

引用格式: 李璐瑶, 张君, 应学兵, 等. 红膜对 3 种蔬菜光合性能与果实品质的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 564–571. LI Luyao, ZHANG Jun, YING Xuebing, *et al.* Effects of red film on photosynthetic abilities and fruit qualities in 3 vegetables[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 564–571.

红膜对 3 种蔬菜光合性能与果实品质的影响

李璐瑶¹, 张君², 应学兵¹, 徐浩哲³, 王振源³, 张雨婷³, 陈萍梅⁴, 左照江³

(1. 杭州市临安区农林技术推广中心, 浙江 杭州 311300; 2. 杭州市临安区农业农村局, 浙江 杭州 311300;
3. 浙江农林大学 浙江省森林芳香植物康养功能研究重点实验室, 浙江 杭州 311300; 4. 杭州嘉泽生态农业开发有限公司, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】研究 2 种红膜 (RF1 和 RF2) 对瓜果类蔬菜光合性能与果实品质的促进效应, 为利用适宜红膜促进果蔬生产提供参考。【方法】分别采用 RF1 和 RF2 搭建大棚, 并测定红膜对黄瓜 *Cucumis sativus*、南瓜 *Cucurbita moschata* 和辣椒 *Capsicum annuum* 叶绿素荧光参数以及果实中糖、可溶性固形物、可溶性蛋白、总酚等质量分数的影响。【结果】与对照 (普通棚膜) 相比, RF1 可显著提高南瓜和辣椒的最大光化学量子产量 (ϕPo)、捕获的激子所导致的电子传递效率 (Ψ_o) 和电子传递的量子产额 (ϕEo), 并显著降低非光化学猝灭的最大量子产量 (ϕDo) ($P < 0.05$); RF2 可显著提高黄瓜 ϕPo 和 Ψ_o 以及辣椒 ϕPo 、 Ψ_o 和 ϕEo , 并显著降低此 2 种蔬菜 ϕDo ($P < 0.05$)。对糖质量分数而言, RF2 可显著促进黄瓜和南瓜果实积累蔗糖、果糖、还原糖和总糖, 促进辣椒果实积累蔗糖 ($P < 0.05$)。在 2 种红膜大棚栽培下, 黄瓜和南瓜果实中可溶性固形物质量分数显著增加 ($P < 0.05$), 南瓜和辣椒果实中可溶性蛋白质量分数显著增加 ($P < 0.05$)。此外, 2 种红膜均能提高南瓜果实中总酚质量分数, RF2 可提高辣椒果实中总酚质量分数。【结论】2 种红膜均能不同程度提高黄瓜、南瓜和辣椒光合性能与果实品质, 其中 RF2 更有利于提高 3 种蔬菜果实中糖质量分数与辣椒果实中总酚质量分数。图 5 表 1 参 36

关键词: 红膜; 瓜果类蔬菜; 光合性能; 果实品质

中图分类号: S601 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0564-08

Effects of red film on photosynthetic abilities and fruit qualities in 3 vegetables

LI Luyao¹, ZHANG Jun², YING Xuebing¹, XU Haozhe³, WANG Zhenyuan³,
ZHANG Yuting³, CHEN Pingmei⁴, ZUO Zhaojiang³

(1. Lin'an Agriculture and Forestry Technology Extension Center, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Hangzhou Lin'an District Agricultural and Rural Bureau, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Forest Aromatic Plants-based Healthcare Functions, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 4. Hangzhou Jiaze Ecological Agriculture Technology Development, Co., Ltd., Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to uncover the promoting effects of 2 red films (RF1 and RF2) on photosynthetic abilities and fruit qualities in fruit vegetables, and then promote fruit vegetable production by using suitable red film. [Method] This study investigated the effects of greenhouses that were separately covered with RF1 and RF2 on the chlorophyll fluorescence parameters and the content of sugars, soluble solids,

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2024-12-12

基金项目: 杭州市农业产业技术专家团队项目 (202306TD15)

作者简介: 李璐瑶 (ORCID: 0009-0001-0500-8912), 从事蔬菜栽培技术与推广。E-mail: 970108555@qq.com。

通信作者: 左照江 (ORCID: 0000-0003-3476-3893), 教授, 从事植物逆境生理和植物挥发性有机物等研究。E-mail: zuozhaojiang@126.com

soluble proteins and total phenolics in fruits in 3 vegetables, including cucumber, squash and pepper. [Result] Compared with the control (common greenhouse film), RF1 significantly improved the maximum photochemical quantum yield (ϕPo), electron transfer efficiency caused by the captured excitons (Ψo) and quantum yield of electron transfer (ϕEo) in squash and pepper, but declined their maximum quantum yield of non-photochemical deexcitation (ϕDo) ($P < 0.05$). RF2 significantly improved the ϕPo and Ψo in cucumber, as well as ϕPo , Ψo and ϕEo in pepper, but declined the ϕDo in the 2 vegetables ($P < 0.05$). For sugar content, RF2 significantly ($P < 0.05$) promoted the accumulation of sucrose, fructose, reducing sugar and total sugar in cucumber and squash fruits, as well as sucrose accumulation in pepper fruits ($P < 0.05$). Under the two red films, the soluble solid content in cucumber and squash fruits was increased remarkably ($P < 0.05$), and the soluble protein content in cucumber and pepper fruits was increased remarkably ($P < 0.05$). Meanwhile, the 2 red films can improve the total phenolic content in squash fruits, and RF2 improved the total phenolic content in pepper fruits. [Conclusion] The 2 red films showed different effects on the improvement of photosynthetic abilities and fruit qualities in cucumber, squash and pepper, and RF2 was preferable for increasing the sugar content in the three vegetable fruits and total phenolic content in pepper fruits. [Ch, 5 fig. 1 tab. 36 ref.]

Key words: red film; fruit vegetable; photosynthetic ability; fruit quality

光质在植物生长发育过程中具有重要作用, 不仅影响种子萌发、光合作用、形态建成与花芽分化^[1-3], 还可通过调控有机物积累影响果蔬品质^[3-5]。在单色光中, 红光可提高莴苣 *Lactuca saliva*^[6]、葡萄 *Vitis vinifera*^[7] 和红叶桃 *Prunus persicae f. atropurpurea*^[8] 叶片中的叶绿素含量, 蓝光可促进类胡萝卜素的积累^[9], 而绿光则不利于光合色素的合成与积累^[10]。与蓝光相比, 红光不仅可提高茄子 *Solanum melongena*^[11] 与番茄 *S. lycopersicum*^[12] 的光合速率, 还有利于茄皮积累类黄酮^[13]。与白光相比, 红光不仅可促进豌豆 *Pisum sativum* 芽苗菜生长, 还可提高其叶绿素、粗纤维和可溶性糖含量^[14]。在白光、红光、蓝光、绿光、黄光和复合光中, 红光最有利于提高樱桃番茄 *Lycopersicon esculentum* var. *cerasiforme* 的产量以及果实中番茄红素与可溶性糖含量, 而绿光最不利于其产量与品质的提升^[15]。与蓝光相比, 红光可显著提高辣椒 *Capsicum annuum* 果实中的可溶性糖含量^[16]。与白光相比, 红光可通过诱导光敏色素基因表达, 从而促进光信号传递以诱导马铃薯 *S. tuberosum* 中糖的苷生物碱合成与积累^[17]。此外, 红光还可通过诱导转录因子表达, 从而促进类胡萝卜素合成与果实转色^[18]。由此可见, 红光对提升果蔬光合性能与果实品质均具有促进效应。

在红、蓝、黄、绿、紫和透明膜中, 红膜不仅可促进草莓 *Fragaria × ananassa* 植株生长, 提高光合色素含量与光合性能^[3], 还可通过诱导醇酰基转移酶与橙花叔醇合酶基因表达以促进酯类和反式-橙花叔醇等香气成分形成^[19]。MIAO 等^[20] 研究发现: 红膜可通过提高草莓花青素合成相关酶活性以促进花青素积累, 而绿膜和蓝膜则具有抑制效应。对大白菜 *Brassica rapa* subsp. *pekinensis* 而言, 红膜和紫膜可通过提高其光合性能以促进植株生长, 进而提升产量^[21]。此外, 红色遮阳网处理也能促进番茄植株与叶片生长, 并提高葡萄糖含量、果糖含量、糖酸比、单果质量等果实品质^[22]。

黄瓜 *Cucumis sativus*、南瓜 *Cucurbita moschata* 和辣椒是重要的瓜果类蔬菜, 可在设施大棚中常年种植。鉴于红膜(光)对果蔬生产具有明显的促进效应, 本研究采用 2 种红膜分别搭建大棚, 探究红膜对黄瓜、南瓜、辣椒光合性能与果实品质的影响, 为利用适宜红膜促进瓜果类蔬菜生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

2024 年 3 月, 在浙江省杭州市临安区后营村后营蔬菜生产基地 (30°11'27"N, 119°12'10"E), 分别采用 2 种红膜 (RF1 和 RF2) 与普通棚膜 (ck, 厚度均为 80 μm) 搭建大棚 (长×宽×高为 32.0 m×8.0 m×3.3 m), 各棚膜光谱特征如图 1 所示。在每个大棚内分别种植黄瓜 ‘浙秀 3 号’ ‘Zhexiu No. 3’、南瓜

‘新栗1号’ ‘Xinli No. 1’ 和辣椒 ‘杭椒早秀’ ‘Hangjiao Zaoxiu’, 定植时叶片数量分别为3、2和9片, 种植数量分别为200、30和280株。以在普通棚膜大棚种植作为对照。在种植期间进行常规栽培管理, 待种植约60 d进入盛果期后, 各处理随机选取6~10株进行光合性能与果实品质测定, 每株视为1次重复。

1.2 叶绿素荧光参数测量

蔬菜叶片经暗适应30 min后, 采用YZQ-500叶绿素荧光仪测量叶绿素荧光诱导动力学曲线, 计算光系统II (PS II) 最大光化学量子产量(ϕP_o)、捕获的激子所导致的电子传递效率(Ψ_o)、电子传递的量子产额(ϕE_o)与非光化学猝灭的最大量子产量(ϕD_o)^[23-24]。

1.3 果实中糖质量分数测定

参考PENG等^[19]的方法, 称取2 g蔬菜果实, 用6 mL体积分数为80%的乙醇研磨成匀浆。经8 000 r·min⁻¹离心后, 上清液用于测量果糖、葡萄糖、蔗糖、还原糖和总糖质量分数。其中, 果糖和蔗糖均通过加入蒽酮试剂进行测定, 并分别用果糖和蔗糖标准品制作标准曲线以计算相应糖质量分数。还原糖通过加入3,5-二硝基水杨酸进行测定, 并利用葡萄糖制作标准曲线以计算还原糖质量分数。果实中葡萄糖质量分数=还原性糖质量分数-果糖质量分数, 总糖质量分数=蔗糖质量分数+还原糖质量分数。

1.4 果实中总酚质量分数测定

称取1 g果实并用2 mL无水乙醇研磨成匀浆, 经5 000 r·min⁻¹离心15 min后, 取1 mL上清液并加入0.5 mL 0.5 mol·L⁻¹福林酚、1.5 mL 0.765 mol·L⁻¹Na₂CO₃溶液。在暗处反应2 h后, 测量溶液在765 nm处的吸光度。以没食子酸为标准品制作标准曲线, 计算果实中总酚质量分数^[25]。

1.5 果实中可溶性固形物质量分数测定

称取4 g果实并研磨成匀浆, 经8 000 r·min⁻¹离心后, 采用阿贝折射仪测量可溶性固形物质量分数^[25]。

1.6 果实中可溶性蛋白质质量分数测定

称取0.2 g果实, 加入pH 7.8磷酸钾缓冲液以研磨成匀浆。经8 000 r·min⁻¹离心后, 取1 mL上清液并与4 mL考马斯亮蓝G-250溶液混匀, 于595 nm处测量其吸光度。采用牛血清蛋白制作标准曲线, 计算果实中可溶性蛋白质质量分数^[26]。

1.7 数据分析

采用Excel整理数据, 利用Origin 2024进行单因素方差分析并作图。

2 结果与分析

2.1 红膜对3种蔬菜光合性能的影响

与对照相比, RF2红膜使黄瓜 ϕP_o 显著提高了10.1% ($P<0.05$), RF1红膜使南瓜 ϕP_o 显著提高了6.6% ($P<0.05$), RF1和RF2分别使辣椒 ϕP_o 显著提高了10.0%和9.9% ($P<0.05$) (图2A)。RF1和RF2对3种蔬菜 Ψ_o 的影响与 ϕP_o 相似 (图2B)。与对照相比, RF1使南瓜 ϕE_o 显著提高了25.6% ($P<0.05$), RF1和RF2分别使辣椒 ϕE_o 显著提高了56.6%和81.6% ($P<0.05$) (图2C)。此外, RF1和RF2分别使南瓜和黄瓜 ϕD_o 显著 ($P<0.05$) 降低, 并均使辣椒 ϕD_o 显著 ($P<0.05$) 降低 (图2D)。

2.2 红膜对3种蔬菜果实中糖质量分数的影响

黄瓜在RF2大棚栽培时, 果实中蔗糖、果糖、还原糖和总糖质量分数分别较对照显著增加了22.9%、44.4%、9.9%和14.7% ($P<0.05$)。与对照相比, RF1和RF2均不影响黄瓜中葡萄糖质量分数, 但在RF1大棚栽培时葡萄糖质量分数却显著 ($P<0.05$) 高于RF2大棚栽培 (表1)。

南瓜在RF2大棚栽培时, 果实中蔗糖、果糖、还原糖和总糖质量分数最高, 分别较对照显著提高

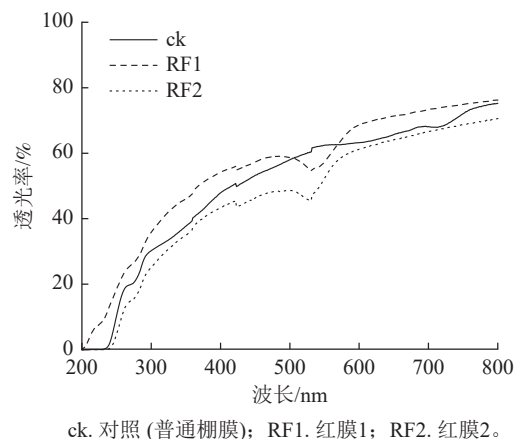
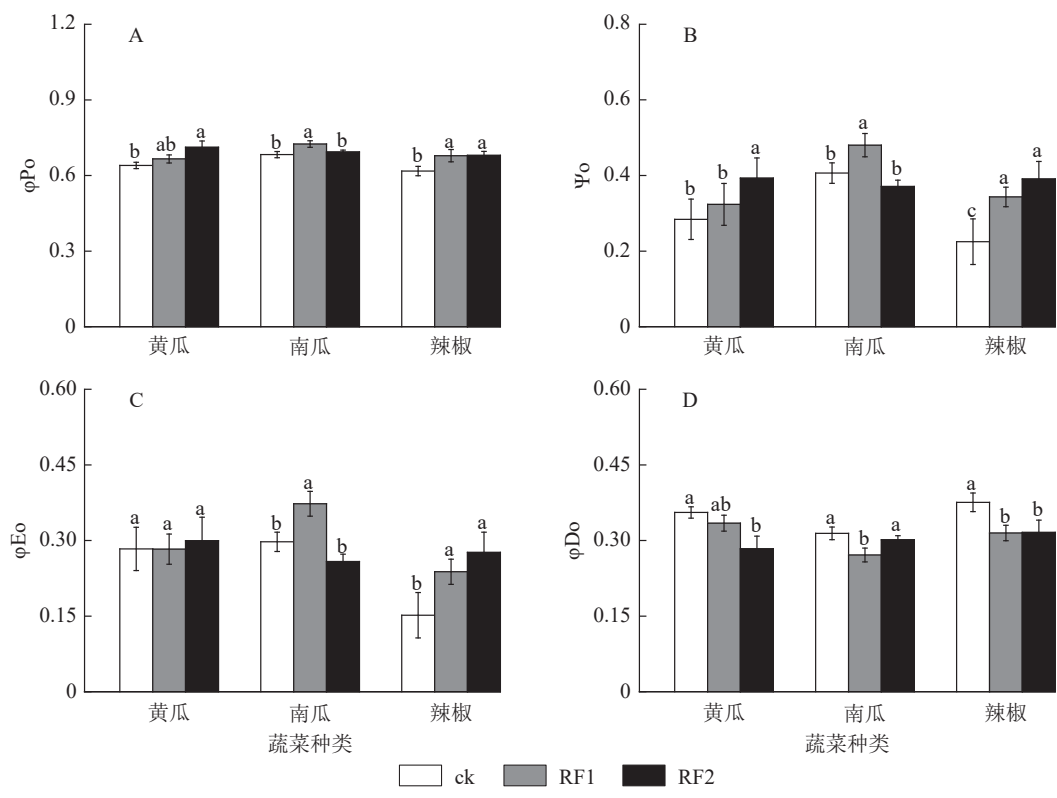


图1 3种棚膜的透光性

Figure 1 Light transmittance performance of 3 greenhouse films



A. 最大光化学量子产量 (ϕ_{Po}); B. 捕获的激子所导致的电子传递效率 (Ψ_o); C. 电子传递的量子产额 (ϕ_{Eo}); D. 非光化学猝灭的最大量子产量 (ϕ_{Do})。ck. 对照(普通棚膜); RF1. 红膜1; RF2. 红膜2。不同小写字母表示同一蔬菜不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 2 种红膜对黄瓜、南瓜和辣椒光合性能的影响

Figure 2 Effects of 2 red films on the photosynthetic abilities in cucumber, squash and pepper

了 15.5%、14.3%、7.6% 和 9.7% ($P < 0.05$) (表 1)。

与对照相比, RF2 可显著 ($P < 0.05$) 提高辣椒果实中蔗糖质量分数, 然而 RF1 和 RF2 均不影响其他糖分积累 (表 1)。

表 1 2 种红膜对黄瓜、南瓜和辣椒果实中糖质量分数的影响

Table 1 Effects of 2 red films on sugar content in cucumber, squash and pepper fruits

蔬菜种类	处理	质量分数/(mg·g ⁻¹)				
		蔗糖	葡萄糖	果糖	还原糖	总糖
黄瓜	ck	13.31±0.37 b	16.99±0.27 ab	6.15±0.25 b	23.14±0.43 b	36.45±0.49 b
	RF1	11.97±0.46 b	18.68±0.25 a	5.47±0.27 b	24.15±0.42 ab	36.12±0.73 b
	RF2	16.36±0.63 a	16.55±0.14 b	8.88±0.40 a	25.43±0.55 a	41.79±0.88 a
南瓜	ck	16.88±0.33 b	32.62±0.60 a	14.16±0.33 b	46.78±0.99 b	63.66±0.10 b
	RF1	17.90±0.48 ab	32.28±0.34 a	14.55±0.09 b	46.83±0.65 b	64.73±0.64 b
	RF2	19.49±0.53 a	34.16±0.23 a	16.18±0.28 a	50.34±0.50 a	69.83±0.53 a
辣椒	ck	10.41±0.46 b	20.76±0.44 a	11.37±0.57 a	32.13±0.74 a	42.54±0.90 a
	RF1	11.77±0.69 ab	20.09±0.39 a	11.48±0.35 a	31.57±0.96 a	43.34±1.47 a
	RF2	12.56±0.35 a	19.57±0.42 a	12.65±0.37 a	32.22±0.74 a	44.78±1.14 a

说明: ck. 对照(普通棚膜); RF1. 红膜1; RF2. 红膜2。不同小写字母表示同一蔬菜不同处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 红膜对 3 种蔬菜果实中总酚质量分数的影响

与对照相比, RF1 和 RF2 大棚栽培时黄瓜果实中总酚质量分数无显著差异, 而南瓜果实中总酚质量分数分别显著提高了 19.6% 和 26.1% ($P < 0.05$)。与对照相比, RF1 不影响辣椒果实中总酚质量分数, 但

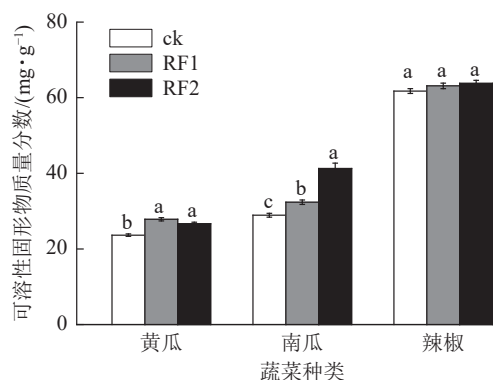
RF2则使辣椒总酚质量分数显著提高了12.0% ($P<0.05$) (图3)。

2.4 红膜对3种蔬菜果实中可溶性固形物质量分数的影响

在RF1和RF2大棚栽培时,黄瓜果实中可溶性固形物质量分数分别较对照显著提高了14.9%和10.1% ($P<0.05$),南瓜果实中可溶性固形物质量分数分别显著提高了11.9%和42.7% ($P<0.05$)。与对照相比,RF1和RF2对辣椒果实中可溶性固形物质量分数均无显著影响(图4)。

2.5 红膜对3种蔬菜果实中可溶性蛋白质量分数的影响

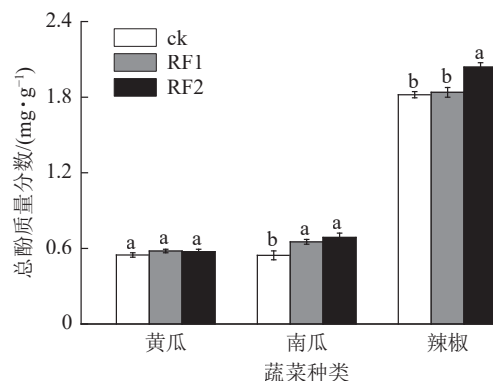
虽然RF1和RF2对黄瓜果实中可溶性蛋白质量分数均无显著影响,但却显著提高了南瓜和辣椒果实中可溶性蛋白质量分数 ($P<0.05$)。与对照相比,南瓜果实中可溶性蛋白质量分数分别提高了21.4%和18.5%,辣椒果实中可溶性蛋白质量分数分别提高了6.2%和11.1% (图5)。



ck. 对照 (普通棚膜); RF1. 红膜1; RF2. 红膜2。不同小写字母表示同一蔬菜不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图4 2种红膜对黄瓜、南瓜和辣椒果实中可溶性固形物质量分数的影响

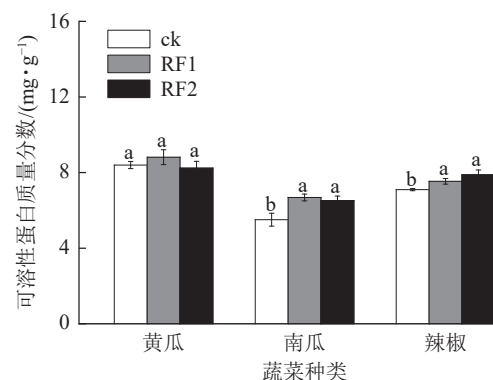
Figure 4 Effects of 2 red films on the soluble solid content in cucumber, squash and pepper fruits



ck. 对照 (普通棚膜); RF1. 红膜1; RF2. 红膜2。不同小写字母表示同一蔬菜不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图3 2种红膜对黄瓜、南瓜和辣椒果实中总酚质量分数的影响

Figure 3 Effects of 2 red films on the total phenolic content in cucumber, squash and pepper fruits



ck. 对照 (普通棚膜); RF1. 红膜1; RF2. 红膜2。不同小写字母表示同一蔬菜不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

图5 2种红膜对黄瓜、南瓜和辣椒果实中可溶性蛋白质量分数的影响

Figure 5 Effects of 2 red films on the soluble protein content in cucumber, squash and pepper fruits

3 讨论

光合作用是植物最基本的物质与能量代谢过程,光合产物是果蔬中糖、蛋白质等初生代谢产物以及总酚、可溶性固形物等风味物质的合成原料^[19]。叶绿素荧光分析是一种快速、非侵入式和高灵敏度检测植物光合性能的方法,其荧光参数可反映植物对光能的吸收、传递与利用情况^[3]。与白光相比,红光可提高番茄叶片光合电子传递效率,而绿光和黄光则呈现相反效应^[27]。与蓝光相比,红光可提高茄子^[11]与番茄^[12]的光合速率。在红色转光膜处理后,甜椒 *Capsicum annuum* var. *grossum* 的净光合速率与气孔导度均明显提高,从而促进果实产量增加^[28]。在不同颜色的棚膜中,红膜可提高草莓 ϕP_o 和 ϕE_o ,而紫膜则呈现相反的效应^[3]。在光反应过程中,植物吸收光后未被利用的光能可通过放热形式进行散失 (ϕDo)^[3]。在红膜处理下,草莓 ϕDo 降至最低,而紫膜处理下则升至最高^[3],这表明红膜可提高植株光能利用效率并降低热耗散。本研究2种红膜均可提高黄瓜、南瓜和辣椒的最大光化学量子产量、电子传递效率与量子产额,并降低热耗散,促进3种蔬菜的PS II效率提高,与已有研究结果相似。其中,RF1和RF2分别对南瓜和黄瓜具有较好的促进效应,对辣椒具有相同的促进效应。

在不同光质中,红光不仅可提高樱桃番茄产量,还可提高果实中番茄红素与可溶性糖质量分数^[15]。

此外, 红光还能提高豌豆芽苗菜、辣椒果实与芦笋 *Asparagus officinalis* 的可溶性糖质量分数, 从而促进其品质提升^[14, 16, 29]。在不同颜色的棚膜中, 红膜可促进草莓果实中果糖、葡萄糖、蔗糖和总糖积累^[19]。在本研究中, RF2 显著提高了黄瓜和南瓜果实中蔗糖、果糖、还原糖和总糖质量分数, 以及辣椒果实中蔗糖质量分数。糖是光合作用的主要产物, 高光合速率可促进糖在果实中积累^[19, 28]。RF2 可不同程度提高 3 种蔬菜的光合性能, 从而提高糖分在果实中积累, 其积累差异可能与蔬菜品种有关^[30]。在不同光质下, 光合产物的分配存在一定差异, 红光和紫光可分别促进光合产物向初生代谢和次生代谢进行分配^[31]。在 3 种棚膜中, RF1 具有较高的紫光和紫外光透过率。这可能促进了 3 种蔬菜在 RF1 下将较多的光合产物分配给次生代谢而非果实中糖分形成, 因而糖分未明显增加。

在 2 种红膜处理下, RF1 可显著提高南瓜果实中总酚质量分数、南瓜和辣椒果实中可溶性蛋白质量分数, RF2 可显著提高南瓜和辣椒果实中总酚与可溶性蛋白质量分数, 这表明红膜处理有利于促进以上 2 种蔬菜的营养品质提升。这与红膜促进草莓果实中可溶性蛋白积累^[3]、红色转光膜提高黄瓜果实中游离氨基酸和可溶性蛋白质量分数^[32]的研究结果相一致, 可能因为红光通过诱导胞内 Ca^{2+} 信号, 促进氨基酸合成相关基因表达、上调蛋白质合成以及其他相关代谢途径基因表达^[33-35]。与单一白光处理相比, 白光+红光+蓝光处理可提高番茄果实中可溶性固形物质量分数^[36]。在本研究中, RF1 和 RF2 处理均能明显提高黄瓜和南瓜果实中可溶性固形物质量分数, 促进 2 种蔬菜风味品质提升。

4 结论

红膜 RF1 和 RF2 可不同程度提高黄瓜、南瓜和辣椒叶片中光合电子产生与传递, 从而提高 3 种蔬菜光合性能。2 种红膜均能明显促进 3 种蔬菜果实中可溶性蛋白积累, 提高南瓜和黄瓜果实中可溶性固形物质量分数, 促进南瓜和辣椒 (RF2 处理) 果实中总酚积累。然而, RF2 更有利于提高 3 种蔬菜果实中糖、南瓜可溶性固形物和辣椒总酚。因此, RF2 更适宜于搭建设施大棚, 从而促进果蔬品质提升。

5 参考文献

- [1] ARENA C, TSONEV T, DONEVA D, *et al.* The effect of light quality on growth, photosynthesis, leaf anatomy and volatile isoprenoids of a monoterpene-emitting herbaceous species (*Solanum lycopersicum* L.) and an isoprene-emitting tree (*Platanus orientalis* L.) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, **130**: 122–132.
- [2] PARK I S, CHO K J, KIM J, *et al.* Growth and flowering response of *Petunia* to artificial light resources with different light quality [J]. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 2016, **34**: 55–66.
- [3] PENG Xin, WANG Bin, WANG Xile, *et al.* Effects of different colored light-quality selective plastic films on growth, photosynthetic abilities, and fruit qualities of strawberry [J]. *Horticultural Science and Technology*, 2020, **38**(4): 462–473.
- [4] TADDA S A, LI Chengyue, DING Jintao, *et al.* Integrated metabolome and transcriptome analyses provide insight into the effect of red and blue LEDs on the quality of sweet potato leaves[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, **14**: 1181680[2024-09-20]. DOI: [10.3389/fpls.2023.1181680](https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1181680).
- [5] ROOSTA H R, BIKDELOO M, GHORBANPOUR M. The growth, nutrient uptake and fruit quality in four strawberry cultivars under different spectra of LED supplemental light[J/OL]. *BMC Plant Biology*, 2024, **24**(1): 179[2024-09-20]. DOI: [10.1186/s12870-024-04880-5](https://doi.org/10.1186/s12870-024-04880-5).
- [6] 许莉, 刘世琦, 齐连东, 等. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 中国农学通报, 2007, **23**(1): 96–100.
XU Li, LIU Shiqi, QI Liandong, *et al.* Effect of light quality on leaf lettuce photosynthesis and chlorophyll fluorescence [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, **23**(1): 96–100.
- [7] 张斌斌, 蔡志翔, 沈志军, 等. 光质对红叶桃叶片呈色的影响[J]. 果树学报, 2013, **30**(4): 602–607.
ZHANG Binbin, CAI Zhixiang, SHEN Zhijun, *et al.* Effect of different light quality on color generation of red-leaf peach [J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, **30**(4): 602–607.
- [8] 余阳, 刘帅, 李春霞, 等. LED 光质对‘夏黑’葡萄光合特性和生理指标的影响[J]. 果树学报, 2015, **32**(5): 879–884.
YU Yang, LIU Shuai, LI Chunxia, *et al.* Effects of LED light quality on the photosynthetic properties and physiological indexes of ‘Summer black’ grape [J]. *Journal of Fruit Science*, 2015, **32**(5): 879–884.
- [9] 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(2): 369–375.

- XU Kai, GUO Yanping, ZHANG Shanglong. Effects of different light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of strawberry leaves [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, **38**(2): 369–375.
- [10] CHOI H G, MOON B Y, KANG N J. Effects of LED light on the production of strawberry during cultivation in a plastic greenhouse and in a growth chamber [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, **189**: 22–31.
- [11] 尹娟. 不同光质对茄子幼苗形态建成、光合特性及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(23): 121–123.
- YIN Juan. Effects of different light quality on morphogenesis, photosynthetic characteristics and enzyme activity of eggplant seedlings [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(23): 121–123.
- [12] 邬奇, 苏娜娜, 崔瑾. LED 光质补光对番茄幼苗生长及光合特性和抗氧化酶的影响[J]. 北方园艺, 2013(21): 59–63.
- WU Qi, SU Nana, CUI Jin. Effects of LED light quality on growth vitality, photosynthetic performance and antioxidant enzymatic activity of tomato seedlings [J]. *Northern Horticulture*, 2013(21): 59–63.
- [13] 李亚华, 陈龙, 高荣广, 等. LED 光质对茄子果实品质及抗氧化能力的影响[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(9): 2728–2734.
- LI Yahua, CHEN Long, GAO Rongguang, *et al.* Effects of LED qualities on quality and antioxidation capacity of eggplant fruits [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(9): 2728–2734.
- [14] 黄枝, 王美娟, 林碧英. LED 光质对豌豆芽苗菜产量及品质的影响[J]. 亚热带农业研究, 2015, **11**(2): 90–94.
- HUANG Zhi, WANG Meijuan, LIN Biying. Effects of LED light quality on the yield and quality of *Pisum sativum* sprouts [J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2015, **11**(2): 90–94.
- [15] 郑冬梅, 林志斌, 陈艺群, 等. 不同光质对樱桃番茄产量及品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2016, **36**(8): 567–571.
- ZHENG Dongmei, LIN Zhibin, CHEN Yiqun, *et al.* Effects of different light qualities on the yield and quality of cherry tomato [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2016, **36**(8): 567–571.
- [16] 周华, 陈铭, 刘淑娟, 等. LED 光质对‘余干’辣椒生殖生长和果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2017(20): 88–92.
- ZHOU Hua, CHEN Ming, LIU Shujuan, *et al.* Effects of LED quality on reproductive growth and fruit nutrition quality of ‘Yugan’ pepper [J]. *Northern Horticulture*, 2017(20): 88–92.
- [17] ZHANG Xiaolu, JIANG Hong, LIU Weigang, *et al.* Effect of red light on the expression of the phytochrome gene family and the accumulation of glycoside alkaloids in potatoes [J]. *Foods*, 2023, **12**(23): 4194 [2024-09-20]. DOI: [10.3390/foods12234194](https://doi.org/10.3390/foods12234194).
- [18] XU Yanna, YOU Congjun, XU Changbin, *et al.* Red and blue light promote tomato fruit coloration through modulation of hormone homeostasis and pigment accumulation [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2024, **207**: 112588 [2024-09-20]. DOI: [10.1016/j.postharvbio.2023.112588](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2023.112588).
- [19] PENG Xin, WANG Bin, WANG Xile, *et al.* Variations in aroma and specific flavor in strawberry under different colored light-quality selective plastic film [J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2020, **35**(3): 350–359.
- [20] MIAO Lixiang, ZHANG Yuchao, YANG Xiaofang, *et al.* Colored light-quality selective plastic films affect anthocyanin content, enzyme activities, and the expression of flavonoid genes in strawberry (*Fragaria × ananassa*) fruit [J]. *Food Chemistry*, 2016, **207**: 93–100.
- [21] 孙晨晨, 吴春涛, 孙胜楠, 等. 有色膜覆盖对春大白菜光合特性及产量的影响[J]. 园艺学报, 2017, **44**(11): 2099–2108.
- SUN Chenchen, WU Chuntao, SUN Shengnan, *et al.* Effect of colored plastic film on photosynthetic characteristics and yield of Chinese cabbage [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2017, **44**(11): 2099–2108.
- [22] THWE A A, KASEMSAP P, VERCAMBRE G, *et al.* Impact of red and blue nets on physiological and morphological traits, fruit yield and quality of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) [J/OL]. *Scientia Horticulturae*, 2020, **264**: 109185 [2024-09-20]. DOI: [10.1016/j.scienta.2020.109185](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109185).
- [23] 王彬, 田正凤, 应彬彬, 等. 高温胁迫对樟树光合性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, **36**(1): 47–53.
- WANG Bin, TIAN Zhengfeng, YING Binbin, *et al.* Photosynthetic abilities in *Cinnamomum camphora* with high temperature stress [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2019, **36**(1): 47–53.
- [24] 孙春光, 黄乐心, 彭鑫, 等. 不同光照强度对草莓光合性能的影响[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2024, **45**(4): 89–95.
- SUN Chunguang, HUANG Lexin, PENG Xin, *et al.* Effects of different light intensity on photosynthetic abilities in strawberry [J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2024, **45**(4): 89–95.

- [25] 彭鑫, 王喜乐, 倪彬彬, 等. 遮阴对草莓光合特性和果实品质的影响[J]. 果树学报, 2018, **35**(9): 1087–1097.
PENG Xin, WANG Xile, NI Binbin, *et al.* Effects of shading on photosynthetic characteristics and fruit quality in strawberry [J]. *Journal of Fruit Science*, 2018, **35**(9): 1087–1097.
- [26] 陈子航, 陶丽, 俞天泽, 等. 遮光对单叶铁线莲生长与生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2024, **41**(3): 615–623.
CHEN Zihang, TAO Li, CHOU Tianze, *et al.* Effects of shading treatment on growth and physiological characteristics of *Clematis henryi* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(3): 615–623.
- [27] WU Qi, SU Nana, SHEN Wenbiao, *et al.* Analyzing photosynthetic activity and growth of *Solanum lycopersicum* seedlings exposed to different light qualities [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2014, **36**(6): 1411–1420.
- [28] 李岩, 文莲莲, 焦娟, 等. 不同转红光棚膜对甜椒光合特性及果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2017, **53**(12): 2147–2156.
LI Yan, WEN Lianlian, JIAO Juan, *et al.* Effects of different turning red light films on photosynthetic characteristics and fruit quality of sweet pepper [J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, **53**(12): 2147–2156.
- [29] MASTROPASQUA L, TANZARELLA P, PACIOLLA C. Effects of postharvest light spectra on quality and health-related parameters in green *Asparagus officinalis* L. [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, **112**: 143–151.
- [30] 鲁兆宏, 谭婷婷, 滕一鸣, 等. 大豆和花生表型及光合特性对荫蔽的响应[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2023, **49**(4): 526–534.
LU Zhaohong, TAN Tingting, TENG Yiming, *et al.* Phenotypes and photosynthetic characteristics of soybeans and peanuts in response to shading [J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences)*, 2023, **49**(4): 526–534.
- [31] ZHOU Xiaonan, ZHENG Tiefeng, XIE Yike, *et al.* Astaxanthin accumulation in *Microcystis aeruginosa* under different light quality[J/OL]. *Bioresource Technology*, 2022, **346**: 126629[2024-09-20]. DOI: [10.1016/j.biortech.2021.126629](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126629).
- [32] 文莲莲, 苏彦宾, 陈小文, 等. 不同转红光棚膜对黄瓜生长、产量及品质的影响[J]. 天津农业科学, 2019, **25**(11): 39–42.
WEN Lianlian, SU Yanbin, CHEN Xiaowen, *et al.* Effects of different red light greenhouse films on growth, yield and quality of cucumber [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2019, **25**(11): 39–42.
- [33] WANG Jia, SUN Han, MOU Haijin, *et al.* Protein and lysine improvement harnessed by a signal chain of red light-emitting diode light in *Chlorella pyrenoidosa*[J/OL]. *Bioresource Technology*, 2024, **414**: 131620[2024-09-20]. DOI: [10.1016/j.biortech.2024.131620](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.131620).
- [34] CHENG Xia, ZHAO Kaiyuan, HE Xiaorong, *et al.* Differential protein response to different light quality conditions of industrial hemp cultivation based on DIA technology[J/OL]. *Industrial Crops and Products*, 2023, **197**: 116650[2024-09-20]. DOI: [10.1016/j.indcrop.2023.116650](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116650).
- [35] XU Erya, LIU Yuanyuan, GUO Li, *et al.* Transcriptional analysis reveals new insights into the different light intensities of red and blue light on the growth and synthesis of medicinal ingredients in *Dendrobium denneanum*[J/OL]. *Industrial Crops and Products*, 2024, **210**: 118065[2024-09-20]. DOI: [10.1016/j.indcrop.2024.118065](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118065).
- [36] 樊小雪, 凌丹丹, 徐刚, 等. 不同 LED 光照对番茄果实品质和糖类物质含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, **37**(4): 944–948.
FAN Xiaoxue, LING Dandan, XU Gang, *et al.* Effects of different LED light on fruit quality and sugar content of tomato [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, **37**(4): 944–948.