

夜间弱光补光对番茄生长和源库间蔗糖转运及相关基因表达的影响

秦艳萍, 国志信

(河南农业大学园艺学院 郑州 450046)

摘要: 夜间补光已成为设施蔬菜生产的重要手段, 但多采用强光, 耗能大、成本高, 而夜间弱光补光对蔬菜生产的影响尚不清楚。为探讨夜间弱光补光对番茄生长和源库间蔗糖转运的影响, 以 Micro Tom 番茄为材料, 从植株 4 叶 1 心时期到果实绿熟期, 以不补光为对照(CK), 每天关灯 1 h 后进行 4 h 15(SL15)和 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (SL30)低于光补偿点的两种补光处理。结果表明, 与 CK 相比, SL15 和 SL30 两个处理均显著提高番茄株高、茎粗和鲜质量; 补光明显改善了根系形态, 显著增加了总根长、总表面积和根尖数; 补光促进开花, 表现为开花株数和总开花数显著高于 CK。以上生理指标 SL15 和 SL30 两个处理之间没有显著差异。与 CK 相比, SL15 处理显著降低了成熟叶片和茎(源)的蔗糖含量, 提高了果实和根系(库)的蔗糖含量, 促进了蔗糖转运基因 *SUT1*、*SUT4*、*SWEET10b*、*SWEET11b* 和 *SWEET14* 在叶片、茎、果实和根系不同程度地上调表达, 但叶片、茎、果实和根系 4 个器官总体的蔗糖含量没有显著差异。此外, SL15 处理显著提高了叶片、茎、果实和根系 4 个器官中与蔗糖转运相关激素脱落酸的含量及其合成和信号标志基因 *NCED1*、*AAO3* 和 *ABI5* 的表达量。综上所述, 夜间弱光补光可促进番茄生长及源库间蔗糖转运, 研究结果为推广夜间弱光补光、降低补光成本、促进设施蔬菜高效绿色发展提供了新思路。

关键词: 番茄; 夜间弱光补光; 生长; 蔗糖转运; 脱落酸

中图分类号: S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)11-019-08

Effects of low-light supplemental light at night on tomato growth, sucrose transport and related gene expression between source and sink

QIN Yanping, GUO Zhixin

(College of Horticulture, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, Henan, China)

Abstract: Nighttime supplemental light has become an important means of facility vegetable production, but strong light is mostly used, which consumes a lot of energy and has a high cost. However, the effect of low-light supplemental light at night on vegetable production is still unclear. To investigate the effect of low-light supplemental light at night on the growth and sucrose transport between source and sink, Micro Tom tomato was used as the material. From the four-leaf and one-heart stage to the mature green stage, two supplemental light treatments of 15 (SL15) and 30 (SL30) $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ bellowing the light compensation point for 4 hours were carried out after turning off the light for 1 hour at night every day, with no light supplementation as the control (CK). The results showed that both SL15 and SL30 treatments significantly increased plant height, stem diameter and fresh mass of tomato seedlings compared with CK. Supplemental light obviously improved root morphology and increased total root length, total surface area as well as root tip number. Supplemental light promoted flowering, manifested by increased the number of flowering plants and the total number of flowering plants. There was no significant difference in the above physiological indexes between SL15 and SL30. Compared with CK, SL15 treatment significantly reduced the sucrose content of mature leaves and stems (source), increased the sucrose content of fruits and roots (sink), and up-regulated the expression of sucrose transport genes *SUT1*, *SUT4*, *SWEET10b*, *SWEET11b* and *SWEET14* to varying degrees in leaves, stems, fruits and roots. However, there was no significant difference in the overall sucrose content of leaves, stems, fruits and roots between CK and SL15 treatment. In addition, SL15 treatment significantly increased the content of abscisic acid that was related to sucrose transport, and improved the

收稿日期: 2024-08-29; 修回日期: 2024-09-13

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(22A210008)

作者简介: 秦艳萍, 女, 硕士, 研究方向为蔬菜栽培生理与生态。E-mail: qinyanping618@163.com

通信作者: 国志信, 男, 副教授, 研究方向为蔬菜栽培生理与生态。E-mail: guozhixin666@henau.edu.cn

expression levels of its synthetic and signaling marker genes including *NCED1*, *AAO3* and *ABI5* in the leaves, stems, fruits and roots. In conclusion, nighttime low-light supplementation promotes tomato growth and sucrose transport between source and sink, which provides a new idea for promoting low-light supplementation to reduce the cost of supplemental light, and promotes the efficient and green development of facility vegetables.

Key words: Tomato; Low-light supplemental light at night; Growth; Sucrose transport; Abscisic acid

光不仅影响植物光合作用,而且是调控植物生长发育和逆境响应的重要环境信号因子^[1]。为解决设施生产中光照不足的问题,采用补光技术是设施农业的重要手段^[2]。对蔬菜幼苗进行夜间补光能改善其长势,提高壮苗指数^[3-4]。冬季温室黄瓜幼苗补光时,揭苫前3 h补光有利于黄瓜幼苗总叶面积增加,壮苗指数增大^[5]。刘志强等^[6]研究表明,白天正常照射4.5 h后进行3 h暗期补光是设施番茄幼苗生长发育最为有利的夜间补光时间段,最能提高植株光合能力,有利于干物质的积累和培育健壮的幼苗。王舒亚等^[7]研究指出,与不补光的对照相比,补光3 h能明显提高番茄的株高、茎粗、叶面积、单果质量、单株结果数和产量。于鹏澎等^[8]研究表明,选择补光光照度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、补光时间为2 h的LED补光参数进行番茄育苗期间的补光处理,能提高番茄幼苗的茎粗、叶片数、叶面积、总叶绿素含量、净光合速率、生物量和壮苗指数,且该处理的番茄育苗电能利用效率和光能利用效率最高。但是目前的夜间补光研究多是为了解决弱光寡照问题,应用高于光补偿点的光强进行夜间补光,而利用低于作物光补偿点的弱光夜间补光对蔬菜生长发育影响的研究较少。高光强补光灯的使用将消耗大量的电力,增加了温室的生产成本,限制了设施补光技术的推广和应用,成为设施蔬菜节能高效生产的瓶颈^[9-10]。此外,夜间弱光补光对作物源库之间蔗糖转运的影响尚未见报道。

番茄(*Solanum lycopersicum* L.)既是重要的果菜,也是研究植物源库间光合产物转运的模式作物。蔗糖是高等植物光合产物运输的主要形式,对作物生长发育、产量和品质形成至关重要。白天成熟叶片(源器官)合成的碳源除供给源器官以及转运至库器官外,大部分以淀粉的形式暂时储存;夜间淀粉被分解为可溶性糖,以蔗糖的形式运输到果实、幼叶和根等库器官中加以利用。如果光合产物的运输受阻,叶片会过多积累光合产物,进而造成光合反馈抑制现象的发生,导致作物生长矮小,抗逆性减弱,产量和品质降低^[11]。蔗糖由源到库的运输不仅与植物的生长发育相关,还受到植物激素水平以及外界环境条件变化等因素的影响^[12]。蔗糖不

能独立跨植物生物膜系统来进行运输,需要相应的糖转运蛋白的协助^[13]。近年来研究发现,两类糖转运蛋白家族是蔗糖质外体转运的关键蛋白,包括蔗糖转运蛋白(sucrose transporter 或 sucrose carrier, SUT 或 SUC)和糖外排转运蛋白(sugars will eventually be exported transporters, SWEETs)^[14-16]。其中, SWEETs 由于能够选择性地吸收不同糖底物,在植物生理活动与发育过程中发挥重要功能^[14]。拟南芥 SWEET 可分为4个不同的亚类,属于不同亚类的各种糖转运蛋白优先转运不同的糖组分,其中分支3(SWEET9-15)成员主要以蔗糖作为底物^[14]。番茄中 *SISWEET10b*、*SISWEET11b* 和 *SISWEET14* 等在不同器官中均有不同程度的表达,且在这些基因的启动子区均存在能够响应植物激素脱落酸(abscisic acid, ABA)的顺式作用元件^[15]。在蔗糖的“源”器官装载、韧皮部的长距离运输和“库”器官卸载等过程中, SUT 发挥着重要作用。番茄中包含3个亚族的蔗糖转运体蛋白分别为 *SISUT1*、*SISUT2* 和 *SISUT4*。Hackel 等^[16]研究证明,番茄 *SISUT1* 影响蔗糖在韧皮部的装载; *SISUT2* 主要定位在筛管细胞质膜上,影响番茄果实及种子的发育; *SISUT4* 主要定位在液泡膜上,负责把蔗糖从液泡运输到细胞质中^[17]。

笔者以发光二极管(LED)白灯作为补光光源,以番茄 Micro Tom 幼苗为材料,旨在研究夜间弱光补光对番茄植株生长和源库之间蔗糖转运的调控作用。研究结果可为工厂化育苗和设施栽培中采用低耗能LED夜间补光提供参考,以节能增效的方式为培育壮苗、提高产量和品质提供理论依据。

1 材料与方方法

1.1 材料

以模式番茄 Micro Tom 为试验材料,番茄幼苗在河南农业大学园艺设施结构与环境实验室人工气候箱(DRON-1000C)中培养,环境条件为:相对湿度65%,昼夜温度25℃/20℃,光周期为12 h·d⁻¹,光照度为 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

番茄种子消毒后,置于转速 $200 \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、温度

28 °C的摇床中催芽 2 d,70%以上的种子露白后,进行穴盘育苗,采用草炭、蛭石体积比为 1:1 的育苗基质;选择 3 叶 1 心、形态长势一致的幼苗移栽至高 9 cm、直径 10 cm 的营养钵中,在智能人工气候箱内进行培养。补光试验于 2024 年 4 月 1 日到 2024 年 5 月 20 日进行,即在幼苗 4 叶 1 心时期到果实绿熟期,每天关灯 1 h 后进行 4 h 分别为 15 (SL15)和 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (SL30)低于光补偿点的两种补光处理,以不补光为对照(CK)。每个处理 45 株,3 次重复,随机排列。果实绿熟期时对番茄的根、茎、叶片、果实进行取样,用于后续试验。

1.3 试验方法

1.3.1 植株形态指标测定 在番茄果实开花期,各处理随机标记 3 株生长一致的植株,采用直尺测量植株从子叶处至生长点的长度,即为植株高度;采用游标卡尺测量植株基部第 1 叶位下 1 cm 处的直径,即为茎粗;采用千分之一的电子天平测定植株鲜质量;使用根系扫描仪(Expression 4990, Epson, Long Beach, CA)结合 Win RHIZO 软件(Regent Instruments Inc., Canada)分析根系构型指标(总长度、总表面积和根尖数)。

1.3.2 开花统计 在补光处理后,当番茄第 1 朵花

的花瓣与柱头呈 45°角时,对花进行标记并记录开花日期,在试验过程中,每天统计总开花株数及总开花个数,开花以花瓣展开 45°为标准^[18]。

1.3.3 蔗糖含量检测 利用苏州梦犀生物医药科技有限公司的试剂盒测定蔗糖含量。

1.3.4 脱落酸含量检测 参照 Chen 等^[19]的方法,采用酶联免疫吸附检测法(ELISA),对根部、茎、叶片、果实中脱落酸的含量进行测定。

1.3.5 植物总 RNA 提取和 qRT-PCR 利用植物 RNA 提取试剂盒(北京华越洋生物科技有限公司)对番茄果实、叶片、茎和根部 RNA 进行提取。使用 Superscript IV 逆转录酶试剂盒(Thermo Fisher, USA)将 RNA 逆转录为 cDNA, -40 °C 保存备用。在实时荧光定量 PCR 仪(ABI7500)CFX96TM Real-Time 系统(Bio-Rad, USA)上,利用 Power Up™ SYBR™ Green Master Mix(Thermo Fisher, USA)对相关基因进行 qRT-PCR 分析。以番茄 *Actin* 基因作为内参,检测番茄各器官在补光处理下蔗糖转运基因(*SWEET10b*、*SWEET11b*、*SWEET14*、*SUT1* 和 *SUT4*)和脱落酸合成和信号标志基因(*NCED1*、*AAO3* 和 *ABI5*)的相对表达量。相对表达量采用 $2^{-\Delta\Delta Ct}$ 方法计算^[20]。具体的引物列表见表 1。

表 1 基因和引物序列

Table 1 Genes and primes used in real-time qRT-PCR analysis

基因名称 Gene name	正向引物(5'-3') Forward primer (5'-3')	反向引物(5'-3') Reverse primer (5'-3')
<i>SWEET10b</i>	AGCGAGCCCTGGATTAACAG	CTAGCTATCTTAGAACAAAGG
<i>SWEET11b</i>	CCTAATTAATGGCTAATGATATATG	CGGACCAGCCGTTTTATGCAT
<i>SWEET14</i>	TGAGTGCAATTGTGTGTTTCAGA	GGCCTCTATGATTGCCTTTGG
<i>SUT1</i>	TTCCATAGCTGCTGGTGTTC	TACCAGAAATGGGTCCACAA
<i>SUT4</i>	AGCGACGGTGCAACTAAGAA	GAAGTGGGAGGAGGTGAGC
<i>NCED1</i>	CTGCTTCTTCCCAAGCATTC	ACCTGTTCCACCACAAGGAC
<i>AAO3</i>	GGAGGCAAGGCAGTGAAA	CAAGATGTAAGGCGGTGA
<i>ABI5</i>	GGGAGTACCAGAATCAGAGATGGT	AAGCGTGAGCGAGTAAATCGA
<i>Actin</i>	CTCAGTCAGGAGAACAGGGT	TGGTCGGAATGGGACAGAAAG

1.4 数据分析

利用 Excel 2019 整理数据,采用 IBM SPSS Statistics 20 进行方差分析,用 Tukey 检验确定处理间的显著性差异($p < 0.05$),使用 Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

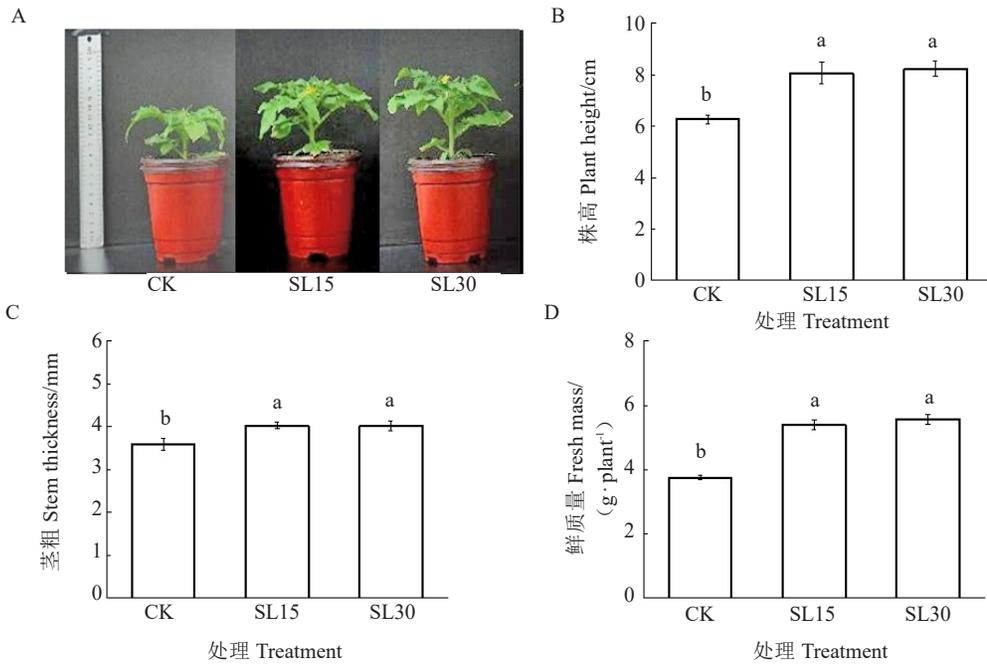
2.1 夜间弱光补光促进番茄生长

夜间弱光补光处理明显影响番茄生长(图 1-A)。与 CK 相比,SL15 补光处理的株高、茎粗和整株鲜质量分别显著提高了 28.72%、12.05%和

44.09%;SL30 补光处理的株高、茎粗和整株鲜质量分别显著提高了 31.38%、11.86%和 48.71%(图 1-B~D)。补光处理 SL15 和 SL30 之间的株高、茎粗和整株鲜质量没有显著差异。以上结果表明,夜间弱光补光显著促进番茄幼苗生长。

2.2 夜间弱光补光明显改善番茄根系构型

夜间不同弱光补光处理明显改善了番茄幼苗的根系构型(图 2-A)。与 CK 相比,SL15 补光处理的总根长、总表面积和根尖数分别显著增加了 22.79%、33.01%和 48.02%;SL30 补光处理的总根



注:A. 植株表型;B. 株高;C. 茎粗;D. 鲜质量。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

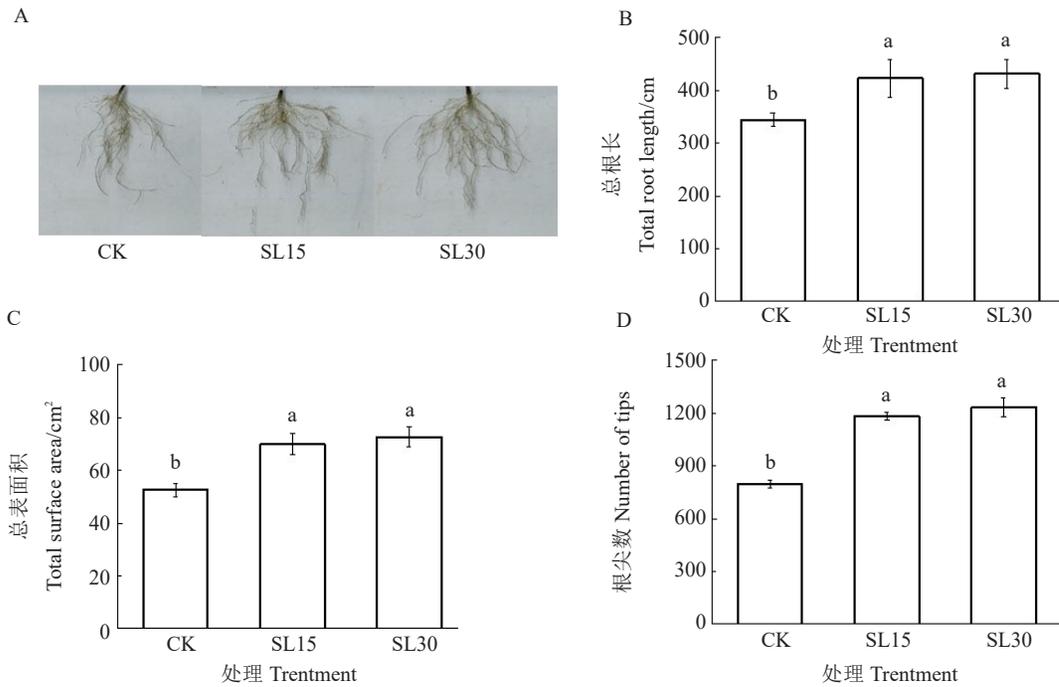
Note: A. Plant phenotype; B. Plant height; C. Stem thickness; D. Fresh mass. Different lowercase letters indicate significant difference between different treatments ($p < 0.05$). The same below.

图1 夜间弱光补光对番茄生长的影响

Fig. 1 Effects of low-light supplemental light at night on tomato growth

长、总表面积和根尖数分别显著增加了 25.28%、38.42%和 54.56%(图 2-B~D)。补光处理 SL15 和 SL30 之间的总根长、总表面积和根尖数没有显

著差异。以上结果表明,夜间弱光补光显著促进番茄幼苗根系生长,有助于构建理想的根系构型。



注:A. 根系形态;B. 总根长;C. 总表面积;D. 根尖数。

Note: A. Root morphology; B. Total root length; C. Total surface area; D. Number of tips.

图2 夜间弱光补光对番茄根系构型的影响

Fig. 2 Effects of low-light supplemental light at night on morphological parameters of tomato root

2.3 夜间弱光补光促进番茄开花

夜间弱光补光处理3周后统计番茄苗开花情况,发现补光处理促进番茄开花。与CK相比,

SL15和SL30补光处理的开花株数和开花数分别显著增加了38.20%、40.45%和31.78%、33.18%(图3)。补光处理SL15和SL30之间的开花株数和开

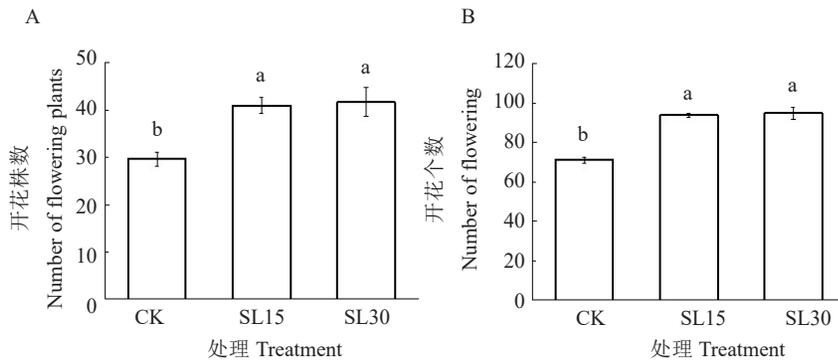


图3 夜间弱光补光对番茄开花的影响

Fig. 3 Effects of low-light supplemental light at night on flowering of tomato plants

花数没有显著差异。

2.4 夜间弱光补光促进番茄源库间蔗糖转运及相关基因的表达

与CK相比,SL15补光处理显著降低了番茄成熟叶片和茎的蔗糖含量,显著提高了果实和根中的蔗糖含量,而成熟叶片、茎、果实和根4个器官的总蔗糖含量在CK和SL15处理之间没有显著差异,说明夜间弱光补光处理促进番茄源库间蔗糖转运(图4-A)。进一步利用qRT-PCR分析番茄蔗糖转运基因在源库间不同器官中的表达量,结果表明,SL15补光处理植株的成熟叶片、茎和果实中*SUT1*表达量分别较CK显著提高了165%、132%和111%(图4-B);补光处理植株的成熟叶片、果实和根中*SUT4*表达量较CK分别显著提高了609%、67%和276%(图4-C);补光处理植株的成熟叶片、茎和根中*SWEET10b*表达量较CK分别显著提高了213%、48%和171%(图4-D);补光处理植株的成熟叶片和果实中*SWEET11b*表达量较CK分别显著提高了578%和126%(图4-E);补光处理植株的成熟叶片和根中*SWEET14*表达量较CK分别显著提高了457%和114%(图4-F)。以上结果表明,夜间弱光补光促进果实绿熟期番茄源库间蔗糖转运及相关基因的表达。

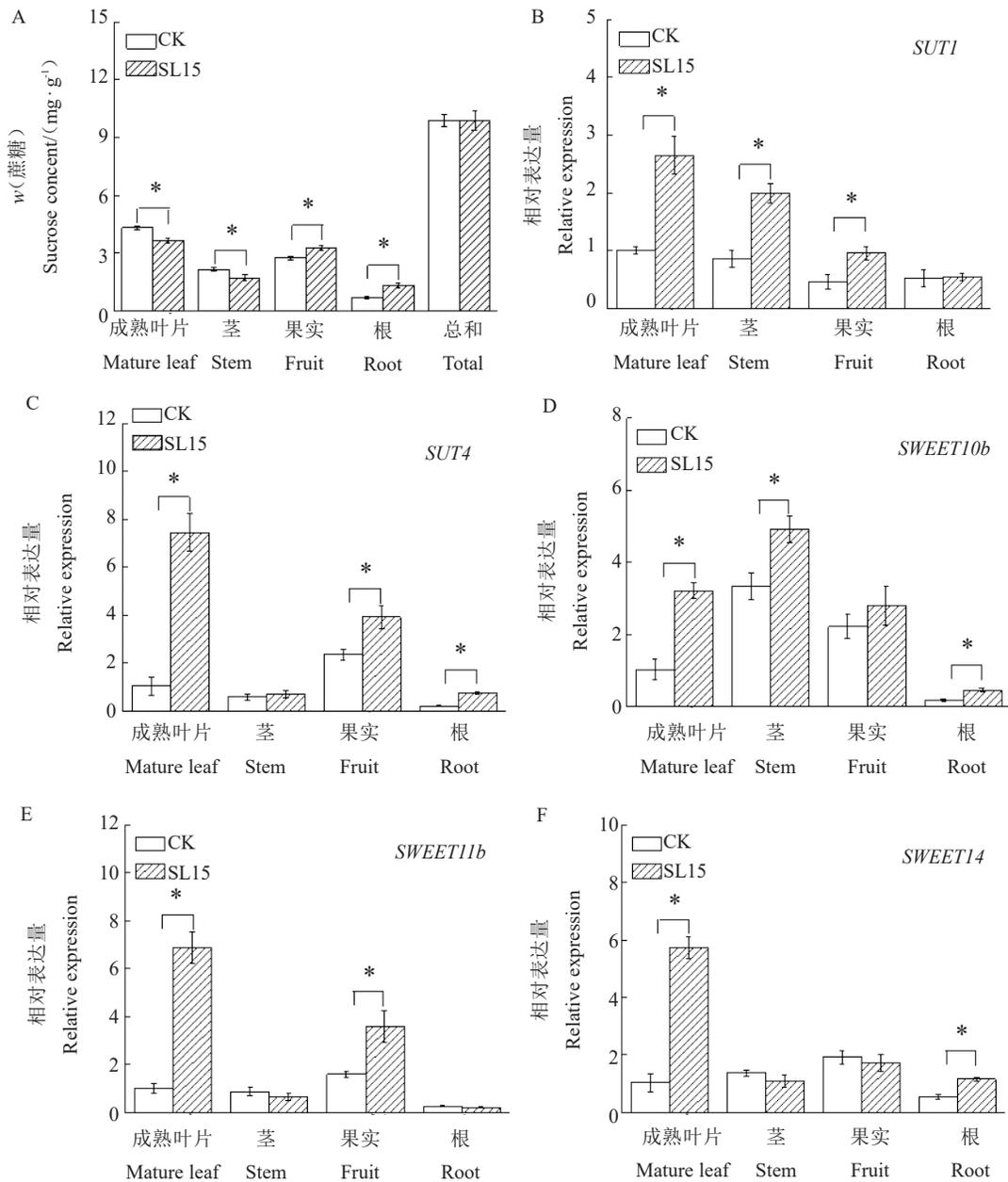
2.5 夜间弱光补光促进番茄内源脱落酸积累及合成和信号基因表达

与CK相比,夜间补光处理SL15显著提高了番茄成熟叶片、茎、果实和根的ABA含量(图5-A)。进一步利用qRT-PCR分析ABA合成标志基因*NCED1*、*AAO3*及信号标志基因*ABI5*在番茄

源库间不同器官中的表达量,结果表明,SL15补光处理植株的成熟叶片、果实和根中*NCED1*表达量分别较CK显著提高了106%、115%和128%(图5-B);补光处理植株的成熟叶片、茎和果实中*AAO3*表达量较CK分别显著提高了164%、96%和156%(图4-C);补光处理植株的成熟叶片、果实和根中*ABI5*表达量较CK分别显著提高了281%、95%和115%(图5-D)。以上结果表明,夜间弱光补光促进果实绿熟期番茄源库间ABA积累及其合成和信号相关基因的表达。

3 讨论与结论

采用高光强补光导致设施园艺生产成本提高的问题限制补光技术的应用和推广。于鹏澎等^[8]指出番茄育苗过程中的用电消耗量占整个育苗成本的80%左右。因此,如何降低设施补光的能耗是当前研究的重点。番茄的光补偿点在 $35 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上^[21-22],笔者在本研究中针对目前补光能耗较高的问题,发现与夜间不补光相比,夜间进行15和 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 低于光补偿点的两种补光处理,均显著促进番茄植株生长,改善根系构型,促进开花,而两种补光处理的相关生理指标没有显著差异。有趣的是,与笔者的研究类似,Yu等^[23]在番茄夜间补光试验中使用的光照度也为 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,该光照度被证明不能为番茄的光合作用提供足够的能量。值得注意的是,研究还指出夜间补充 $30 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 光照可以显著提高番茄白天的光合速率、产量和品质。此外,李海云等^[24]研究表明,夜间采用 $1.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱光补光能显著促进黄



注:*代表差异显著性($p < 0.05$)。下同。

Note: * indicates significant difference at $p < 0.05$. The same below.

图4 夜间弱光补光对番茄源库间蔗糖转运及相关基因表达的影响

Fig. 4 Effects of low-light supplemental light at night on sucrose transport and related gene expression between sources and sinks of tomato plants

瓜幼苗生长,但需要的补光时间较长,与不补光的对照相比,9~12 h 补光处理的株高、茎粗、干质量才达到显著差异。因此,夜间弱光补光可能通过光信号的形式促进作物生长,导致本研究中 15 和 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 低于光补偿点的两种补光处理对番茄生长指标的促进效果没有显著差异。

根系在固定植物、吸收水分和养分方面发挥重要作用^[25]。植物的根系构型是指根系在空间上的分布结构以及侧根的数量和长度等^[26]。杨俊刚等^[27]提

出了番茄的理想根系构型为主根深入、表层密集。本研究结果表明,夜间弱光补光显著改善了番茄根系构型,提高了番茄幼苗根系的总根长、总表面积和根尖数,可见夜间弱光补光有助于番茄构建理想的根系构型。文莲莲等^[3]研究表明,补光处理较不补光对照显著促进根系发育,根系构型参数随补光时间的延长显著提高,以补光 4 h 效果最显著。韩文等^[28]研究表明,采用 8 h 延长早晚补光时长、打破黑暗的非连续补光方式明显改善日光温室番茄根

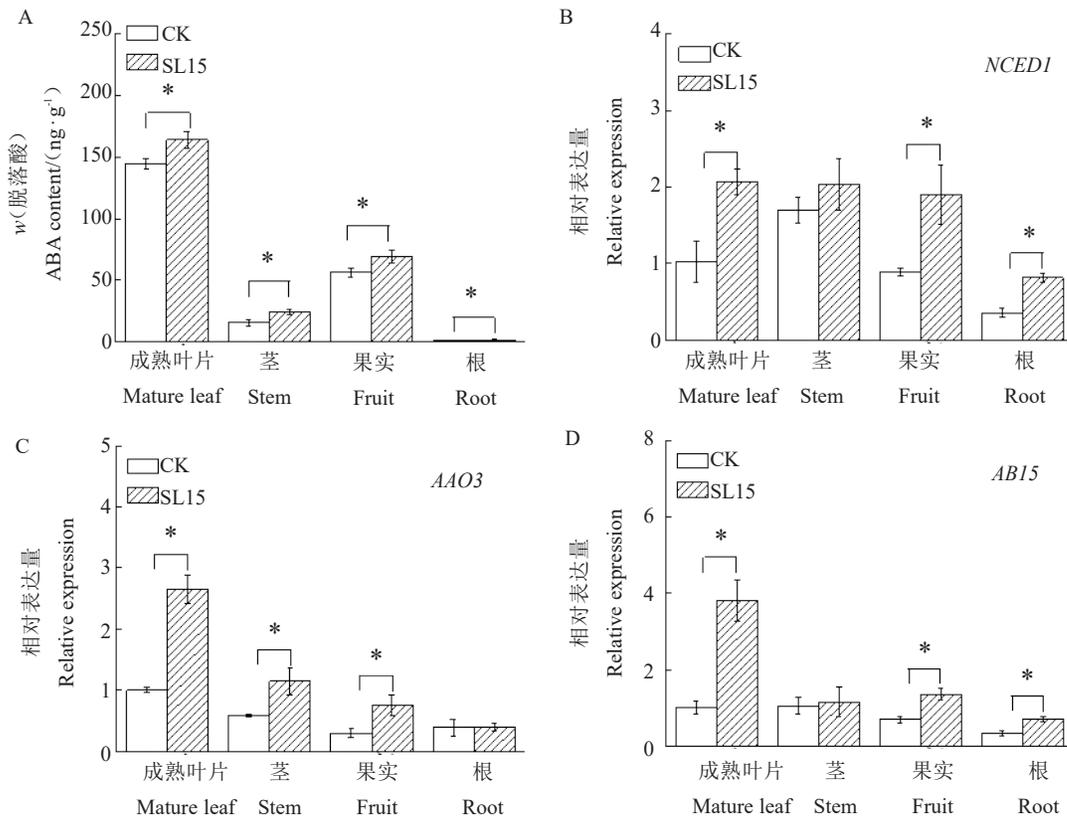


图 5 夜间弱光补光对番茄源库间 ABA 累积及合成和信号基因表达的影响

Fig. 5 Effects of low-light supplemental light at night on abscisic acid accumulation, synthesis and signaling gene expression between sources and sinks of tomato plants

系构型。以上研究与本研究结论一致,但两项研究均未提及所用的补光光照度。因此,本研究为利用弱光补光促进工厂化育苗中培育健壮根系提供了新思路。

蔗糖是高等植物中光合同化物最主要的转运形式,在作物生长发育、产量和品质形成中发挥重要作用。鉴于本研究中 15 和 30 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 低于光补偿点的两种补光处理之间,番茄生长指标没有显著差异,从光信号和节约成本两个角度出发,笔者选择了 15 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照度用于研究夜间弱光补光处理对番茄源库间蔗糖转运的影响。研究初步明确了夜间弱光补光促进番茄源库间蔗糖转运,但不影响源库间各器官蔗糖的总量,说明采用低于光补偿点的弱光补光可能是通过光信号而非光合作用的形式促进蔗糖从源器官转出和库器官蔗糖的积累。虽然本研究中蔗糖转运基因的表达趋势与蔗糖积累趋势一致,但尚缺乏对夜间补光过程中蔗糖代谢相关酶和基因表达变化的研究。在未来的研究中,将建构蔗糖转运基因的沉默和过表达载体,获得稳定的遗传材料,解析弱光补光促进番茄

源库间蔗糖转运的作用机制。

ABA 影响多种作物源库之间的蔗糖转运。Kobashi 等^[29]研究表明,喷施外源 ABA 促进了桃果实中糖的积累。ABA 能够通过促进叶片光合产物积累,增大韧皮部面积和诱导糖转运基因表达,调控光合产物在葡萄不同器官之间的分配^[30]。Chen 等^[31]研究表明,干旱胁迫下模式植物拟南芥以 ABA 依赖的方式增强了蔗糖的长距离运输能力。最近的研究发现,红光通过光信号转录因子 HY5、PIFs 参与红光信号调控佛手果实 ABA 的积累^[32]。本研究发现,夜间弱光补光显著促进番茄源库间 4 个器官中 ABA 的积累,诱导了 ABA 合成和信号基因在不同器官的上调表达,可见弱光补光能够激活番茄 ABA 信号。然而夜间弱光补光是否依赖 ABA 调控番茄源库间蔗糖转运还需要进一步研究。

综上所述,夜间采用低于光补偿点的弱光补光能够促进番茄幼苗生长和源库间蔗糖转运,为在工厂化育苗和设施栽培中利用夜间低能耗 LED 补光手段实现培育蔬菜壮苗、提高产量和品质提供了理论依据,并对有效突破目前生产上设施补光耗能

大、成本高、难以大面积推广应用的技术瓶颈具有一定意义。

参考文献

- [1] KATHARE P K, HUQ E. Light-regulated pre-mRNA splicing in plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2021, 63: 102037.
- [2] 王跃荣, 陈鹏宇, 王殿发, 等. 补光技术在蔬菜生产中的应用研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(7): 1-7.
- [3] 文莲莲, 李岩, 张聘丘, 等. 冬季温室补光时长对番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢的影响[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(9): 1490-1498.
- [4] 齐振宇, 王婷, 桑康琪, 等. 设施番茄不同叶位补光对植株形态、光合及激素合成的影响[J]. *园艺学报*, 2021, 48(8): 1504-1516.
- [5] 王冰华, 孙凤清, 李娟起, 等. 不同时段补光对日光温室冬春茬黄瓜幼苗质量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2017(12): 23-29.
- [6] 刘志强, 朱新红, 刘勇鹏, 等. 夜间不同 LED 补光时段对番茄幼苗生长生理指标的影响[J]. *中国瓜菜*, 2022, 35(8): 79-85.
- [7] 王舒亚, 吕剑, 郁继华, 等. 不同补光时长对日光温室番茄生长、产量及品质的影响[J]. *中国蔬菜*, 2018(10): 35-39.
- [8] 于鹏澎, 宋金修, 蔡玮, 等. 夜间 LED 补光光照度和补光时间对番茄种苗质量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(9): 1917-1926.
- [9] 杨小玲, 宋兰芳, 靳力争, 等. 设施果菜补光技术应用现状与展望[J]. *北方园艺*, 2018(17): 166-170.
- [10] APPOLLONI E, ORSINI F, PENNISI G, et al. Supplemental LED lighting effectively enhances the yield and quality of greenhouse truss tomato production: Results of a meta-analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 596927.
- [11] 陈庆超, 赵杨. 植物光合产物源库流调控及其对干旱的响应[J]. *山西农业科学*, 2021, 49(12): 1367-1375.
- [12] 王洁, 蔡昱萌, 张楠等. 植物蔗糖转运蛋白表达的调控因素与分子机制[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(3): 115-124.
- [13] LI J, WU L M, FOSTER R, et al. Molecular regulation of sucrose catabolism and sugar transport for development, defence and phloem function[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2017, 59(5): 322-335.
- [14] 耿艳秋, 董肖昌, 张春梅. 园艺作物糖转运蛋白研究进展[J]. *园艺学报*, 2021, 48(4): 676-688.
- [15] FENG C Y, HAN J X, HAN X X, et al. Genome-wide identification, phylogeny, and expression analysis of the *SWEET* gene family in tomato[J]. *Gene*, 2015, 573(2): 261-272.
- [16] HACKEL A, SCHAUER N, CARRARI F, et al. Sucrose transporter LeSUT1 and LeSUT2 inhibition affects tomato fruit development in different ways[J]. *Plant Journal*, 2006, 45: 180-192.
- [17] WEISE A, BARKER L, KUHN C, et al. A new subfamily of sucrose transporters, SUT4, with low affinity/high capacity localized in enucleate sieve elements of plants[J]. *Plant Cell*, 2000, 12(8): 1345-1355.
- [18] 朱雨晴, 薛晓萍. 遮阴及复光对花果期番茄叶片光合特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2019, 40(2): 126-134.
- [19] CHEN H T, SHI Y, AN L, et al. Overexpression of *SIWRKY6* enhances drought tolerance by strengthening antioxidant defense and stomatal closure via ABA signaling in *Solanum lycopersicum* L.[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 213: 108855.
- [20] LIVAK K J, SCHMITTGEN T D. Analysis of relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the $2^{-\Delta\Delta CT}$ method[J]. *Methods*, 2001, 25(4): 402-408.
- [21] TUBEROSA R, GIULIANI S, PARRY M A J, et al. Improving water use efficiency in Mediterranean agriculture: What limits the adoption of new technologies?[J]. *Annals of Applied Biology*, 2007, 150(2): 157-162.
- [22] 李玉巧. 加工番茄光合特性的研究[D]. 新疆石河子: 石河子大学, 2007.
- [23] YU H J, LIU P, XU J C, et al. The effects of different durations of night-time supplementary lighting on the growth, yield, quality and economic returns of tomato[J]. *Plants*, 2024, 13(11): 1516.
- [24] 李海云, 刘焕红. 夜间补光对黄瓜幼苗激素含量及养分吸收的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(16): 74-78.
- [25] GLANZ- IDAN N, TARKOWSKI P, TURECKOVA V, et al. Root-shoot communication in tomato plants: Cytokinin as a signal molecule modulating leaf photosynthetic activity[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(1): 247-257.
- [26] 毛齐正, 杨喜田, 苗蕾. 植物根系构型的生态功能及其影响因素[J]. *河南科学*, 2008, 26(2): 172-176.
- [27] 杨俊刚, 廖上强, 孙焱鑫, 等. 番茄根系对控释氮素的响应及其理想构型[J]. *中国蔬菜*, 2017(10): 23-31.
- [28] 韩文, 郭鹏飞, 张坤, 等. 夜间延时补光调控对番茄幼苗生长及根系构型的影响[J]. *园艺与种苗*, 2018, 38(2): 7-11.
- [29] KOBASHI K, SUGAYA S, GEMMA H, et al. Effect of abscisic acid (ABA) on sugar accumulation in the flesh tissue of peach fruit at the start of the maturation stage[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 35(3): 215-223.
- [30] MURCIA G, PONTIN M, REINOSO H, et al. ABA and GA₃ increase carbon allocation in different organs of grapevine plants by inducing accumulation of non- structural carbohydrates in leaves, enhancement of phloem area and expression of sugar transporters[J]. *Physiologia Plantarum*, 2016, 156(3): 323-337.
- [31] CHEN Q C, HU T, LI X H, et al. Phosphorylation of SWEET sucrose transporters regulates plant root: Shoot ratio under drought[J]. *Nature Plants*, 2022, 8(1): 68-77.
- [32] 徐燕娜. 红蓝光质对采后番茄、柑橘果实着色影响及红光调控柑橘果实 ABA 积累的机制探究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024.