

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.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.02.025

## 不同时段株间补光对日光温室番茄产量及品质的影响

张 洋<sup>1</sup>, 郁继华<sup>1,2</sup>, 唐中祺<sup>1</sup>, 于 健<sup>1</sup>, 罗石磊<sup>1</sup>, 王舒亚<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学园艺学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为探究不同补光时段株间补光对冬季日光温室番茄产量及品质的影响, 以番茄品种粉太郎为试验材料, 通过设置 CK (不补光)、T1 (早晨揭帘前补光 5.0 h)、T2 (晚上盖帘后补光 5.0 h)、T3 (早晨揭帘前、晚上盖帘后各补光 2.5 h) 4 个处理, 采用方差分析法, 对品质、产量进行分析, 采用主成分分析法, 对硬度、可溶性固形物含量等 13 项指标进行了综合分析。结果表明: 早晨揭帘前补光 5.0 h 的补光效果显著优于其他处理。T1 处理产量、果实硬度、单果干质量、可溶性固形物含量、可溶性糖含量、有机酸含量、可溶性蛋白质含量、维生素 C 含量、番茄红素含量显著高于 CK。通过主成分分析法分析得出, T1 处理综合得分最高, 其次为 T2、T3 处理, CK 得分最低。综上所述, 早晨揭帘前补光 5.0 h 番茄的产量最高, 品质最优。

**关键词:** 番茄; 日光温室; 品质; 产量; 株间补光; 补光时段

**中图分类号:** S641.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)02-0430-08

## Effects of inter-lighting supplementation at different times on tomato yield and quality in solar greenhouse

ZHANG Yang<sup>1</sup>, YU Ji-hua<sup>1,2</sup>, TANG Zhong-qi<sup>1</sup>, YU Jian<sup>1</sup>, LUO Shi-lei<sup>1</sup>, WANG Shu-ya<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Lab of Arid Land Crop Sciences, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of inter-lighting supplementation at different times on tomato yield and quality in solar greenhouse in winter, the tomato variety Fentailang was used as the experimental material, and four treatments were set up: CK (no supplemental light), T1 (supplemental light for 5.0 hours before opening curtain in the morning), T2 (supplemental light for 5.0 hours after covering curtain in the evening), T3 (supplemental light for 2.5 hours before opening curtain in the morning and supplemental light for 2.5 hours after covering curtain in the evening). Variance analysis method was used to analyze the quality and yield, and principal component analysis method was used to analyze 13 indices, such as hardness and soluble solid content. The results showed that the light supplementing effect of T1 treatment was significantly better than that of other treatments. The yield, fruit hardness, dry weight per fruit, soluble solids content, soluble sugar content, organic acid content, soluble protein content, vitamin C content and lycopene content of tomato in T1 treatment were significantly higher than those in the control. According to the results of principal component analysis, the

comprehensive score of T1 treatment was the highest, followed by T2 treatment and T3 treatment, and the comprehensive score of CK was the lowest. In conclusion, the yield of tomato is highest, and the quality is best under T1 treatment.

**Key words:** tomato; solar greenhouse; quality; yield; inter-lighting supplementation; supplemental light period

收稿日期: 2019-10-16

基金项目: 甘肃省科技重大专项 (17ZD2NA015); 国家大宗蔬菜产业技术体系项目 (CARS-23-C-07); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0201205)

作者简介: 张 洋 (1995-), 男, 汉族, 甘肃瓜州人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培与生理生态研究。(E-mail) 554300709@qq.com

通讯作者: 郁继华, (E-mail) yujihua@gsau.edu.cn

在影响植物生长发育的各种环境因子中,光是影响植物生长发育及形态建成的关键环境因子之一<sup>[1]</sup>。光对植物的作用主要体现在两个方面:一是为植物的光合作用提供能量,二是作为信号物质,通过不同的光受体,来调控植物的生长发育和形态建成<sup>[2]</sup>。光是植物光合作用最重要的能量之一,不同环境下的光质是不相同的<sup>[3]</sup>,不同光质对植物生长发育的功能也不一样,主要是植物吸收的光质的波长不同,主要吸收特定波长的光,比如处于400~500 nm的蓝紫光和630~680 nm的红光<sup>[4-6]</sup>。

LED光源具有节能环保、体积小、质量轻、寿命长等特点,且光源装置多种多样,有很广泛的应用环境,同时,LED光源是一种冷光源,补光过程中可贴近植物照射不会因温度过高而引起植物灼伤。在LED光源照射条件下,一些生长空间较小的叶菜类作物可以得到有效光源,提高作物产量,空间利用率得到提升。LED光源的光谱可以根据不同植物生长发育的特性进行任意组合,满足植物光合作用以及形态建成调控的需求<sup>[7-8]</sup>。因此,LED光源已被广泛应用于生菜、油菜等叶菜类植物的工厂化生产<sup>[9-13]</sup>,在温室栽培中也被应用于萝卜、番茄、甜瓜等蔬菜作物的生产<sup>[14-17]</sup>。LED光源可以调控作物生长发育、提高作物产量及品质,这使得LED光源成为近几年人们研究设施蔬菜人工补光改善光环境的最佳光源。

在中国北方地区,冬季日光温室蔬菜栽培生产中由于白天光照时间短以及保温覆盖材料的污浊、损坏等,使得植株常常会受到弱光寡照环境的影响,致使蔬菜的产量和品质受到严重影响。如今,在冬季设施生产过程中,一些研究者利用LED光源进行人工补光,以此探究LED补光对日光温室冬季茄果类蔬菜生长、生理等方面的影响。LED补光处理根据光源设置位置不同,主要有顶部补光和株间补光。株间补光可以使光源散发出的光直接照射到植株的功能叶,较顶部补光可以促进光能的利用,所以可以更加有效地促进光合作用,促进光合产物的形成与积累。马艳等<sup>[18-20]</sup>研究发现,株间LED红蓝光补光可以显著增加番茄果实可溶性固形物、可溶性蛋白、 $V_c$ 含量,提高番茄产量。不同的补光时长对于番茄的产量和品质有不同的影响,王舒亚等<sup>[21]</sup>研究发现,在日光温室条件下,补光3 h可以显著提高番茄的产量和品质。李蔚等<sup>[22]</sup>的研究结果表明,补光7 h对番茄形态指标影响最大,补光9 h可以提升果实

品质,增产效果明显。

关于番茄补光方式、补光位置、补光时段以及不同补光时长的研究结果分别已有报道,但对于番茄补光的综合研究却很少。为了探究番茄补光这一综合问题,本试验以番茄品种粉太郎为研究材料,在日光温室条件下采用LED灯作为补光光源,通过不同时段株间补光处理番茄植株,探究不同时段株间补光处理对日光温室番茄品质和产量的影响,以得出在日光温室番茄生产中进行株间一定时长补光对番茄生长发育的适宜补光时段,为今后北方地区冬季日光温室越冬番茄高品质栽培提供理论基础。

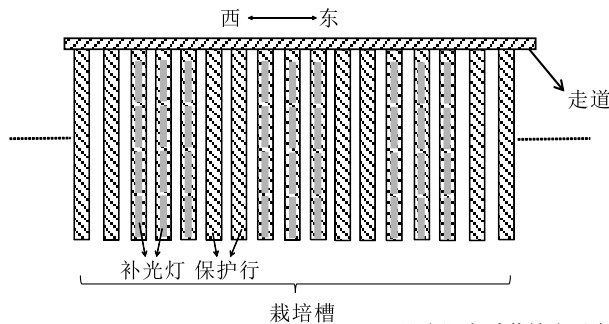
## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2018年10月至2019年6月在甘肃榆中县榆兴农庄日光温室中进行,该温室长60 m,跨度为10 m。采用槽式栽培,槽长宽深为9.00 m×0.40 m×0.25 m,每槽填充基质(购自甘肃省绿能农业科技股份有限公司)1 m<sup>3</sup>,共37槽,株距为0.45 m,灌溉方式为膜下滴灌。供试番茄品种为粉太郎(日本)。供试LED光源为深圳厚屹节能技术有限公司生产的HY-115CM-36×3 W-RB型红蓝光(红光:蓝光=7:2)LED植物生长灯,额定功率为108 W。

采用基质栽培,日光温室开帘时间为9:30,关帘时间为16:30,日照时间为7 h。随着日照时间的变化,开关帘的时间随之调整。育苗时间为2018年10月8日,幼苗长至3叶1心时进行定植,定植时间为11月24日,12月18日开始进行补光处理。本试验采用完全随机设计的试验方法,并对获得的结果进行方差分析。本试验共设置4个处理:不补光(CK);早晨揭帘前补光5.0 h(T1);晚上盖帘后补光5.0 h(T2);早晨揭帘前、晚上揭帘后各补光2.5 h(T3)。

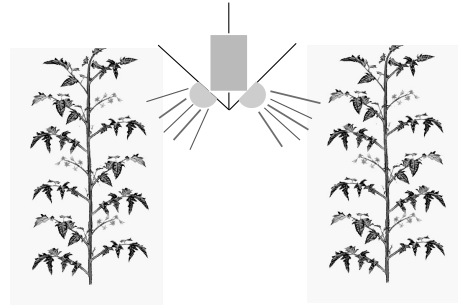
每个处理设置3次重复,按“Z”型取样标记10株番茄植株并测定相关指标。每个重复5组LED灯,共计90根灯管。每组垂直方向2根LED灯,2根LED灯以互相垂直的形式连接在一起,灯管与垂直方向呈45°夹角,光源照射区域为茎尖生长点以下的功能叶,随植株生长,光源位置也按需求上升。利用全自动定时补光控制系统控制LED灯的开关。每处理间设置2槽保护行以避免互相干扰。补光设计图见图1。



日光温室番茄补光示意图 (俯视图)

图 1 补光布置图

Fig.1 Layout of supplemental light test



## 1.2 测定项目及方法

待番茄成熟后,分批次进行采收,称量记录每处理单果质量,单株果数、亩产量。在番茄盛果期,对相同穗数且成熟度一致的番茄进行取样,并对相关指标进行测定。使用 GY-4 数显式水果硬度计测定果实硬度。使用万分之一电子天平称量番茄果实鲜质量;用 DGG-9140B 型恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司产品)105℃杀青 15 min 后,80℃烘干至恒质量,用万分之一电子天平称量番茄果实干质量;使用游标卡尺测量果实横径、纵径,以此来计算果形指数,果形指数为纵横径之比。

使用 PAL-1 手持式折射计测定可溶性固形物含量, $V_c$  含量使用 2,6-二氯酚靛酚钠法测定<sup>[23]</sup>,并略有改动,可溶性蛋白质含量用考马斯亮蓝法测定<sup>[23]</sup>,硝酸盐含量用水杨酸法测定<sup>[23]</sup>;有机酸含量用碱液滴定法测定;可溶性糖含量用蒽酮比色法测定<sup>[23]</sup>,糖酸比,即可溶性糖含量与有机酸含量之比。番茄红素的提取参照 T/CCMHP1.28—2018 的方法,稍加改动,使用高效液相色谱(HPLC)法测定。

## 1.3 数据处理及分析

用 Microsoft Word 2016 与 Microsoft Excel 2016 软件处理数据和作图,数据分析用 SPSS 20.0 软件,并运用 LSD 和 Duncan's 检验法对显著性差异( $P < 0.05$ )进行多重比较、描述,应用主成分分析法对测定指标进行综合分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同时段株间补光对番茄产量的影响

由表 1 可以看出,不同时段株间补光对番茄产量有显著差异。各补光处理产量均显著高于 CK,排序为 T1>T3>T2>CK。T1 处理单株果数和产量均显

著高于 CK。T2、T3 处理间在单果鲜质量、单株果数、产量上无差异。

表 1 不同时段株间补光对番茄产量的影响

Table 1 Effect of inter-lighting supplementation at different times on tomato yield

处理	单果鲜质量 (g)	单株果数 (个)	产量 (kg/667m <sup>2</sup> )
CK	118.89±3.74a	25.67±0.88b	5 497.77±267.46c
T1	129.55±7.09a	33.00±0.58a	7 691.96±87.59a
T2	120.74±2.79a	31.00±0.58a	6 743.26±317.12b
T3	121.16±3.34a	30.25±0.88a	6 837.57±265.81b

CK: 不补光; T1: 早晨揭帘前补光 5.0 h; T2: 晚上盖帘后补光 5.0 h; T3: 早晨揭帘前、晚上盖帘后各补光 2.5 h。同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著( $P < 0.05$ )。

### 2.2 不同时段株间补光对番茄外观品质的影响

从表 2 可以看出,番茄硬度在 5.12~7.95,各处理的番茄果实硬度均显著高于 CK。T1 处理番茄果实硬度最高,达到 7.95 kg/cm<sup>2</sup>,较 CK 高 55.27%,T2 处理与 T3 处理间无显著差异。单果鲜质量是体现果实发育的一个重要指标。番茄果实单果鲜质量各处理之间无差异。单果干质量是体现果实干物质积累的指标之一。T1 处理番茄单果干质量最大,达到 13.43 g,与 CK 差异显著。CK 的单果干质量最低,为 10.58 g,T2、T3 处理间单果干质量无差异。果实含水率各处理间无差异,均在 89%以上。各处理间果形指数无显著差异,T2、T3 处理的番茄果实属于扁圆形,CK 和 T1 处理的番茄果实属于圆形或经圆形。

### 2.3 不同时段株间补光对番茄内在品质的影响

由表 3 可知,各补光处理的番茄可溶性固形物含量显著高于 CK。T1 处理的番茄可溶性固形物含量最高,达到 10.44%,T2、T3 处理间番茄可溶性固形物含量无显著差异,CK 可溶性固形物含量最低,



仅为 7.78%。可溶性糖含量和有机酸含量的变化规律和可溶性固形物一致。T1 处理的番茄可溶性糖和有机酸均显著高于 CK, T2、T3 处理间可溶性糖含量无显著差异。CK 有机酸含量最低, T1、T2、T3 处理间有机酸含量无显著差异。各处理间糖酸比无显著差异。各处理番茄果实  $V_c$  含量依次为 T1>T2>T3>CK, T1 处理番茄果实  $V_c$  含量最高, 且显著高于 CK、T3 处理, T2、T3、CK 间无显著差异。与 CK 相比, 各补光处理均提高番茄可溶性蛋白质含量, 其中 T1 处理番茄可溶性蛋白质含量最高, 显著高于其他处理, 达到 0.52 mg/g, 较 CK 提高 642.86%, T2 处理与 CK 间无显著差异。T1 处理的番茄红素含

量显著高于其他处理, 其次为 T3 处理, T2 处理与 CK 无显著差异。各补光处理间硝酸盐含量无差异。

表 2 不同时段株间补光对番茄外观品质的影响

Table 2 Effects of inter-lighting supplementation at different times on appearance quality of tomatoes

处理	硬度 (kg/cm <sup>2</sup> )	单果鲜质量 (g)	单果干质量 (g)	含水率 (%)	果形指数
CK	5.12±0.02c	118.89±3.74a	10.58±0.31c	91.09±0.45a	0.83±0.02a
T1	7.95±0.08a	129.55±7.09a	13.43±0.53a	89.63±0.70a	0.83±0.04a
T2	6.74±0.06ab	120.74±2.79a	12.31±0.31ab	89.82±0.61a	0.79±0.02a
T3	6.63±0.04b	121.16±3.34a	12.05±0.22b	89.97±2.76a	0.79±0.01a

CK、T1、T2、T3 处理见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

表 3 不同时段株间补光对番茄内在品质的影响

Table 3 Effects of inter-lighting supplementation at different times on the internal quality of tomatoes

处理	可溶性固形物 含量 (%)	可溶性糖含量 (%)	有机酸含量 (%)	糖酸比	$V_c$ 含量 (mg/100 g)	可溶性蛋白质 含量 (mg/g)	硝酸盐含量 (μg/g)	番茄红素含量 (mg/100 g)
CK	7.78±0.61c	3.17±0.12b	1.22±0.10b	2.63±0.25a	65.74±1.11b	0.07±0.01c	85.58±2.32b	3.88±0.03c
T1	10.44±0.09a	4.56±0.56a	1.99±0.33a	2.71±0.03a	72.05±2.64a	0.52±0.04a	130.63±2.45a	5.21±0.19a
T2	8.78±0.12bc	3.66±0.12ab	1.35±0.04ab	2.31±0.35a	68.78±1.10ab	0.11±0.01bc	131.63±2.47a	3.95±0.02bc
T3	9.05±0.28b	3.18±0.06b	1.29±0.16ab	2.47±0.19a	66.59±0.64b	0.17±0.05b	137.21±1.65a	4.26±0.10b

CK、T1、T2、T3 处理见表 1 注。同一列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

## 2.4 不同时段株间补光处理间番茄品质的相关性分析

本试验研究了不同时段株间补光对番茄果实的影响, 并对其 13 个品质指标进行了相关性分析(表 4)。硬度与单果干质量呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 相关系数为 0.999, 与可溶性固形物含量呈显著正相关( $P<0.05$ ), 相关系数为 0.975; 单果鲜质量与可溶性固形物含量、番茄红素含量呈显著正相关( $P<0.05$ ), 相关系数分别为 0.952、0.985; 与有机酸含量和可溶性蛋白质含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 相关系数分别为 0.992、0.996; 单果干质量与可溶性固形物含量呈显著正相关( $P<0.05$ ), 相关系数为 0.964; 可溶性糖含量与有机酸含量、 $V_c$  含量呈显著正相关( $P<0.05$ ), 相关系数分别为 0.971、0.988; 有机酸含量和可溶性蛋白质含量、番茄红素含量呈显著正相关( $P<0.05$ ), 相关系数分别为 0.982、0.961; 可溶性蛋白质含量与番茄红素含量呈极显著相关( $P<0.01$ ), 相关系数为 0.996。由此分析可得, 番茄的各项品质指标间存在一定的相关性和依存关系。

## 2.5 不同时段株间补光处理间番茄果实品质的主成分分析

主成分分析是利用降维的思想, 通过对指标体

系内部结构关系的研究, 将多个指标转化为相互独立的综合指标。新的综合变量可以反映原始变量提供的主要信息, 从而简化数据结构并找到变量之间的关系<sup>[24]</sup>。影响瓜菜品质的因素有许多, 仅靠其中的几个指标难以说明整个处理效果。本试验通过对硬度、单果鲜质量、单果干质量、含水率等 13 项指标进行主成分分析, 综合评价番茄各项品质指标对番茄品质的影响。

通过主成分分析得到主成分特征值、贡献率和累计贡献率。本研究中按照累计贡献率大于 99% 的原则选择主要成分。由表 5 可得, 第一主成分的特征值为 9.504, 代表本试验 4 个处理 13 项品质指标 73.106% 的信息。第二主成分的特征值为 3.109, 代表本试验 4 个处理 13 项品质指标 23.914% 的信息。第三主成分的特征值为 0.387, 代表本试验 4 个处理 13 项品质指标 2.98% 的信息。前 3 个主成分可以反映 13 项品质指标 100% 的综合性状。说明这 3 个主成分反映了原始变量的 100% 的信息。因此提取前 3 个主成分替代原 13 项品质指标评价番茄品质。对番茄品质评价由原来的 13 个方面降为 3 个彼此不相关的主成分, 达到了降维的目的。

表 4 番茄果实品质指标的相关性

Table 4 Correlation of tomato fruit quality indicators

指标	硬度	单果鲜质量	单果干质量	含水率	果形指数	可溶性固形物含量	可溶性糖含量	有机酸含量	糖酸比	V <sub>C</sub> 含量	可溶性蛋白质含量	番茄红素含量	硝酸盐含量
硬度	1.000	0.882	0.999 **	-0.939	-0.075	0.975 *	0.848	0.849	0.101	0.906	0.852	0.846	0.808
单果鲜质量		1.000	0.872	-0.666	0.398	0.952 *	0.942	0.992 **	0.545	0.926	0.996 **	0.985 *	0.455
单果干质量			1.000	-0.944	-0.086	0.964 *	0.855	0.843	0.071	0.915	0.837	0.827	0.807
含水率				1.000	0.409	-0.847	-0.656	-0.620	0.240	-0.759	-0.621	-0.619	-0.947
果形指数					1.000	0.103	0.393	0.463	0.911	0.248	0.435	0.411	-0.634
可溶性固形物含量						1.000	0.870	0.915	0.313	0.899	0.940	0.942	0.704
可溶性糖含量							1.000	0.971 *	0.408	0.988 *	0.911	0.871	0.389
有机酸含量								1.000	0.559	0.946	0.982 *	0.961 *	0.378
糖酸比									1.000	0.278	0.604	0.614	-0.401
V <sub>C</sub> 含量										1.000	0.887	0.849	0.515
可溶性蛋白质含量											1.000	0.996 **	0.421
番茄红素含量												1.000	0.440
硝酸盐含量													1.000

\* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

表 5 品质指标主成分分析

Table 5 Principal component analysis of quality indicators

项目	第一主成分	第二主成分	第三主成分
特征值	9.504	3.109	0.387
贡献率 (%)	73.106	23.914	2.980
累计贡献率 (%)	73.106	97.020	100.000

## 2.6 不同时段株间补光处理间番茄果实品质综合评价

根据主成分分析可得,前 3 个主成分的累计贡献率达到 100.0%,所以可使用这 3 个主成分来构建分析模型。用各品质指标的主成分载荷(表 6)除以相对应主成分特征值的开平方根,得到 3 个主成分中每个品质指标所对应的系数即特征向量,以特征向量为权重构建 3 个主成分的函数表达式:

$$Z_1 = 0.31x_1 + 0.31x_2 + 0.31x_3 - 0.26x_4 + 0.07x_5 + 0.31x_6 + 0.32x_7 + 0.31x_8 + 0.09x_9 + 0.32x_{10} + 0.30x_{11} + 0.29x_{12} + 0.19x_{13}$$

$$Z_2 = -0.15x_1 + 0.13x_2 - 0.16x_3 + 0.33x_4 + 0.55x_5 - 0.04x_6 + 0.11x_7 + 0.16x_8 + 0.51x_9 + 0.02x_{10} + 0.15x_{11} + 0.15x_{12} - 0.43x_{13}$$

$$Z_3 = 0.31x_1 + 0.35x_2 + 0.23x_3 - 0.23x_4 - 0.10x_5 + 0.50x_6 - 0.20x_7 + 0.16x_8 + 0.55x_9 - 0.19x_{10} + 0.46x_{11} + 0.60x_{12} + 0.49x_{13}$$

上述 3 个表达式中, $x_1$  为硬度、 $x_2$  为单果鲜质量、

$x_3$  为单果干质量、 $x_4$  为含水率、 $x_5$  为果形指数、 $x_6$  为可溶性固形物含量、 $x_7$  为可溶性糖含量、 $x_8$  为有机酸含量、 $x_9$  为糖酸比、 $x_{10}$  为 V<sub>C</sub> 含量、 $x_{11}$  为可溶性蛋白质含量、 $x_{12}$  为番茄红素含量、 $x_{13}$  为硝酸盐含量。以各个主成分对应的方差贡献率作为权重,由主成分得分和对应的权重线性加权求和得到综合评价函数。

$$\text{综合得分} = 0.73Z_1 + 0.24Z_2 + 0.03Z_3$$

根据主成分综合的得分模型,可计算出 4 个不同时段株间补光处理下的番茄品质的综合得分和排序(表 7)。各处理得分依次为 T1、T2、T3、CK。

表 6 品质指标主成分载荷矩阵

Table 6 Principal component load matrix of quality index

指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分
硬度	0.946	-0.261	0.191
单果鲜质量	0.951	0.223	0.216
单果干质量	0.950	-0.277	0.141
含水率	-0.805	0.577	-0.140
果形指数	0.204	0.977	-0.065
可溶性固形物含量	0.947	-0.072	0.314
可溶性糖含量	0.974	0.191	-0.122
有机酸含量	0.954	0.281	0.102
糖酸比	0.285	0.896	0.340
V <sub>C</sub> 含量	0.992	0.039	-0.119
可溶性蛋白质含量	0.918	0.273	0.288
番茄红素含量	0.890	0.260	0.374
硝酸盐含量	0.585	-0.751	0.306

表 7 综合得分和排序

Table 7 Comprehensive score and ranking

处理	Z <sub>1</sub>	Z <sub>2</sub>	Z <sub>3</sub>	综合得分	排序
CK	-3.09	1.79	-2.94	-1.91	4
T1	4.17	1.22	3.87	3.45	1
T2	-0.43	-1.75	-1.13	-0.76	2
T3	-0.65	-1.27	0.20	-0.78	3

CK、T1、T2、T3 处理见表 1 注。

### 3 讨 论

番茄为喜光植物,同时是北方地区日光温室主栽的蔬菜品种之一。在番茄的生长发育过程中,植株所处的光环境是影响其光合作用、果实产量、品质的关键因子<sup>[25]</sup>。LED 补光技术可以解决冬季日光温室光照不足的问题,并能够使黄瓜果实的商品外观和营养品质有一定程度的改善,也可以提高果实质量、单株结果数与产量,对其干物质的积累有良好的作用<sup>[3,26]</sup>。

在本研究中,番茄植株经过不同时段株间补光处理后,T1 处理番茄的产量最高,显著高于 CK,其他补光处理也高于 CK,这与林婧<sup>[27]</sup>、王舒亚等<sup>[21]</sup>、钱舒婷<sup>[28]</sup>、崔晓辉<sup>[29]</sup>在番茄和薄皮甜瓜上的研究结果相符,说明不同时段 LED 株间补光处理能够延长植株的光合作用,促进有机物积累,进一步提高番茄产量。孙天宇等<sup>[30]</sup>研究发现,LED 红蓝光处理下,可以提高薄皮甜瓜硬度,在本试验中 T1 处理番茄的硬度最高,显著高于 CK,说明补光处理可能通过提高番茄果皮中的纤维素及果胶含量,进一步提高硬度,提高果品贮藏性能方便长距离运输。杨俊伟等<sup>[15]</sup>使用 LED 红蓝光处理番茄,发现可以促进植株的干物质积累。刘福霞等<sup>[31]</sup>的研究结果表明,LED 补光可以促进生菜干物质的积累。在对番茄进行不同时段株间补光后,T1 处理番茄单果干质量最大,说明早晨对番茄进行补光处理可以促进番茄果实干物质的积累,这与本研究结果相同。各处理下番茄含水率及果形指数没有显著差异,说明补光处理对番茄果形没有显著的影响。番茄果实中可溶性固形物含量、V<sub>c</sub> 含量、糖酸比是检测番茄果实品质的重要指标<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,早晨补光可以提高番茄可溶性固形物含量、V<sub>c</sub> 含量、有机酸含量及可溶性糖含量,这与刘露<sup>[33]</sup>、刘晓英<sup>[34]</sup>、孙娜<sup>[35]</sup>、钱舒婷<sup>[28]</sup>在番茄,苏立芳<sup>[26]</sup>、祁娟霞等<sup>[36]</sup>在黄瓜上

的研究结果相同,说明早晨揭帘前对番茄进行 LED 株间补光处理可以提高番茄的风味,营养价值更高。如今许多番茄已经没有明显的风味,使用 LED 光源补光处理则使番茄发挥出其原有的风味品质。可溶性蛋白质是重要的渗透调节物质和营养物质,植物体内的可溶性蛋白质大多参与各种酶类代谢,同时易于人体吸收,参与调节生理功能并为人体提供能量<sup>[37]</sup>。在进行不同时段株间 LED 补光后,各处理的可溶性蛋白质含量均高于 CK,其中 T1 处理可溶性蛋白质含量最高,说明 LED 补光处理可以提高可溶性蛋白质含量,这与刘露<sup>[33]</sup>、李海达等<sup>[38]</sup>、在番茄上的研究结果一致。

番茄红素是一种富含在番茄中,也存在于多种蔬菜水果中的类胡萝卜素<sup>[39]</sup>,多项研究结果表明它是一种重要的抗氧化物质<sup>[40]</sup>,是评价番茄品质的一项重要指标。孙娜等<sup>[41]</sup>、Xie 等<sup>[42]</sup>研究发现,LED 红蓝配比光可以提高番茄果实中番茄红素含量,补充蓝光和红光可以诱导番茄红素的合成,提高番茄果实中番茄红素的含量,经过补光处理后,相对于对照,早晨揭帘前补光 5 h 番茄中的番茄红素含量均显著高于其他补光处理,这与前人的研究结果相同。果实中过多的硝酸盐不仅危害人体健康,也对生态环境构成一定威胁<sup>[43]</sup>。经过试验测定,各补光处理番茄果实硝酸盐含量无显著差异。程瑞峰等<sup>[44]</sup>在黄瓜补光研究中发现,早晨进行补光时温室内 CO<sub>2</sub> 浓度高,为叶片的光合作用提供了充足的碳源,相对湿度也较夜间大,叶肉阻力小,此时进行补光相比夜间补光效果更佳,另外在白天黄瓜持续进行光合作用,积累了大量有机物,由于这些光合产物没有及时输出,抑制了夜间补光时的光合作用。杨振华<sup>[45]</sup>经过研究发现,在冬季日光温室条件下,设施草莓应用红蓝配比 LED 植物补光灯进行早晨补光处理后,草莓植株的生长受到显著促进,品质及产量相对夜间补光明显提高,所以较晚上盖帘后补光,早晨揭帘前补光效果更好,可以使叶片更好地进行光合作用,积累有机物,从而改善果实品质,提高产量。

经过对不同时段株间补光处理番茄果实的 13 个品质指标进行相关分析,可得出以下结果:果皮硬度和单果干质量呈极显著正相关,与可溶性固形物含量呈显著正相关;单果鲜质量与可溶性固形物含量、番茄红素含量呈显著正相关,与有机酸含量和可溶性蛋白质含量呈极显著正相关;单果干质量含量



与可溶性固形物含量呈显著正相关;可溶性糖含量与有机酸含量、 $V_c$ 含量呈显著正相关;有机酸含量与可溶性蛋白质含量、番茄红素含量呈显著正相关;可溶性蛋白质含量与番茄红素含量呈极显著相关。由分析可得,番茄的品质指标之间存在着密切的相关性,共同决定番茄的品质。

采用主成分分析方法对不同时段株间补光处理与番茄果实品质指标的关系进行综合评价。此方法较其他分析比较方法,更加全面、直观地揭示番茄各项品质指标之间对番茄品质整体的一个贡献程度,此分析方法得出的结果更具说服力。根据主成分综合的得分模型,结果显示:T1处理的得分最高,其次为T2、T3处理,得分最低的为CK。

本试验在总结前人研究的基础上,在补光时长一定的条件下,探究了使用LED光源,在不同时段株间补光对日光温室番茄品质和产量的影响,一定程度上说明了不同时段株间LED补光对日光温室番茄产量和品质的影响,但本研究在补光时长方面未作进一步探究,对于不同时段条件下最佳的补光时长还需进一步研究。综上所述,结合对番茄果实品质、产量的对比分析,本试验认为冬季早晨揭帘前补光5 h可以提高冬季日光温室番茄的品质和产量。

## 参考文献:

- [1] 邓波,尚旭兰,刘桂华,等.不同季节遮荫对青钱柳生长和主要次生代谢物积累的影响[J].北京林业大学学报,2017,39(9):66-75.
- [2] 王虹,王颖,阎君,等.不同比例的红蓝光对黄瓜幼苗生长及光合特性的影响[J].浙江农业学报,2018,30(11):1879-1885.
- [3] 王华硕.LED补光对日光温室黄瓜、番茄、草莓生长发育及品质的影响[D].邯郸:河北工程大学,2018.
- [4] WANG H, GU M, CUI J, et al. Effects of light quality on  $CO_2$  assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus* [J]. Journal of Photochemistry & Photobiology B Biology, 2009, 96(1):30-37.
- [5] PFFINDEL E, BAAKE E. A quantitative description of fluorescence excitation spectra in intact bean leaves greened under intermittent light[J]. Photosynthesis Research, 1990, 26(1):19-28.
- [6] 杨其长,徐志刚,陈弘达,等.LED光源在现代农业的应用原理与技术进展[J].中国农业科技导报,2011,13(5):37-43.
- [7] 王声学,吴广宁,蒋伟,等.LED原理及其照明应用[J].灯与照明,2006(4):32-35.
- [8] 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.
- [9] 查凌雁,刘文科.LED红蓝光连续光照对五种生菜生长、光合和叶绿素荧光特性的影响[J].植物生理学报,2017,53(9):1735-1741.
- [10] 王涛,兰婕,陈永快,等.LED红蓝光配比对生菜生长及生理特性的影响[J].江苏农业科学,2019,47(22):199-203.
- [11] 侯红英.人工调光环境下蔬菜生长的研究[D].青岛:中国海洋大学,2006.
- [12] 黄碧阳,林碧英,李彩霞,等.LED红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(7):131-135.
- [13] 周成波,张旭,崔青青,等.LED补光光质对小白菜生长及光合作用的影响[J].植物生理学报,2017,53(6):1030-1038.
- [14] 查凌雁,刘文科.LED红蓝光质比及其光周期对樱桃萝卜品种生长与产量的影响[J].照明工程学报,2017,28(6):83-86,91.
- [15] 杨俊伟,鲍恩财,张珂嘉,等.不同红蓝光比例对番茄幼苗叶片结构及光合特性的影响[J].西北农业学报,2018,27(5):716-726.
- [16] 刘晓英,焦学磊,徐志刚,等.不同红蓝LED光照强度对樱桃番茄幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J].南京农业大学学报,2015,38(5):772-779.
- [17] 祁娟霞,韦峰,董艳,等.不同补光时间对日光温室甜瓜生长发育的影响[J].浙江农业学报,2016,28(6):979-983.
- [18] 马艳,喻晨,王瑞,等.不同LED补光时间对日光温室番茄生长发育及光合特性的影响[J].新疆农业科学,2019,56(8):1469-1475.
- [19] 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):132-138,146.
- [20] 陈强,刘世琦,张自坤,等.不同LED光源对番茄果实转色期品质的影响[J].农业工程学报,2009,25(5):156-161.
- [21] 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.
- [22] 李蔚,李新旭,李红岑,等.植物生长灯不同补光时间对日光温室番茄产量及品质的影响[J].安徽农业科学,2019,47(11):49-50,55.
- [23] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [24] 张鹏.基于主成分分析的综合评价研究[D].南京:南京理工大学,2004.
- [25] 李金娜,方海田,刘慧燕,等.不同贮藏温度对采后碧娇樱桃番茄生理和品质的影响[J].食品工业,2019,40(3):111-115.
- [26] 苏立芳.LED补光对日光温室黄瓜生长、生理指标及品质的影响[D].邯郸:河北工程大学,2018.
- [27] 林婧.LED补光对樱桃番茄生长发育、产量及品质的影响[D].邯郸:河北工程大学,2018.
- [28] 钱舒婷.不同补光灯对设施草莓、番茄光合生长及产量品质的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2018.
- [29] 崔晓辉.LED补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.

- [30] 孙天宇,于锡宏,蒋欣梅.不同光质 LED 补光对甜瓜果实生长发育及品质的影响[J].长江蔬菜,2017(20):72-75.
- [31] 刘福霞,刘乃森.不同光质对生菜幼苗生长的影响[J].北方园艺,2014(21):53-56.
- [32] 亓艳艳,骆洪义,公华锐,等.黄腐酸对基质栽培番茄生长、产量及品质的影响[J].山东农业科学,2018,50(5):87-91.
- [33] 刘 露.不同留果穗数和不同补光时间对番茄品质及产量的影响[D].咸阳:西北农林科技大学,2018.
- [34] 刘晓英.LED 光源对樱桃番茄生育和光合作用影响的研究[D].南京:南京农业大学,2010.
- [35] 孙 娜.光质对番茄生长、生理代谢及果实产量品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2015.
- [36] 祁娟霞,韦 峰,董 艳,等.不同补光时间对温室番茄生长发育的影响[J].江苏农业科学,2016,44(8):245-248.
- [37] 刘 慧,张静林,刘杰超,等.施硒对樱桃番茄贮藏品质及 3 种活性氧代谢酶的影响[J].食品工业科技,2019,40(24):256-261.
- [38] 李海达,吉家曾,郑桂建,等.不同 LED 补光光源对樱桃番茄产量和品质的影响[J].广东农业科学,2014,41(14):37-40,46.
- [39] 袁平丽,李 智,赵胜杰,等.西瓜种质资源番茄红素含量评价[J].江苏农业科学,2018,46(7):115-120.
- [40] 付兴周,路志芳,申海燕.番茄红素复合添加剂对肉鸡生长性能、免疫器官指数及肉质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(19):202-205.
- [41] 孙 娜,李 岩,魏 珉,等.补光对日光温室越冬番茄生长及产量品质的影响[J].天津农业科学,2014,20(3):91-93,96.
- [42] XIE B X, WEI J J, ZHANG Y T, et al. Supplemental blue and red light promote lycopene synthesis in tomato fruits[J].Journal of Integrative Agriculture,2019,18(3):590-598.
- [43] 张钧恒,马乐乐,李建明.全有机营养肥水耦合对番茄品质、产量及水分利用效率的影响[J].中国农业科学,2018,51(14):2788-2798.
- [44] 程瑞锋,邹志荣,王 军.外源补光状态下温室黄瓜光合作用的研究[J].陕西农业科学,2004(3):17-18.
- [45] 杨振华.不同补光时段对日光温室草莓生长的影响[J].山西农业科学,2019,47(6):1002-1004.

(责任编辑:陈海霞)