

网络出版日期:2017-06-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1220.S.20170629.1108.028.html>

施用 CO₂ 对番茄‘巴特’水分利用效率和产量的影响

袁婷婷,王婷婷,张 玲,李亚灵,温祥珍

(山西农业大学 园艺学院,山西太谷 030801)

摘 要 以番茄品种‘巴特’为材料,在 2 个自然光照人工气候室内(长 2.2 m、宽 1.2 m、高 1.5 m),采用基质盆栽法(基质按质量配比,腐熟牛粪:炉灰=1:1),研究施用 CO₂ 对番茄植株水分利用效率的影响。试验采用钢瓶进行 CO₂ 补充供应(体积分数为 500 μ L/L),以不施用 CO₂ 为对照;3 个水分处理分别为低水(S)处理 300 mL、中水(M)处理 400 mL、高水(H)处理 600 mL(每 3 d 灌水 1 次),每盆(1 株)精量灌水。结果表明:增施 CO₂ 高水 H、中水 M 处理水分利用效率分别较对照提高 58%、38%,低水 S 处理仅增加 8%,这种效应也反映到作物的生物量表现上,即番茄植株干物质质量在高水、中水、低水处理下分别比对照处理提高 30%、23%、9%。同时生理测定结果表明,水分供应充足条件下(M、H),增施 CO₂ 的番茄植株其超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性提高。因此认为水分充足下,增施 CO₂ 对于提高产量和水分利用效率是一个有效的措施。

关键词 CO₂; 灌水量; 番茄; 生物量; 水分利用效率

中图分类号 S641.2

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2017)07-1054-08

温室中各环境因子共同影响温室作物的生长。水和 CO₂ 是光合作用必不可少的原料,温室在未能及时通风条件下往往 CO₂ 浓度偏低^[1],限制光合作用的进行,补施 CO₂ 肥料非常必要^[2-3]。水分对 CO₂ 增施效果有影响,CO₂ 浓度升高对水分利用效率也有影响,二者相互作用。周力士等^[4]发现 CO₂ 增施能提高番茄第 1 穗果质量水平上的水分利用率。刘月岩等^[5]指出 CO₂ 浓度升高显著提高小麦在叶片、群体及产量水平下的水分利用效率。提高 CO₂ 浓度对作物有利,但肥料效应同时还受其他环境因素、物候期等影响^[6-9]。对小麦^[10]、番茄^[4]等研究表明,不同水分条件下,增施 CO₂ 对作物的生长发育产生不同的影响,但关于 CO₂ 和灌水量的协同作用的研究不多。

本试验通过控制生长室内 CO₂ 体积分数和基质灌水量,探讨不同组合条件下增施 CO₂ 对番茄植株水分利用效率的效应及它们之间的协同作用,以期确定一个合理的水肥组合,为未来农业施肥灌水制度提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设置与材料

试验于山西省太谷县(北纬 37°25′,东经 112°25′)山西农业大学设施农业工程研究所的不对称三连栋温室^[11]内进行,在温室内建立 2 个规格、方位一致的自然光照智能控制气候室。气候室的规格为长 2.2 m、宽 1.2 m、高 1.5 m。试验从 2015-04-01 定植至 2015-06-23 结束,共 84 d。

选用的番茄品种为‘巴特’。购进番茄苗为 5 叶 1 心的幼苗,放置于阴凉处 1 周进行蹲苗,之后选生长健壮、长势一致的番茄幼苗进行定植。

1.2 试验处理及方法

在 2 个气候室中设计 2 种 CO₂ 处理:C₁ 处理,即室内补充 CO₂ 体积分数至 400~500 μ L/L,C₀ 处理,即不施用 CO₂,以此作为对照,试验采用钢瓶向室内供应 CO₂,CO₂ 控制时间为 9:00—18:00,共 9 h,通过空调风扇控制温度。试验环境 CO₂ 体积分数、温度、湿度的控制和测

收稿日期:2016-05-19 修回日期:2016-06-20

基金项目:山西省煤基重点科技攻关项目(FT201402-05);国家自然科学基金重点项目(661233006);山西省科技攻关项目(20130311010-1)。

第一作者:袁婷婷,女,硕士研究生,研究方向为设施园艺。E-mail:739477830@qq.com

通信作者:温祥珍,男,教授,博士生导师,研究方向为设施园艺。E-mail:wenzhangzhen2009@hotmail.com

定是通过 CO₂ + 温湿度一体式控制器进行,每 10 min 记录 1 次。

水分处理分小水、中水、大水 3 个水平,以 S、M、H 表示。其中中水 M 的确定是根据在当时气候条件下番茄植株每日耗水量来确定的,因此 S、M、H 处理每盆每株每 2 d 的灌水量分别为 300 mL、400 mL、600 mL。试验期间采用土壤湿度测定仪(仪器型号 YM-01)监测土壤湿度。每个水分处理 24 株,每个气候室共有 72 株。

试验采用盆栽法,花盆大小为底部直径 21 cm、高 21 cm,底部与周边均无孔,且盆内衬有塑料袋,确保水分不流失。在盆底放置一些松针使植株通气性良好。每盆装混匀的基质 3.5 kg。基质为 *m*(腐熟的牛粪):*m*(炉灰)=1:1 均匀混合,每盆定植 1 株幼苗,缓苗后开始进行不同的水分处理。

1.3 测定项目及方法

每个处理随机选取 5 株,定期观测植株的长势。每个处理选择 3 株植株做样本,每 12 d 测定植株根、茎、叶鲜质量和干质量,以及叶片的超氧

化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性。SOD、POD 活性测定方法分别采用氮蓝四唑法和愈创木酚法^[12]。

番茄单株的水分利用效率计算方法为植株的干质量与耗水量之比,单位(g/kg)。

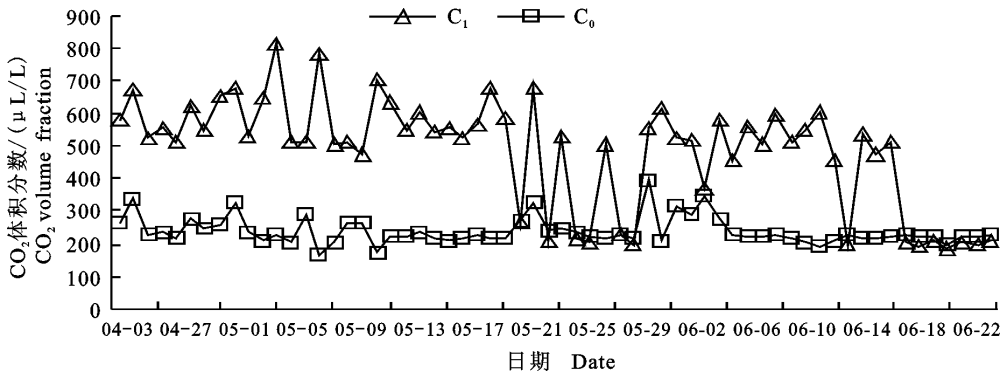
采用 Excel 2003 进行数据处理,用 SAS-8e 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 试验期间气候室中的环境状况

图 1 是试验期间 2 个气候室中白天(9:00—18:00)CO₂ 的逐日变化均值,从图中看到 CO₂ 控制效果良好,计算从 4 月 23 日—6 月 23 日 2 个月的平均值,C₀、C₁ 分别为 238 μL/L、486 μL/L,基本达到预期设定目标。夜间(18:00 至次日 6:00)气候室内的 CO₂ 体积分数均值 C₀ 比 C₁ 稍高(表 1),由于夜间不能进行光合作用,这期间不会影响试验结果。

表 1 是试验期间气候室内的气温与湿度,统计分析无显著差异,均处于番茄生长适宜温度范围。



白天 CO₂ 体积分数是从 9:00 至 18:00,每 10 min 采集 1 次,共 54 个数据的均值,数据采集时间是 4 月 23 日—6 月 23 日。
The CO₂ volume fraction was collected from 9:00 to 18:00 every 10 min during daytime and average of 54 data each day. Data acquisition was from April 23 to June 23.

图 1 试验期间不同 CO₂ 处理白天的日变化

Fig. 1 Daily variation of CO₂ volume fraction under different treatments

表 1 气候室中的环境状况

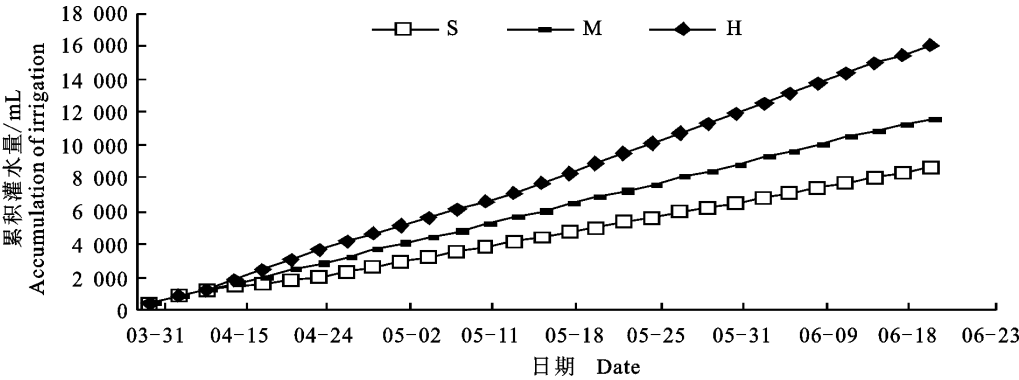
Table 1 Environmental situation in growth chamber

处 理 Treatment	实测 CO ₂ 体积分数/(μL/L) Measured CO ₂ volume fraction			温度/℃ Temperature			湿度/% Relative humidity		
	24 h	白天 Day	夜间 Night	24 h	白天 Day	夜间 Night	24 h	白天 Day	夜间 Night
C ₀	270	238	303	23.8	29.6	18.1	62.3	56.2	67.6
C ₁	379	486	275	23.2	27.9	18.6	53.7	47.2	59.5

注:白天 CO₂ 体积分数是从 9:00 到 18:00 的均值,平均气温、湿度夜间均值是从该天 18:00 到次日 6:00 的均值,白天平均值是从该天的 6:00 到 18:00 的均值,数据采集时间为 4 月 23 日—6 月 23 日。

Note:CO₂ volumn fraction during daytime was collected from 9:00 to 18:00 every 10 min during daytime. Average of air temperature,relative humidity was from the 18:00 to 6:00 next day during night and the daytime means were from 6:00 to 18:00. Data acquisition was from April 23 to June 23.

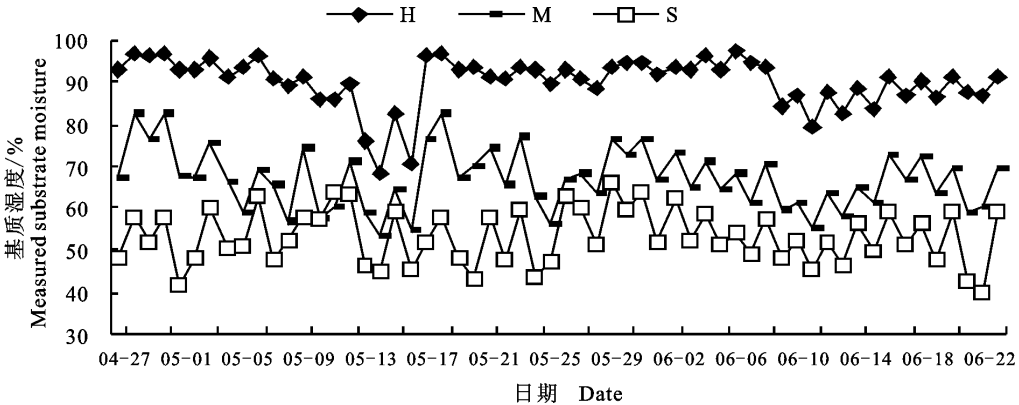
图 2 为试验期间每株番茄(每盆)的累积灌水量,试验于 4 月 15 日开始水分处理,从图 2 可以看到整个试验期间,随着时间的增加,H、M、S 处理下的累积灌水量差异也逐渐增大,H 处理每株共灌水 16 100 mL,M 处理每株共灌水 11 600 mL,S 处理每株共灌水 8 600 mL。



数据采集时间为 3 月 31 日至 6 月 23 日 Data acquisition was from March 31 to June 23

图 2 试验期间不同处理累积灌水量(每株)

Fig. 2 Accumulation of irrigation water under different treatments during experiment(each plant)



每 10 min 记录 1 次,数据采集时间是 4 月 27 日—6 月 23 日,图中每个点是由每天采集的 144 个数据计算其平均值所得 The substrate moisture was collected every 10 min during day and night,and average of 144 data each day,data acquisition was from April 27 to June 23

图 3 试验期间不同水处理的基质湿度(每株)

Fig. 3 Measured substrate moisture under different treatments during experiment(each plant)

2.2 不同处理对番茄植株干质量的影响

图 4 是各处理组合下的番茄植株累积干质量随生长时间的变化趋势。由图 4 可知,植株干质量均表现为逐日增加。每个水分处理下,C₁ 与 C₀ 的植株干质量在 36 d 之前平缓增加,之后 C₁ 的干质量突然跃升,高于 C₀,在 H、M 条件下表现的最为明显,说明 CO₂ 效应大于水分效应。H 处理下,第 48 天,C₁ 处理单株的累积干质量比 C₀ 增加 5.3 g,提高 33%,第 63 天,增加 10.9 g,提

图 3 显示,H、M、S 处理下的基质湿度均值分别为 90%、67%、53%,从图中可以看出,各水分处理的差异较为明显。图中的数据由智能多点土壤湿度记录仪每 10 min 记录 1 次,数据采集时间为 4 月 27 日至 6 月 23 日。

高 38%,第 84 天,增加 21.7 g,提高 58%;M 处理下,第 63 天,C₁ 干质量比 C₀ 增加 6.5 g,提高 28%,第 84 天,C₁ 比 C₀ 增加 12.3 g,提高 38%;而 S 处理下,仅提高 8%。可见,处理时间越长,C₁ 较 C₀ 增加的幅度就越大,CO₂ 效应需一定时间积累。

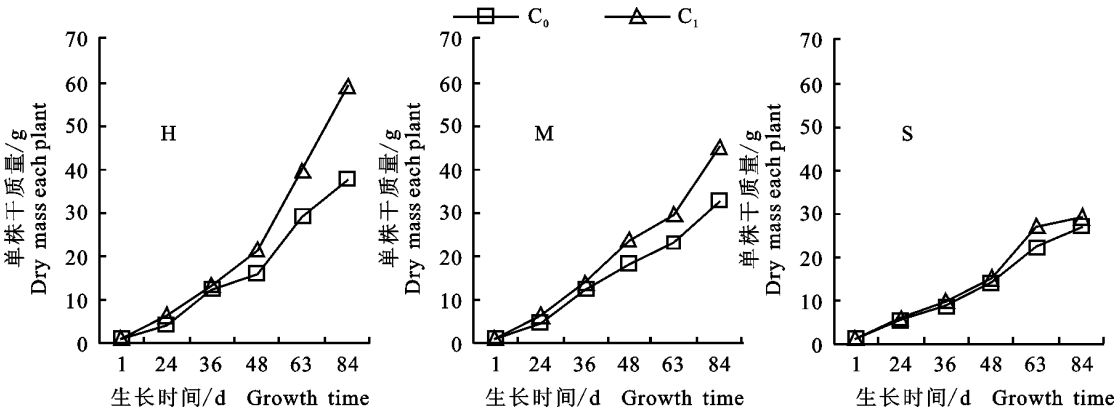
从表 2 可分析得出,在 H 条件下,C₁ 水平下的番茄累积干质量较 C₀ 增加 30%,且差异显著,C₁ 的番茄水分利用效率比 C₀ 增加 58%;M 处理

下,C₁ 的累积干质量比 C₀ 增加 23%,C₁ 的番茄水分利用效率比 C₀ 增加 38%;而 S 处理下,C₁ 的累积干质量比 C₀ 仅增加 9%,C₁ 的番茄水分利用效率比 C₀ 仅增加 8%。说明水分供应与施 CO₂ 具有协同作用,在一定范围内水分越多施肥效应就越明显,促进番茄植株的干物质积累,进而提高水分的利用效率。肥料效应在水分充足条件下发挥得更好。

由表 2 可知,对于干物质日生长量这一生长指标也发现同样的规律,即 H 处理下,C₁ 水平下植株的日生长量比 C₀ 增加 55%;M 处理下,C₁

比 C₀ 增加 37%;而 S 处理下,仅增加 12%。表明增施 CO₂ 可促进番茄单株的日生长量(干质量)增加,进而使总干物质增加。

由表 2 还发现,各个处理组合中,C₁H 处理的番茄单株最终干质量最大,为 59.1 g,C₁M 次之,为 44.9 g,并且 C₁H、C₁M 处理下的番茄水分利用效率也最高,为 3.7 和 3.8 g/kg。S 处理下的水分利用效率也较高,为 3.1~3.4 g/kg,但是植株干质量最小,低于 30 g,远低于 M、H 处理下的番茄干质量。综合考虑,C₁H 处理效果最好,C₁M 次之。



图中第 1 天为从定植时间 4 月 1 日开始算起 Plants were transplanted at first day starting on April 1

图 4 不同灌水量和 CO₂ 处理下番茄的单株累积干质量

Fig. 4 Accumulated dry mass per plant under different treatments

表 2 不同灌水量和 CO₂ 处理对番茄生物量 and 水分利用率的影响

Table 2 Effects of different irrigation and CO₂ treatments on plant dry-mass and utilization of water

处 理 Treatment	干物质生长量的函数式 Growth of dry-mass	单株最终干质量/g Final dry-mass per plant	单株累积用水量/kg Irrigation per plant	水分利用效率/(g/kg) Water use efficiency
H	C ₀ Y=0.470X-3.324(R ² =0.954 0)	37.4 bAB	16.1 aA	2.3 abA
	C ₁ Y=0.728X-7.514(R ² =0.931 3)	59.1 aA	16.1 aA	3.7 aA
M	C ₀ Y=0.399X-1.661(R ² =0.977 4)	32.7 bB	11.6 bB	2.8 abA
	C ₁ Y=0.547X-3.478(R ² =0.969 1)	44.9 bAB	11.6 bB	3.8 abA
S	C ₀ Y=0.334X-1.358(R ² =0.970 1)	26.7 bB	8.6 cC	3.1 bA
	C ₁ Y=0.375X-1.551(R ² =0.942 0)	28.8 bB	8.6 cC	3.4 bA

注:函数式是以测定时间 X(即生长时间)为横坐标,以每株干物质累积量(g)Y 为纵坐标,在 Excel 中做散点图,函数式的斜率为日生长量(干质量)。小写字母表示差异显著(P<0.05),大写字母表示差异极显著(P<0.01)。下同。

Note:The detected time X(Growth days) represents X-axis and dry matter accumulation(g) per plant represents Y-axis in functions of the above table. Scatter plots are done in the Excel,the slope of the functions were daily growth(dry matter). Lowercase letters reperent significant difference(P<0.05) and uppercase letters reperent extremely significant differences(P<0.01). The same below.

由图 4 和表 2 可知,在 H、M、S 处理下,C₁ 水平下番茄植株的累积干质量比 C₀ 高。图 5 是把水分处理合计,综合比较 C₁ 与 C₀ 对植株干质量的影响。由表 3 可知,C₁ 水平下的番茄日生长量

(干物质)和 C₀ 的分别是 0.5 g 和 0.4 g,C₁ 比 C₀ 增加 38%;从图 5 和表 3 明显可以看出,C₁ 与 C₀ 的最终平均干质量(6 月 23 日的测定值见表 3)分别为 44.29 g 和 32.26 g,C₁ 水平下番茄植株的

累积干质量比 C₀ 增加 37%，差异显著。由于这里累积使用的水量一样，则 C₁ 水平下番茄水分利用效率较 C₀ 高 37%。

2.3 增施 CO₂ 对番茄生理活性的影响

由表 4 可知，在 H、M、S 处理下，番茄植株的 SOD 活性均值分别为 59.5、58.5 和 53.3 U/g，随水分的减少而降低，而在水分供应充足（H、M），C₁ 水平下的 SOD 活性比 C₀ 的提高 17%，水分亏缺（S），可提高 21%。水分供应充足（H、M），C₁ 水平下的 POD 活性比 C₀ 提高约 39%，水分亏缺（S），提高 59%。说明水分供应充足（H、M），增施 CO₂ 可使植株体内 SOD 和 POD 活性升高，水分亏缺（S）时，效果更明显，可以更好地清除活性氧的伤害。

SOD 和 POD 作为酶保护体系，在不同 CO₂ 体积分数下酶活发生了变化（图 6、图 7）。POD 活性在试验期间整体呈现先慢后快、逐步上升的趋势，且 C₁ 水平的番茄其 POD 活性始终高于 C₀ 的。SOD 活性在试验期间整体呈现先下降后上升的趋势，且 C₁ 的始终高于 C₀。C₁ 与 C₀ 的番

茄植株其 SOD 平均酶活分别为 61.9 和 52.4 U/g，C₁ 比 C₀ 提高 18%；C₁ 与 C₀ 水平下 POD 活性平均分别为 638.5 和 442.7 U/（g·min），C₁ 比 C₀ 提高 44%，说明增施 CO₂ 能提高番茄植株的抗氧化性，可快速有效消除植株在新陈代谢过程中产生的有害物质。

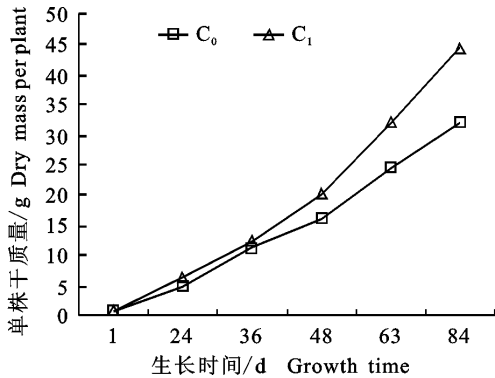


图 5 不同 CO₂ 处理对番茄单株累积干质量的影响
Fig. 5 Effect of different CO₂ treatments on accumulated dry mass per plant

表 3 不同 CO₂ 处理对番茄水分利用率的影响

Table 3 Effects of different CO₂ treatments on water use efficiency

处 理 Treatment	干物质生长量的函数式 Growth of dry-mass	单株最终干质量/g Final dry-mass per plant	单株累积用水量/kg Irrigation	水分利用效率/(g/kg) Water use efficiency
C ₀	$Y=0.401\ 6X-2.114\ 8(R^2=0.973\ 1)$	32.26 bA	12.10 aA	2.67 bA
C ₁	$Y=0.550\ 3X-4.181\ 2(R^2=0.961\ 0)$	44.29 aA	12.10 aA	3.66 aA

注：C₀、C₁ 干质量计算方法分别为：C₀H+C₀M+C₀S、C₁H+C₁+C₁S。每个处理选 3 株，计 9 个数据均值。
Note: Dry-mass of C₀ and C₁: C₀H+C₀M+C₀S, C₁H+C₁+C₁S. Three plants were selected in each treatment and averaged 9 plants.

表 4 不同灌水量处理下增施 CO₂ 对番茄叶片 POD 和 SOD 活性的影响

Table 4 Effects of CO₂ enrichment on activities of POD and SOD under different irrigation treatments

处 理 Treatment		SOD 活性/(U/g) SOD activity	POD 活性/[U/(g·min)] POD activity
H	C ₀	54.8 ab	505.9 ab
	C ₁	64.2 a	700.0 a
M	C ₀	54.0 ab	470.2 ab
	C ₁	63.0 a	654.6 ab
S	C ₀	48.3 b	351.9 b
	C ₁	58.4 ab	560.7 ab

注：数据为试验期间 4 次测定的均值，每个处理选 3 株，为 12 个数据的均值。
Note: Data are mean value of 4 measurements in the experiment. Three plants were selected in every treatment, each value was average of 12 data.

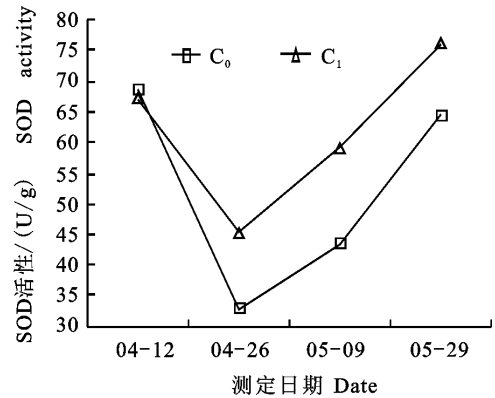


图 6 不同 CO₂ 处理对番茄叶片 SOD 活性的影响
Fig. 6 Effect of different CO₂ treatments on activity of SOD in tomato leaves

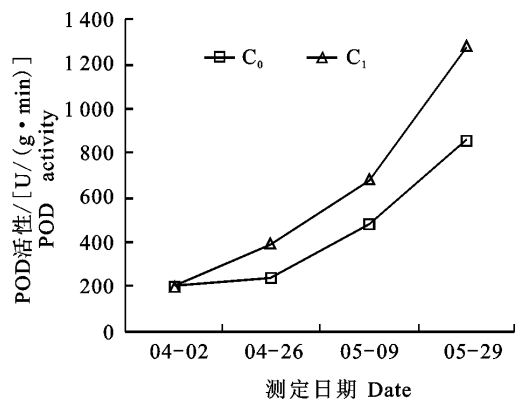


图 7 不同 CO₂ 处理对番茄叶片
POD 活性的影响

Fig. 7 Effects of different CO₂ treatments
on activity of POD in tomato leaves

3 讨论

3.1 增施 CO₂ 可以提高番茄植株的水分利用效率

试验表明,相同灌水量下,增施 CO₂ 可使番茄植株的水分利用效率提高 37%,这是通过增加生物量来提高其水分利用效率。刘月岩等^[5]通过文献总结出 CO₂ 体积分数升高显著提高小麦在叶片、群体及产量水平下的水分利用效率。张小全等^[13]发现当 CO₂ 体积分数升高时,作物叶片的气孔导度就会减小,从而导致蒸腾速率降低,光合速率下降的速度小于蒸腾速率,可使作物水分利用率提高达 50%~150%。在群体水平,增施 CO₂ 使叶片周围 CO₂ 体积分数增大,促使气孔打开,提高植株的光合作用,生物量得以累积,从而提高水分的利用效率,但对耗水量影响不显著。试验在水分利用效率指标上也得出类似结论。

试验还发现,水分供应充足(H、M),增施 CO₂ 的番茄植株其水分利用效率比不施增加 38%~58%;水分亏缺(S)下仅增加 8%。表明增施 CO₂ 需保证水分供应充足,效果才会更好。目前这方面的报道较少,需进一步验证。

3.2 增施 CO₂ 可以促进番茄植株增产

CO₂ 是光合作用的主要原料,增施 CO₂ 利于羧化反应,提高光合效率,同时抑制光呼吸,提高净同化率,从而增加干物质量。崔庆法等^[14]研究表明,与正常生长条件下相比,补施 CO₂ (700 μL/L)的黄瓜的生物干质量增加了 27%。魏珉等^[3]指出施用 CO₂ 肥,700 和 1 000 μL/L 处理下分别使全株干质量提高 35%、75%。试验表明,

增施 CO₂ (500 μL/L)可以提高番茄植株的生物干质量,比不施可提高 37%。

高方胜等^[15]的研究也表明,80%土壤湿度显著提高番茄鲜质量,但坐果率较 50%土壤水分处理番茄的低,而番茄灵处理可显著提高 80%与 65%土壤水分处理的番茄坐果率,并显著提高其产量,但对 50%水分处理的番茄没有影响;自然坐果条件下,80%、65%水分处理的番茄产量分别比 50%处理高 35%、28%,而用番茄灵处理后,前者的产量分别比后者增加 71%和 39%。

温室内自然 CO₂ 体积分数下,由于体积分数偏低限制番茄叶片的光合作用,因此增产幅度小。高 CO₂ 体积分数下,同时受其他环境因子(光照、温湿度、水)的限制。本试验发现,不同灌水量和 CO₂ 体积分数处理下,水分充足(H、M),增施 CO₂ 的番茄植株其生物干质量比不施增加 23%~30%;水分亏缺(S)仅增加 9%,增产不明显。由此可知,增施 CO₂ 需保证水分供应充足,效果才会更好。

4 结论

增施 CO₂ 可使番茄植株的水分利用效率显著提高,高水、中水、低水处理分别提高 58%、38%、8%,说明在水分供应充足的情况下,增施 CO₂ 效果显著;这种效应会直接反映到作物的生物量表现上,即番茄植株生物量(干质量)在高水、中水、低水处理时分别比不施用 CO₂ 的对照处理提高 30%、23%、9%。同时生理测定结果表明水分供应充足条件下(M、H),增施 CO₂ 的番茄植株 SOD 活性比不施的增加 18%,POD 活性增加 44%。

参考文献 Reference:

- [1] 蒋先明. 蔬菜栽培学总论[M]. 北京:中国农业出版社, 2000:105-109.
JIANG X M. Olericulture General [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:105-109(in Chinese).
- [2] 王修兰,徐师华,崔读昌. CO₂ 浓度倍增及气候变暖对农业生产影响的诊断与评估[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(4):47-48.
WANG X L, XU SH H, CUI D CH. The diagnosis and estimation of CO₂ concentration increasing and climate warming on the agricultural production[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(4):47-48(in Chinese with English abstract).
- [3] 魏珉,邢禹贤,马红,等. 果菜苗期 CO₂ 施肥壮苗效果

研究[J]. 山东农业大学学报, 2000, 31(2): 196-200.

WEI M, XING Y X, MA H, *et al.* Study on fruit and vegetable seedling CO₂ fertilization effect[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2000, 31 (2): 196-200 (in Chinese with English abstract).

[4] 周力士, 曲英华, 王红玉, 等. 不同水分条件下增施 CO₂ 对日光温室内番茄生长的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 175-181.

ZHOU L SH, QU Y H, WANG H Y, *et al.* Effect of CO₂ enrichments under different water conditions on growth of tomato in heliogreenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45 (11): 175-181(in Chinese with English abstract).

[5] 刘月岩, 乔允周. CO₂ 浓度升高对小麦水分利用效率的影响研究综述[J]. 气候变化研究快报, 2013, 2(1): 9-14.

LIU Y Y, QIAO Y ZH. A review on the effect of carbon dioxide enrichment on wheat water use efficiency[J]. *Climate Change Research Letters*, 2013, 2(1): 9-14(in Chinese).

[6] 姜 帅, 居 辉, 吕小溪, 等. CO₂ 浓度升高与水分互作对的冬小麦生长发育影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 403-409.

JIANG SH, JU H, LÜ X X, *et al.* Interactive effects of elevated carbon dioxide and water on the growth and development of winter wheat[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(4): 403-409(in Chinese with English abstract).

[7] 王润佳, 高世铭, 张绪成. 高大气 CO₂ 浓度下 C₃ 植物叶片水分利用效率升高的研究进展[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 190-195.

WANG R J, GAO SH M, ZHANG X CH. The physiological mechanism of the increment of C₃ plant leaf water use efficiency under high atmospheric CO₂ condition[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(6): 190-195(in Chinese with English abstract).

[8] 蒋跃林, 岳 伟, 张庆国, 等. 大气 CO₂ 浓度对大豆光能利用率和水分利用效率的影响[J]. 耕作与栽培, 2005, 2(2): 2-3.

JIANG Y L, YUE W, ZHANG Q G, *et al.* Effects of atmospheric CO₂ concentration on light energy utilization and water use efficiency of soybean[J]. *Tillage and Cultivation*, 2005, 2(2): 2-3(in Chinese).

[9] 孙景生. 大气 CO₂ 浓度增加对植物生长发育及其水分利用率的影响[J]. 农业环境与发展, 1996(3): 27-29.

SUN J SH. Effects of atmospheric CO₂ concentration on plant growth and development and water use efficiency[J]. *Agricultural Environment and Development*, 1996(3): 27-29(in Chinese).

[10] 俞满源, 黄占斌, 山 仑. 不同水分条件下 CO₂ 浓度升高对植物生长及水分利用效率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(3): 110-112.

YU M Y, HUANG ZH B, SHAN L. Response of plant growth and water use efficiency to different water contents under environmental CO₂ concentration raising[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2003, 11(3): 110-112(in Chinese with English abstract).

[11] 温祥珍, 李亚灵. 非对称连跨式节能温室的结构设计与性能特点[J]. 农村实用工程技术, 2003, 2(2): 22-23.

WEN X ZH, LI Y L. Structure design and performance characteristics of asymmetric continuous span type energy saving greenhouse[J]. *Applied Engineering Technology in Rural Areas*, 2003, 2(2): 22-23(in Chinese).

[12] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992: 120-123.

ZHANG ZH L. Experimental Instruction of Plant Physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 120-123 (in Chinese).

[13] 张小全, 陈仲庐. CO₂ 增长对杉木中龄林针叶光合生理生态的影响[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 390-396.

ZHANG X Q, CHEN ZH L. The responses of 17-years-old Chinese fir shoots to elevated CO₂ [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 390-396(in Chinese with English abstract).

[14] 崔庆法, 王 静. 补施 CO₂ 对日光温室黄瓜生长的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 39-43.

CUI Q F, WANG J. Effects of applied CO₂ in the solar greenhouse on characters of *Cucumis sativus* 's growth [J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2003, 23(1): 39-43(in Chinese with English abstract).

[15] 高方胜, 徐 坤, 徐立功, 等. 土壤水分对番茄生长发育及产量品质的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(4): 69-72.

GAO F SH, XU K, XU L G, *et al.* Effect of soil water on the growth, development, yield and quality of tomato[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(4): 69-72(in Chinese with English abstract).

Effect of CO₂ Enrichment on Water Use Efficiency and Yield in ‘Bate’ Tomato

YUAN Tingting, WANG Tingting, ZHANG Ling, LI Yaling and WEN Xiangzhen

(College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu Shanxi 030801, China)

Abstract This experiment was conducted with a tomato variety ‘Bate’ in two growth chambers with natural sunlight. The cow manure and slag(1 : 1, mass ratio) were used in this study as substrate.

The effect of CO₂ enrichment on water use efficiency in tomato was studied in this experiment. CO₂-enrichment was accomplished with pressured CO₂ in a steel cylinder at the concentration of 500 μL/L, while no CO₂-enrichment was used as the control. The potted tomato plants received three levels of irrigation regime treatments, which were 300 mL per pot(low), 400 mL per pot(middle), 600 mL per pot (high). The tomato plants were watered once every three days. The results showed that CO₂ enrichment increased the water use efficiency in ‘Bate’ tomato. The tomato plants with CO₂ enrichment showed 58% higher water use efficiency than control at 600 mL per pot(high), 38% higher at 400 mL per pot(middle), and 8% higher at 300 mL per pot(low). The results from this study showed that the improvement of water use efficiency by CO₂ enrichment in ‘Bate’ was more obvious under adequate water supply. This improved water use efficiency was showed in plant dry mass, and fruit dry mass. CO₂ enrichment increased the total plant dry mass by 30% at 600 mL per pot(high), by 23% at 400 mL per pot(middle), and by 9% at 300 mL per pot(low). CO₂ enrichment significantly increased the enzymatic activities of superoxide dismutase and peroxidase at 600 mL per pot(high) and 400 mL per pot(middle). The CO₂ enrichment with abundant water supply could be a highly effective tool for increasing fruit yield and profitability.

Key words CO₂; Irrigation; Tomato; Dry-mass; Water use efficiency

Received 2016-05-19 **Returned** 2016-06-20

Foundation item Key Project of Coal-based Scientific and Technology in Shanxi Province (No. FT201402-05); State Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 61233006); Scientific and Technological Project in Shanxi Province (No. 20130311010-1).

First author YUAN Tingting, female, master student. Research area: protected horticulture. E-mail: 739477830@qq.com

Corresponding author WEN Xiangzhen, male, professor, doctoral supervisor. Research area: protected horticulture. E-mail: wenxiangzhen2009@hotmail.com

(责任编辑:潘学燕 **Responsible editor:** PAN Xueyan)