

陈永快,王 涛,兰 婕,等. 植物工厂内 LED 光调控在作物栽培中的研究进展[J]. 江苏农业科学,2020,48(23):40-46.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.23.008

植物工厂内 LED 光调控在作物栽培中的研究进展

陈永快,王 涛,兰 婕,黄语燕,康育鑫

(福建省农业科学院数字农业研究所,福建福州 350003)

摘要:本文主要阐述植物工厂内 LED 光调控在作物栽培中的应用进展,总结光质、光照度、光周期 3 个关键因子对作物(蔬菜、药植、花卉及果树)在生长发育和营养品质的调控。结果表明,光环境因子从多方面影响着作物的生长进程,在作物整个生理周期中起重要作用,总体上红光能够促进植株形态建成,蓝光促进植物营养成分累积,合理的光质调配能够促进作物生长;通过光照度和光周期的调控,可以减少逆境影响,促进形态指标和营养品质改善。本文主要分析不同作物在光调控环境下的响应,为植物工厂中作物光生物学研究提供参考。

关键词:植物工厂;LED 光调控;光环境;作物栽培;研究进展

中图分类号: S123;S316 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)23-0040-07

植物工厂是通过设施内高精度环境控制,实现农作物周年生产的高效农业系统,是由计算机对植物生育过程中的温度、湿度、光照、土壤肥力、室内 CO₂ 浓度等环境因素进行自动控制,使设施内植物生长发育不受自然条件制约的省力型生产方式^[1]。迄今为止,植物工厂已应用于种苗、反季节蔬菜、瓜果、花卉、食用菌、中草药等植物的规模化生产,且种类逐年增多^[2-6]。植物工厂具有露地栽培不可比拟的优势,具体表现为:不受外界气候条件影响,可按计划进行周年生产;空间单位土地面积利用率高,达露地栽培的 40~108 倍,可进行立式栽培^[7];自动化程度高;无农药污染,水肥循环一体化利用;作物外观整齐一致,洁净无杂质^[8]。

在影响植物生长的环境因素中,光发挥着重要作用,不仅影响植物的生物学基础,也是形成良好

品质的必要条件之一。在植物工厂中,Kwon 等指出光照条件包括光质、光照度和光周期 3 个重要参数,这些属性对作物生长发育的影响起到了关键作用,亦是植物工厂正常运行的决定性因素^[9]。合理利用 LED 光环境综合调控能够突破自然条件的局限,提高作物生产效益。

在传统农业照明领域,Tournus 等指出由于白炽灯红蓝光谱分布不均,且单位栽培面积功率能耗大,易引起植株徒长^[10];荧光灯故障率相对较高,寿命短,实用化程度低^[11];金属卤化物灯和日光色镝灯光利用率较低^[12],传统电光源照明无法判断光谱里哪些是植物生长发育必需的光质,无法真正认识植物的光质需求特性。发光二极管(LED)是半导体发光器件,是新一代固态光源,LED 的出现为作物栽培提供可控光源,也为作物光质生物学研究提供有效工具^[13]。LED 属于电致发光光源,相较于传统光源而言,具有以下光电优势和特征:体积小,可进行任意形状的装配,为植物工厂等设备提供更大的自由度;寿命长、可靠性高;发光效率高;LED 为冷光源,低发热量,热辐射小,可近距离照射植物,

收稿日期:2020-05-06

基金项目:福建省农业科学院一般项目(编号:A2018-5、A2018-1)。

作者简介:陈永快(1981—),男,硕士,助理研究员,主要从事设施农业、循环农业研究。E-mail:stonecyk@126.com。

[29]张 琦,李 斌,孟宪军,等. 超临界萃取和分子蒸馏技术对玫瑰精油提取分离的研究[J]. 中国粮油学报,2006,21(2):72-74.

[30]郭胜旭. CHClF₂ 亚临界萃取-分子蒸馏相结合提取玫瑰精油[D]. 兰州:兰州大学,2014.

[31]赵晓峰,吴荣书. 玫瑰花综合利用与其开发前景[J]. 保鲜与加工,2004,4(3):30-31.

[32]王晓霞,魏 杰,刘劲芸,等. 云南食用玫瑰精油化学成分的

GC/MS 分析及其应用研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2011,33(增刊2):414-417,421.

[33]Umez T,Ito H,Nagano K,et al. Anticonflict effects of rose oil and identification of its active constituents[J]. Life Sciences,2002,72(1):91-102.

[34]母 多,徐兴梦,郭亚东,等. 玫瑰精油的提取工艺及化学成分的 GC-MS 分析研究[J]. 昆明学院学报,2017,39(6):101-106,111.

空间利用率高^[14];波长固定,可按植物所需生长光谱宽度调制;节能环保,不含汞等有害物质^[15];响应速度快,一般为 0.15~0.25 s^[16];抗振动和碰撞,耐振性佳。

植物工厂的发展经历了半个多世纪,随着光调控技术的不断创新与完善,使植物工厂的能源利用率达到新的高度。近几年 LED 被广泛应用到国内外作物的栽培研究中,在果蔬生产方面逐步实现了从播种、育苗到定植、采收等生产过程的生产模式,为植物工厂进一步发展提供了有益借鉴^[17-18]。植物工厂充分利用了设施作物光生物学基础,通过营养液栽培技术、LED 光调控技术和环境控制技术,三类技术彼此融合,优化实施环境要素控制、养分水分供给、植物种类甄选等相关条件,达到植物高效生产的目标。本文从光质、光照度、光周期 3 个角度论述蔬菜作物、药用植物、花卉和果树的应用进展,以期为植物工厂中作物光生物学研究提供参考。

1 光调控技术在植物工厂的研究进展

1.1 光质对设施作物生长和品质的调控

光质对植物生长发育及生理代谢有着显著的调控作用。植物光合作用主要以红橙光及蓝紫光为吸收峰值区域,分别约占作物光能生产能力的 55%、8%^[19]。对于大多数作物而言,光谱能量分布是光的重要属性,影响着植物的生理过程,包括对特定波段范围内的光具有不同的生物学效应^[20]。

在蔬菜作物方面,陈晓丽等研究发现,植物对红光和蓝光较为敏感,尤其在红蓝光比例组合为 2:1 时莴苣根系矿质元素的累积量达到峰值,说明此波段对莴苣矿质养分的吸收特性有所影响^[21-22]。Johkan 等研究发现,与常见的复配光源相比,其他光谱成分如红外光谱波段或紫外光谱波段对植物生长发育和形态建成有协同作用,说明不同光质间混合调配对植物营养分配有一定影响^[23]。李慧敏等研究表明,红蓝组合光为 8:1 时,甘蓝型油菜幼苗的根系健壮,叶片中可溶性糖、可溶性淀粉、游离氨基酸和总氮的含量显著提高,而蓝光则明显促进叶片中可溶性蛋白、光合色素、蔗糖和抗坏血酸的累积,说明一定的红蓝光配比可能会综合单色光的优势,从而促进植株生长^[24]。黄薪历等研究发现,在生产前期补充红光有利于叶面积的扩展,补充蓝光有利于生菜干物质的积累,促进维生素 C 的合成,同时降低硝态氮含量^[25]。蒋晓婷等研究发现,补充

黄光提高了丝瓜幼苗类胡萝卜素含量^[26]。黄枝等研究表明,增加绿光会抑制瓠瓜丙二醛(MDA)的积累,增强抗逆性^[27]。

在药用植物方面,陈晓丽等研究表示,单色红光及混合光 FLRB(荧光灯与红蓝 LED 混合)有利于水培蒲公英可食生物量的积聚,主要表现在纯红光条件下蒲公英地上部分对钙、镁、锌、钠 4 种元素的累积达到最高值,而钾、磷、铜等 6 种无机元素的积累量在混合光 FLRB 条件下最高^[28]。李思静等研究表明,在复色光红蓝比分别为 1:1 和 4:1 时,明显抑制枳壳幼苗茎伸长,相对于单色光来说,高比例红光和对照白光更有利于枳壳物质合成^[29]。王莉等研究表明,对长鞭红景天生长影响,长时间红光照射有助于酶活性的提高,但在生物量方面,单一光质白光显著高于红光^[30]。朱美瑛等研究揭示,红光对金线莲中可溶性糖和类胡萝卜素具有最强的刺激作用^[31]。施满容在对金线莲生理特性的研究中发现,光质中蓝光均值最大时,金线莲生长过程中的多糖、总黄酮、叶绿素 a 和叶绿素 a+b 积累最多,而对叶绿素 b 合成无促进作用^[32]。刘建福等研究提出,蓝光及红蓝光配比能提高姜黄叶片蛋白质和次生代谢产物生成,而绿光及远红光不利于姜黄次生代谢产物的积累^[33]。

在花卉方面,郭莹等研究表明,大花蕙兰与虎雪兰杂交组培苗在 LED 复合光(红:蓝:白为 6:1:1)处理下,叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均高于其他处理,说明复合光有利于叶绿素的合成,影响植物光合色素含量^[34],这与褚四敏等在光质条件下对植物组织培养的研究^[35]具有一致性。石镇源等研究表示,虎雪兰组培苗在红:蓝:白=6:1:1 时,地上部、根部和整株干质量最高,与上述研究不同的是,虎雪兰组培苗在红:蓝:白=4:2:1 时利于 3 种色素的合成,而单色蓝光(B)下其游离氨基酸和可溶性蛋白含量最高,在单色红光(R)下反之,说明红蓝白光配比下虎雪兰整体长势较佳,相比之下,单色红光或单色蓝光下虎雪兰组培苗易出现徒长现象,部分节间变长,叶短而小;在复配光照射下,能较多地积累有效物质,使植株正常生长^[36]。杨长娟等研究表明,红蓝配比光(2RB)条件下洋桔梗组培苗增殖量最高,红蓝复合光(1RB)处理次之,单色蓝光处理增殖量最低,红蓝复合光处理是单色蓝光处理的 2.062 倍,是红蓝复合光(1RB)处理的 1.181 倍,说明不同光质的作用

差异可能由洋桔梗组培苗对不同因素处理的差异所致^[37]。任桂萍等研究表明,红光更有利于蝴蝶兰单芽增殖及生物量积累,蓝光促进叶片叶绿素含量增加,并提高根系活力^[38],这与刘晓青等在研究高山杜鹃时发现红光更有利于芽的再生率^[39]相似。

在果树方面,陈光彩等研究表明,单色红光处理可增加香蕉组培苗的根数和根长,促进植物形态建成,低蓝光会矮化组培苗,对组培苗叶片有不利影响,红蓝光混合(80% R + 20% B)处理香蕉组培苗可溶性糖、光合色素含量积累量达到最高,说明红蓝混合光源对香蕉组培苗植株形态及生理指标有促进作用^[40]。张立伟等研究表明,红光处理会降低香椿苗可溶性蛋白含量,而蓝光、红蓝混合光处理能提高香椿苗可溶性蛋白含量^[41]。张斌斌等研究表明,红、黄滤光膜下红叶桃叶片光泽较佳,花青素、叶绿素、类黄酮含量显著提升,蓝、绿滤光膜下叶片色泽偏绿,叶绿素含量变为负值,总酚、类黄酮等含量降低,而白色滤光膜下叶片着色较差,说明可通过调节光质组成促进红叶桃叶片的呈色效果^[42]。黄文静等研究表示,LED 红光利于火龙果幼苗植株增高,LED 蓝光利于火龙果幼苗茎围增粗,在复合红蓝光(6:4)下火龙果出苗时间最短,增殖系数高,生根率达到 100%,说明在此光谱条件下可促进火龙果幼苗生长进程^[43]。

综上所述,不同光谱分布的 LED 复配光源对植物体内功能性化学物质积累表现在多个方面,说明光质对植物体内有效物质的光调控具有复杂性,不同植物及品种在植物生长周期各阶段所表现出特定的响应机制,呈现出不同的光生物学效应。总体来看,红光下所生成的物质使植株形态发生变化,促进碳水化合物合成,增加酶活性,而蓝光下所生成的物质明显促进植物营养成分的累积,合理的红蓝复合光能够促进植物形态建成。

1.2 光照度对设施作物生长和品质的调控

光是一个复杂且重要的生态因子,一定范围内的光照度会造成植物形态特征和生理特性可塑性变化,从而影响植物的营养物质含量。植物主要通过利用光能与碳氧分配来影响光合作用,调节不同类型光合色素复合物的形成,实现植物的营养吸收^[44]。Torres 等指出,在合理光照度下植物光合速率和蒸腾速率增加,物质生产能力越高,干物质积累越多,越能促进作物生长发育^[45]。

在光环境中,不同供试植物对于不同供给光子

通量所产生的若干生理反应及生物学效应并不相同。张毅华等研究得出,与黑暗处理相比,补光光照度为 $9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,黑豆芽苗菜下胚轴直径最大,随着光照度增大,下胚轴长逐渐减小,尤其当光照度大于 $21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,下胚轴长出现光抑制现象,表明强光不利于黑豆芽苗菜下胚轴的增粗^[46]。肖苏琪等研究表明,光照度为 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时显著增加黄瓜幼苗的茎粗、叶面积、比叶质量、生物量和壮苗指数,且补光促进干物质向叶片和根部分配,抑制向茎部分配^[47]。在方舒玲水培生菜研究中,光照度为 $250 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,其地上鲜质量、叶绿素含量表现最优,且净光合速率最大,可溶性糖、可溶性蛋白含量随光照度增加而增大,硝酸盐、抗坏血酸含量随光照度增加而呈下降态势^[48]。林魁等研究阐释,在红蓝配比处理下,瓠瓜果实的光合色素、可溶性蛋白质、可溶性糖含量均随光照度增大而显著提高,而丙二醛含量显著降低^[49]。在田发明培育甜椒幼苗研究中,当光照度为 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,与白光相比,红蓝混合光提高了叶片叶绿素 a 含量、胡萝卜素含量和根系活力^[50]。

植物整个生长周期在光照度补光下,对其表型特征和后期品性有较大影响。根据各种植物对光照度的需求,可分为阳地植物、阴地植物和耐阴地植物^[51]。韩金龙等经过研究发现,北沙参、柴胡、天南星在 50% 遮光处理下仍能维持较高的光合速率和产量,而土贝母和牛膝产量受光影响严重,遮光处理后光合速率等指标显著下降,说明这 2 种药用植物对光照比较敏感,属喜光植物,不适合在遮光条件下种植。芍药属阳地植物,要求生长在阳光充足的地方,其光饱和点为全光照的 100%,光补偿点为全光照的 3% ~ 5%^[52]。李丽丽研究阐述,芍药光补偿点 LCP 在 $25 \sim 53 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,光饱和点 LSP 在 $700 \sim 1\,100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间,因此当遮阴 30% 时,芍药光合生理特性最优,且有效缓解光抑制现象^[53]。鱼腥草属三白草科多年生草本植物,喜欢生长在阴湿环境下。曾至诚研究表明,光照度对鱼腥草生长形态和营养成分影响较大,随着光照度的降低,鱼腥草植株高度、地上茎直径、地下茎直径、叶长、叶宽、叶柄长均有所增加^[54]。三七是景天科阴地植物,不能忍受强烈的日光照射,喜湿环境生存。陈黎明等的研究表明,在透光率为 16% 的光照度下,三七光合作用达最大值^[55]。

在花卉方面,杨有芹等研究指出,遮阴能促进红雉凤仙花株高、侧枝、冠幅等形态指标生长,同时促进了植物叶片的生长,使单叶面积、叶片长宽显著增强;光照度对红雉凤仙花的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度影响显著,而对胞间浓度、水分利用效率及气孔限制值影响不显著^[56],这与曾小华对峨眉凤仙花的研究结果^[57]相似。于海业等研究表明,蝴蝶兰在 $175 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下培育,其叶绿素 a、叶绿素 b 及总叶绿素含量最佳,当光照度为 $450 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,兰花的气孔导度、蒸腾速率、净 CO_2 同化率、根系活性最高^[58]。武冲等研究表明,随着遮光率的增高,红叶樱花叶片中光合色素含量增加,但花色苷含量减少,净光合速率及光化学淬灭系数增加,说明遮阴可以降低其花色苷的含量^[59]。

在果树方面,马焕香等研究指出,光照度影响邹平水杏顶芽枝向上生长,而树冠内部光照不足表现为徒长且枝条细弱,对根系生长有明显的抑制作用;光照充足时,果品着色好,且糖分及维生素含量高^[60]。张珊珊等研究表明,高光照度水平(100%光照)和深度遮阴(20%光照)均不利于云南蓝果树幼苗的生长及光合作用,适度遮阴(60%光照)最利于幼苗个体发育^[61]。尹魁林等研究表明,当光照度在 $2\,000 \sim 5\,000 \text{ lx}$ 时,冬枣试管苗叶色深绿,成活率高;当光照度在 $5\,000 \sim 10\,000 \text{ lx}$ 时,冬枣试管苗叶色微黄,生长速率慢,成活率低^[62]。

综合来看,光照度调控作物生长具有重要作用,合理的光照度能够改善植物生长,促进植物生长速率,增加干物质等。在光照度一致的条件下,红蓝混合光能够促进作物初级代谢产物(糖、蛋白质、维生素等)生理过程变化,可以通过光量调控营养品质指标。植物在不同程度光照度下活性成分存在明显变化,在高光照度条件下,适当的遮阴处理能防止植物光合结构的破坏,在形态结构上有利于避免过高光照度对叶片光合器官的损伤^[63]。

1.3 光周期对设施作物生长和品质的调控

光照是最重要的环境因子,光周期是光环境的三大属性之一,是植物在昼夜周期中光照期和黑暗期长短的交替,植物对光的需求有独特的昼夜规律,通过正确匹配植物体内时钟周期,获得更多光合作用的优势^[64]。通过光周期调控,植物营养物质累积具有可调节性,而适当延长光照周期可以缓解弱光产生的胁迫,有助于生物量积累和品质

改善^[65]。

光周期调控是解决设施栽培作物因地理位置、季节变化引起的光照时间不足等问题,光周期调控可缩短培养周期,做到分段光周期管理,通常延长植物苗的光周期可以促进其生长代谢和生理过程。高建敏等研究表明,光周期为 9 h 光期 + 15 h 暗期下,南瓜幼苗的株高最高,而茎围在光周期为 24 h 光期 + 0 h 暗期最高,说明全光照可抑制南瓜幼苗的伸长,有利于茎的增粗,同时长光照促进南瓜幼苗干物质的积累,而在短光照处理下(9 h 光期)南瓜幼苗干物质积累最少,且幼苗徒长现象严重^[66]。查凌雁等研究表明,光周期为 16 h 光期 + 8 h 暗期时,明显提高了樱桃萝卜的根直径、根体积和肉质根干鲜质量,同时增加了地上部干鲜质量和叶绿素含量^[67]。番茄作为日中性蔬菜,对光照时数没有严格的要求^[68],但何蔚等研究发现,在光照度和日光累积量一致的条件下,光周期是影响番茄幼苗光合色素合成的主要因素^[69]。刘晓英等研究发现,光周期为昼 14 h/夜 10 h 时能明显提高菠菜的光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)含量,并促进菠菜生长^[70]。马超在对大豆芽苗菜生理特性研究时发现,适当延长光照时间可累积大豆芽苗菜叶绿素、维生素 C 与异黄酮含量,显著降低游离氨基酸含量^[71]。

按照药用植物对光周期的反应,可分为 3 类,依次是长日照植物(日照 12 h 以上)、短日照植物(日照 14 h 以下)、日中性植物(对日照无要求,任何日照均能开花)^[72]。桔梗是多年生草本植物,一味以根入药的常用中药,赵姣姣研究发现,在光周期 16 h 下,桔梗地上部和根的生物量最大,而白光 8 h 光周期下植株干鲜质量最小^[73]。紫苏是典型的短日照植物,兰树斌研究发现,紫苏对补光特别敏感,在补光时间 6 h 以内,开花时间越迟,弱补光越适合紫苏生长^[74]。大麻为 1 年生草本植物,强晓霞采用 2,3,5-三苯基氯化四氮唑(TTC)法、NADH 法在大麻苗期进行性别鉴定,研究发现大麻性别表达不受人工短日照处理(8 h)的影响,但人工长日照处理(16 h)会使大麻向雄性分化^[75]。月季属日中性植物,可入药,吕永平等研究发现,当光周期不低于 14 h/d 时可保证月季组织培养,生根情况均无明显差异^[76]。

在花卉方面,菊花是典型的短日照植物,洪艳等研究表明,切花菊丽金在短日照(12 h 光照/12 h 黑暗)下 43 d 时,其幼苗可以完成花芽分化,较快地

现蕾与开花^[77],与 Higuchi 等研究结论“菊花适宜光周期”^[78]相一致。毛洪玉等研究发现,当光周期为 10 h 光照/14 h 黑暗时,切花菊 C029 花芽分化提前,有助于加快该品种开花的临界日长^[79]。韩婧等研究表示,将光周期延长至 14 h/d 时,芍药的开花率和着花量显著提升,同时促进叶绿素积累^[80]。李程等研究表明,春石斛在生长阶段经过短日照处理,可大大加快花芽分化进程,缩短开花时间^[81],这与赵耀等研究光周期调控菊花生长的研究结果^[82]相似。邝琦等研究表明,菊花花芽分化临界日长为 13.5 h,说明短日照时间对菊花栽培具有指导性的意义^[83]。

在果树方面,朱开元等研究表明,延长光周期处理(每天将光周期延长至 18 h)可以促进罗汉松和鸡爪槭苗木干物质积累,同时刺激了光合潜力的提升,在养分浓度方面,鸡爪槭苗木较罗汉松在氮、磷、钾元素的利用效率均显著提高,但不会影响养分淋溶^[84]。李冬梅研究指出,桃树在休眠诱导期内长日照条件下叶片表现出良好的营养状况和较强的抗性,但抗性开始的时间晚,持续时间长;短日照下叶片抗性迅速增强,但持续时间短,衰老早^[85]。孔琼等研究提出,在全光照、全黑暗、光暗交替(12L—12D)3 种光照处理下,枇杷拟盘多毛孢均有利于促进菌落扩展、产孢量增加和分生孢子萌发,其中全光照处理下,菌落直径和孢子萌发率均达到峰值,而光暗交替能促进产孢量的增加,且产孢量达到最高^[86]。刘国琴等研究阐述杨树、桑树受短日照影响,使果树进入芽休眠阶段^[87]。张晓伟研究表明,短日照条件下,果树新梢伸长受到抑制,枝条节数及节间长度减小,而长日照有利于果实发育,间接促进果树花芽形成^[88]。

由此看来,植物通过光受体光周期明暗变化,调节植物生理生化特性^[89],通过逐渐延长每天的光周期,缩短暗期可提高植物幼苗的生长发育,使植物花芽分化提前,调节植物生理特性及开花反应。适当延长光照时间,植物的生物量、营养成分积累更为显著,但短光照可能致使蔬菜幼苗出现徒长现象,通过提高作物对短光周期的适应能力,与高光照度相互协调,促进植株的生长发育^[90-91]。

2 结论

综上所述,对设施作物而言,光质、光照度和光周期需求具有作物种类和品种差异,作物生长发育

的本质需求分阶段性,在萌发阶段需要热量,而生长阶段需要不同的光源促进其光形态建成及更多营养物质的累积、储存与利用。本文主要探讨了植物工厂中不同光质、光照度和光周期对蔬菜、药植、花卉及果树生长和品质的影响,分析不同作物生长发育规律的多样性,认为光环境调控对设施作物不能一概而论,要按需调控光质、光照度和光周期参数,逐条分析植物形态建成、物质代谢及营养品质产生的生物学效应,达到优质高产的目标。随着高精度环境控制形式植物工厂和光电技术的发展,按照植物光生物学要求,按需供光,智能化管理,最大程度提高光环境调控的生物效益,为作物生长发育和营养品质提供新的有效手段。光调控技术不仅为光源的节能提供技术参数,更为作物的优质高产提供技术手段,具有重要意义。

参考文献:

- [1] 杨其长,魏灵玲,刘文科,等. 植物工厂系统与实践[M]. 北京: 化学工业出版社,2012.
- [2] 曹 凯,于 捷,叶 林,等. 暗前适宜 LED 远红光光照强度促进设施番茄种苗生长发育[J]. 农业工程学报,2016,32(8): 171-176.
- [3] 刘文科. LED 植物工厂光质生物学研究与应用现状[J]. 中国农业科技导报,2018,20(10):9-14.
- [4] 赵丹丹,桂 敏,蒋亚莲,等. LED 灯补光对温室内香石竹生物学性状的影响[J]. 西南农业学报,2017,30(8):1882-1885.
- [5] 李 杰,王再花,刘海林,等. 不同光质的 LED 对 2 种金线莲组培苗增殖、生根及生长的影响[J]. 热带作物学报,2017,38(9): 1666-1670.
- [6] 刘文科,杨其长. 食用菌光生物学及 LED 应用进展[J]. 科技导报,2013,31(18):73-79.
- [7] Kozai T. Plant factory in Japan—current situation and perspectives [J]. Chronica Horticulturae,2013,53(2):8-11.
- [8] 全宇欣. 设施农业的技术革命——人工光植物工厂[J]. 科技导报,2014,32(10):84.
- [9] Kwon S Y, Ryu S H, Lim J H. Design and implementation of an integrated management system in a plant factory to save energy[J]. Cluster Computing,2014,17:727-740.
- [10] Tournus F, Bonet E. Magnetic susceptibility curves of a nanoparticle assembly, I: Theoretical model and analytical expressions for a single magnetic anisotropy energy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2011,23(9):1109-1117.
- [11] 张海辉,杨 青,胡 瑾,等. 可控 LED 亮度的植物自适应精准补光系统[J]. 农业工程学报,2011,27(9):153-158.
- [12] 毛罕平,晋 春,陈 勇. 温室环境控制方法研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报,2018,49(2):1-13.
- [13] 刘文科,杨其长. 设施农业照明新光源——发光二极管(LED) [J]. 科技导报,2014,32(6):12.

- [14]李志鹏. 植物工厂光斑可调式 LED 节能光源研制及应用研究 [D]. 北京:中国农业科学院,2016.
- [15]Togawa T,Fujita T,Dong L,et al. Feasibility assessment of the use of power plantsourced waste heat for plant factory heating considering spatial configuration [J]. Journal of Cleaner Production,2014,81:60–69.
- [16]Hyun I T,Lee J H,Yoon Y B,et al. The potential and utilization of unused energy sources for large – scale horticulture facility applications under Korean climatic conditions[J]. Energies,2014,7(8):4781–4801.
- [17]Samuoliene G,Sirtautas R,Brazaityte A,et al. LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce [J]. Food Chemistry,2012,134(3):1494–1499.
- [18]Bergstrand K J,Schüssler H K. Recent progresses on the application of LEDs in the horticultural production [J]. Acta Horticulturae,2012,927:529–534.
- [19]许大全,高伟,阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报,2015,51(8):1217–1234.
- [20]闻靖,杨其长,魏灵玲,等. 不同红蓝 LED 组合光源对叶用莴苣光合特性和品质的影响及节能评价[J]. 园艺学报,2011,38(4):761–769.
- [21]陈晓丽,郭文忠,薛绪掌,等. 不同光谱成分条件下叶用莴苣矿物质元素吸收分析[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(8):2207–2210.
- [22]陈晓丽,郭文忠,薛绪掌,等. LED 组合光谱对水培生菜矿物质吸收的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(5):1394–1397.
- [23]Johkan M,Shoji K,Goto F,et al. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa* [J]. Environmental and Experimental Botany,2012,75:128–133.
- [24]李慧敏,陆晓民. 不同光质对甘蓝型油菜幼苗的生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2015,35(11):2251–2257.
- [25]黄薪历,邹志荣,高垣美智子,等. 不同生长阶段补充红蓝光对生菜生长与品质的影响[J]. 北方园艺,2017(24):89–95.
- [26]蒋晓婷,梁双贤,林碧英,等. 不同光质补光对丝瓜幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2015,44(3):250–255.
- [27]黄枝,林魁,林碧英,等. 光质对瓠瓜幼苗光合及若干生理特性的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2016,36(2):85–90.
- [28]陈晓丽,Morewane M B,薛绪掌,等. ICP–AES 分析光谱条件对中药蒲公英无机元素吸收的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2015,35(2):519–522.
- [29]李思静,易晓瞳,李有芳,等. 不同 LED 光质对枳壳幼苗生长发育的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2018,38(3):708–714.
- [30]王莉,史玲玲,刘玉军. 不同光质对长鞭红景天悬浮细胞生长及苯丙氨酸解氨酶活性的影响[J]. 林业科学,2007,43(6):52–56.
- [31]朱美瑛,王康才,李雨晴. 金线莲叶片气孔与光合特性研究[J]. 江苏农业科学,2014,42(11):210–212.
- [32]施满容. 金线莲组织培养条件优化对其有效成分含量的影响[J]. 福建农业学报,2018,33(5):495–501.
- [33]刘建福,范燕萍,王明元,等. 发光二极管不同光质对姜黄光合特性和姜黄素含量的影响[J]. 生态学杂志,2014,33(3):631–636.
- [34]郭莹,李海燕,阮氏月,等. LED 不同光质对大花蕙兰‘爱神’×虎雪兰‘霞光’杂交组培苗叶绿素含量的影响[J]. 北方园艺,2015(18):77–80.
- [35]褚四敏,陈敏洁,贾文妹,等. 光质对植物组织培养的影响[J]. 安徽农业科学,2011,39(2):665–666,672.
- [36]石镇源,唐敏,杨红飞,等. LED 不同光质对虎雪兰组培苗生理生化特性影响的研究[J]. 云南农业大学学报,2012,27(6):863–869.
- [37]杨长娟,凌青,任兴平,等. LED 不同光质对洋桔梗组培苗增殖的影响[J]. 北方园艺,2011(18):154–156.
- [38]任桂萍,王小菁,朱根发. 不同光质的 LED 对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响[J]. 植物学报,2016,51(1):81–88.
- [39]刘晓青,苏家乐,陈尚平,等. 高山杜鹃叶片再生和试管苗生长对不同 LED 光质的响应特征[J]. 江苏农业学报,2013,29(6):1451–1455.
- [40]陈光彩,潘彤彤,毛琪,等. LED 红、蓝光源对香蕉组培苗生长的影响[J]. 中国南方果树,2019,48(2):59–66.
- [41]张立伟,刘世琦,张自坤,等. 不同光质下香椿苗的生长动态[J]. 西北农业学报,2010,19(6):115–119.
- [42]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.
- [43]黄文静,杨光柱,郑丽萍,等. 不同光质对火龙果胚培养苗生长发育的影响[J]. 中国果树,2014(4):46–49,后插2.
- [44]冯博,徐程扬. 光照对植物体内碳氮分配作用的机理研究进展[J]. 吉林农业科学,2014,39(5):18–22,42.
- [45]Torres A P,Lopez R G. Photosynthetic daily light integral during propagation of *Tecoma stans* influences seedling rooting and growth [J]. HortScience,2011,46(2):282–286.
- [46]张毅华,张晓燕,崔瑾. 光强对黑豆芽苗菜生长和营养品质的影响[J]. 中国蔬菜,2013(16):49–54.
- [47]肖苏琪,王冰华,曲梅,等. 冬春季育苗温室补光光强对黄瓜幼苗质量的影响[J]. 中国蔬菜,2018(10):40–45.
- [48]方舒玲. 光强和营养液浓度对水培生菜生长及养分利用效率的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [49]林魁,黄枝,林碧英,等. 光强和红蓝光配比对瓠瓜幼苗生长及生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(3):517–525.
- [50]田发明. 光环境对甜椒生长产量及生理代谢的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2013.
- [51]简敏菲,刘琪璟,朱筠,等. 九连山常绿阔叶林乔木优势种群的种间关联性分析[J]. 植物生态学报,2009,33(4):672–680.
- [52]韩金龙,单成钢,王志芬. 不同遮光处理对9种药用植物光合速率及产量的影响[J]. 农学学报,2018,8(10):57–60.
- [53]李丽丽. 不同光照处理下芍药的光合生理研究[D]. 泰安:山东农业大学,2016.
- [54]曾至诚. 光强对鱼腥草光合特性与化学成分的影响[D]. 长

- 沙:湖南大学,2012.
- [55]陈黎明,罗美佳,夏鹏国,等. 光强对三七生长、光合特性及有效成分积累的影响[J]. 时珍国医国药,2016,27(12):3004-3006.
- [56]杨有芹,李登飞,王力,等. 红雉凤仙花形态与光合特性对光强的响应及其耐阴性评价[J]. 四川林业科技,2019,40(1):5-14.
- [57]曾小华. 遮阴对野生峨眉凤仙花的影响[D]. 雅安:四川农业大学,2016.
- [58]于海业,孔丽娟,刘爽,等. 植物生产的光环境因子调控应用综述[J]. 农机化研究,2018,40(8):1-9.
- [59]武冲,张晓敏,尹燕雷,等. 遮阴对红叶樱花光合速率和叶绿素荧光参数的影响[J]. 山东农业科学,2017,49(2):48-53.
- [60]马焕香,蔡永伟. 光照对邹平水杏生长发育关系的影响分析[C]//第二十八届中国气象学会年会论文集,2011:1-4.
- [61]张珊珊,杨文忠,康洪梅,等. 光强和土壤含水量对云南蓝果树幼苗生长及光合特征的影响[J]. 东北林业大学学报,2018,46(3):16-23.
- [62]尹魁林,张琼. 不同因素对冬枣试管苗过渡移栽成活率的影响[J]. 落叶果树,2014,46(2):8-10.
- [63]Kang J H, Krishnakumar S, Atulba S L S, et al. Light intensity and photoperiod influence the growth and development of hydroponically grown leaf lettuce in a closed type plant factory system[J]. Horticulture, Environment and Biotechnology, 2013, 54(6):501-509.
- [64]吴云平,朱信,王瑞,等. 利用弱光延长光照时间对温室烟苗光合作用与生长的影响[J]. 中国烟草学报,2011,17(5):59-63.
- [65]韩文,郭鹏飞,张坤,等. 弱光条件下不同补光方式对设施番茄幼苗生长的影响[J]. 新疆农业科学,2018,55(4):655-663.
- [66]高建敏,徐立青,屈婷,等. 光质及光周期对南瓜砧木幼苗生长影响的研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(12):78-82.
- [67]查凌雁,刘文科. LED 红蓝光质比及其光周期对樱桃萝卜品种生长与产量的影响[J]. 照明工程学报,2017,28(6):84-86,91.
- [68]Haque M S, Kjaer K H, Rosenqvist E, et al. Recovery of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) leaves from continuous light induced injury[J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 185:24-30.
- [69]何蔚,杨振超,蔡华,等. 光质调控蔬菜作物生长和形态研究进展[J]. 中国农业科技导报,2016,18(2):9-18.
- [70]刘晓英,徐志刚,焦学磊,等. 可调 LED 光源系统设计及其对菠菜生长的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(1):208-212.
- [71]马超. 光环境调控对绿瓣型大豆芽苗菜生长和品质的影响[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [72]谷丰收. 基于光合特性的药用植物适应性分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2018.
- [73]赵姣姣. 桔梗设施无土栽培氮营养与光照条件研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
- [74]兰树斌. 紫苏光周期反应与类 *LFY* 基因 cDNA 的克隆[D]. 海口:海南大学,2008.
- [75]强晓霞. 大麻性别分化的生理学研究[D]. 南京:南京农业大学,2012.
- [76]吕永平,陈志,李坤峰,等. 光照环境对大花月季组织培养的影响[J]. 浙江农业学报,2017,29(8):1297-1304.
- [77]洪艳,陈之琳,戴思兰. 切花菊‘丽金’响应光照诱导成花特性研究[J]. 北京林业大学学报,2015,37(3):133-138.
- [78]Higuchi Y, Sumitomo K, Oda A, et al. Day light quality affects the night-break response in the short-day plant chrysanthemum, suggesting differential phytochrome-mediated regulation of flowering[J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169(18):1789-1796.
- [79]毛洪玉,顾钊宇,祝朋芳. 不同光周期处理对菊花 C029 花芽分化及开花的影响[J]. 西北植物学报,2010,30(10):2074-2080.
- [80]韩婧,吴益,赵琳,等. 光周期对促成栽培芍药生长开花和叶绿素荧光动力学影响[J]. 北京林业大学学报,2015,37(9):62-69.
- [81]李程,裴忠孝,甘林叶,等. 光周期对春石斛开花及多胺含量的影响[J]. 植物生理学报,2014,50(8):1167-1170.
- [82]赵耀,吕晋慧,陈阳,等. 3 种短日照依赖型地被菊光周期调控研究[J]. 山西农业大学学报(自然科学版),2013,33(1):22-26.
- [83]邝琦,王文通,乔志钦,等. 21 个切花菊品种的光周期与花期调控研究[J]. 安徽农业科学,2011,39(7):3861-3862,3866.
- [84]朱开元,刘慧春,周江华,等. 延长光周期对罗汉松和鸡爪槭苗期生长及养分吸收利用的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2016,42(2):190-198.
- [85]李冬梅. 光周期诱导设施桃树休眠的生理生化变化及蛋白质组学初探[D]. 泰安:山东农业大学,2012.
- [86]孔琼,袁盛勇,刘双芹,等. 枇杷拟盘多毛孢生物学特性研究[J]. 河北农业大学学报,2010,33(2):84-87.
- [87]刘国琴,郑鹏华,滕元文. 落叶果树芽休眠相关基因的研究进展[J]. 果树学报,2012,29(5):911-917.
- [88]张晓伟. 光照对果树生理生化的影响及其利用[J]. 防护林科技,2015(1):73-76.
- [89]黄静艳,李臣,李欢,等. 光照度和光周期对水培薯蓣菜品质的影响[J]. 江苏农业学报,2018,34(3):630-635.
- [90]王磊,张劲峰,景跃波,等. 暗期间断在植物生长发育中的应用研究[J]. 西部林业科学,2011,40(4):100-105.
- [91]刘晓英,焦学磊,徐志刚,等. 不同红蓝 LED 光照强度对樱桃番茄幼苗生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 南京农业大学学报,2015,38(5):772-779.