

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

文莲莲¹, 李岩^{1,2,3,4,*}, 张聃丘¹, 黄世杰¹, 秦利杰¹, 宋甲斌⁵, 韩吉书⁵, 魏珉^{1,2,3,4,*}

¹山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安271018

²山东农业大学农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站, 山东泰安271018

³山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东泰安271018

⁴山东农业大学山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 山东泰安271018

⁵山东省蔬菜工厂化育苗示范工程技术研究中心, 济南251400

摘要: 采用LED(发光二极管)光源, 将红蓝白组合光应用于冬季日光温室进行番茄苗期补光试验。分别在早上揭开保温被(8:30)前和下午盖保温被(16:30)后进行补光, 每日补光时数分别为1、2、3和4 h, 以自然光照为对照(CK), 研究温室番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢对不同补光时长的响应。结果表明, 与自然光照相比, 早晚补光显著增加了植株茎粗、叶面积、干鲜重, 提高了根冠比、壮苗指数、根系构型参数和根系活力, 改善了光系统II性能, 且显著提高蔗糖合成酶(SS)和蔗糖磷酸合成酶(SPS)活性, 促进淀粉积累, 均以每日补光4 h效果较好, 但随补光时间的延长, 总糖、还原糖和蔗糖呈逐渐降低趋势。综上, 冬季温室番茄育苗补光4 h红蓝白组合光能够通过改善光系统II性能, 提高幼苗光合效率, 进而促进植株生物量的积累, 有利于壮苗培育。

关键词: LED; 补光; 壮苗指数; 光合; 碳代谢

光是影响植物生理生化过程的重要因素之一。番茄作为设施主栽作物之一, 冬季受天气等因素的影响, 设施内光照强度和光照时间严重不足, 易造成幼苗徒长, 植株生长较弱(刘再亮等2004)。人工补光是改善冬季设施内光照条件最有效的办法。有研究表明, 通过人工补光延长光照时间可明显提高番茄的光合特性及生长速率, 促进光合产物积累, 进而提高果实品质(花妍等2008)。

目前, 我国设施补光技术应用的研究尚处于初级阶段, 对补光的实用性和系统性尤其是光质对作物理化性状的影响和补光时长的合理性方面还缺乏深入了解。因此, 光质的组合效应和补光时长是值得进一步探索的问题。为此, 本试验将实验室前期已筛选出的红蓝白组合光(红:蓝:白=3:1:1)应用于日光温室番茄育苗中, 研究不同补光时长对番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢的影响, 以期优化温室番茄育苗补光技术提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于2017年12月~2018年2月在山东农业大学园艺实验站日光温室内进行, 供试番茄(*Solanum lycopersicum* Mill.)品种‘SV0313TG’ (Seminis Vegetable Seeds公司, 美国)。

1.2 试验设计

经温汤浸种、催芽后的番茄种子播于80孔育

苗盘中(草炭:蛭石=2:1), 隔天浇灌1/2剂量山崎番茄专用配方营养液, 待幼苗2片子叶展平时进行补光时长处理。补光时间为早上揭开保温被(8:30)之前和下午覆盖保温被(16:30)之后, 由时间继电器控制每日补光时长分别为1、2、3和4 h, 以自然光照时长为对照(CK)。LED光源光质组合为红蓝白组合光(红:蓝:白=3:1:1, 3R1B1W), 购自深圳纯英达业集团有限公司, 补光期间日光温室内温光条件如图1, 具体补光光谱及处理时间如图2和表1所示, 每2 d用1剂量山崎番茄专用配方营养液浇灌, 幼苗长至四叶一心时结束。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 地上部生长指标测定

幼苗四叶一心期, 统计分析幼苗株高、茎粗、叶面积及全株干鲜重。株高用直尺从植株子叶处到新叶最高点处测量, 茎粗采用游标卡尺测量子叶下1 cm处, 全株叶面积采用CI-202便携式激光叶面积仪(CID Bio-science公司, 美国)测定。将不同处理的番茄幼苗从钵中取出, 先用流水冲洗干

收稿 2018-06-01 修定 2018-08-16

资助 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-23-C04)、国家自然科学基金(31401921)、山东省自然科学基金(ZR2014-CQ029)、国家科技支撑计划(2014BAD05B03)、国家重点研发计划(2016YFB0302403)和山东农业大学‘双一流’科技创新团队设施园艺优势团队专项(SYL2017YSTD07)。

* 共同通讯作者: 李岩(edmonlee@163.com)、魏珉(minwei@sdau.edu.cn)。

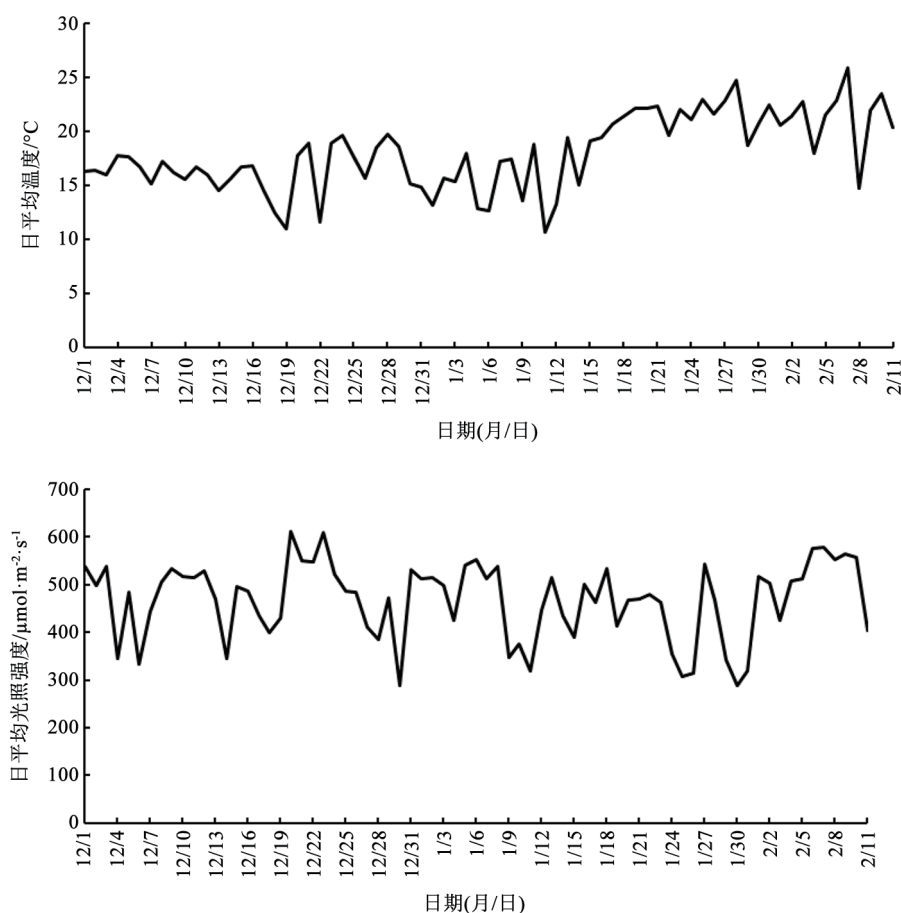


图1 日光温室日平均气温和光照强度变化

Fig.1 Changes of daily average air temperature and light intensity in solar greenhouse

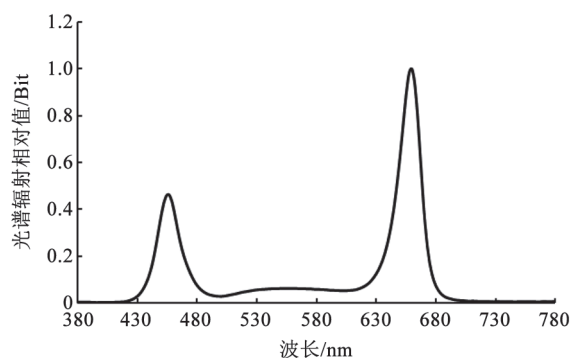


图2 光质的光谱图

Fig.2 Spectrum figures of light qualities

净, 吸水纸吸干, 测定单株鲜重, 并在烘箱中105°C杀青30 min, 75°C烘至恒重, 称量干重, 壮苗指数=茎粗/株高×全株干重(张振贤和程智慧2008)。

1.3.2 根系生长发育的测定

采用WinRHIZO软件及根系扫描仪(Regent公

司, 加拿大)进行根系构型参数的分析, 测定其总根长、总表面积、体积及根尖数等根系生长特性。将一部分根系取出洗净吸干表面水分, 称取0.5 cm长根尖部分0.5 g, 采用氯化三苯基四氮唑(2,3,5-triphenyltetrazoliumchloride, TTC)法测定根系活力(赵世杰等2002)。

1.3.3 叶片光合特性的测定

以下指标测定均选自第3片完全伸展真叶。

叶片色素含量的测定: 参考邹琦(1995)的方法测定叶片光合色素(叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素), 并计算叶绿素a+b和a/b值。

荧光参数的测定: 测定开始前, 各处理选取长势一致、受光均匀的5株幼苗的相同部位, 叶片首先经过30 min的充分暗适应, 采用FMS-2型便携式脉冲调制式叶绿素荧光仪(Hansatech公司, 英国)测定叶绿素荧光参数: 可变荧光(F_v)、最大荧光(F_m)、

表1 补光时长处理

Table 1 Supplemental light duration treatment

处理	补光时长/h	补光时段/h	总光照时长/h
CK	0	—	8 (8:30~16:30)
T1	1	8:00~8:30和16:30~17:00	9 (8:00~17:00)
T2	2	7:30~8:30和16:30~17:30	10 (7:30~17:30)
T3	3	7:00~8:30和16:30~18:00	11 (7:00~18:00)
T4	4	6:30~8:30和16:30~18:30	12 (6:30~18:30)

暗适应30 min下PSII最大光化学效率(F_v/F_m)、光适应条件下的最大量子产额(F_v'/F_m')、PSII实际光化学效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭系数(q_p)、非光化学淬灭系数(NPQ)、光合电子传递效率(ETR)。

叶绿素荧光诱导动力学曲线(OJIP)的测定: 参考Zhang等(2012)的方法, 采用Handy-PEA植物效率分析仪测量系统(Hansatech公司, 英国)提供的自动程序(连续激发式荧光)进行测量。番茄叶片经过45 min的充分暗适应后, 用3 000 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 脉冲红光诱导, 荧光信号从10 μs 开始记录, 至1 s时结束, 初始记录速度为每秒钟10万次。根据Öz等(2014)的方法, 将OJIP曲线进行O-P段和O点标准化。

1.3.4 碳代谢产物及相关酶活性的测定

总糖和淀粉: 参照高俊凤(2006)的方法稍加改动, 蒽酮试剂显色法测定两者的含量(Hu等2009)。

还原糖: 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原糖含量(薛应龙等1985)。

蔗糖: 依照张志良和瞿伟菁(2003)的方法稍加改动, 间苯二酚比色法测定蔗糖含量。

粗酶液的提取制备: 称取0.5 g去掉主叶脉的番茄幼苗叶片, 置于预冷的研钵中, 加缓冲液4 mL, 冰浴研磨, 转移至离心管中, 13 000 \times g冰冻离心30 min, 取上清液待测。所有操作均在4 $^{\circ}\text{C}$ 下进行(张志良和瞿伟菁2003)。

蔗糖合成酶(sucrose synthase, SS): 100 μL 提取液与0.15 mL反应液于30 $^{\circ}\text{C}$ 下水浴10 min后, 加入2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的NaOH 0.05 mL, 沸水浴10 min, 流水冷却, 再加入1.5 mL浓HCl和0.5 mL 0.1%间苯二酚摇匀, 于80 $^{\circ}\text{C}$ 水浴10 min, 在480 nm下测定OD值。

蔗糖磷酸合成酶(sucrose phosphate synthase, SPS): 在蔗糖合成酶的反应液中, 将10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的果糖-6-磷酸换作10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的果糖, 测定方法同蔗糖合成酶。

1.4 数据处理

采用DPS V14.10软件进行数据统计分析、相关性分析和差异显著性检验($P<0.05$)。用Microsoft Excel 2010和Sigmaplot 10.0软件进行数据统计和作图。

2 实验结果

2.1 不同补光时长对番茄幼苗生长的影响

由表2可知, 不同补光时长对番茄幼苗生长具有显著影响, 且不同生长指标基本随补光时间的延长呈显著增加的趋势。T4处理下株高、茎粗、叶面积及全株鲜重分别较CK提高57.44%、51.40%、71.53%和56.47%, 均显著高于CK及其他处理; T4处理下全株干重和壮苗指数较CK分别提高167%和157%, 显著高于CK, T1、T2和T3间则无显著差异, 但仍显著高于CK。

表2 不同补光时长对番茄幼苗形态的影响

Table 2 Effects of different supplemental light duration on morphology of tomato seedlings

处理	株高/cm	茎粗/mm	叶面积/ cm^2	全株鲜重/g	全株干重/g	壮苗指数
CK	9.00 \pm 0.00 ^e	1.07 \pm 0.06 ^d	31.12 \pm 0.07 ^d	1.70 \pm 0.01 ^e	0.12 \pm 0.01 ^c	0.014 \pm 0.001 ^c
T1	11.00 \pm 0.00 ^d	1.29 \pm 0.07 ^c	45.98 \pm 0.75 ^c	2.00 \pm 0.05 ^d	0.20 \pm 0.01 ^b	0.023 \pm 0.000 ^b
T2	12.83 \pm 0.29 ^c	1.38 \pm 0.01 ^b	46.06 \pm 2.51 ^c	2.21 \pm 0.01 ^c	0.21 \pm 0.01 ^b	0.022 \pm 0.002 ^b
T3	13.50 \pm 0.50 ^b	1.39 \pm 0.01 ^b	49.53 \pm 0.03 ^b	2.56 \pm 0.08 ^b	0.22 \pm 0.01 ^b	0.023 \pm 0.001 ^b
T4	14.17 \pm 0.29 ^a	1.62 \pm 0.03 ^a	53.38 \pm 0.78 ^a	2.66 \pm 0.02 ^a	0.32 \pm 0.01 ^a	0.036 \pm 0.001 ^a

同列不同字母表示差异达显著($P<0.05$), 下同。

2.2 不同补光时长对番茄幼苗根系生长发育的影响

由表3可知, 不同补光时长可显著影响番茄幼苗根系构型参数, 且随着补光时间的延长, 根系总根长、表面积、总体积及根尖数均显著增加, 补光处理各项指标均显著高于CK, 以T4处理最高。幼苗根系活力的变化趋势与根系构型参数一致(图3), 且T4处理根系活力较CK升高142%。

2.3 不同补光时长对番茄幼苗光合特性的影响

2.3.1 光合色素

由表4可知, 叶绿素 a 、叶绿素 b 、叶绿素 $a+b$ 和类胡萝卜素含量均以T4和T3处理最高, 且两者之间无显著差异, 均明显高于CK, T2次之, CK最低, 但与T1无显著差异。叶绿素 a/b 含量以CK最高, T1、T2、T3次之, 但三者无显著差异, T4处理最低。

2.3.2 荧光参数

不同补光时长可显著影响番茄幼苗叶绿素荧光参数(表5)。T4处理下 F_v'/F_m' 、 Φ_{PSII} 、 q_p 、ETR均

显著高于CK及其他处理; NPQ则以CK最高, T4处理最低, 显著低于CK; F_v/F_m 各处理间无显著差异。

2.3.3 荧光诱导动力学曲线

从标准化的OJIP曲线(图4)中可明显看出, 各处理下生长的幼苗在O点处差异不显著, 说明在O点处作用中心活性状态无差异; 在J点和I点处, T4处理均低于CK, 尤其在J点显著低于CK及其他处理; P点处各处理间则无显著差异。

从表6中可知, 叶片单位反应中心吸收(ABS/RC)、捕获(TR_0/RC)、用于电子传递(ET_0/RC)的能量均随着补光时间的延长逐渐增加, 热耗散(DI_0/RC)能量则逐渐降低。T4下的番茄幼苗 ABS/RC 、 TR_0/RC 及 ET_0/RC 均最高, 显著高于CK和其他处理; DI_0/RC 则以CK处理最高, 显著高于各处理, T4处理最低。叶片单位面积吸收的光能(ABS/CS_0)、捕获的光能(TR_0/CS_0)、单位面积内反应中心数目(RC/CS_0)、传递的光能(ET_0/CS_0)基本随补光时长的增加逐渐升高, 且以T4处理下最高, 显著高于CK, 以

表3 不同补光时长对番茄幼苗根系构型参数的影响

Table 3 Effects of different supplemental light duration on the configuration parameters of root in tomato seedlings

处理	总根长/cm	根表面积/cm ²	总体积/cm ³	根尖数
CK	182.81±8.35 ^e	25.84±2.00 ^e	0.97±0.06 ^e	613.67±15.95 ^d
T1	241.83±12.78 ^d	44.12±3.82 ^d	1.44±0.03 ^d	761.33±20.98 ^c
T2	329.88±19.35 ^c	60.51±7.23 ^c	1.84±0.13 ^c	836.67±15.70 ^b
T3	410.48±13.45 ^b	73.35±4.80 ^b	2.23±0.02 ^b	856.67±10.97 ^b
T4	472.48±20.17 ^a	86.22±11.23 ^a	2.66±0.02 ^a	1 010.67±20.43 ^a

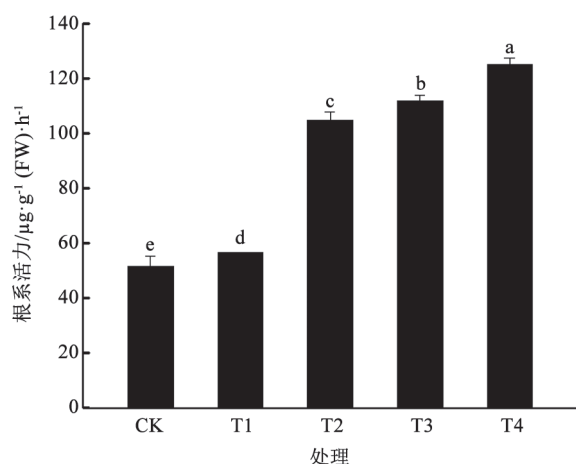


图3 不同补光时长对番茄幼苗根系活力的影响

Fig.3 Effects of different supplemental light duration on root activity of tomato seedlings

CK和T1较低, 两者无显著差异; T2、T3、T4下单位面积的热耗散(DI_0/CS_0)显著低于CK和T1, 且三者之间无显著差异, CK最高。

2.4 不同补光时长对番茄幼苗碳代谢及相关酶活性的影响

由表7可知随着补光时间的延长, 淀粉随补光时长延长而增加, 以T4处理最高, 显著高于CK; 总糖、还原糖和蔗糖则基本呈逐渐降低趋势, 其中总糖和还原糖含量以CK最高, 显著高于其他处理, 而蔗糖含量以T2最高, 但与CK和T1无显著差异, T4最低。

不同补光时长对番茄幼苗SPS和SS活性具有显著影响(图5), 与CK相比, 补光处理下SPS和SS活性均显著高于CK, SPS活性以T2、T3和T4处理较

表4 不同补光时长对番茄幼苗色素含量的影响

Table 4 Effects of different supplemental light duration on chlorophyll content of tomato seedlings

处理	叶绿素a/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素b/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素(a+b)/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素(a/b)/mg·g ⁻¹ (FW)	类胡萝卜素/mg·g ⁻¹ (FW)
CK	0.666±0.004 ^b	0.164±0.004 ^c	0.830±0.003 ^b	4.073±0.110 ^a	0.176±0.003 ^c
T1	0.670±0.058 ^b	0.182±0.020 ^c	0.851±0.078 ^b	3.697±0.097 ^b	0.167±0.010 ^c
T2	0.827±0.032 ^a	0.220±0.012 ^b	1.047±0.044 ^a	3.756±0.060 ^b	0.211±0.003 ^b
T3	0.833±0.002 ^a	0.230±0.003 ^{ab}	1.063±0.003 ^a	3.623±0.043 ^b	0.223±0.005 ^a
T4	0.868±0.003 ^a	0.252±0.003 ^a	1.120±0.006 ^a	3.446±0.027 ^c	0.224±0.003 ^a

表5 不同补光时长对番茄幼苗叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effects of different supplemental light duration on chlorophyll fluorescence parameters of tomato seedlings

处理	F_v/F_m	F_v'/F_m'	Φ_{PSII}	q_p	NPQ	ETR
CK	0.73±0.01 ^a	0.75±0.00 ^b	0.63±0.05 ^c	0.85±0.01 ^c	0.67±0.06 ^a	1.06±0.04 ^c
T1	0.70±0.01 ^a	0.74±0.00 ^{bc}	0.69±0.00 ^{ab}	0.87±0.01 ^b	0.34±0.01 ^b	1.89±0.06 ^d
T2	0.72±0.02 ^a	0.75±0.01 ^b	0.68±0.02 ^{abc}	0.86±0.01 ^{bc}	0.42±0.01 ^b	2.54±0.12 ^c
T3	0.72±0.01 ^a	0.74±0.00 ^c	0.65±0.01 ^{bc}	0.85±0.00 ^c	0.31±0.03 ^b	3.13±0.03 ^b
T4	0.73±0.01 ^a	0.77±0.00 ^a	0.72±0.02 ^a	0.89±0.00 ^a	0.22±0.03 ^c	5.27±0.04 ^a

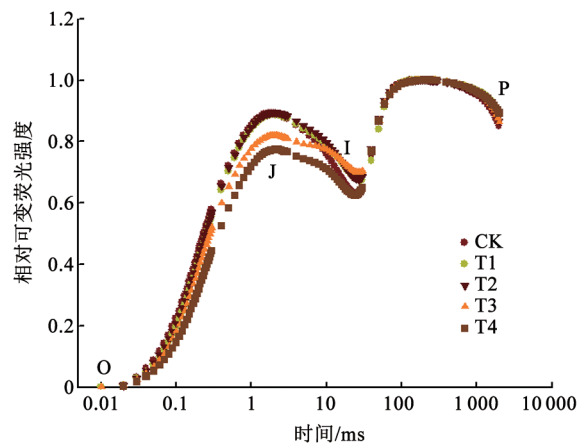


图4 不同补光时长对番茄幼苗光系统II (PSII)相对可变荧光强度的影响

Fig.4 Effects of different supplemental light duration on the relative variable fluorescence intensity of photosystemII (PSII) from tomato seedlings

高,但三者无显著差异, T1处理次之; SS活性以T4最高,显著高于CK和其他处理, T2和T3次之,但两者无显著差异。

3 讨论

日光温室冬季存在光照时间和光照强度严重不足的现象。光照不足会影响作物的光合作用,导致作物生长不良,进而影响产量和品质。研究

发现,适当延长光照时间能有效促进黄瓜幼苗的生长和干物质积累(崔瑾等2009)。申宝营(2014)发现在夜间(19:00~23:00)延时补照红蓝光(80%R:20%B) 4 h可显著提高黄瓜幼苗综合质量,这可能与夜间呼吸释放的CO₂在光照处理过程中再同化回收有关,也可能与补光光质调控植株的物质代谢有关。而在本试验中,冬季温室番茄育苗时,在上午揭开保温被前和下午覆盖保温被后各补2 h红蓝白组合光(3R1B1W)可显著提高番茄幼苗株高、茎粗、叶面积、全株干鲜重,这与陈颐等(2012)和王冰华等(2017)的研究结果相似,这也体现了不同蔬菜种类对不同补光时段及不同光质的响应存在差异。壮苗指数是评价幼苗质量的重要指标之一,本试验中补光处理显著提高幼苗的壮苗指数,且以补光4 h下壮苗指数最大,说明在一定范围内,补光时间越长,越有利于培育番茄壮苗。

光通过影响作物的光合作用及光合产物的合成与转运而影响根系的生长发育和功能。本试验发现,补光处理较CK显著促进根系发育,根系活力明显增强,且根系构型参数和活力均随补光时间的延长显著提高,以补光4 h效果最显著,这与前人在油菜(Li等2013)和黄瓜(闫晓花2016)上的研究结果类似。说明该处理有利于番茄幼苗根系的发育和壮苗指数的提高,可能与补光时长显著改变番茄幼苗根、茎、叶中玉米素(ZT)及茎中生长素

表6 不同补光时长对番茄幼苗叶片单位反应中心和单位面积光能利用效率的影响

Table 6 Effects of different supplemental light duration on light use efficiency for per reaction center and per unit area of tomato seedling leaves

处理	ABS/RC	TR_0/RC	ET_0/RC	DI_0/RC	ABS/CS_0	TR_0/CS_0	RC/CS_0	ET_0/CS_0	DI_0/CS_0
CK	2.94±0.17 ^c	2.09±0.01 ^b	0.23±0.00 ^d	1.03±0.05 ^a	565.00±23.64 ^e	394.98±5.55 ^c	391.65±6.91 ^c	47.24±5.75 ^c	210.84±7.46 ^a
T1	2.96±0.02 ^c	2.09±0.01 ^b	0.33±0.01 ^c	0.77±0.02 ^b	592.33±7.64 ^c	401.17±12.13 ^c	407.84±4.31 ^b	46.36±4.18 ^c	193.34±10.42 ^b
T2	3.30±0.11 ^b	2.05±0.04 ^b	0.31±0.01 ^c	0.76±0.04 ^b	651.00±1.73 ^b	444.82±16.46 ^b	438.15±5.35 ^a	68.05±5.99 ^b	154.34±7.33 ^c
T3	3.46±0.17 ^{ab}	2.10±0.08 ^{ab}	0.44±0.02 ^b	0.76±0.03 ^b	655.67±47.35 ^b	451.46±6.59 ^{ab}	435.44±7.91 ^a	94.67±5.31 ^a	142.16±7.15 ^c
T4	3.60±0.10 ^a	2.18±0.02 ^a	0.51±0.01 ^a	0.69±0.00 ^c	728.33±6.35 ^a	472.09±2.97 ^a	446.08±2.38 ^a	94.68±6.37 ^a	139.39±6.16 ^c

表7 不同补光时长对番茄幼苗叶片糖含量的影响

Table 7 Effects of different supplemental light duration on sugar content in leaves of tomato seedlings

处理	总糖/mg·g ⁻¹ (DW)	还原糖/mg·g ⁻¹ (DW)	蔗糖/mg·g ⁻¹ (DW)	淀粉/mg·g ⁻¹ (DW)
CK	122.22±3.88 ^a	49.78±1.56 ^a	15.99±0.77 ^a	14.72±0.24 ^e
T1	110.00±1.57 ^b	47.13±1.42 ^b	16.35±0.97 ^a	19.72±0.64 ^d
T2	88.13±2.66 ^c	43.15±1.02 ^c	16.63±0.33 ^a	36.11±1.46 ^c
T3	85.76±0.87 ^c	40.79±1.28 ^{cd}	13.99±0.77 ^b	58.47±3.07 ^b
T4	74.38±1.67 ^d	38.80±2.06 ^d	13.30±0.26 ^b	74.86±1.92 ^a

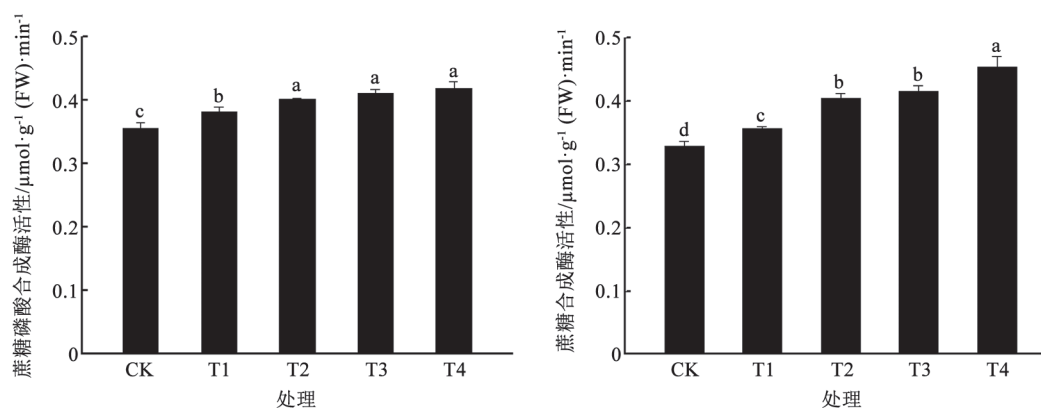


图5 不同补光时长对番茄幼苗叶片蔗糖磷酸合成酶(A)与蔗糖合成酶(B)活性的影响

Fig.5 Effects of different supplemental light duration on activities of SPS (A) and SS (B) in leaves of tomato seedlings

(IAA)和赤霉素(GA)含量有关,也可能与补光处理下光谱比例与植物光合作用所需光谱比例相吻合有关。随着补光时间的延长,补光处理下植株通过光合作用加速地上部生长,其同化产物的积累量增加进而促进地下部生长,从而提高根系吸收水分和矿质养分的能力,对促进番茄幼苗生长具有积极作用,且为番茄苗期的营养生长和生殖生长奠定了良好基础。

光合色素含量的提高,有利于植株光合效率的提高进而促进干物质积累,而长期光照不足会影响光合色素的合成(华劲松等2009),从而限制光

合碳同化,不利于植物生长及同化产物的积累。因此光照较弱时,适当补光可以促进光合色素的合成。本研究表明,冬季番茄育苗过程中早晚适当延长光照时间,可有效提高幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量,这与王惠哲等(2006)的研究结果相似,说明补光时长与光质对番茄幼苗生长存在显著的互作效应,可能与补照红蓝白组合光,影响了卡尔文循环相关酶活性及其基因表达,且叶片叶绿体结构良好,线粒体丰富,基粒、基质片层清晰,最终促进叶绿素合成,提高净光合速率有关(Hogewoning等2012)。本试验中,随着补光时间的延长,NPQ呈逐

渐降低趋势,说明不同处理下番茄幼苗叶片均受到不同程度的光抑制,但随着补光时间的延长光抑制现象逐渐缓解; Φ_{PSII} 、 q_p 及ETR则逐渐上升,均以补光4 h最佳。这些可能与补照4 h红蓝白组合光能够保护幼苗叶片的光合机能,缓解光抑制现象有关,且该处理下生长的幼苗PSII开放程度大,吸收、捕获及传递电子的能力强,即PSII活性高,热耗散最低,光能利用率较高(Miyake等2009)。通过对叶绿素荧光诱导动力学曲线的分析,补光4 h下番茄幼苗J点、I点较其他处理低,表明PSII供体侧、受体侧电子传递通畅,快还原型PQ比例增多,说明了该补光处理下番茄幼苗活性较高,PSII供体侧和受体侧电子传递性能高,说明补光能引起PSII和PSI的光吸收不平衡和随后的两个光系统电子流的不平衡。闫晓花(2016)发现补光时间与光质对黄瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响均明显表现出处理时间的累加效应,就补光时间而言,以补光4 h最佳,本试验研究结果与之类似。此外,就补光时段而言,本试验与程瑞锋等(2004)的研究存在差异,其研究发现黄瓜结果期在清晨时补光叶片净光合速率较夜间高,光合启动时间也较夜间长,而本试验中,番茄幼苗早晚补光,同样可以提高叶片净光合速率,进而增加植株生物量,培育壮苗,这说明不同蔬菜种类及不同生长阶段对光照的需求不同。

本试验中,随着补光时间的延长,除淀粉外,总糖、还原糖和蔗糖含量逐渐下降,并显著低于CK,但SS和SPS活性明显高于CK。说明补光可促进番茄幼苗碳同化与转化代谢,但碳的积累代谢有所减弱,以补光4 h最低。补光对番茄育苗的影响最终反映在生长量和产量的变化上。本研究中,补光对番茄幼苗生长量的影响非常明显,且随着补光时间的延长而增加,补光4 h处理显著提高了番茄幼苗的株高、茎粗、单株干鲜重,说明补光能够促进番茄幼苗生长及同化产物向营养器官的分配。补光时长直接影响植物光合作用时间的长短,进而影响到植物体内碳水化合物代谢及其他营养元素的吸收和转化,光合作用产生的碳水化合物能够供应番茄幼苗的生长发育。上述结果与宁宇等(2015)在芹菜研究中的结果类似,具体机理还有待进一步探究。随着补光时间的延长,番茄

幼苗的淀粉含量逐渐升高,以补光4 h最高。这可能与SS和SPS活性随补光时间延长逐渐升高有关,高活性SS和SPS共同作用调控蔗糖裂解为尿苷二磷酸葡萄糖(uridine 5'-diphosphoglucose, UDPG),并进一步转化为合成淀粉的底物腺苷二磷酸葡萄糖(adenosine diphosphate glucose, ADPG),促进淀粉合成(Li等2017)。综上,与自然光相比,日光温室内番茄幼苗补光能够明显改善PSII性能,显著提升根系构型参数及根系活力,增加碳水化合物向营养器官分配比例,进而促进植株物质积累,以早晚各补2 h红蓝白组合光(3R1B1W)效果最明显。进一步延长补光时间是否更加有利于培育壮苗,并在效益上可行,值得深入研究。

参考文献(References)

- Chen Y, Yang HQ, Xiao CS, et al (2012). Effect of supplementary light exposure and trace elements on growth of tobacco seedling. *Acta Tabacaria Sin*, 18 (6): 48–52 (in Chinese with English abstract) [陈颐, 杨虹琦, 肖春生等(2012). 补充光照及微量元素对烟苗生长的影响. *中国烟草学报*, 18 (6): 48–52]
- Cheng RF, Zou ZR, Wang J (2004). Study on photosynthesis of cucumber in greenhouse under exogenous photo supplementation. *Shaanxi J Agric Sci*, (3): 17–18 (in Chinese with English abstract) [程瑞锋, 邹志荣, 王军(2004). 外源补光状态下温室黄瓜光合作用的研究. *陕西农业科学*, (3): 17–18]
- Cui J, Ma ZH, Xu ZG, et al (2009). Effects of supplemental lighting with different light qualities on growth and physiological characteristics of cucumber, pepper and tomato seedlings. *Acta Horti Sin*, 36 (5): 663–670 (in Chinese with English abstract) [崔瑾, 马志虎, 徐志刚等(2009). 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响. *园艺学报*, 36 (5): 663–670]
- Gao J (2006). *Techniques of Plant Physiological Experiment*. Beijing: Higher Education Press, 144–148 (in Chinese) [高俊凤(2006). *植物生理学实验指导*. 北京: 高等教育出版社, 144–148]
- Hogewoning SW, Wientjes E, Douwstra P, et al (2012). Photosynthetic quantum yield dynamics: from photosystems to leaves. *Plant Cell*, 24 (5): 1921–1935
- Hu LP, Meng FZ, Wang S, et al (2009). Changes in carbohydrate levels and their metabolic enzymes in leaves, phloem sap and mesocarp during cucumber (*Cucumis sativus* L.) fruit development. *Sci Horti*, 121 (2): 131–137
- Hua JS, Dai HY, Xia MZ (2009). Effects of different light intensity on photosynthetic characteristic and yield characters of kidney bean. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*, 18

- (2): 136–140 (in Chinese with English abstract) [华劲松, 戴红燕, 夏明忠(2009). 不同光照强度对芸豆光合特性及产量性状的影响. 西北农业学报, 18 (2): 136–140]
- Hua Y, Luo XL, Li TL, et al (2008). Effect of light length on tomato growth in seedling stage. *J Henan Agric Sci*, 7 (8): 108–111 (in Chinese with English abstract) [花妍, 罗新兰, 李天来等(2008). 光照时间对番茄苗期生长发育的影响. 河南农业科学, 37 (8): 108–111]
- Li H, Tang C, Xu Z (2013). The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis in vitro. *Sci Hortic*, 150 (2): 117–124
- Li Y, Xin GF, Wei M, et al (2017). Carbohydrate accumulation and sucrose metabolism responses in tomato seedling leaves when subjected to different light qualities. *Sci Hortic*, 225: 490–497
- Liu ZL, Ma CW, Yang QC (2004). Review on controlling the ratio of red light to far-red light in protected environment. *J Agric Engin*, 20 (1): 270–273 (in Chinese with English abstract) [刘再亮, 马承伟, 杨其长(2004). 设施环境中红光与远红光比值调控的研究进展. 农业工程学报, 20 (1): 270–273]
- Miyake C, Amako K, Shiraishi N, et al (2009). Acclimation of tobacco leaves to high light intensity drives the plastoquinone oxidation system-relationship among the fraction of open PSII centers, non-photochemical quenching of Chl fluorescence and the maximum quantum yield of PSII in the dark. *Plant Cell Physiol*, 50 (4): 730–743
- Ning Y, Deng HH, Li QM, et al (2015). Effects of red and blue light quality on the metabolites and key enzyme activities of carbon-nitrogen metabolism in celery. *Plant Physiol J*, 51 (1): 112–118 (in Chinese with English abstract) [宁宇, 邓惠惠, 李清明等(2015). 红蓝光质对芹菜碳氮代谢及其关键酶活性的影响. 植物生理学报, 51 (1): 112–118]
- Öz MT, Turan Ö, Kayihan C, et al (2014). Evaluation of photosynthetic performance of wheat cultivars exposed to boron toxicity by the jip fluorescence test. *Photosynthetica*, 52 (4): 555–563
- Shen BY (2014). Regulation of night light on cucumber seedling morphology (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [申宝营(2014). 夜间延时补光调控黄瓜幼苗形态研究(学位论文). 南京: 南京农业大学]
- Wang BH, Sun FQ, Li JQ, et al (2017). Effects of supplementary light at different time on quality of cucumber seedlings in solar greenhouse. *China Veget*, 1 (12): 23–29 (in Chinese with English abstract) [王冰华, 孙凤清, 李娟起等(2017). 不同时段补光对日光温室冬春茬黄瓜幼苗质量的影响. 中国蔬菜, 1 (12): 23–29]
- Wang HZ, Pang JA, Li SJ, et al (2006). Effects of weak light treatment on growth and development of different varieties of *Cucumis sativus* L. in spring greenhouse. *J Henan Agric Univ*, 40 (2): 156–160 (in Chinese with English abstract) [王惠哲, 庞金安, 李淑菊等(2006). 弱光处理对春季温室不同品种黄瓜生长发育的影响. 河南农业大学学报, 40 (2): 156–160]
- Xue Y (1985). *Plant Physiology Laboratory Manual*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 135–138 (in Chinese) [薛应龙(1985). 植物生理学实验手册. 上海: 上海科学技术出版社, 135–138]
- Yan XH (2016). Effect of supplemental and light quality on cucumber seedling and photosynthesis in greenhouse (dissertation). Lanzhou: Gansu Agricultural University (in Chinese with English abstract) [闫晓花(2016). 补光时间及光质对温室黄瓜幼苗生长及光合特性的影响(学位论文). 兰州: 甘肃农业大学]
- Zhang Z, Cheng Z (2008). *Advanced Vegetable Physiology*. Beijing: China Agriculture University Press (in Chinese) [张振贤, 程智慧(2008). 高级蔬菜生理学. 北京: 中国农业大学出版社]
- Zhang Z, Qu W (2003). *Techniques of Plant Physiological Experiment*. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [张志良, 瞿伟菁(2003). 植物生理学实验指导(第三版). 北京: 高等教育出版社]
- Zhang ZS, Li G, Gao HY, et al (2012). Characterization of photosynthetic performance during senescence in stay-green and quick-leaf-senescence *Zea mays* L. inbred lines. *PLoS One*, 7 (8): e42936
- Zhao S, Shi G, Dong X (2002). *Techniques of Plant Physiological Experiment*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese) [赵世杰, 史国安, 董新纯(2002). 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业科学技术出版社]
- Zou Q (1995). *Experimental Guide of Plant Physiology and Biochemistry*. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [邹琦(1995). 植物生理生化实验指导. 北京: 中国农业出版社]

Effects of supplemental light duration on the growth, photosynthetic characteristic and carbon metabolism of tomato seedlings in winter under solar greenhouse

WEN Lian-Lian¹, LI Yan^{1,2,3,4,*}, ZHANG Dan-Qiu¹, HUANG Shi-Jie¹, QIN Li-Jie¹, SONG Jia-Bin⁵, HAN Ji-Shu⁵, WEI Min^{1,2,3,4,*}

¹College of Horticultural Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

²Scientific Observing and Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

³State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

⁴Shandong Collaborative Innovation Center of Fruit & Vegetable Quality and Efficient Production, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

⁵Shandong Demonstration Engineering and Technology Research Center of Factory-cultivated Vegetable Seedling, Jinan 251400, China

Abstract: In this experiment, the combination of red, blue and white light generated by LED (light emitting diode) was applied as the supplemental light test of tomato seedlings under solar greenhouse in winter before opening the heat preservation quilt in the morning (8:30) and after covering in the afternoon (16:30). The daily supplemental light duration was 1, 2, 3 and 4 h, respectively. The response of growth, photosynthetic characteristic and carbon metabolism of tomato seedlings in solar greenhouse to different supplemental light duration was studied with the natural light as control (CK). The results showed that, compared with CK, supplementing light on tomato seedlings significantly increased plant stem diameter, leaf area and dry and fresh weight, enhanced ratio of root to shoot, seedling index, parameters of root system configuration and root activity, as well as the PSII performance and activities of sucrose synthase (SS) and sucrose phosphate synthase (SPS), and then, the accumulation of starch was promoted when the supplemental light duration was 4 h. However, the content of total sugar, reducing sugar and sucrose was reduced with the supplemental light duration. In conclusion, supplemental light duration of 4 h could promote the accumulation of plant biomass and was beneficial to produce strong tomato seedlings through the improved photosystem II performance and enhanced photosynthetic efficiency in winter under solar greenhouse.

Key words: LED; supplemental light; seedling index; photosynthesis; carbon metabolism

Received 2018-06-01 Accepted 2018-08-16

This work was supported by the China Agriculture Research System (CARS-23-C04), the National Natural Science Foundation of China (31401921), the Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2014CQ029), the National Science & Technology Support Program of China (2014BAD05B03), the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0302403) and Science and Technology Innovation Team of Shandong Agriculture University-Facility Horticulture Advantages Team (SYL2017YSTD07).

*Co-corresponding authors: Li Y (edmonlee@163.com), Wei M (minwei@sdau.edu.cn).