

不同水分条件下增施 CO₂ 对日光温室内番茄生长的影响*

周士力 曲英华 王红玉 熊 珺

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 试验设置4个CO₂浓度(温室内未增施的CO₂浓度约450 μmol/mol,低、中、高CO₂增施浓度分别为(700 ± 50)、(1 000 ± 50)、(1 300 ± 50) μmol/mol)和3个水分条件(低、中、高基质含水率分别为基质饱和含水率的35% ~ 45%、55% ~ 65%、75% ~ 85%)的交互处理。结果表明,增施1 000、1 300 μmol/mol CO₂能提升番茄叶片的净光合速率并可促使植株提早6 ~ 11 d开花;中水条件下,CO₂增施组比未增施组的表观量子效率(AQY)、表观羧化效率(ACE)显著上升,光补偿点显著降低;高CO₂浓度下,中水、高水组植株的最大净光合速率和表观量子效率显著高于低水组,同时光补偿点和CO₂补偿点低于低水组;低水条件下CO₂增施组植株叶片的丙二醛(MDA)含量降低,表明增施CO₂可以在一定程度上缓解不利水分条件对番茄植株造成的氧化损伤;增施CO₂条件下低水组比未增施条件下中水组植株的开花时间提前3 ~ 7 d、第一穗果鲜质量增加18% ~ 44%,1 000、1 300 μmol/mol CO₂增施条件下中水组比未增施条件下高水组植株的开花时间分别提前8、10 d,第一穗果鲜质量分别增加42.8%、34.0%,表明CO₂增施能提高番茄第一穗果鲜质量水平上的水分利用效率。

关键词: 日光温室 CO₂浓度 基质含水率 表观量子效率 表观羧化效率 丙二醛(MDA)含量

中图分类号: S625.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)S0-0175-07

引言

在全球化石能源濒临枯竭的大背景下,能够在不进行人工加热条件下生产新鲜蔬菜的日光温室在我国已蓬勃发展了将近80年^[1],但仍然存在对CO₂气肥不够重视、对水分的精确管理水平不够高等问题。一般研究都认为增施CO₂有利于作物的生长发育,但其增施效果还受其他环境因子、作物生长阶段等因素的影响。水分作为作物生长发育的重要环境因子之一,对CO₂增施效果产生影响。黄瓜、玉米、小麦等作物的研究表明,不同水分条件下增施CO₂对作物的生长发育产生不同影响^[2-4]。在相对封闭且高湿的日光温室内,作物对水分管理的要求较高,因此,日光温室内对水分进行合理的精确管理,不仅可以提高种植作物的产量与品质,同时能够提高水资源的利用率。提高日光温室效益的同时减少设施栽培对水资源的浪费,在我国水资源短缺的大背景下具有重要意义。

目前,不同水分条件下增施CO₂对作物生长发育影响的相关研究仍较少,且多以牧草和田间粮食作物作为研究对象,较少涉及温室蔬菜作物,在日光

温室内进行的研究则更少。本研究以番茄为试验对象,研究不同水分条件下增施CO₂对日光温室内番茄生长和光合特性的影响,以期对日光温室环境最优调控与管理策略的建立提供理论依据和技术参数,为我国日光温室产业的发展提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验品种为番茄“中杂105”,试验地点为中国农业大学水利与土木工程学院楼顶的日光温室内。于2013年9月1日播种,28 d后定植到内径为10 cm的塑料营养钵中,基质为蛭石与珍珠岩按2:1体积比均匀混合而成。在植株营养需求较小的前期,每隔1 d补给1个剂量营养液,营养需求较旺盛的后期补给2倍剂量的营养液。在植株第一花序上部留2片叶后摘心。

试验设置3个CO₂增施水平,浓度(摩尔比)为(700 ± 50)、(1 000 ± 50)、(1 300 ± 50) μmol/mol,以温室内未增施的环境CO₂(约450 μmol/mol)为对照,共4组处理。使用CO₂钢瓶增施CO₂,各处理分别置于4个栽培槽内(2.5 m × 0.6 m × 2.0 m),用

收稿日期:2014-06-28 修回日期:2014-08-24

*国家自然科学基金资助项目(31271619)

作者简介:周士力,硕士生,主要从事设施园艺环境工程研究,E-mail: chochou512@cau.edu.cn

通讯作者:曲英华,教授,博士生导师,主要从事设施园艺研究,E-mail: qyinghua@cau.edu.cn

PEP 塑料薄膜分隔并各自用胶带和凹凸条进行密封,各处理组内安装 CO₂ 传感器进行 CO₂ 的实时监控。每个 CO₂ 浓度下设置 3 个水分处理,其基质含水率分别为基质饱和含水率的 35%~45% (低)、55%~65% (中)、85%~75% (高)。子叶展开后,晴天上午增施 CO₂ 2~3 h,阴雨天不增施;以称量和土壤湿度传感器控制各处理组基质的含水率。

1.2 测定项目与方法

选 10 株样本测定番茄叶片的 SPAD 值、第一花序的着生节位与开花时间。

分别于 12 月 16 日~12 月 26 日、12 月 28 日~次年 1 月 3 日,选择晴天的 9:30~11:30、14:00~16:00,采用便携式光合仪 (Li-6400, Li-COR INC., USA) 测定番茄植株生长点以下第 3 片叶的 CO₂ 响应曲线、光响应曲线。测量时采用红蓝 LED 叶室,叶室温度设置为 25 °C,气流速度 500 μmol/s。测定 CO₂ 响应曲线,设置光合有效辐射 (PAR) 强度为 400 μmol/(m²·s),CO₂ 浓度为 0、50、100、150、200、250、400、700、1 000、1 300、1 600、2 000 μmol/mol;在温室内未增施 CO₂ 条件下测定光响应曲线,设置光合有效辐射 (PAR) 强度为 1 300、1 100、900、700、500、300、200、150、100、75、50、0 μmol/(m²·s)。重复测量 3 次。

测定结果利用经典的 Farquhar 模型进行拟合,用 SPSS 非线性统计分析模块进行数据拟合与分析。最大净光合速率 P_{max} 、最大电子传递速率 J_{max} 、表观量子效率 AQY、表观羧化效率 ACE、曲角 K 、暗呼吸速率 R_d 、光呼吸速率 R_p 的初始值设置为 30 μmol/(m²·s)、30 μmol/(m²·s)、0.05 μmol/mol、0.05 μmol/mol、0.5 (无量纲)、2 μmol/(m²·s)、2 μmol/(m²·s);约束条件依次设置为:(P_{max} 、 J_{max}) ≤ 50 μmol/(m²·s),0 < (AQY、ACE) ≤ 0.125 μmol/mol,0 < K ≤ 1。对 CO₂ 浓度在 150 μmol/mol 以内或光合有效辐射 PAR 在 150 μmol/(m²·s) 以内的数据进行

线性回归,该直线与 P_{max} 的交点为 CO₂ 饱和点 (CSP) 或光饱和点 (LSP),与 X 轴的交点为 CO₂ 补偿点 (CCP) 或光补偿点 (LCP)。

2014 年 1 月 5 日取植株生长点以下第 4 片叶,用 TBA 显色法测定其丙二醛 (MDA) 含量,重复 3 次。

2014 年 1 月 20 日称取番茄第一穗果实的鲜质量。

1.3 统计分析

采用 EXCEL 2007、SPSS 16.0 软件对试验数据进行分析与作图。

2 结果与分析

2.1 不同水分条件下增施 CO₂ 对日光温室内番茄着花节位和开花时间的影响

由图 1 可知,在各水分条件下,增施 CO₂ 能降低花序节位,高水下 1 300 μmol/mol 组的花序节位比 CK 的花序节位显著低 1 节位;在各水分条件下,植株开花时间随 CO₂ 浓度的升高而提前,中水、高水下 1 300 μmol/mol 组的开花时间分别比 CK 的开花时间显著提前 9、11 d。对 CO₂ 浓度和植株开花时间进行 Pearson 相关分析,低水、中水、高水条件下开花时间与 CO₂ 浓度的相关系数 R 分别为 -0.807、-0.737、-0.749,都在 $P_{0.01}$ 水平上呈显著负相关。

增施 CO₂ 使 C/N 增大,植物花芽分化的营养需求得到满足,花芽分化加快,生殖生长加快,促进了花的形成与发育。本试验中增施 CO₂ 有效降低了花序节位,开花时间随 CO₂ 浓度的增加而提前,这与前人在番茄、水稻、洋桔梗等植物上的研究结果一致^[5-9]。

同时,CO₂ 增施条件下低水组番茄植株的第一花序节位分别比未增施条件下的中水组低 0.3~1.3 个节位、开花时间分别提前 3~7 d,CO₂ 增施条件下中水组番茄植株的第一花序节位分别比未增施条件下的高水组低 0.8~1.0 个节位、开花时间分别

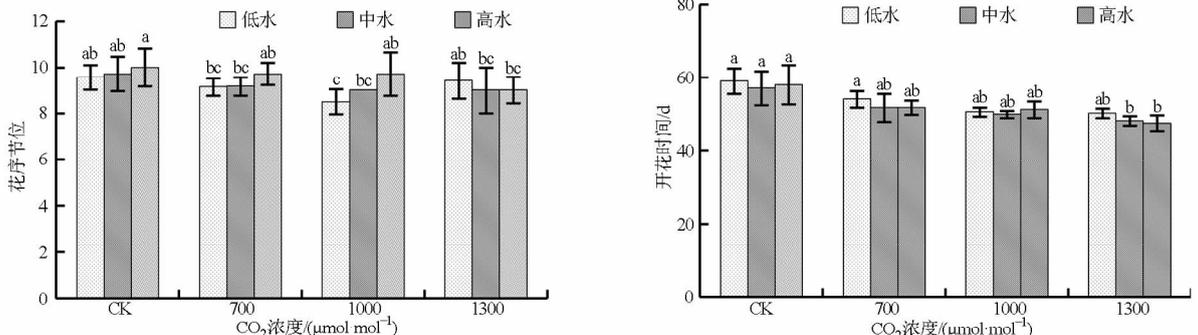


图 1 不同水分条件下 CO₂ 增施对日光温室内番茄植株花序节位和开花时间的影响

Fig. 1 Effect of CO₂ enrichments under different water conditions on plant inflorescence node and flowering time of tomato in heliogreenhouse

提前6~10 d,即增施CO₂后,在较少水量下,番茄植株的花序节位降低、开花提前。

2.2 不同水分条件下增施CO₂对日光温室内番茄植株光合特性的影响

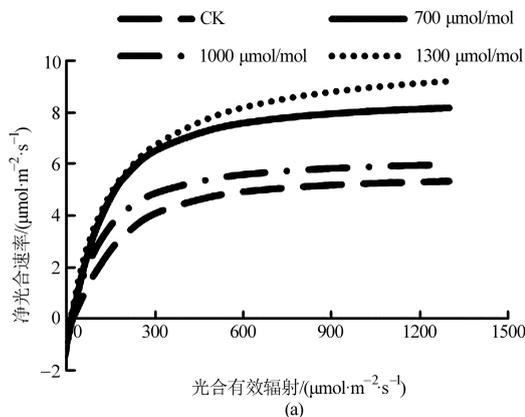
表1中,定植7 d时,各水分条件下和各CO₂浓度组内,植株叶片的SPAD值无显著差异;定植28 d时,各水分条件下1 000、1 300 μmol/mol组内植株叶片的SPAD值高于对照和700 μmol/mol组;定植49 d时,低水下1 000、1 300 μmol/mol组的SPAD值比CK、700 μmol/mol组显著升高,中水、高水下CO₂增施组的SPAD值比CK分别显著提高9.7%、15.6%、16.5%和6.5%、12.1%、16.5%。

表1 不同水分条件下CO₂增施对日光温室内番茄植株叶片SPAD值的影响

Tab.1 Effect of CO₂ enrichments under different water conditions on SPAD of tomato leaves in heliogreenhouse

CO ₂ 浓度/ (μmol·mol ⁻¹)	水分	定植天数/d		
		7	28	49
CK	低	33.3 ± 1.0 ^{ab}	33.4 ± 3.1 ^{cd}	33.1 ± 1.3 ^{def}
	中	34.0 ± 2.6 ^{ab}	30.6 ± 3.5 ^a	32.1 ± 2.2 ^{ef}
	高	33.7 ± 1.7 ^{ab}	33.6 ± 3.7 ^{bcd}	31.5 ± 0.8 ^f
700	低	33.0 ± 1.2 ^{ab}	35.3 ± 2.3 ^{abc}	34.6 ± 1.0 ^{cde}
	中	33.8 ± 3.6 ^{ab}	32.9 ± 2.5 ^{cde}	35.2 ± 2.5 ^{bc}
	高	32.0 ± 1.6 ^b	32.2 ± 1.6 ^{de}	33.6 ± 1.1 ^{cde}
1 000	低	34.5 ± 1.3 ^{ab}	37.9 ± 2.2 ^{abc}	38.3 ± 2.0 ^a
	中	35.5 ± 1.7 ^a	37.6 ± 2.0 ^{abc}	37.1 ± 1.3 ^{ab}
	高	33.5 ± 1.6 ^{ab}	35.4 ± 3.1 ^{abc}	35.3 ± 2.1 ^{bc}
1 300	低	33.0 ± 2.0 ^{ab}	37.3 ± 2.0 ^{abc}	36.6 ± 1.3 ^{ab}
	中	35.0 ± 1.2 ^a	36.9 ± 2.3 ^{abc}	37.4 ± 0.8 ^a
	高	33.7 ± 1.5 ^{ab}	36.2 ± 3.3 ^{ab}	36.7 ± 1.2 ^{ab}
方差分析 CO ₂ 浓度		*	**	**
水分条件		ns	*	**
CO ₂ 浓度 × 水分条件		ns	ns	ns

注:同列数值后不同字母表示P<0.05水平上差异显著。*P<0.05,**P<0.01,***P<0.001,ns表示无显著性差异。



CO₂浓度倍增,植物叶绿体片层膜上的色素含量增加,能提高PS II的活性和光能转化效率,有利于植物对光能的吸收^[10]。但对小麦的研究表明,高大气CO₂浓度(760 μmol/mol)会降低小麦叶片的叶绿素含量^[11-13]。本试验中,随着时间的延长,在各水分条件下,CO₂增施有效促进了番茄植株叶片SPAD值的提升。

图2中,CO₂浓度对叶片净光合速率有显著影响,低水条件下CO₂增施组的叶片净光合速率比未增施组高3%~21%;中水、高水下叶片净光合速率都随CO₂增施浓度的增大而增大,增施组分别比未增施组提高1%~29%、39%~84%。基质含水率对叶片净光合速率产生显著影响,CO₂增施组内,净光合速率随基质含水率的增大而增大,1 300 μmol/mol组内高水处理的叶片净光合速率比低水处理高62.4%。

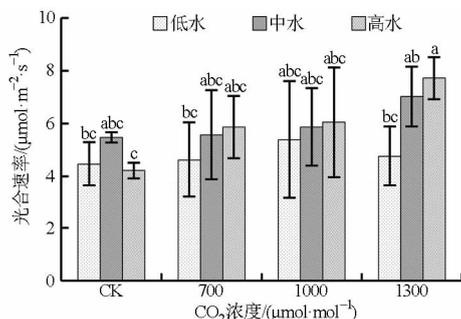


图2 不同水分条件下CO₂增施对日光温室内番茄叶片光合速率的影响

Fig.2 Effect of CO₂ enrichments under different water conditions on photosynthesis rate of tomato plants in heliogreenhouse

由图3可以看出,中水条件下,不同CO₂浓度处理番茄植株叶片的净光合速率对光强变化的响应趋势相同,当PAR在0~200 μmol/(m²·s)之间时,净光合速率随光强的增大而迅速升高;PAR在200~500 μmol/(m²·s)之间时,净光合速率的上升趋势变

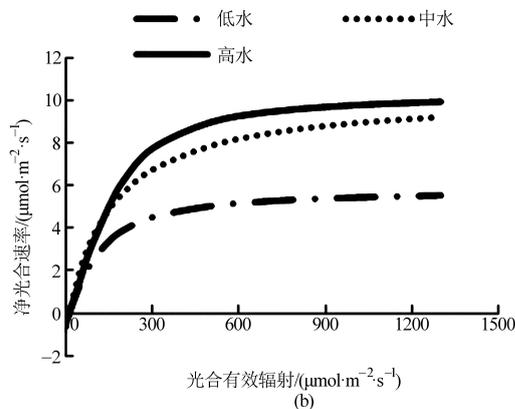


图3 不同CO₂浓度和不同水分条件下番茄植株叶片的光响应曲线

Fig.3 Light response curves of tomato grown in different CO₂ concentrations and water conditions

(a) 不同CO₂浓度 (b) 不同水分条件

缓;PAR 大于 $500 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,净光合速率逐渐趋于平缓。 $1300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ CO_2 浓度组内,不同水分条件下番茄植株叶片的净光合速率对光强变化响应曲线的变化趋势与不同 CO_2 浓度下的响应曲线的变化趋势相同。

表 2 不同 CO_2 浓度下番茄植株叶片光响应曲线特征参数

Tab.2 Parameters of light response curves of tomato grown in different CO_2 concentrations

处理组 (CO_2 浓度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}) \cdot \text{水分}$)	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	表观量子效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
CK * 中	$6.9 \pm 0.7^{\text{ns}}$	$0.033 \pm 0.006^{\text{c}}$	$11.1 \pm 1.3^{\text{a}}$	$264.8 \pm 69.0^{\text{ns}}$
700 * 中	$8.0 \pm 1.6^{\text{ns}}$	$0.055 \pm 0.004^{\text{b}}$	$7.2 \pm 0.1^{\text{b}}$	$270.9 \pm 57.8^{\text{ns}}$
1000 * 中	$8.4 \pm 1.5^{\text{ns}}$	$0.072 \pm 0.005^{\text{a}}$	$5.1 \pm 1.1^{\text{c}}$	$253.0 \pm 4.1^{\text{ns}}$
1300 * 中	$9.4 \pm 1.5^{\text{ns}}$	$0.048 \pm 0.004^{\text{b}}$	$4.8 \pm 1.3^{\text{c}}$	$248.2 \pm 46.2^{\text{ns}}$

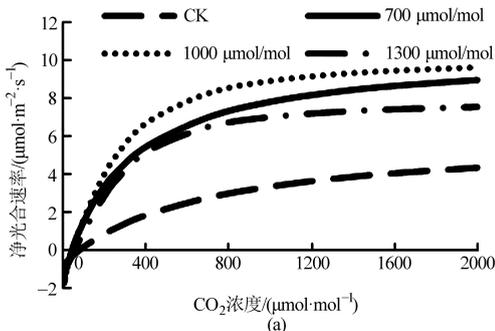
注: 同列数值后不同字母表示 $P < 0.05$ 水平上差异显著, ns 表示无显著差异, 下同。

表 3 不同水分条件下番茄植株叶片光响应曲线特征参数

Tab.3 Parameters of CO_2 response curves of tomato grown in different water conditions

处理组 (CO_2 浓度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}) \cdot \text{水分}$)	最大净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	表观量子效率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	光补偿点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	光饱和点/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
1300 * 低	$6.6 \pm 0.8^{\text{b}}$	$0.044 \pm 0.001^{\text{b}}$	$6.8 \pm 1.1^{\text{a}}$	$305.1 \pm 77.1^{\text{ns}}$
1300 * 中	$9.4 \pm 1.5^{\text{a}}$	$0.048 \pm 0.004^{\text{a}}$	$4.8 \pm 1.3^{\text{a}}$	$248.2 \pm 46.2^{\text{ns}}$
1300 * 高	$10.1 \pm 0.8^{\text{a}}$	$0.055 \pm 0.003^{\text{a}}$	$2.5 \pm 0.2^{\text{b}}$	$307.7 \pm 32.9^{\text{ns}}$

从叶片对光合有效辐射响应曲线的特征参数来看(表 2、表 3),在中水条件下, CO_2 增施组的最大光合速率、表观量子效率分别高于未增施组 15% ~ 37%、45% ~ 118%,光补偿点降低 34% ~ 57% 且与增施的 CO_2 浓度呈负相关;在 $1300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ CO_2 浓度组内,基质含水率增加,番茄植株叶片的最大净光合速率和表观量子效率依次增加,光补偿点依次下降。随着 CO_2 浓度的提高、基质含水率的增加,



番茄植株对弱光和强光的利用能力都得到增强,表明中水条件下 CO_2 增施组的植株并未发生对 CO_2 的光合适应现象, $1300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ CO_2 浓度下一定范围内基质含水率的提升能促进番茄光合能力的提升。

图 4 中,在中水条件下,不同 CO_2 浓度处理番茄植株叶片的净光合速率对 CO_2 浓度的响应趋势相同,当 CO_2 浓度在 $0 \sim 200 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间时,净光合速率随 CO_2 浓度的升高而迅速升高; CO_2 浓度在 $200 \sim 700 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 之间时,净光合速率的上升变缓; CO_2 浓度大于 $700 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 时,净光合速率趋于平缓。在 $1300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ CO_2 浓度组内,不同水分条件下番茄植株叶片的净光合速率对 CO_2 浓度变化响应曲线的变化趋势与不同 CO_2 浓度下响应曲线的变化趋势相同。

从叶片对 CO_2 浓度响应曲线的特征参数来看(表 4、表 5),中水条件下, CO_2 增施组的最大电子传递速率、表观羧化效率分别大幅高于未增施组 61% ~ 79%、66% ~ 81%, CO_2 饱和点较低但差异不显著, CO_2 补偿点降低 19% ~ 25%; $1300 \mu\text{mol}/\text{mol}$ CO_2 浓度组内,基质含水率增加,番茄植株叶片的最大电子传递速率随 CO_2 浓度的提高而增大,中水、高水组的表观羧化效率略优于低水组,中水、高水组的 CO_2 补偿点分别低于低水组的 CO_2 补偿点 26.3%、9.1%。随着 CO_2 浓度的提高、基质含水率的增加,番茄植株对高浓度 CO_2 和低浓度 CO_2 的利用能力都得到增强,表明各水分条件下 CO_2 增施组的植株并未发生对 CO_2 的光合适应现象。

2.3 不同水分条件下增施 CO_2 对日光温室内番茄植株叶片中丙二醛含量的影响

丙二醛是自由基进行细胞膜脂过氧化伤害的最终产物之一,其含量高低可反映膜脂过氧化程度的大小^[14]。小麦、黄瓜幼苗等作物的众多研究表明,干旱胁迫将导致植株叶片膜脂过氧化程度的升

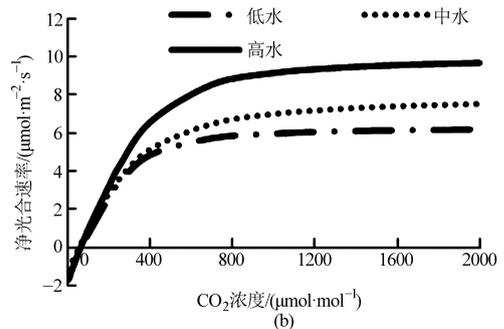


图 4 不同 CO_2 浓度和不同水分条件下番茄植株叶片的 CO_2 响应曲线

Fig.4 CO_2 response curves of tomato grown in different CO_2 concentrations and water conditions

(a) 不同 CO_2 浓度 (b) 不同水分条件

高^[15-16]。由图 5 可知,1 000、1 300 μmol/mol 组内中水、高水的 MDA 含量低于低水的 MDA 含量;CK、700 μmol/mol 组内 MDA 含量随基质含水率的升高而降低,其中低水的 MDA 含量比高水的 MDA 含量分别显著高出 35.1%、34.5%。即各 CO₂ 浓度组内,低水植株受到的氧化损伤程度最大。

表 4 不同 CO₂ 浓度下番茄植株叶片 CO₂ 响应曲线特征参数

Tab. 4 Parameters of light response curves of tomato grown in different CO₂ concentrations

处理组 (CO ₂ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)* 水分)	最大电子 传递速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	表观羧 化效率/ (μmol·mol ⁻¹)	CO ₂ 补偿点/ (μmol·mol ⁻¹)	CO ₂ 饱和点/ (μmol·mol ⁻¹)
CK * 中	6.6 ± 0.3 ^b	0.018 ± 0.007 ^b	66.6 ± 15.0 ^{ns}	500.1 ± 64.0 ^{ns}
700 * 中	11.7 ± 2.0 ^a	0.032 ± 0.006 ^a	55.3 ± 4.8 ^{ns}	559.1 ± 49.6 ^{ns}
1 000 * 中	11.6 ± 3.6 ^a	0.033 ± 0.004 ^a	53.7 ± 4.3 ^{ns}	540.2 ± 98.0 ^{ns}
1 300 * 中	10.7 ± 2.1 ^b	0.030 ± 0.005 ^a	55.8 ± 2.8 ^{ns}	546.8 ± 47.5 ^{ns}

表 5 不同水分条件下番茄植株叶片 CO₂ 响应曲线特征参数

Tab. 5 Parameters of CO₂ response curves of tomato grown in different water conditions

处理组 (CO ₂ 浓度/(μmol·mol ⁻¹)* 水分)	最大电子 传递速率/ (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	表观羧 化效率/ (μmol·mol ⁻¹)	CO ₂ 补偿点/ (μmol·mol ⁻¹)	CO ₂ 饱和点/ (μmol·mol ⁻¹)
1 300 * 低	9.1 ± 1.1 ^{ns}	0.028 ± 0.011 ^{ns}	70.4 ± 7.1 ^a	581.4 ± 108.7 ^{ns}
1 300 * 中	10.7 ± 2.1 ^{ns}	0.030 ± 0.005 ^{ns}	55.8 ± 2.8 ^b	546.8 ± 47.5 ^{ns}
1 300 * 高	11.8 ± 3.4 ^{ns}	0.025 ± 0.005 ^{ns}	64.6 ± 5.0 ^{ab}	679.1 ± 39.3 ^{ns}

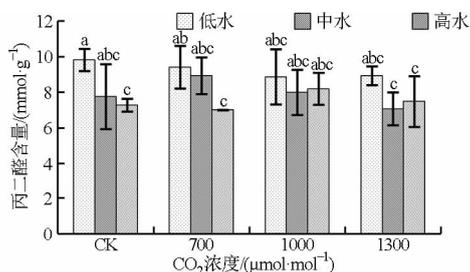


图 5 不同水分条件下 CO₂ 增施对日光温室内番茄叶片丙二醛含量的影响

Fig. 5 Effect of CO₂ enrichments under different water conditions on leaf MDA content of tomato plants in heliogreenhouse

但低水条件下,CO₂ 增施组的 MDA 含量比未增施组叶片的 MDA 含量低 4%~11%,表明 CO₂ 增施能够在一定程度上缓解缺水条件对植株造成的氧化损伤,这与前人在黄瓜、玉米等作物上的研究结果一

致^[16-18]。高 CO₂ 浓度使植物抗旱能力提高的原因可能是:高浓度的 CO₂ 能够提高抗氧化酶活性,增强抗氧化酶对活性氧的清除能力,细胞内活性氧含量降低,对细胞的攻击能力减弱,对植株造成的氧化损伤减小;此外,由于 CO₂ 浓度升高导致叶片的气孔阻力增大,蒸腾速率减小,水分利用率增加,植物对干旱的耐性得到增强^[15,17]。

2.4 不同水分条件下增施 CO₂ 对日光温室内番茄第一穗果鲜质量的影响

番茄果实 90% 以上的干物质来自光合作用,而 CO₂ 浓度是影响光合强度、呼吸作用和光化学反应等的重要因素,因此,CO₂ 浓度是农作物品质和产量的重要限制因素^[5]。增加 CO₂ 浓度能促进番茄的光合作用,增加 C 以碳水化合物形式转移到生长器官的量,从而提高产量^[19]。由图 6 可知,各水分条件下,1 000 和 1 300 μmol/mol CO₂ 增施组的第一穗果实鲜质量均高于未增施组,其中中水条件下,1 000、1 300 μmol/mol 组的果实鲜质量分别比 CK 的果实鲜质量显著高出 149.3%、134.0%,而果实鲜质量提高正是相同水分条件下 CO₂ 浓度为 1 000 和 1 300 μmol/mol 增施处理组第一穗果鲜质量水平上的水分利用效率提升的主要原因。

众多研究表明,随基质或土壤相对含水率的增加,番茄产量增加^[14, 20-21]。本试验中,各 CO₂ 增施组内果实鲜质量随基质含水率的增大而增大,其中 1 000 μmol/mol 组内高水、中水的果实鲜质量分别比低水的果实鲜质量显著高出 74.1%、81.0%,1 300 μmol/mol 组内高水、中水的果实鲜质量分别比低水的果实鲜质量显著高出 87.6%、72.7%。

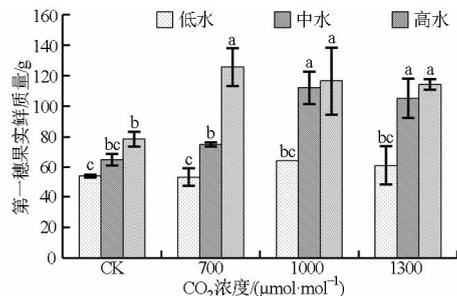


图 6 不同水分条件下 CO₂ 增施对日光温室内番茄第一穗果鲜质量的影响

Fig. 6 Effect of CO₂ enrichments under different water conditions on fresh weight of first spike fruit of tomato in heliogreenhouse

3 讨论

低水条件下增施 CO₂, 番茄花序节位降低、开花时间提前、光合速率提高、MDA 含量降低、第一穗果实鲜

质量增大、第一穗果鲜质量水平上的水分利用效率提高,表明 CO₂ 浓度升高在一定程度上缓解或避免了水分不足条件给作物产量带来的损伤,这可能是由于增施 CO₂ 提高了植株的抗旱能力,使植株在缺水条件下能维持更长时间的光合作用并延长了生长期引起。

在相同水分条件下,增施 CO₂ 能够提升第一穗果实的鲜质量;同时,CO₂ 增施组的低水组果实鲜质量与CK 的中水组果实鲜质量差异不显著,1 000、1 300 μmol/mol CO₂ 浓度下中水组果实鲜质量分别比CK 的高水组果实鲜质量显著高出 42.8%、34.0%,即增施 CO₂ 后,在较少的水量下就能获得与较高水量相若甚至较优的第一穗果实鲜质量。

中、高 CO₂ 浓度条件下,中水、高水组植株的开花时间、光合能力、第一穗果鲜质量在所有处理中表现较优,因此,在中水、高水条件下增施浓度为 1 000、1 300 μmol/mol 的 CO₂ 有利于番茄的生长发育。

4 结 论

(1) 低水条件下增施 CO₂ 能促进番茄生长发育。

(2) 增施 CO₂ 能够提高番茄第一穗果实鲜质量水平上的水分利用效率,具有节水的意义。

(3) 在中水、高水条件下,增施浓度为 1 000、1 300 μmol/mol 的 CO₂ 能促进番茄的生长发育。

参 考 文 献

- 魏晓明, 周长吉, 曹楠, 等. 中国日光温室结构及性能的演变[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(4): 855 - 860.
- 李清明. 温室黄瓜(*Cucumis sativus* L.) 对干旱胁迫与 CO₂ 质量比升高的响应与适应机理研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- Manderscheid R, Erbs M, Weigel H J. Interactive effects of free-air CO₂ enrichment and drought stress on maize growth[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 52: 11 - 21.
- 姜帅, 居辉, 吕小溪, 等. CO₂ 浓度升高与水分互作对冬小麦生长发育的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(4): 403 - 409. Jiang Shuai, Ju Hui, Lü Xiaoxi, 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)
- 张志明. CO₂ 施肥对番茄果实品质的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- Baker J T, Allen L H, Boote K J. Growth and yield responses of rice to carbon-dioxide concentration[J]. Journal of Agricultural Science, 1990, 115(3): 313 - 320.
- Osborne J L, Awmack C S, Clark S J, et al. Nectar and flower production in *Vicia faba*. (field bean) at ambient and elevated carbon dioxide[J]. Apidologie, 1997, 28(1): 43 - 55.
- Ushio A, Hara H, Fukuta N. Promotive effect of CO₂ enrichment on plant growth and flowering of *eustoma grandiflorum* (Raf.) shinn. under a winter culture regime[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2014, 83(1): 59 - 63.
- Micallef B J, Haskins K A, Vanderveer P J, et al. Altered photosynthesis, flowering, and fruiting in transgenic tomato plants that have an increased capacity for sucrose synthesis[J]. Planta, 1995, 196(2): 327 - 334.
- 赵天宏, 史奕, 王春乙, 等. CO₂ 和 O₃ 浓度倍增及其复合作用对大豆叶绿素含量的影响[J]. 生态学杂志, 2003, 22(6): 117 - 120. Zhao Tianhong, Shi Yi, Wang Chunyi, et al. Effect of double CO₂, and O₃ on chlorophyll content of soybean[J]. Chinese Journal of Ecology, 2003, 22(6): 117 - 120. (in Chinese)
- 于佳, 于显枫, 郭天文, 等. 施氮和大气 CO₂ 浓度升高对春小麦拔节期间光合作用的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 651 - 655. Yu Jia, Yu Xianfeng, Guo Tianwen, et al. Effect of nitrogen application rate and elevated atmospheric CO₂ concentration on photosynthesis of spring wheat at jointing stage[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(4): 651 - 655. (in Chinese)
- 曹翠玲, 李秀生. 供氮水平对小麦生殖生长期叶片光合速率、NR 活性和核酸含量及产量的影响[J]. 植物学通报, 2003, 20(3): 3191 - 3241. Cao Cuiling, Li Xiusheng. Effect of nitrogen level on the photosynthetic rate, NR activity and contents of nucleic acid of wheat leaf in the stage of reproduction [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2003, 20(3): 3191 - 3241. (in Chinese)
- 杨晴, 李雁鸣, 肖凯, 等. 不同施氮量对小麦旗叶衰老特性和产量性状的影响[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(4): 20 - 24. Yang Qing, Li Yanming, Xiao Kai, et al. Effect of different amount of nitrogen on flag leaf senescence and yield components of wheat[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2002, 25(4): 20 - 24. (in Chinese)
- 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 Fangsheng, Xu Kun, Xu Ligong, 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)
- De L I, Irigoyen J J, Sanchez-Diaz M. Elevated CO₂ enhances plant growth in droughted N-2-fixing alfalfa without improving water status[J]. Physiologia Plantarum, 1999, 107(1): 84 - 89.
- 李清明, 刘彬彬, 艾希珍. CO₂ 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗脂膜过氧化及抗氧化系统的影响[J]. 生态学报, 2010,

30(22): 6063–6071.

Li Qingming, Liu Binbin, Ai Xizhen. Effects of double CO₂ concentration on lipid peroxidation and antioxidant system of cucumber seedlings under drought stresses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(22): 6063–6071. (in Chinese)

17 阮亚男, 何兴元, 陈玮. CO₂ 浓度倍增对城市银杏 (*Ginkgo biloba*) 叶片膜脂过氧化与抗氧化酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1106–1111.

Ruan Yanan, He Xingyuan, Chen Wei. Effects of elevated CO₂ on lipid peroxidation and activities of antioxidant enzymes in *Ginkgo biloba*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(3): 1106–1111. (in Chinese)

18 Seth G P, Zhen Linju, Santen E V, et al. The influence of elevated CO₂ on the activities of antioxidative enzymes in two soybean genotype[J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2000, 27(11): 1061–1068.

19 杜振宇, 周健民, 段增强, 等. 番茄对二氧化碳浓度增加的反应[J]. *土壤*, 2004, 36(6): 609–614.

20 夏秀波, 于贤昌, 高俊杰. 水分对有机基质栽培番茄生理特性、品质及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2710–2714.

Xia Xiubo, Yu Xianchang, Gao Junjie, et al. Effects of moisture content in organic substrate on the physiological characters, fruit quality and yield of tomato plant[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(12): 2710–2714. (in Chinese)

21 樊怀福, 杜长霞, 朱祝军, 等. 基质含水量对番茄生长、品质和产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2011(3): 496–499.

Effect of CO₂ Enrichments under Different Water Conditions on Growth of Tomato in Heliogreenhouse

Zhou Shili Qu Yinghua Wang Hongyu Xiong Jun

(College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Heliogreenhouse has become the major protected horticulture industry in China due to its environmental friendly and energy saving features, however, the healthy development of heliogreenhouse is still limited by many problems. In view of extremely CO₂ deficient and water resources waste caused by lax water management in heliogreenhouse, we investigated the growth and photosynthetic characteristics of tomato plants under four different CO₂ levels, i. e., ambient CO₂ concentration in heliogreenhouse (about 450 μmol/mol), elevated CO₂ concentrations are (700 ± 50) μmol/mol (low), (1000 ± 50) μmol/mol (moderate), (1300 ± 50) μmol/mol (high) combined with three different water levels, i. e., substrate water content are 35% ~ 45% (low), 55% ~ 65% (moderate), 75% ~ 85% (high) of saturated substrate water content. The results showed that biomass of below ground, net photosynthetic rate, chlorophyll contents (SPAD) were increased and plants bloomed 6 ~ 11 d earlier in moderate and high CO₂ level plants. AQY and ACE were markedly increased by 45% ~ 118% and 66% ~ 81%, respectively; meanwhile, LCP was significantly reduced by 34% ~ 57% in CO₂ enrichment plants under moderate water condition. Compared with low water level, P_{max} was markedly increased by 42.8% and 52.1%; AQY was markedly increased by 10.7% and 25.9%; LCP was reduced by 29.1% and 63.4%; CCP was reduced by 20.8% and 8.3% in moderate and high water level plants under the measured high CO₂ condition, respectively. Compared with the plants grown under ambient CO₂ concentration, the MDA content reduced by 4% ~ 10% in CO₂ elevated plants under low water condition, this indicated that CO₂ enrichment could alleviate oxidative damage of tomato plants that subjected to low water condition. Compared with the plants that grown in moderate water level under ambient CO₂ concentration, blooming time was 3 ~ 7 d earlier and yield of first spike fruit was increased by 18% ~ 44% in low water level plants under CO₂ elevated conditions, meanwhile, compared with the plants that grown in high water level under ambient CO₂ concentration, blooming time was 8 and 10 d earlier and yield of first spike fruit was increased by 42.8% and 34.0% in moderate water level plants under moderate and high CO₂ condition, respectively, this indicated that water use efficiency which related to yield was enhanced by elevating CO₂ concentration.

Key words: Heliogreenhouse CO₂ concentration Substrate water content AQY ACE MDA content