

doi:10.11937/bfyy.20164467

长期 CO₂ 加富对日光温室秋冬茬甜椒 光合生理及低温适应性的影响

杨志刚^{1,2}, 崔世茂¹, 胡栓红², 马生碧^{1,3}, 谢拴玲⁴, 廉勇²

(1. 内蒙古农业大学 农学院, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农牧业科学院 蔬菜研究所, 内蒙古 呼和浩特 010031;
3. 陕西省靖边县种子管理站, 陕西 榆林 718500; 4. 内蒙古凉城县蛮汉镇农业站, 内蒙古 凉城 013750)

摘 要:以低温适应性能较好的“帅椒六号”甜椒为试材, 设置 $(600 \pm 50) \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (T1) 与 $(1\ 200 \pm 50) \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (T2) 2 个 CO₂ 加富施肥处理, 以不施用 CO₂ 为对照 (CK), 门椒坐住后测定辣椒叶片光合生理指标 SPAD 值及 Rubisco、RCA 活性和耐低温性指标丙二醛 (MDA)、可溶性糖含量及超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性, 研究了长期加富 CO₂ 对甜椒光合生理和低温适应性的影响, 以期为冬季在北方地区甜椒种植提供技术参考。结果表明: 随着气温降低, 各处理甜椒净光合速率、叶片 SPAD 值、叶片 Rubisco 和 RCA 活性均呈显著下降趋势。T2 处理在处理 30 d 后甜椒叶片净光合速率在各时段均显著高于 CK 和 T1 处理, 较 CK 分别提高 23.65%、37.51%、35.67%、16.86%、16.55%; 处理 60 d 后, T2 净光合速率在 11:00、13:00、15:00 和 17:00 等 4 个时段均显著高于 CK 和 T1 处理, 较 CK 分别提高 33.16%、30.14%、16.97%、24.71%。T2 处理在处理 30、60 d 时, 甜椒叶片 SPAD 值均显著高于 CK。处理 30 d 和 60 d, Rubisco 活性均表现为 T2 处理显著高于 CK 和 T1 处理, 分别比 CK 高 15.8%、10.9%。RCA 活性在处理 30、60 d 均表现为 T2 处理均显著高于 CK, 比 CK 高 9.96%、8.56%。不同处理下甜椒叶片 SOD、POD 和 CAT 活性表现为 T2>T1>CK, T2 处理显著高于 CK 和 T1 处理。不同处理下甜椒叶片丙二醛含量 T2 处理显著低于 T1 处理和 CK。可溶性糖含量表现为 T2>T1>CK, 各处理差异达到显著水平。综上, 在秋冬茬日光温室进行 $1\ 200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ CO₂ 加富施肥可有效增强甜椒光合作用, 提高甜椒在低温环境中的适应性, 对于甜椒进行越冬栽培具有重要意义。

关键词: CO₂ 加富; 甜椒; 光合生理; 耐低温性

中图分类号: S 641.326.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0009(2017)13-0084-07

第一作者简介: 杨志刚 (1984-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为蔬菜育种与栽培。E-mail: yzg5995@163.com.

责任作者: 崔世茂 (1961-), 男, 教授, 博士生导师, 现主要从事园艺作物抗逆性生理与园艺设施及环境调控等研究工作。E-mail: cuishimao@sina.com.

基金项目: 内蒙古农牧业科学院青年创新基金资助项目 (2014QNJJN09); 内蒙古教育厅研究生科研创新资助项目 (B20141012903Z); 国家大宗蔬菜产业技术体系呼和浩特综合试验站资助项目 (CARS-25-G-15); 国家自然科学基金资助项目 (34060269); 山西省科技厅计划资助项目 (FT1014-2-7)。

收稿日期: 2017-02-07

甜椒 (*Capsicum annuum* L.) 是北方设施栽培的一种重要蔬菜^[1]。但是在北方高寒地区, 冬季低温和 CO₂ 亏缺是影响设施甜椒栽培的主要限制因素^[2]。这些影响因素对甜椒生长的影响主要表现在对光合作用的限制方面。通过人工手段调节设施栽培环境增强甜椒光合作用是实现北方高寒地区甜椒越冬栽培的有效途径。关于增施高浓度 CO₂ 对植物光合作用影响的研究, 前人已经开展了大量的工作, 目前已经基本明确增施 CO₂ 气肥对 C3 植物光合作用的促进要强于 C4 植物和

CAM 植物^[3-4]。国内学者针对设施蔬菜增施 CO₂ 促进光合作用在机理方面进行了较多研究^[5-8],如魏珉等^[9]研究表明 CO₂ 加富后黄瓜叶片叶绿体数目和大小、单位叶绿体含淀粉粒数上升,但叶绿体超微结构未见明显伤害。刘志华等^[10]研究表明增施 CO₂ 能改善保护地茄果类蔬菜的生存环境,极显著地增强光合作用,促进其生理代谢机能。熊珺等^[11]研究了番茄的净光合速率最高的 CO₂ 浓度。也有学者针对逆境下增施 CO₂ 对蔬菜作物生理变化进行了研究,如李清明等^[12]研究结果表明 CO₂ 浓度倍增有利于促进干旱胁迫条件下黄瓜叶片渗透调节物质的积累,对防止植物的氧化损伤具有一定的保护作用。关于 CO₂ 加富对蔬菜作物的影响,前人在生理机制,显微结构以及促进光合作用方面开展了较多研究,但针对北方高寒地区越冬蔬菜增施 CO₂ 对蔬菜光合作用的促进作用及其对蔬菜耐低温性能的研究较少。该试验在冬季低温、弱光日光温室栽培条件下,研究 CO₂ 加富对温室甜椒光合生理以及耐低温性的影响,以期为北方地区甜椒越冬生产提供参考依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试甜椒新品种“帅椒六号”由内蒙古农牧业科学院蔬菜研究所选育,该品种具有耐低温、弱光的特性,适宜在温室进行反季节栽培。

1.2 试验方法

试验于 2014 年 9 月 10 日至 2015 年 1 月 28 日在内蒙古农牧业科学院蔬菜研究所试验农场日光温室进行,2014 年 8 月 1 日播种育苗,2014 年 9 月 10 日定植。CO₂ 施肥处理在 2014 年 11 月 1 日(门椒坐住后)开始,2015 年 1 月 10 日结束,处理时间共 71 d。不同 CO₂ 加富处理的辣椒水肥和其它栽培管理措施均相同。试验设计 2 个 CO₂ 不同浓度处理,分别为增施 CO₂ 后达到 (600±50) μL·L⁻¹ (T1),增施 CO₂ 后达到 (1 200±50) μL·L⁻¹ (T2),以不施用 CO₂ 为对照(CK),见表 1。每小区 6 个栽培垄,采用大小垄栽培,垄面宽 60 cm,垄距 40 cm,株距 45 cm,每 667 m² 定植甜椒 2 500 株左右。3 个不同处理区用透明的塑料薄膜

隔开,确保不同处理区之间不会有气体扩散。CO₂ 施肥使用钢瓶装液化 CO₂,CO₂ 液化气钢瓶出气口安装 CO₂ 减压器调节 CO₂ 气体释放速度和处理区的浓度。减压器连接一个输送 CO₂ 主管道,直径为 0.06 m,主管道将 CO₂ 输送到各个垄上,然后通过毛管与主管道进行连接,将 CO₂ 气体输送到每株甜椒的茎基部,毛管每隔 40 cm 有一个排气孔,通过排气孔完成 CO₂ 的释放。

表 1 试验设计

处理 Treatment	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration/(μL·L ⁻¹)
CK	不施用 CO ₂
T1	600±50
T2	1 200±50

1.3 项目测定

1.3.1 温室内温度和 CO₂ 浓度的测定

温室内的温度和各处理区 CO₂ 使用北京旗硕基业科技有限责任公司生产的旗硕“农用通”进行测定,测定高度为甜椒冠层中部,在试验期间根据甜椒植株长势适时进行调整,确保测试温度和 CO₂ 浓度为甜椒冠层的值。

1.3.2 光合作用和 SPAD 值的测定

光合作用使用 LI-6400 光合仪(美国 LI-COR 公司生产)测定,在甜椒整个生育期测定 3 次,分别为 CO₂ 施肥处理 0、30、60 d。光合作用测定时间为 09:00、11:00、13:00、15:00、17:00。测定时使用光合仪自带光源,控制光照强度为 1 500 μmol·m²·s⁻¹。在 CO₂ 施肥开始处理前,使用标牌标记一批功能叶,为 CO₂ 施肥处理后 0、30、60 d 进行光合作用测定做准备。标记叶片为从甜椒生长顶端数第 5 片功能叶。在该叶片进行光合作用测定后,同时测定 SPAD 值,再取样测定 Rubisco 和 RCA。第 2、3 次光合作用测定时同样测定已经标记的叶片。每个处理选取 3 株具有代表性的甜椒进行光合作用的测定,各处理光合作用最终值为 3 次重复的均值。

1.3.3 Rubisco 和 RCA 活性的测定

在处理 0、30、60 d 进行 Rubisco 和 RCA 活性测定。在测定万辣椒净光合速率后取辣椒叶片测定 Rubisco 和 RCA 活性,剪下待测的甜椒叶

片,并快速清洗,然后立即置于液氮中,带回实验室后称取 0.2 g 叶片置于研钵中,加入 500 L GENMED 裂解液(上海杰美基因医药科技有限公司生产),磨成匀浆,涡旋振荡,充分混匀,分别按照上海杰美基因医药科技有限公司生产的 GMS16015.1 试剂盒和 GMS16016 试剂盒说明书提取 Rubisco 和 RCA,之后放入紫外分光光度计(温度为 25 ℃,波长 340 nm)检测。同时,按照试剂盒说明书测定样品背景,计算 RCA 活性^[5]。

1.3.4 耐低温性指标的测定

丙二醛含量采用硫代巴比妥酸反应比色法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑 NBT 还原法测定;POD(过氧化物酶)活性采用愈伤木酚氧化法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[13]。以上各生理指标均是在 2014 年 12 月 15 日,CO₂ 施肥处理 45 d 以后下旬外界最高气温为 -5 ℃,最低气温为 -18 ℃时测定。各生理指标均取各处理甜椒相同叶位叶片进行测定,且每处

理最终值为 3 次重复,9 个样品的均值。

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2007 和 SAS 9.0 软件对数据进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 处理期间试验温室与外界气温变化规律

由图 1 可知,试验处理期间 2014 年 11 月 10 日至 2015 年 1 月下旬,是当地一年中温度最低的季节。在 11 月 12 日以后,室外日平均气温基本都在 0 ℃ 以下,进入 12 月初气温达到最低的一 15 ℃。温室内日平均气温 12 月初以前维持在 15 ℃ 以上,进入 12 月后日平均温度基本维持在 10~15 ℃,在 1 月中下旬达到最低的 7 ℃ 以下,进入 2 月后温室气温开始回升。该试验进行处理期间,温室日平均气温逐渐由高向低变化,每日光照时间逐渐减少,甜椒生长受到冬季低温影响,处于低温的生长环境中。

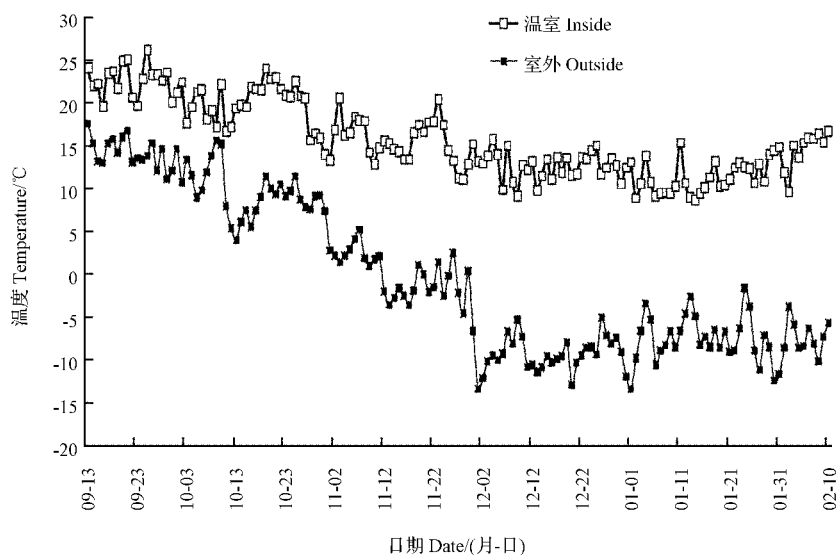


图 1 试验期间温室和室外气温变化趋势

Fig. 1 Air temperature changing trend diagram about solar greenhouse and outdoor during the experiment

2.2 长期 CO₂ 加富对甜椒叶片光合作用的影响

由图 2 可知,相同 CO₂ 浓度施肥处理下,不同时期甜椒叶片光合作用差异明显。各处理在不同时期净光合速率表现如下,CK 的 Pn 日变化各时段在处理 0、30 d 时差异不大,在处理 60 d 时,

各时段 Pn 较 0、30 d 时均显著降低;T1 处理 Pn 日变化在各时段均表现为 Pn(30 d) > Pn(0 d) > Pn(60 d),其中 T1 处理各时段 Pn(60 d)显著低于 Pn(30 d)和 Pn(0 d);T2 处理在处理 30 d 时, Pn 在各时段均显著高于 0 d 和 60 d。在处理 0、

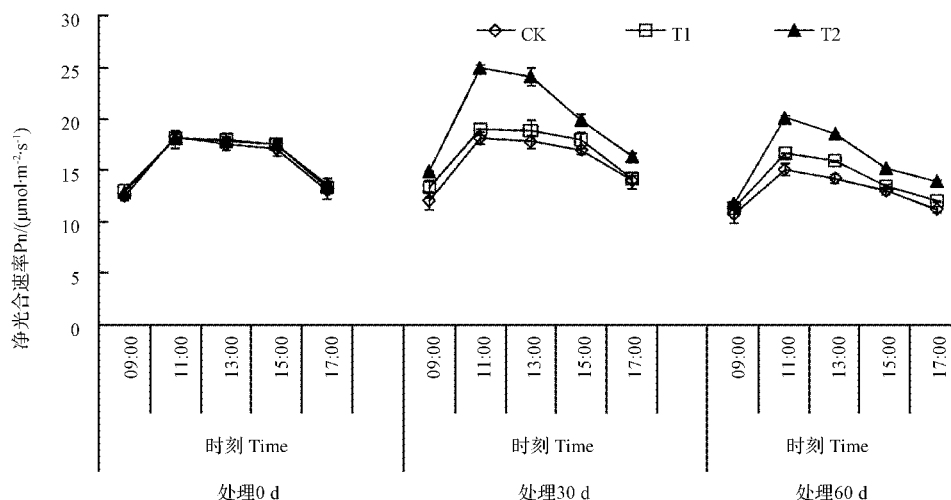
图 2 加富 CO₂ 下甜椒叶片净光合速率日变化

Fig. 2 Photosynthetic diurnal variation of pepper leaves under the condition of CO₂ enrichment

30、60 d 时,不同 CO₂ 施肥处理下甜椒叶片 Pn 日变化均表现出先升高后降低的趋势,Pn 最大值出现在 11:00,随后开始下降,在 17:00 降到最低。处理 0 d 时,各处理间无差异。处理 30 d, T2 处理净光合速率在各时段均显著高于 T1 处理和 CK, T2 处理较 CK 在 09:00、11:00、13:00、15:00、17:00 分别提高 23.65%、37.51%、35.67%、16.86%、16.55%。CK 和 T1 处理之间差异不显著。处理 60 d 后, T2 处理净光合速率在 11:00、13:00、15:00 和 17:00 均显著高于 CK 和 T1 处理, T2 处理较 CK 在 11:00、13:00、15:00、17:00 分别提高 33.16%、30.14%、16.97%、24.71%。

2.3 长期 CO₂ 加富对甜椒叶片 SPAD 值的影响

SPAD 叶绿素仪是基于植物叶片叶绿素对于红光(650 nm 左右)有强烈吸收和对远红外(940 nm 左右)的低吸收原理研制的一款快速检测植物叶片单位面积叶绿素含量的仪器, SPAD 可以较好地反映出叶片叶绿素含量^[14]。由图 3 可知,各处理甜椒叶片 SPAD 值随着生育期的延长,均表现出先增加后降低的趋势,说明甜椒叶片在处理开始前期,叶片随着生育期的延长,叶片叶绿素含量逐渐增加,在中后期受到低温寡照影响,叶片叶绿素含量开始降低。在处理后 30 d 和 60 d,处理 T2 甜椒叶片 SPAD 值显著高于 CK 和 T1 处理。说明加富 CO₂ 条件可以显著增加甜椒叶片叶绿素含量。

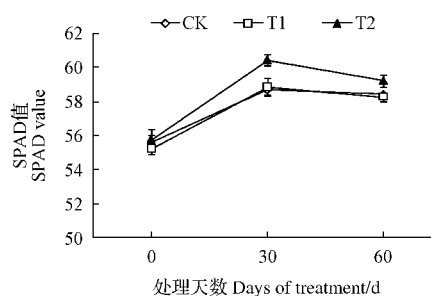
图 3 加富 CO₂ 下甜椒叶片 SPAD 值变化

Fig. 3 SPAD value variation of pepper leaves under the condition of CO₂ enrichment

2.4 长期加富 CO₂ 对甜椒叶片 Rubisco 和 RCA 活性的影响

Rubisco 是植物光合作用固定 CO₂ 的酶,其同时也参与植物光呼吸^[15]。RCA 是一种对 Rubisco 活性具有调节作用的酶,其与 Rubisco 结合相互作用完成 CO₂ 的固定^[16]。由表 2 可知,随着甜椒进入冬季生育期的延长,甜椒叶片的 Rubisco 活性均呈现降低趋势, RCA 活性也随着进入冬季生育期延长呈现下降趋势,说明随着甜椒生长环境气温逐渐降低, Rubisco 和 RCA 活性逐渐受到影响降低。处理 30 d 和 60 d, Rubisco 活性均表现为 T2>T1>CK, T2 处理显著高于 CK 和 T1 处理, T1 处理与 CK 之间差异不显著。处理 30 d 和 60 d, T2 处理的 Rubisco 活性分别

比 CK 高 15.8%、10.9%。RCA 活性在处理 30 d 和 60 d 均表现为 T2>T1>CK, 在处理 60 d 时 T2 处理显著高于 T1 处理, 在处理 30 d 和 60 d

时 T2 处理均显著高于 CK, T2 处理分别比 CK 提高 9.96%、8.56%。

表 2 加富 CO₂ 对甜椒叶片 Rubisco 和 RCA 活性的影响

Table 2 Effects of CO ₂ enrichment on the activities of Rubisco and RCA enzyme of pepper leaves		CO ₂ μmol · g ⁻¹ · min ⁻¹				
处理 Treatment	0 d	Rubisco			RCA	
		30 d	60 d	0 d	30 d	60 d
CK	0.148±0.001a	0.165±0.004b	0.138±0.002bc	2.18±0.02a	2.31±0.06b	1.87±0.04b
T1	0.144±0.003a	0.171±0.001b	0.142±0.001b	2.10±0.04a	2.39±0.01ab	1.69±0.01b
T2	0.151±0.002a	0.191±0.002a	0.153±0.001a	2.11±0.06a	2.54±0.03a	2.03±0.02a

注: 同列数据后不同小写字母表示差异达 $P<0.05$ 显著水平, 下同。

Note: Different lowercase letter indicate different significance at 0.05 level under different treatments. The same below.

2.5 长期加富 CO₂ 对甜椒叶片相关酶活性及脯氨酸、丙二醛含量的影响

由表 3 可知, 不同处理下甜椒叶片 SOD、POD、CAT 活性存在差异, 均表现为 T2>T1>CK, T2 处理显著高于 CK 和 T1 处理, CK 与 T1 处理差异不显著。T2 处理甜椒叶片 SOD 活性比 CK 和 T1 处理提高 230.11、160.47 U · g⁻¹ · h⁻¹ FW。甜椒叶片 POD 活性 T2 处理分别比 CK 和 T1 处理提高 0.77、1.23 U · g⁻¹ · min⁻¹。甜椒叶片 CAT

活性 T2 处理分别比 CK 和 T1 处理提高 65.93、64.16 U · g⁻¹ · min⁻¹。可见, 在加富 CO₂ 处理下甜椒叶片受到低温影响后, 酶保护系统活性显著提高。不同处理下甜椒叶片丙二醛含量 T2 处理显著低于 T1 处理和 CK, CK 和 T1 处理之间差异不显著, 与 CK 相比, T2 处理丙二醛含量降低 0.006 μmol · g⁻¹。可溶性糖含量在不同处理下差异显著, 表现为 T2>T1>CK, 各处理差异达到显著水平, T2 处理比 CK 提高 0.04 g · (100g)⁻¹。

表 3 加富 CO₂ 对甜椒耐冷性指标的影响

Table 3 Effects of CO ₂ enrichment on the low-temperature tolerance of pepper					
处理 Treatment	超氧化物歧化酶活性 SOD activity /(U · g ⁻¹ · h ⁻¹ FW)	过氧化物酶活性 POD activity /(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	过氧化氢酶活性 CAT activity /(U · g ⁻¹ · min ⁻¹)	丙二醛含量 MDA content /(μmol · g ⁻¹)	可溶性糖含量 Soluble sugar content /(g · (100g) ⁻¹)
CK	692.04±2.14bc	4.32±0.13b	86.88±0.29b	0.021±0.001a	0.21±0.002c
T1	761.68±3.86b	4.78±0.07b	88.65±0.89b	0.025±0.001a	0.23±0.001b
T2	922.15±3.15a	5.55±0.12a	152.81±1.58a	0.015±0.001b	0.25±0.002a

3 讨论与结论

3.1 长期富 CO₂ 对甜椒光合生理的影响

冬季北方地区日光温室相对封闭, 由此造成的 CO₂ 亏缺是影响温室蔬菜作物生长的主要限制因素之一^[17]。CO₂ 加富处理对光合生理的影响主要表现在其作为光合作用的底物增加了 CO₂ 对 Rubisco 酶结合位点的竞争, 使 Rubisco 活性会进一步发挥, 抑制 Rubisco 加氧活性抑制光呼吸, 从而提高羧化速度和净光合速率^[18]。该试验中, 加富 CO₂ 处理浓度上升到 (1 200±50) μL · L⁻¹ (T2 处理) 对甜椒光合作用及光合生理酶活性均有显著提高,

处理 30 d 后和处理 60 d 后在不同时间段 Pn 均高于对照 (CK)。甜椒叶片 Rubisco 活性在 CO₂ 加富 (1 200±50) μL · L⁻¹ 处理后 30 d 和 60 d, T2 处理分别比 CK 高 15.8%、10.9%; RCA 活性在 CO₂ 加富 (1 200±50) μL · L⁻¹ 处理后 30 d 和 60 d, T2 处理分别比 CK 高 9.96%、8.56%。因此证明了 CO₂ 加富处理会增强蔬菜作物的光合作用, 其内在原因是由于加富 CO₂ 处理后增加了光合作用的底物, 促进了 Rubisco 以及 RCA 活性。该试验中 T1 处理设定 CO₂ 浓度为 (600±50) μL · L⁻¹, 但其施肥后对甜椒净光合速率、Rubisco 活性和 RCA 活性的促进作用并不明显, 这主要是因为在该浓度处理下温室空间的 CO₂

浓度与对照不施用 CO_2 处理浓度梯度不大,增加的 CO_2 浓度不足以对光合作用和 Rubisco 活性引起显著变化。该试验中,在处理 30、60 d, T2 处理加富 CO_2 在 $(1\ 200 \pm 50)\ \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ 甜椒叶片 SPAD 值显著高于 CK 和 T1 处理,说明加富 CO_2 条件可以显著增加甜椒叶片叶绿素含量。前人关于增施 CO_2 对植物光合色素含量的影响研究结果不尽相同,如张其德等^[19]研究认为 CO_2 倍增能提高光合色素含量,改善光合功能,许申平等^[20]研究表明 CO_2 加富降低了叶绿素的含量,具体机理有待进一步研究。

3.2 长期加富 CO_2 对甜椒耐低温性的影响

丙二醛是低温胁迫下植物细胞膜质过氧化的产物,其含量可以反映出植物受到低温胁迫的严重程度。可溶性糖是植物抵御低温的重要保护物质,提高原生质保护能力。SOD 是植物体内清除活性氧系统的第一道防线,可催化氧自由基歧化生成 O_2 和 H_2O_2 。 H_2O_2 通过金属催化的 Haber-Weiss 反应生成高度活泼的羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)能氧化几乎所有的细胞组分,并引起细胞的破坏。CAT 和 POD 可以催化 H_2O_2 生成 H_2O ^[21]。该试验中,进入冬季以后温室内的气温逐渐降低,在试验处理期间,温室内日平均温度基本维持在 $10\sim 15\ ^\circ\text{C}$,在 1 月中下旬达到最低温,为 $7\ ^\circ\text{C}$,甜椒生长和生理活动受到低温的影响。该试验中,不同处理下甜椒叶片 SOD、POD、CAT 活性均表现为 $\text{T2} > \text{T1} > \text{CK}$, T2 处理显著高于 CK 和 T1 处理。此外,不同处理下甜椒叶片丙二醛含量 T2 处理显著低于 T1 处理和 CK。可溶性糖含量在不同处理下表现为 $\text{T2} > \text{T1} > \text{CK}$,各处理差异达到显著水平。可见,在加富 CO_2 处理下甜椒叶片受到低温影响后,酶保护系统显著提高,膜质过氧化产物丙二醛减少,保护性物质可溶性糖增多。这与魏岷等^[22]研究结果类似,说明 CO_2 加富施肥可以有效提高蔬菜作物的抗冷性能,适应冬季低温弱光环境。

综上所述,在秋冬茬日光温室进行 $(1\ 200 \pm 50)\ \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ CO_2 加富施肥可以有效地增强甜椒光合作用,提高甜椒在低温环境中的抗冷性能,对于北方高寒地区进行秋冬茬甜椒生产具有重要的意义。

(该试验得到内蒙古农牧业科学院蔬菜研究所姜伟研究员和王建国博士的指导,在此表示感谢!)

参考文献

- [1] 耿三省,陈斌,张晓芬,等.我国辣椒品种市场需求变化趋势及育种对策[J].中国蔬菜,2015(3):1-5.
- [2] 张国斌,郁继华.低温弱光对甜椒幼苗光合特性与光合作用启动时间的影响[J].西北植物学报,2006(9):1770-1775.
- [3] BOWES G. Facing the inevitable plants and increasing atmospheric CO_2 [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,1993,44:309-332.
- [4] 许申平,崔波,叶庆生.短期 CO_2 加富对非洲菊光合生理和生长的影响[J].河南农业科学,2015(12):99-103,116.
- [5] 潘璐,刘杰才,李晓静,等.高温和加富 CO_2 温室中黄瓜 Rubisco 活化酶与光合作用的关系[J].园艺学报,2014(8):1591-1600.
- [6] 崔庆法,王静.补施 CO_2 对日光温室黄瓜生长的影响[J].西北植物学报,2003(1):39-43.
- [7] 尹燕东,魏珉,邹永洲,等. CO_2 施肥对黄瓜幼苗根系发育及氮代谢酶活性的影响[J].西北农业学报,2006(5):191-194,201.
- [8] 孙治强,白玉玲,张惠梅,等. CO_2 施肥对日光温室西葫芦光合特性的影响[J].河南农业大学学报,1997(4):76-79,86.
- [9] 魏珉,邢禹贤,王秀峰,等. CO_2 加富对黄瓜叶片显微和亚显微结构的影响[J].园艺学报,2002(1):30-34.
- [10] 刘志华,蒋海燕,程建峰. CO_2 肥对保护地茄果类蔬菜光合作用和产量形成的效应[J].安徽农学通报,2009(5):81-83,87.
- [11] 熊璐,曲英华,范冰冰,等.不同 CO_2 浓度下番茄苗期及果期的光合特性[J].北方园艺,2015(9):6-9.
- [12] 李清明,刘彬彬,艾希珍. CO_2 浓度倍增对干旱胁迫下黄瓜幼苗膜脂过氧化及抗氧化系统的影响[J].生态学报,2010(22):6063-6071.
- [13] 张志良,瞿伟菁.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2003.
- [14] 王凯,吴祥云,段海侠,等.辽西北主要绿化树种叶绿素含量分异特征及与 SPAD 值关系[J].植物研究,2014(5):634-641.
- [15] 梅杨,李海蓝,谢晋,等.核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)[J].植物生理学通讯,2007(2):363-368.
- [16] 李卫芳.小麦 Rubisco 和 Rubisco 活化酶对光合作用的影响[D].扬州:扬州大学,2002.
- [17] 魏珉,邢禹贤,王秀峰,等.日光温室 CO_2 浓度变化规律研究[J].应用生态学报,2003(3):354-358.
- [18] 林伟宏.植物光合作用对大气 CO_2 浓度升高的反应[J].生态学报,1998(5):83-92.
- [19] 张其德,卢从明,匡廷云.大气 CO_2 浓度升高对光合作用的影响[J].植物学通报,1992(4):18-23.
- [20] 许申平,王芳,叶庆生. CO_2 加富与两种供 N 水平对非洲菊光合生理及生长发育的影响[J].植物生理学报,2016(4):533-542.

[21] 张帆,郁继华,颜建明,等. 外源 ALA 和 Spd 对低温弱光下甜椒幼苗光合作用及抗氧化系统的影响[J]. 中国农业科学, 2013 (11): 2298-2306.

[22] 魏珉,邢禹贤,于贤昌,等. CO₂ 施肥对黄瓜幼苗抗冷性及后期生育的作用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2001(2): 157-161.

Effects of CO₂ Enrichment on Photosynthetic Physiology and Low Temperature Resistance of Pepper in Solar Greenhouse at Autumn-winter Season

YANG Zhigang^{1,2}, CUI Shimao¹, HU Shuanhong², MA Shengbi^{1,3}, XIE Shuanling⁴, LIAN Yong²

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019; 2. Vegetable Institutes, Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031; 3. Jingbian County Seed Management Department, Yulin, Shaanxi 718500; 4. Agricultural Station of Manhan Town of Liangcheng County in Inner Mongolia, Liangcheng, Inner Mongolia 013750)

Abstract: The new pepper variety ‘Shuaijiao NO. 6’ was used as test materials to study the effect of long-time CO₂ enrichment on photosynthetic physiology and low temperature resistance. As the contrast of no CO₂ application(CK), the experiment designed two kinds of different CO₂ concentration level's treatments which were $(600 \pm 50) \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (T1) and $(1\ 200 \pm 50) \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (T2), SPAD value, the activities of Rubisco and RCA, contents of MDA and soluble sugar, activities of SOD and CAT were measured after setting the first fruit of pepper, to offer technical reference for planting pepper in south of China in winter. The results showed that with temperature decreasing in winter, the net photosynthetic rate, SPAD value, Rubisco enzyme activity and Rubisco activase enzyme activity of pepper leaves in different treatments were decreased significantly. The net photosynthetic rate of T2 at 11:00, 13:00, 15:00 and 17:00 were significantly higher than CK and T1 after processed 30 days. Compared with CK, the net photosynthetic rate of T2 increased by 23.65%, 37.51%, 35.67%, 16.86%, 16.55% at 09:00, 11:00, 13:00, 15:00 and 17:00, respectively. The net photosynthetic rate of T2 at 11:00, 13:00, 15:00 and 17:00 were significantly higher than CK and T1 after processed 60 days. Compared with CK, the net photosynthetic rate of T2 increased by 33.16%, 30.14%, 16.97%, 24.71% at 11:00, 13:00, 15:00 and 17:00, respectively. SPAD values of T2 pepper leaf were significantly higher than CK after processed 30 days and 60 days. Rubisco enzyme activities were significantly higher than CK and T1 after processed 30 days and 60 days. Compared with CK, Rubisco enzyme activities of T2 increased by 15.8% and 10.9% after processed 30 days, 60 days. Rubisco activase enzyme activities were significantly higher than CK after processed 30 days and 60 days. Compared with CK, Rubisco enzyme activities of T2 increased by 9.96% and 8.56% after processed 30 days and 60 days. Activities of SOD, POD and CAT of pepper leaves showed T2>T1>CK, T2 was significant higher than CK and T1. MDA content of pepper leaves in different treatments showed that T2 was significant lower than CK. Soluble sugar content showed T2>T1>CK, and the differences were statistically. On the whole, the treatment of $1\ 200 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ CO₂ enrichment in solar greenhouse at autumn-winter season could effectively enhance photosynthesis of pepper, improve chilling resistance of pepper. And it had important significance for winter cultivation on pepper.

Keywords: CO₂ enrichment; pepper; photosynthetic physiology; low temperature resistance