

生物基碳量子点对火龙果光合因子及产量的调控效应

王帆林^{1,2}, 简纯平^{2*}, 成宏斌², 潘晓翠², 张熠莹², 吴福星²

1. 新疆理工职业大学, 新疆喀什 844000; 2. 海南省农垦科学院集团有限公司, 海南三亚 572000

摘要: 本研究针对热带地区火龙果反季节栽培中光温限制导致的成花少、产量低等生产难题, 结合生物基碳量子点 (CQDs) 在增强光合作用与抗逆性方面的独特优势, 系统研究其对火龙果光合特性及产量、品质的调控效应。以四年生台湾 6 号红心火龙果为试材, 设置不同浓度生物基碳量子点处理 (CDS₂₀₀、CDS₂₅₀、CDS₃₀₀、CDS₅₀₀) 及其与营养元素复合处理 (coCDS₃₀₀、coCDS₅₀₀、coCDS₈₀₀), 通过夏季和冬季田间试验, 测定 Rubisco 活性、叶绿素含量、开花特性及产量。结果表明: 夏季 CDS₂₅₀ 与 coCDS₃₀₀ 处理可显著提高 Rubisco 活性, 较 CK 分别提高 41.05% 与 20.46%; 复合处理组效果优于单一碳量子点处理组; 冬季 CDS₂₀₀、CDS₂₅₀ 处理的酶活性响应为“快速激活-迅速回落”, 而复合处理组可使 Rubisco 在 14 d 内保持高活性。叶绿素合成能力显著增强, 夏季 CDS₂₀₀ 处理使叶绿素 b 含量提高 43.89%, 远高于叶绿素 a 含量的 10.56%; 冬季复合处理组可使叶绿素 b 含量占比达到 61.80%, 但对叶绿素 a 含量无显著影响。显著促进了冬季开花且具有浓度效应, 以 CDS₅₀₀ 处理最为突出, 开花数较 CK 增加了 141.80%, coCDS₃₀₀ 和 CDS₃₀₀ 处理次之。产量分析结果表明, CDS₃₀₀ 处理产量较 CK 增产 115.60%, coCDS₃₀₀ 处理次之, 而 CDS₂₀₀ 处理增产效果最弱, 与对 Rubisco 活性、叶绿素及开花数的调控效应一致; 特大果比例以 coCDS₃₀₀ 处理最高, 为 80.91%, 且复合处理组均高于单一碳量子点处理组; 碳量子点在冬季的平均增产效应 (58.24%) 显著高于夏季 (27.19%)。本研究结果表明, 生物基碳量子点可通过优化光合系统功能促进生殖生长, 协同提升火龙果产量, 尤其在冬季弱光条件下增效显著, 为热带果树反季节栽培提供了一种新型纳米技术解决方案。

关键词: 火龙果; 生物基碳量子点; 光合因子; Rubisco; 叶绿素; 产量

中图分类号: S667.9 文献标志码: A

Effects of Bio-based Carbon Quantum Dots on Photosynthetic Factors and Yield in Pitaya (*Hylocereus undatus* Britt)

WANG Fanlin^{1,2}, JIAN Chunping^{2*}, CHENG Hongbin², PAN Xiaocui², ZHANG Yiying², WU Fuxing²

1. Xinjiang Vocational University of Technology, Kashi, Xinjiang 844000, China; 2. Hainan State Farms Academy of Sciences Group Co., Ltd., Sanya, Hainan 572000, China

Abstract: The study addressed the industrial challenges of low flowering rate and reduced yield in off-season pitaya cultivation caused by light and temperature limitations in tropical regions. By leveraging the unique advantages of bio-based carbon quantum dots (CQDs) in enhancing photosynthesis and stress resistance, we systematically investigated the regulatory effects on the photosynthetic characteristics, yield, and fruit quality of pitaya. Using four-year-old Taiwan No. 6 red-fleshed pitaya as the plant material, different concentrations of CQDs (CDS₂₀₀, CDS₂₅₀, CDS₃₀₀, CDS₅₀₀) and the combinations with nutritional elements (coCDS₃₀₀, coCDS₅₀₀, coCDS₈₀₀) were applied. Through field trials conducted in both summer and winter seasons, the dynamic changes in Rubisco activity, chlorophyll content, flowering characteristics, yield, and fruit quality were systematically investigated. Results demonstrated that during summer, CDS₂₅₀ and coCDS₃₀₀ rapidly increased Rubisco activity by 41.05% and 20.46% respectively compared to con-

收稿日期 2025-11-20; 接受日期 2025-12-09

基金项目 海南省南海新星科技创新人才平台项目 (No. NHXXRCXM202371); 海南省自然科学基金企业人才项目 (No. 325QY917); 三亚崖州湾科技城高新区“崖州湾”菁英人才项目 (No. SKJC-JYRC-2025-28)。

作者简介 王帆林 (1990—), 女, 硕士, 农艺师, 研究方向: 天然产物开发与利用。*通信作者 (Corresponding author): 简纯平 (JIAN Chunping), E-mail: 45355852@qq.com。

trol, while composite treatments consistently outperformed single CQD applications. In winter, high-concentration treatments (CDS₂₀₀, CDS₂₅₀) exhibited a "rapid activation-fast decline" pattern in enzyme activity, whereas composite treatments maintained elevated Rubisco activity for 14 days. Chlorophyll synthesis was significantly enhanced, with summer CDS₂₀₀ increasing chlorophyll by 43.89% (versus 10.56% for chlorophyll a), and winter composite treatments elevating chlorophyll b proportion to 61.80% without affecting chlorophyll a. Notably, CQDs significantly promoted winter flowering with concentration-dependent effects, where CDS₅₀₀ showed the most prominent increase (141.80%), followed by coCDS₃₀₀ and CDS₃₀₀. Yield analysis revealed CDS₃₀₀ achieved 115.60% yield increase, while high-concentration CDS₂₀₀ showed weakest effects, consistent with its regulation on Rubisco activity, chlorophyll content and flowering. The premium fruit ratio reached 80.91% under coCDS₃₀₀, with all composite treatments outperformed single CQD groups. Winter yield enhancement (58.24%) markedly exceeded summer gains (27.19%). The research demonstrates that bio-based CQDs significantly enhance pitaya yield and quality by regulating photosynthetic systems and reproductive growth, with particularly prominent effects under low-light conditions in winter, providing technical support for off-season cultivation of tropical fruit trees.

Keywords: *Hylocereus undatus* Britt; bio-based carbon quantum dots; photosynthetic factors; Rubisco; chlorophyll composition; yield

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.03.011

火龙果 (*Hylocereus undulatus* Britt) 为仙人掌科量天尺属多年生藤本植物, 原产于中美洲热带地区, 因其独特的风味和丰富的营养价值广受欢迎, 在我国海南、广东、广西等热带亚热带地区广泛栽培^[1]。近年来, 随着市场需求的不断扩大, 火龙果产业迅速发展。得益于优势的光热资源, 火龙果在海南可实现全年生产, 已成为海南热带特色农业的重要组成部分。火龙果的花芽分化主要受光照和温度的影响, 海南的温度基本满足火龙果诱导开花的条件^[2], 但火龙果是长日照植物, 为了促进火龙果花芽分化, 补光是冬季火龙果的常规栽培措施。但是, 在海南冬季补光中, 光源颜色、补光时长等参数尚未有明确定论, 各栽培基地补光方案各不相同。在海南, 火龙果一般为大面积栽培, 补光时间不足会导致成花数量减少, 收益降低; 补光时间过长则耗电量大、成本投入高^[3]。如何通过外源调控缓解季节性光温限制、提高果实产量与品质是产业发展的关键。

生物基碳量子点 (CQDs) 是近年来兴起的一种新型纳米碳材料, 其尺寸小于 10 nm, 属于碳点 (CDs), 以生物质为原料制备而成^[4], 具有发光效率高、光学性能稳定、环境友好、低毒、生物相容性好、易制备等优点, 因此在许多领域具有广泛的应用前景^[5-6]。研究表明, 碳量子点可通过增强叶绿素合成、促进光能吸收与转化、提高 Rubisco 活性、提升电子传递及 CO₂ 固定效率等途径, 整体提高植物光合作用^[7]。此外, 还能提高植物抗逆性^[8-9], 提高植物对养分的吸收利用效率^[10], 改善土壤肥力^[11]。这些特性使碳量子点在

农业领域展现出广阔的应用前景。

目前, 关于碳量子点在农作物中的应用研究已有较多报道, 但其对多年生热带果树, 特别是火龙果上的生理调控效应尚不明确。基于此, 本研究以海南主栽火龙果品种为材料, 通过夏、冬两季田间试验, 系统探究不同浓度生物基碳量子点及其与营养元素配施对火龙果光合特性、开花动态、产量及品质的调控效应, 旨在揭示其作用效果并探讨其作用机制, 为碳量子点在热带果树优质高效栽培中的应用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 基地概况 试验于 2023 年 6 月至 2024 年 3 月在海南省乐东黎族自治县大田镇水果岛种植基地 (18°45'N, 109°10'E) 进行, 基地每年的补光期为秋分至春分 (9 月 22 日至次年 3 月 20 日)。该地区属热带季风气候, 年平均气温为 24.5 °C, 年降水量为 1600 mm, 试验期间气候条件与常年基本一致。试验基地土壤为砖红壤, 供试品种为四年生台湾 6 号红心火龙果 (*Hylocereus undatus*), 供试植株生长健壮, 无病虫害, 栽培规格一致, 采用联排式栽培模式。试验期间除处理因素外, 各小区的病虫害防治、除草等田间管理措施保持一致。

1.1.2 试验材料 生物基碳量子点由中科黛君 (北京) 科技有限公司提供, 其主要技术参数如下: 碳含量 ≥ 98%, 粒径 2~5 nm, 量子产率 15%, 表面富含羧基、羟基等官能团。复合碳量子点委

托福建岐黄贵本生物科技有限公司制备,基础养分为 $N-P_2O_5-K_2O=15-15-15$,根据研究需求添加不同浓度的生物基碳量子点。试验所用化学试剂均为分析纯,实验用水为超纯水。

1.1.3 主要仪器设备 UV-2550 紫外可见分光光度计(日本岛津公司)、SpectraMax M2 酶标仪(美国 Molecular Devices 公司)等。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 试验共设9个处理:(1)空白对照(CK,施用等量清水);(2)阳性对照(PC,仅施用营养元素);(3)单一碳量子点处理(CDS_{200} 、 CDS_{250} 、 CDS_{300} 、 CDS_{500} ,稀释倍数);(4)复合处理($coCDS_{300}$ 、 $coCDS_{500}$ 、 $coCDS_{800}$,不同稀释倍数碳量子点+营养元素)。营养元素组成与PC处理保持一致($N-P_2O_5-K_2O=15-15-15$)。试验采用完全随机区组设计,每个处理设3次重复,每重复种植行长为20 m。试验于每季生长关键期开始进行连续施肥,每15 d采用叶面喷施与滴灌相结合的方式施用1次,第4次施用后进行枝条采样,施肥兑水量统一为 3000 kg/hm^2 。夏季试验期为5—8月,冬季试验期为10月至次年3月,分别对应了火龙果的主要生长季和反季节生产期。

1.2.2 Rubisco 活性测定 于每试验期第4次施肥后第1、3、5、7、14天采集各处理1月龄枝条顶端(施肥后24 h计为第1天,48 h计为第2天,依次类推),液氮速冻后于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保存。参照北京索莱宝科技有限公司的Rubisco试剂盒说明书,采用酶标仪法测定核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶活性,结果以U/g表示。

1.2.3 叶绿素含量测定 与酶活性测定同步,取1月龄枝条顶端新鲜组织0.2 g,采用95%乙醇浸提,暗处静置24 h至组织完全变白。使用UV-2550紫外可见分光光度计分别测定649 nm和665 nm处的吸光度,按Lichtenthaler公式计算叶绿素a、b及总叶绿素含量,结果以mg/g表示。

1.2.4 冬季开花动态观测 以开始施肥后分化出的花为第一批统计对象,在火龙果花期连续观测记录各处理每日开花数和开花时间,统计各小区开花总数及日开花动态。为减小试验期内因季节变化导致的误差,于试验期连续跟踪记录每批开花情况,以此统计总开花数(朵/ hm^2)和盛花期集中度(单日最大开花数占总花数百分比)。因火龙果夏季可正常花芽分化,本研究只分析冬季施肥效果。

1.2.5 产量与果实分级 以开始施肥后分化出的

花芽坐果为第一批采收对象,为减小试验期内光温变化导致的误差,于试验期连续采收记录,统计各小区坐果数、单果质量,计算总产量。按NY/T 3601—2020《火龙果等级规格》标准对冬季果实进行分级:特大果($\geq 450\text{ g}$)、大果($350\sim 449\text{ g}$)、中果($250\sim 349\text{ g}$)、小果($<250\text{ g}$),计算各等级果实比例。因火龙果夏季果实采收周期短(每15~20 d可采收一批),本研究主要分析冬季施肥效果。

1.3 数据处理

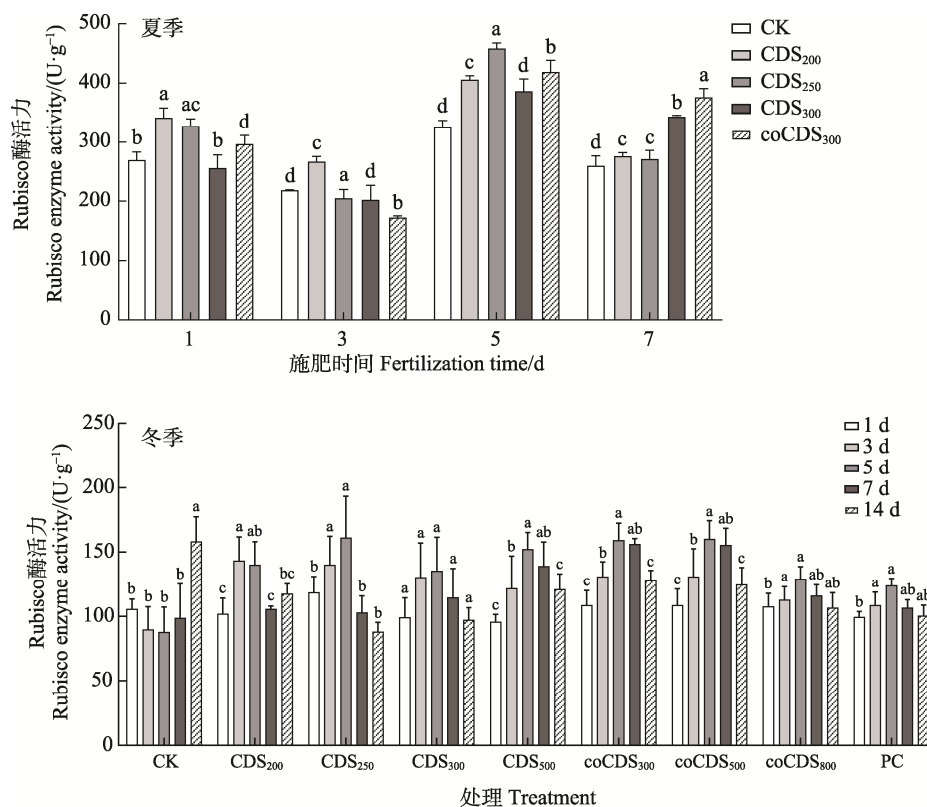
采用SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),使用Duncan法进行多重比较($P<0.05$),使用GraphPad Prism9 软件制图。

2 结果与分析

2.1 碳量子点对 Rubisco 活性的调控效应

由图1可知,夏季,各处理的Rubisco活性均显著高于CK($P<0.05$),但不同浓度处理间存在明显差异。 CDS_{250} 与 $coCDS_{300}$ 处理在第5天时Rubisco活性达到峰值,分别较CK提高41.05%和20.46%,其次是 CDS_{200} 处理,各组间差异显著。相较于 CDS_{300} 处理, $coCDS_{300}$ 处理更有利于提高Rubisco活性。总体而言,在夏季高光高温条件下,以高浓度处理对Rubisco活性的促进作用更为显著且有利于维持较高酶活性水平,相同浓度下,碳量子点与营养元素配合施用更有利于提高光合酶活性。

为进一步探究碳量子点对火龙果影响的时间动态特征,试验将冬季监测期延长至14 d。结果表明,高浓度处理(CDS_{200} 、 CDS_{250})对酶活性的响应表现出“快速激活-迅速回落”的特点,且在第3天达到峰值后,在第7天恢复至初始水平;中低浓度处理(CDS_{300} 、 CDS_{500})的酶活性回落速率明显减缓;复合处理($coCDS_{300}$ 、 $coCDS_{500}$ 、 $coCDS_{800}$)在14 d监测期内仍能维持峰值80%以上的酶活性水平, $coCDS_{300}$ 和 $coCDS_{500}$ 处理高于 CDS_{300} 和 CDS_{500} 处理, $coCDS_{800}$ 处理调控效应最弱。PC处理对酶活性调控效应在趋势上同复合处理组,但效果较弱,低于 $coCDS_{800}$ 处理。这一结果表明,冬季低温弱光条件下,碳量子点对火龙果光合酶活性具有显著调控效应,高浓度碳量子点可在短期内迅速提高酶活性,营养元素的协同引入则显著延长了碳量子点对Rubisco活性的调控时效,为反季节栽培提供了更持久的光合保障。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 1 夏季和冬季不同处理对 Rubisco 活性的调控效应

Fig. 1 Regulatory effects of different treatments on Rubisco activity during summer and winter

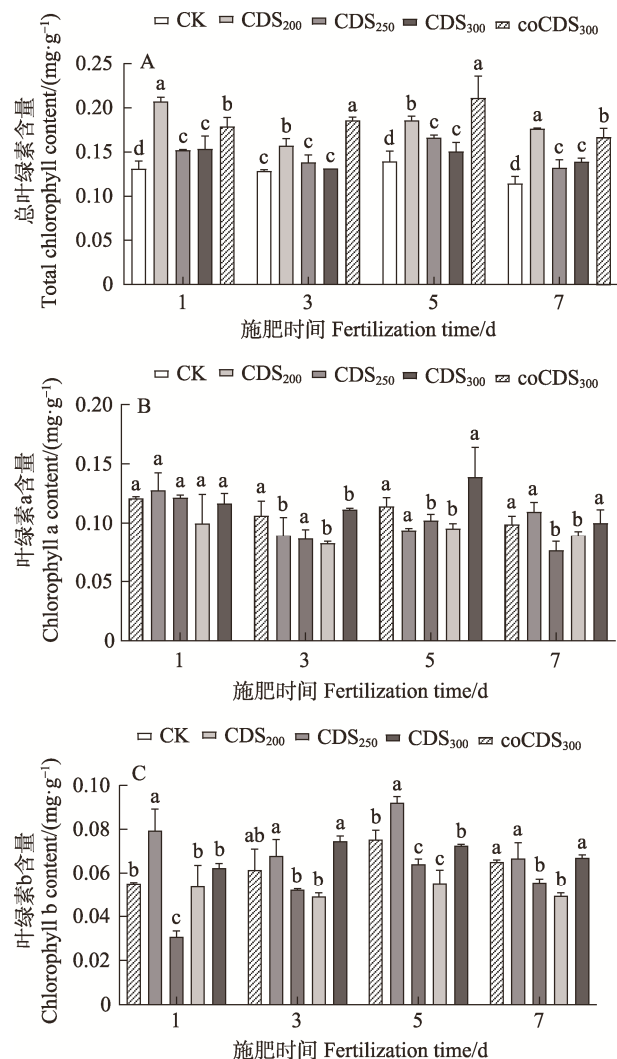
2.2 碳量子点对叶绿素的调控效应

夏季叶绿素含量分析结果表明 (图 2), 各处理在施药后 7 d 内总叶绿素含量均显著高于 CK ($P < 0.05$)。本研究中, coCDS_{300} 处理对叶绿素的影响最为显著, 总叶绿素含量平均提高 44.68%; 其次是 CDS_{200} 处理, 使火龙果总叶绿素含量平均提高 41.92%, 两组间差异显著, 且显著高于其他处理。 coCDS_{300} 处理可使叶绿素 a、b 含量分别提高 21.53% 和 21.48%, CDS_{200} 处理则使叶绿素 a 含量平均提高 10.56%, 叶绿素 b 含量提高 43.89%。各处理间对叶绿素的调控差异主要体现在总叶绿素和叶绿素 b 的含量方面。本研究显示, 碳量子点对叶绿素 b 合成的促进作用显著强于叶绿素 a, 使叶绿素 a/b 比值降低。对比 CDS_{300} 和 coCDS_{300} 处理发现, 营养元素的协同施用显著增强了同浓度碳量子点对火龙果叶绿素生物合成的正向调控效应。

冬季弱光条件下, 碳量子点促进叶绿素合成的响应特征更加明显 (图 3)。 CDS_{300} 、 CDS_{500} 处理和复合处理组对叶绿素合成的促进作用更为明

显, 对叶绿素生物合成具有显著的时空调控特征:

(1) 时序响应方面, 各处理组诱导的总叶绿素和叶绿素 b 含量呈现渐进式积累模式, 于处理第 7~14 天达到峰值; (2) 组分优化方面, 复合处理可使叶绿素 b 占比提升至 61.80%, 显著高于高浓度碳量子点处理 (7.60%~41.70%)。与夏季不同的是, 高浓度处理 (CDS_{200} 、 CDS_{250}) 对冬季火龙果叶绿素的合成没有显著促进作用, 且这种效应不随施肥时间而变化。值得注意的是, 冬季条件下, 碳量子点呈现显著的选择性调控特征: 各处理对叶绿素 a 含量无显著影响, 但对叶绿素 b 的合成表现出剂量依赖性促进效应 (CDS_{300} 、 $\text{CDS}_{500} > \text{CDS}_{200}$ 、 CDS_{250}), 其中高浓度碳量子点 (CDS_{200} 、 CDS_{250}) 处理基本未表现出调控活性。这一特异性调控效应在弱光环境中具有重要意义: 叶绿素 b 作为光系统 II 的捕光色素, 其比例增加可使蓝紫光 (470 nm) 吸收效率提升 37%~42%^[5], 直接增强了火龙果在冬季弱光条件下的光能转化效率。本研究结果证明, 碳量子点可通过“含量提升-组分优化”双重途径重构光合色素系统, 其冬



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图2 夏季不同处理对火龙果叶绿素的调控效应

Fig. 2 Regulatory effects of summer treatments on chlorophyll in pitaya

季特异性的叶绿素 b 靶向调控机制, 为开发火龙果弱光适应性纳米助剂提供理论依据。

2.3 碳量子点对冬季开花特性的调控效应

开花数量分析结果 (表 1) 显示, 各处理均能显著促进火龙果开花, 但效果存在较大差异。CDS₅₀₀ 处理的促开花效果最为突出, 总开花数达 6750 朵/hm², 较 CK 增加 141.80%; coCDS₃₀₀ 和 CDS₃₀₀ 处理次之, 总开花数分别为 5280 朵/hm² 和 4485 朵/hm², 增幅分别为 94.71% 和 65.29%; 其他处理的增幅在 49.01%~59.67% 之间。碳量子点对火龙果开花的调控效应表现出明显的浓度效应: 在单一碳量子点处理组中, 随着稀释倍数的增加 (即浓度降低), 其促开花效果反而增强, 本

研究中以 CDS₅₀₀ 处理表现最优。

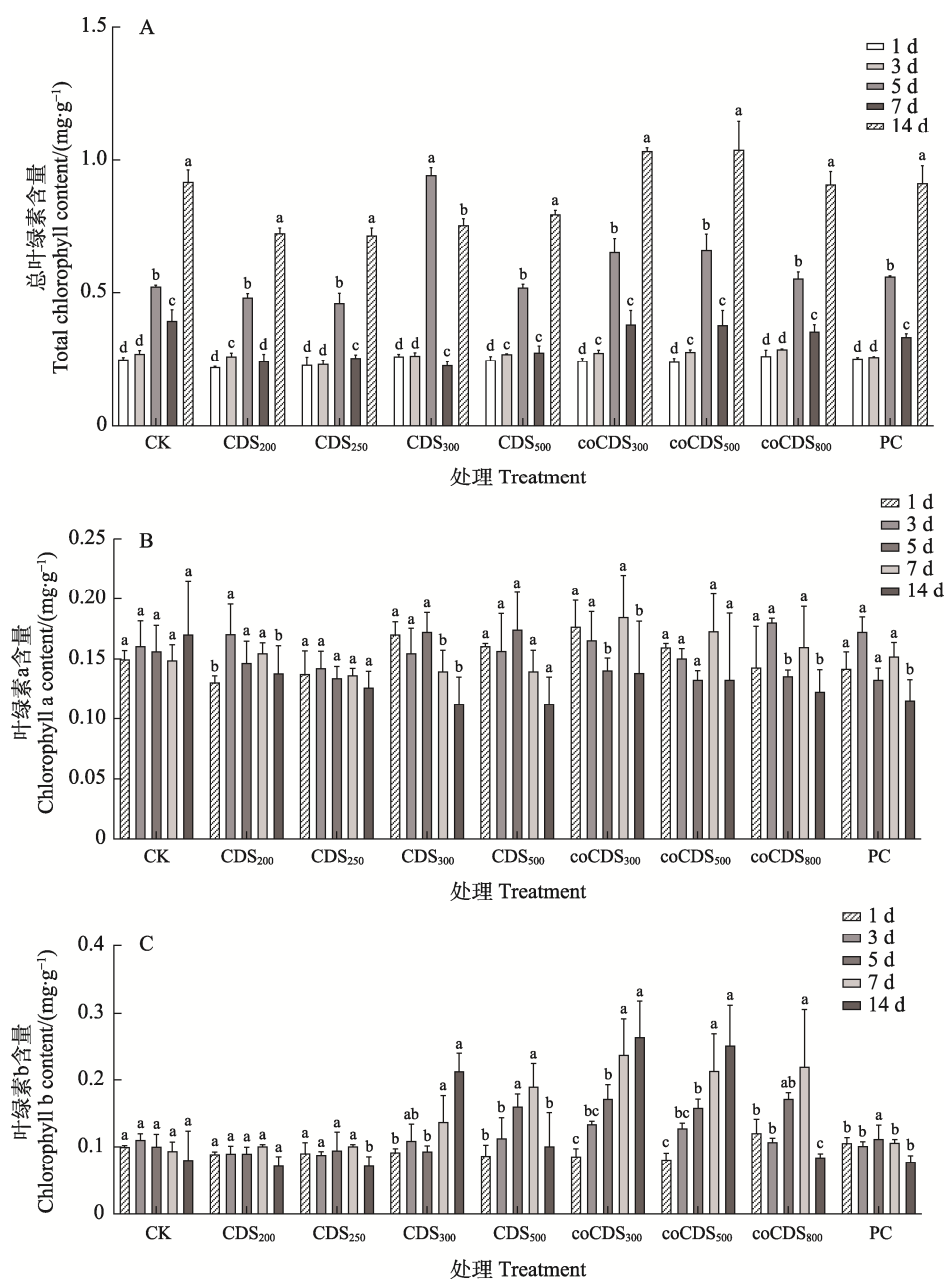
花期分布特征分析结果表明, 除 coCDS₃₀₀ 处理外, 其余处理的盛花期均为第 3 天, 当日开花数占总开花数的 50% 以上。而 coCDS₃₀₀ 处理的盛花期则提前至第 2 天, 植株前 3 d 的总开花数增加, 这表明碳量子点与营养元素的配施不仅影响开花数量, 还可能改变其开花节律。

进一步分析表明, 叶绿素 b 含量与开花数呈显著正相关 ($r=0.83$, $P < 0.05$), 推断光合作用的增强促进了碳水化合物的积累, 为植物后续的生殖生长 (开花、授粉和果实发育) 提供了必需的能量和物质基础^[12], 本研究观察到碳量子点处理组的植株始花期提前也说明了这一点。光合性能的改善有助于促进花芽分化和改变开花过程, 表明本研究中碳量子点可能通过调控叶绿素 b 的合成间接影响了火龙果的生殖生长。

2.4 碳量子点对产量与果实大小的调控效应

冬季产量分析结果 (表 2) 表明, 与 CK 相比, 施用碳量子点显著增加了各处理的火龙果产量, 但处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。CDS₃₀₀ 处理产量最高, 为 2721.00 kg/hm², 较 CK 增产 115.60%, coCDS₃₀₀ 处理次之, 产量为 2427.15 kg/hm², 增产 92.31%, 但两组间的差异不显著; 而处理 CDS₂₀₀ 的增产效果最弱, 仅为 20.24%, 这与该处理对火龙果 Rubisco 活性、叶绿素含量及开花数的调控效应一致, 进一步证实碳量子点通过调控光合作用促进植株生殖生长。果实分级结果表明, coCDS₃₀₀ 处理的特大果比例高达 80.91%, 显著高于其他处理, 且复合处理组的特大果比例均高于单一碳量子点处理组; 而单一碳量子点处理组的特大果比例在 38.19%~43.64% 之间, 虽显著高于对照 (34.42%), 但明显低于复合处理组。这一结果表明, 碳量子点能显著促进冬季火龙果果实膨大, 但其与营养元素的协同增效作用优于单一施用。本研究中, 由于 PC 处理种植区地势较低, 导致水分和养分聚集, 随着试验进行, 这种养分富集对生殖生长的促进作用逐渐凸显, 导致相关数据偏高。

各处理火龙果的夏季产量表现与冬季存在明显差异 (表 3)。夏季, 各处理增产幅度在 16.61%~37.21% 之间, 虽显著高于 CK, 但处理间的差异不显著。碳量子点在冬季弱光下的平均增产效应 (58.24%) 显著高于夏季 (27.19%), 表明碳量子点在逆境条件下对火龙果的调控作用更为突出。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 冬季不同处理对火龙果叶绿素的调控效应

Fig. 3 Regulatory effects of winter treatments on chlorophyll in pitaya

这与 LI 等^[8]报道的碳点可缓解水稻非生物胁迫的结果一致, 碳量子点可能通过增强光合同化能力和抗逆性来协同提升产量, 这为其在火龙果反季节栽培中的应用提供依据。

3 讨论

3.1 碳量子点对光合系统的调控机制

本研究系统研究了生物基碳量子点在火龙果光合生理中的双重调控效应。从分子机制角度分

析, 碳量子点可能通过其独特的纳米结构和表面官能团参与植物的光合作用。碳量子点具有优异的光致发光性能, 可进行共价官能化, 使其在可见光谱甚至近红外光区均具有较强的吸收和发射能力^[13-14], 并通过发射蓝光或红光, 或将紫外线转化为作物可利用的蓝紫光 and 红光, 提高叶片的光合速率^[15]。

KOU 等^[16]的研究结果表明, 碳量子点可进入植物并通过表面羧基与 PSII 的放氧复合体中 Mn_4CaO_5

表 1 不同处理对火龙果开花的调控效应
Tab. 1 Regulatory effects of different treatments on pitaya flowering

处理 Treatment	当日开花数占总开花数比例 Proportion of daily flowering to total flowering/%				总开花数 Total number of flowers /(flowers·hm ⁻²)	增幅 Increase rate/%
	第 1 天 Day1	第 2 天 Day2	第 3 天 Day3	第 4 天 Day4		
CDS ₂₀₀	10.81	29.73	59.46	0	4050±48.84 ^c	49.01±10.42 ^c
CDS ₂₅₀	11.90	30.95	52.38	4.76	4140±40.83 ^c	52.60±6.54 ^c
CDS ₃₀₀	6.67	35.56	55.56	2.22	4485±36.11 ^b	65.29±7.08 ^c
CDS ₅₀₀	1.47	23.53	70.59	4.41	6570±26.86 ^a	141.80±9.43 ^a
coCDS ₃₀₀	13.33	53.33	31.67	1.67	5280±39.03 ^b	94.71±7.21 ^b
coCDS ₅₀₀	1.49	20.90	74.63	2.99	4305±31.10 ^c	58.83±6.79 ^c
coCDS ₈₀₀	0.79	24.34	69.31	5.56	4335±24.63 ^c	59.67±6.54 ^c
CK	1.42	42.15	55.44	0.99	2130±39.18 ^d	
PC	10.33	27.74	58.34	3.59	4395±55.76 ^b	106.3±14.56 ^b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 2 冬季不同处理对火龙果产量的调控效应
Tab. 2 Regulation effects of different winter treatments on pitaya yield

处理 Treatment	产量 Production/(kg·hm ⁻²)	增产 Increase production/%	果实分级占比 Proportion of fruit grading/%			
			特大果 Extra large fruit	大果 Big fruit	中果 Middle fruit	小果 Little fruit
CDS ₂₀₀	1517.55±104.83 ^b	20.24	38.19±1.38 ^{bc}	42.81±1.16 ^a	6.45±2.43 ^a	1.54±0.58 ^a
CDS ₃₀₀	2721.00±29.11 ^a	115.60	40.00±11.54 ^b	48.89±9.69 ^a	3.57±2.22 ^a	0.00±0.00 ^a
CDS ₅₀₀	1490.70±25.09 ^b	18.11	43.64±5.56 ^b	50.00±2.63 ^a	0.00±0.00 ^c	6.36±3.19 ^a
coCDS ₃₀₀	2427.15±32.71 ^a	92.31	80.91±6.05 ^a	0.00±0.00 ^c	15.36±3.37 ^a	3.33±3.33 ^a
coCDS ₅₀₀	1883.40±15.78 ^b	49.23	64.24±7.16 ^a	29.70±11.81 ^b	19.05±6.06 ^a	0.00±0.00 ^a
coCDS ₈₀₀	1942.65±61.63 ^b	53.92	59.63±16.48 ^a	37.04±19.60 ^a	17.04±3.96 ^a	0.00±0.00 ^a
PC	2588.25±2.91 ^a	105.07	40.62±0.64 ^b	40.98±3.43 ^a	11.11±3.21 ^a	1.70±0.90 ^a
CK	1262.10±22.94 ^c		34.42±3.71 ^c	41.59±1.69 ^a	16.72±5.69 ^b	1.91±0.47 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

表 3 夏季不同处理对火龙果产量的调控效应
Tab. 3 Regulation effects of different summer treatments on pitaya yield

处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)	增产 Output increase /(kg·hm ⁻²)	增产率 Yield in- crease rate/%	大果率 (≥250 g) Percentage of large fruit/%
CDS ₂₀₀	11 430	2400	26.58	87.50
CDS ₃₀₀	11 370	2340	25.91	80.00
CDS ₅₀₀	11 640	2610	28.90	88.46
coCDS ₃₀₀	11 730	2700	27.91	76.47
coCDS ₅₀₀	10 530	1500	16.61	65.00
coCDS ₈₀₀	12 390	3360	37.21	60.00
CK	9 030			67.68

簇相互作用等提升光合电子传递链的效率，从而显著促进植物生长；碳量子点表面的官能团能与酶等结合，诱导 Rubisco 发生构象微调，或吸附

和传递 CO₂分子等，增强其活性^[11, 17]。夏季试验中，CDS₂₅₀与 coCDS₃₀₀处理使 Rubisco 活性在第 5 天达到峰值，分别较 CK 提高 41.05%和 20.46%。冬季试验中，各处理组均能使 Rubisco 活性迅速升高，复合处理组在 14 d 内可维持峰值 80%以上的酶活性水平。这是碳量子点调控植物光合生理的宏观体现。

在叶绿素水平上，本研究观察到碳量子点可提高叶绿素含量，但对叶绿素 b 合成的促进作用显著强于叶绿素 a。夏季试验中，CDS₂₀₀处理可使叶绿素 b 提高 43.89%，远高于对叶绿素 a 的促进作用的 10.56%；冬季试验中，复合处理组可使叶绿素 b 占比达到 61.80%，而对叶绿素 a 含量无显著促进作用，这一变化在弱光条件下具有重要意义。叶绿素 b 作为 LHCII 的主要组分，其含量

增加可显著增强光系统 II 的捕光能力^[5], 使植株能够有效地利用冬季丰富的散射光。这一发现与刘涛等^[1]对火龙果叶绿素荧光特性的研究结果相互印证, 为碳量子点在弱光条件下的应用提供理论依据。

3.2 碳量子点对产量形成的协同效应

本研究结果表明, 碳量子点对火龙果产量的提升具有显著的浓度效应和季节效应。冬季试验中, CDS₃₀₀ 处理使产量达到 2721.00 kg/hm², 较对照增产 115.60%, 而 CDS₂₀₀ 处理的增产效果相对最弱 (20.24%), 且与其在光合酶活性和叶绿素中的效应一致。值得注意的是, coCDS₃₀₀ 处理使特大果比例达到 80.91%, 且复合处理组均显著高于单一碳量子点处理组, 表明碳量子点与营养元素的协同作用对果实膨大的促进效果更为显著。近期研究表明, 碳量子点能与营养元素协同作用, 最终促进植物生长并提升品质^[18-20]。碳量子点表面的羧基等官能团能降低根际环境的 pH, 通过化学吸附增强作物对养分的吸收能力, 并影响根际微生物环境, 从而间接影响作物生长^[21-22], 碳量子点还能通过上调氮转运蛋白基因和增强氮代谢关键酶活性, 显著提高植物对氮元素的利用效率^[23]。因此, 碳量子点的浓度效应可能与其在植物体内的吸收和转运特性有关。碳量子点与营养元素配合施用, 是一种通过纳米技术实现化肥减量增效、促进植物生长的有效策略。

季节性差异分析显示, 碳量子点在冬季弱光环境下的平均增产效应 (58.24%) 显著高于夏季 (27.19%), 这一现象可能与不同季节的光合作用限制因素有关。在海南夏季高光强与高温条件下, 火龙果的光合系统可能接近饱和, 而冬季弱光条件下, 碳量子点通过优化叶绿素组分和增强光能捕获能力, 更有效地缓解了光限制胁迫。这一发现为碳量子点在热带果树反季节生产中的应用提供重要依据。

3.3 碳量子点的作用机制

基于本研究结果, 推测碳量子点可能通过以下途径影响火龙果的生长发育: (1) 碳量子点通过增强 Rubisco 活性和优化叶绿素组分, 提高光合效率; (2) 通过促进叶绿素 b 合成, 增强植株在弱光条件下的生存能力; (3) 通过与营养元素的协同效应, 促进植物对养分的吸收和利用。这些途径共同作用引起碳量子点对火龙果产量和品质的提升作用。

越来越多的研究表明, 碳量子点并非作为传统的肥料提供养分, 而是作为光合作用增效剂或生长调节剂, 通过优化植物自身的机能来发挥作用, 具有高效、环保、用量少的潜力, 为开辟纳米农业投入剂指明了方向。生物基碳量子点作为一种新型植物生长调节材料, 在热带果树栽培中展现出良好的应用前景, 本研究证实其可通过多途径协同调控光合性能与产量形成, 尤其在缓解季节性光温限制方面具有独特优势。未来研究可着重探讨碳量子点在土壤-植物系统中的迁移转化规律及其环境行为, 为其在热带果树中的安全高效应用提供完整的技术支撑。

参考文献

- [1] 刘涛, 沃林峰, 应建平, 毛文龙, 杨丽娜, 房明华, 胡渊渊. 火龙果不同月龄枝条的叶绿体超微结构及叶绿素荧光特性[J]. 经济林研究, 2019, 37(3): 84-89.
LIU T, WO L F, YING J P, MAO W L, YANG L N, FANG M H, HU Y Y. Chloroplast ultrastructure and chlorophyll fluorescence characteristics of different months old branches in *Hylocereus undulatus*[J]. Non-wood Forest Research, 2019, 37(3): 84-89. (in Chinese)
- [2] 韩冰, 韩剑. 海南省火龙果产业发展形势及其建议[J]. 中国南方果树, 2015, 44(5): 156-158.
HAN B, HAN J. Development situation and suggestions for pitaya industry in Hainan province[J]. South China Fruits, 2015, 44(5): 156-158. (in Chinese)
- [3] 熊睿, 徐敏, 刘成立, 林家年, 程玉, 韦双双, 汤华. 海南冬季诱导火龙果开花的补光条件[J]. 热带生物学报, 2019, 10(1): 60-65.
XIONG R, XU M, LIU C L, LIN J N, CHENG Y, WEI S S, TANG H. Supplementary illumination for pitaya flower induction in winter in Hainan[J]. Journal of Tropical Biology, 2019, 10(1): 60-65. (in Chinese)
- [4] WAREING T C, GENTILE P, PHAN A N. Biomass-based carbon dots: current development and future perspectives[J]. ACS Nano, 2021, 15(10): 15471-15501.
- [5] 王士鹏, 董娅慧, 赵浩然, 李玉, 程倩. 生物质基碳点制备及应用研究进展[J]. 发光学报, 2022, 43(6): 833-850.
WANG S P, DONG Y H, ZHAO H R, LI Y, CHENG Q. Progress in preparation and application of biomass-based carbon quantum dots[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2022, 43(6): 833-850. (in Chinese)
- [6] FAN J, KANG L, CHENG X, LIU D, ZHANG S. Biomass-derived carbon dots and their sensing applications[J]. Nanomaterials, 2022, 12(24): 25.
- [7] LI Y D, XU X K, WU Y, ZHUANG J L, ZHANG X J,

- ZHANG H R, LEI B F, HU C F, LIU Y L. A review on the effects of carbon dots in plant systems[J]. *Materials Chemistry Frontiers*, 2020, 4(2): 437-448.
- [8] LI H, HUANG J, LU F, LIU Y, SONG Y X, SUN Y H, ZHONG J, HUANG H, WANG Y, LI S M, LIFSITZ Y, LEE S T, KANG Z H. Impacts of carbon dots on rice plants boosting the growth and improving the disease resistance[J]. *ACS Applied Bio Materials*, 2018, 1(3): 663-672.
- [9] LI Y D, GAO J M, XU X K, WU Y, ZHUANG J L, ZHANG X J, ZHANG H R, LEI B F, ZHENG M T, LIU Y L, HU C F. Carbon dots as a protective agent alleviating abiotic stress on rice (*Oryza sativa* L.) through promoting nutrition assimilation and the defense system[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(30): 33575-33585.
- [10] LI H, HUANG J, LIU Y, LU F, ZHONG J, WANG Y, LI S M, LIFSITZ Y, LEE S T, KANG Z H. Enhanced RuBisCO activity and promoted dicotyledons growth with degradable carbon dots[J]. *Nano Research*, 2019, 12(7): 1585-1593.
- [11] WANG H B, LI H, ZHANG M L, SONG Y X, HUANG J, HUANG H, SHAO M W, LIU Y, KANG Z H. Carbon dots enhance the nitrogen fixation activity of azotobacter chroococcum[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(19): 16308-16314.
- [12] LI W, WU S S, ZHANG H R, ZHANG X J, ZHUANG J L, HU C F, LIU Y L, LEI B F, MA L, WANG X J. Enhanced biological photosynthetic efficiency using light-harvesting engineering with dual-emissive carbon dots[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(44): 1-11.
- [13] LIU J, LI R, YANG B. Carbon dots: a new type of carbon-based nanomaterial with wide applications[J]. *ACS Central Science*, 2020, 6(12): 2179-2195.
- [14] CAO L, SANHU S, ANILKUMAR P, BUNKER C E, XU J, FERNANDO K A S, PING W, GULIANTS E A, TACKETT K N, SUN Y P. Carbon nanoparticles as visible-light photocatalysts for efficient CO₂ conversion and beyond[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2011, 133(13): 4754-4757.
- [15] SAIL M, LIU S Q, QIAN X X, YU Y H, XU X F. Nontoxic fluorescent carbon nanodot serving as a light conversion material in plant for UV light utilization[J]. *Colloids & Surfaces B: Biointerfaces*, 2018, 169: 422-428.
- [16] KOU E F, YAO Y Y, YANG X, SONG S W, LI W, KANG Y Y, QU S N, DONG R Y, PAN X Q, LI D N, ZHANG H R, LEI B F. Regulation mechanisms of carbon dots in the development of lettuce and tomato[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(2): 944-953.
- [17] 王磊. 碳点在绿色农业技术变革中的应用进展[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(6): 631-645.
- WANG L. Application and environmental significance of carbon dots in modern agriculture[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2024, 54(6): 631-645. (in Chinese)
- [18] 朱洪, 刘洋, 崔茂亚, 高平磊, 陈英龙, 戴其根. 纳米材料-碳点对作物生长发育的影响研究进展[J]. *江苏农业学报*, 2025, 41(4): 823-832.
- ZHU Q, LIU Y, CUI M Y, GAO P L, CHEN Y L, DAI Q G. Research progress on the effects of nano-material-carbon dots on crop growth and development[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2025, 41(4): 823-832. (in Chinese)
- [19] LIU J L, GANG H X, QIN D, WANG H Y, WANG X T, SHAO K L, FU C L, HONG J J, HUO J W. Carbon quantum dots from fallen leaves of *Lonicera caerulea* L.: an innovative plant growth promoter and fruit quality enhancer[J]. *Environmental Research*, 2025, 274(1): 350-359.
- [20] RITZ S, SCHOTTLE S, KOTMAN N, BAIER G, MUSYANOVYH A, KUHAREV J, LANDFESTER K, SCHILD H, JAHN O, TENZER S, MAILANDER V. Protein corona of nanoparticles: distinct proteins regulate the cellular uptake[J]. *Biomacromolecules*, 2025, 16(4): 1311-1321.
- [21] KOU E F, YAO Y Y, YANG X, SONG S W, LI W, KANG Y Y, QU S N, DONG R Y, PAN X Q, LI D N, ZHANG H R, LEI B F. Regulation mechanisms of carbon dots in the development of lettuce and tomato[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(4): 944-953.
- [22] HU J, JIA W Y, YU X F, YAN C H, WHITE J C, LIU J F, SHEN G F, TAO S, WANG X L. Carbon dots improve the nutritional quality of coriander (*Coriandrum sativum* L.) by promoting photosynthesis and nutrient uptake[J]. *Environmental Science: Nano*, 2022, 9(5): 1651-1661.
- [23] JI Y H, YUE L, CAO X S, CHEN F, LI J, ZHANG J, WANG C, WANG Z, XING B. Carbon dots promoted soybean photosynthesis and amino acid biosynthesis under drought stress: reactive oxygen species scavenging and nitrogen metabolism[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159125.