

杨再强<sup>1,2</sup> 袁昌洪<sup>1</sup> 丁宇晖<sup>1</sup> 侯梦媛<sup>1</sup> 张曼义<sup>1</sup>

# 低温弱光对设施番茄苗期营养物质和干物质分配的影响



**作者简介:**杨再强(1967—),男,四川安岳人,博士,教授,博士生导师.现任南京信息工程大学无锡研究生院院长、江苏省农业气象重点实验室主任、中国农业资源与区划学会农业灾害风险专业委员会副理事长,主要研究设施农业气象灾害监测预警及农业生物环境调控.主持国家自然科学基金面上项目4项,省社会发展项目2项,行业专项子项目3项,科技部农业科技转化项目1项,省自然科学基金1项.获得发明专利授权8项,主编专著4部,发表论文100余篇,其中SCI论文13篇.

E-mail: yzq@nuist.edu.cn

## 摘要

本试验以 PAR(光合有效辐射)  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 温度  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  为对照(CK), 设置6个处理[L1T1(PAR  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、L1T2(PAR  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、L1T3(PAR  $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、L2T1(PAR  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )、L2T2(PAR  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 和 L2T3(PAR  $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )], 分别处理 6、12、24、48 和 72 h, 以研究低温弱光双重胁迫对番茄苗期干物质分配以及不同器官的可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸含量的影响. 结果表明: 低温弱光双重胁迫使地下部分干物质分配比例减小, 而对地上部分干物质分配比例无显著影响, 地下部分的干物质分配比例随时间的变化与地上部分相反; 低温弱光胁迫显著降低了番茄茎和叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和游离氨基酸的含量; 根的可溶性糖含量随胁迫时间的变化趋势与地上部分不一致, 但根、茎、叶片的可溶性糖含量均以 L2T3 处理 72 h 含量最高, 分别为  $94.88$ 、 $77.09$  和  $41.62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ; 根的可溶性蛋白含量随胁迫时间的变化趋势与地上部分不一致, 茎和叶片的可溶性蛋白含量均以 L2T3 处理 12 h 最高, 以 L1T1 处理 72 h 最低; 不同器官的游离氨基酸含量随胁迫时间的变化趋势与可溶性蛋白相反; 弱光对番茄干物质和营养物质含量的影响小于低温. 研究证实苗期番茄在低温弱光胁迫前期, 干物质和营养物质先向地上部分分配, 胁迫 24 h 后则更多地向根系积累.

## 关键词

低温弱光; 干物质; 可溶性糖; 蛋白质; 氨基酸

中图分类号 S614.226

文献标志码 A

## 0 引言

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.) 是重要的设施作物<sup>[1]</sup>. 如何优化调控设施小气候以改善中国设施番茄生产产量低、品质差的现状是生产部门亟待解决的关键问题. 温度和光照强度显著影响设施番茄的生长发育状况<sup>[2-4]</sup>. 近年来低温雾霾天气显著增加, 设施内低温弱光灾害为设施番茄的生产带来极大的安全隐患. 植物在低温或弱光胁迫下会出现光合速率降低、气孔关闭<sup>[5]</sup>、抗氧化酶活性改变<sup>[6]</sup>、水分利用效率提高<sup>[7]</sup>等一系列变化.

温度和光照是影响作物干物质分配的重要因素. 温度直接改变作物的库强度, 进而对植物体干物质的产量和分配产生重要影响<sup>[8]</sup>.

收稿日期 2019-04-08

基金项目 国家重点研发计划(2019YFD1002202); 国家自然科学基金(41475107); “十二五”国家科技支撑计划(2014BAD10B07)

1 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, 南京, 210044

2 江苏省农业气象重点实验室, 南京, 210044

Walker 等<sup>[9]</sup>的研究证实,低温 2 °C 处理 3 d,番茄的干物质积累量显著降低.Kawasaki 等<sup>[10]</sup>进一步研究发现,根区温度 16.6 °C 保持 7 d,番茄根系的干物质质量显著高于 5.8 °C 处理.光作为重要的环境因子,对植物生长及其干物质分配具有极其重要的作用.El-Gizawy 等<sup>[11]</sup>研究表明,番茄植株的株高、叶面积以及干物质含量在弱光胁迫下均有不同程度的降低,说明弱光抑制作物生长.但也有学者认为弱光条件下植物叶面积增加,株高伸长,而总生物量分配变化并不显著<sup>[12-14]</sup>.

糖、氨基酸、蛋白质等营养物质是影响作物发育进程和果实品质形成的物质基础.Yu 等<sup>[15]</sup>研究发现,桃树木质部中的可溶性糖含量随着低温量的累积而增加,这与对番茄的研究是一致的<sup>[16]</sup>.Ou 等<sup>[17]</sup>进一步研究证实,在弱光条件下,随低温胁迫时间的延长,辣椒的叶绿素含量下降,根系活力降低,可溶性糖和脯氨酸含量则呈先升高后降低的趋势.植物体内总代谢水平的高低与蛋白质关系密切,而蛋白质含量的多少又直接或间接地受到温度和光照等环境因子的影响.Yan 等<sup>[18]</sup>认为水稻幼苗在 6 °C 低温处理下相对电解质渗漏增强,蛋白质降解增加.也有学者认为,温度的变化会引起植物体内蛋白质组分的改变<sup>[19]</sup>,如 Lee 等<sup>[20]</sup>发现低温诱导水稻产生了新的冷应激蛋白(cold-stress-responsive proteins).对于蛋白质含量对光照的响应方面,有研究指出遮光降低了水稻籽粒的蛋白含量<sup>[21]</sup>,而颀建明等<sup>[22]</sup>则发现,在 15 °C/5 °C(昼/夜)、100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  处理 5 d 时,海丰 7 号辣椒的可溶性蛋白含量比处理前增加了 107.20%,但随胁迫时间的延长,可溶性蛋白含量反而下降.游离氨基酸是细胞内重要的渗透调节物质.植物在感测低温后,一方面质膜组成等会发生改变,另一方面游离氨基酸和脯氨酸等渗透调节物质含量也有所增加<sup>[17,23-24]</sup>.也有研究显示,弱光同样会引起苏氨酸等大多数氨基酸含量的增加<sup>[25]</sup>.

迄今为止,低温和弱光双重胁迫对设施番茄器官营养物质及干物质分配的影响仍不清楚.本项目拟通过人工环境控制试验,研究设施番茄各器官营养物质包括器官可溶性糖和蔗糖、游离氨基酸和可溶性蛋白含量、干物质在各器官的分配比例对低温弱光的响应规律,试图揭示低温弱光双重胁迫对番茄植株生理的影响机理.研究结果可为设施番茄生产环境调控决策提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2017 年 4—5 月在南京信息工程大学 Venlo 试验温室(TPG-2009 Australian)内进行(118°43'E,30°12'N).供试番茄品种为“齐达利”(Lycopersicon esculentum Mill., cv. 'Zadari'),前期育苗在玻璃温室中进行,待番茄苗高 5 cm 时,选取生长健壮的幼苗定植于塑料花盆中,每盆 2 株.花盆直径 25.4 cm,深 19.0 cm,每盆装土约 5 kg,并施 0.78 g 尿素、0.64 g  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2\cdot\text{H}_2\text{O}$  和 1.11 g KCl.供试土壤含有机质 1.45%、全氮 0.12%、全磷 0.10%、有效氮 80.5  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、有效磷 27.6  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、有效钾 125.2  $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ,pH 值 6.75.缓苗 3 d 后,将花盆移入人工气候箱中进行处理.试验设置低温弱光双因素处理,温度分别设置为 4、6 和 8 °C 3 个水平,光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)设置为 200 和 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  2 个水平,共 6 个处理,即 L1T1 (PAR 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 4 °C)、L1T2 (PAR 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 6 °C)、L1T3 (PAR 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 8 °C)、L2T1 (PAR 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 4 °C)、L2T2 (PAR 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 6 °C) 和 L2T3 (PAR 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 8 °C),并以 PAR 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、温度 25 °C 为对照(CK).每个处理重复 3 次.分别在处理 6、12、24、48 和 72 h 后取样测定.人工气候箱中,每天的光合有效辐射时间为 12 h,湿度为 75%,温度误差为  $\pm 0.5$  °C.

### 1.2 干物质分配比例的测定

将各处理番茄植株的不同器官(根、茎、叶)洗净分别放置,105 °C 杀青 5 min 后置于 85 °C 烘箱中烘干至恒重,用精度为 0.01 g 的电子天平测定各器官干质量.地上和地下部分干物质分配比例的计算公式为

$$P_{ir} = W_r / W_t, \quad (1)$$

$$P_{isa} = (W_{st} + W_i) / W_t, \quad (2)$$

式中: $P_{ir}$ 、 $P_{isa}$  分别为地下和地上的干物质分配比例; $W_r$ 、 $W_{st}$ 、 $W_i$  分别为单株根、茎、叶的干质量,单位为 g/株; $W_t$  为单株总干物质质量,单位为 g/株.

### 1.3 器官可溶性糖含量的测定

可溶性糖的测定方法采用硫酸-蒽酮比色法<sup>[26]</sup>.取 0.05 g 磨碎的组织干样于离心管中加 5~6 mL 水,沸水浴 30 min,然后离心 10 min(4 000 转/min),去上清液倒入 25 mL 容量瓶中,重复 3 次,定容至 25

mL, 制得提取液. 吸取提取液 0.1 mL, 加 3.0 mL 茚酮试剂, 90 °C 水浴 30 min, 620 nm 波长下比色.

#### 1.4 器官游离氨基酸含量的测定

游离氨基酸的测定方法采用茚三酮显色法<sup>[26]</sup>. 将 0.05 g 组织样品经 5 mL 10% 乙酸研磨提取, 定容至 100 mL 并过滤. 取滤液 1 mL, 加入蒸馏水 1 mL、水合茚三酮 3 mL、抗坏血酸 0.1 mL, 混匀后置于沸水浴 15 min, 摇动冷却至溶液呈蓝紫色, 用 60% 乙醇定容至 20 mL, 于 570 nm 下比色.

#### 1.5 器官可溶性蛋白含量的测定

可溶性蛋白的测定方法采用考马斯亮蓝比色法测定<sup>[26]</sup>. 取 0.5 g 组织样品加 5 mL pH 值 7.8 的磷酸缓冲液, 冰浴研磨后冷冻离心 20 min 制得酶液. 取 20 μL 酶液加入 3 mL 考马斯亮蓝 G-250 反应液放置 2 min 后在 595 nm 下比色.

#### 1.6 数据分析

试验数据运用 Excel 2010 绘图, SPSS16.0 进行相关统计分析, Duncan 检验 ( $\alpha = 0.05$ ) 进行多重比较.

## 2 结果与分析

### 2.1 低温弱光对番茄干物质分配比例的影响

图 1a 为不同处理下的番茄地下部分干物质分

配比例, 可以看出, 番茄地下部分干物质分配比例经不同低温弱光处理后, 均随胁迫时间的延长呈先减小后增加的趋势. 除 L2T3 处理外, 其他处理的地下部分干物质分配比例均在低温弱光处理 24 h 降到最低, 而 L2T3 处理的地下干物质分配比例在处理 6 h 即降到最低值, 只有 CK 的 87.47%. 所有处理中, 以 L1T1 处理 24 h 的地下部分干物质分配比例最小, 只有 CK 的 67.25%; 其次是 L2T1 处理 24 h, 为 CK 的 67.08%; 以 L2T3 处理 72 h 的地下部分干物质分配比例最高, 为 0.18, 且显著高于 CK. 在相同温度处理下, L1 (PAR 为  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 光照处理地下部分干物质分配比例总体小于 L2 (PAR 为  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 光照处理. 相同光照条件下地下部分干物质分配比例总体随温度升高而增加.

图 1b 为不同处理下的番茄地上部分干物质分配比例, 可以看出, 与地下部分干物质分配比例相反, 经不同低温弱光处理后的番茄地上部分干物质分配比例, 均随胁迫时间的延长呈先升高后降低的趋势. 不同低温弱光处理的地上部分干物质分配比例均在处理后 24 h 达到最大. 但在试验胁迫时间内, 各处理的地上部分干物质比例与 CK 均无显著差异. 与地下部分干物质分配比例相似, 在相同温度处理下, L2 光照处理地上部分干物质分配比例总体大于 L1 光照处理. 相同光照条件下地上部分干物质分配比例总体随温度升高而增加.

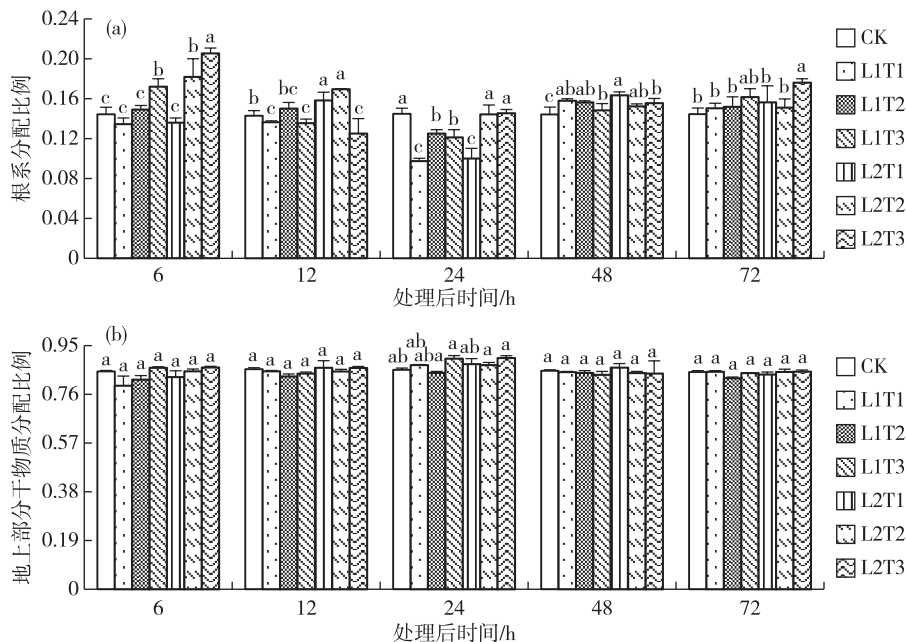


图 1 低温寡照对番茄苗期植株根系和地上部分干物质分配比例的影响

Fig. 1 Low temperature and low light intensity effects on dry matter distribution ratio in roots (a) and aboveground matters (b) of tomato seedlings

## 2.2 低温弱光对番茄器官可溶性糖含量的影响

表1为各处理对番茄不同器官可溶性糖含量(质量分数)的影响,可以看出,随着处理时间的延长,不同低温弱光处理下番茄根的可溶性糖含量均不断增加.在处理的6~24 h,不同低温弱光处理的根可溶性糖含量均显著低于CK.处理持续72 h,L1T3、L2T1、L2T2和L2T3处理的根可溶性糖含量显著高于CK,而L1T1和L1T2处理的根可溶性糖含量仍显著低于CK,分别只有CK的53.49%和98.90%.所有处理中,以L2T3处理72 h的根可溶性糖含量最高,为94.88 mg·g<sup>-1</sup>,以L1T1处理6 h的根可溶性糖含量最低,较CK显著低85.55%(表1).

处理6~72 h,不同低温弱光处理均显著降低了番茄茎的可溶性糖含量(表1).与根的可溶性糖含量变化不同,经过低温弱光处理后,L1T1、L1T2、L2T1和L2T2处理的茎可溶性糖含量则随胁迫时间的持续呈先增加后降低的趋势(表1),且均在处理持续24 h达到最大值,但较CK显著低31.06%~77.45%.L1T3和L2T3处理的茎可溶性糖含量随胁迫时间的持续不断增加.所有处理中,以L2T3处理

72 h的茎可溶性糖含量最高,为77.09 mg·g<sup>-1</sup>,以L1T1处理48 h的茎可溶性糖含量最低,只有CK的7.50%(表1).

叶片可溶性糖含量在不同低温弱光处理下的变化较为复杂,由表1可以看出,L1T1、L1T2、L2T1和L2T2处理的叶片可溶性糖含量随着胁迫时间的持续呈先增加后降低的趋势,且均在处理的12 h达到最大值.处理持续72 h,L1T1、L1T2、L2T1和L2T2处理的叶片可溶性糖含量达到最小值,分别较CK低77.43%、72.09%、41.38%和15.72%.L1T3和L2T3处理的叶片可溶性糖含量随处理时间的延长不断增加,其中L2T3处理的叶片可溶性糖含量在处理6~12 h后与CK无显著差异,而在处理24~72 h后显著低于CK.所有处理中,以L2T3处理72 h的叶片可溶性糖含量最高,为41.62 mg·g<sup>-1</sup>,以L1T1处理72 h的叶片可溶性糖含量最低,只有9.55 mg·g<sup>-1</sup>(表1).

此外,在相同温度处理下,L2光照处理的器官可溶性糖含量总体上高于L1光照处理.相同光照条件下各器官可溶性糖含量总体随温度升高而增加(表1).

表1 低温寡照对番茄苗期不同器官可溶性糖含量的影响

Table 1 Low temperature and low light intensity effects on soluble sugar content in tomato seedling organs mg·g<sup>-1</sup>

| 器官 | 处理   | 处理后时间/h     |              |              |              |             |
|----|------|-------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
|    |      | 6           | 12           | 24           | 48           | 72          |
| 根  | CK   | 50.45±0.96a | 51.00±0.99a  | 50.29±1.88a  | 50.78±1.74b  | 51.02±1.75d |
|    | L1T1 | 7.29±0.52f  | 16.33±1.10e  | 17.85±0.16e  | 18.42±0.61d  | 27.29±0.63f |
|    | L1T2 | 12.94±0.09e | 18.59±0.41d  | 27.07±2.02d  | 50.01±0.87b  | 30.46±1.97e |
|    | L1T3 | 18.03±0.72c | 14.64±2.44f  | 16.90±0.81e  | 35.59±0.69c  | 58.98±0.88c |
|    | L2T1 | 7.90±0.18f  | 10.68±0.76g  | 30.46±0.57c  | 34.98±0.67c  | 64.31±1.70b |
|    | L2T2 | 15.77±0.48d | 24.24±1.07c  | 26.50±0.59d  | 49.33±2.19b  | 66.72±0.90b |
|    | L2T3 | 36.11±1.91b | 34.41±0.67b  | 33.11±1.02b  | 71.14±0.96a  | 94.88±1.55a |
|    | CK   | 97.33±1.15a | 98.01±1.38a  | 97.46±1.07a  | 97.22±1.84a  | 97.77±1.80a |
| 茎  | L1T1 | 8.98±0.93f  | 8.98±1.08f   | 21.98±1.62e  | 7.29±0.99f   | 11.24±1.42e |
|    | L1T2 | 16.90±2.29c | 18.03±1.15e  | 26.29±3.70d  | 18.03±2.87e  | 18.42±1.49e |
|    | L1T3 | 50.24±3.09b | 56.45±1.06c  | 51.76±1.81c  | 70.53±1.35b  | 72.22±4.09b |
|    | L2T1 | 26.50±0.87c | 36.11±0.95d  | 54.76±1.38c  | 36.67±1.88d  | 33.01±2.66d |
|    | L2T2 | 11.81±2.78f | 58.66±4.61b  | 67.19±2.49b  | 60.41±5.54c  | 53.75±3.33c |
|    | L2T3 | 20.85±1.13d | 63.80±1.53b  | 69.45±1.91b  | 71.26±11.57b | 77.09±8.93b |
|    | CK   | 41.78±2.27a | 42.18±1.91a  | 42.81±0.68a  | 42.52±3.79a  | 42.31±2.83a |
|    | L1T1 | 15.03±2.45e | 28.20±1.98c  | 19.72±2.34e  | 21.42±3.83d  | 9.55±2.47d  |
| 叶  | L1T2 | 22.55±2.21d | 31.02±2.10bc | 20.29±2.71e  | 19.13±2.09d  | 11.81±1.95d |
|    | L1T3 | 27.63±2.39c | 29.72±1.98c  | 27.94±2.55de | 33.85±2.50c  | 37.02±5.84b |
|    | L2T1 | 32.72±3.38b | 37.41±2.34b  | 34.41±4.01cd | 31.14±1.39c  | 24.80±2.65c |
|    | L2T2 | 33.40±2.47b | 40.66±2.60a  | 40.14±9.54b  | 34.92±4.48b  | 35.66±9.76c |
|    | L2T3 | 38.37±3.21a | 40.75±2.38a  | 40.50±2.42b  | 40.59±8.95b  | 41.62±6.82b |

### 2.3 低温弱光对番茄器官可溶性蛋白的影响

各处理下番茄不同器官可溶性蛋白的含量(质量分数)见表2,可以看出,不同低温弱光处理下番茄根的可溶性蛋白含量均随着处理时间的延长出现不同程度的增加.在处理的6~24 h, L1T1处理的根可溶性蛋白含量始终最低,较CK显著低7.21%~46.0%;而L2T3处理的根可溶性蛋白含量始终最高,较CK显著高7.75%~29.61%.处理6 h, L1T2、L1T3、L2T1和L2T2处理的根可溶性蛋白含量与CK差异并不显著;处理持续72 h, L2T1和L2T2处理的根可溶性蛋白仍与CK无显著差异,但L1T2和L1T3处理的根可溶性蛋白含量则分别较CK显著高4.17%和8.94%.所有处理中,以L2T3处理72 h的根可溶性蛋白含量最高,较CK显著高29.61%,以L1T1处理6 h的根可溶性蛋白含量最低,较CK显著低46.07%(表2).

不同低温弱光处理的茎可溶性蛋白含量随胁迫时间的延长呈先升高后降低的趋势(表2).胁迫12 h时,各处理下的番茄茎可溶性蛋白含量达到最大值,此时,除L2T3处理外,其他处理的茎可溶性蛋白含

量均与CK差异显著.处理12 h后,各处理的茎可溶性蛋白含量均显著低于CK.胁迫持续72 h,各处理的茎可溶性蛋白含量均达到最小值,较CK显著低25.43%~65.51%.所有处理中,以L2T3处理12 h的茎可溶性蛋白含量最高,为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,以L1T1处理72 h的茎可溶性蛋白含量最低,只有CK的65.18%(表2).

与茎可溶性蛋白的变化趋势相同,不同低温弱光处理的叶片可溶性蛋白含量均在胁迫12 h达到最大值,其中, L2T3处理的叶片可溶性蛋白含量最高,为 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,与CK无显著差异,其次是L1T3处理,较CK显著低9.80%;但L1T1和L1T2处理则分别较CK显著低44.23%和44.07%.胁迫12 h之后,不同低温弱光处理的叶片可溶性蛋白含量随着胁迫时间的延长呈不断降低的趋势(表2).胁迫持续72 h,胁迫处理的叶片可溶性蛋白含量较CK低29.00%~60.25%,且差异均达到显著性水平.所有处理中,以L2T3处理12 h的叶片可溶性蛋白含量最高,为 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,以L1T1处理72 h的叶片可溶性蛋白含量最低,较CK低69.64%(表2).

表2 低温寡照对苗期番茄器官的可溶蛋白含量的影响

Table 2 Low temperature and low light intensity effects on soluble protein content in tomato seedling organs  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$

| 器官 | 处理   | 处理后时间/h     |             |             |             |             |
|----|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|    |      | 6           | 12          | 24          | 48          | 72          |
| 根  | CK   | 0.47±0.01b  | 0.47±0.01b  | 0.48±0.02b  | 0.48±0.03b  | 0.47±0.06d  |
|    | L1T1 | 0.25±0.02d  | 0.35±0.04d  | 0.36±0.01c  | 0.44±0.01c  | 0.43±0.02e  |
|    | L1T2 | 0.47±0.01b  | 0.47±0.02b  | 0.46±0.00b  | 0.52±0.01a  | 0.53±0.02bc |
|    | L1T3 | 0.46±0.03b  | 0.48±0.02b  | 0.48±0.02b  | 0.52±0.01a  | 0.57±0.03ab |
|    | L2T1 | 0.42±0.02bc | 0.43±0.02c  | 0.44±0.02b  | 0.43±0.01c  | 0.49±0.02cd |
|    | L2T2 | 0.46±0.03b  | 0.48±0.01b  | 0.54±0.01a  | 0.50±0.01ab | 0.51±0.01cd |
|    | L2T3 | 0.53±0.03a  | 0.53±0.02a  | 0.54±0.03a  | 0.52±0.02a  | 0.61±0.02a  |
|    | CK   | 0.56±0.02a  | 0.57±0.01a  | 0.56±0.02a  | 0.56±0.03a  | 0.57±0.03a  |
| 茎  | L1T1 | 0.24±0.02f  | 0.38±0.03d  | 0.33±0.01e  | 0.24±0.01e  | 0.20±0.02e  |
|    | L1T2 | 0.38±0.01e  | 0.52±0.02bc | 0.39±0.01d  | 0.39±0.02cd | 0.35±0.01c  |
|    | L1T3 | 0.43±0.02c  | 0.51±0.03bc | 0.40±0.01cd | 0.44±0.01b  | 0.41±0.03b  |
|    | L2T1 | 0.40±0.01de | 0.44±0.02c  | 0.43±0.04c  | 0.37±0.01d  | 0.27±0.01d  |
|    | L2T2 | 0.41±0.01d  | 0.51±0.02bc | 0.49±0.02ab | 0.41±0.03c  | 0.40±0.01b  |
|    | L2T3 | 0.53±0.02b  | 0.58±0.02a  | 0.48±0.02ab | 0.45±0.01b  | 0.43±0.02b  |
|    | CK   | 2.12±0.04a  | 2.13±0.03a  | 2.12±0.02a  | 2.12±0.02a  | 2.13±0.02a  |
|    | L1T1 | 0.88±0.01f  | 1.19±0.04d  | 0.92±0.02d  | 0.86±0.02d  | 0.65±0.03f  |
| 叶  | L1T2 | 0.76±0.01e  | 1.19±0.02d  | 0.78±0.04d  | 0.70±0.01d  | 0.69±0.01f  |
|    | L1T3 | 1.69±0.05c  | 1.92±0.10b  | 1.67±0.13b  | 1.25±0.03c  | 1.16±0.01c  |
|    | L2T1 | 0.81±0.03e  | 1.60±0.04c  | 1.28±0.01c  | 0.87±0.02d  | 0.88±0.03e  |
|    | L2T2 | 0.82±0.02de | 1.66±0.02c  | 1.43±0.05b  | 1.17±0.02c  | 1.12±0.03d  |
|    | L2T3 | 1.51±0.14b  | 2.15±0.10a  | 1.64±0.04b  | 1.66±0.03b  | 1.51±0.02b  |

此外,在相同温度处理下,L2光照处理的器官可溶性蛋白含量总体高于L1光照处理.相同光照条件下各器官可溶性蛋白含量总体随温度升高而增加(表2).

#### 2.4 低温弱光对番茄器官游离氨基酸含量的影响

表3为各处理对番茄不同器官游离氨基酸含量(质量分数)的影响,可以看出,随着处理时间的延长,不同低温弱光处理下番茄根的自由氨基酸含量均不断下降.在处理的6h,L1T1和L2T1根的自由氨基酸含量分别较CK显著低2.94%和0.66%,其他处理的根游离氨基酸含量与CK差异并不显著.处理12h,除L2T3处理外,其他处理的根游离氨基酸含量均显著低于CK.处理持续72h,不同低温弱光处理的根游离氨基酸含量均与CK的差异达到最大.所有处理中,以L2T3处理6h的根游离氨基酸含量最高,较CK显著高15.43%,以L1T1处理72h的根游离氨基酸含量最低,较CK显著低78.46%(表3).

与根的自由氨基酸含量变化不同,经过低温弱光处理后,不同低温弱光处理的茎游离氨基酸含量

在胁迫6~12h呈降低的趋势(表3),胁迫持续12h时,此时以L2T3处理的茎游离氨基酸含量最高,为 $5.36\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,以L1T1处理最低,只有 $3.91\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .胁迫12h后,不同处理的茎游离氨基酸含量随胁迫时间的延长不断增加.但胁迫持续至72h,各处理的茎游离氨基酸含量仍显著低于CK.所有处理中,以L2T3处理6h的茎游离氨基酸含量最高,为 $13.09\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,以L1T1处理12h的叶片游离氨基酸含量最低,只有 $3.91\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ (表3).

由表3可以看出,不同低温弱光处理的叶片游离氨基酸含量与茎的自由氨基酸含量变化类似,即随胁迫时间的延长呈先降低后增加的趋势,且各处理的叶片游离氨基酸含量均在胁迫12h达到最小值.处理持续12h,L1T1和L2T3处理的叶片游离氨基酸含量分别较CK显著低80.37%和57.30%.胁迫12h后,各处理的叶片游离氨基酸含量虽不断增加,但仍显著低于CK.所有处理中,以L2T3处理72h的叶片游离氨基酸含量最高,为 $28.30\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,以L1T1处理12h的叶片游离氨基酸含量最低,只有CK的19.64%(表3).

表3 低温寡照对苗期番茄器官游离氨基酸含量的影响

Table 3 Low temperature and low light intensity effects on free amino acid content in tomato seedling organs  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$

| 植株器官 | 处理           | 处理后时间/h      |              |             |              |              |
|------|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
|      |              | 6            | 12           | 24          | 48           | 72           |
| 根    | CK           | 14.28±1.82a  | 14.77±0.67a  | 14.20±1.19a | 14.77±1.70a  | 14.36±2.01a  |
|      | L1T1         | 13.86±0.41b  | 8.85±1.10c   | 7.10±0.92d  | 3.62±0.57e   | 3.09±0.55d   |
|      | L1T2         | 15.08±1.31ab | 12.98±3.09b  | 8.19±0.98cd | 4.79±0.89e   | 4.07±0.52d   |
|      | L1T3         | 16.41±1.22a  | 9.82±2.17c   | 9.44±1.72b  | 8.99±1.06bc  | 8.95±1.27b   |
|      | L2T1         | 14.19±0.63b  | 9.48±0.90c   | 8.23±0.60cd | 6.08±1.31d   | 4.18±0.68d   |
|      | L2T2         | 14.51±1.07ab | 10.79±0.78bc | 9.36±0.61bc | 7.70±0.48cd  | 7.01±0.59c   |
|      | L2T3         | 16.49±0.64a  | 14.90±1.70a  | 10.46±0.82b | 9.96±1.15b   | 9.82±0.35b   |
|      | 茎            | CK           | 14.24±0.67a  | 14.40±0.53a | 14.65±2.09a  | 14.00±0.25a  |
| L1T1 | 6.27±0.86d   | 3.91±0.55c   | 4.02±0.93d   | 5.39±1.48de | 7.34±1.43e   |              |
| L1T2 | 9.08±1.10c   | 4.54±0.67c   | 6.71±1.46c   | 7.21±1.40e  | 8.69±2.57e   |              |
| L1T3 | 11.10±1.60b  | 4.98±0.37c   | 7.56±0.35bc  | 7.93±1.49d  | 10.64±2.77c  |              |
| L2T1 | 5.07±0.76d   | 3.97±0.94c   | 6.86±1.07c   | 7.53±2.11d  | 9.40±1.54cd  |              |
| L2T2 | 5.77±0.27d   | 4.66±0.61c   | 5.11±0.83cd  | 8.55±3.45cd | 9.08±1.08cd  |              |
| L2T3 | 13.09±2.13ab | 5.36±0.75b   | 9.46±1.83b   | 10.86±5.20b | 12.60±1.74b  |              |
| 叶    | CK           | 30.51±1.36a  | 31.35±3.93a  | 30.95±1.41a | 31.51±1.16a  | 31.09±1.11a  |
|      | L1T1         | 12.64±1.45f  | 6.16±1.43d   | 7.17±1.05e  | 11.72±0.90ef | 17.32±1.05f  |
|      | L1T2         | 23.68±1.04c  | 6.82±0.58d   | 10.75±0.40d | 12.55±0.89e  | 20.42±1.75de |
|      | L1T3         | 22.77±1.12cd | 9.80±0.65c   | 13.64±0.84c | 15.61±0.75c  | 23.91±1.20d  |
|      | L2T1         | 20.22±1.70e  | 8.20±1.76c   | 9.80±1.86f  | 11.44±0.65f  | 20.72±1.00de |
|      | L2T2         | 23.03±0.67c  | 12.10±0.26c  | 13.41±1.15c | 13.97±0.74cd | 27.36±1.71c  |
|      | L2T3         | 27.66±1.56b  | 13.39±0.67b  | 15.80±0.51b | 16.81±1.86b  | 28.30±2.00b  |

此外,在相同温度处理下,L2光照处理的器官游离氨基酸含量总体高于L1光照处理.相同光照条件下各器官游离氨基酸含量总体随温度升高而增加(表3).

### 3 总结与讨论

温度和光照的变化会干扰植物的干物质分配.本试验中,不同低温弱光胁迫处理的番茄根干物质分配比例均在胁迫的6~24 h不断下降,这是因为番茄在胁迫前期,Rubisco羧化活性受到抑制<sup>[27]</sup>,光合速率下降<sup>[28-29]</sup>,植物为获取足够的光能和养分,控制地上部分的正常生长,从而减少了向根部的干物质输送;而在胁迫24 h后,根的干物质分配比例呈升高趋势,其原因可能是植株受害加重,需要强化根系生长,便于从土壤中吸收营养和水分来保证番茄的存活,从而使地下部分的干物质分配比例增加.尽管一些研究指出,低温或弱光单一胁迫均会对植物的生长有一定抑制<sup>[9,11,30]</sup>,但在双重胁迫的条件下,低温却能够在一定程度上促进弱光下植株的干物质积累<sup>[31]</sup>.在PAR相同的条件下处理72 h,番茄根的干物质分配比例以8℃处理最高,2℃处理最低,说明低温抑制根系生长,研究结果与前人研究<sup>[9,30]</sup>一致.本试验中地上部分的干物质分配比例的变化与前人研究不一致<sup>[31]</sup>,可能与品种、胁迫的强度与胁迫时间的差异有关.

可溶性糖不仅可以反映植物体内的碳素营养状况,又是重要的渗透调节物质,它能够通过稳定膜和蛋白质来减少胁迫引起的失水,减轻逆境对作物的伤害<sup>[32-33]</sup>.本试验研究发现,4和6℃处理下番茄茎和叶片中的可溶性糖含量均随胁迫时间的延长呈先增加后减少的趋势,这是因为在胁迫前期时,一方面番茄主动积累可溶性糖以降低渗透势,增强抗寒性,同时为呼吸作用提供能量<sup>[34-35]</sup>;另一方面,低温累积使赤霉素增加,进而诱发淀粉酶等合成,促使淀粉水解为糖<sup>[36]</sup>,这就使得茎和叶片中的可溶性糖含量在处理时间较短时即快速上升至最大值.随着低温的持续,番茄叶绿体结构受损,叶绿素合成受限<sup>[17]</sup>,光合速率下降,同时弱光的影响持续累积,促使蔗糖等营养物质的分解<sup>[37]</sup>,能量固定的水平减弱<sup>[38]</sup>,这就造成了胁迫中后期可溶性糖含量的下降.而8℃处理(L1T3和L2T3)下番茄的茎和叶片中的可溶性糖含量则不断增加,这可能是因为8℃并未达到番茄的严重受害温度<sup>[39]</sup>,番茄对于胁迫的耐受时间也相

对更长,同时反映出低温对番茄地上部可溶性糖含量的影响比弱光更强.不同低温弱光处理下根的可溶性糖含量均随胁迫时间的延长并未出现下降的趋势,这可能是因为胁迫后期番茄受害加重,为保证营养吸收以及植株存活,可溶性糖更多地分配至根系以维持活力,并以此抵御逆境带来的伤害<sup>[34]</sup>.

可溶性蛋白是植物体内重要的有机渗透调节物质,其含量的多少能反映出植物体内总代谢水平的高低.Lee等<sup>[20]</sup>发现低温诱导植物产生新的冷应激蛋白(cold-stress-responsive proteins).在本试验中,各处理番茄茎和叶片的可溶性蛋白含量在低温和弱光双重胁迫持续6~12 h不断升高,这是因为短期胁迫下,番茄生长受到的伤害较小,而胁迫会诱导一些更适应低温的蛋白质合成<sup>[20]</sup>,从而保护细胞膜免受脱水所造成的伤害.而随着低温与弱光的伤害持续累积,番茄各项生理机能受到严重破坏,RuBP羧化酶活性急剧下降<sup>[40]</sup>,蛋白酶的活性升高,RNA转录和翻译受到抑制,蛋白质合成减少<sup>[41]</sup>.同时,为保证番茄植株的正常存活,根系需积累更多的可溶性蛋白以维持活力,抵御逆境伤害,这也是根的可溶性蛋白含量在胁迫72 h内不断增加的原因.

游离氨基酸是氮代谢的中间产物,也是植物适应环境的信号物质,在胁迫下对植物的水势调节、缓解分解产物造成的损伤起到至关重要的作用.氨基酸的代谢比较复杂,如弱光会引起苏氨酸和赖氨酸的显著增加,但对丙氨酸和天冬氨酸的影响较小<sup>[25]</sup>.本研究发现,番茄各器官的游离氨基酸与可溶性蛋白含量变化趋势相反.在处理的6~12 h茎和叶片的游离氨基酸含量呈下降趋势,而此时正是可溶性蛋白含量不断上升的时期,说明番茄为满足代谢需要而合成蛋白质,从而消耗了大量的氨基酸.处理24 h后游离氨基酸含量缓慢增加,一方面是由于这一阶段的可溶性蛋白含量不断下降,另一方面可能是植株为DNA复制、RNA产生、合成新的蛋白质等生理变化做准备<sup>[42]</sup>.

本试验采用盆栽试验,在昼夜温度一致的情况下进行,仅研究不同低温弱光处理对番茄干物质和营养物质的影响,但由于不同昼夜温差可能导致番茄生长状况的差异,同时盆栽条件与温室种植条件不一致,今后应该在温室种植的条件下进一步控制昼夜温差,以减少试验误差.

### 4 结论

本研究证实低温弱光双重胁迫使地下部分干物

质分配比例减小,而对地上部分干物质分配比例无显著影响.低温弱光还显著降低了番茄茎和叶片的营养物质的含量.根的营养物质含量随胁迫时间的变化与地上部分不一致.各器官游离氨基酸随胁迫时间的变化趋势与可溶性蛋白相反.弱光对番茄干物质和营养物质含量的影响小于低温.研究证实苗期番茄在低温弱光胁迫前期,干物质和营养物质先向地上部分分配,胁迫 24 h 后则更多地向根系积累.本研究可为设施作物的低温弱光复合灾害防御提供理论参考.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] Nuruddin M M, Madramootoo C A, Dodds G T. Effects of water stress at different growth stages on greenhouse tomato yield and quality [ J ]. Hort Science, 2003, 38(7): 1389-1393
- [ 2 ] Heuvelink E. Tomato growth and yield: quantitative analysis and synthesis [ D ]. Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agriculture University, 1996
- [ 3 ] Callahan H S, Pigliucci M. Shade-induced plasticity and its ecological significance in wild populations of *Arabidopsis thaliana* [ J ]. Ecology, 2002, 83(7): 1965
- [ 4 ] Elizondo R, Oyanedel E. Field testing of tomato chilling tolerance under varying light and temperature conditions [ J ]. Chilean Journal of Agricultural Research, 2010, 70(4): 552-558
- [ 5 ] Kao W Y, Shih C N, Tsai T T. Sensitivity to chilling temperatures and distribution differ in the mangrove species *Kandelia candel* and *Avicennia marina* [ J ]. Tree Physiology, 2004, 24(7): 859-864
- [ 6 ] Wei Y Y, Xu F, Shao X F. Changes in soluble sugar metabolism in loquat fruit during different cold storage [ J ]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(5): 1043-1051
- [ 7 ] Kuwagata T, Ishikawa-Sakurai J, Hayashi H, et al. Influence of low air humidity and low root temperature on water uptake, growth and aquaporin expression in rice plants [ J ]. Plant and Cell Physiology, 2012, 53(8): 1418-1431
- [ 8 ] Heuvelink E. Effect of fruit load on dry matter partitioning in tomato [ J ]. Scientia Horticulturae, 1997, 69(1/2): 51-59
- [ 9 ] Walker M A, McKersie B D, Pauls K P. Effects of chilling on the biochemical and functional properties of thylakoid membranes [ J ]. Plant Physiology, 1991, 97(2): 663-669
- [ 10 ] Kawasaki Y, Matsuo S, Kanayama Y, et al. Effect of root-zone heating on root growth and activity, nutrient uptake, and fruit yield of tomato at low air temperatures [ J ]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2014, 83(4): 295-301
- [ 11 ] El-Gizawy A M, Goma H M, El-Habbasha K M, et al. Effect of different shading levels on tomato plants 1. growth, flowering and chemical composition [ J ]. Acta Horticulturae, 1993(323): 341-348
- [ 12 ] Cockshull K E, Graves C J, Cave C R J. The influence of shading on yield of glasshouse tomatoes [ J ]. Journal of Horticultural Science, 1992, 67(1): 11-24
- [ 13 ] 何维明, 钟章成. 攀援植物绞股蓝幼苗对光照强度的形态和生长反应 [ J ]. 植物生态学报, 2000, 24(3): 375-378  
HE Weiming, ZHONG Zhangcheng. Morphological and growth responses of the climbing plant, *Gynostemma pentaphyllum* seedlings to varying light intensity [ J ]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(3): 375-378
- [ 14 ] Steinger T, Roy B A, Stanton M L. Evolution in stressful environments II: adaptive value and costs of plasticity in response to low light in *Sinapis arvensis* [ J ]. Journal of Evolutionary Biology, 2003, 16(2): 313-323
- [ 15 ] Yu D J, Hwang J Y, Chung S W, et al. Changes in cold hardiness and carbohydrate content in peach (*Prunus persica*) trunk bark and wood tissues during cold acclimation and deacclimation [ J ]. Scientia Horticulturae, 2017, 219: 45-52
- [ 16 ] Klopotek Y, Kläring H P. Accumulation and remobilisation of sugar and starch in the leaves of young tomato plants in response to temperature [ J ]. Scientia Horticulturae, 2014, 180: 262-267
- [ 17 ] Ou L J, Wei G, Zhang Z Q, et al. Effects of low temperature and low irradiance on the physiological characteristics and related gene expression of different pepper species [ J ]. Photosynthetica, 2015, 53(1): 85-94
- [ 18 ] Yan S P, Zhang Q Y, Tang Z C, et al. Comparative proteomic analysis provides new insights into chilling stress responses in rice [ J ]. Molecular & Cellular Proteomics, 2006, 5(3): 484-496
- [ 19 ] Gammulla C G, Pascovici D, Atwell B J, et al. Differential metabolic response of cultured rice (*Oryza sativa*) cells exposed to high- and low-temperature stress [ J ]. Proteomics, 2010, 10(16): 3001-3019
- [ 20 ] Lee D G, Ahsan N, Lee S H, et al. Chilling stress-induced proteomic changes in rice roots [ J ]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(1): 1-11
- [ 21 ] Mo Z W, Li W, Pan S G, et al. Shading during the grain filling period increases 2-acetyl-1-pyrroline content in fragrant rice [ J ]. Rice, 2015, 8: 9
- [ 22 ] 颜建明, 郁继华, 颜敏华, 等. 低温弱光下辣椒 3 种渗透调节物质含量变化及其与品种耐性的关系 [ J ]. 西北植物学报, 2009, 29(1): 105-110  
XIE Jianming, YU Jihua, XIE Minhua, et al. Changes of three osmotic regulatory metabolites in leaves of pepper under low temperature and poor light stress and relations between its and varietal tolerance [ J ]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(1): 105-110
- [ 23 ] Kaplan F, Kopka J, Sung D Y, et al. Transcript and metabolite profiling during cold acclimation of *Arabidopsis* reveals an intricate relationship of cold-regulated gene expression with modifications in metabolite content [ J ]. The Plant Journal, 2007, 50(6): 967-98
- [ 24 ] Kovács Z, Simon-Sarkadi L, Szűcs A, et al. Differential effects of cold, osmotic stress and abscisic acid on poly-



- amine accumulation in wheat [J]. *Amino Acids*, 2010, 38 (2): 623-631
- [25] Liang C G, Jia L, Yan W, et al. Low light during grain filling stage deteriorates rice cooking quality, but not nutritional value [J]. *Rice Science*, 2015, 22(4): 197-206
- [26] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- LI Hesheng. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000
- [27] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2002, 25(2): 239-250
- [28] Abreu M E, Munné-Bosch S. Salicylic acid may be involved in the regulation of drought-induced leaf senescence in perennials; a case study in field-grown *Salvia officinalis* L. plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 64(2): 105-112
- [29] Ruelland E, Zachowski A. How plants sense temperature [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 69(3): 225-232
- [30] Walter A, Nagel K A. Root growth reacts rapidly and more pronounced than shoot growth towards increasing light intensity in tobacco seedlings [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2006, 1(5): 225-226
- [31] 邹雨伽, 高冠, 杨再强, 等. 低温寡照对番茄花期植株生长及干物质分配的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(12): 178-184
- ZOU Yuqie, GAO Guan, YANG Zaiqiang, et al. Effects of low temperature and low light on plant growth and dry matter distribution in tomato flowering stage [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 44(12): 178-184
- [32] Ma Y Y, Zhang Y L, Lu J, et al. Roles of plant soluble sugars and their response to plant cold stress [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2009, 8(10): 2004-2010
- [33] Wisniewski M, Nassuth A, Teulière C, et al. Genomics of cold hardiness in woody plants [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2014, 33(2/3): 92-124
- [34] 赵昶灵, 武绍波, 李文祥, 等. 人工低温对滇中砧山酥梨休眠芽和枝的效应 [J]. *西北植物学报*, 2000, 20(4): 596-603
- ZHAO Changling, WU Shaobo, LI Wenxiang, et al. Effects of the artificial low temperature on the dormant buds and shoots of Dangshan pear in the central part of Yunnan [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2000, 20(4): 596-603
- [35] Jaganathan G K, Han Y Y, Li W J, et al. Physiological mechanisms only tell half story: multiple biological processes are involved in regulating freezing tolerance of imbibed *Lactuca sativa* seeds [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 44166
- [36] Mohamed H B, Vadel A M, Geuns J M C, et al. Biochemical changes in dormant grapevine shoot tissues in response to chilling: possible role in dormancy release [J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 124(4): 440-447
- [37] 刘波, 郑国生, 闫志佩, 等. 低温处理对牡丹春节催花及营养类物质变化的影响 [J]. *西北植物学报*, 2004, 24(9): 1635-1639
- LIU Bo, ZHENG Guosheng, YAN Zhipei, et al. Effect of different chilling treatments on forcing culture of tree peony in winter and changes of nutrient substance [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2004, 24(9): 1635-1639
- [38] Correia M J, Osório M L, Osório J, et al. Influence of transient shade periods on the effects of drought on photosynthesis, carbohydrate accumulation and lipid peroxidation in sunflower leaves [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 58(1/2/3): 75-84
- [39] Hu W H, Wu Y, Zeng J Z, et al. Chill-induced inhibition of photosynthesis was alleviated by 24-epibrassinolide pretreatment in cucumber during chilling and subsequent recovery [J]. *Photosynthetica*, 2010, 48(4): 537-544
- [40] Bruggemann W. Long-term chilling of young tomato plants under low light. VI. Differential chilling sensitivity of ribulose-1,5-bisphosphate Carboxylase/Oxygenase is linked to the oxidation of cysteine residues [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1995, 36(4): 733-736
- [41] 谢志玉, 张文辉, 刘新成, 等. 干旱胁迫对文冠果幼苗生长和生理生化特征的影响 [J]. *西北植物学报*, 2010, 30(5): 948-954
- XIE Zhiyu, ZHANG Wenhui, LIU Xincheng, et al. Growth and physiological characteristics of *Xanthoxeranthoxylon sorbifolia* seedlings under soil drought stress [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, 30(5): 948-954
- [42] 唐云明. 桑冬芽休眠解除中蛋白质和核酸的动态变化研究 [J]. *西南农业大学学报*, 1997, 19(1): 75-77
- TANG Yunming. Kinetic changes of protein and nucleic acids during dormancy release of mulberry winter buds [J]. *Journal of Southwest Agricultural University*, 1997, 19(1): 75-77

## Effects of low temperature and low light intensity on nutrient and dry matter distribution in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings

YANG Zaiqiang<sup>1,2</sup> YUAN Changhong<sup>1</sup> DING Yuhui<sup>1</sup> HOU Mengyuan<sup>1</sup> ZHANG Manyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

<sup>2</sup> Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044

**Abstract** In this study, we examined the influence of low temperature and low light intensity stress on the soluble sugar, soluble protein, and free amino acid content in different organs and on dry matter distribution in greenhouse tomato seedlings. We used Photosynthetically Active Radiation (PAR) at  $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and temperature of  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  as control (CK), and set up an experiment involving six treatments [L1T1 (PAR  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ), L1T2 (PAR  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ ), L1T3 (PAR  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ), L2T1 (PAR  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ), L2T2 (PAR  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ ), and L2T3 (PAR  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $8 \text{ }^\circ\text{C}$ )] that were monitored for 6, 12, 24, 48, and 72 h, respectively. The results showed that the dry matter distribution ratio in the underground part of the plant was lower than that in the ground-level parts and opposite to that in the aboveground part. Low temperature and low light intensity stress significantly reduced the soluble sugar, soluble protein, and free amino acid content of the stems and leaves. The soluble sugar content in the roots was not consistent with the aboveground parts but was highest in the roots, stems, and leaves ( $94.88 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $77.09 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  and  $41.62 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively) after 72 h in the L2T3 treatment. The soluble protein content in the roots was not consistent with the aboveground part but was highest in both the stems and leaves after 12 h in the L2T3 treatment and lowest after 72 h in the L1T1 treatment. The free amino acid content in different organs showed an effect opposite to that of the soluble protein content when the stress exposure time was prolonged. Low light had less of an effect on dry matter and nutrient content than low temperatures did. The results showed that dry matter and nutrients were distributed to the ground-level part of the plant during the early stages of exposure to stress, and then to the root system after 24 h of stress exposure. The results provide a theoretical basis for improved loss prevention due to low temperature or low light stress in crops grown in facilities such as greenhouses.

**Key words** low temperature or low light stress; dry matter; soluble sugar; protein; amino acid