各器官的贡献为:穗>茎叶>根。

3) CO₂ 浓度增加,增强了玉米的光合能力,从 6 叶~14 叶期间,700 比 350 ppm 的净光合速率增长 6.0%~24.7%、600 ppm 增长 5.0%~11.3%、500 ppm 增长 2.4%~7.8%。P_n 增长幅度随叶龄的增加而增大,抽雄期达到最大。

4) CO₂ 浓度增加,对蒸腾有明显的抑制作用,从 10 叶至收获期间的各生育阶段,700 比 350 ppm 蒸腾系数减少 8.1%~23.7%、600 ppm 减少 7.7%~20.0%、500 ppm 减少 5.2%~14.9%,抽雄阶段减少最显著。

5) CO₂ 浓度增加,提高了玉米的抗逆性能,增强了玉米耐高温、低光及干旱胁迫的能力,减弱并抑制了温度升高对玉米产量的不利影响。

6) 在玉米生育过程中存在一个对 CO₂ 浓度反应的敏感期,即抽雄期。在此期间 CO₂ 浓度增加,玉米光合速率增长最高,蒸腾系数下降明显,生长量增长最大。一些地区为了争季节增加茬次在农业设施内进行玉米育苗移栽,白天(一般 9~15 时)出现 CO₂ 亏缺,浓度低于 300 ppm,抑制了光合作用,影响作物生长。因此在育苗如何适时适量补充 CO₂,特别是在敏感期进行短期 CO₂ 施肥,将会有明显的增产效果。从而为提高作物产量展示了应用前景。

参 考 文 献

- 1 Bert Bolin, Bor Doos, Jill Jager, Richard A Warrick. The Greenhouse Effect Climatic Change and Ecosystems. published on Behalf of SCOPE, 1986, 396~399
- 2 Jenniferr D Curp, Basil Acock. Cron responses to carbon dioxide doubling; a literature survey. Agriculture and Meteorology. 1986, 38, 127~145
- 3 王修兰,徐师华,李佑祥. 植物群体光合速率测定装置与方法. 农业工程学报, 1993, 9(4): 62~66
- 4 彭宁德弗里斯, F. W. T 等著,几种一年生作物生长的生态生理过程模拟. 北京:中国农业科技出版社, 1991, 31~38
- 5 龚绍先. 粮食作物与气象. 北京农业大学出版社, 1987, 245~248