

LED 光质对比对离体蓝莓试管苗生根及移栽成活率的影响

赵 敏

(吉林农业大学园艺学院, 吉林 长春 130118)

摘 要: 蓝莓作为高价值小浆果, 市场需求持续增长, 离体组织培养是其优良种苗快速繁育的核心技术。然而, 试管苗生根率低、根系质量差、移栽后抗逆性弱、成活率不稳定 (仅 60%-70%), 已成为制约蓝莓组培工厂化育苗的关键瓶颈。LED 光源因光谱可调、能耗低、寿命长等优势, 成为调控离体培养环境的理想工具, 光质配比可通过调控植物光受体信号转导、内源激素平衡、光合代谢及抗逆系统, 定向影响试管苗生根发育与移栽适应性。本文以蓝莓离体试管苗为研究对象, 系统阐释 LED 光质调控试管苗生根及移栽成活的理论机制, 重点解析光受体介导的信号通路、内源激素调控规律、光合碳代谢适配机制及抗氧化系统激活路径, 阐明单色光与复合光的协同效应、不同发育阶段光质需求转变及离体 - 异养 - 自养转换的光调控逻辑。研究旨在构建光质调控蓝莓试管苗生根与移栽成活的理论体系, 为优化 LED 光质配比方案、突破组培育苗瓶颈、提升蓝莓种苗繁育效率与质量提供理论支撑与实践参考。

关键词: 蓝莓; 离体培养; LED 光质; 试管苗生根; 移栽成活率; 光调控机制

中图分类号: S663

文献标识码: A

文章编号: 3106-2547 (2025) 12-0008-12

DOI: 10.62022/FHR.issn3106-2547.2025.12.003

Effects of LED Light Quality Ratio on Rooting and Transplanting Survival Rate of Blueberry Plantlets in Vitro

Zhao Min

(College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118)

Abstract: As a high-value small berry, blueberry has seen continuous growth in market demand, and in vitro tissue culture is a core technology for the rapid propagation of high-quality seedlings. However, the low rooting rate, poor root quality, weak stress resistance after transplanting, and unstable survival rate (only 60% - 70%) of in vitro plantlets have become key bottlenecks restricting the commercial-scale seedling production of blueberry. LED light sources, owing to their tunable spectrum, low energy consumption, and long lifespan, have emerged as an ideal tool for regulating the in vitro culture environment. Light quality ratios can directionally influence the rooting development and transplanting adaptability of in vitro plantlets by modulating plant photoreceptor signal transduction, endogenous hormone balance, photosynthetic metabolism, and stress resistance systems. This article takes blueberry in vitro plantlets as the research object, systematically elucidates the theoretical mechanisms by which LED light quality regulates plantlet rooting and transplanting survival, and focuses on analyzing photoreceptor-mediated signaling pathways, endogenous hormone regulation patterns, photosynthetic carbon metabolism adaptation mechanisms, and antioxidant system activation pathways. It further clarifies the synergistic effects of monochromatic and composite light, the shift in light quality requirements at different developmental stages, and the photoregulatory logic underlying the in vitro - heterotrophic - autotrophic transition. This study aims to construct a theoretical framework for light quality regulation of rooting and transplanting survival in blueberry plantlets, thereby providing theoretical support and practical guidance for optimizing LED light quality ratios, breaking through bottlenecks in tissue culture seedling production, and improving the efficiency and quality of blueberry seedling propagation.

Keywords: blueberry; in vitro culture; LED light quality; rooting of plantlets; transplanting survival rate; photoregulation mechanism

1 引言

1.1 蓝莓组织培养中生根与移栽成活的关键瓶颈

蓝莓 (Vaccinium spp.) 隶属杜鹃花科越橘属, 是富含花青素、维生素及矿物质的高营养特色小浆果, 兼具食用、

药用与生态价值, 近年来全球种植规模持续扩张, 我国东北、西南及长江流域已形成规模化种植产区。蓝莓遗传杂合度高, 种子繁殖易发生性状分离, 扦插繁殖受季节、母株数量限制且生根率低, 而离体组织培养可实现优良品种的快速扩繁、脱毒复壮及周年生产, 是当前蓝莓种苗繁育

作者简介: 赵敏, 博士, 讲师, 研究方向为小浆果组织培养与光环境调控。

的主流技术。

蓝莓组培流程主要包括外植体灭菌、丛生芽诱导、继代增殖、试管苗生根及移栽驯化五大环节,其中生根与移栽成活是决定育苗成败与成本的核心阶段。生产实践中,蓝莓试管苗生根环节存在突出问题:一是生根率低且不稳定,常规荧光灯培养下,多数品种试管苗生根率仅30%–70%,品种间差异显著,如南高丛蓝莓部分品种生根率不足50%;二是根系质量差,生根试管苗多形成细弱、短小的不定根,根毛稀少,木质化程度低,吸收水分与养分能力弱,且易出现愈伤组织过度增生、根畸形等问题;三是生根周期长,试管苗生根需60–90天,延长育苗周期、增加生产成本。

移栽驯化阶段的瓶颈更为突出,试管苗长期处于无菌、高湿、弱光、异养的封闭环境,形成形态与生理的“脆弱性”:叶片角质层薄、气孔发育异常、蒸腾失水快;叶绿体结构简单、光合能力弱,难以快速适应自然光下的自养环境;细胞间隙大、机械组织不发达,抗机械损伤与病原菌侵染能力差;内源激素失衡、抗氧化系统活性低,对温湿度波动、强光、干旱等胁迫耐受性弱。上述问题导致蓝莓试管苗移栽成活率仅60%–70%,且成活幼苗生长缓慢,需3–5个月才能培育为合格营养钵苗,严重制约蓝莓种苗规模化供应与产业发展。

现有研究多聚焦培养基配方优化、激素浓度调控、移栽基质筛选等方面,虽取得一定成效,但未从光环境调控这一核心因子入手,难以从根本上解决试管苗形态与生理脆弱性问题。光是植物生长发育的基础,不仅为光合作用提供能量,更是调控植物形态建成、激素代谢、抗逆响应的核心信号因子,而传统组培采用的荧光灯光谱固定、能耗高、发热量大,无法精准调控光质配比,难以适配蓝莓试管苗不同发育阶段的生理需求。因此,深入解析LED光质对比对蓝莓试管苗生根及移栽成活率的影响机制,成为突破蓝莓组培育苗瓶颈的关键研究方向。

1.2 LED光质调控植物生长发育的理论基础

光作为植物生长的核心环境因子,兼具能量源与信号源双重功能:一方面,植物通过光合作用吸收光能,将二氧化碳与水转化为有机物,为生长发育提供物质与能量;另一方面,光通过不同波长的光质信号,被植物体内光受体感知,激活下游信号转导通路,调控基因表达、激素合成与代谢,进而影响植物形态建成、生理代谢及逆境响应,这一过程称为光形态建成。

植物对光质的感知具有光谱特异性,不同波长光质(红

光、蓝光、绿光、远红光等)被不同光受体识别,引发差异化生理响应。高等植物光受体主要包括五大类:一是光敏色素(PHY),主要感知红光(650–670nm)与远红光(705–740nm),存在红光吸收型(Pr)与远红光吸收型(Pfr)两种可逆转化形式,Pfr为活性形式,可调控茎伸长、开花、休眠及生根等发育过程;二是隐花色素(CRY),特异性响应蓝光(400–500nm)与紫外光A(UV-A),调控光形态建成、生物钟、花青素合成及气孔发育;三是向光素(PHOT),感知蓝光信号,介导叶绿体运动、气孔开闭及向光性反应,优化光能吸收与利用;四是UVR8,特异性感知紫外光B(UV-B),调控植物抗紫外胁迫响应与次生代谢产物合成;五是ZEITLUPE家族蛋白,作为光周期受体,精细调控植物昼夜节律与开花时间。

LED(发光二极管)是一种新型半导体光源,与传统荧光灯、白炽灯相比,具有光谱可调、单色性好、能耗低、寿命长、发热少、体积小等显著优势,可精准输出特定波长的单色光(红光、蓝光、绿光、远红光等)或任意配比的复合光,为植物光质调控提供了精准、高效的技术手段。LED光质调控植物生长发育的核心理论是光质–光受体–信号转导–生理响应的级联调控机制:不同光质被对应光受体感知后,通过磷酸化、泛素化等修饰激活下游信号分子,进而调控细胞核内相关基因的表达,影响内源激素(生长素、赤霉素、细胞分裂素、脱落酸等)的合成、运输与代谢,最终调控植物细胞分裂、分化、器官发育及生理代谢,实现对植物生长发育的定向调控。

近年来,LED光质调控技术已在蔬菜、花卉、果树等园艺植物离体培养中广泛应用,研究表明,合理的光质配比可显著提高试管苗生根率、改善根系质量、增强光合能力与抗逆性,提升移栽成活率。例如,红蓝光配比(3:1)可显著提高杉木组培苗生根率,较白光对照提高45.61%;红光可促进月季组培苗生长素合成与运输,生根率提高40%;蓝光可增强石斛组培苗抗氧化酶活性,提高移栽后抗逆性。上述研究为LED光质调控蓝莓试管苗生长发育提供了重要理论依据与实践参考,但针对蓝莓这一杜鹃花科植物,其光质响应具有物种特异性,需结合蓝莓生理特性系统解析光质配比的调控机制。

1.3 光质对离体培养物生根与驯化的潜在影响机制

离体培养物的生根与驯化是细胞分化、器官建成及生理适应性重塑的复杂过程,受遗传、激素、营养、环境等多因子协同调控,其中光质作为核心环境信号因子,通过多维度、多层次的调控路径影响离体培养物的生根发育与

驯化成活。

在生根诱导阶段,光质主要通过调控内源激素平衡、根原基细胞分化及碳代谢供应影响不定根形成。生长素是诱导不定根原基形成的核心激素,其合成、极性运输与分布直接决定生根效率。红光可通过激活光敏色素信号通路,促进生长素合成基因(如YUC家族)表达,提高内源生长素含量,同时增强生长素极性运输载体(如PIN蛋白)活性,促进生长素向试管苗基部运输与积累,诱导根原基启动与分化;蓝光通过隐花色素信号通路,适度抑制生长素降解,维持基部生长素浓度,同时调控细胞分裂素与生长素的比例,避免愈伤组织过度增生,促进不定根正常发育;远红光可通过调控光敏色素平衡,缓解红光诱导的徒长,优化试管苗形态,为生根提供良好的营养基础;绿光虽光合效率较低,但可穿透试管苗冠层,促进基部细胞代谢,辅助不定根伸长。此外,光质可调控试管苗光合能力,红光与蓝光是叶绿素吸收的主要光质,合理配比可提高光合色素含量与光合效率,增加可溶性糖积累,为根原基分化与不定根生长提供充足碳源,避免因碳源不足导致生根停滞。

在移栽驯化阶段,光质主要通过调控光合能力重建、气孔发育与水分平衡、抗氧化系统激活及机械组织发育影响试管苗适应性与成活率。长期异养培养的试管苗光合能力极弱,移栽后需快速重建自养能力,蓝光可促进叶绿体发育与叶绿素合成,提高光系统II(PSII)活性,增强光能捕获与转化效率;红光可促进光合碳代谢关键酶(如Rubisco)活性,加速可溶性糖合成与积累,为移栽后生长提供能量。气孔是植物水分蒸腾与气体交换的核心通道,试管苗气孔发育异常、开闭失调是移栽失水死亡的主要原因之一,蓝光通过向光素信号通路,促进气孔发育与正常开闭,降低蒸腾速率,维持水分平衡。移栽过程中,试管苗易受强光、干旱、病原菌侵染等胁迫,导致细胞内活性氧(ROS)积累,引发膜脂过氧化与细胞损伤,红光与蓝光可通过激活抗氧化系统,提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性,增加脯氨酸、可溶性蛋白等渗透调节物质含量,清除活性氧,减轻胁迫损伤。此外,蓝光可促进细胞壁木质化与机械组织发育,增强试管苗抗机械损伤与病原菌侵染能力,提高移栽成活率。

复合光配比的协同效应是光质调控离体培养物生根与驯化的核心特征,单一光质难以满足试管苗不同发育阶段的生理需求,如单独红光易导致试管苗徒长、根系细弱;单独蓝光易抑制生根、导致苗体矮化;合理的红蓝光配比

可平衡形态建成与生理代谢,促进生根与抗逆性提升。此外,添加适量绿光、远红光可进一步优化调控效果,如红蓝光中添加10%绿光可显著改善蓝莓组培苗长势,提高增殖倍数与生根率;低剂量远红光可促进蓝莓试管苗增殖与光合能力提升。上述潜在影响机制为解析LED光质配比对蓝莓试管苗生根及移栽成活率的调控效应提供了理论框架,但需结合蓝莓离体培养的生理特性,进一步细化光质配比的调控路径与作用靶点。

1.4 本文的理论逻辑与论述结构

本文以“光质-光受体-内源激素-生理代谢-生根-移栽成活”为核心理论逻辑,聚焦蓝莓离体试管苗生根与移栽两大关键环节,系统阐释LED光质配比的调控机制与理论体系。全文遵循“理论基础-机制解析-效应整合-结论展望”的论述逻辑,层层递进、逐步深入,构建完整的光质调控蓝莓试管苗生长发育理论框架。

第一章为引言,重点阐述蓝莓组培育苗的产业背景与技术瓶颈,解析LED光质调控植物生长发育的理论基础,揭示光质对离体培养物生根与驯化的潜在影响机制,明确本文的研究意义、理论逻辑与论述结构,为后续章节奠定研究背景与理论框架。

第二章为LED光质对离体生根调控的理论机制,聚焦生根诱导的核心生理过程,从光受体介导的光信号转导通路、光质对生长素合成与极性运输的调控、光质对不定根原基诱导与伸长的理论模型三个维度,系统解析LED光质调控蓝莓试管苗不定根形成的分子与生理机制,阐明不同光质及配比的作用靶点与调控路径。

第三章为LED光质对试管苗生理状态的影响理论,聚焦移栽驯化的生理适应性需求,从光质调控光合能力与碳代谢的理论基础、光质对气孔发育与水分调控能力的理论影响、光质与抗氧化系统及移栽胁迫耐受性的理论关联三个方面,解析LED光质改善试管苗生理状态、增强移栽适应性的调控机制,揭示光质调控与试管苗抗逆性的内在联系。

第四章为光质配比优化与移栽成活的理论整合,聚焦光质调控的协同性与阶段性,从单色光与复合光配比的协同效应理论、不同发育阶段对光质需求的理论转变、从离体生根到异养-自养转换的光调控理论三个层面,整合光质配比的优化逻辑与动态调控策略,阐明复合光协同调控的理论依据与发育阶段适配的光质需求规律。

第五章为结论与理论展望,总结本文的核心理论认识,分析当前光质调控理论的局限性与待解决的关键问题,展望光质调控技术在园艺植物微繁中的理论发展方向与应用

前景,为后续深入研究与实践应用提供理论参考。

参考文献部分严格遵循学术规范,精选12篇涵盖书籍、期刊论文、学位论文等类型的文献,确保文献的准确性、完整性与权威性,支撑全文理论论述的科学性与严谨性。

2 LED 光质对离体生根调控的理论机制

2.1 光受体介导的光信号转导通路

LED 光质调控蓝莓试管苗离体生根的核心是光受体感知光质信号并启动下游信号转导通路,进而调控生根相关基因表达与内源激素代谢,最终影响不定根原基的诱导、分化与伸长。蓝莓试管苗体内光受体(光敏色素、隐花色素、向光素等)对不同波长 LED 光质具有特异性感知能力,不同光质通过激活不同光受体,启动差异化的信号转导通路,形成复杂的光信号调控网络,精准调控生根发育进程。

光敏色素介导的红光/远红光信号转导通路是调控蓝莓试管苗生根的核心通路。光敏色素广泛存在于蓝莓试管苗的茎尖、叶片及基部愈伤组织细胞中,以 Pr (红光吸收型,无活性)与 Pfr (远红光吸收型,有活性)两种形式存在,二者可在红光与远红光照射下发生可逆转化。当 LED 红光(650–670nm)照射时,Pr 迅速吸收红光转化为 Pfr, Pfr 从细胞质转移至细胞核,与核内光敏色素相互作用因子(PIFs)结合,通过泛素-蛋白酶体系统降解 PIFs,解除 PIFs 对下游生根相关基因的抑制作用。PIFs 是一类负调控因子,可抑制生长素合成、运输及根原基分化相关基因的表达,红光通过降解 PIFs,激活 YUC 家族(生长素合成)、PIN 家族(生长素运输)、ARF 家族(生长素响应)等关键基因的表达,促进生长素在试管苗基部合成与积累,诱导根原基启动。当 LED 远红光(705–740nm)照射时,Pfr 吸收远红光转化为 Pr, PIFs 积累,抑制生根相关基因表达,低剂量远红光可适度调控光敏色素平衡,缓解红光诱导的基部徒长,优化根原基分化环境,而高剂量远红光则会抑制生根。

隐花色素介导的蓝光信号转导通路在蓝莓试管苗生根中起辅助调控与平衡优化作用。隐花色素主要分布于蓝莓试管苗叶片与茎尖细胞的细胞核中,特异性感知 LED 蓝光(400–500nm)与 UV-A 信号。蓝光照射时,隐花色素发生磷酸化激活,与核内 COP1/SPA 复合体相互作用,抑制 COP1 的 E3 泛素连接酶活性,使下游 HY5 转录因子积累并激活。HY5 是光形态建成的核心正调控因子,可直接结合并激活生长素合成基因(YUC)、细胞分裂素降解基因(CKX)、抗氧化酶基因(SOD、POD)等,适度提高内源

生长素含量,降低细胞分裂素/生长素比例,避免愈伤组织过度增生,促进不定根正常分化。同时,隐花色素信号通路可与光敏色素信号通路交叉互作,蓝光通过隐花色素抑制 PIFs 活性,增强红光信号的调控效应,平衡试管苗形态建成与生根发育,避免单独红光导致的根系细弱问题。

向光素介导的蓝光信号通路主要通过调控细胞代谢与物质运输间接影响生根。向光素分布于蓝莓试管苗叶片与基部细胞的细胞膜上,感知蓝光信号后发生自磷酸化,激活下游生长素极性运输调控因子,增强 PIN 蛋白的极性定位与运输活性,促进生长素向试管苗基部定向运输与积累,为根原基分化提供充足的生长素信号。同时,向光素信号通路可促进基部细胞叶绿体发育与光合碳代谢,提高可溶性糖含量,为根原基细胞分裂与分化提供能量与物质支撑,加速不定根伸长。

不同光受体介导的信号转导通路并非独立作用,而是形成复杂的交叉调控网络:红光/远红光通过光敏色素通路主导生根诱导,蓝光通过隐花色素与向光素通路平衡生根发育与形态建成、强化物质运输与代谢;复合光配比可同时激活多条信号通路,实现协同增效,如红蓝光配比可同时激活光敏色素与隐花色素通路,显著提高蓝莓试管苗生根率与根系质量。

2.2 光质对生长素合成与极性运输的调控

生长素(IAA)是诱导蓝莓试管苗不定根原基形成的核心内源激素,其合成部位、含量水平、极性运输效率及基部积累浓度直接决定生根效率与根系质量。LED 光质通过调控生长素合成相关基因表达、合成前体供应、极性运输载体活性及运输方向,精准调控蓝莓试管苗体内生长素的动态平衡,进而影响不定根发育进程。

光质对生长素合成的调控具有显著的波长特异性,红光与蓝光是促进生长素合成的核心光质,绿光与远红光调控效应较弱。蓝莓试管苗生长素主要在茎尖分生组织、幼叶及基部愈伤组织中合成,合成途径主要为色氨酸依赖途径,YUC 家族基因编码的黄色素单加氧酶是该途径的关键限速酶。LED 红光照射时,光敏色素通路激活,降解 PIFs,解除对 YUC2、YUC4、YUC6 等基因的抑制,显著提高其表达水平,促进色氨酸向生长素转化,提高内源生长素含量。研究表明,红光处理可使蓝莓试管苗茎尖与基部生长素含量提高 30%–50%,为根原基诱导提供充足激素信号。LED 蓝光照射时,隐花色素通路激活, HY5 转录因子积累,直接结合并激活 YUC1、YUC3 等基因,适度促进生长素合成,同时抑制生长素降解酶(如 DAO)活性,减少生长素分解,

维持体内生长素稳定水平。与红光相比,蓝光对生长素合成的促进效应较弱,但可平衡生长素与细胞分裂素比例,避免因生长素过高导致的愈伤组织过度增生。绿光对生长素合成无显著促进作用,低剂量绿光可辅助维持细胞代谢,高剂量绿光则会抑制 YUC 基因表达,降低生长素含量,抑制生根。远红光对生长素合成的调控具有浓度依赖性,低剂量远红光可通过调控光敏色素平衡,适度促进生长素合成,高剂量远红光则抑制 YUC 基因表达,降低生长素含量。

光质对生长素极性运输的调控是决定蓝莓试管苗基部生长素积累浓度的关键,极性运输主要由 PIN 蛋白家族介导,其极性定位、表达水平及运输活性直接影响生长素运输效率与方向。LED 红光通过光敏色素 - PIFs 通路,显著上调 PIN1、PIN2、PIN3 等基因在试管苗基部细胞的表达水平,促进 PIN 蛋白在细胞膜上的极性定位(基部侧),增强生长素从茎尖向基部的极性运输效率,使基部生长素浓度达到根原基诱导的阈值水平,启动不定根原基分化。LED 蓝光通过向光素通路,激活下游 PIN 蛋白磷酸化激酶,提高 PIN 蛋白运输活性,同时调控 PIN 蛋白在基部细胞的均匀分布,避免生长素局部浓度过高导致的畸形根,促进不定根均匀分化。复合光配比(如红蓝光 4:1)可同时上调 PIN 基因表达并增强 PIN 蛋白活性,协同提升生长素极性运输效率,使基部生长素浓度稳定维持在适宜生根的范围内,显著提高生根率与根系整齐度。

光质对生长素动态平衡的调控是蓝莓试管苗生根的核心保障,红光主导生长素合成与基部积累,蓝光平衡生长素代谢与分布,复合光配比实现合成 - 运输 - 积累 - 代谢的精准调控。若光质配比失衡,如单独红光导致生长素过高、愈伤组织增生、根系细弱;单独蓝光导致生长素不足、根原基诱导受阻、生根率低;红蓝光比例过高或过低均会打破生长素平衡,抑制生根发育。因此,优化 LED 光质配比,维持蓝莓试管苗体内生长素的适宜浓度与分布,是促进不定根高效发育的关键。

2.3 光质对不定根原基诱导与伸长的理论模型

LED 光质调控蓝莓试管苗不定根发育是“信号启动 - 细胞分化 - 原基形成 - 不定根伸长”的连续动态过程,基于光受体信号转导、内源激素调控及碳代谢供应的协同作用,可构建光质 - 激素 - 细胞分化 - 不定根发育的理论模型,系统阐释不同光质及配比的调控效应与作用机制。

第一阶段:根原基诱导启动期(光信号感知与激素积累,0-7天)。此阶段核心是光质信号被试管苗基部细胞光受体感知,启动信号转导通路,促进生长素合成与极性运

输,使基部生长素浓度达到诱导阈值(10^{-8} - 10^{-6} mol/L),激活根原基诱导相关基因表达。LED 红光(650-670nm)为最优诱导光质,通过光敏色素通路快速提高基部生长素含量,激活 ARF7、ARF19 等生长素响应因子,促进基部中柱鞘细胞与愈伤组织薄壁细胞脱分化,恢复分裂能力,形成根原基启动细胞团。LED 蓝光(400-500nm)为辅助诱导光质,通过隐花色素通路适度提高生长素含量,同时抑制细胞分裂素合成,降低细胞分裂素/生长素比例,避免愈伤组织过度增生,为根原基分化创造良好的细胞环境。复合光配比(红蓝光 4:1)可协同增效,红光主导激素积累与细胞脱分化,蓝光平衡激素比例与细胞状态,显著提高根原基诱导率。绿光与远红光在此阶段作用较弱,低剂量绿光可维持细胞代谢活性,远红光需严格控制剂量,避免抑制根原基启动。

第二阶段:根原基分化形成期(细胞分裂与组织分化,7-21天)。此阶段核心是根原基启动细胞团在适宜光质与激素环境下,持续分裂与分化,形成具有根冠、分生区、伸长区的完整根原基,并突破表皮细胞。LED 红光继续促进生长素合成与运输,维持根原基细胞团的高分裂活性,同时上调细胞周期蛋白(Cyclin)、CDK 激酶等基因表达,促进细胞有丝分裂,增加根原基细胞数量。LED 蓝光在此阶段作用凸显,通过隐花色素通路激活细胞分化相关基因(如 WOX5、SCR),促进根原基细胞定向分化,形成根冠(保护分生区)、分生区(持续分裂)、伸长区(细胞伸长)等功能区域,避免根原基细胞无序分裂导致的畸形根。同时,蓝光促进基部细胞叶绿体发育与光合碳代谢,提高可溶性糖含量,为根原基分化提供充足能量与物质支撑,加速根原基成熟。复合光配比(红蓝光 3:1)可平衡细胞分裂与分化,红光促进细胞增殖,蓝光促进组织分化,形成形态正常、结构完整的根原基。若蓝光比例过高,会抑制细胞分裂,导致根原基细小、发育迟缓;红光比例过高,会导致细胞无序分裂、愈伤组织包裹根原基、难以突破表皮。

第三阶段:不定根伸长发育期(细胞伸长与功能完善,21-60天)。此阶段核心是成熟根原基突破表皮,形成不定根并持续伸长,根毛发育与维管组织连接,建立水分与养分吸收功能。LED 红光促进不定根伸长生长,通过提高生长素含量,激活细胞壁松弛蛋白(Expansin)、木葡聚糖内转糖苷酶(XET)等基因表达,松弛细胞壁,促进不定根细胞伸长,增加根长。LED 蓝光促进不定根增粗与根毛发育,通过提高细胞分裂素活性,促进不定根皮层细胞分裂与分化,增加根粗;同时激活根毛发育相关基因(如 RSL4),

促进根毛分化与生长,扩大根系吸收面积。复合光配比(红蓝光 2:1)可协同促进根长与根粗发育,红光主导伸长、蓝光主导增粗与根毛发育,形成长而壮、根毛密集的优质根系。此外,低剂量绿光(10%)可穿透根系周围培养基,促进不定根深层细胞代谢,辅助根系伸长;低剂量远红光可调控根系向地性生长,优化根系空间分布。

该理论模型表明,LED光质对蓝莓试管苗不定根发育的调控具有阶段性 with 配比依赖性:根原基诱导期以红光为主、蓝光为辅;分化期需红蓝光平衡配比;伸长期适度提高蓝光比例、辅助添加绿光/远红光。合理的动态光质配比可精准匹配不定根不同发育阶段的生理需求,最大化提升生根率与根系质量,为移栽成活奠定良好基础。

3 LED光质对试管苗生理状态的影响理论

3.1 光质调控光合能力与碳代谢的理论基础

蓝莓离体试管苗长期处于无菌、异养、弱光的封闭培养环境,光合系统发育不完善、光合能力极弱,主要依赖培养基中的蔗糖提供碳源,导致碳代谢失衡、苗体脆弱、移栽后难以快速重建自养能力,是移栽成活率低的核心生理原因之一。LED光质通过调控试管苗叶绿体发育、光合色素合成、光系统活性及光合碳代谢关键酶活性,定向改善光合系统结构与功能,促进碳代谢从异养向自养转变,积累可溶性糖等渗透调节物质,增强试管苗生理韧性与移栽适应性。

光质对叶绿体发育与光合色素合成的调控是提升试管苗光合能力的结构基础。蓝莓试管苗叶片叶绿体结构简单、类囊体膜不发达、基粒堆叠疏松,光合色素(叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素)含量低,光能捕获与转化效率差。LED蓝光(400–500nm)是促进叶绿体发育的核心光质,通过隐花色素信号通路,激活叶绿体发育相关基因(如GLK1、GLK2),促进叶绿体分裂与增殖,增加叶片叶绿体数量;同时调控类囊体膜合成与基粒堆叠,使类囊体膜排列紧密、基粒层数增加,优化叶绿体超微结构,提升光能捕获效率。LED红光(650–670nm)主要促进光合色素合成,通过光敏色素通路,上调叶绿素合成关键酶基因(如HEMA1、POR)表达,促进叶绿素a、叶绿素b合成,提高叶绿素含量;同时促进类胡萝卜素合成,类胡萝卜素可吸收过剩光能、清除活性氧,保护光合系统免受光损伤。复合光配比(红蓝光 3:1)可协同优化叶绿体结构与色素组成,蓝光促进叶绿体发育、红光促进色素积累,使试管苗叶片叶绿素含量提高20%–40%,叶绿体数量增加30%–50%,显著提

升光能捕获能力。绿光对叶绿体发育与色素合成无显著促进作用,低剂量绿光可辅助光能吸收,高剂量绿光则抑制叶绿素合成。

光质对光系统活性与光能转化效率的调控是提升光合能力的功能核心。蓝莓试管苗光系统II(PSII)活性低、光化学效率差,光能转化为化学能的效率低,大部分光能以热或荧光形式散失。LED蓝光通过隐花色素通路,促进PSII核心蛋白(如D1蛋白)合成与组装,修复受损PSII,提高PSII潜在光化学效率(F_v/F_m)与实际光化学效率(Φ_{PSII}),增强光能转化效率。LED红光通过光敏色素通路,促进光系统I(PSI)活性,优化PSI与PSII的能量分配,促进环式电子传递,增加ATP合成,为光合碳代谢提供能量。复合光配比(红蓝光 4:1)可平衡PSI与PSII活性,红光强化PSI功能、蓝光强化PSII功能,使试管苗 F_v/F_m 值提高15%–30%,光能转化效率显著提升。若蓝光比例过高,会导致PSII活性过强、光能过剩,引发活性氧积累,损伤光合系统;红光比例过高,会导致PSI与PSII失衡,电子传递受阻,光合效率下降。

光质对光合碳代谢与碳积累的调控是改善试管苗生理状态的物质保障。蓝莓试管苗移栽后需快速合成可溶性糖,满足生长与抗逆需求,而LED光质可调控光合碳代谢关键酶活性、蔗糖合成与积累,促进碳代谢从异养向自养转变。LED红光通过光敏色素通路,上调核酮糖-1,5-二磷酸羧化酶/加氧酶(Rubisco)、磷酸果糖激酶(PFK)等光合碳代谢关键酶基因表达,提高酶活性,加速卡尔文循环运转,促进二氧化碳固定与蔗糖合成。LED蓝光通过隐花色素通路,促进蔗糖磷酸合成酶(SPS)、蔗糖合成酶(SS)活性,优化蔗糖合成与运输,增加叶片与茎部可溶性糖积累。复合光配比(红蓝光 3:1)可协同提升碳代谢效率,红光主导碳固定、蓝光主导蔗糖合成,使试管苗可溶性糖含量提高30%–60%,不仅为移栽后生长提供能量,还可作为渗透调节物质,提高细胞渗透压,增强抗旱、抗盐胁迫能力。此外,可溶性糖可促进细胞壁木质化,增强试管苗机械强度,减少移栽机械损伤。

综上,LED光质通过结构优化(叶绿体发育)–功能提升(光能转化)–物质积累(碳代谢)的层级调控,显著改善蓝莓试管苗光合能力与碳代谢水平,促进异养向自养转变,增强苗体生理韧性,为移栽后快速适应自然环境、提高成活率奠定核心生理基础。

3.2 光质对气孔发育与水分调控能力的理论影响

气孔是植物水分蒸腾、气体交换(CO_2 吸收、 O_2 释

放)的核心通道,其密度、大小、开闭功能及分布直接决定植物水分平衡与光合效率。蓝莓离体试管苗长期处于高湿(相对湿度90%–100%)封闭环境,气孔发育异常:气孔密度低、孔径小、开闭失调(多处于开放状态)、保卫细胞结构简单,导致移栽后蒸腾失水过快、水分平衡失调,是试管苗萎蔫死亡的主要原因之一。LED光质通过调控气孔发育相关基因表达、保卫细胞分化、气孔开闭调控因子活性,定向改善试管苗气孔结构与功能,增强水分调控能力,减少移栽失水,提高成活率。

光质对气孔发育与形态结构的调控是改善水分调控能力的结构基础。蓝莓试管苗叶片气孔密度仅为自然光下正常植株的50%–60%,保卫细胞体积小、细胞壁薄、无角质层保护,气孔易破损、开闭不灵活。LED蓝光(400–500nm)是促进气孔发育的核心光质,通过向光素与隐花色素信号通路,激活气孔发育相关基因(如SPCH、MUTE、FAMA),促进表皮细胞分化为保卫细胞,增加气孔密度;同时调控保卫细胞细胞壁增厚与角质层形成,增强保卫细胞机械强度,提高气孔稳定性。研究表明,蓝光处理可使蓝莓试管苗叶片气孔密度提高25%–40%,保卫细胞体积增大、细胞壁增厚,气孔形态更接近自然光下正常植株。LED红光(650–670nm)对气孔发育无直接促进作用,但可通过提高光合效率、增加叶片可溶性糖含量,间接为气孔发育提供能量与物质支撑,辅助气孔形态完善。复合光配比(红蓝光3:1)可协同优化气孔密度与形态,蓝光主导气孔分化、红光辅助物质供应,使试管苗气孔密度与形态达到自然光下正常植株的70%–80%,显著改善气孔结构。绿光与远红光对气孔发育无显著促进作用,高剂量绿光会抑制保卫细胞分化,降低气孔密度。

光质对气孔开闭功能与水分平衡的调控是增强水分调控能力的功能核心。蓝莓试管苗气孔开闭失调,高湿环境下气孔持续开放,移栽后环境湿度骤降,气孔无法快速关闭,导致蒸腾失水速率远大于根系吸水速率,苗体快速萎蔫。LED蓝光通过向光素信号通路,激活保卫细胞膜上的 H^+ -ATP酶,促进 H^+ 外流、 K^+ 内流,调控保卫细胞渗透压变化,实现气孔快速开闭:光照充足时气孔开放,保证 CO_2 吸收;强光、干旱时气孔快速关闭,减少水分蒸腾。同时,蓝光促进脱落酸(ABA)合成与积累,ABA是诱导气孔关闭的核心激素,可增强气孔对干旱信号的敏感性,移栽后快速响应环境湿度变化,关闭气孔、减少失水。LED红光通过光敏色素通路,适度抑制气孔过度开放,降低基础蒸腾速率,减少水分消耗;同时促进根系发育,提高移栽

后根系吸水能力,维持水分平衡。复合光配比(红蓝光4:1)可平衡气孔开闭与蒸腾效率,蓝光强化开闭调控、红光降低基础蒸腾,使试管苗移栽后蒸腾失水速率降低30%–50%,显著减少萎蔫死亡。若蓝光比例过高,会导致气孔开闭过于敏感、光合效率下降;红光比例过高,会导致气孔开闭迟钝、失水过快。

光质对叶片角质层与蒸腾失水的调控是减少移栽失水的辅助保障。蓝莓试管苗叶片角质层薄、蜡质含量低,水分易通过表皮散失,加剧移栽失水。LED蓝光通过隐花色素通路,激活角质层合成相关基因(如CER1、CER3),促进叶片表皮细胞角质层与蜡质合成,增加角质层厚度与蜡质含量,形成防水屏障,减少非气孔蒸腾失水。LED红光可辅助促进蜡质合成,增强角质层防水效果。复合光配比处理可使试管苗叶片角质层厚度提高20%–30%,蜡质含量增加40%–60%,非气孔蒸腾失水显著减少。

综上,LED光质通过气孔结构优化(密度、形态)–开闭功能强化(敏感性、调控效率)–表皮防水增强(角质层、蜡质)的多维度调控,显著改善蓝莓试管苗气孔发育与水分调控能力,减少移栽后蒸腾失水,维持水分平衡,降低萎蔫死亡率,为移栽成活提供关键生理保障。

3.3 光质与抗氧化系统及移栽胁迫耐受性的理论关联

蓝莓试管苗移栽过程中,需经历无菌–有菌、高湿–低湿、弱光–强光、恒温–变温、异养–自养等多重环境胁迫,导致细胞内活性氧(ROS,如 O_2^- 、 H_2O_2 、 $\cdot OH$)大量积累,引发膜脂过氧化、蛋白质变性、核酸损伤、细胞死亡,是移栽成活率低的重要生理原因。LED光质通过调控试管苗抗氧化酶活性、抗氧化物质含量、活性氧清除能力,激活抗氧化系统,增强对强光、干旱、病原菌感染等胁迫的耐受性,减轻胁迫损伤,提高移栽成活率。

光质对抗氧化酶系统的调控是清除活性氧、减轻胁迫损伤的核心机制。蓝莓试管苗体内超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)等抗氧化酶活性低,活性氧清除能力弱,胁迫下易发生氧化损伤。LED红光(650–670nm)通过光敏色素通路,激活抗氧化酶基因(如SOD、POD、CAT)表达,显著提高SOD、POD、CAT活性:SOD可将 O_2^- 歧化为 H_2O_2 与 O_2 ;POD与CAT可将 H_2O_2 分解为 H_2O 与 O_2 ,形成活性氧清除酶系统,有效清除胁迫下积累的活性氧,减轻膜脂过氧化损伤。研究表明,红光处理可使蓝莓试管苗SOD、POD、CAT活性提高40%–70%,活性氧清除能力显著增强。LED蓝光(400–500nm)通过隐花

色素通路,适度提高抗氧化酶活性,同时增强 APX 活性, APX 可利用抗坏血酸清除 H_2O_2 ,与红光形成协同抗氧化效应。复合光配比(红蓝光 3:1)可最大化激活抗氧化酶系统,红光主导酶活性提升、蓝光辅助强化,使试管苗抗氧化酶活性达到自然光下正常植株的 80%–90%,显著增强活性氧清除能力。绿光对于抗氧化酶活性无显著促进作用,低剂量绿光可辅助维持酶活性,高剂量绿光则抑制抗氧化酶表达。

光质对非酶抗氧化物质的调控是增强抗氧化能力的重要补充。蓝莓试管苗体内抗坏血酸(AsA)、谷胱甘肽(GSH)、脯氨酸、可溶性蛋白、花青素等非酶抗氧化物质含量低,难以有效清除活性氧、维持细胞渗透压。LED 蓝光通过隐花色素通路,激活花青素合成相关基因(如 LDOX、OMT、UFGT),促进花青素合成与积累,花青素是强抗氧化剂,可直接清除活性氧、保护细胞膜与蛋白质免受氧化损伤。同时,蓝光促进 AsA 与 GSH 合成,AsA 与 GSH 可协同清除 H_2O_2 与 $\cdot OH$,增强抗氧化系统稳定性。LED 红光通过光敏色素通路,促进脯氨酸与可溶性蛋白积累,脯氨酸是重要的渗透调节物质,可维持细胞渗透压、保护蛋白质结构;可溶性蛋白可增强细胞保水能力、提高抗逆性。复合光配比(红蓝光 4:1)可协同提升非酶抗氧化物质含量,蓝光主导花青素、AsA、GSH 合成,红光主导脯氨酸、可溶性蛋白积累,使试管苗非酶抗氧化物质含量提高 50%–80%,进一步增强抗氧化与抗逆能力。

光质对细胞膜稳定性与胁迫耐受性的调控是减少移栽损伤的直接保障。活性氧积累引发的膜脂过氧化会破坏细胞膜结构与完整性,导致细胞膜透性增大、细胞内容物外渗、细胞死亡。LED 光质通过激活抗氧化系统,减少活性氧积累,降低膜脂过氧化程度,减少丙二醛(MDA,膜脂过氧化产物)生成,维持细胞膜稳定性与完整性。研究表明,复合光配比处理可使蓝莓试管苗 MDA 含量降低 30%–50%,细胞膜透性减小 40%–60%,显著减轻胁迫对细胞膜的损伤。同时,光质调控促进细胞壁木质化与机械组织发育,增强试管苗抗机械损伤能力,减少移栽操作中的物理损伤;提高酚类物质与植保素含量,增强对病原菌感染的抵抗力,降低移栽后病害发生率。

综上,LED 光质通过抗氧化酶激活–非酶抗氧化物质积累–细胞膜稳定性维持–机械与抗病能力增强的多层次调控,全面激活蓝莓试管苗抗氧化系统,显著提升对移栽多重胁迫的耐受性,减轻氧化损伤与物理、病害损伤,降低死亡率,为移栽成活提供关键生理保障。

4 光质配比优化与移栽成活的理论整合

4.1 单色光与复合光配比的协同效应理论

LED 单色光(红光、蓝光、绿光、远红光)对蓝莓试管苗生根及生理状态具有特异性调控效应,但单一光质存在明显局限性,难以满足试管苗生根、发育及移栽适应的全维度生理需求;复合光配比通过多光质信号整合、调控通路交叉互作、生理效应互补增效,克服单色光缺陷,形成 1+1>2 的协同调控效应,最大化提升试管苗生根效率与移栽成活率。

单色光的特异性效应与局限性是复合光协同调控的基础。

红光(650–670nm):核心优势为促进生长素合成与极性运输、诱导根原基分化、提升光合碳代谢效率、积累可溶性糖、激活抗氧化酶,显著提高生根率与根系长度,增强碳代谢与抗逆性;局限性为易导致试管苗徒长、茎秆细弱、根系纤弱、气孔发育不良、蒸腾失水快、蓝光依赖型抗逆机制不足,单独红光处理移栽成活率仅 50%–60%。

蓝光(400–500nm):核心优势为促进叶绿体发育、叶绿素合成、气孔分化与开闭调控、花青素与抗氧化物质积累、茎秆增粗、根系增粗与根毛发育,显著改善试管苗形态、增强光合与水分调控能力、提升抗逆性;局限性为抑制生长素合成、根原基诱导效率低、生根率低、根系长度短、碳代谢效率不足,单独蓝光处理生根率仅 20%–40%。

绿光(500–550nm):效应温和,辅助穿透冠层、促进基部细胞代谢、缓解强光胁迫、补充光能吸收,低剂量(5%–15%)可优化复合光调控效果;局限性为光合效率低、对生根与抗逆无直接促进作用、高剂量抑制叶绿素合成与生根,单独绿光处理生根率与成活率极低。

远红光(705–740nm):效应具有浓度依赖性,低剂量(5%–10%)调控光敏色素平衡、缓解徒长、优化根系向地性、辅助增殖;局限性为高剂量抑制生长素合成、根原基分化与光合效率,单独远红光处理严重抑制生根与发育。

复合光配比的协同效应机制是优化调控效果的核心,主要体现在信号通路协同、激素平衡协同、生理功能协同、抗逆调控协同四个维度。

信号通路协同:复合光可同时激活光敏色素(红光)、隐花色素/向光素(蓝光)等多条光受体信号通路,形成信号交叉互作网络:红光通路降解 PIFs、激活生根基因;蓝光通路激活 HY5、平衡激素比例;通路间相互增强,放大生根与发育信号,显著提高根原基诱导率与生根效率。例如,红蓝光配比(4:1)可同时激活光敏色素与隐花色素通

路,生根率较单独红光提高15%–20%,较单独蓝光提高40%–50%。

激素平衡协同:红光主导生长素合成与积累,蓝光主导细胞分裂素代谢与生长素降解平衡,复合光配比可精准调控生长素/细胞分裂素比例,维持在适宜生根的最优范围(3:1–5:1):既保证根原基诱导所需的生长素浓度,又避免愈伤组织过度增生,促进不定根正常发育。同时,复合光可协同调控脱落酸、赤霉素平衡,增强气孔调控与抗逆性。

生理功能协同:红光强化光合碳代谢、可溶性糖积累、根系伸长,蓝光强化叶绿体发育、气孔功能、根系增粗与根毛发育、形态建成,复合光配比可平衡形态发育与生理代谢:既促进根系高效发育(长而壮、根毛密集),又改善试管苗形态(矮壮、茎秆坚韧、叶片浓绿);既提升光合能力与碳积累,又增强水分调控与抗逆性,实现生根效率与苗体质量同步提升。例如,红蓝光配比(3:1)处理的蓝莓试管苗,生根率达85%–95%,根系长度与粗度显著优于单色光,移栽成活率达85%–90%。

抗逆调控协同:红光激活抗氧化酶系统、脯氨酸积累,蓝光促进花青素、抗坏血酸、谷胱甘肽合成,复合光配比可全面激活酶与非酶抗氧化系统,协同清除活性氧、维持细胞膜稳定性、增强胁迫耐受性,显著降低移栽氧化损伤与死亡率。

复合光配比的优化规律:蓝莓试管苗光质配比需遵循“红光为主、蓝光为辅、适量补充绿光/远红光”的核心原则。生根诱导期(0–21天):红蓝光配比(4:1–5:1),高比例红光主导根原基诱导,低比例蓝光平衡激素、抑制徒长;不定根伸长期(21–60天):红蓝光配比(3:1–2:1),适度提高蓝光比例,促进根系增粗、根毛发育与苗体健壮;移栽驯化前(7–10天):红蓝光配比(3:1)+5%–10%绿光,补充绿光缓解强光胁迫、增强抗逆性。避免蓝光比例过高(>50%)抑制生根,或红光比例过高(>80%)导致徒长;绿光与远红光严格控制剂量($\leq 15\%$),避免产生抑制效应。

4.2 不同发育阶段对光质需求的理论转变

蓝莓试管苗从离体生根诱导–不定根发育–移栽驯化的整个过程,经历细胞分化、器官建成、生理重塑等一系列发育转变,不同阶段的生理代谢特征、激素平衡状态、环境适应性需求存在显著差异,对LED光质的类型、比例、强度需求呈现阶段性动态转变规律,需遵循“发育阶段适配、生理需求导向”原则,实施动态光质调控,最大化提升生根效率与移栽成活率。

第一阶段:离体生根诱导期(0–21天,愈伤组织形成–根原基分化)。此阶段核心生理特征:细胞脱分化、分裂旺盛、需高浓度生长素诱导根原基、光合能力弱、依赖培养基异养;核心需求:促进生长素合成与基部积累、诱导根原基分化、抑制愈伤组织过度增生、维持细胞代谢活性。光质需求特征:高比例红光(70%–80%)+低比例蓝光(20%–30%),禁用高剂量绿光/远红光。红光主导:激活光敏色素通路,促进生长素合成与极性运输,提高基部生长素浓度,诱导根原基启动;蓝光辅助:激活隐花色素通路,平衡细胞分裂素/生长素比例,抑制愈伤组织过度增生,维持细胞正常分裂分化;光强控制在 $40\text{--}50\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,避免强光抑制根原基分化。若蓝光比例过高(>40%),生长素合成不足,根原基诱导率低;红光比例过高(>90%),愈伤组织过度增生,根原基难以突破表皮。

第二阶段:不定根伸长期(21–60天,根原基成熟–不定根伸长–根系完善)。此阶段核心生理特征:根原基分化成熟、不定根快速伸长、根毛发育、维管组织连接、光合能力逐步提升、异养向自养过渡;核心需求:促进不定根伸长与增粗、根毛发育、光合系统完善、碳积累、苗体健壮。光质需求特征:中高比例红光(60%–70%)+中比例蓝光(30%–40%),可添加5%–10%绿光。红光主导:促进不定根伸长、光合碳代谢与可溶性糖积累,为根系发育提供能量;蓝光强化:促进叶绿体发育、叶绿素合成、气孔功能完善、不定根增粗与根毛发育、茎秆健壮;绿光辅助:穿透培养基,促进根系深层细胞代谢,辅助根系伸长;光强提升至 $60\text{--}80\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,适配光合能力提升需求。此阶段蓝光比例需适度提高,若仍维持高红光比例,易导致根系纤弱、苗体徒长;蓝光比例过高,根系伸长受抑制、苗体矮化。

第三阶段:移栽驯化过渡期(移栽前7–10天,生理适应性重塑)。此阶段核心生理特征:光合能力快速提升、气孔功能完善、抗氧化系统激活、细胞壁木质化、抗逆性增强、准备适应外界环境;核心需求:强化光合自养能力、水分调控能力、抗氧化与抗逆能力、减少移栽胁迫损伤。光质需求特征:红蓝光(3:1)+5%–10%绿光+低剂量远红光($\leq 5\%$),光强提升至 $80\text{--}100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,模拟自然光谱特征。红蓝光平衡:最大化光合效率与碳积累,完善气孔功能;绿光补充:缓解强光胁迫、增强光能利用;远红光辅助:调控光敏色素平衡、优化株型、增强抗逆性;同时激活抗氧化系统,提高胁迫耐受性。此阶段需避免单一光质,全面激活生理功能,为移栽做好准备。

第四阶段: 移栽后缓苗期(移栽后1-4周, 环境适应-自养建立)。此阶段核心生理特征: 环境胁迫响应、蒸腾失水调控、根系吸水建立、光合自养重建、抗氧化防御激活、苗体恢复生长; 核心需求: 减少蒸腾失水、维持水分平衡、激活根系吸水、快速重建光合自养、减轻氧化损伤、促进成活。光质需求特征: 红蓝光(3:1)+10%-15%绿光, 光强逐步提升至 $120-150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 避免强光直射。蓝光主导气孔调控: 快速响应环境湿度变化, 关闭气孔、减少失水; 红光主导碳积累: 为根系恢复与新根生长提供能量; 绿光缓解强光胁迫: 保护光合系统、减轻氧化损伤; 待苗体成活、新根长出后, 逐步提高光强、增加蓝光比例, 促进正常生长。

综上, 蓝莓试管苗不同发育阶段的光质需求呈现“红光比例由高到低、蓝光比例由低到高、逐步补充绿光/远红光、光强逐步提升”的动态转变规律, 核心是光质配比与发育阶段生理需求精准适配, 实现生根效率、苗体质量与移栽成活率的协同提升。

4.3 从离体生根到异养-自养转换的光调控理论

蓝莓试管苗从离体无菌异养环境到移栽后有菌自养环境的转变, 是营养方式、能量来源、水分代谢、抗逆机制的根本性重塑过程, 核心是异养(依赖培养基蔗糖)向自养(依赖光合作用)的代谢转换, 而LED光质调控是驱动代谢转换、平衡转换过程、保障转换成功的核心技术手段, 形成光质-光合-碳代谢-营养转换-移栽成活的系统调控理论。

离体异养阶段(生根培养期): 光质调控“异养优化、自养预备”。此阶段试管苗完全依赖培养基中的蔗糖提供碳源, 光合系统发育不完善、光合能力极弱, 光质调控核心并非直接促进光合作用, 而是优化异养代谢效率、启动光合系统发育、为后续自养转换奠定结构与生理基础。红光调控: 促进蔗糖分解与利用, 提高异养代谢效率, 为生根与发育提供能量; 激活光合碳代谢关键酶基因, 提前启动光合系统基因表达, 为后续光合能力提升做准备。蓝光调控: 促进叶绿体发育与叶绿素合成, 完善光合系统结构, 逐步提升光能捕获与转化效率, 使试管苗从“无光合能力”向“低光合能力”转变, 减少对蔗糖的依赖程度。复合光配比(红蓝光4:1-3:1): 平衡异养代谢与光合预备, 既保证生根发育所需的异养能量供应, 又逐步激活光合系统, 使试管苗在生根后期(50-60天)具备初步光合能力(光合速率/呼吸速率 $\approx 0.5-0.8$), 为移栽后自养转换创造条件。若此阶段采用弱光或单色红光, 光合系统发育停滞, 移栽

后难以快速启动自养; 采用高比例蓝光, 异养代谢受抑制, 生根发育受阻。

异养-自养转换过渡期(移栽驯化期): 光质调控“转换驱动、平衡过渡、抗逆保障”。此阶段试管苗脱离培养基, 失去外源蔗糖供应, 需快速激活光合系统、建立自养能力, 同时应对多重环境胁迫, 光质调控核心是驱动光合能力快速提升、平衡异养残留与自养建立、激活抗逆系统保障转换成功。转换驱动机制: 复合光(红蓝光3:1+绿光)通过强化叶绿体功能、提高光合色素含量、激活光合碳代谢关键酶, 快速提升光合效率, 使试管苗光合速率/呼吸速率从0.5-0.8提升至1.2-1.5, 实现光合碳自给, 完全替代外源蔗糖供应, 完成异养向自养的根本性转换。平衡过渡机制: 转换初期(移栽后1-2周), 试管苗光合能力尚未完全建立, 光质调控适度提高红光比例, 促进淀粉与可溶性糖积累, 利用前期储备碳源维持生长, 避免因碳源断供导致死亡; 转换后期(移栽后3-4周), 逐步提高蓝光比例, 进一步提升光合效率, 实现自养稳定。抗逆保障机制: 转换过程中胁迫损伤风险高, 复合光通过激活抗氧化酶与非酶抗氧化系统、维持细胞膜稳定性、增强水分调控能力, 减轻胁迫损伤, 保障转换过程顺利进行, 降低死亡率。

自养稳定阶段(移栽成活后): 光质调控“自养强化、生长促进、品质提升”。此阶段试管苗已完全适应外界环境, 自养能力稳定建立, 光质调控核心是进一步强化光合效率、促进营养生长、提升种苗质量。红蓝光配比(3:1-2:1): 最大化光合碳代谢效率, 促进茎秆伸长、叶片扩展、生物量积累; 适度蓝光: 促进细胞壁木质化、机械组织发育、花青素积累, 增强种苗抗逆性与品质; 适量绿光: 优化光能分布、促进冠层内部叶片光合, 提高整体生长效率。

光调控理论的核心要点:

阶段性适配: 光质配比需严格匹配异养预备-转换过渡-自养稳定的代谢转换阶段, 动态调整红、蓝、绿光比例, 实现调控效应最大化。

光合优先原则: 自养转换的核心是光合能力快速建立, 光质调控需始终围绕光合系统结构完善与功能提升展开, 优先保障蓝光供应(叶绿体发育)与红光供应(碳代谢)。

抗逆协同保障: 转换过程胁迫风险高, 光质调控需同步激活抗氧化与抗逆系统, 避免“重光合、轻抗逆”导致的转换失败。

复合光最优性: 单色光无法满足代谢转换的多维度需求, 红蓝光为主、适量绿光补充的复合光配比是驱动异养-自养转换的最优光质方案。

综上, LED 光质调控通过阶段性动态配比、光合系统定向激活、抗逆系统协同强化, 精准驱动蓝莓试管苗从离体异养到移栽自养的平稳转换, 平衡转换过程中的能量供应、生理代谢与胁迫适应, 显著提高移栽成活率, 为蓝莓组培育苗的工厂化、高效化提供核心理论支撑。

5 结论与理论展望

5.1 主要理论认识总结

本文系统阐释了 LED 光质配比对离体蓝莓试管苗生根及移栽成活率的调控机制与理论体系, 核心理论认识可总结为“一个核心机制、三个调控维度、四个阶段适配、一个系统整合”, 全面揭示了光质调控的内在规律与作用逻辑。

一个核心机制: 光受体介导的“光质-激素-生理-发育”级联调控机制。LED 不同光质(红光、蓝光、绿光、远红光)被蓝莓试管苗体内光敏色素、隐花色素、向光素等光受体特异性感知后, 启动差异化信号转导通路, 精准调控内源激素(生长素、细胞分裂素、脱落酸等)的合成、运输与代谢, 进而影响光合碳代谢、气孔发育、抗氧化系统活性等生理过程, 最终定向调控不定根诱导、发育及试管苗形态建成、抗逆能力, 形成从光信号感知到生长发育调控的完整级联反应链, 是光质调控的核心理论基础。

三个调控维度: 生根发育调控、生理状态调控、移栽适应调控。

生根发育调控: 红光主导生长素合成与基部积累, 诱导根原基分化; 蓝光平衡激素比例、促进根系增粗与根毛发育; 复合光配比协同提升生根率与根系质量, 解决试管苗生根率低、根系纤弱的瓶颈问题。

生理状态调控: 蓝光促进叶绿体发育、气孔分化与开闭调控, 增强水分调控能力; 红光提升光合碳代谢效率、积累可溶性糖; 复合光优化试管苗形态(矮壮、坚韧), 改善碳代谢与水分平衡, 解决苗体脆弱、蒸腾失水快的生理缺陷。

移栽适应调控: 红光激活抗氧化酶系统、积累脯氨酸; 蓝光促进花青素、抗坏血酸合成; 复合光全面激活抗氧化系统, 增强对强光、干旱、病原菌侵染等胁迫的耐受性, 减轻移栽氧化损伤与死亡率, 解决胁迫耐受性弱、成活率低的关键问题。

四个阶段适配: 光质配比与试管苗发育阶段精准动态适配。蓝莓试管苗从生根诱导期-不定根伸长期-移栽驯化过渡期-移栽缓苗期, 光质配比遵循“红光比例由高到

低、蓝光比例由低到高、逐步补充绿光/远红光、光强逐步提升”的动态规律: 生根诱导期以高红光(70%-80%)为主, 诱导根原基分化; 不定根伸长期提高蓝光比例(30%-40%), 促进根系完善与苗体健壮; 移栽驯化期补充绿光/远红光, 强化光合与抗逆; 移栽缓苗期平衡红蓝光, 减少失水、促进成活, 实现光质调控与生理需求的精准匹配。

一个系统整合: 从离体生根到异养-自养转换的全流程光调控整合。LED 光质调控贯穿蓝莓试管苗离体生根、发育、驯化、移栽成活的全流程, 核心是驱动异养(依赖培养基)向自养(依赖光合作用)的平稳转换: 离体阶段优化异养代谢、预备光合系统; 驯化过渡期驱动光合能力快速提升、平衡碳供应、激活抗逆系统; 移栽后强化自养能力、促进生长, 形成全链条、系统性的光调控理论体系, 为蓝莓组培育苗效率与质量提升提供完整理论支撑。

尽管本文已构建 LED 光质调控蓝莓试管苗生根与移栽成活的理论框架, 但现有研究仍存在机制解析不深入、调控体系不完善、应用转化不充分等局限, 亟待在以下方面开展系统性突破:

分子机制解析的深度与广度不足现有研究多聚焦光受体-激素-生理代谢的宏观关联, 对光信号通路交叉互作、关键转录因子调控网络、表观遗传修饰等微观机制揭示不足。例如, 光敏色素与隐花色素通路在蓝莓生根中的协同/拮抗节点、HY5、PIFs 等核心因子对生根与抗逆下游基因的精准调控模式、光质介导的 DNA 甲基化/组蛋白修饰对生根的影响等尚未阐明; 同时, 缺乏多组学(转录组、蛋白组、代谢组)联合解析, 难以全面揭示光质调控的分子网络。

光质调控体系的完整性与精准度欠缺一是光环境因子耦合研究缺失, 现有理论仅单独考虑光质配比, 未系统整合光强、光周期、光分布、温度、湿度、CO₂ 浓度等环境因子的耦合效应, 无法模拟工厂化育苗的真实复合环境; 二是品种与基因型特异性规律不清, 不同蓝莓品种(南高丛、北高丛、兔眼等)的光质响应差异显著, 现有结论难以普适推广; 三是动态调控阈值模糊, 不同发育阶段光质配比、光强转换的临界时间点与量化参数尚未明确, 难以支撑智能化精准调控。

调控技术与产业化应用脱节理论研究多基于实验室小试, 缺乏规模化生产验证, 光质调控设备的能耗、成本、光均匀性等关键指标未适配工厂化育苗需求; 同时, 光质调控与培养基优化、激素调控、移栽基质筛选、炼苗流程等技术的集成度低, 未形成“光-养-境-管”一体

化高效育苗体系,导致理论成果难以快速转化为生产技术。

生理与表型关联的量化模型缺失现有研究以定性描述为主,缺乏光质—生理—表型的量化预测模型,无法通过光质参数精准预判生根率、根系形态、光合指标、移栽成活率等关键指标;对蓝莓试管苗异养—自养转换的临界节点、碳代谢切换阈值、抗逆系统激活窗口期等关键生理转折点的定量刻画不足,制约调控策略的精准优化。

特殊光质与长期效应研究薄弱对UV- A、UV- B、远红光、绿光等辅助光质的调控效应研究偏少,其安全剂量、增效机制、与红蓝光的最优配比尚不明确;缺乏光质调控对蓝莓试管苗移栽后田间生长、产量、品质、抗逆性的长期跟踪评价,难以评估技术应用的全周期价值。

5.3 光质调控在园艺植物微繁中的理论发展方向

基于蓝莓光质调控理论与产业需求,未来园艺植物离体微繁的光调控研究将向精准化、分子化、集成化、智能化、产业化方向发展,形成跨物种、全流程、多维度的理论体系:

光信号调控分子网络的深度解析以光受体信号通路为核心,解析光—激素—代谢交叉调控网络,挖掘光质调控生根、光合、抗逆的关键基因与调控模块;利用基因编辑、荧光定量、免疫共沉淀等技术,明确核心转录因子(HY5、PIFs、ARFs等)的作用靶点与调控机制;建立多组学联合解析范式,揭示光质调控园艺植物组培苗生长发育的普适性分子规律。

精准光环境调控理论体系构建建立“光质—光强—光周期”三维精准调控理论,明确不同园艺植物(小浆果、花卉、蔬菜、果树)在增殖、生根、炼苗等阶段的最优光环境参数;揭示光环境与温度、湿度、CO₂、营养供给的耦合调控机制,构建多因子协同适配的离体培养环境理论;形成物种特异性、基因型差异化的光质调控数据库,为精准供光提供理论依据。

异养—自养转换光驱动理论创新深化光质驱动试管苗碳代谢重塑、光合系统建成、抗逆系统激活的理论研究,阐明异养向自养平稳转换的光调控机制;建立“光诱导—代谢转换—适应性建立”理论模型,破解组培苗移栽“生理脆弱性”难题;形成覆盖“离体培养—驯化炼苗—田间定植”全链条的光调控理论,支撑高成活率、高品质种苗生产。

光调控与现代生物技术的集成创新推动LED光质调控与脱毒快繁、基因编辑、合成生物学、人工智能等技术深度融合;构建“光调控+激素精准配比+营养优化+生物诱导”的集成微繁理论,实现高效、低成本、标准化育苗;建立光质调控次生代谢产物(花青素、多酚等)的理论体系,拓展至药用、观赏园艺植物的品质定向提升。

智能化光调控与产业化理论支撑基于机器学习、物联网技术,构建光环境实时监测—智能决策—动态调控理论模型,开发园艺植物组培工厂智能化光控装备;形成节能型、规模化、标准化的光调控生产理论,降低育苗能耗与成本;建立光调控种苗质量评价体系,制定行业技术标准与操作规程,推动理论成果全面产业化。

跨物种普适性理论与特殊光质应用总结木本、草本、多肉、兰科等不同类型园艺植物的光质响应规律,提炼跨物种普适性调控理论;深化UV- A/UV- B、远红光、绿光等特殊光质的安全应用理论,挖掘其在壮苗、抗逆、提质方面的增效潜力;拓展光调控理论至体细胞胚发生、原生质体培养、遗传转化等前沿微繁领域,丰富植物细胞工程理论体系。

参考文献:

- [1] 赵敏,等.LED光质对比对离体蓝莓试管苗生根及光合生理的影响[J].园艺学报,2024,51(2):267-282.
- [2] 刘文科.设施园艺LED光环境调控理论与技术研究进展[J].照明工程学报,2024,35(1):30-40.
- [3] 刘慧雯.LED光质对蓝莓组培苗生根、抗氧化系统及移栽成活率的调控效应[D].长春:吉林农业大学,2023.
- [4] 杨艳敏,等.不同红蓝光配比对“都克”蓝莓组培苗增殖与生根的影响[J].果树学报,2022,39(8):1355-1364.
- [5] 谷艾素,张欢,崔瑾.光调控在植物组织培养中的应用研究进展[J].西北植物学报,2011,31(11):2341-2346.
- [6] 王玉英,等.LED光质对百合组培苗增殖及生理特性的影响[J].园艺学报,2021,48(S1):207-216.
- [7] 任桂萍,等.不同LED光质对蝴蝶兰组培苗生长及内源激素的影响[J].热带作物学报,2022,43(5):926-933.
- [8] 尚文倩,等.LED光质对铁皮石斛试管苗生长及生理特性的影响[J].中国中药杂志,2020,45(12):2820-2826.