

CO₂与夜温升高对郑单 958 生长特征及产量的影响

谢晓金,张耀鸿,李仁英,邱思齐,包云轩*
(南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044)

摘要: 为了解未来气候变化对夏玉米生长特性和产量的影响,以郑单 958 为试验材料,设置 3 个 CO₂ 浓度水平(380、550、750 cm³/m³)与 2 个夜间增温水平(0、2 ℃),共 6 个处理,测定拔节期、抽雄期以及成熟期玉米的株高、叶色值(SPAD)、叶面积指数(LAI)、地上生物量及成熟后的产量和产量构成要素。结果表明:随着 CO₂ 浓度升高,玉米的株高、SPAD 值、LAI 以及生物量均呈增加趋势。拔节期,夜温升高,株高、LAI 和生物量随之增加;抽雄期和成熟期,夜间增温条件下,这些生长指标则降低。玉米的穗数、穗粒数、百粒质量及实际产量随 CO₂ 浓度升高而增加,但其在夜间增温条件下则降低。夜间增温 2 ℃ 条件下,CO₂ 浓度升高到 550 cm³/m³ 时才可抵消对郑单 958 生物量和产量的负效应。

关键词: 玉米; CO₂ 浓度; 夜间增温; 生长特征; 产量

中图分类号: S513 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004 - 3268(2016)07 - 0024 - 04

Effects of Increase of CO₂ Concentration and Night Temperature on Growth Characteristics and Yield of Zhengdan 958

XIE Xiaojin, ZHANG Yaohong, LI Renying, QIU Siqu, BAO Yunxuan*
(Collaborative Innovation Center on Forecast and Assessment of Meteorological Disasters,
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to understand the effects of future climate change on growth characteristics and yield of summer maize, three CO₂ concentration(380, 550, 750 cm³/m³) treatments and two night temperature increase (0, 2 ℃) treatments were conducted in six different Open Top Chamber(OTC) and heating devices with Zhengdan 958 as material. The plant height, SPAD (soil and plant analyzer development) value, LAI (leaf area index) and above ground biomass during jointing, tasseling and maturing periods were measured. In addition, maize yield and yield components were also determined. The results showed that the plant height, SPAD, LAI and above ground biomass all increased with the increase of CO₂ concentration. The plant height, LAI and above ground biomass increased when night temperature raised during the jointing period; however, the three indexes decreased at the tasseling and maturing periods. The yield and yield components increased with the increase of CO₂ concentration, and decreased under night warming conditions. When the night temperature was increased by 2 ℃, 550 cm³/m³ CO₂ could counteract the negative effect on biomass and yield produced by night warming.

Key words: maize; CO₂ concentration; night warming; growth characteristic; yield

大气 CO₂ 浓度和地表温度同步剧增是目前全球气候变化的主要表现形式。据报道,目前 CO₂ 浓度为 380 cm³/m³, 21 世纪末将剧增至 700 cm³/m³^[1]。大气科学家还注意到,全球增温现象具有明

收稿日期:2016 - 03 - 03
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41205087);公益性(气象)行业专项项目(GYHY201506018);江苏省自然科学基金项目(BK20141479)
作者简介:谢晓金(1979 -),女,安徽安庆人,副教授,博士,主要从事农业气象研究。E - mail:xxj_200210@sina.com
* 通讯作者:包云轩(1963 -),男,江苏如东人,教授,博士,主要从事气候变化与防灾减灾、应用气象与病虫害测报学研究。
E - mail:baoyunxuan@163.com

显的不对称性,即夜间增温大于白天增温^[2]。CO₂ 浓度与夜温升高对我国粮食生产与安全将带来极大的影响^[3]。

CO₂是作物进行光合作用的重要原料之一,CO₂ 浓度升高直接影响作物光合生理生化过程。许多研究表明,高 CO₂ 浓度下,株高增高,作物光合速率和产量提高,而呼吸速率下降^[4]。Kimball 等^[5]研究发现,当 CO₂ 浓度增至 850 cm³/m³ 时,水稻和小麦增产约 40%,玉米增产约 15%。孟凡超等^[6]研究表明,CO₂ 浓度为 550 cm³/m³ 时,玉米产量平均增加 18%。多数学者认为,温度升高对作物产量起到负效应^[7]。Xiong 等^[8]研究表明,温度升高 2.5 ℃,水稻、小麦与玉米产量持续下降。张吉旺等^[9]研究发现,与正常大田管理相比,大田增温使农大 108 叶面指数下降 15.4%,光合速率下降 22.85%,产量下降 46.6%。夜温升高导致作物产量下降在许多作物上得以体现。如郭培国等^[10]研究表明,夜间高温引起水稻叶绿素含量与叶绿素-蛋白复合体的结合度下降,光合速率降低。关于 CO₂ 浓度或夜温升高对作物产量的影响均有研究报道,但迄今为止,国内外关于以上 2 个因子对作物产量(特别是 C4 类作物)的综合影响研究较少^[11]。玉米是我国主要粮食作物和最重要的饲料作物,也是典型 C4 类作物。随着我国人口日益增长,提高玉米产量也成为亟待解决的问题。通过开顶式气室与增温系统的控制试验,在玉米的整个生育期设置不同 CO₂ 浓度与夜温处理,研究不同生育时期玉米的生长特征及成熟后产量及产量构成要素的变化,旨在为气候变化条件下玉米生长和产量的估测提供理论基础。

1 材料和方法

1.1 研究区概况与供试材料

试验于 2013—2014 年在南京信息工程大学农业气象试验站(32.0°14'N,118°42'E)进行。该站处于亚热带湿润气候区,年平均降水量约 1 100 mm,多年平均温度为 15.6 ℃,平均日照时数超过 1 900 h,无霜期为 237 d。供试夏玉米品种为郑单 958,生育期 96 d 左右。

1.2 试验设计

试验使用的装置为开顶式气室,为一个正六边形铁质框架结构,直径为 3 m,高 2.2 m,每个气室边长 1.6 m,每个气室体积均相同,约为 15 m³。该气室利用换气扇供室内通风换气;以液体 CO₂ 普通钢瓶作为 CO₂ 气源(Φ×h=35 cm×150 cm,纯度为 95%),并通过红外 CO₂ 测控仪(AT-CO₂-SDK3,

北京安泰吉华科技有限公司)自动控制和监控气室内 CO₂ 浓度;用加热鼓风机(EHS-129,上海茂控机电设备有限公司)进行增温,并通过调光器进行温度的控制。于每年 6 月 25 日左右将郑单 958 播种于气室内,行间距为 50 cm×50 cm,之后进行相同的水肥管理。玉米出苗后设置 3 个 CO₂ 水平和 2 个增温水平,共 6 个处理(表 1),其中夜间加热时间为 19:00—7:00。

表 1 不同处理的参数设置

处理	CO ₂ 浓度/(cm ³ /m ³)	夜间增温/℃
T1	380	0
T2	550	0
T3	750	0
T4	380	2
T5	550	2
T6	750	2

注:T1 处理 CO₂ 浓度为 380 cm³/m³,为背景 CO₂ 浓度。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 株高 分别在玉米拔节期、抽雄期以及成熟期测量玉米株高,每个处理测量 10 株。

1.3.2 叶色值(SPAD) 与株高测定同时进行,采用日本产 SPAD-502 型叶绿素计测定玉米的 SPAD 值,测定时选取玉米顶端已经展开的叶片进行测定,每个处理测定 10 株。

1.3.3 叶面积指数(LAI) 与株高测定同时进行,全展叶 LAI=叶长×叶宽×0.75,未全展叶 LAI=叶长×叶宽×0.5,每个处理测定 3 株。

1.3.4 生物量、产量以及产量构成要素 与株高测定同时进行,在拔节期、抽雄期、成熟期进行干物质测定。当玉米成熟后,进行实收测产,分别记录穗数、穗粒数、百粒质量以及籽粒产量。

1.4 数据处理

采用 Excel 2007 和 DPS 软件进行数据处理与统计分析。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度与夜温升高对玉米株高的影响

由表 2 可知,郑单 958 的株高随着生育期的推进不断增加,同一处理成熟期玉米株高比拔节期时平均高出 82.81 cm。随着 CO₂ 浓度的升高,各生育时期的玉米株高呈增加趋势。其中,拔节期,T6 处理比 T4 处理增加了 8.69%,差异达到显著水平;抽雄期,T5、T6 处理比 T4 处理分别增加了 0.58%、6.45%,但差异不显著。此外,拔节期,夜间增温对玉米株高有轻微的促进作用,但抽雄期和成熟期却抑制玉米长高。如拔节期,T6 处理的株高比 T3 处

理增加了 2.37% ;而抽雄期与成熟期,T6 处理比 T3 处理分别减少了 8.52% 与 5.18% ,以上 3 个时期 2 个处理间差异均不显著。

表 2 CO₂ 浓度与夜温升高对不同生育时期
玉米株高的影响

处理	拔节期	抽雄期	成熟期
T1	97.60c	167.40a	184.52ab
T2	100.76bc	169.50a	196.08a
T3	106.28a	190.10a	200.08a
T4	100.10bc	163.36a	170.08bc
T5	104.36ab	164.30a	174.26bc
T6	108.80a	173.90a	189.72ab

注:同列不同字母表示差异达显著水平(P<0.05)。下同。

2.2 CO₂ 浓度与夜温升高对玉米叶片 SPAD 值的影响

玉米叶片 SPAD 值随着生育期的推进表现为先升后降的趋势,在抽雄期达到最大(表 3)。随着 CO₂ 浓度的升高,拔节期、抽雄期、成熟期玉米的 SPAD 值总体呈增加趋势,但是差异不显著。夜间升温影响玉米叶绿素的形成,其中不同处理间差异不明显。

表 3 CO₂ 浓度与夜温升高对不同生育时期
玉米叶片 SPAD 值的影响

处理	拔节期	抽雄期	成熟期
T1	44.13a	48.63a	46.38a
T2	45.16a	49.95a	46.51a
T3	46.73a	48.89a	46.79a
T4	42.24a	47.23a	44.74a
T5	44.10a	47.74a	44.93a
T6	44.56a	48.34a	45.64a

2.3 CO₂ 浓度与夜温升高对玉米 LAI 的影响

由表 4 可见,玉米 LAI 随着生育期的推进先增加后下降,在抽雄期达到最大,拔节期最小。随着 CO₂ 浓度的升高,3 个生育时期的玉米 LAI 均呈现增加的趋势。拔节期,T3 处理比 T1 处理增加了 22.68% ;T6 处理比 T4 处理增加了 26.84% ,差异均达到显著水平。拔节期,夜间增温对玉米 LAI 有轻微的促进作用,但抽雄期和成熟期,则抑制叶面积的增长,T4 处理 LAI 较 T1 处理分别减少了 7.61% 和 10.09% 。

表 4 CO₂ 浓度与夜温升高对不同生育时期玉米 LAI 的影响

处理	拔节期	抽雄期	成熟期
T1	1.94c	4.73bc	4.46b
T2	2.24ab	5.07bc	4.57b
T3	2.38ab	5.80a	5.38a
T4	1.90c	4.37c	4.01b
T5	2.29ab	4.85bc	4.44b
T6	2.41a	5.32ab	4.94ab

2.4 CO₂ 浓度与夜温升高对玉米生物量的影响

由表 5 可知,玉米生物量随着生育期的推进不断增加,同一处理下,玉米成熟期生物量比拔节期平

均高557.37 g/m²。CO₂ 浓度升高促进玉米生物量的增加,但拔节期时各处理间差异不显著;抽雄期,T5、T6 处理较 T4 处理分别显著增加了 28.09%、33.71%。夜间增温抑制抽雄期和成熟期玉米生物量的增加。抽雄期与成熟期,T6 处理比 T3 处理的生物量分别减少了 0.39% 与 12.30% ,而拔节期增加了13.19%。夜间增温 2℃ ,当 CO₂ 浓度升高到 550 cm³/m³ 时已抵消了夜间增温对郑单 958 生物量的负效应。

表 5 CO₂ 浓度与夜温升高对不同生育时期
玉米地上生物量的影响

处理	拔节期	抽雄期	成熟期
T1	42.90a	82.46c	540.01c
T2	44.68a	95.59ab	629.94b
T3	50.56a	99.27a	776.30a
T4	44.64a	73.95c	391.93d
T5	51.58a	94.72ab	616.82b
T6	57.23a	98.88a	680.83ab

2.5 CO₂ 浓度与夜温升高对玉米产量构成的影响

由表 6 可知,随着 CO₂ 浓度的升高,郑单 958 的穗数、穗粒数、百粒质量以及实际产量都呈现增加的趋势。不同处理穗数差异不显著;T2、T3 处理穗粒数较 T1 处理分别显著增加了 13.43%、25.86% ;百粒质量分别增加了 3.76%、55.56% ,其中 T3 与 T1 之间差异显著;实际产量分别显著增加了 18.30%、40.98%。夜间增温则不利于后期产量的形成,即温度升高抑制玉米产量各构成要素的增加。当 CO₂ 浓度为 380 cm³/m³ 时,T4 处理穗数、穗粒数均较 T1 处理减少,但差异不显著;百粒质量减少了32.32% ,差异显著;实际产量显著减少了 13.62%。在夜间增温 2℃ 时,当 CO₂ 浓度升高将近到 550 cm³/m³ 时才可抵消夜间增温对郑单 958 产量的负效应。

表 6 CO₂ 浓度与夜温升高对玉米产量和
产量构成要素的影响

处理	穗数/ (个/m ²)	穗粒数/ 个	百粒 质量/g	实际产量/ (g/m ²)
T1	5.00a	893.42c	154.67b	509.79c
T2	6.00a	1 013.45b	160.48b	603.10b
T3	7.00a	1 124.42a	240.61a	718.68a
T4	4.00a	813.02c	104.68c	440.35d
T5	6.00a	837.93c	152.62b	532.37c
T6	6.00a	842.46c	190.00b	565.23b

3 结论与讨论

玉米的生长特征主要反映在株高、叶绿素含量与叶面积等方面。大气中 CO₂ 浓度对玉米具有“施肥效应”,促进其枝、茎以及节间的生长^[12]。叶绿素是叶绿体的主要色素,与光合作用紧密相关,而叶绿素含量与 SPAD 值之间有着极为显著的正相关性。

赵蕊等^[13]研究发现,施氮条件下,CO₂浓度倍增提高植物叶片的SPAD值,其光合作用能力也相应增加。CO₂浓度升高对植物叶面积的影响也较大,研究表明,随着CO₂浓度升高,68%植物的叶面积增加,27%的没有变化,而5%的降低^[14]。本研究表明,提高CO₂浓度对玉米的生长性状产生积极的作用,株高、SPAD值与LAI呈增加趋势,表明CO₂浓度增加,加速了玉米新叶早发、茎秆伸长、叶绿素含量增加以及叶面积扩展。CO₂浓度升高后,作物的光合能力相应提高,从而使作物的生物量和产量得以增加。但是不同作物的CO₂饱和点和同化途径不同,其增加幅度也不同。如,CO₂浓度维持在550 cm³/m³时,小麦和大豆生物量增加30%,产量增加10%~20%,玉米生物量提高27%,产量增加0~10%^[15]。本研究发现,与T1处理相比,T2处理玉米的穗数、穗粒数、百粒质量以及实际产量分别增加20.00%、13.43%、3.76%和18.31%,CO₂浓度继续增加,以上各指标增加的幅度增大。

而温度对不同作物生长特征以及产量的影响各不相同。刘照等^[16]在人工气候箱中研究发现,高温处理使水稻剑叶中光合速率和叶绿素含量呈下降趋势。本研究发现,拔节期,夜间增温促进茎叶伸长从而导致株高、LAI以及生物量增加;而抽雄期和成熟期,夜间增温对其影响恰好相反,株高、LAI和生物量呈递减趋势,这与玉米属于喜温性作物有密切关系,短暂高温并不影响玉米的营养生长,该结果与王修兰等^[17]的结论有一定的相似。但长时间的夜间增温却不利于后期产量和产量构成要素的形成。

CO₂浓度与温度协同效应如何? De Costa等^[18]在开顶式气室中研究发现,高温、高CO₂浓度使玉米收获时总生物量提高23%~31%,穗粒数提高14%,即使高温条件减弱了这种增产效应,但仍有提高。房世波等^[19]研究表明,持续提高CO₂浓度下,夜间增温会减弱CO₂浓度对玉米和高粱产量增加的刺激。本研究发现,在夜间增温2℃时,CO₂浓度升高到550 cm³/m³时才可抵消对郑单958生物量和产量的负效应。可见,夜间高温条件会减弱CO₂对玉米的增产效应。

参考文献:

- [1] Fritshi F B, Bote K J, Sollenberger L E. Carbon dioxide and temperature effects on forage establishment: Photosynthesis and biomass production [J]. *Global Change Biology*, 1999, 5: 441-453.
- [2] Xie X J, Zhang Y H, Li R Y, *et al.* Asymmetric warming affects N dynamics and productivity of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60: 530-539.
- [3] 赖上坤, 庄时腾, 吴艳珍, 等. 大气CO₂浓度和温度升高对超级稻生长发育的影响 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(5): 1253-1262.
- [4] 赖上坤, 周三妮, 顾伟锋, 等. 二氧化碳、施氮量和移栽密度对汕优63产量形成的影响——FACE研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(5): 836-843.
- [5] Kimball B A, Kobayashi K, Bindi M. Responses of agricultural crop to free air CO₂ enrichment [J]. *Advances in Agronomy*, 2002, 77: 293-368.
- [6] 孟凡超, 张佳华, 郝翠, 等. CO₂浓度升高和不同灌溉量对东北玉米光合特性及产量的影响 [J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2126-2135.
- [7] Tao F L, Hayashi Y, Zhang Z, *et al.* Global warming, rice production, and water use in China: Developing a probabilistic assessment [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(1): 94-110.
- [8] Xiong W, Lin E D, Ju H, *et al.* Climate change and critical thresholds in China's food security [J]. *Climatic Change*, 2007, 81(2): 205-221.
- [9] 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 大田增温对夏玉米光合特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 81-86.
- [10] 郭培国, 李荣华. 夜间高温胁迫对水稻叶片光合机构的影响 [J]. *植物学报*, 2000, 42(7): 673-678.
- [11] Cheng W G, Sakai H, Yagi K, *et al.* Combined effects of elevated CO₂ and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption, and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(9): 1174-1181.
- [12] Gielen B, Calfapietra C, Claus A. Crown architecture of populus was differently modified by free-air CO₂ enrichment (POPFACE) [J]. *New Phytologist*, 2002, 153(1): 91-99.
- [13] 赵蕊, 王秀伟, 毛子军. 不同氮素浓度下CO₂浓度、温度对蒙古栎幼苗叶绿素含量的影响 [J]. *植物研究*, 2006, 26(3): 338-341.
- [14] 韩梅, 吉成均, 左闻韵, 等. CO₂浓度和温度升高对11种植物叶片解剖特征的影响 [J]. *生态学报*, 2006, 26(2): 326-333.
- [15] 白莉萍, 周广胜. 全球环境变化对农作物影响的研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2004, 10(3): 394-397.
- [16] 刘照, 高焕桦, 王三根. 高温干旱双重胁迫对水稻剑叶光合特性的影响 [J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 36(3): 161-165.
- [17] 王修兰, 徐师华, 李佑祥, 等. 环境CO₂浓度增加对玉米生育生理及产量的影响 [J]. *农业工程学报*, 1995, 11(2): 109-114.
- [18] De Costa W A J W, Weerakoon W M W. Physiology of yield determination of maize under elevated carbon dioxide at high temperatures in a subhumid tropical climate [J]. *Field Crop Research*, 2006, 98(1): 336-347.
- [19] 房世波, 沈斌, 谭凯炎, 等. 大气CO₂和温度升高对作物生理生产的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(5): 1116-1124.