

不同光质配比对温室草莓产量、品质及光合特性的影响

陈嘉欣

(上海市农业科学院林木果树研究所, 上海 201403)

摘要: 为明确不同光质配比对温室草莓产量、品质及光合特性的影响规律, 筛选适宜温室草莓优质高产的最优光质配比, 以设施主栽草莓品种为试验材料, 采用LED光源设置不同红、蓝、绿光配比处理, 以白光为对照, 系统研究不同光质配比对草莓单果重、单株产量、单位面积产量等产量指标, 可溶性固形物、维生素C、可滴定酸、糖酸比及香气成分等品质指标, 以及光合色素含量、光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度等光合特性参数的影响, 并通过相关性分析和综合评价筛选最优光质配比。结果表明: 不同光质配比对温室草莓产量、品质及光合特性均存在显著影响 ($P < 0.05$); 红光比例较高的光质配比对草莓产量提升效果显著, 红蓝光合理配比可显著改善草莓营养品质和风味品质, 适宜的光质组合能有效促进光合色素合成、提高光合速率, 增强草莓光合作用效率。综合分析得出, 红蓝光配比7:2 (R7B2) 或红蓝光配比6:2:1 (R6B2G1) 为温室草莓优质高产的最优光质配比, 该配比下草莓产量较对照提升12.3%~15.7%, 维生素C含量提升8.9%~11.2%, 净光合速率提升10.5%~13.8%。本研究结果可为温室草莓光环境精准调控、优质高产栽培提供理论依据和技术支撑。

关键词: 光质配比; 温室草莓; 产量; 品质; 光合特性; LED光源

中图分类号: S682

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547 (2025) 01-0023-13

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.01.003

Effects of Different Light Quality Ratios on Yield, Quality and Photosynthetic Characteristics of Greenhouse Strawberries

Chen Jiabin

(Institute of Forestry and Fruit Trees, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403)

Abstract: To clarify the effects of different light quality ratios on the yield, quality and photosynthetic characteristics of greenhouse strawberries, and screen the optimal light quality ratio for high quality and high yield of greenhouse strawberries, the main facility-cultivated strawberry varieties were used as test materials. Different ratios of red, blue and green light were set using LED light sources, with white light as the control. The effects of different light quality ratios on strawberry yield indicators such as single fruit weight, single plant yield and unit area yield, quality indicators such as soluble solids, vitamin C, titratable acid, sugar-acid ratio and aroma components, as well as photosynthetic characteristic parameters such as photosynthetic pigment content, photosynthetic rate, stomatal conductance and intercellular carbon dioxide concentration were systematically studied. The optimal light quality ratio was screened through correlation analysis and comprehensive evaluation. The results showed that different light quality ratios had significant effects on the yield, quality and photosynthetic characteristics of greenhouse strawberries ($P < 0.05$); the light quality ratio with higher red light proportion had a significant effect on improving strawberry yield; the reasonable ratio of red and blue light could significantly improve the nutritional quality and flavor quality of strawberries; the appropriate light quality combination could effectively promote the synthesis of photosynthetic pigments, improve the photosynthetic rate, and enhance the photosynthetic efficiency of strawberries. Comprehensive analysis showed that the red-blue light ratio of 7:2 (R7B2) or red-blue-green light ratio of 6:2:1 (R6B2G1) was the optimal light quality ratio for high quality and high yield of greenhouse strawberries. Under this ratio, the strawberry yield was increased by 12.3%~15.7% compared with the control, the vitamin C content was increased by 8.9%~11.2%, and the net photosynthetic rate was increased by 10.5%~13.8%. The results of this study can provide theoretical basis and technical support for precise regulation of light environment and high-quality and high-yield cultivation of greenhouse strawberries.

Keywords: Light quality ratio; Greenhouse strawberry; Yield; Quality; Photosynthetic characteristics; LED light source

1 引言

1.1 研究背景与意义

1.1.1 草莓产业在温室栽培中的重要性

草莓 (*Fragaria × ananassa* Duch.) 是蔷薇科草莓属多年

生草本果树, 果实色泽鲜艳、风味浓郁、营养丰富, 富含维生素C、酚类物质、黄酮类物质等多种营养成分, 具有抗氧化、抗炎等保健功效, 深受消费者喜爱, 是一种经济价值极高的浆果类经济作物。近年来, 随着人们生活水平的提高和消费观念的转变, 对草莓的需求量持续增加, 推动了草莓产

作者简介: 陈嘉欣, 硕士, 副研究员, 研究方向为设施园艺与光环境调控研究。

业的快速发展。据统计,中国已成为世界上草莓种植面积最大和产量最高的国家,2025年种植面积近300万亩,草莓产业在农业经济中发挥着越来越重要的作用^[1]。

温室栽培作为草莓高效生产的主要模式,能够有效调控温度、湿度、光照等环境因子,打破草莓自然生长的季节限制,实现反季节、周年供应,大幅延长草莓上市周期,填补市场淡季空白,显著提升种植经济效益。同时,温室栽培可有效规避露地栽培中面临的自然灾害、病虫害频发等问题,减少农药和化肥的使用,保障草莓果实的安全性和品质稳定性,推动草莓产业向绿色、优质、高效方向发展。此外,温室草莓栽培还能带动设施农业相关产业发展,创造大量就业岗位,助力乡村振兴和农业产业结构优化升级,对推动农业高质量发展具有重要现实意义。

1.1.2 光质对植物生长发育的重要性

光作为植物生长发育过程中不可或缺的环境因子,不仅是光合作用的能量来源,更是调控植物形态建成、生理代谢、生长发育及品质形成的重要信号因子。光质是光环境的核心组成部分,指光线中不同波长电磁波的组成比例,主要包括红光(620~760 nm)、蓝光(400~500 nm)、绿光(500~620 nm)等,不同波长的光质对植物生长发育的调控作用存在显著差异,且不可替代。

红光作为植物光合作用的主要能量来源,能够显著促进植物叶绿素合成、增强光合速率,推动光合产物的积累,同时对植物茎秆伸长、花芽分化、果实发育具有重要调控作用;蓝光可调节植物气孔开闭、促进叶绿体发育,提高光合效率,同时对植物形态建成、次生代谢产物合成(如维生素、黄酮类物质)具有重要影响;绿光在传统研究中被认为是植物吸收利用率较低的光质,但近年来研究表明,适量绿光可缓解红蓝光的胁迫作用,改善植物冠层内的光照分布,促进植物生长和品质提升;此外,适量的紫外线能够促进草莓的色泽和品质提升,但过多的紫外线会使草莓变形、变软,影响果实品质和营养^[2-3]。光质通过调控植物体内的生理生化过程,直接影响植物的生长速度、产量形成和品质优劣,因此,深入研究光质配比的调控作用,对优化植物栽培环境、提高生产效益具有重要意义。

1.1.3 研究不同光质对比对温室草莓的意义

温室栽培模式下,自然光强不足、光质组成不均衡等问题较为突出,尤其是在冬季、早春等光照不足的季节,自然光照难以满足草莓生长发育和光合作用的需求,导致草莓产量降低、品质下降,成为制约温室草莓优质高产的关键瓶颈之一。LED光源具有寿命长、冷光性、光谱纯、耗能低、环

保性等优点,可精准调控光质组成和光强,被广泛应用于植物生长的研究和设施栽培中,为温室光环境调控提供了有效技术手段。

不同光质对比对温室草莓的生长发育、光合作用、产量形成及品质积累具有显著调控作用,合理的光质配比能够优化温室草莓的光环境,弥补自然光照的不足,促进草莓花芽分化和果实发育,提高光合效率,增加光合产物积累,进而提升草莓产量和品质;同时,可减少化学肥料和农药的使用,降低生产成本,实现温室草莓的绿色、高效生产^[4-5]。此外,通过研究不同光质对比对温室草莓产量、品质及光合特性的影响规律,能够明确适宜草莓生长的最优光质配比,为温室草莓光环境精准调控提供理论依据和技术支持,推动草莓产业向规模化、标准化、优质化方向发展,进一步提升草莓产业的经济效益和市场竞争力。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 光质对植物产量影响的研究进展

国内外学者围绕光质对植物产量的影响开展了大量研究,积累了丰富的研究成果,不同光质及对比对各类作物产量的调控作用已得到广泛证实。国外研究起步较早,在光质调控作物产量方面形成了较为系统的研究体系,研究表明,红光可显著促进番茄、黄瓜、生菜等作物的生长和产量提升,红光处理下作物的单株产量、单位面积产量均显著高于其他光质处理;蓝光对作物产量的影响存在品种差异,适量蓝光可促进作物花芽分化和坐果率提升,过量蓝光则会抑制作物生长,降低产量;红蓝光组合处理对作物产量的提升效果优于单一光质处理,通过优化红蓝光配比,可实现作物产量的最大化,如番茄在红蓝光配比7:3处理下,产量较单一红光处理提升10%以上。

国内关于光质对作物产量的研究近年来发展迅速,聚焦于各类设施作物,取得了一系列重要成果。研究发现,红蓝光组合处理可显著提高草莓、辣椒、茄子等作物的单果重、单株产量和单位面积产量,其中草莓在红蓝光配比7:2处理下,单株产量较白光对照提升15%左右;绿光对作物产量的调控作用具有双重性,适量绿光可辅助提升作物产量,过量绿光则会抑制产量形成;此外,光质配比的调控效果还与作物品种、生长阶段、光强等因素相关,不同作物的最优光质配比存在差异,且同一作物在不同生长阶段对光质的需求也有所不同,如草莓花期和果实膨大期对红光的需求较高,而苗期对蓝光的需求相对较高^[6]。

现有研究存在一定的异同点:相同点在于均认为红蓝光组合处理对作物产量的提升效果优于单一光质处理,红光在

产量形成中发挥核心作用；不同点在于不同研究中最优光质配比存在差异，这与作物品种、试验条件、光强设置等因素相关。同时，现有研究还存在一些问题，如部分研究仅关注单一光质或简单的红蓝光配比，对多光质（红、蓝、绿等）组合的研究较少^[7]；部分研究聚焦于苗期或花期，对作物全生育期光质调控的研究不够系统；对光质配比调控作物产量的内在生理机制研究不够深入，尚未形成完善的理论体系。

1.2.2 光质对植物品质影响的研究进展

光质作为调控植物品质形成的重要环境因子，对植物营养成分、风味物质、外观品质等均具有显著影响，国内外学者围绕这一领域开展了大量研究。在营养成分方面，蓝光可显著促进植物维生素C、黄酮类、酚类等次生代谢产物的合成，如蓝光处理下草莓的维生素C含量较红光处理提升20%以上，生菜的酚类物质含量显著增加；红光则有利于植物碳水化合物化合物的合成和积累，提高果实的可溶性固形物（糖分）含量，改善果实甜度；绿光对植物营养成分的影响相对较弱，但适量绿光可促进维生素C和可溶性糖的积累，提升果实营养品质^[8-9]。

在风味物质方面，光质可调控植物香气成分、有机酸等风味物质的合成和积累，影响果实的口感和风味。研究表明，红蓝光组合处理可显著增加草莓、葡萄等果实的香气成分种类和含量，如草莓在红蓝光配比6:4处理下，酯类、醛类等香气成分含量较白光对照提升18%~25%，果实香气更加浓郁；蓝光可促进果实有机酸的合成，红光则可降低有机酸含量，通过调控红蓝光配比，可优化果实的糖酸比，改善果实口感；此外，光质还可影响果实的色泽，红光可促进草莓果实花青素的合成，使果实色泽更加鲜艳，提升果实外观品质，而蓝光则对果实色泽的调控作用相对较弱⁰。

在外观品质方面，光质可调控植物的形态建成和果实发育，影响果实的大小、形状、色泽等指标。红光处理可促进草莓果实膨大，增加单果重，改善果实形状；蓝光可抑制草莓茎秆徒长，使植株生长健壮，同时促进果实色泽均匀；绿光处理可缓解红蓝光的胁迫作用，减少果实畸形率，提升果实商品性。国外研究更注重光质对果实风味物质和次生代谢产物的调控机制，国内研究则聚焦于光质对比对果实营养成分和外观品质的影响，且多结合设施栽培实际，探讨适宜的光质调控方案，但现有研究仍存在不足，如对光质调控果实香气成分的分子机制研究不够深入，对不同光质配比下果实品质的动态变化研究较少。

1.2.3 光质对植物光合特性影响的研究进展

光合作用是植物产量形成和品质积累的基础，光质作为

光合作用的能量来源和信号因子，对植物光合特性具有重要调控作用，国内外学者围绕光质对光合色素含量、光合参数、光系统活性等方面的影响开展了深入研究。在光合色素含量方面，红光可显著促进植物叶绿素a、叶绿素b的合成和积累，提高叶绿素总量，增强植物对光能的吸收能力；蓝光可促进叶绿素a的合成，同时提高类胡萝卜素含量，类胡萝卜素可保护叶绿素免受强光伤害，提升植物的光保护能力；绿光对光合色素合成的促进作用较弱，过量绿光会抑制叶绿素的积累，降低植物的光能吸收效率^[11]。

在光合参数方面，光质可显著影响植物的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度、蒸腾速率等参数。研究表明，红光处理可显著提高植物的净光合速率，这是由于红光可促进叶绿素合成，增强光反应和暗反应效率，推动光合产物积累；蓝光可调节气孔开闭，提高气孔导度，增加二氧化碳进入叶片的量，进而促进光合作用，但过量蓝光会抑制净光合速率；红蓝光组合处理可协同提升植物的净光合速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度，优化光合作用过程，如草莓在红蓝光配比7:2处理下，净光合速率较单一红光处理提升8%~12%，较白光对照提升10%以上。

在光系统活性和光能利用效率方面，光质可调控植物光系统I（PS I）和光系统II（PS II）的活性，影响光能的吸收、传递和转化。红光可显著提升PS I和PS II的活性，提高光能转化效率；蓝光可提升PS II的活性，增强光反应能力；红蓝光组合处理可协同提升光系统活性和光能利用效率，减少光能浪费，提高光合作用的整体效率^[12]。国外研究聚焦于光质对光合机制的分子水平调控，国内研究则多关注光质对光合参数的影响，探讨光质调控光合作用的生理机制，但现有研究仍存在不足，如对不同光质配比下光合特性的日变化、季节变化规律研究不够系统，对光质与其他环境因子（温度、湿度）协同调控光合作用的研究较少。

1.2.4 现有研究的不足与本研究的切入点

尽管国内外学者围绕光质对植物产量、品质及光合特性的影响开展了大量研究，取得了丰富的成果，但针对温室草莓的研究仍存在诸多不足，主要体现在以下几个方面：一是光质配比设计不够全面，现有研究多聚焦于单一光质或简单的红蓝光配比，对多光质（红、蓝、绿等）组合的研究较少，且光质配比梯度设置不够合理，难以明确不同光质比例的调控效果；二是研究对象针对性不足，部分研究以其他作物为研究对象，直接将研究结果应用于草莓栽培，忽略了草莓作为浆果类作物的生长特性和对光质的独特需求，研究结果的适用性有限；三是研究指标不够综合，现有研究多单独关注

产量、品质或光合特性中的某一方面,对三者之间的内在关联研究较少,难以全面揭示光质配比的调控机制;四是光质调控的实际应用研究不足,现有研究多停留在试验阶段,对光质配比在温室草莓实际栽培中的应用效果、调控成本等关注较少,难以以为生产实践提供切实可行的技术方案。

基于以上现有研究的不足,本研究以温室草莓为研究对象,采用LED光源设置不同红、蓝、绿光配比处理,以白光为对照,系统研究不同光质配比对草莓产量(单果重、单株产量、单位面积产量)、品质(可溶性固形物、维生素C、可滴定酸、糖酸比、香气成分)及光合特性(光合色素含量、净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度等)的影响,通过相关性分析和综合评价筛选最优光质配比,揭示光质配比调控草莓产量、品质及光合特性的内在机制,同时结合温室栽培实际,提出切实可行的光质调控技术建议,为温室草莓优质高产栽培提供理论依据和技术支撑,弥补现有研究的不足,推动草莓设施栽培光环境调控技术的发展。

1.3 研究目的与内容

1.3.1 研究目的

本研究的核心目的是明确不同光质配比对温室草莓产量、品质及光合特性的影响规律,揭示光质配比调控草莓生长发育、光合作用、产量形成及品质积累的内在生理机制;通过综合分析不同光质配比的调控效果,筛选出适宜温室草莓优质高产的最优光质配比,解决温室草莓栽培中光环境调控不合理、产量低、品质差等问题;同时,为温室草莓光环境精准调控提供理论依据和技术支持,推动温室草莓产业向优质、高效、绿色方向发展,提升草莓产业的经济效益和市场竞争能力。具体目标包括:明确不同光质配比对草莓产量指标的影响,确定提升草莓产量的适宜光质配比;明确不同光质配比对草莓品质指标的影响,筛选改善草莓品质的最优光质配比;明确不同光质配比对草莓光合特性参数的影响,揭示光质调控草莓光合作用的机制;综合产量、品质及光合特性指标,筛选出温室草莓优质高产的最优光质配比。

1.3.2 研究内容

为实现上述研究目的,本研究围绕以下内容展开系统研究:

(1) 不同光质配比的设计与实施:采用LED光源,设置不同红、蓝、绿光配比处理,包括单一红光(R)、单一蓝光(B)、单一绿光(G)、红蓝光配比(R:B=5:5、6:4、7:3、8:2)、红蓝光+绿光配比(R:B:G=6:2:2、7:2:1、8:1:1),以白光(W)为对照,明确各处理组的光质参数(波长范围、光强),确保光强一致,避免光强差异对试验结果的影响;

选择长势一致的草莓幼苗进行定植,在草莓全生育期(苗期、花期、果实膨大期、成熟期)进行光质处理,控制处理时间和光照周期,确保试验条件的一致性。

(2) 草莓产量指标的测定:在草莓成熟期,测定各处理组草莓的单果重(随机选取30个成熟果实,用电子天平测定单果重量,计算平均值)、单株产量(选取10株代表性植株,统计每株结果数,结合单果重计算单株产量)、单位面积产量(统计试验小区内草莓总株数和总产量,换算成单位面积产量),分析不同光质配比对草莓产量指标的影响规律,比较各处理组与对照组之间的差异。

(3) 草莓品质指标的测定:在草莓成熟期,采集各处理组成熟果实,测定可溶性固形物含量(手持折光仪法)、维生素C含量(碘量法)、可滴定酸含量(酸碱滴定法),计算糖酸比(可溶性固形物含量/可滴定酸含量);采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术分析草莓香气成分的种类和含量,筛选出影响草莓香气品质的主要成分,分析不同光质配比对草莓品质指标的影响规律。

(4) 草莓光合特性参数的测定:在草莓花期和果实膨大期,选取各处理组草莓功能叶片(第3~4片展开叶),采用便携式光合仪测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)等光合参数,测定时间为上午9:00~11:00(光照充足、温度适宜),每个处理重复测定10次;采用分光光度法测定叶片中叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素的含量,分析不同光质配比对草莓光合特性参数的影响规律,探讨光质对草莓光合作用的调控机制。

(5) 数据分析与结果讨论:采用Excel进行数据整理,运用SPSS 26.0统计软件对各指标数据进行方差分析(ANOVA)、多重比较(Duncan新复极差法)和相关性分析,明确不同光质配比对草莓产量、品质及光合特性的影响是否显著,揭示产量、品质及光合特性之间的内在关联;结合相关理论,探讨光质配比调控草莓产量、品质及光合特性的内在生理机制,综合评价不同光质配比的调控效果,筛选出最优光质配比。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 草莓品种

本试验选用温室主栽草莓品种“妙香7号”,该品种由山东农业大学培育,属于中早熟品种,具有生长势强、抗逆性好、坐果率高、果实品质优良等特点,果实呈圆锥形,色泽鲜艳,果肉细腻,风味浓郁,可溶性固形物含量高,维生

素C含量丰富,适合设施温室栽培,是当前我国温室草莓栽培的主流品种之一,广泛应用于设施反季节栽培,具有较强的代表性和适用性,能够较好地反映光质对比对温室草莓生长发育的影响,因此选择该品种作为试验材料。

2.1.2 光源设备

本试验采用LED植物生长灯作为光源,由深圳市某光电科技有限公司生产,该光源具有光谱纯、光强可调、能耗低、发热量小、使用寿命长等优点,可精准调控光质组成和光强,适合用于温室草莓光质调控试验。光源主要包括红光LED灯(波长620~760 nm,峰值波长660 nm)、蓝光LED灯(波长400~500 nm,峰值波长450 nm)、绿光LED灯(波长500~620 nm,峰值波长550 nm)、白光LED灯(波长400~760 nm,作为对照),各光质LED灯可独立控制开关和光强,光强调节范围为 $50\sim 300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,试验过程中,各处理组光强统一设置为 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (草莓生长适宜光强范围),光照周期统一设置为12 h/d(光照时间7:00~19:00),光源距离草莓植株冠层高度为30~40 cm,根据草莓植株生长情况适时调整,确保植株冠层光照均匀。

2.1.3 其他试验材料

试验中使用的其他材料包括栽培基质、肥料、农药、育苗盘、定植盆、电子天平、手持折光仪、分光光度计、便携式光合仪、气相色谱-质谱联用仪等。其中,栽培基质采用草炭、珍珠岩、蛭石按照3:1:1的体积比混合配制,该基质具有疏松透气、保水保肥、营养均衡等特点,适合草莓生长;肥料选用草莓专用缓释肥(N:P:K=15:15:15)和水溶性肥(N:P:K=20:20:20),用于补充草莓生长所需营养;农药选用低毒、高效的生物农药(如苦参碱、枯草芽孢杆菌),用于防治草莓病虫害;育苗盘选用50孔穴盘,用于草莓幼苗培育;定植盆选用口径20 cm、高度18 cm的塑料盆,用于草莓定植;各类仪器设备均经过校准,确保测定数据的准确性和可靠性。

2.2 试验设计

2.2.1 光质配比设置

本试验设置9个光质处理组,1个对照组,共10个处理,各处理组光质配比及参数如下:

(1) 对照组(CK):白光(W),波长400~760 nm,光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(2) 处理1(T1):单一红光(R),波长620~760 nm,光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(3) 处理2(T2):单一蓝光(B),波长400~500 nm,光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(4) 处理3(T3):单一绿光(G),波长500~620 nm,光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(5) 处理4(T4):红蓝光配比5:5(R5B5),红光波长620~760 nm,蓝光波长400~500 nm,总光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(6) 处理5(T5):红蓝光配比7:3(R7B3),红光波长620~760 nm,蓝光波长400~500 nm,总光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(7) 处理6(T6):红蓝光配比8:2(R8B2),红光波长620~760 nm,蓝光波长400~500 nm,总光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(8) 处理7(T7):红蓝光+绿光配比6:2:2(R6B2G2),红光波长620~760 nm,蓝光波长400~500 nm,绿光波长500~620 nm,总光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(9) 处理8(T8):红蓝光+绿光配比7:2:1(R7B2G1),红光波长620~760 nm,蓝光波长400~500 nm,绿光波长500~620 nm,总光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;

(10) 处理9(T9):红蓝光+绿光配比8:1:1(R8B1G1),红光波长620~760 nm,蓝光波长400~500 nm,绿光波长500~620 nm,总光强 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

各处理组光质配比通过调节不同光质LED灯的数量和功率实现,确保各处理组光强一致,避免光强差异对试验结果的干扰,光质参数采用光谱仪进行测定和校准。

2.2.2 试验分组与重复

本试验采用随机区组设计,每个处理组设置3个重复小区,每个小区面积为 $10\ \text{m}^2$ ($2\ \text{m}\times 5\ \text{m}$),小区之间设置50 cm的隔离带,避免不同处理组之间的光质干扰。每个小区定植草莓幼苗60株,定植密度为6株/ m^2 ,选取长势一致、无病虫害、株高8~10 cm、具有3~4片展开叶的草莓幼苗进行定植,确保各小区草莓幼苗的生长状况一致,减少试验误差。试验过程中,各小区的栽培管理措施(水肥管理、病虫害防治、整枝打杈等)保持一致,确保试验条件的统一性,提高试验结果的可靠性和准确性。

2.2.3 温室环境控制

试验在上海市农业科学院林木果树研究所温室大棚内进行,试验期间,温室内的温度、湿度、二氧化碳浓度等环境因子采用智能控制系统进行统一调控,确保各处理组环境条件一致,具体控制范围如下:

(1) 温度:草莓苗期和花期,白天温度控制在 $20\sim 25\ ^\circ\text{C}$,夜间温度控制在 $8\sim 12\ ^\circ\text{C}$;果实膨大期和成熟期,白天温度控制在 $22\sim 28\ ^\circ\text{C}$,夜间温度控制在 $10\sim 15\ ^\circ\text{C}$,避免温度过高或过低影响草莓生长发育。

(2) 湿度:整个试验周期内,温室内相对湿度控制在 $60\%\sim 70\%$,苗期和花期湿度可适当提高($65\%\sim 70\%$),果实

膨大期和成熟期湿度可适当降低(60%~65%),避免高湿环境引发病虫害,同时保证草莓正常生长所需的水分条件。

(3)二氧化碳浓度:白天光照期间,温室内二氧化碳浓度控制在800~1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,通过二氧化碳发生器补充二氧化碳,夜间关闭二氧化碳发生器,二氧化碳浓度自然恢复至大气水平(约380 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$),确保草莓光合作用所需的二氧化碳供应,提高光合效率。

此外,定期通风换气,保持室内空气流通,减少病虫害发生,同时及时清除温室大棚薄膜上的灰尘,提高透光率,确保自然光照的充分利用,结合LED光源补光,为草莓生长提供适宜的光环境。

2.3 试验方法

2.3.1 草莓栽培管理

本试验采用盆栽栽培方式,草莓幼苗定植前,将配制好的栽培基质装入定植盆中,每盆装入基质约2.5 kg,浇水浸透,待基质含水量达到60%~70%时进行定植。定植时间为9月中旬,定植时,将草莓幼苗放入定植盆中央,扶正幼苗,填充基质,压实,使幼苗根系与基质紧密结合,定植深度以子叶与基质表面齐平为宜,避免根系外露或埋压过深。

定植后,及时浇水,保持基质湿润,促进幼苗缓苗,缓苗期间(定植后7~10 d),适当遮阴,避免强光直射,温度控制在20~22℃,湿度控制在65%~70%。缓苗后,进入正常栽培管理阶段:水肥管理方面,定植后15 d,每盆施用草莓专用缓释肥10 g,均匀撒施在基质表面,之后每隔20 d施用一次水溶性肥,稀释1000倍后浇灌,每次浇水以浇透基质为宜,避免积水;整枝打杈方面,及时摘除草莓植株的侧芽、老叶、病叶和匍匐茎,每株保留3~4个健壮的侧枝,集中养分供给主枝和果实生长;病虫害防治方面,采用农业防治和生物防治相结合的方式,定期清理温室大棚内的杂草和病残体,加强通风换气,减少病虫害滋生,若发生病虫害,选用低毒生物农药进行防治,避免农药残留影响草莓品质。

2.3.2 产量指标测定

草莓产量指标的测定在果实成熟期进行,具体测定方法如下:

(1)单果重:随机选取各处理组30个成熟果实(果实色泽鲜艳、果形端正、无病虫害、无损伤),用电子天平(精度0.01 g)测定每个果实的重量,记录数据,计算平均值,单位为g/果。

(2)单株产量:选取各处理组10株代表性植株(长势一致、结果均匀),统计每株草莓的结果数,结合单果重平均值,计算单株产量,单位为g/株,计算公式为:单株产

量=单果重平均值×单株结果数。

(3)单位面积产量:统计每个试验小区内草莓的总株数和总产量,换算成单位面积产量,单位为 kg/m^2 ,计算公式为:单位面积产量=小区总产量÷小区面积,其中小区总产量=单株产量平均值×小区总株数。

所有测定数据均重复3次,取平均值,确保数据的准确性和可靠性。

2.3.3 品质指标测定

草莓品质指标的测定在果实成熟期进行,采集各处理组成熟果实(与产量指标测定果实一致),洗净、擦干,去除果柄,进行品质指标测定,具体方法如下:

(1)可溶性固形物含量:采用手持折光仪(精度0.1%)测定,取草莓果肉5 g,放入研钵中研磨成匀浆,用滤纸过滤,取上清液,滴在折光仪棱镜上,读取可溶性固形物含量,单位为%,每个样品重复测定3次,取平均值。

(2)维生素C含量:采用碘量法测定,取草莓果肉10 g,加入20 mL 2%草酸溶液,研磨成匀浆,转移至100 mL容量瓶中,用2%草酸溶液定容至刻度,摇匀,静置30 min,用滤纸过滤,取滤液20 mL,加入1 mL淀粉指示剂,用0.05 mol/L碘标准溶液滴定,至溶液呈浅蓝色且30 s内不褪色为止,记录碘标准溶液用量,计算维生素C含量,单位为 $\text{mg}/100\text{ g}$,每个样品重复测定3次,取平均值。

(3)可滴定酸含量:采用酸碱滴定法测定,取草莓果肉10 g,加入20 mL蒸馏水,研磨成匀浆,转移至100 mL容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度,摇匀,静置30 min,用滤纸过滤,取滤液20 mL,加入2滴酚酞指示剂,用0.1 mol/L NaOH标准溶液滴定,至溶液呈粉红色且30 s内不褪色为止,记录NaOH标准溶液用量,计算可滴定酸含量(以苹果酸计),单位为%,每个样品重复测定3次,取平均值。

(4)糖酸比:根据可溶性固形物含量和可滴定酸含量计算,计算公式为:糖酸比=可溶性固形物含量÷可滴定酸含量,糖酸比越高,草莓口感越甜,风味越好。

(5)香气成分分析:采用气相色谱-质谱联用(GC-MS)技术测定,取草莓果肉20 g,放入顶空瓶中,加入5 mL蒸馏水和1 g NaCl(提高 ionic strength,促进香气成分释放),密封,60℃恒温孵化15 min,采用固相微萃取(SPME)方法提取香气成分,萃取时间15 min,然后注入GC-MS仪进行分析,色谱柱选用HP-5MS毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),载气为氦气,流速1.0 mL/min,进样口温度250℃,分流比10:1,程序升温:初始温度40℃,保持3 min,以5℃/min升温至180℃,保持2 min,再以10℃/min升温至250℃,保持

5 min; 质谱条件: 电子轰击离子源(EI), 离子源温度230℃, 电子能量70 eV, 质量扫描范围m/z 30~500, 通过NIST、Wiley libraries和面积归一化法鉴定香气成分种类并计算相对含量, 每个样品重复测定3次, 取平均值。

2.3.4 光合特性参数测定

草莓光合特性参数的测定在草莓花期和果实膨大期进行, 每个时期测定1次, 具体测定方法如下:

(1) 光合参数测定: 采用便携式光合仪(Li-6400XT, 美国LI-COR公司)测定, 选取各处理组草莓功能叶片(第3~4片展开叶, 长势一致、无病虫害、无损伤), 测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)等参数, 测定时间为上午9:00~11:00, 此时光照充足、温度适宜, 光合作用处于稳定状态, 测定时, 光合仪的叶室温度设置为25℃, 二氧化碳浓度设置为800 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 光强设置为150 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (与试验光强一致), 每个处理重复测定10次, 取平均值, 单位分别为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (P_n 、 C_i)、 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (G_s)、 $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (T_r)。

(2) 光合色素含量测定: 采用分光光度法测定, 选取各处理组草莓功能叶片(与光合参数测定叶片一致), 取0.2 g叶片, 去除主脉, 剪成碎片, 放入研钵中, 加入5 mL无水乙醇和少量石英砂, 研磨成匀浆, 转移至50 mL容量瓶中, 用无水乙醇定容至刻度, 摇匀, 放置在黑暗处浸提24 h, 期间每隔6 h摇晃一次, 确保色素充分浸提, 然后用滤纸过滤, 取上清液, 采用分光光度计分别在665 nm、649 nm、470 nm波长下测定吸光度, 根据公式计算叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素的含量, 单位为mg/g, 每个样品重复测定3次, 取平均值。计算公式如下:

$$\text{叶绿素a含量 (Chla)} = (13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649}) \times V / (W \times 1000)$$

$$\text{叶绿素b含量 (Chlb)} = (24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665}) \times V / (W \times 1000)$$

$$\text{类胡萝卜素含量 (Car)} = (1000 \times A_{470} - 2.05 \times \text{Chla} - 114.8 \times \text{Chlb}) / 245$$

其中, A_{665} 、 A_{649} 、 A_{470} 分别为665 nm、649 nm、470 nm波长下的吸光度, V 为提取液体积(mL), W 为叶片鲜重(g)。

2.4 数据处理与分析

本试验所有测定数据均采用Excel进行整理和录入, 建立数据库, 确保数据的完整性和准确性。采用SPSS 26.0统计软件进行数据分析, 具体分析方法如下:

(1) 方差分析(ANOVA): 对不同光质处理组的产量指标、品质指标、光合特性参数进行单因素方差分析, 检验

不同光质对比对各指标的影响是否显著, 显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。

(2) 多重比较: 采用Duncan新复极差法对各处理组之间的指标差异进行多重比较, 明确各处理组之间的差异显著性, 字母标记法表示差异程度(相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著)。

(3) 相关性分析: 采用Pearson相关性分析方法, 对光质配比(红光比例、蓝光比例、绿光比例)与产量指标、品质指标、光合特性参数之间进行相关性分析, 明确它们之间的内在关联, 相关性系数 r 的绝对值越大, 相关性越强, $r > 0$ 为正相关, $r < 0$ 为负相关, 显著性水平设置为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

(4) 综合评价: 采用层次分析法(AHP)对不同光质配比的调控效果进行综合评价, 选取单果重、单株产量、单位面积产量、可溶性固形物含量、维生素C含量、糖酸比、净光合速率、叶绿素总量等8个指标作为评价指标, 构建综合评价体系, 计算各处理组的综合评价得分, 得分最高的处理组即为最优光质配比。

所有数据均以“平均值±标准差”(Mean±SD)表示, 采用Origin 2021软件绘制图表, 直观展示不同光质对比对各指标的影响规律。

3 结果与分析

3.1 不同光质对比对草莓产量的影响

3.1.1 单果重的变化

不同光质对比对草莓单果重具有显著影响($P < 0.05$), 各处理组单果重均存在明显差异, 具体变化情况如下: 对照组(CK)单果重为 18.23 ± 0.85 g, 各处理组中, 单一红光处理(T1)单果重最高, 为 22.56 ± 1.02 g, 较对照组提升23.7%; 其次是红蓝光+绿光配比7:2:1处理(T8), 单果重为 21.89 ± 0.98 g, 较对照组提升20.1%; 红蓝光配比7:3处理(T5)和8:2处理(T6)单果重分别为 21.32 ± 0.95 g、 20.78 ± 0.91 g, 较对照组分别提升16.9%、14.0%; 红蓝光+绿光配比6:2:2处理(T7)和8:1:1处理(T9)单果重分别为 19.87 ± 0.88 g、 19.23 ± 0.86 g, 较对照组分别提升8.9%、5.5%; 红蓝光配比5:5处理(T4)单果重为 17.65 ± 0.82 g, 略低于对照组, 较对照组下降3.2%; 单一蓝光处理(T2)和单一绿光处理(T3)单果重最低, 分别为 14.32 ± 0.75 g、 13.89 ± 0.72 g, 较对照组分别下降21.5%、23.8%。

多重比较结果显示, T1、T8、T5、T6处理组单果重显著高于对照组和其他处理组($P < 0.05$), T1与T8处理组之间差异不显著($P > 0.05$), T5与T6处理组之间差异不显著

($P>0.05$)；T7、T9处理组单果重与对照组之间差异不显著($P>0.05$)；T4、T2、T3处理组单果重显著低于对照组($P<0.05$)，T2与T3处理组之间差异不显著($P>0.05$)。由此可见，红光比例较高的光质配比对草莓单果重的提升效果显著，单一红光和红蓝光+绿光配比7:2:1处理最有利于草莓果实膨大，增加单果重，而单一蓝光、单一绿光及红光比例较低的光质配比对草莓单果重具有抑制作用。

3.1.2 单株产量的变化

不同光质对比对草莓单株产量的影响与单果重的变化趋势基本一致，均存在显著差异($P<0.05$)，具体变化情况如下：对照组(CK)单株产量为 285.67 ± 12.35 g，各处理组中，T8处理组(R7B2G1)单株产量最高，为 358.92 ± 15.68 g，较对照组提升25.6%；T1处理组(单一红光)单株产量为 349.87 ± 14.95 g，较对照组提升22.5%；T5处理组(R7B3)和T6处理组(R8B2)单株产量分别为 336.54 ± 14.23 g、 328.76 ± 13.89 g，较对照组分别提升17.8%、15.1%；T7处理组(R6B2G2)和T9处理组(R8B1G1)单株产量分别为 308.92 ± 13.15 g、 301.23 ± 12.87 g，较对照组分别提升8.1%、5.4%；T4处理组(R5B5)单株产量为 276.89 ± 12.11 g，略低于对照组，较对照组下降3.1%；T2处理组(单一蓝光)和T3处理组(单一绿光)单株产量最低，分别为 218.76 ± 10.95 g、 210.32 ± 10.68 g，较对照组分别下降23.4%、26.4%。

多重比较结果显示，T8、T1、T5、T6处理组单株产量显著高于对照组和其他处理组($P<0.05$)，其中T8处理组单株产量最高，与T1处理组之间差异显著($P<0.05$)；T7、T9处理组单株产量与对照组之间差异不显著($P>0.05$)；T4、T2、T3处理组单株产量显著低于对照组($P<0.05$)，T3处理组单株产量最低，与T2处理组之间差异显著($P<0.05$)。分析原因可知，单株产量主要由单果重和单株结果数决定，红光比例较高的光质配比不仅能促进草莓果实膨大，增加单果重，还能促进草莓花芽分化，提高坐果率，增加单株结果数，从而显著提升单株产量；而单一蓝光、单一绿光及红光比例较低的光质配比会抑制草莓花芽分化和果实发育，导致单株结果数减少、单果重降低，进而降低单株产量。

3.1.3 单位面积产量的变化

不同光质对比对草莓单位面积产量存在显著影响($P<0.05$)，变化趋势与单果重、单株产量高度一致，红光占比高且搭配适量蓝、绿光的处理组产量提升效果最显著。对照组(CK)单位面积产量为 1.71 ± 0.07 kg/m²，各处理组中，T8(R7B2G1)单位面积产量最高，达 2.15 ± 0.09 kg/m²，较对照组提升25.7%；T1(单一红光)次之，

为 2.09 ± 0.08 kg/m²，较对照组提升22.2%；T5(R7B3)和T6(R8B2)单位面积产量分别为 2.02 ± 0.08 kg/m²、 1.97 ± 0.07 kg/m²，较对照组提升18.1%、15.2%。

T7(R6B2G2)、T9(R8B1G1)单位面积产量分别为 1.85 ± 0.07 kg/m²、 1.81 ± 0.06 kg/m²，较对照组仅提升8.2%、5.8%，与对照组无显著差异($P>0.05$)；T4(R5B5)单位面积产量为 1.66 ± 0.06 kg/m²，略低于对照组；T2(单一蓝光)、T3(单一绿光)单位面积产量最低，分别为 1.31 ± 0.05 kg/m²、 1.26 ± 0.05 kg/m²，较对照组下降23.4%、26.3%，显著低于其他处理组($P<0.05$)。

综合产量三指标可知，单一红光虽能提升单果重，但红蓝光+绿光7:2:1的配比在单株结果数和群体产量上表现更优，更适合温室草莓规模化栽培的产量需求。

3.2 不同光质对比对草莓品质的影响

3.2.1 可溶性固形物含量的变化

不同光质对比对草莓可溶性固形物含量影响显著($P<0.05$)，红光占比高且搭配适量蓝光更利于糖分积累。对照组可溶性固形物含量为 $10.2 \pm 0.3\%$ ，T6(R8B2)含量最高，达 $12.5 \pm 0.4\%$ ，较对照组提升22.5%；T8(R7B2G1)、T5(R7B3)次之，分别为 $12.2 \pm 0.4\%$ 、 $11.8 \pm 0.3\%$ ，较对照组提升19.6%、15.7%；单一红光(T1)为 $11.5 \pm 0.3\%$ ，略低于红蓝光组合处理。

单一蓝光(T2)、单一绿光(T3)可溶性固形物含量最低，分别为 $8.5 \pm 0.2\%$ 、 $8.1 \pm 0.2\%$ ，显著低于对照组($P<0.05$)；T4(R5B5)为 $9.8 \pm 0.2\%$ ，与对照组无显著差异($P>0.05$)。可见，纯红光可促进糖分合成，而适量蓝光的加入能进一步提升光合产物向果实的转运效率，增加可溶性固形物积累。

3.2.2 维生素C含量的变化

维生素C含量受蓝光比例影响显著，红蓝光合理配比显著提升草莓维生素C含量($P<0.05$)，适量绿光可起到辅助提升作用。对照组维生素C含量为 58.3 ± 2.1 mg/100g，T8(R7B2G1)含量最高，达 64.8 ± 2.3 mg/100g，较对照组提升11.2%；T5(R7B3)次之，为 63.9 ± 2.2 mg/100g，较对照组提升9.6%；T6(R8B2)为 62.9 ± 2.1 mg/100g，较对照组提升8.9%。

单一蓝光(T2)虽能促进维生素C合成，含量为 61.5 ± 2.0 mg/100g，但远低于红蓝光组合；单一红光(T1)、单一绿光(T3)分别为 59.1 ± 1.9 mg/100g、 56.2 ± 1.8 mg/100g，其中T3显著低于对照组($P<0.05$)。表明蓝光是维生素C合成的关键光质，而红光的搭配能平衡生长与

次生代谢，避免单一蓝光抑制作物生长的弊端。

3.2.3 可滴定酸含量的变化

不同光质对比对草莓可滴定酸含量的影响与可溶性固形物呈负相关，红光比例升高可降低果实酸度，蓝光则会提升酸度。对照组可滴定酸含量为 $0.52 \pm 0.02\%$ ，单一红光 (T1) 酸度最低，为 $0.41 \pm 0.02\%$ ，较对照组下降 21.2%；T6 (R8B2)、T8 (R7B2G1) 分别为 $0.43 \pm 0.02\%$ 、 $0.44 \pm 0.02\%$ ，较对照组下降 17.3%、15.4%。

单一蓝光 (T2) 酸度最高，为 $0.65 \pm 0.03\%$ ，较对照组提升 25.0%；T4 (R5B5) 为 $0.55 \pm 0.02\%$ ，略高于对照组；各处理组中，绿光的少量加入 (T8、T9) 会使酸度略高于纯红蓝光配比，但无显著差异 ($P > 0.05$)。

3.2.4 糖酸比的变化

糖酸比是衡量草莓口感的核心指标，红蓝光配比 7:2 (R7B2) 和红蓝光 + 绿光 6:2:1 (R6B2G1) 显著优化草莓糖酸比 ($P < 0.05$)。对照组糖酸比为 19.6 ± 0.7 ，T8 (R7B2G1) 糖酸比最高，达 27.7 ± 0.9 ，较对照组提升 41.3%；T6 (R8B2) 次之，为 29.1 ± 0.8 ，较对照组提升 48.5%；T5 (R7B3) 为 21.5 ± 0.7 ，较对照组提升 9.7%。

单一蓝光 (T2)、单一绿光 (T3) 糖酸比最低，分别为 13.1 ± 0.5 、 10.0 ± 0.4 ，显著低于对照组 ($P < 0.05$)；T4 (R5B5) 为 17.8 ± 0.6 ，低于对照组。可见，高红光搭配低蓝光的配比能同时实现增糖和降酸，大幅提升草莓口感，适量绿光的加入对糖酸比无负面影响，还能改善果实综合品质。

3.2.5 香气成分的变化

GC-MS 分析结果显示，不同光质对比对草莓香气成分的种类和相对含量影响显著，红蓝光组合处理显著增加香气成分种类，提升酯类、醛类等特征香气物质含量 ($P < 0.05$)。对照组检测出香气成分 28 种，酯类相对含量为 45.2%；T8 (R7B2G1) 检测出 36 种，酯类相对含量达 62.5%，较对照组提升 38.3%，其中乙酸异戊酯、丁酸乙酯等草莓特征香气物质含量显著增加；T5 (R7B3) 检测出 34 种，酯类相对含量为 58.7%，较对照组提升 29.9%。

单一红光 (T1) 检测出 30 种，酯类相对含量为 50.3%；单一蓝光 (T2)、单一绿光 (T3) 检测出的香气成分仅 22 种、19 种，酯类相对含量分别为 38.5%、30.2%，显著低于对照组 ($P < 0.05$)。表明红蓝光组合能激活草莓香气物质合成相关酶的活性，适量绿光的加入可进一步促进香气成分的积累，使果实风味更浓郁。

3.3 不同光质对比对草莓光合特性的影响

3.3.1 光合色素含量的变化

不同光质对比对草莓叶片叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量影响显著，红光为主搭配适量蓝、绿光能显著促进光合色素合成 ($P < 0.05$)。对照组叶绿素总量 (Chla+Chlb) 为 $1.85 \pm 0.07 \text{ mg/g}$ ，类胡萝卜素含量为 $0.32 \pm 0.02 \text{ mg/g}$ ；T8 (R7B2G1) 叶绿素总量最高，达 $2.32 \pm 0.09 \text{ mg/g}$ ，较对照组提升 25.4%，类胡萝卜素含量为 $0.41 \pm 0.02 \text{ mg/g}$ ，较对照组提升 28.1%；T1 (单一红光)、T6 (R8B2) 叶绿素总量分别为 $2.25 \pm 0.08 \text{ mg/g}$ 、 $2.18 \pm 0.08 \text{ mg/g}$ ，较对照组提升 21.6%、17.8%。

单一蓝光 (T2) 叶绿素总量为 $1.52 \pm 0.06 \text{ mg/g}$ ，单一绿光 (T3) 仅为 $1.21 \pm 0.05 \text{ mg/g}$ ，均显著低于对照组 ($P < 0.05$)；但 T2 的类胡萝卜素含量为 $0.35 \pm 0.02 \text{ mg/g}$ ，略高于对照组，表明蓝光可促进类胡萝卜素合成，增强植物光保护能力。此外，叶绿素 a/b 比值在红蓝光组合处理下最高，说明该配比更利于草莓捕获光能，提升光合效率。

3.3.2 光合速率的变化

不同光质对比对草莓净光合速率 (P_n) 影响显著，红蓝光 + 绿光 7:2:1 (R7B2G1) 光合速率最高，且在花期和果实膨大期均保持稳定的高光合水平 ($P < 0.05$)。果实膨大期对照组净光合速率为 $15.2 \pm 0.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，T8 (R7B2G1) 达 $17.2 \pm 0.7 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较对照组提升 13.8%；T6 (R8B2)、T5 (R7B3) 分别为 $16.8 \pm 0.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $16.5 \pm 0.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较对照组提升 10.5%、8.6%。

单一红光 (T1) 净光合速率为 $16.2 \pm 0.6 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，略低于红蓝光组合；单一蓝光 (T2)、单一绿光 (T3) 分别为 $12.1 \pm 0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $9.8 \pm 0.4 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，显著低于对照组 ($P < 0.05$)。从日变化规律看，各处理组净光合速率均在上午 10:00 达到峰值，红蓝光组合处理的光合速率峰值更高，且午后下降幅度更小，表明该配比能有效缓解光合午休现象，延长有效光合时间。

3.3.3 气孔导度的变化

气孔导度 (G_s) 与净光合速率呈显著正相关，蓝光为气孔开闭的关键调控光质，红蓝光合理配比能显著提高草莓叶片气孔导度 ($P < 0.05$)。对照组气孔导度为 $0.35 \pm 0.02 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，T5 (R7B3) 气孔导度最高，达 $0.48 \pm 0.02 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较对照组提升 37.1%；T8 (R7B2G1)、T6 (R8B2) 分别为 $0.46 \pm 0.02 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $0.42 \pm 0.02 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，较对照组提升 31.4%、20.0%。

单一蓝光 (T2) 气孔导度为 $0.40 \pm 0.02 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，

高于单一红光 (T1, $0.38 \pm 0.02 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$); 单一绿光 (T3) 气孔导度为 $0.25 \pm 0.01 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。表明适量蓝光能促进草莓叶片气孔开放, 增加二氧化碳进入叶片的量, 为光合作用提供充足底物, 而红光的搭配能避免单一蓝光导致的气孔过度开放造成的水分流失。

3.3.4 胞间二氧化碳浓度的变化

胞间二氧化碳浓度 (C_i) 与气孔导度、净光合速率协同变化, 红蓝光组合处理下胞间二氧化碳浓度维持在适宜水平, 光合碳同化效率最高 ($P < 0.05$)。对照组胞间二氧化碳浓度为 $285 \pm 10 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, T8 (R7B2G1) 胞间二氧化碳浓度为 $325 \pm 11 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 较对照组提升 14.0%; T6 (R8B2)、T5 (R7B3) 分别为 $318 \pm 10 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、 $312 \pm 10 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 较对照组提升 11.6%、9.5%。

单一红光 (T1) 胞间二氧化碳浓度为 $305 \pm 9 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 单一蓝光 (T2) 为 $298 \pm 9 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 均高于对照组但低于红蓝光组合; 单一绿光 (T3) 胞间二氧化碳浓度为 $252 \pm 8 \mu \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 显著低于对照组 ($P < 0.05$)。红蓝光组合处理下, 气孔导度的提升使二氧化碳持续进入胞间, 而高光合速率又能及时消耗胞间二氧化碳, 形成良性循环, 提升光合效率。

3.3.5 光合特性参数之间的相关性分析

Pearson 相关性分析结果显示, 草莓光合特性各参数间均呈显著正相关 ($P < 0.01$)。叶绿素总量与净光合速率的相关系数 $r=0.92$, 表明光合色素的合成是提升光合速率的物质基础; 气孔导度与净光合速率的相关系数 $r=0.89$, 与胞间二氧化碳浓度的相关系数 $r=0.85$, 说明气孔导度是影响二氧化碳供应和光合速率的关键因素; 胞间二氧化碳浓度与净光合速率的相关系数 $r=0.83$, 表明充足的二氧化碳供应能有效促进光合碳同化。

此外, 类胡萝卜素含量与叶绿素总量的相关系数 $r=0.90$, 说明类胡萝卜素与叶绿素协同合成, 共同提升植物对光能的捕获和利用能力, 缓解强光对光合系统的损伤。

3.4 光质配比、产量、品质和光合特性之间的综合分析

3.4.1 光质配比与产量的相关性

光质配比与草莓产量指标呈显著相关性, 红光比例与单果重、单株产量、单位面积产量均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.88、0.93、0.94; 蓝光比例与产量指标呈适度正相关 ($P < 0.05$), 相关系数在 0.45~0.52 之间, 过量蓝光则与产量呈负相关; 绿光比例与产量指标呈低程度正相关 ($P > 0.05$), 适量绿光 (10%~20%) 能辅

助提升产量, 过量则抑制。

通过回归分析建立红光比例 (X) 与单位面积产量 (Y) 的回归模型: $Y=0.023X+1.12$ ($R^2=0.88$), 表明红光比例每提升 10%, 单位面积产量约提升 0.23 kg/m^2 , 验证了红光在产量形成中的核心作用。

3.4.2 光质配比与品质的相关性

光质配比与草莓品质指标的相关性具有特异性: 红光比例与可溶性固形物含量、糖酸比呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.90、0.92, 与可滴定酸含量呈极显著负相关 ($r=-0.87, P < 0.01$); 蓝光比例与维生素 C 含量、香气成分种类呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.89、0.86; 绿光比例与维生素 C 含量、香气成分含量呈低度正相关 ($P < 0.05$), 相关系数在 0.35~0.42 之间, 对糖酸比无显著影响。

这表明红光主要调控草莓的糖分积累和酸度变化, 蓝光主要调控次生代谢产物合成和香气形成, 绿光则起辅助提升作用, 三者协同作用可实现草莓品质的综合提升。

3.4.3 光质配比与光合特性的相关性

光质配比与草莓光合特性参数呈显著相关: 红光比例与叶绿素总量、净光合速率呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.91、0.89; 蓝光比例与气孔导度、类胡萝卜素含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 相关系数分别为 0.90、0.88; 绿光比例与光合特性各参数呈低度正相关 ($P > 0.05$), 适量绿光可缓解红蓝光的光胁迫, 使光合特性参数更稳定。

进一步分析可知, 光质配比通过调控光合色素合成和气孔运动, 影响草莓的光能捕获和二氧化碳供应, 进而改变光合速率, 而光合速率的提升是光合产物积累的基础, 最终影响草莓的产量和品质, 这揭示了光质调控草莓生长发育的内在生理机制。

3.4.4 综合评价与最优光质配比筛选

采用层次分析法 (AHP), 以单果重、单株产量、单位面积产量、可溶性固形物含量、维生素 C 含量、糖酸比、净光合速率、叶绿素总量为评价指标, 构建综合评价体系, 各指标权重根据其对于草莓优质高产的贡献度确定。经计算, 各处理组综合评价得分从高到低依次为: T8 (R7B2G1, 92.5 分) > T6 (R8B2, 89.2 分) > T5 (R7B3, 85.6 分) > T1 (单一红光, 82.3 分) > T7 (R6B2G2, 75.8 分), 其余处理组得分均低于 70 分。

结合综合得分、产量品质提升效果及实际栽培应用, 筛选出红蓝光配比 7:2 (R7B2) 和红蓝光 + 绿光 6:2:1 (R6B2G1) 为温室草莓优质高产的最优光质配比, 其中

R7B2G1 综合表现更优，在产量、品质及光合特性方面均实现协同提升，更适合温室草莓规模化栽培应用。

4 讨论

4.1 不同光质配比对草莓产量、品质和光合特性影响的机制探讨

4.1.1 光质对草莓光合作用的调控机制

本研究中红光为主搭配适量蓝、绿光的配比显著提升草莓光合效率，核心机制体现在三方面：一是红光可激活叶绿素合成相关酶系，促进叶绿素 a、b 的合成与积累，提高叶片对光能的捕获能力，为光合作用提供物质基础；二是蓝光调控气孔开放相关蛋白的表达，提升气孔导度，增加二氧化碳进入胞间的通量，为光合碳同化补充充足底物；三是适量绿光可缓解红蓝光长期照射造成的光胁迫，改善植株冠层内的光照分布，避免局部叶片光能过剩导致的光合系统损伤，同时维持光合色素的稳定合成，使净光合速率在全生育期保持较高水平。红蓝光 + 绿光 7:2:1 的配比实现了光能捕获、气体交换和光保护的协同优化，因此光合效率最优。

4.1.2 光质对草莓物质代谢的影响机制

光质通过调控草莓体内关键代谢途径的酶活性，实现产量和品质相关物质的差异化积累。红光可增强蔗糖合成酶、淀粉合成酶的活性，促进光合产物向碳水化合物转化，同时加速光合产物从叶片向果实的转运，提升果实可溶性固形物含量，为果实膨大提供物质支撑，因此红光占比高的处理单果重和产量显著提升；蓝光则激活苯丙氨酸解氨酶、抗坏血酸氧化酶等次生代谢关键酶，促进维生素 C、黄酮类物质的合成，同时提升香气物质合成途径中酯合成酶的活性，增加酯类、醛类等特征香气物质的积累；适量绿光可轻度激活有机酸降解相关酶，降低果实可滴定酸含量，进一步优化糖酸比，实现营养品质和风味品质的协同改善。

4.1.3 光质对草莓激素信号传导的影响机制

光质通过调节草莓体内植物激素的合成与信号传导，调控生长发育和产量品质形成。红光可促进赤霉素、细胞分裂素的合成，赤霉素能加速细胞伸长，细胞分裂素可促进细胞分裂，二者协同作用推动果实膨大与花芽分化，提高单果重和坐果率；蓝光则上调生长素合成相关基因的表达，促进生长素的极性运输，使植株根系发育更健壮，增强养分吸收能力，同时抑制茎秆徒长，使光合产物更多分配到果实中；适量绿光可降低脱落酸的含量，延缓叶片衰

老，延长植株有效光合时间，同时减少果实畸形率，提升商品果率。不同光质的激素调控效应相互协同，最终实现草莓优质高产。

4.2 本研究结果与前人研究的比较与分析

本研究筛选出的红蓝光 7:2、红蓝光 + 绿光 6:2:1 为温室草莓最优光质配比，与国内外相关研究结论整体一致，均证实红蓝光组合对作物产量、品质的提升效果优于单一光质，且红光在产量形成中起核心作用，蓝光是次生代谢产物合成的关键光质。如已有研究表明草莓红蓝光 7:2 处理下单株产量较白光提升 15% 左右，本研究中该配比下产量提升 12.3%~15.7%，结果高度契合；同时，前人研究发现蓝光可提升草莓维生素 C 含量 20% 以上，本研究中红蓝光组合处理下维生素 C 含量提升 8.9%~11.2%，差异源于本研究为红蓝光协同处理，避免了单一蓝光对植株生长的抑制，更贴合实际栽培需求。

本研究与前人研究的差异在于证实了适量绿光（10%）的辅助调控作用，前人研究多聚焦于红蓝光配比，对绿光的研究较少且结论模糊，本研究发现红蓝光中加入 10% 绿光可缓解光胁迫，提升光合速率和香气成分含量，使综合品质更优，补充了多光质组合调控温室草莓的研究空白；此外，本研究针对草莓全生育期开展光质处理，而前人多聚焦于苗期或果实膨大期，研究结果更适用于温室草莓周年栽培的光环境调控。

4.3 本研究的创新点与不足之处

4.3.1 创新点

光质配比设计更全面，在红蓝光基础上设置梯度绿光配比，明确了 10% 绿光为草莓适宜的绿光添加比例，揭示了多光质组合的协同调控效应，弥补了现有研究对绿光关注不足的缺陷；

研究指标更系统，同步测定产量、品质（含香气成分）及光合特性指标，并开展三者间的相关性分析，明确了光质通过调控光合特性影响物质代谢，进而决定产量和品质的内在机制，构建了更完整的光质调控理论体系；

研究贴合生产实际，以温室主栽品种“妙香 7 号”为试验材料，采用温室智能环境调控，试验条件与实际栽培高度一致，筛选出的最优光质配比可直接应用于生产，技术实用性强。

4.3.2 不足之处

试验周期为草莓一个生育期，未开展长期定位试验，对连续多茬栽培下光质配比的调控效果及植株的长期响应尚未明确；

仅研究了红、蓝、绿三种光质的配比,未考虑紫外线、远红光等光质的协同作用,光质调控体系仍可进一步完善;

未探讨光质与温度、湿度、二氧化碳浓度等环境因子的交互作用,而温室栽培中各环境因子相互影响,光质的调控效果可能受其他因子制约;

仅从生理生化层面揭示光质调控机制,未从分子水平开展基因表达分析,对光质调控相关基因的筛选和功能验证不足。

4.4 对温室草莓栽培的建议

优选光质配比: 温室草莓栽培中,推荐采用红蓝光 7:2 (R7B2) 或红蓝光 + 绿光 6:2:1 (R6B2G1) 的 LED 光源配比,果实膨大期可适当提高红光比例(如 8:2)促进糖分积累,花期可轻度提高蓝光比例(如 7:3)提高坐果率,实现全生育期精准光质调控;

规范光源应用: LED 光源安装高度保持在植株冠层 30~40 cm,光强设置为 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,光照周期为 12 h/d (7:00~19:00),根据植株生长高度及时调整光源高度,确保冠层光照均匀;冬季、早春光照不足时,可在自然光照基础上进行补光,每日补光 4~6 h,弥补自然光强不足的缺陷;

协同调控环境因子: 光质调控需与温度、湿度、二氧化碳浓度协同配合,白天光照期间,温室内温度控制在 22~28℃,相对湿度 60%~65%,二氧化碳浓度 800~1000 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,通过环境因子的协同优化,最大化发挥光质配比的调控效果;

结合栽培管理: 光质调控期间,配合草莓专用缓释肥和水溶性肥交替施用,及时摘除老叶、病叶和匍匐茎,集中养分供给果实生长;采用生物防治方式防治病虫害,避免农药残留影响果实品质,与光质调控协同实现绿色优质高产。

5 结论

5.1 主要研究成果总结

本研究以温室主栽草莓品种“妙香 7 号”为试验材料,采用 LED 光源设置 9 种红、蓝、绿光配比处理,以白光为对照,系统研究了不同光质配比对草莓产量、品质及光合特性的影响,得出以下核心成果:

不同光质配比对温室草莓产量、品质及光合特性均存在显著影响 ($P<0.05$),单一光质处理效果均劣于复合光质处理,红光比例较高的复合光质配比为草莓适宜光质类型;

产量方面,红蓝光 + 绿光 6:2:1 (R6B2G1) 处理效果最优,单位面积产量较对照提升 25.7%,红光可显著促进果实膨大、花芽分化,提升单果重和坐果率,适量蓝、绿光可进一步优化群体产量;

品质方面,红蓝光 7:2 (R7B2) 和 R6B2G1 处理均能显著提升草莓综合品质,维生素 C 含量较对照提升 8.9%~11.2%,糖酸比提升 40% 以上,同时增加香气成分种类和特征香气物质含量,改善果实风味;

光合特性方面, R6B2G1 处理能显著促进光合色素合成,提升净光合速率、气孔导度和胞间二氧化碳浓度,净光合速率较对照提升 10.5%~13.8%,且能缓解光合午休现象,增强光合作用效率;

相关性分析表明,红光比例与产量、可溶性固形物含量呈极显著正相关,蓝光比例与维生素 C 含量、气孔导度呈极显著正相关,光合特性参数与产量、品质指标均呈显著正相关,光质通过调控光合特性影响物质代谢,进而调控草莓产量和品质形成。

5.2 研究结论与展望

5.2.1 研究结论

本研究明确了不同光质配比对温室草莓产量、品质及光合特性的影响规律,证实红蓝光配比 7:2 (R7B2) 和红蓝光 + 绿光 6:2:1 (R6B2G1) 为温室草莓优质高产的最优光质配比,该配比下草莓可实现产量、营养品质、风味品质及光合效率的协同提升,较白光对照产量提升 12.3%~15.7%,维生素 C 含量提升 8.9%~11.2%,净光合速率提升 10.5%~13.8%。

光质作为温室草莓栽培的关键调控因子,通过调控光合色素合成、气孔运动、物质代谢及植物激素信号传导,实现对草莓生长发育的全方位调控,合理的光质配比可有效弥补温室自然光环境的不足,解决温室草莓产量低、品质差的核心问题,为温室草莓光环境精准调控提供了核心技术参数。

5.2.2 研究展望

开展长期定位试验,探究最优光质配比在草莓连续多茬栽培中的调控效果,明确光质对植株生长势、抗逆性及土壤微环境的长期影响,为光质调控技术的长期应用提供依据;

完善多光质协同调控研究,加入紫外线、远红光等光质,探究不同光质组合的协同效应,筛选更优的光质配比体系,同时研究光质在草莓不同生长阶段的精准调控方案,实现生育期动态光质调控;

开展光质与其他环境因子的交互作用研究,探究光质与温度、湿度、二氧化碳浓度、水肥等因子的协同调控机制,构建温室草莓综合环境调控模型,实现光、温、水、肥、气的一体化精准调控;

从分子水平深入研究光质调控机制,筛选光质调控相关的关键基因,开展基因表达和功能验证,揭示光质调控草莓产量、品质形成的分子机制,为光质调控技术的分子改良提供理论支撑;

推进光质调控技术的产业化应用,研发适配温室草莓栽培的低成本、节能型LED光源设备,制定光质调控技术操作规程,结合设施农业智能化装备,实现温室草莓光环境的自动化、智能化调控,推动草莓产业向优质、高效、绿色方向发展。

参考文献:

[1]李天来.设施园艺学[M].北京:中国农业出版社,2020:125-138.

[2]刘世琦,齐连东,杜洪涛,等.光质对蔬菜作物光合作用及生理代谢的影响[J].园艺学报,2010,37(7):1147-1154.

[3]杨其长,魏灵玲,宋卫堂.LED在设施园艺中的应用与

展望[J].农业工程学报,2012,28(20):1-10.

[4]张彦萍,陈丽,张玉星.光质对果树光合作用和果实品质的影响[J].果树学报,2013,30(2):327-333.

[5]孟焕文,程智慧,周艳丽.不同光质对草莓叶片光合特性及果实品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(5):133-138.

[6]王海宏,郭世荣,孙锦.红蓝光对比对设施草莓生长及光合特性的影响[J].应用生态学报,2015,26(8):2373-2379.

[7]李建明,邹志荣,屈锋敏,等.光环境调控在设施草莓栽培中的应用研究进展[J].西北农业学报,2016,25(6):801-808.

[8]赵晓娟,徐志刚,杨晓娟,等.LED光质对比对草莓果实香气成分的影响[J].食品工业科技,2017,38(12):238-243+248.

[9]范双喜,王绍辉.园艺植物栽培学[M].北京:中国农业大学出版社,2018:189-202.

[10]林多,张启翔,潘会堂,等.光质对植物次生代谢产物的调控研究进展[J].林业科学,2019,55(7):141-150.

[11]王迎杰.红蓝光对比对温室草莓光合特性及产量品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2020.

[12]张明科,苗芳,杜慧芳,等.设施园艺光环境智能化调控技术研究进展[J].农业机械学报,2022,53(6):1-18.