

黄志午, 俞亦章, 徐志刚, 等. 冬季设施补光对苏州地区岩棉培番茄生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1034-1041.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.021

## 冬季设施补光对苏州地区岩棉培番茄生长的影响

黄志午<sup>1</sup>, 俞亦章<sup>2</sup>, 徐志刚<sup>3</sup>, 朱为民<sup>1</sup>, 钱春花<sup>4</sup>

(1.上海市农业科学院, 上海 201106; 2.昆山市城区农副产品实业有限公司, 江苏 昆山 215300; 3.南京农业大学, 江苏 南京 210000; 4.苏州农业职业技术学院, 江苏 苏州 215008)

**摘要:** 为探究补光栽培技术在冬季设施岩棉培番茄中的应用, 在双层拱棚连栋温室大棚内, 以番茄品种 152 为试验材料, 设置 3 个补光处理, 处理 1 为点光源冠层补光+线光源丛间补光(C1), 处理 2 为线光源丛间补光(C2), 处理 3 为点光源冠层补光(C3), 以未补光的单间为对照(CK), 解析不同补光方法对番茄产量、植株生长和光合作用的影响。结果表明, C1 和 C3 处理的单株产量、单果质量均显著多于对照, 花穗数多于对照。C1 处理的番茄植株生长指标优于 C3 处理。C2 处理和 CK 的光合作用低于 C1 和 C3 处理。总之, 点光源冠层补光+线光源丛间补光(C1)更有利于番茄生长, 可用于长江中下游区域的冬季番茄设施补光栽培。

**关键词:** 岩棉培; 番茄; 人工补光; 产量; 光合作用

**中图分类号:** S624.4<sup>+</sup>3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2022)04-1034-08

## Effects of winter facility light supplement on the growth of stone wool cultivated tomato in Suzhou area

HUANG Zhi-wu<sup>1</sup>, YU Yi-zhang<sup>2</sup>, XU Zhi-gang<sup>3</sup>, ZHU Wei-min<sup>1</sup>, QIAN Chun-hua<sup>4</sup>

(1.Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 200000, China; 2.Kunshan Urban Agricultural and Sideline Products Industrial Co., Ltd., Kunshan 215300, China; 3.Nanjing Agricultural University, Nanjing 210000, China; 4.Suzhou Polytechnic Institute of Agriculture, Suzhou 215008, China)

**Abstract:** To explore the application of light supplement cultivation technology in the cultivation of tomato by stone wool facilities in winter, tomato variety 152 was used as experimental material in the multi-span greenhouse with double arch, and three light supplementary treatments were set up. Treatment 1 used light supplement method by point light source in the canopy + line light source in the branches (C1), treatment 2 used light supplement method by line light source in the branches (C2), treatment 3 used light supplement method by point light source in the canopy (C3). The single room without light supplement was used as control (CK) to analyze the effects of different light supplement methods on yield, growth and photosynthesis of tomato. The results showed that, the yield per plant and single fruit weight under C1 and C3 treatments were significantly higher than those of the control, and the number of flower panicle was higher than that of the control. The growth indexes of tomato plants under C1 treatment were better than those of C3 treatment. The photosynthetic activities under C2 and CK treatments were lower than those of C1 and C3 treatments. In conclusion, light supplement method by point light source in the canopy + line light source in the branches (C1) is more beneficial to the growth of tomato, and can be used in the facility light supplement cultivation of tomato in winter in the middle and lower reaches of the Yangtze River.

**Key words:** stone wool culture; tomato; artificial light supplement; yield; photosynthesis

收稿日期: 2021-12-28

基金项目: 苏州市科技计划项目(SNG2017058); 上海市农委项目  
[沪农科推字(2019)第 1-12 号]

作者简介: 黄志午(1993-), 男, 江西萍乡人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为植物补光栽培技术。(E-mail) 1285551548@qq.com

通讯作者: 钱春花, (E-mail) chqian@szai.edu.cn

番茄, 又称西红柿、番柿, 起源于热带、亚热带地区, 属茄科茄属, 是中国设施温室中的主栽作物之一, 同时番茄还是一种世界性经济作物。番茄产量

影响着地方经济发展和农民的经济收入,番茄作为一种肉质性果实,也被认为是研究果实发育、成熟的理想材料。为了周年供应优质果菜,部分地区的栽培技术和栽培设施发展得较快,也面临着诸多客观问题,从而影响番茄产量和品质等。例如:冬季和早春季的雾霾、连续阴雨等造成温室光照环境恶化。另外,棚室的材料老化、骨架结构、补光灯位置和不断生长的番茄间和叶片间相互遮掩都使得喜光作物番茄长期生长在弱光环境中,使番茄植株营养生长过快,出现避阴反应;此外,番茄生殖生长不良,表现为落花落果、果实发育缓慢、产量下降、品质变低等<sup>[1]</sup>。要高效生产番茄等果菜类作物,就必须克服冬季低温弱光和高湿度传播病虫害等问题。

岩棉栽培番茄可以有效解决土壤酸碱化、板结等不利于种植的问题,并可杜绝土传病害的传播、节约空间、有效降低空气湿度、减少病虫害。在荷兰无土栽培的设施温室中,90%以上是用岩棉栽培<sup>[2]</sup>。美国在无土栽培技术领域早已转向太空,并走在世界的前列<sup>[3]</sup>。

人工补光是改善设施光环境的最有效手段,为当前设施园艺高产、提质增效的关键措施之一,在设施蔬菜生产中具有重要的应用前景<sup>[4]</sup>。在设施温室内应用人工补光配合采用岩棉培技术能够有效弥补温室环境中的光照不足,降低温室湿度,减少病虫害等,提高抗病性。林婧等<sup>[5]</sup>研究发现,增加补光强度和延长光照时间,可以增加番茄的株高、节间距和茎粗,提高番茄幼苗抗病虫害的能力。刘晓英等<sup>[6]</sup>的研究结果表明,不同光质配比可以增加番茄苗期叶绿素含量、提高光合作用等。Xu 等<sup>[7]</sup>发现,发光二极管(LED)红光会增加棉铃虫对番茄的危害,同时 LED 蓝光降低了番茄的病情指数。目前,大多数研究集中在室内补光对番茄苗期的影响,如在北方设施温室内番茄全生育期的补光,较少涉及长江流域冬季设施岩棉培番茄补光技术的应用。因此本研究以番茄品种 152 为试验材料,设置 3 组不同位置补光处理,在双层拱棚的连栋设施大棚内应用岩棉栽培技术,研究人工补光对冬季番茄产量、生长及光合作用的影响,为反季节种植番茄的补光技术提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 光源的选择

冠层补光采用点形大功率植物光源(以下简称

点光源,功率 250 W,由南京植生谱光电科技有限公司提供),丛间补光采用线形 LED 植物光源(以下简称线光源,功率 18 W,由南京植生谱光电科技有限公司提供)。

### 1.2 试验材料

由厦门百利现代农业科技有限公司提供番茄品种 152 的种子。

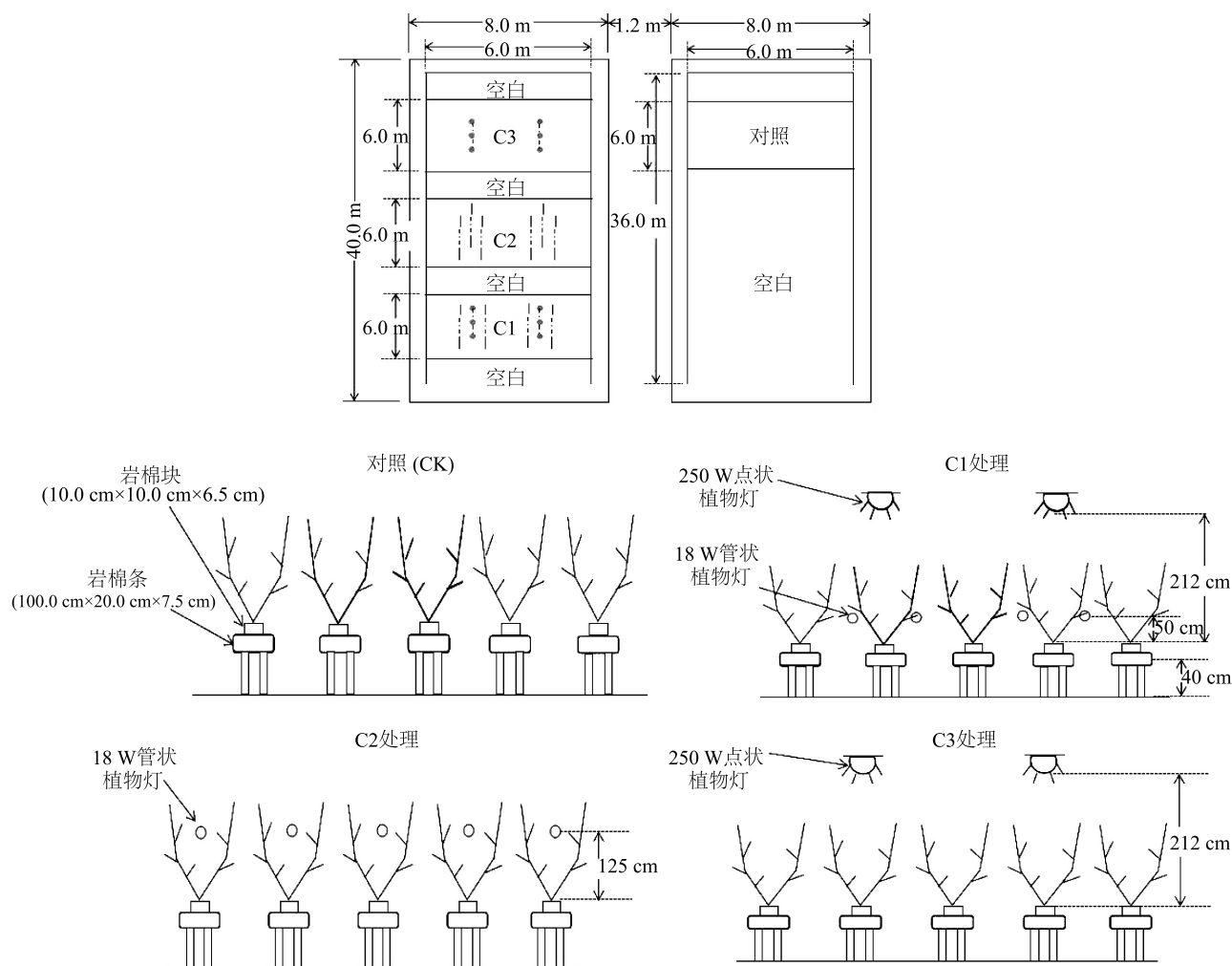
### 1.3 试验设计

试验在南京农业大学昆山蔬菜研究院的双层拱棚连栋温室大棚内进行。2018 年 8 月 27 日催芽,9 月 22 日定植,各处理设 72 株番茄,株距 25 cm。双层拱棚保温,覆盖地布,用水肥一体化技术降低空气湿度、减少病虫害。设置 3 个处理组和 1 个对照组:C1 处理,两垄的冠层分别用间隔 120 cm 的 5 盏点光源共 10 盏+两垄的各侧面用 5 根线光源共 20 根;C2 处理,横向五垄的岩棉块正上方放置 3 根线光源共 15 根;C3 处理,两垄的冠层分别用间隔 120 cm 的 5 盏点光源共 10 盏;CK,一个不补光的单间。各处理之间使用遮光板隔开,防止光源干扰。点光源固定于岩棉块正上方 212 cm 处。C1 处理的线光源放置于垄的两侧,最开始距离岩棉块的距离为 50 cm,其高度随番茄生长及采收状况进行调整;C2 处理的线光源固定于垄的中间,距离岩棉块正上方 125 cm 处(图 1)。补光时间根据当天的天气状况进行调节。11 月 3 日开始补光。白天最高温度高于 27 ℃时放风降温除湿,夜间最低温度低于 12 ℃时采取临时加温措施增温。双秆整枝,不封顶,每穗留 10~12 个果,各农事操作统一进行。

### 1.4 测定项目和方法

1.4.1 生长指标的测定 从每个处理中随机选取灯下长势一致的 4 株番茄,分别于开花后 30 d、37 d、44 d、51 d 和 58 d,用布条尺测量株高、第 3 穗花上两节的节间距,用电子游标卡尺测量第 3 穗花上两节的节间茎粗,用计数法目测花穗数。

1.4.2 叶片中色素含量的测定 分别在果实的绿熟期、转色期和成熟期,摘取各处理选取的 4 株番茄相同部位的果实,用植物破壁研磨机进行研磨,放入超低温冰箱中保存待用。取对应的番茄叶片,放入液氮罐中后用超低温冰箱保存待测,共取样 3 次。叶绿素含量的测定采用乙醇-丙酮混合提取法<sup>[8]</sup>。



C1 处理:点光源冠层补光+线光源丛间补光;C2 处理:线光源丛间补光;C3 处理:点光源冠层补光;CK:未补光的单间对照。

图 1 冬季设施岩棉培番茄各处理补光方式示意

Fig.1 Schematic diagram of the light supplement method for stone wool cultivated tomato under each treatment in winter

1.4.3 光合荧光参数、光响应曲线的确定 在果实成熟期,用光合仪 LI-6400XT(USA)测量各光合指标。测量光响应曲线时,光照度梯度设置为2 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 800  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 600  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 400  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、800  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、600  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、400  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、150  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、100  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、75  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、50  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、25  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、0  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,  $\text{CO}_2$ 浓度设置为 $(390\pm 10)$   $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,重复测定 3 次。

## 1.5 数据统计和分析

采用 Excel 2010 处理数据和绘图,采用 SPSS 20.0 进行统计分析,并用 Duncan's 法分析差异显著性。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄产量的影响

2.1.1 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄各采摘节点产量的影响 2018 年 11 月 3 日开始随天气状况间断补光,补光后 3 d C1 和 C3 处理果实最先开始转色,补光后 26 d 各补光处理开始采收,而 CK 延迟 6 d 后才达到采收程度,说明冠层应用点光源进行补光能够促进番茄果实提前转色,且补充光照使得番茄提前成熟,提早上市,增加了经济效益。除第 4 次采摘外,CK 在各次采收中的产量都较低。补光处理能够增加番茄产量,且 C1 处理的产量最高,补光效果最佳(表 1)。

表 1 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄各采摘节点产量的影响

Table 1 Effect of different light supplement methods on the yield of stone wool cultivated tomato in winter

处理	第 1 次采摘 (2018-11-29) 产量(g)	第 2 次采摘 (2018-12-03-2018-12-04) 产量(g)	第 3 次采摘 (2018-12-08) 产量(g)	第 4 次采摘 (2018-12-13) 产量(g)	第 5 次采摘 (2018-12-24) 产量(g)	前 5 次 68 株总产量 (g)
C1	595	1 395	3 575	895	530	6 990
C2	425	1 200	3 230	360	790	6 005
C3	835	1 735	2 010	960	705	6 245
CK	—	1 030	2 602	1 885	420	5 937

各处理见图 1 注。各产量均为 68 株产量。

2.1.2 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄产量及构成因素的影响 如表 2 所示,不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄产量及其构成因素的影响存在差异。对照的总产量最低,为 36 587.52 g。C1 处理的 72 株总产量最高,为 51 076.08 g,与对照相比提高 39.60%。C1 处理的实际单株产量最高,其次是 C3 处理,两者显著高于 CK,而各补光处理之间没有

显著差异,这与单穗果质量的差异显著性相同。不同处理下番茄单果质量的顺序为 C1 处理>C3 处理>C2 处理>CK,这与 72 株总产量、实际单株产量和单穗果质量的顺序相同。C1 处理的单果质量显著大于 C2 处理和对照。上述结果说明,C1 处理相比于 C2 处理和 C3 处理在各产量构成因素中表现最好,试验产量最高。

表 2 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄产量及构成因素的影响

Table 2 Effect of different light supplement treatments on yield and yield components of stone wool cultivated tomato in winter

处理	株数	实际单株产量 (g)	单穗果质量 (g)	单果质量 (g)	72 株总产量 (g)
C1	72	709.39±41.80a	168.84±8.58a	14.40±0.19a	51 076.08
C2	72	635.10±51.88ab	156.29±4.21ab	12.54±0.66bc	45 727.20
C3	72	654.70±34.21a	163.67±8.55a	13.80±0.40ab	47 138.40
CK	72	508.16±39.92b	135.74±6.64b	12.30±0.25c	36 587.52

各处理见图 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。实际单株产量为整个试验各处理内标记的 5 株番茄从采摘到第 4 台果总产量取平均值。各处理从采摘到第 4 台果的试验总产量=各处理实际单株产量×各处理总株数(72 株)。

2.1.3 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄花穗数的影响 如表 3 所示,在开花后 30 d、37 d 和 51 d,不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄花穗数没有显著影响。开花后 30 d,C2 处理的花穗数低于对照。开花后 37 d,C3 处理的花穗数高于对照和其他处理。C1 和 C3 处理的花穗数平均每周增长 1 穗以上,C2 处理每周增长 1 穗,而 CK 每周增长 1 穗左右。C1 和 C3 处理的花穗数增量大于 C2 处理,明显

大于 CK,说明补光处理能促进花芽分化,同时,冠层应用点光源的效果更显著。开花后 44 d 和 58 d,C1 和 C3 处理花穗数高于对照和 C2 处理。最终到花后 58 d,C1 处理的花穗数最多,其次为 C3 处理,说明冠层点光源+丛间线光源的补光效果最好。花穗数是重要的番茄产量构成因素之一,它直接影响了产量的高低。

表 3 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄花穗数的影响

Table 3 Effect of different light supplement methods on the number of spicae of stone wool cultivated tomato in winter

处理	花穗数				
	花后 30 d	花后 37 d	花后 44 d	花后 51 d	花后 58 d
C1	5.0±0a	6.0±0a	7.3±0.3ab	7.5±0.3a	8.8±0.3a
C2	4.8±0.3a	6.0±0a	6.8±0.3ab	7.5±0.3a	7.5±0.3b
C3	5.0±0a	6.3±0.3a	7.5±0.3a	8.0±0a	8.5±0.5ab
CK	5.0±0a	6.0±0a	6.5±0.3b	7.3±0.3a	8.0±0ab

各处理见图 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。



## 2.2 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄生长的影响

2.2.1 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄节间距和茎粗的影响 如表 4 所示,不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄节间距存在一定影响。花后 37 d 和 58 d,CK 的节间距显著高于 C2 处理,与 C1 和 C3 处理无显著差异。花后 44 d CK 的节间距显著高于 C2 和 C3 处理,与 C1 处理没有显著差异。花后 51 d 不同补光处理和 CK 的节间距没有显著差异,对照一直保持最高的节间距。由此可见,C1 和 C3 处理比 C2 处理更能促进冬季设施岩棉培番茄的生长发

育,两者的各产量构成因素表现最好,产量也高于 C2 处理和 CK。比较各补光处理与 CK,发现补光处理能抑制冬季设施岩棉培番茄徒长。

不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄茎粗的影响也存在显著差异。花后 37 d、44 d 各补光处理番茄茎粗都显著大于 CK。花后 51 d、58 d,C1 处理的番茄茎粗最大且显著大于 CK,与 C2、C3 处理没有显著差异。综合比较得出,各补光处理植株表现更粗壮且 C1 处理最健壮,与 CK 形成鲜明对比,说明补光促进了冬季设施岩棉培番茄生长发育,降低了冬季恶劣环境条件的影响。

表 4 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄第 3 穗花上两节节间距和茎粗的影响

Table 4 Effects of different light supplement methods on the internodal spacing and stem diameter of the third panicle of stone wool cultivated tomato in winter

处理	节间距 (cm)				茎粗 (mm)			
	花后 37 d	花后 44 d	花后 51 d	花后 58 d	花后 37 d	花后 44 d	花后 51 d	花后 58 d
C1	9.98±0.29ab	10.00±0.26ab	9.81±0.29a	9.89±0.27ab	10.08±0.49a	10.34±0.40a	10.87±0.38a	10.81±0.44a
C2	9.33±0.28b	9.36±0.28b	9.46±0.34a	9.33±0.31b	9.88±0.28a	9.94±0.46a	10.06±0.38a	10.34±0.36ab
C3	9.49±0.31ab	9.04±0.26b	9.50±0.31a	9.48±0.30ab	9.78±0.32a	9.99±0.38a	9.81±0.41ab	10.10±0.44ab
CK	11.05±0.85a	11.09±0.83a	11.09±0.85a	11.07±0.86a	8.68±0.24b	8.56±0.27b	8.88±0.26b	9.19±0.37b

各处理见图 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.2.2 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄株高的影响 如表 5 所示,不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄花后 30 d 到 51 d 的株高没有显著影响。而在花后 58 d,不同补光方法处理的番茄株高存在

显著差异,C1 处理的株高显著高于 C3 处理,两者与对照、C2 处理没有显著差异。C1 处理的番茄生长得最快,最终各处理株高的顺序为 C1 处理>CK 处理>C2 处理>C3。

表 5 不同补光方法对冬季岩棉培番茄株高的影响

Table 5 Effect of different light supplement methods on the plant height of stone wool cultivated tomato in winter

处理	株高 (cm)				
	花后 30 d	花后 37 d	花后 44 d	花后 51 d	花后 58 d
C1	132.18±0.50a	162.13±1.27a	201.13±2.29a	225.23±2.31a	261.55±0.68a
C2	132.48±2.37a	162.88±1.92a	198.13±2.63a	225.48±3.09a	253.73±4.28ab
C3	134.03±1.01a	162.90±1.35a	191.25±11.80a	214.85±6.37a	239.25±8.87b
CK	130.48±1.58a	166.30±0.87a	199.88±1.99a	226.08±1.52a	255.00±2.00ab

各处理见图 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

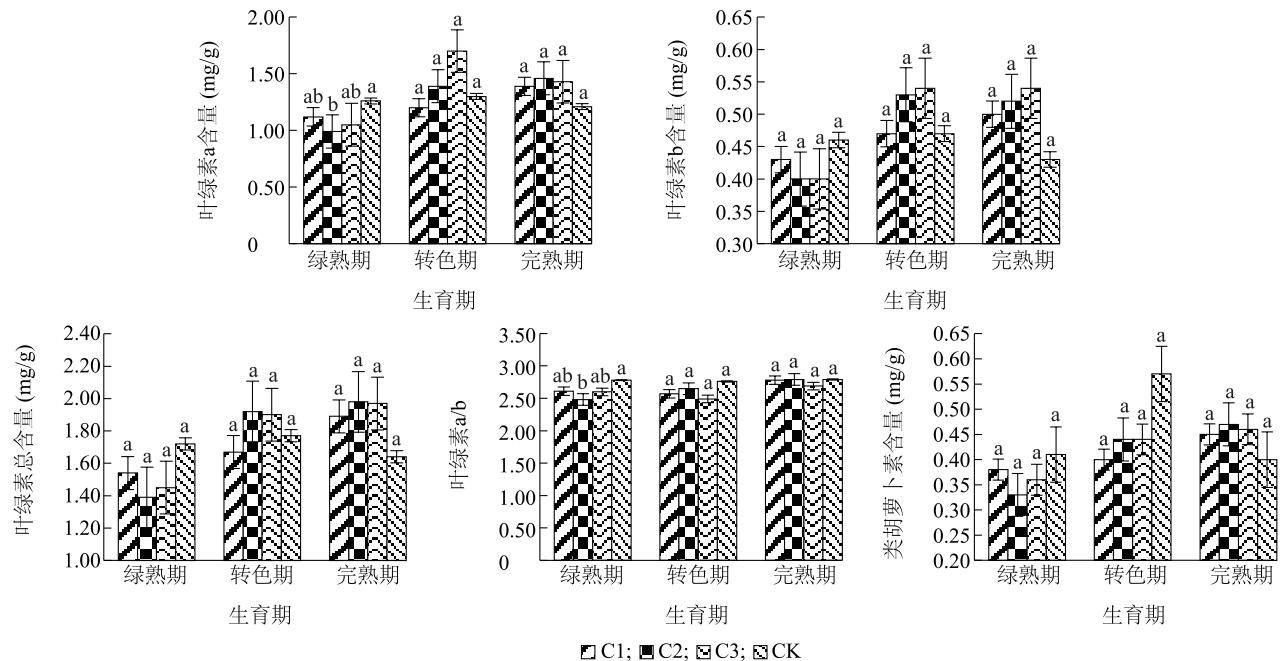
## 2.3 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光合作用的影响

2.3.1 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄叶片光合色素含量的影响 由图 2 可知,不同补光方法下冬季设施岩棉培番茄果实各发育时期植株叶片中色素含量存在差异。在果实绿熟期,对照的 Chl.a 含量、Chl.b 含量、Chl.a/Chl.b 比值、类胡萝卜素含

量和叶绿素总含量都是最高的,且对照的 Chl.a 含量和 Chl.a/Chl.b 比值均显著高于 C2 处理,与 C1 和 C3 处理没有显著差异,其他各色素含量在转色期和完熟期均没有显著差异。在果实完熟期,对照的各光合色素含量与各补光处理之间没有显著差异,但对照的各色素含量都是最低的。比较各补光处理,发现 C2 处理的叶绿素总含量高于 C1 和 C3 处理,

这可能是由于 C2 处理光照度较低以及与其他处理在同一间棚室内温度有所增加的情况下,应对低温寡照的适应性反应。C3 处理的叶绿素含量相对高于 C1 处理,可能由于南面温度稍高。果实从转色

期到完熟期对养分和能量需求增加,可溶性离子浓度( EC )也达到 5.0 以上,同时,补光促进果实完熟期叶片中色素的积累,促进光合作用对光能和 CO<sub>2</sub> 的吸收,形成更多碳水化合物输送到果实中。



各处理见图 1 注。同一时期不同处理间标有不同小写字母表示差异显著 (  $P < 0.05$  )。

图 2 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光合色素各相关指标的影响

Fig.2 Effect of different light supplement methods on chlorophyll related indicators of stone wool cultivated tomato in winter

2.3.2 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光合特征的影响 如表 6 所示,不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄植株气孔导度和蒸腾速率没有显著影响,但 C2 处理在各处理和对照中是最低的。不同补光方法对番茄光合速率和胞间二氧化碳浓度有显著影响,C2 处理的光合速率显著低于对照、C1 和 C3 处理,大小顺序为 C3 处理>C1 处理>对照>C2 处理。而 C2 处理和对照的胞间二氧化碳浓度显著高于 C1 和 C3 处理。尽管 C2 处理的叶绿素总含量高于对照和其他各补光处理,但 C2 处理的光合速率、

气孔导度和蒸腾速率均低于对照,这可能是由于棚室内补光灯、设施设备(如:棚室骨架结构、臭氧发生器等)遮挡及较弱的自然光造成的。这也进一步说明在没有充足光照的情况下,植物光合作用的强弱不仅与补光强度相关,还跟设施内温度、自然光强度等有关。C3 处理的光合速率、蒸腾速率高于对照、C1 和 C2 处理,可能由于 C3 处理处于温度稍高的南面,再加上冠层应用大功率植物光源,其气孔导度、蒸腾速率和光合速率也相应上升。

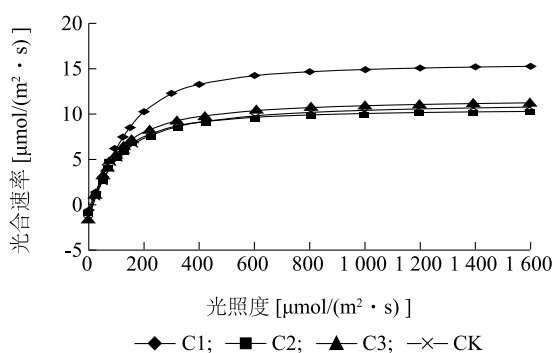
表 6 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光合特征的影响

Table 6 Effect of different light supplement methods on photosynthetic characteristics of stone wool cultivated tomato in winter

处理	光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	气孔导度 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]	蒸腾速率 [ $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]
C1	6.84±0.31a	0.26±0.02a	334.98±1.11b	2.52±0.11a
C2	5.11±0.34b	0.24±0.02a	344.22±1.15a	2.50±0.14a
C3	7.01±0.36a	0.28±0.01a	332.40±1.38b	2.67±0.10a
CK	6.71±0.46a	0.28±0.01a	344.74±1.78a	2.57±0.10a

各处理见图 1 注。同列数据后标有不同小写字母表示差异显著 (  $P < 0.05$  )。

2.3.3 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光响应曲线的影响 如图 3 所示,不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光响应的影响存在明显差异。在光照度为 $0\sim 400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的范围内,各补光处理下番茄植株的净光合速率都高于对照。同时在此范围内,对照及各处理的番茄植株光合速率增速都较快,在光照度达到 $500\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之后,增速趋于平缓,但 C1 处理的光合速率较对照和其他处理高出 $4\sim 6\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。且在光照度为 $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之后,C2 处理的光合速率低于对照,这与 C2 处理的光合特征相对应(表 6)。



各处理见图 1 注。

图 3 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光响应曲线的影响

Fig.3 Effects of different light supplement methods on light response curve of stone wool cultivated tomato in winter

表 7 不同补光方法对冬季设施岩棉培番茄光响应曲线参数的影响

Table 7 Effect of different light supplement methods on indices of light response curve of stone wool cultivated tomato in winter

处理	最大净光合速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	表观量子效率	光呼吸速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	$R^2$	光饱和点 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]	光补偿点 [ $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ]
C1	16.261	0.078	0.460	0.999	731.821	6.069
C2	11.535	0.082	0.855	0.994	659.150	11.262
C3	11.415	0.064	0.255	0.997	605.084	4.075
CK	11.183	0.056	0.597	0.990	815.974	11.262

各处理见图 1 注。

### 3 讨论与结论

补光能显著提高番茄的产量,这是由于植株生长处于源限制时,补光显著影响番茄的形态特征,对作物生物量的积累有促进作用。叶片光合作用的强弱影响着果实碳同化物转运,弱光环境下补光可以提高光合同化率、果实生长速率和作物产量<sup>[9]</sup>。战吉成等<sup>[10]</sup>认为弱光下植株会出现徒长、茎秆瘦长、叶片变大变薄和颜色变淡等避阴症状。强光下植株会出现叶片变厚、叶色变黄等不良症状<sup>[11]</sup>。本研究中对照的节间距均高于补光处理,且对照的茎粗最小。在花

如表 7 所示,由光响应曲线得到的参数值在不同补光方法下差异明显。C3 处理的光补偿点最低,为 $4.075\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,与 C1 处理的差异较小,两者明显小于 C2 处理 and 对照。说明 C1 和 C3 处理对冬季弱光的环境适应性强于 CK 和 C2 处理,两者光合速率也高于 CK 和 C2 处理。同时 C1 和 C3 处理在形态建成(表 4、表 5)和产量构成(表 2)方面表现较好。正常的光照环境中,春秋茬番茄的光饱和点为 $1\ 200\sim 1\ 300\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,但本试验番茄为反季节番茄,低温寡照、湿度较高等恶劣的环境导致番茄的光饱和点普遍降低一半以上。对照的光补偿点和光饱和点都高于各补光处理,而 C2 处理的光饱和点与对照不相同,说明 C2 处理丛间应用线形 LED 植物光源有一定的补光效果,起到抵御冬季不良环境因素的作用,这也是 C2 处理的总产量稍高于 CK 的原因之一。

C1 处理的最大净光合速率明显大于对照、C2 和 C3 处理,对照的最大净光合速率最小,但与 C2 和 C3 处理的最大净光合速率差异不大。在弱光阶段光响应曲线的斜率即为表观量子效率。对照的表观量子效率较小,各处理的大小顺序为 C2 处理>C1 处理>C3 处理>对照。各处理之间光呼吸速率相差较大,C2 处理最大,为 $0.855\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,高于对照,是 C3 处理的 3.35 倍。

后 58 d,对照的株高除小于 C1 处理外,均大于另外 2 个补光处理。根据朗伯比定律,随着冠层深度的增加,叶面积指数为 1 时丛间光照强度只有冠层顶部的 40%,且随着叶面积指数增加,中下部光照强度呈指数关系下降。株间补光能够提高番茄中下部的光照强度,增加叶片净光合速率,利于番茄植株生长,提高产量。在只有双层拱棚保温的情况下,通过补光可以提前 6 d 采收,且 C1 处理的产量最高,补光效果最佳。研究中发现,补光处理可显著提高番茄的单株产量和单果质量,对照的花穗数整体上少于 C1 和 C3 处理,但个别指标却比 C2 处理更好。层间 LED 补光与

环境光照强度相比较弱,对番茄植株光合作用没有太大影响,这与闫文凯等<sup>[12]</sup>研究结果一致。Marcelis<sup>[13]</sup>研究结果表明光照强度每增加 1%,其产量也增加 1%。Gajcowska 等<sup>[14]</sup>研究认为点状高压钠灯相比于 LED 灯更有利于增加番茄的产量。

大多数叶绿素 a 和全部的叶绿素 b 都参与光能的吸收和传递,另有一部分叶绿素 a 起光反应中心作用,推动光化学反应的进行,分别称为天线色素和反应中心色素,类胡萝卜素也有天线色素的作用,同时它还起到光保护的作用。本试验中,在果实发育的转色期和完熟期,补光处理对叶绿素各指标无显著影响,但补光处理下叶绿素含量增加而对照是下降的。叶绿素和类胡萝卜素分配比例的改变,使得植株更加高效地利用光能,从而提高植株抵抗逆境和病虫害的能力。

光合作用是植物形成产量的基础<sup>[15-17]</sup>,叶片净光合速率下降是植物对环境胁迫的共同特征。光合作用受光照和温度等环境条件的影响,又容易受到气孔限制和非气孔限制。本试验发现,C2 处理的光合速率显著低于对照、C1 处理和 C3 处理,其气孔导度较低而胞间二氧化碳浓度显著高于其他处理,说明 C2 的净光合速率主要受非气孔限制的影响。赵玉萍等<sup>[18]</sup>研究发现,在相同温度下,增加光照强度,番茄的净光合速率上升,对照的气孔导度增大,胞间二氧化碳浓度提高,这与本试验结果一致。植物光补偿点与对弱光的利用效率成反比,本试验中,对照和 C2 处理的光补偿点相同,明显高于 C1 和 C3 处理,C3 处理和对照的光饱和点与光补偿点的数值大小呈正相关,而 C2 处理的光饱和点并不是最高,且 C1 处理要高于 C2 处理,这与李佳帅等<sup>[19]</sup>研究结果不一致,可能与补光方法和针对不同植物产生的效果差异有关。与对照和其他各处理相比,C2 处理的表观量子效率和光呼吸速率最高,因此,C2 处理下的番茄更多地消耗叶片中光合作用所产生的碳水化合物,以弥补弱光的影响。光饱和点能够反映植物对光能利用区间的大小。本研究中,C1 处理的光饱和点高于 C2 和 C3 处理,且 C1 处理的最大净光合速率明显高于对照和其他处理,其表观量子效率明显高于对照和 C3 处理,光呼吸速率则只高于 C3 处理。点光源冠层补光+线光源丛间补光(C1)处理的番茄具有更大的光能利用区间和光合潜力。

## 参考文献:

[1] 吴兰坤,黄卫东,战吉成. 弱光对大樱桃坐果及果实品质的影

响[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(3): 69-74.

- [2] 朱士吾. 无土栽培新基质——岩棉[J]. 中国花卉盆景, 1987(12): 6.
- [3] 林 夕. 无土栽培基质中的新宠——岩棉[J]. 农村实用工程技术: 温室园艺, 2003(9): 24-25.
- [4] 李 涛, 杨其长. 设施园艺生产人工补光理论初探[J]. 温室园艺, 2018(6): 48-52.
- [5] 林 婧, 马邯生, 王丽萍, 等. LED 补光技术对番茄苗期应用研究[J]. 现代园艺, 2018(3): 15-17.
- [6] 刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 等. 不同光质 LED 弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(4): 725-732.
- [7] XU H L, XU Q C, LI F L, et al. Applications of xerophytophysiology in plant production——LED blue light as a stimulus improved the tomato crop[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 148: 190-196.
- [8] 邹 琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.
- [9] 宋 羽. 株间 LED 补光与温室番茄光能利用特性及生长发育关系的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [10] 战吉成, 黄卫东, 王利军. 植物弱光逆境生理研究综述[J]. 植物学通报, 2003, 20(1): 43-50.
- [11] MATOS F S, WOLFGGRAMM R, GONALVES F V, et al. Phenotypic plasticity in response to light in the coffee tree[J]. Environmental & Experimental Botany, 2009, 67(2): 421-427.
- [12] 闫文凯, 张雅婷, 张玉琪, 等. LED 株间补光对日光温室番茄产量及光合作用的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 132-138.
- [13] MARCELIS L F M B. Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops[J]. Acta Horticulturae, 2006, 711(8): 97-103.
- [14] GAJCOWSKA J, KOWALCZYK K, METERA A, et al. Effect of supplementary lighting on selected physiological parameters and yielding of tomato plants[J]. Folia Horticulturae, 2013, 25(2): 153-159.
- [15] 张 洋, 郁继华, 唐中祺, 等. 不同时段株间补光对日光温室番茄产量及品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2): 430-437.
- [16] 王彦辉, 韩燕丽, 樊永强, 等. 叶面喷施尿素对谷子郑农谷 09-6 光合特性及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(5): 92-96.
- [17] 吴思佳, 李仁英, 谢晓金, 等. 抽穗期高温对水稻叶片光合特性、叶绿素荧光特性和产量构成因素的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 20-27.
- [18] 赵玉萍, 蒋丽煌. 不同温光对温室番茄不同生长期光合特性的影响[J]. 新疆农业科技, 2014(2): 17-19.
- [19] 李佳帅, 杨再强, 薛思嘉, 等. 寡照对设施黄瓜叶片光合参数及光响应曲线的影响[J]. 北方园艺, 2018(14): 63-71.

(责任编辑: 张震林)