

# 不同耐冷番茄叶片光合速率及可溶性糖的变化特性研究

李天来 焦晓赤 齐明芳 刘玉凤 徐连营

(沈阳农业大学 园艺学院 辽宁省设施园艺重点实验室, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:**以耐低温番茄品系 L402-F 和冷敏感品系自交系 J2 为试材, 15℃ 为对照, 研究 6℃ 夜低温不同时长处理对光合指标和可溶性糖类的影响及相关性分析。结果表明:不同时长夜低温胁迫导致 L402-F 和 J2 番茄叶片的净光合速率、Rubisco 羧化速率和  $F_v/F_m$  均下降, 呈现  $15^\circ\text{C} > 6^\circ\text{C}$   $3\text{ h} > 6^\circ\text{C}$   $9\text{ h}$ , L402-F 的下降幅度比 J2 的下降幅度小, 品种间存在着一定的差异;低温胁迫后, 碳水化合物在 L402-F 和 J2 叶片中积累, 并且随着处理小时数的增多和处理时间的延长, 碳水化合物积累增多;对净光合速率与各指标间进行相关性分析表明, L402-F 叶片中净光合速率的下降与淀粉含量的大量积累有关, 而导致 J2 叶片中净光合速率下降可能与 Rubisco 羧化速率和淀粉积累有着密切的联系。

**关键词:**夜间低温;番茄;净光合速率;可溶性糖

中图分类号: S641.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2011)04-0097-07

## The Study on Change Characteristics of Photosynthetic Rate and Soluble Sugar in Different Psychrotolerant Leaf of Tomato

LI Tian-lai, JIAO Xiao-chi, QI Ming-fang, LIU Yu-feng, XU Lian-ying

(College of Horticulture, Shenyang Agricultural University, Key Laboratory of Protected Horticulture of Liaoning Province, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** Tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2 was taken as experimental materials. The effects of 6℃ treatment of low night temperature at different periods of time on photosynthetic indicators and the impact of soluble sugars and correlation analysis were studied using 15℃ as control. The results showed that Net photosynthetic rate, Rubisco carboxylation rate and  $F_v / F_m$  of tomato leaf of L402-F and J2 decreased in low night temperature at different duration, showing  $15^\circ\text{C} > 6^\circ\text{C}$   $3\text{ h} > 6^\circ\text{C}$   $9\text{ h}$ , The decline of L402-F was smaller than J2, there were some differences between species. After cold stress, the carbohydrates were accumulated in the leaves of J2 and L402-F, with the increasing of treatment hours and extension of treatment days, carbohydrate accumulations were increased. The correlation between net photosynthetic rate and each index showed that the decrease of net photosynthetic rate is related with the generous accumulation of starch; but Rubisco carboxylation rate and starch accumulation may lead to the decline of net photosynthetic rate.

**Key words:** Low night temperature; Tomato; Net photosynthetic rate; Soluble sugar

光合作用的过程可以分为光能吸收、传递、转化和二氧化碳同化, 最终形成植物所需的碳水化合物, 逆境胁迫会导致净光合速率的下降和碳水化合物的积累。近年来本课题组对有关夜间低温影响作物生育及光合作用和碳水化合物积累的研究已有一些报道<sup>[1-4]</sup>。但是净光合速率和碳水化合物积累在不同番茄品种中存在着一定的差异。在低温条件下, 水

稻<sup>[5]</sup>、番茄<sup>[6]</sup>、梨<sup>[7]</sup>、西葫芦<sup>[8]</sup>、辣椒<sup>[9]</sup>不同耐冷品种的净光合速率和糖积累冷敏感品种下降幅度小; 可溶性糖类的含量与植物抗寒性之间呈正相关。耐寒品种体内的还原糖特别是葡萄糖含量比不耐寒品种高<sup>[10]</sup>。耐寒性不同的茄子品种低温条件下光合特性发生变化的趋势一致, 但不同耐寒性品种光合速率的变化幅度不同<sup>[11]</sup>。而引起净光合速率下降

收稿日期: 2011-05-10

基金项目: 大宗蔬菜产业技术体系岗位科学家专项 (Nycytx-35-gw23); 公益性行业 (农业) 科研专项 (nyhyzx07-007)

作者简介: 李天来 (1955-), 男, 辽宁绥中人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事蔬菜设施栽培研究。

主要有许多因素,碳水化合物的积累可能是引起净光合速率下降其中一个主要原因。前人试验证明,低温胁迫后净光合速率下降的同时伴随着碳水化合物的含量增多,并且在盐浓度<sup>[12,13]</sup>、环剥<sup>[14]</sup>、高CO<sub>2</sub><sup>[15]</sup>和重金属<sup>[16]</sup>胁迫中,也有类似的发现。但是番茄不同耐冷品种中关于净光合速率和碳水化合物的积累及其相互之间关系的研究较少。

为此,探究了不同时长低夜温条件下苗期两个番茄品种 L402-F 和自交系 J2 功能叶片光合作用及相关碳水化合物的变化,从相关性的角度分析碳水化合物积累对光合作用的影响,了解在不同品种中存在怎样的差异。以期对番茄的栽培种植以及筛选提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与试验处理

供试番茄品种为耐低温品系 L402-F 和常规品系自交系 J2。于日光温室中穴盘基质育苗,六叶一心时移入人工气候室[昼温(25±1)℃,夜温(15±1)℃]适应 5 d,随后进行夜间低温不同小时数处理。具体温度控制为:6:00 开始升温,8:00 时达到处理所设温度,昼温为 25℃,保持此温度至 16:00 开始降温,到晚上 18:00 时分别降到 15℃和 6℃;夜间不同时长处理以 15℃为对照,设置 6℃处理 3 h(6℃3 h)和 6℃处理 9 h(6℃9 h)共 2 个低温处理,昼温均为 25℃。处理时间分别为每天的 18:00 到 21:00 和每天的 18:00 到 3:00,分别在 0,1,3,5,7,9 d 进行取样。

### 1.2 测定项目与方法

1.2.1 光合指标的测定 用 LI-6400 型便携式光合测定仪利用外源 CO<sub>2</sub> 钢瓶(CO<sub>2</sub> 浓度 400 μmol/(m<sup>2</sup>·s))与人工光源(600 μmol/(m<sup>2</sup>·s))于 10:00–11:00 测定第 4 片真叶顶端叶片的净光合速率(Pn)光合作用指标。羧化效率的测定:采用 LI-6400 型便携式光合测定仪,利用外源 CO<sub>2</sub> 钢瓶与人工光源(600 μmol/(m<sup>2</sup>·s)),测定低 CO<sub>2</sub> 浓度梯度下处理番茄植株第 4 功能叶的 Pn 值,根据 Pn-Ci 曲线的初始斜率求出羧化效率(CE)。采用 Dual-PAM-100 测定各处理叶片的 Fv/Fm(原初光能转化效率),测定前先对叶片暗适应 20 min。

1.2.2 碳水化合物含量的测定 蔗糖、果糖、葡萄糖和可溶性总糖含量的测定。测定方法是:取样称重→剪碎后置入试管→倒入 80% 乙醇,浸没样品高出 1 cm→80℃水浴 1 h→冷却后封存。测定前倒出乙醇提取液入 25 mL 容量瓶→再向试管中加入

80% 乙醇,80℃水浴,如此反复提取 2 次→定容→取一定体积浓缩→用 1 mL 超纯水溶解→上清液过 0.45 μm 滤膜→进液相(HPLC)测定,测定方法及色谱条件为:Waters 600E 高效液相色谱,用碳水化合物柱,柱温为 35℃,2410 示差检测器,流动相比比例为 80% 乙腈:20% 超纯水,流速为 1.0 mL/min, Waters Millennium 软件控制及数据处理。

淀粉含量的测定:取测糖后的干燥残渣,采用高氯酸水解法<sup>[17]</sup>测定叶片中淀粉的含量。

1.2.3 数据处理 运用 Excel 与 DPS 软件进行数据处理及相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 夜低温不同时长处理对番茄不同耐冷品种幼苗光合指标的影响

从图 1-A、C、E 可以看出,番茄品种 L402-F 在低夜温不同时长处理初期 6℃ 3 h 和 6℃ 9 h 净光合速率高于对照,处理 3 d 后 6℃ 3 h 和 6℃ 9 h 净光合速率开始下降并低于对照且一直持续到处理结束;经低夜温不同时长处理后 L402-F Rubisco 羧化效率高于对照,第 5 天开始逐渐低于对照,并一直持续到处理结束;而 Fv/Fm 从处理开始到处理结束 6℃3 h 和 6℃9 h 均低于对照,处理和对照之间的变化很小,总体上呈现 15℃ > 6℃ 3 h > 6℃ 9 h。

从图 1-B、D、F 得知,番茄品种 J2 的净光合速率、Rubisco 羧化效率和 Fv/Fm 从整个低温处理过程中均低于处理,并且低夜温处理小时数越长下降越明显,即 15℃ > 6℃ 3 h > 6℃ 9 h,且下降幅度较大。总体来说,番茄品种 J2 的净光合速率、Rubisco 羧化效率、Fv/Fm 均比 L402-F 的净光合速率、Rubisco 羧化效率、Fv/Fm 下降幅度大。

从表 1 可以看出,耐低温番茄品种 L402-F 在 6℃3 h 和 6℃9 h 低温处理胁迫下与 Fv/Fm 和 Rubisco 羧化效率均呈现正相关性但这种正相关未达到显著水平;而冷敏感番茄品种 J2 在 6℃3 h 和 6℃9 h 低温处理条件下与 Rubisco 羧化效率呈现出显著的正相关性,与 Fv/Fm 没有显著的相关性。

### 2.2 低夜温不同时长处理对番茄不同耐冷品种碳水化合物积累的影响

由图 2 可以发现,经过低夜温不同时长处理后,番茄叶片中的可溶性糖(以鲜质量计)不同程度积累。其中,图 2-A、C、E、G 为 L402-F 可溶性糖含量的变化,在低温处理初期,果糖积累的较少,始终低于对照,第 3 天开始,经过 6℃ 3 h 和 6℃ 9 h 处理的 L402-F 果糖含量 6℃ 3 h 和 6℃ 9 h 高于 15℃,并且

一直持续到处理结束;低温处理第1天开始,葡萄糖含量 $6^{\circ}\text{C}$  9 h 高于 $15^{\circ}\text{C}$ ,而 $6^{\circ}\text{C}$  3 h 和 $15^{\circ}\text{C}$ 之间差异不显著;蔗糖含量的变化趋势与葡萄糖相似,但是在低温处理的第9天,蔗糖的积累呈现 $6^{\circ}\text{C}$  9 h  $> 6^{\circ}\text{C}$  3 h  $> 15^{\circ}\text{C}$ ;在处理的第3天,总糖含量 $6^{\circ}\text{C}$  3 h  $< 15^{\circ}\text{C}$ ,之后随着处理时间的延长,处理植株叶片总糖含量不断累积且高于对照。

图2-B、D、F、H为J2可溶性糖含量的变化,可以看出,在低温处理前期果糖和总糖积累较少且低于对照,第3天开始,处理植株果糖含量的的积累增多,即 $6^{\circ}\text{C}$  9 h、 $6^{\circ}\text{C}$  3 h  $> 15^{\circ}\text{C}$ ,并持续到处理结束;葡萄糖含量 $6^{\circ}\text{C}$  3 h 和 $6^{\circ}\text{C}$  9 h 与 $15^{\circ}\text{C}$ 相比变化不大,略高于对照;在低温处理第1天,处理植株的蔗

糖的含量并没有显著的积累,第3天开始,经过 $6^{\circ}\text{C}$  3 h 和 $6^{\circ}\text{C}$  9 h 处理后蔗糖的含量呈现 $6^{\circ}\text{C}$  9 h  $> 6^{\circ}\text{C}$  3 h  $> 15^{\circ}\text{C}$ ;J2总糖含量变化与L402-F相似;L402-F可溶性糖含量高于J2。

净光合速率与各种可溶性糖的相关性分析结果(表2)中发现,在番茄耐低温品种L402-F冷敏感品种J2中,净光合速率与 $6^{\circ}\text{C}$  9 h L402-F的总糖、 $6^{\circ}\text{C}$  3 h J2和9 h J2的果糖之间的相关性达到显著水平,净光合速率与其他处理时间的糖的相关性没有达到显著水平,在番茄耐低温品种L402-F和冷敏感品种J2中净光合率与果糖、葡萄糖、蔗糖和总糖之间都是负相关。

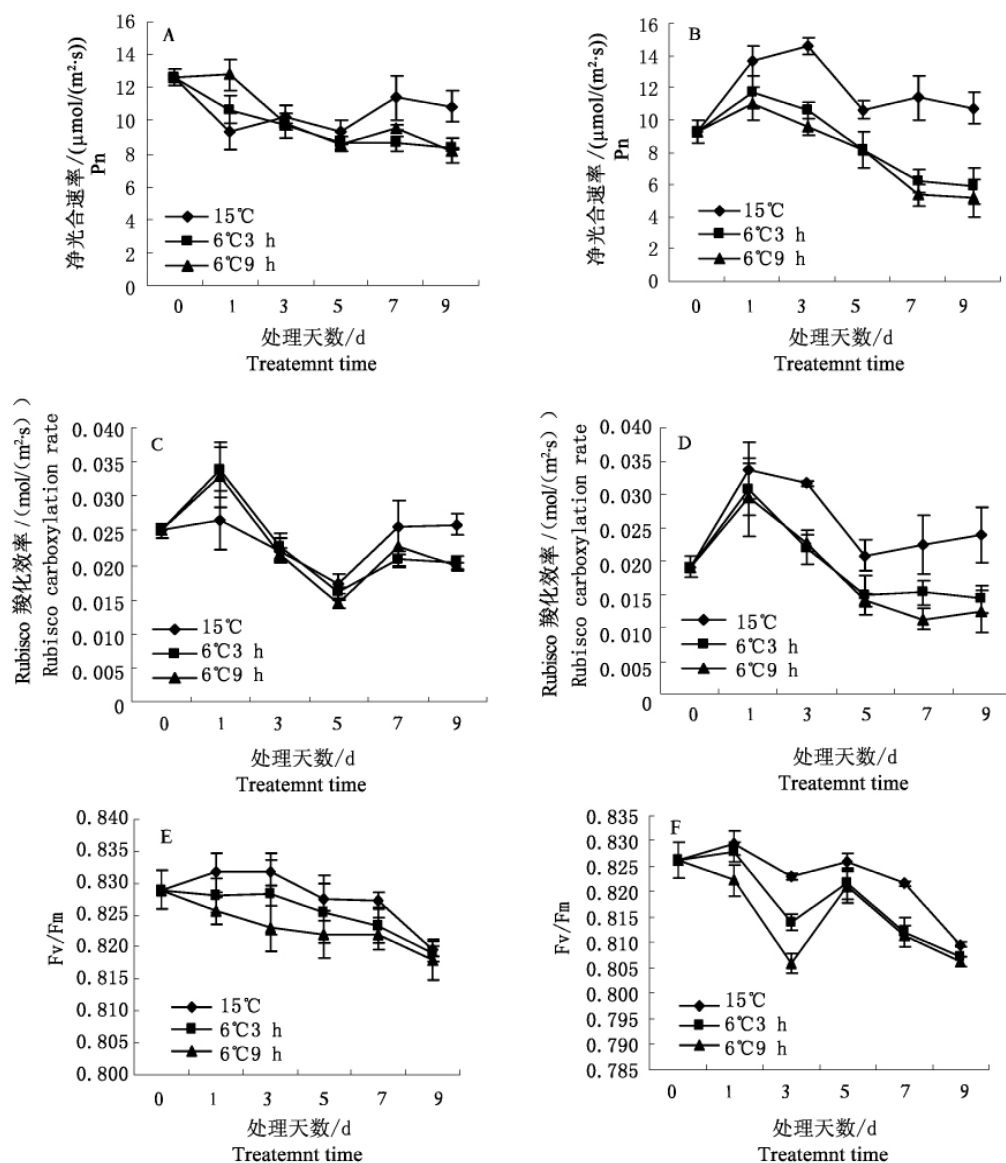


图1 低夜温不同时长处理对番茄耐低温品种L402-F和冷敏感品种J2叶片光合指标的影响

Fig.1 The effects of different temperature of the night interval time on photosynthetic parameters of tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2

表 1 番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 功能叶片光合指标间的相关性分析

Tab. 1 The correlation analysis of tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2 on photosynthetic parameters

光合指标 Photosynthetic parameters	净光合速率 Net photosynthetic rate			
	6℃ 3 h L402-F	6℃ 9 h L402-F	6℃ 3 h J2	6℃ 9 h J2
Rubsico 羧化效率	0.256	0.612	0.796*	0.889*
Fv/Fm	0.668	0.510	0.722	0.516

注: \* . 表示 0.5% 水平的差异显著性。

Note: \* . Significantly different at 0.5% level.

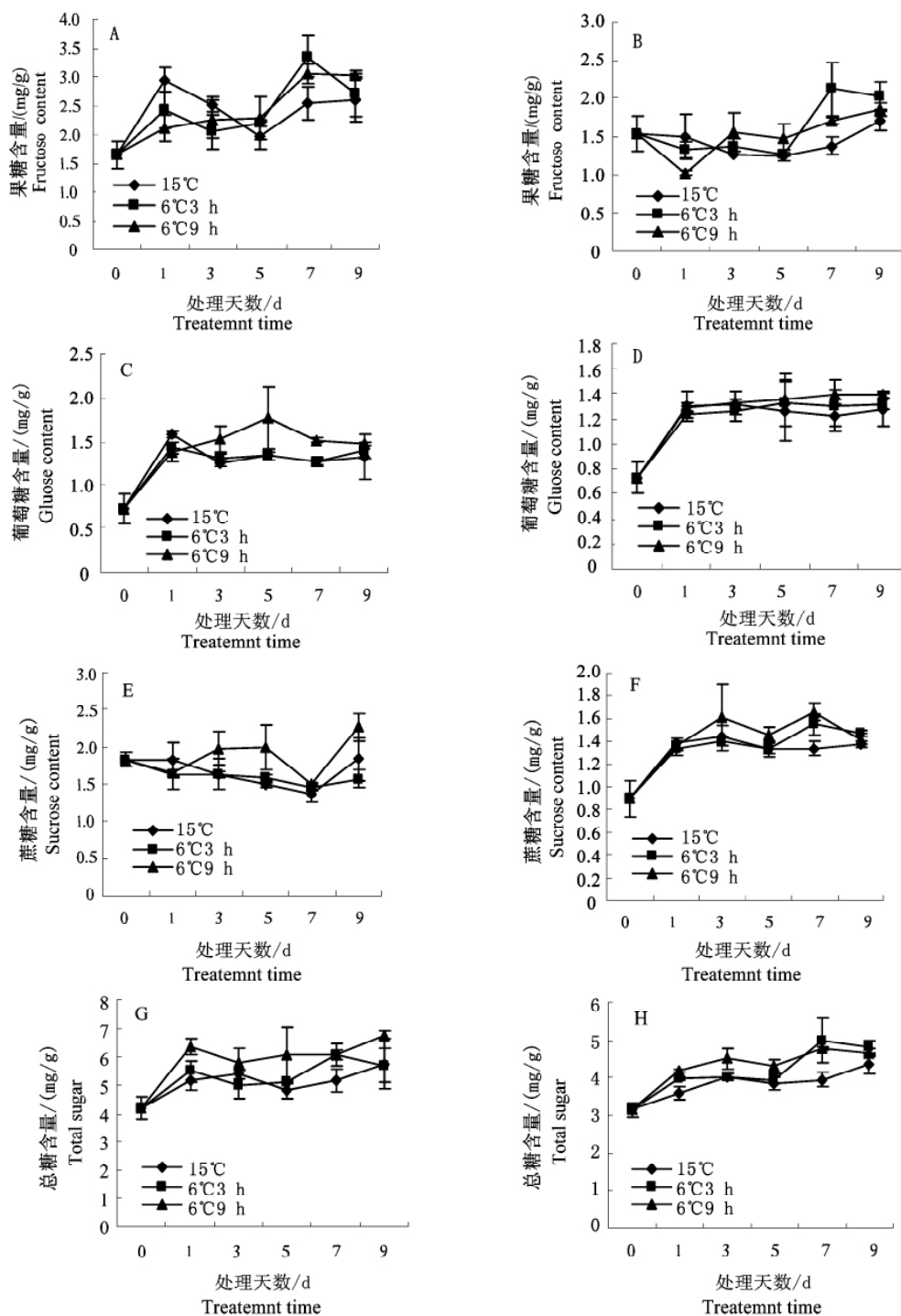


图 2 低夜温不同时长处理对番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 可溶性糖含量的影响

Fig. 2 The effects of different temperature of the night interval time on soluble sugar content of tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2

表2 夜间不同时长低温处理后番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 净光合速率与可溶性糖类相关性分析

Tab.2 The correlation analysis of tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2 between net photosynthetic rate and the content of soluble sugars after different temperature of the night interval time.

可溶性糖含量 The content of soluble sugars	净光合速率 Net photosynthetic rate			
	6℃ 3 h L402-F	6℃ 9 h L402-F	6℃ 3 h J2	6℃ 9 h J2
果糖 Fructose	-0.685 8	-0.779 1	-0.907 1*	-0.841 8*
葡萄糖 Glucose	-0.765 9	-0.757 8	-0.244 1	-0.443 4
蔗糖 Sucrose	-0.803 7	-0.464 8	-0.373 3	-0.413 4
总糖 Total sugar	-0.719 4	-0.935 7*	-0.733 7	-0.585 1

从图3可以看出,番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 经过低夜温不同时长处理后,功能叶片中淀粉含量随着处理天数的延长而升高;并且处理小时数越长淀粉含量越高,即 6℃ 9 h > 6℃ 3 h > 15℃ ;随着处理时间的延长,处理植株叶片淀粉含量

不断累积且高于对照。与对照相比,经过低夜温处理的冷敏感品种 J2 比耐低温品种 L402-F 的上升幅度更大,番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 之间存在着一定的差异。

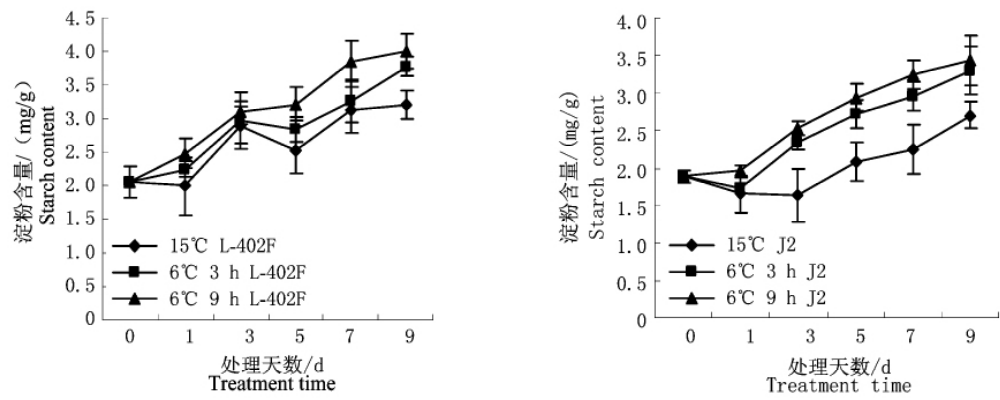


图3 低夜温不同时长处理对番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 叶片淀粉含量的影响

Fig.3 The effects of different temperature of the night interval time on starch content of tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2

从表3可知,番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 各个处理叶片淀粉含量与净光合速率均存在负相关性,并且这种相关性达到了显著水平。

表3 低夜温不同时长处理后番茄耐低温品种 L402-F 和冷敏感品种 J2 叶片净光合速率与淀粉含量的相关性

Tab.3 The correlation analysis of tomato cultivar of resistant to cold L402-F and cold-sensitive tomato cultivar J2 between net photosynthetic rate and starch content after different temperature of the night interval time

处理 Treatment	相关系数 Correlation coefficient	显著水平 P Significant
6℃ 3 h L402-F	-0.875 7	0.022 2
6℃ 3 h J2	-0.877 8	0.021 5
6℃ 9 h L402-F	-0.902 9	0.013 7
6℃ 9 h J2	-0.903 5	0.013 5

3 结论与讨论

3.1 夜间低温对不同品种间光合作用相关指标的影响及相关性分析

光合作用是指植物吸收光能,同化 CO<sub>2</sub> 和水,制造有机产物并释放 O<sub>2</sub> 的过程,光合作用包括光

反应和暗反应两个过程。其中,暗反应是一系列的酶促反应,酶的活性与温度息息相关,Rubisco 是控制植物光合碳代谢和光呼吸的关键酶,是光合作用的限速酶,其含量或羧化活性与光合速率密切相关<sup>[18]</sup>。试验研究表明,在 L402-F 和 J2 中,净光合速率和 Rubisco 羧化速率均有不同程度的下降且 15℃ > 6℃ 3 h > 6℃ 9 h, L402-F 净光合速率和 Rubisco 羧化速率经过低温处理与 15℃ 相比降幅较小, J2 净光合速率和 Rubisco 羧化速率经过低温处理后 6℃ 9 h 和 6℃ 3 h 明显低于 15℃,说明不同时长低温处理在番茄不同耐低温品种中存在着明显的差异,处理的时间越长,品种之间的差异越明显,这与张素勤<sup>[11]</sup>和王国莉<sup>[5]</sup>在不同品种的茄子和水稻中的研究结果一致。说明耐寒性强的品种光合作用受低温影响小,在低温下能维持较高的光合作用;耐寒性弱的品种光合作用则受低温影响较大。进而在不同耐冷番茄品种中对净光合速率和 Rubisco 羧化效率进行相关性分析发现,对于耐低温番茄品种 L402-F 来说, Rubisco 羧化效率与净光合速率之间

的相关性没有达到显著水平;而冷敏感番茄品种 J2 在 6℃ 3 h 和 6℃ 9 h 低温处理条件下与 Rubisco 羧化效率呈现出显著正相关,这与开花期后贝达和赤霞珠功能叶片净光合速率与 Rubisco 羧化速率呈极显著相关一致<sup>[17]</sup>,这也许是由于 Rubisco 初始活力的下降引起的<sup>[20]</sup>,从相关性分析也可以看出,不同品种间存在着差异。

Fv/Fm 指充分暗适应叶片 PS II 的最大光化学效率,为开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率,它的变化代表 PS II 光化学效率的变化,是光抑制程度的一个重要指标<sup>[21-24]</sup>。比值越高证明其发生光抑制的程度越低。低温条件下,Pn 和 Fv/Fm 降低表明植物受到了光抑制<sup>[23,24]</sup>。Hetherington 认为,低温还可增加冷敏感植物发生光抑制的可能性<sup>[23]</sup>,光抑制与引起 PS II 损伤的光破坏及防御光破坏的光保护有关<sup>[28]</sup>。本研究表明,不同时长低温处理后 L402-F 和 J2 两个番茄品种的 Fv/Fm 均降低,呈现 15℃ > 6℃ 3 h > 6℃ 9 h,但下降幅度较小,尤其在 L402-F 品种中。说明低温条件下 L402-F 和 J2 受到了光抑制且影响程度较小,这可能是 PSII 反应中心的一种可逆失活现象,是对夜低温胁迫的快速响应机制。Fv/Fm 的降低幅度与品种对低温敏感性是一致的,这与王国莉<sup>[29]</sup>、Jung S 等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。从相关性分析中发现,Fv/Fm 与净光合速率的相关性并没有达到显著水平,说明光抑制并不是导致 L402-F 和 J2 净光合速率下降的主要原因。

### 3.2 夜间低温对不同品种间碳水化合物积累的影响及相关性分析

光合作用的过程通过光能吸收、传递、转化和二氧化碳同化一系列反应,最终产生糖存于植物体内,可溶性糖含量作为植物抗寒性的一个指标,在植物抗寒性研究中广泛应用。在低温胁迫下植物叶片中糖含量的积累是一个普遍现象。糖的积累能增加保水能力,提高细胞渗透浓度,使之更能抵御寒冷<sup>[31]</sup>。可溶性糖类的含量与植物抗寒性之间呈正相关。在逆境胁迫下,光合产物(蔗糖)转运受到抑制,从而导致光合产物(蔗糖)在叶片中大量积累,进而对叶片的光合作用造成反馈抑制,从而使叶片的净光合速率降低<sup>[32-35]</sup>。例如,较高浓度的盐处理时明显降低了二色补血草等植物净光合速率的下降,植物生长受到抑制,糖利用减少,叶片中可溶性糖的含量也逐渐增加,说明糖积累造成的反馈抑制可能是蚕豆幼苗光合速率下降的原因之一<sup>[12,13]</sup>;黄柏在剥皮使光合碳同化物质不能向根系运转,光合碳同化物在叶中积累,通过反馈抑制光合进程,导致光合速率下

降<sup>[14]</sup>;短期高 CO<sub>2</sub> 处理能增加 C<sub>3</sub> 植物的光合速率和净光合生物量,但植物不能全部利用在高 CO<sub>2</sub> 条件下所增加的碳水化合物,通过反馈抑制使叶片光合速率降低<sup>[15,36,37]</sup>。本试验结果表明,伴随着净光合速率下降的同时,在 L402-F 和 J2 中糖积累,即 6℃ 3 h 和 6℃ 9 h 中糖的含量高于 15℃,尤其是在 L402-F 品种中积累的多,但是糖积累在两个品种之间的差异不大。为了进一步分析净光合速率与碳水化合物积累之间的关系,笔者对其进行了相关性分析,表明耐低温番茄品种 L402-F 和冷敏感番茄品种 J2 叶片中淀粉含量与净光合速率之间存在负相关性,并且这种相关性达到了显著水平,淀粉积累影响 L402-F 和 J2 的光合作用,可能与淀粉与 Mg<sup>2+</sup> 结合有关,而 Mg<sup>2+</sup> 是许多光合酶的活化剂和辅助因子,进而引起与 Mg<sup>2+</sup> 关系密切的 RuBP 羧化酶活性的降低,另外,淀粉粒的大量积累改变了 CO<sub>2</sub> 扩散途径的几何形状,从而影响 CO<sub>2</sub> 的运输,造成光合作用的降低,这与李国强<sup>[1]</sup>的研究结果一致。

综上所述,耐寒性不同的植物品种低温条件下光合特性发生变化的趋势一致,但不同耐寒性品种光合速率的变化幅度不同,不同耐寒性植物的低温响应机制不同。耐低温番茄品种 L402-F 和冷敏感番茄品种 J2 叶片光合速率下降的原因不同,L402-F 叶片中净光合速率的下降与淀粉含量的大量积累有关,而引起 J2 叶片中净光合速率下降的原因有可能是 Rubisco 羧化速率和淀粉积累共同作用的结果。引起耐低温番茄品种 L402-F 和冷敏感番茄品种 J2 叶片光合速率下降的原因很有可能与其他因素有关,还需进一步试验的验证。

### 参考文献:

- [1] 李国强. 苗期低夜温处理及室温恢复对番茄生长发育和光合作用影响的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2006.
- [2] 王丽娟. 夜间低温对设施番茄光合物质生产、分配及代谢影响的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2006.
- [3] 王丽娟, 李天来, 崔娜. 夜间不同时长低温对番茄光合产物积累与分配的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(6): 811-815.
- [4] 李天来, 刘玉凤, 宋礼毓. 夜间亚低温处理及其恢复对番茄叶片光抑制的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35(7): 1003-1010.
- [5] 王国莉, 郭振飞. 磷营养对水稻不同耐冷品种光合特性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(8): 1385-1389.
- [6] 孙佳佳, 张其安, 江力, 等. 3 种不同耐寒番茄品系的生理特性研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(5): 2315-2317.

- [7] 王晓婷. 不同梨品种光合特性和糖代谢规律及其酶学调控机制研究[D]. 青岛:青岛农业大学 2007.
- [8] 毛丽萍, 郭尚, 程伯英, 等. 低温弱光对西葫芦幼苗生理指标的影响[J]. 山西农业科学, 2008, 36(9):33-36.
- [9] 柴文臣, 马蓉丽, 邢国明, 等. 辣椒耐低温研究进展[J]. 山西农业科学, 2009, 37(1):85-87.
- [10] 何新红. 不同品种黄瓜的耐低温特性的研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学 2007.
- [11] 张素勤, 程智慧, 耿广东. 低温胁迫对不同耐寒性茄子品种光合特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(27):8435-8437.
- [12] 刘霞.  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对蚕豆幼苗生长及光合特性的影响[D]. 济南:山东师范大学 2008.
- [13] 周俊山.  $\text{NaCl}$  对二色补血草光合作用的影响[D]. 济南:山东师范大学 2007.
- [14] 严晓宇. 环剥对黄柏光合作用及  $^{14}\text{C}$  同化物运输、分配的影响[D]. 泰安:四川农业大学 2007.
- [15] 康辉. 环境  $\text{CO}_2$  浓度升高对植物的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(22):42-44.
- [16] 葛才林, 骆剑锋, 刘冲, 等. 重金属对水稻光合作用和同化物输配的影响[J]. 核农学报, 2005, 19(3):214-218.
- [17] 牛森. 作物品质分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1994.
- [18] 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, 43(2):363-368.
- [19] 谢鹏, 赵方贵, 侯丽霞, 等. “贝达”和“赤霞珠”叶片中可溶性糖类对光合作用的调节作用[J]. 中国农学通报, 2010, 26(3):167-172.
- [20] 孙骞, 杨军, 张邵阳等. 钾营养与果树光合生理及果实品质关系研究进展[J]. 广东农业科学, 2006, (12):126-128.
- [21] Iglesias D. J, Lliso L, Tadeo F R, et al. Regulation of photosynthesis through source; sink imbalance in citrus is mediated by carbohydrate content in leaves[J]. Physiologic Plantarum, 2002, 116:563-572.
- [22] Zhou R, Quebedeaux B. Changes in photosynthesis and carbohydrate metabolism in mature apple leaves in response to whole plant source-sink manipulation. [J]. J Amer Soc Hort Sci, 2003, 128:113-119.
- [23] 陈贻竹, 李晓萍, 夏丽. 叶绿素荧光技术在植物环境胁迫研究中的应用[J]. 热带亚热带植物学报, 1995, 3(4):79-86.
- [24] Demmig B, Bjorkman O. Comparison of effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of  $\text{O}_2$  evolution in leaves of higher plants[J]. Planta, 1987, 171:171-184.
- [25] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence as a tool in plant physiology II Interpretation of fluorescence signals[J]. Photosynth Res, 1984, 5:139-157.
- [26] Krause G H, Weis E. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics[J]. Annu Rev Plant Plant Mol, 1991, 42:313-349.
- [27] Long S P, East T M, Baker N R. Chilling damage to photosynthesis in young *Zea mays* L. Effects of light and temperature variation on photosynthetic carbon dioxide assimilation [J]. Journal of Experimental Botany, 1983, 34:177-188.
- [28] Long S P, Humphreys S, Falkowski P G. Photoinhibition of photosynthesis in nature[J]. Annu Rev Plant Physiol Mol Biol, 1994, 45:633-662.
- [29] 王国莉, 郭振飞. 低温对水稻不同耐低温品种幼苗光合速率和叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国水稻科学, 2005, 19(4):381-383.
- [30] Jung S, Steffen K L, Lee H J. Comparative photo inhibition of a high and low altitude ecotype of tomato to chilling stress under high and light conditions [J]. Plant Sci, 1998, 134:69-77.
- [31] 和红云, 田丽萍, 薛琳, 等. 植物抗寒性生理生化研究进展[J]. 天津农业科学, 2007, 13(2):10-13.
- [32] 崔娜, 李天来, 赵聚勇, 等. 外源生长素对番茄果实蔗糖代谢关键酶活性及基因表达的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(3):103-105.
- [33] 杨延杰, 谢春玲, 林多, 等. 弱光对番茄茎叶中铜含量的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(S2):186-188.
- [34] 杨延杰, 李天来, 林多, 等. 弱光对不同类型番茄干物质积累及矿质营养分配的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(3):125-128.
- [35] 王淑芬. 果蔬可溶性糖含量测定方法研究[J]. 山西农业科学, 1984, 6:16-18.
- [36] 王林闯, 贺超兴, 张志斌, 等. 番茄品种苗期耐低温性生理指标的研究[J]. 华北农学报, 2009, 24(S1):143-146.
- [37] 朱延辉, 冯辉. 弱光环境下番茄幼苗需光特性的变化[J]. 华北农学报, 2007, 22(5):80-82.