

不同转红光棚膜对甜椒光合特性及果实品质的影响

李岩^{1,2,3,4,*}, 文莲莲¹, 焦娟^{1,5}, 魏珉^{1,2,3,4}, 史庆华^{1,2,3,4}, 杨凤娟^{1,3,4}, 王秀峰^{1,3}, 米庆华⁶

山东农业大学¹园艺科学与工程学院, ²农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站, ³作物生物学国家重点实验室, ⁴山东果蔬优质高效生产协同创新中心, 山东泰安271018; ⁵泰安市农业科学研究院, 山东泰安271000; ⁶山东农业大学发展规划处, 山东泰安271018

摘要: 为了筛选适合甜椒设施生产栽培的优质棚膜, 本试验以红色甜椒品种‘凯特琳’为试材, 研究加入红色母粒的涂覆型消雾无滴转红光棚膜的透光性及对甜椒植株生长、光合色素含量、光合特性、果实产量和品质的影响。结果表明: 转光剂种类不同, 对日光温室光环境、甜椒生长发育均有显著影响。与对照及其他棚膜相比, KMN-2试验膜能够明显促进甜椒胚轴伸长和干物质积累, 叶绿素a/b值、类胡萝卜素含量和光合性能均显著提高, 有利于果实增产, 果实可溶性糖、维生素C (Vc)和游离氨基酸含量明显增加。红色膜覆盖均明显诱导了甜椒果实花青苷的积累, 特别是KMN-2棚膜覆盖下果实花青苷含量比对照提高了41.40%。与对照和其他处理相比, KMN-2棚膜覆盖显著诱导果实苯丙氨酸解氨酶(PAL)和查耳酮异构酶(CHI)活性升高。综上, 红色膜中加入适宜转光剂能够提高甜椒光合效率, 促进植株生长, 进而增加产量, 同时诱导丙苯氨基酸途径中关键酶活性的变化, 促使花青苷积累。

关键词: 涂覆膜; 转光剂; 甜椒; 光合特性; 花青苷

光质对植物形态建成、生理代谢和果实品质等方面具有明显的调控作用(苏娜娜等2013; Hernández和Kubota 2016)。由于受设施方位、骨架结构和覆盖材料等的影响, 设施内光谱组成发生较大改变(张福墁2000)。因此, 调节好设施内的光环境尤其是光质是实现设施作物高产优质的重要条件。

设施内光质调控主要通过两种途径, 即覆盖材料和人工光源(苏娜娜等2013)。前者在设施蔬菜生产过程中起举足轻重的作用(李晔等2007), 可以实现作物的反季节上市, 而且能提高产量和品质(胡飞虎和丁为民2009)。其中, 塑料薄膜由于具有质地柔韧、经济、便于安装、透光能力强等优点而被广泛应用, 成为当今温室、塑料大棚等园艺设施的主要覆盖材料(张福墁2000)。此外, 植物光合作用的光谱与叶绿素的吸收光谱具有一致性, 主要集中在红橙光和蓝紫光区(Andrew等1997)。不同颜色薄膜可以通过改变温室内光谱构成, 对作物生长发育产生影响(刘寿东等2010)。前人研究证明, 采用红色薄膜覆盖有利于作物生长, 提高果实产量及品质(曹明等2017)。国内外学者依据光生态学原理, 通过在普通农用塑料薄膜中添加转光剂研发出转光膜, 将紫外光或植物利用较少的黄绿光转换为对光合作用有利的蓝紫光和红橙光(张颂培等2002), 从而达到调控植物生长发育的目的。目前, 转光膜的研究十分活跃, 并已成为农用薄膜功能化技术的重要发展方向。

甜椒是我国与世界设施栽培的主要蔬菜之一, 其果实的着色状况在很大程度上决定其外观品质, 对于红色甜椒而言, 果皮花青苷的合成对果实着色起决定性作用。光质也在一定程度上影响花青苷的合成(高燕会等2012), 但不同光质对甜椒果实花青苷积累及其合成途径中相关酶活性的调节作用研究报道较少。因此, 本试验在笔者前期研究的基础上(李岩等2016a), 以涂覆型消雾无滴无色EVA棚膜为对照, 根据甜椒对光质的需求特性, 研究了添加可将绿光转化为红橙光的不同转光剂的涂覆型消雾无滴红色EVA棚膜覆盖条件下日光室内光环境及甜椒生长发育和果实产量及着色品质的变化, 为筛选适合甜椒设施生产的优质棚膜提供理论依据。

材料与方法

1 供试材料与试验设计

试验于2016年8月~2017年1月在山东省莱芜市方下镇卢家庄山东农业大学农用薄膜试验示范基地

收稿 2017-09-01 修定 2017-11-15
资助 国家自然科学基金(31401921)、山东省自然科学基金(ZR-2014CQ029)、国家科技支撑计划(2014BAD05B03)、现代农业产业技术体系专项资金(CARS-25)、山东农业大学科技创新团队设施园艺优势团队(SYL2017YSTD07)、国家重点研发计划(2016YFB0302403)和国家公益性行业(农业)科研专项(201303108)。

* 通讯作者(E-mail: edmonlee@163.com)。

地的生产型日光温室内进行, 供试红色甜椒(*Capsicum annuum* L.)品种‘凯特琳’(商品苗由莱芜市农科院提供)。2016年8月10日定植, 10月25日覆膜, 2017年1月16日采收。株距40 cm, 行距65 cm。温室覆盖外保温被(冬季晴天每天8:30~16:30掀开; 阴天每天9:00~16:00揭开), 其长度65 m, 脊高3.3 m, 内跨10 m。覆盖材料由转红光的涂覆型消雾无滴红色EVA棚膜KMN-1 (转光剂种类: KMN-1)、KMN-2 (转光剂种类: KMN-2)、KMN-3 (转光剂种类: KMN-3)及对照膜CK (涂覆型消雾无滴无色EVA棚膜)等距离拼接而成。棚膜均由山东天鹤塑胶股份有限公司生产, 厚度为0.08 mm。每处理设一个小区, 从中选取10株定期观察测定。田间肥水管理按常规进行。

2 测定项目与方法

2.1 温室光环境测定

光谱采用UPRtek-MK350便携式光谱分析仪(群耀科技股份有限公司, 台湾)测定。自2016年10月28日开始每隔30 d测定1次, 共测定3次, 取平均值。为避免或减少2块棚膜之间的相互影响, 测定项目均在每块棚膜中央下方进行。测定波段为360~750 nm, 扫描波长间隔1 nm, 扫描集成时间8 ms, 输出的光谱值是光电流信号比特, 根据峰面积计算各波段光透过率。

光照强度采用PHR-51型照度计(T&D公司, 日本)测定, 温室内外分别采用三脚架固定仪器, 调节高度使其探头距地面1.2 m处。从11:00~13:00采集数据, 测定日期同光谱。透光率(T)= $R_i/R_o \times 100\%$, 式中 R_i 、 R_o 分别是在温室内和温室外处水平面所测的光照强度, 单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (李强等2010)。

2.2 植株形态指标测定

各处理分别于定植后120 d时(下同)测定株高、茎粗、节间长度、叶片纵、横径、地上和地下部干重。植株的株高为植株地上部根部至生长点距离, 采用卷尺测量; 茎粗从地上部根部采用游标卡尺进行测量(测量部位为植株基部第1叶叶下1 cm处); 节间长度在植株第2~3节位之间采用游标卡尺进行测定; 叶片纵、横径选基部以上第2叶片中心点采用游标卡尺测定其长和宽; 分解甜椒植株各器官, 105°C下杀青20 min, 70°C烘干至恒重, 称量干重。

2.3 叶片光合色素含量动态测定

取3株长势一致的植株, 于10:00~11:30 (下同), 选上数第3片完全展开的叶片, 参考邹琦(1995)的方法, 测定叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素含量, 并计算叶绿素a+b和a/b值。

2.4 叶片光合参数测定

采用LI-6400便携式光合测定仪(LI-COR公司, 美国)在各棚膜下测定甜椒植株上数第4叶的光合参数(常涛涛2010): 净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)及蒸腾速率(T_r)。光量子通量密度 $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度(23 ± 1)°C, CO_2 浓度(400 ± 10) $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

2.5 果实产量测定

根据株、行距, 计算每亩(1亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$)定植株数; 沿对角线随机取3个点, 每点连续调查10株, 统计坐果数, 计算平均单株结果数; 采收期一次性采收果实称重, 计算平均单果重, 缩值系数取0.90, 产量按下列公式计算:

产量($\text{kg} \cdot \text{亩}^{-1}$)=单果重 $\times$ 单株结果数 $\times$ 每亩定植株数 $\times 0.90$ (缩值系数)。

2.6 果皮中花青苷含量测定

参照冯守千等(2008)的方法, 采收期将达到商品成熟的果实用于花青苷含量测定。每个处理各取5个果实, 将果皮切碎充分混合, 取0.5 g果皮鲜样, 放入10 mL 1% HCl甲醇溶液4°C浸提2 h。用分光光度计测定提取液在553和600 nm处吸光值, 二者之差表示花青苷的相对含量。为计算方便把差值增加0.01定义为1单位(U)。

2.7 果皮丙氨酸解氨酶(PAL)和查耳酮异构酶(CHI)活性测定

参照王慧聪等(2004)的方法提取PAL、CHI粗提液。参照Lister和Lancaster (1996)的方法测定PAL、CHI的活性。

2.8 果实其他品质测定

采收期将达到商品成熟的果实用于品质测定。果实转色面积大于1/2计为转色, 转色率=转色果数/果实总数 $\times 100\%$; 蒽酮比色法测定可溶性糖含量(赵世杰等1998), 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定Vc含量(刘春生和杨守祥1996), 考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白质含量(赵世杰等1998), 茚三酮比色法测定游离氨基酸含量(曹建康和姜微波2007)。

3 数据处理

试验数据采用3个重复的平均值, 用DPS 7.05和OriginPro 7.5软件对数据进行统计分析和绘图, 并运用Duncan检验法进行多重比较和差异显著性检验($\alpha=0.05$)。图表数据为平均值±标准差。

实验结果

1 不同转红光棚膜对日光温室内光照条件的影响

对不同棚膜透过光谱进行分析可以看出(表1), 红色转光膜在紫光、蓝光和绿光区段的投射比

率均显著低于对照($P<0.05$), 其中, KMN-2棚膜透过紫光和蓝光比率显著低于其他处理; 该膜透过红橙光比率较对照和其他处理显著提高, 其中透射光谱在红橙光区较对照提高37.80%; 与对照相比, KMN-1和KMN-3膜显著提高了远红光波段的透射率, 且两处理之间无显著差异, KMN-2次之。

三种试验膜的平均透光率均显著低于对照($P<0.05$), 透光率降低与试验膜中加入红色母粒有关。其中, 透光率KMN-1和KMN-2之间无显著差异, KMN-3则明显低于前两者。

表1 不同转红光棚膜覆盖的投射光谱比率和透光率

Table 1 Ratio of representative irradiance spectrum and transmittance under different turning red light films

处理	投射光谱比率/%					透光率/%
	紫光(400~440 nm)	蓝光(440~510 nm)	绿光(510~610 nm)	红橙光(610~710 nm)	远红光(710~760 nm)	
CK	7.80±0.06 ^a	18.19±0.06 ^a	27.65±0.05 ^a	21.59±0.07 ^c	10.79±0.05 ^c	85.5±0.6 ^a
KMN-1	6.72±0.05 ^c	17.23±0.12 ^b	20.88±0.12 ^c	27.36±0.07 ^b	13.85±0.12 ^a	76.7±0.6 ^b
KMN-2	6.24±0.02 ^d	16.72±0.03 ^c	20.23±0.04 ^c	29.75±0.11 ^a	13.26±0.08 ^b	77.9±0.4 ^b
KMN-3	7.28±0.03 ^b	17.07±0.08 ^b	21.53±0.08 ^b	27.38±0.09 ^b	14.09±0.06 ^a	73.7±0.4 ^c

不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$), 下同。

2 不同转红光棚膜对甜椒生长的影响

植株的生长量大小在一定程度上反映了植株同化产物的累积量及其生长的健壮程度。由表2可以看出, 不同棚膜覆盖下甜椒植株长势差异明显。与对照和其他处理相比, KMN-2棚膜显著促进了甜椒生长($P<0.05$), 株高和节间长度增加, 叶片横径增大; KMN-1棚膜次之, 但其节间长度和叶片横径与对照无显著差异; KMN-3棚膜覆盖下植株长势较弱, 但株高、节间长度和叶片横径与对照差异不明显; 茎粗以对照最高, 叶片纵径则以KMN-1棚膜最高。

与对照和其他棚膜相比, KMN-2膜覆盖有利于甜椒生物量增加(图1), 其地下部干质量与KMN-1之

间无显著差异, KMN-3和对照最低, 但两者之间差异不显著。综合比较, KMN-2棚膜最有利于甜椒植株生长。

3 不同转红光棚膜对甜椒叶片光合色素含量的影响

由表3可知, 不同棚膜覆盖对甜椒叶片光合色素含量的影响差异显著。红色试验膜覆盖下叶绿素含量显著低于无色对照膜($P<0.05$), 覆盖红色膜虽然降低了甜椒叶绿素含量, 但明显提高了叶绿素a/b值; 不同试验膜覆盖下, 叶绿素a、b含量及叶绿素总量均以KMN-1最高, KMN-3次之, 但叶绿素a、b含量两处理之间无显著差异; 类胡萝卜素含量则以覆盖KMN-2为最高。

表2 不同转红光棚膜对甜椒植株生长的影响

Table 2 Effects of different turning red films on plant growth of sweet pepper

处理	株高/cm	茎粗/cm	节间长度/cm	叶片纵径/cm	叶片横径/cm
CK	111.87±6.53 ^c	1.72±0.03 ^a	5.50±0.07 ^{bc}	14.63±0.40 ^b	15.13±0.39 ^{bc}
KMN-1	120.67±3.90 ^b	1.62±0.05 ^b	5.63±0.14 ^b	16.10±0.55 ^a	15.87±0.53 ^b
KMN-2	126.23±2.81 ^a	1.58±0.10 ^{bc}	6.10±0.09 ^a	15.10±0.49 ^b	17.17±0.41 ^a
KMN-3	110.33±4.09 ^c	1.51±0.08 ^c	5.42±0.11 ^c	13.93±0.36 ^c	14.97±0.44 ^c

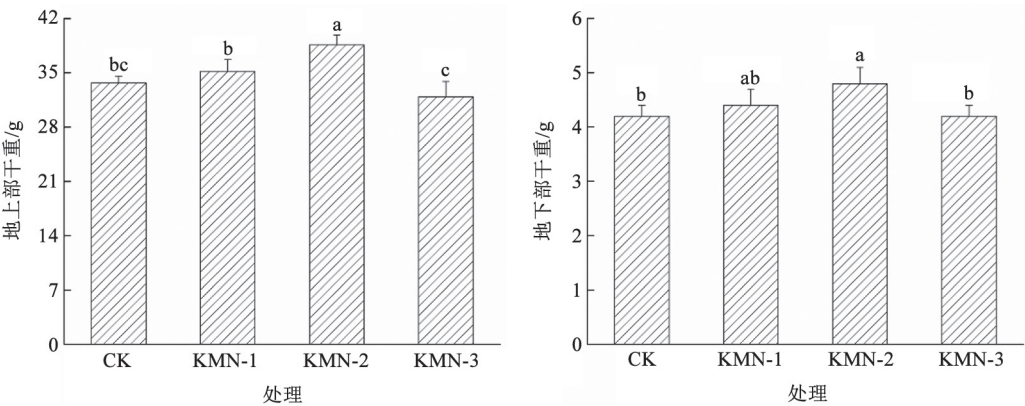


图1 不同转红光棚膜对甜椒生物量的影响
Fig.1 Effects of different turning red films on biomass of sweet pepper

表3 不同转红光棚膜对甜椒叶片光合色素含量的影响

处理	叶绿素a含量/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素b含量/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素a+b含量/mg·g ⁻¹ (FW)	叶绿素a/b	类胡萝卜素含量/mg·g ⁻¹ (FW)
CK	1.92±0.05 ^a	0.93±0.07 ^a	2.85±0.09 ^a	2.06±0.03 ^c	0.25±0.02 ^c
KMN-1	1.70±0.10 ^b	0.71±0.03 ^b	2.41±0.05 ^b	2.39±0.02 ^b	0.29±0.01 ^b
KMN-2	1.46±0.11 ^c	0.57±0.03 ^c	2.03±0.05 ^d	2.56±0.04 ^a	0.35±0.01 ^a
KMN-3	1.57±0.11 ^{bc}	0.66±0.04 ^{bc}	2.23±0.06 ^c	2.38±0.04 ^b	0.17±0.02 ^d

4 不同转红光棚膜对甜椒叶片光合特性的影响

不同棚膜覆盖对甜椒植株净光合速率有显著影响(表4), 以KMN-2最高, KMN-1次之, 而KMN-3显著低于对照($P<0.05$); 气孔导度和蒸腾速率的变化规律与净光合速率相似, 但KMN-3与对照覆盖下的气孔导度及KMN-1与对照覆盖下的蒸腾速率

无显著差异; 胞间CO₂浓度以KMN-3和对照下最高, KMN-2下最低。

5 不同转红光棚膜对甜椒产量的影响

由表5可以看出, 与对照和其他棚膜相比, KMN-2棚膜覆盖下甜椒果实转色率明显提高($P<0.05$), 且该膜覆盖下甜椒平均单果重及每亩产量均

表4 不同转红光棚膜对甜椒叶片光合特性的影响

处理	净光合速率(P_n)/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气孔导度(G_s)/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	胞间CO ₂ 浓度(C_i)/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	蒸腾速率(T_r)/ $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
CK	12.30±0.44 ^c	141.52±5.43 ^c	343.86±8.52 ^{ab}	2.38±0.09 ^b
KMN-1	13.29±0.48 ^b	162.35±3.37 ^b	328.31±8.39 ^b	2.33±0.11 ^b
KMN-2	14.58±0.69 ^a	171.87±4.16 ^a	293.95±6.60 ^c	2.65±0.05 ^a
KMN-3	10.28±0.70 ^d	139.30±3.19 ^c	349.05±13.62 ^a	1.78±0.05 ^c

表5 不同转红光棚膜对甜椒产量的影响

处理	转色率/%	单株果数	平均单果重/g	产量/kg·亩 ⁻¹
CK	30.61±1.19 ^b	4.9±0.1 ^b	181.1±3.56 ^c	2 048.54±21.47 ^c
KMN-1	29.63±1.98 ^b	5.4±0.2 ^a	176.9±2.44 ^d	2 205.22±18.96 ^b
KMN-2	36.67±2.18 ^a	5.5±0.2 ^a	195.5±3.30 ^a	2 482.21±27.19 ^a
KMN-3	30.91±1.24 ^b	4.5±0.2 ^c	187.8±4.53 ^b	1 950.91±17.25 ^d

明显高于对照及其他处理; 与对照相比, KMN-1和KMN-2棚膜显著增加了甜椒单株结果数, 且这两种棚膜覆盖下甜椒每亩产量较对照分别增加7.65%和21.17%; KMN-3覆盖下的甜椒单株果数及每亩产量则明显低于对照, 每亩较对照减产4.77%。

6 不同转红光棚膜对甜椒果皮花青苷含量及PAL和CHI活性的影响

由图2可以看出, 红色膜覆盖下甜椒果实花青苷含量均明显高于对照($P<0.05$), 且不同处理间存在显著性差异, 花青苷含量表现为KMN-2>KMN-1>KMN-3。其中, KMN-1和KMN-2处理的果实花青苷含量分别比对照提高了24.80%和41.40%。

与对照相比, 红色膜覆盖下甜椒果皮PAL活性均显著升高($P<0.05$), 且不同处理间以KMN-2明显较高, KMN-1次之, KMN-3最低; 不同棚膜处理CHI活性变化趋势与PAL相似(图3)。

7 不同转红光棚膜对甜椒果实其他品质的影响

由表6可以看出, 与对照和其他棚膜相比, KMN-2棚膜覆盖显著提高了甜椒果实可溶性糖、Vc和游离氨基酸含量($P<0.05$), KMN-3和对照则较

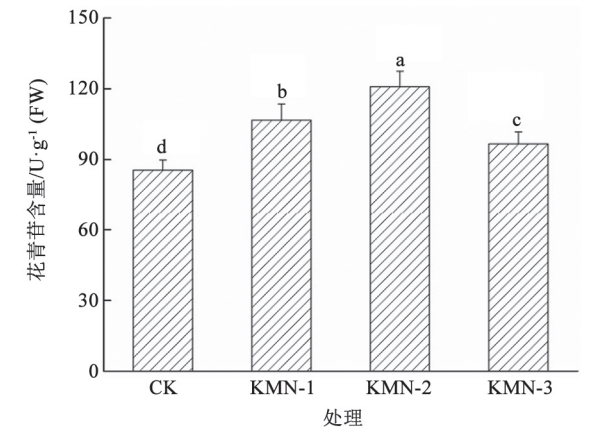


图2 不同转红光棚膜对甜椒花青苷含量的影响
Fig.2 Effects of different turning red films on anthocyanin content of sweet pepper

低; 与对照相比, KMN-2膜覆盖下果实可溶性蛋白含量显著降低, KMN-1和KMN-3次之。

讨 论

设施内光环境是影响作物生长发育及产量的关键(陈修德2009)。不同光质对植物生长、干物

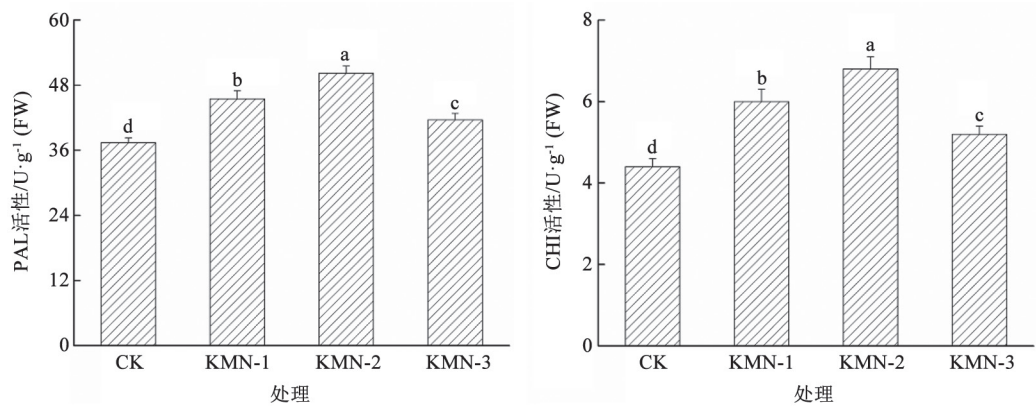


图3 不同转红光棚膜对甜椒PAL和CHI活性的影响
Fig.3 Effects of different turning red films on activities of PAL and CHI in sweet pepper

表6 不同转红光棚膜对甜椒果实品质的影响

Table 6 Effects of different turning red films on fruit qualities of sweet pepper

处理	可溶性糖含量/%	Vc含量/mg·g ⁻¹ (FW)	可溶性蛋白含量/mg·g ⁻¹ (FW)	游离氨基酸含量/mg·g ⁻¹ (FW)
CK	5.98±0.17 ^c	0.10±0.003 ^c	30.48±1.32 ^a	1.01±0.04 ^c
KMN-1	6.69±0.22 ^b	0.12±0.003 ^b	27.71±1.38 ^b	1.15±0.03 ^b
KMN-2	7.43±0.26 ^a	0.13±0.004 ^a	22.50±1.15 ^d	1.20±0.03 ^a
KMN-3	6.07±0.19 ^c	0.11±0.002 ^c	25.39±0.98 ^c	0.97±0.05 ^d

质积累和分配等影响较大。本试验中,与无色对照膜相比,红色转光膜显著提高了红橙光和远红光的透射比率,降低了紫光、蓝光,特别是绿光的透射率,导致棚膜覆盖下的光质组成发生改变(表1)。其中,KMN-1和KMN-2棚膜,尤其是后者覆盖下红橙光和远红光比率较高,有利于甜椒叶片伸展和胚轴伸长,提高光合速率,调控同化产物向营养器官分配,进而促进植株的生长;对照膜下透过的蓝光等短波段光较多,则明显抑制胚轴伸长,增加茎粗。这与前人的研究结果一致(崔瑾等2009;杨晓建等2011),但与曹明等(2017)在甜瓜上的研究结果不同,表明不同蔬菜种类及品种对光质的响应存在差异(崔瑾等2009)。不同棚膜覆盖下甜椒植株长势的差异可能与不同光质通过影响植物体内源激素的代谢水平来调节茎的生长有关(谢景等2012),这有待于做进一步研究。与对照相比,KMN-3覆盖下红橙光和远红光透过率较高,但植株生长发育迟缓,可能与该膜透光率过低有关(表2和图1)。

光合色素是光合作用的基础,光质直接影响光合色素的合成,从而影响植株的光合作用(杨富军等2013)。光合作用受诸多因素影响,类胡萝卜素为光吸收的辅助色素,能够吸收和传递电子(郑洁等2008);叶绿素含量的高低并不能完全反映叶片光合能力的强弱,但叶绿素含量的减少会导致叶片衰老和光合速率的不可逆降低(张秋英等2005)。本试验认为覆盖无色对照膜,透过的蓝光比率增加,对甜椒叶片叶绿素的合成有促进作用(表3),说明蓝光可以延缓甜椒叶片的衰老。对照膜下甜椒叶片叶绿素a/b值较低(表3),说明该膜覆盖下的甜椒植株具有阴生植物的特性,表现为利用光的能力较低,净光合速率下降(表4);而红色转光膜覆盖下透过的蓝光较少,红橙光比率增加,甜椒植株叶绿素a/b值较高与阳生植物相似,且显著提高类胡萝卜素含量(表3),从而增强甜椒叶片对光能的吸收和传递电子的能力(表4),这可能是红色转光膜提高甜椒净光合速率的重要因素。这与番茄、黄瓜和甜瓜上的报道一致(曹刚等2013;崔晓辉等2017;董飞等2017),但与部分前人研究结果不同(江明艳和潘远智2006),主要原因可能与棚膜下光质组成较复杂有关,在适宜比例的蓝光中混杂其他颜色的光时,对叶绿素的合成起到促进作用。

光合速率是影响植物同化能力和产量的关键因素(李伟等2008)。本试验中,与对照相比,覆盖KMN-1和KMN-2棚膜,尤其是后者可显著促进甜椒叶片净光合速率,与该膜能够明显提高叶片气孔导度和蒸腾速率有关(表4)。KMN-3棚膜覆盖下气孔导度显著降低,胞间CO₂浓度明显提高,表明叶肉细胞对CO₂的利用效率较低,气孔导度和CO₂利用效率的明显降低可能均为其光合速率下降的原因(闫萌萌等2014),以上都说明红色膜中添加适宜的转光剂有利于甜椒植株光合作用。

笔者前期研究证明,转光膜增加红橙光透射比率能够促进光合产物向红色甜椒和番茄果实中分配(李岩等2016a, b),这在本试验中再次得到验证,红色膜中添加适宜转光剂能够促进甜椒果实转色,有利于植株将更多的同化物质分配到果实中,进而提高产量。可溶性糖、Vc、蛋白质和游离氨基酸含量可反映果实品质高低(陈祥伟等2014)。花青苷作为一种重要的植物天然色素,越来越多的研究表明,光质是调控果实着色的有效手段。本试验结果表明,与无色对照膜相比,红色膜覆盖有利于甜椒果实花青苷积累(图2),与冀晓昊等(2016)报道的蓝光和紫外光较其他光质更能促进花青苷合成的结果不同。但与徐凯等(2007)的研究结果一致,表明不同作物对光质的响应不同。红色膜中添加不同转光剂对甜椒果实品质的影响存在明显差异,且加入适宜转光剂能够提高果实中可溶性糖和游离氨基酸含量(表6),原因可能是红色转光膜下红橙光比率升高,产生高温光效应,通过提高甜椒光合效率和植株生长,一方面提高对矿质营养的吸收,促进氮素的吸收同化,有利于氨基酸合成,另一方面促进碳代谢强度和碳水化合物合成,进而加速转色期果实叶绿素降解和花青苷积累,改善果实外观和营养品质。

有报道认为PAL是花青苷合成的关键酶(邓科等2011),其活性对花青苷合成的影响已备受关注;CHI在黄酮类化合物的进一步转化中起重要作用(Lister和Lancaster 1996)。本试验中,不同棚膜处理下采收期红色甜椒果皮中PAL、CHI活性变化与花青苷一致,且KMN-2棚膜覆盖下两者酶活性有较大幅度的提升(图3),表明PAL与CHI是甜椒花青苷合成的关键酶,两者共同参与了甜椒中花青

昔的合成。棚膜中添加适宜的转光剂使两者酶活性明显增加, 主要是由两者酶基因表达量迅速增加引起。

有研究认为红光能够提高果实Vc含量(傅明华等2000)。本试验结果表明红色膜中添加适宜转光剂能够显著提高甜椒果实Vc含量(表6), 与本人前期研究结果一致(李岩等2016a), 但与徐师华等(2000)的报道不同, 反映出不同光质可能通过调节不同光受体间的平衡影响果实Vc合成酶的活性而引起Vc代谢, 且不同作物对光质的要求不一。已有研究证明蓝光利于蛋白质合成(杨晓建等2011)。本试验结果表明无色对照膜下蓝光透射比率较高, 显著提高甜椒果实中可溶性蛋白含量, 与前人研究结果一致。孙非等(1993)研究发现可溶性蛋白含量变化与硝酸还原酶活性呈正相关, 对照膜覆盖对蛋白质合成的促进作用可能与其透过较多的蓝光提高硝酸还原酶的活性有关。

参考文献

- Andrew CS, Christopher SB, Elizabeth CS (1997). Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann Bot*, 79 (3): 273–282
- Cao G, Zhang GB, Yu JH, Ma YX (2013). Effects of different LED light qualities on cucumber seedling growth and chlorophyll fluorescence parameters. *Sci Agric Sin*, 46 (6): 1297–1304 (in Chinese with English abstract) [曹刚, 张国斌, 郁继华, 马彦霞 (2013). 不同光质LED光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响. *中国农业科学*, 46 (6): 1297–1304]
- Cao JK, Jiang WB (2007). *Experimental Guidance of Postharvest Physiology and Biochemistry Experiment of Fruits and Vegetables*. Beijing: China Light Industry Press (in Chinese) [曹建康, 姜微波(2007). 果蔬采后生理生化实验指导. 北京: 中国轻工业出版社]
- Cao M, Yang XF, Mi QH, Wei M, Zhang XB, Yang GH (2017). Effects of film color on growth and fruit quality of melon grown in high tunnel. *J Shandong Agric Univ (Nat Sci)*, 48 (1): 20–23 (in Chinese with English abstract) [曹明, 杨小锋, 米庆华, 魏珉, 张雪彬, 杨光华(2017). 不同颜色棚膜对甜瓜生长及果实品质的影响. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 48 (1): 20–23]
- Chang TT (2010). Effects of different light spectral distribution on growth and qualities of tomato (Master's thesis). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [常涛涛(2010). 不同光谱能量分布对番茄生长发育及其果实品质的影响(硕士论文). 南京: 南京农业大学]
- Chen XD, Gao DS, Mi QH, Tan Y, Guo YC, Li SX, Xu AH (2009). Effects of different plastic film on fruit quality of peach in greenhouse. *Chin Agric Sci Bull*, 25 (13): 254–259 (in Chinese with English abstract) [陈修德, 高东升, 米庆华, 谭钺, 郭玉才, 李少旋, 徐爱红(2009). 不同棚膜对设施桃果实品质的影响. *中国农学通报*, 25 (13): 254–259]
- Chen XW, Liu SQ, Wang Y, Liu JK, Feng L (2014). Effects of different LED light qualities on growth, photosynthetic characteristics and nutritional quality of savoy. *Chin J Appl Ecol*, 25 (7): 1955–1962 (in Chinese with English abstract) [陈祥伟, 刘世琦, 王越, 刘景凯, 冯磊(2014). 不同LED光源对乌塌菜生长、光合特性及营养品质的影响. *应用生态学报*, 25 (7): 1955–1962]
- Cui J, Ma ZH, Xu ZG, Zhang H, Chang TT, Liu HJ (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, 张欢, 常涛涛, 刘海俊 (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]
- Cui XH, Guo XO, Sun TY, Qi HY (2017). Effects of LED supplementary lighting on seedling growth and fruit quality of oriental melon. *Plant Physiol J*, 53 (4): 657–667 (in Chinese with English abstract) [崔晓辉, 郭小鸥, 孙天宇, 齐红岩(2017). LED补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响. *植物生理学报*, 53 (4): 657–667]
- Deng K, Kong WF, Zhan JC, Wang XQ, Huang WD (2011). The study on increasing activity of phenylalanine ammonia-lyase and phenols accumulation induced by sugar in peach fruit. *Chin Agric Sci Bull*, 27 (25): 162–167 (in Chinese with English abstract) [邓科, 孔维府, 战吉成, 王秀芹, 黄卫东(2011). 糖诱导桃果实园片果实苯丙氨酸解氨酶活性上升和酚类物质积累的研究. *中国农学通报*, 27 (25): 162–167]
- Dong F, Wang CZ, Zhang XZ, Qin Y, Liu SQ (2017). Effects of different light qualities on physiological and photosynthetic characteristics of cherry tomato seedlings. *J Plant Physiol*, 53 (7): 1208–1214 (in Chinese with English abstract) [董飞, 王传增, 张现征, 秦瑜, 刘世琦(2017). 不同光质对樱桃番茄幼苗生理与光合特性的影响. *植物生理学报*, 53 (7): 1208–1214]
- Feng SQ, Chen XS, Zhang CY, Liu XJ, Liu ZC, Wang HB, Wang YL, Zhou CH (2008). A study of the relationship between anthocyanin biosynthesis and related enzymes activity in *Pyrus pyrifolia* 'Mantianhong' and its bud sports 'Aoguan'. *Sci Agric Sin*, 41 (10): 3184–3190 (in Chinese with English abstract) [冯守千, 陈学森, 张春雨, 刘晓静, 刘遵春, 王海波, 王延玲, 周朝华(2008). 砂梨品种‘满天红’及其芽变品系‘奥冠’花青苷合成与相关酶活性研究. *中国农业科学*, 41 (10): 3184–3190]
- Fu MH, Wang XD, Gu ZL, Liao ZX, Zhu AF (2000). Effect of multifunctional plastic film transferring violet ray to red light (VTR) applied in field. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 16 (6): 81–84 (in Chinese with English abstract) [傅明华, 汪羞德, 顾仲兰, 廖兆熊, 朱爱凤(2000). 多功能转光塑料薄膜应用效应研究. *农业工程学报*, 16 (6): 81–84]
- Gao YH, Huang CH, Zhu YQ, Tong ZK (2012). Progress on plant anthocyanin biosynthesis and regulation. *Chin Biotech*, 32 (8): 94–99 (in Chinese with English abstract) [高燕会, 黄春红, 朱玉球, 童再康(2012). 植物花青素苷生物合成及调控的研究进展. *中国生物工程杂志*, 32 (8): 94–99]

- Hernández R, Kubota C (2016). Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs. *Environ Exp Bot*, 121 (1): 66–74
- Hu FH, Ding WM (2009). Light transmission and heat preservation effects of different greenhouse films and its influences on chlorophyll content and roots activity in watermelon seedling. *Jiangsu Agric Sci*, (5): 164–166 (in Chinese) [胡飞虎, 丁为民(2009). 不同棚膜的透光保温性及其对西瓜苗叶绿素含量和根系活力的影响. *江苏农业科学*, (5): 164–166]
- Ji XH, Wang HB, Zhang KK, Wang XD, Shi XB, Wang BL, Zheng XC, Wang ZQ, Liu FZ (2016). The grape anthocyanin biosynthesis regulation by different color fruit bags. *Sci Agric Sin*, 49 (22): 4460–4468 (in Chinese with English abstract) [冀晓昊, 王海波, 张克坤, 王孝娣, 史祥宾, 王宝亮, 郑晓翠, 王志强, 刘凤之(2016). 不同颜色果袋对葡萄花青苷合成的调控. *中国农业科学*, 49 (22): 4460–4468]
- Jiang MY, Pan YZ (2006). Effects of light quality on the photosynthetic characteristics and growth of poinsettia. *Acta Hort Sin*, 33 (2): 338–343 (in Chinese with English abstract) [江明艳, 潘远智(2006). 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响. *园艺学报*, 33 (2): 338–343]
- Li Q, Wang XF, Chu M, Chen XM, Mi QH, Wei M, Shi QH, Yang FJ (2010). Effects of neotype greenhouse film on light and temperature, growth and development of tomato in greenhouse. *Shandong Agric Sci*, (3): 41–45 (in Chinese with English abstract) [李强, 王秀峰, 初敏, 陈向梅, 米庆华, 魏珉, 史庆华, 杨凤娟(2010). 新型棚膜对温室内光温环境及番茄生长发育的影响. *山东农业科学*, (3): 41–45]
- Li W, Gui XL, Wang SH, Guan QZ, Hu LP, Zhou M, Meng FZ, Zhang ZX (2008). Effects of low light on photosynthetic characteristics of different position leaves of cucumber seedlings. *Sci Agric Sin*, 41 (11): 3698–3707 (in Chinese with English abstract) [李伟, 眭晓蕾, 王绍辉, 关秋竹, 胡丽萍, 周明, 孟凡珍, 张振贤(2008). 黄瓜幼苗不同叶位叶片光合特性对弱光的响应. *中国农业科学*, 41 (11): 3698–3707]
- Li Y, Mi QH, Liu ZL, Shi QH, Yang FJ, Wang XF, Wei M (2016a). Effects of special films on environment condition, growth and development of red pepper in greenhouse. *Agric Eng Technol*, (16): 13–17 (in Chinese) [李岩, 米庆华, 刘中良, 史庆华, 杨凤娟, 王秀峰, 魏珉(2016a). 甜椒专用棚膜对日光温室环境和红色彩椒生长发育的影响. *农业工程技术*, (16): 13–17]
- Li Y, Sun N, Zhao HR, Wei M, Mi QH, Wang XF, Shi QH, Yang FJ (2016b). Effects of neotype multifunctional plastic film on environment condition, growth and development of tomato in solar greenhouse. *J Shandong Agric Univ (Nat Sci)*, 47 (2): 161–165 (in Chinese with English abstract) [李岩, 孙娜, 赵海榕, 魏珉, 米庆华, 王秀峰, 史庆华, 杨凤娟(2016b). 新型功能棚膜对日光温室环境及番茄生长发育的影响. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 47 (2): 161–165]
- Li Y, Sun ZP, Li TL (2007). Analysis of facility horticulture development based on the light and heat condition of northern China. *Agric Eng Technol (Greenhouse & Horti)*, (6): 13–15 (in Chinese) [李晔, 孙周平, 李天来(2007). 基于光热资源的中国北方地区设施园艺发展分析. *农业工程技术(温室园艺)*, (6): 13–15]
- Lister CE, Lancaster JE (1996). Phenylalanine ammonia-lyase (PAL) activity and its relation-ship to anthocyanin and flavonoid levels in New Zealand-grown apple cultivars. *J Am Soc Hort Sci*, 121 (2): 281–285
- Liu CS, Yang SX (1996). *Agrochemistry Analysis*. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese) [刘春生, 杨守祥(1996). *农业化学分析*. 北京: 中国农业大学出版社]
- Liu SD, Yang ZQ, Su TX, Fei YJ, Huang CR, Huang HJ (2010). Effect of light quality on the photosynthetic characteristics of greenhouse sweet pepper. *Trans Atmospher Sci*, 33 (5): 600–605 (in Chinese with English abstract) [刘寿东, 杨再强, 苏天星, 费玉娟, 黄川容, 黄海静(2010). 不同光质对温室甜椒光合特性的影响. *大气科学学报*, 33 (5): 600–605]
- Su NN, Wu Q, Cui J (2013). Applications and prospects of light environment control technology for vegetable seedling cultivation in factory. *China Veget*, (4): 14–19 (in Chinese with English abstract) [苏娜娜, 邬奇, 崔瑾(2013). 光环境调控技术在蔬菜工厂化育苗中的应用及前景. *中国蔬菜*, (4): 14–19]
- Sun F, Cao YQ, Liu LX, Tang SY (1993). Changes of nitrate reductase (NR) activity and protein content in ginseng cultured under different light quality. *Acta Bioph Sin*, 9 (1): 153–157 (in Chinese with English abstract) [孙非, 曹悦群, 刘立侠, 唐树延(1993). 不同光质下栽培人参硝酸还原酶(NR)活性和蛋白质含量的变化. *生物物理学报*, 9 (1): 153–157]
- Wang HC, Huang XM, Hu GB, Huang HB (2004). Studies on the relationship between anthocyanin biosynthesis and related enzymes in litchi pericarp. *Sci Agric Sin*, 37 (12): 2028–2032 (in Chinese with English abstract) [王慧聪, 黄旭明, 胡桂兵, 黄辉白(2004). 荔枝果皮花青苷合成与相关酶的关系研究. *中国农业科学*, 37 (12): 2028–2032]
- Xie J, Liu HC, Song SW, Sun GW, Chen RY (2012). Effects of different LED lights on growth of cucumber seedlings. *J Changjiang Veget*, 1 (2): 1–7 (in Chinese with English abstract) [谢景, 刘厚诚, 宋世威, 孙光闻, 陈日远(2012). 光源及光质调控在温室蔬菜生产中的应用研究进展. *长江蔬菜*, 1 (2): 1–7]
- Xu K, Guo YP, Zhang SL, Dai WS, Fu QG (2007). Effect of light quality on the fruit quality of ‘Toyonoka’ strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch.). *Acta Hort Sin*, 34 (3): 585–590 (in Chinese with English abstract) [徐凯, 郭延平, 张上隆, 戴文圣, 符庆功(2007). 不同光质膜对草莓果实品质的影响. *园艺学报*, 34 (3): 585–590]
- Xu SH, Wang XL, Wu YM (2000). Effects of different light quality (spectrum) on crop growth and development. *Chin J Eco-Agric*, 8 (1): 18–20 (in Chinese with English abstract) [徐师华, 王修兰, 吴毅明(2000). 不同光质(光谱)对作物生长发育的影响. *中国生态农业学报*, 8 (1): 18–20]
- Yan MM, Wang ML, Wang HB, Wang YF, Zhao CX (2014). Effects of light quality on photosynthetic pigment contents and photosynthetic characteristics of peanut seedling leaves. *Chin J Appl Ecol*, 25 (2): 483–487 (in Chinese with English abstract) [闫萌萌, 王铭伦, 王洪波, 王月福, 赵长星(2014). 光质对花生幼苗叶片光合色素含量及光合特性的影响. *应用生态学报*, 25 (2): 483–487]

- Yang FJ, Zhao CX, Yan MM, Wang YF, Wang ML (2013). Effects of different cultivation modes on the leaf photosynthetic characteristics and yield of summer-sowing peanut. *Chin J Appl Ecol*, 24 (3): 747–752 (in Chinese with English abstract) [杨富军, 赵长星, 闫萌萌, 王月福, 王铭伦(2013). 栽培方式对夏直播花生叶片光合特性及产量的影响. *应用生态学报*, 24 (3): 747–752]
- Yang XJ, Liu SQ, Zhang ZK, Liu ZL, Ma L, Zhang Y (2011). Effects of different light emitting diode sources on growth and chlorophyll fluorescence parameters in garlic seedling. *China Veget*, 1 (6): 62–67 (in Chinese with English abstract) [杨晓建, 刘世琦, 张自坤, 刘中良, 马琳, 张宇(2011). 不同LED光源对青蒜苗生长及叶绿素荧光特性的影响. *中国蔬菜*, 1 (6): 62–67]
- Zhang FM (2000). *Protected Horticulture*. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese) [张福墀(2000). *设施园艺学*. 北京: 中国农业大学出版社]
- Zhang QY, Li FD, Liu MY (2005). Changing laws of chlorophyll content and photosynthetic rate in winter wheat leaves. *Chin J Eco-Agric*, 13 (3): 95–98 (in Chinese with English abstract) [张秋英, 李发冬, 刘孟雨(2005). 冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率变化规律的研究. *中国生态农业学报*, 13 (3): 95–98]
- Zhang SP, Liu YJ, Kang J, Zheng YX (2002). Study on the performance of agricultural conversion film. *Chin Plastics*, 16 (12): 69–73 (in Chinese with English abstract) [张颂培, 刘英俊, 康军, 郑应欣(2002). 农用转光膜的性能研究. *中国塑料*, 16 (12): 69–73]
- Zhao SJ, Liu HS, Dong XC (1998). *Experimental Guide for Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press (in Chinese) [赵世杰, 刘华山, 董新纯(1998). *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业科学技术出版社]
- Zheng J, Hu MJ, Guo YP (2008). Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants. *Chin J Appl Ecol*, 19 (7): 1619–1624 (in Chinese with English abstract) [郑洁, 胡美君, 郭延平(2008). 光质对植物光合作用的调控及其机理. *应用生态学报*, 19 (7): 1619–1624]
- Zou Q (1995). *Experimental Guide of Plant Physiology and Bio-chemistry*. 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 different turning red light films on photosynthetic characteristics and fruit quality of sweet pepper

LI Yan^{1,2,3,4,*}, WEN Lian-Lian¹, JIAO Juan^{1,5}, WEI Min^{1,2,3,4}, SHI Qing-Hua^{1,2,3,4}, YANG Feng-Juan^{1,3,4}, WANG Xiu-Feng^{1,3}, MI Qing-Hua⁶

¹College of Horticultural Science and Engineering, ²Scientific Observing and Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, ³State Key Laboratory of Crop Biology, ⁴Shandong Collaborative Innovation Center of Fruit & Vegetable Quality and Efficient Production, Shangdong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China; ⁵Taian Academy of Agricultural Sciences, Taian, Shandong 271000, China; ⁶Development and Planning Department, Shangdong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China

Abstract: In order to screen high quality films suitable for the protected cultivation of sweet pepper, the effects of coating-anti-fog turning red light films by adding red master batch on the growth, photosynthetic pigment, photosynthetic characteristics, fruit yield and quality of red sweet pepper with variety of ‘Kaitelin’ as experimental material were studied. The results showed that adding different types of light conversion agents had significant influence on the light environment of solar greenhouse as well as the growth and development of sweet pepper. Compared with control and the other films, KMN-2 test film could significantly promote hypocotyls elongation and biomass increment of sweet pepper, and the chlorophyll a/b, carotenoid content and photosynthetic performance were significantly enhanced. It was also more beneficial to increase the yield. Moreover, the content of soluble sugar, vitamin C (Vc) and free amino acids in sweet pepper fruit were improved obviously. The red films significantly induced the accumulation of anthocyanins in sweet pepper fruit, especially KMN-2 test film increased by 41.40% compared with control. In addition, compared with control and other treatments, the increasing activities of phenylalanine ammonia lyase (PAL) and chalcone isomerase (CHI) were induced by KMN-2. In conclusion, the addition of suitable light conversion agent in red film could raise the photosynthetic efficiency of sweet pepper, promote plant growth, and then, increase the yield of sweet pepper. Furthermore, it could affect the variations in activities of key enzyme derived from alanine pathway, which resulted in the accumulation of anthocyanin.

Key words: coating film; light conversion agent; sweet pepper; photosynthetic characteristics; anthocyanin

Received 2017-09-01 Accepted 2017-11-15

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31401921), the Natural Science Foundation of Shandong Province (Grant No. ZR2014CQ029), the National Science & Technology Support Program of China (Grant No. 2014BAD05B03), the China Agriculture Research System (Grant No. CARS-25), Science and Technology Innovation Team of Shandong Agricultural University-Facility Horticulture Advantages Team (Grant No. SYL2017YSTD07), the National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2016YFB0302403) and Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (Grant No. 201303108).

*Corresponding author (E-mail: edmonlee@163.com).