

光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展

孙浩翔

中国农业大学 北京 海淀 100193

摘要: 本文围绕光照强度对园艺植物光合作用的影响展开研究进展综述, 聚焦不同光照条件下植物光合机构的响应机制、调控路径及实际应用方向, 梳理近年相关试验结论与理论成果。研究发现, 光照强度通过调控光合色素组成、光合酶活性及碳同化过程, 直接作用于园艺植物的光合效率, 且不同物种、生育期对光照的适应阈值存在显著差异。结合设施园艺的实际需求, 当前研究已从单一光照因子分析转向多环境因子协同调控探索, 为生产中的光照精准管理提供科学依据。

关键词: 光照强度; 园艺植物; 光合作用; 光合机制; 调控策略; 设施栽培

引言:

园艺植物的产量与品质直接依赖光合作用的高效进行, 而光照作为光合作用的能量来源, 其强度变化对这一过程的影响始终是园艺学科关注的重点。从传统露地栽培到现代设施园艺, 研究者们通过长期田间观察与室内试验, 逐步揭示光照强度与光合效率之间的复杂关联, 这些源于实践的探索不仅丰富了植物生理理论, 更为生产中的光照调控提供了科学依据。早在上世纪中期, 园艺研究者在田间试验中便注意到, 番茄、黄瓜等常见作物在夏季强光时段易出现光合效率下降的现象, 而冬季弱光环境下又会因能量供应不足导致生长迟缓, 这种源于生产实践的观察为后续精准调控研究奠定了基础。随着分子生物学与智能监测技术的发展, 当前研究已能从细胞层面解析光照信号的传导路径, 但其成果向生产应用的转化仍需进一步深化。本文结合近年国内外相关研究, 系统梳理光照强度对园艺植物光合作用关键环节的影响, 分析不同光照条件下植物的适应机制及调控技术, 以期园艺生产的高效可持续发展提供参考。

一、不同光照强度对园艺植物光合基础环节的作用

(一) 弱光环境下的光合响应特征

弱光作为设施栽培中常见的环境胁迫, 其对园艺植物光合作用的影响已通过大量盆栽与田间试验得到验证。当光照强度低于植物光补偿点时, 多数园艺植物会通过调整光合色素比例提升光捕获能力, 叶绿素b含量的增加能够增强对弱光的吸收效率, 同时类胡萝卜素的稳定可保护光合机构免受光损伤, 这种适应性变化在设施草莓、生菜等作物中表现尤为明显。研究说明, 弱光胁迫持续时间超过一定阈值后, 植物Rubisco酶活性会显著下降, 导致碳同化速率降低, 进而影响植株生长发育, 这一结论已在番茄苗期试验中得到反复证实。此外, 弱光还会改变光合产物的分配模式, 使更多同化物向叶片运输以扩大光合面积, 而非向果实或块茎积累, 这种分配策略虽能帮助植物在弱光下维持生存, 却会对园艺作物的产量形成制约。

(二) 强光环境下的光合适应与抑制

强光环境下, 园艺植物的光合作用呈现“适应”与“抑制”并存的特征。对于月季、葡萄等喜光作物, 适度强光可激活光系统II的修复机制, 通过提高叶黄素循环效率耗散过剩光能, 避免光合机构受损, 同时促进Rubisco酶的羧化活性, 提升碳同化速率。但当光照强度超过光饱和点且持续时间过长时, 植物会出现明显的光抑制现象, 表现为光合速率下降、PSII反应中心失活, 这种抑制在高温强光叠加条件下更为显著。研究说明, 强光导致的光合抑制并非完全不可逆, 多数园艺植物在遮阴处理后24-48小时内可恢复正常光合功能, 但持续强光胁迫会造成不可逆损伤, 比如辣椒在夏季正午强光下若未采取遮阴措施, 其叶片光合效率会下降30%-50%, 且恢复周期延长。此外, 强光还会诱导植物产生抗氧化酶系统, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等活性的提升可清除强光产生的活性氧, 这一防御机制在不同园艺植物中的激活程度存在物种特异性。

（三）光强波动下的光合调节机制

自然环境中光照强度的波动（如云层遮挡、季节变化）远大于人工控制环境，这种波动对园艺植物光合作用的影响近年逐渐成为研究热点。当光照强度快速提升时，植物光合机构的响应存在“滞后性”，Rubisco酶的激活速度慢于光反应速率，导致部分光能无法被有效利用；而当光照强度骤降时，光反应产生的ATP和NADPH会出现过剩，进而引发活性氧积累。为应对这种波动，黄瓜、番茄等作物会通过调节类囊体膜的结构稳定性，加快光合机构对光强变化的适应速度，同时通过非光化学猝灭（NPQ）的快速启动与关闭，实现光能利用与耗散的动态平衡。研究说明，长期生长在波动光环境中的园艺植物，其光合系统的灵活性显著高于稳定光环境下的植株，比如露地栽培的茄子相比温室固定光强下的植株，在光强骤变时光合速率的恢复速度快20%~30%。

二、园艺植物对光照强度的长期适应机制

（一）形态结构层面的适应调整

植物对光照强度的长期适应会体现在形态结构的改变上，这种改变是植物在进化过程中形成的生存策略。对于长期生长在弱光环境中的园艺植物，如耐阴花卉兰花、观叶植物绿萝，其叶片通常表现为大而薄、叶肉细胞排列疏松，这种结构可扩大光吸收面积，减少光在叶片内部的传递阻力；同时，这些植物的叶绿体体积较大、类囊体膜堆叠疏松，能够增加光合色素的分布面积，提升对弱光的利用效率。与之相反，喜光园艺植物如向日葵、月季，其叶片较厚、叶肉细胞排列紧密，且栅栏组织发达，这种结构不仅能增强光吸收能力，还可通过增加叶片厚度减少强光对光合机构的损伤。研究说明，光照强度对植物形态的影响具有阶段性，苗期是形态适应的关键时期，此阶段的光环境条件会显著影响植株成年后的形态特征及光合能力，比如苗期经历弱光处理的番茄，即使后期转入正常光照，其叶片结构也难以完全恢复至正常水平。

（二）生理代谢层面的适应调控

生理代谢层面的调整是园艺植物适应不同光照强度的核心机制，涉及光合酶系统、激素调节及碳代谢路径等多个方面。在弱光长期胁迫下，植物会通过提高Rubisco酶的亲合力，增强对低浓度CO₂的利用能力，同时降低呼吸作用速率，减少光合产物的消耗，这种代谢策略在设施芹菜、菠菜

等作物中表现突出。而在长期强光环境下，植物会通过增加Rubisco酶的总量及羧化活性，提升碳同化效率，同时激活光呼吸途径，通过消耗过剩光能保护光合机构，比如葡萄在夏季强光下光呼吸速率可提升40%~60%。此外，植物激素在光照适应过程中发挥调控作用，生长素（IAA）可通过调节叶片生长方向优化光吸收角度，脱落酸（ABA）则能在强光胁迫下诱导气孔关闭，减少水分流失及光抑制损伤。研究说明，不同激素的协同作用是植物实现光照适应的重要保障，单一激素的调控效果远低于多激素协同调控。

（三）分子水平的响应机制

随着分子生物学技术的发展，光照强度对园艺植物光合作用的影响已深入到基因表达层面。研究发现，光信号受体（如光敏色素、隐花色素）可感知光照强度变化，并通过信号传导途径调控光合相关基因的表达，比如光敏色素A（phyA）在弱光下可诱导叶绿素合成相关基因（如CHLH、POR）的表达，促进叶绿素积累。在强光环境下，植物会启动光保护相关基因的表达，如编码叶黄素循环关键酶（VDE、ZEP）的基因，以及抗氧化酶基因（SOD、POD），这些基因的表达量与光照强度呈正相关。此外，转录因子在光合基因调控中发挥核心作用，HY5转录因子可结合到光合色素合成基因的启动子区域，调控基因表达水平，进而影响植物的光适应能力。研究说明，不同园艺植物的光合相关基因对光照强度的响应存在差异，这种差异是物种长期适应不同光照环境的结果，比如耐阴植物兰花的光保护基因表达阈值显著低于喜光植物月季。

三、光照强度调控在园艺生产中的应用

（一）设施园艺中的光照调控技术

设施园艺为光照强度的精准调控提供了可能，当前常用的调控技术包括补光、遮阴及光质与光强协同调控。补光技术主要应用于冬季弱光时段，通过LED光源（如红蓝光组合）补充光照，可显著提升作物光合效率，比如番茄在补光强度150 μmol·m⁻²·s⁻¹、每天补光8小时的条件下，光合速率可提升25%~35%，产量增加15%~20%。遮阴技术则用于夏季强光时段，通过遮阳网、遮阳涂料等降低光照强度，避免光抑制发生，不同作物对遮阴度的需求存在差异，辣椒适宜的遮阴度为30%~40%，而葡萄则为20%~30%。近年兴起的光质与光强协同调控技术，通过调整不同光质的比例及强度，可进一步优化光合效率，比如在弱光补光

中增加蓝光比例,可促进黄瓜叶片Rubisco酶活性提升,增强碳同化能力。研究说明,设施光照调控需结合作物种类、生育期及环境条件综合设计,单一调控措施的效果有限,多技术协同应用才能实现最佳生产效益。

(二) 露地栽培中的光照管理策略

露地栽培中光照强度受自然条件制约,其管理策略主要围绕品种选择、种植模式优化及田间管理展开。品种选择上,根据栽培区域的光照条件选用适宜品种,比如高纬度地区选择耐弱光的白菜、萝卜品种,低纬度强光地区选择喜光且耐光抑制的玉米、西瓜品种。种植模式优化方面,通过合理密植调整植株间的光照分布,避免因种植过密导致下部叶片光照不足,比如番茄露地栽培的适宜行距为0.8-1.0m,株距为0.4-0.5m,可保证冠层内光照分布均匀。田间管理中,通过整枝打杈、修剪叶片等措施改善植株通风透光条件,提升冠层光合效率,比如葡萄通过冬季修剪控制结果枝数量,夏季摘心去除顶端优势,可减少无效消耗,增强叶片光合能力。研究说明,露地栽培的光照管理需结合当地气候特征及作物生长规律,因地制宜制定方案,才能在提高光合效率的同时保障作物产量与品质。

(三) 调控技术的应用挑战与发展方向

尽管光照强度调控在园艺生产中已取得一定应用成效,但其推广仍面临诸多挑战。设施补光技术存在能耗高、成本高的问题,传统高压钠灯的能耗是LED灯的2-3倍,而LED灯的初始投入成本较高,制约了中小规模设施的应用。露地栽培中,极端天气(如持续阴雨、暴雨)导致的光照异常

难以通过人工措施完全调控,比如2023年南方地区持续阴雨天气,导致露地草莓光合效率下降,产量减少30%以上。此外,不同作物、不同生育期对光照的需求差异显著,当前多数调控技术缺乏针对性,难以实现“精准适配”。未来,光照调控技术的发展方向将聚焦于低成本、高效能及智能化,比如开发基于太阳能的补光系统降低能耗,利用传感器与物联网技术实现光照强度的实时监测与自动调控,同时结合分子育种技术培育高光效、广适性的园艺作物品种,推动光照调控从“经验化”向“精准化、智能化”转变。

结束语

综合近年的研究成果,光照强度对园艺植物光合作用的影响已从宏观现象深入到分子机制层面,从单一因子分析拓展到多环境因子协同作用研究。当前研究明确了弱光、强光及光强波动下植物的光合响应特征与适应机制,揭示了形态、生理及分子层面的调控路径,为园艺生产中的光照管理提供了科学依据。但现有研究仍存在不足,比如光强与其他环境因子(温度、CO₂浓度)的交互作用机制尚未完全明晰,设施光照调控的成本效益比有待进一步优化,耐极端光照品种的选育进程需加快。未来的研究需结合智能传感技术与分子生物学手段,深入挖掘植物光适应的关键基因与调控网络,同时加强田间实际应用的验证,推动研究成果向生产转化。园艺植物光合作用对光照强度的响应是一个复杂的系统工程,只有将基础研究与生产实践紧密结合,才能实现光照资源的高效利用,为园艺产业的高质量发展提供支撑,这也是一代代园艺研究者持续探索的目标。

参考文献:

- [1]朱文杰,郑鸣洁,康瑜国.不同光照强度对三种藤本植物光合作用的影响[J].中国农学通报,2022,38(26):27-31.
- [2]陈熙,翟玉莹,杨月,等.光照强度对园艺植物光合作用的影响研究[J].现代园艺,2018,(03):8-9.
- [3]马传芳.光照强度对园艺植物光合作用影响的探究[J].花卉,2017,(24):22-23.
- [4]温博.光照强度对园艺植物光合作用影响的研究进展[J].花卉,2017,(22):38.