

光照对农林植物生长影响及人工补光技术研究进展

王建平¹,王纪章¹,周 静¹,贺 通¹,李萍萍^{1,2*}

(1.江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室,江苏 镇江 212013;
2.南京林业大学生物与环境学院,江苏 南京 210037)

摘要:光照是影响植物生长最重要的因素之一,近年来随着补光技术越来越广泛地应用于设施园艺与苗木生产中,国内外关于光照对植物生长的影响及人工补光技术的研究越来越多。首先综述了光照对植物的多方面影响,包括不同光照强度、不同光质(如红蓝光、白光、红外光和紫外光及其组合)、光周期等对植物光合作用及形态建成的影响,以及不同类型的农林植物对光照的反应差异。其次,总结了补光调节技术与策略研究进展,即根据光环境对植物生长的影响规律,设计光强、光质调节与补光效率调节技术。最后,就补光技术发展的方向与重点进行了展望,认为应将光源选型、光照在植物内部作用机理和多环境因素对植物的协同作用等方面作为今后提高补光效率的研究重点。

关键词:植物生长;光照强度;光周期;补光技术;红蓝光

中图分类号:S728 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2006(2020)01-0215-08



Recent progress of artificial lighting technique and effect of light on plant growth

WANG Jianping¹, WANG Jizhang¹, ZHOU Jing¹, HE Tong¹, LI Pingping^{1,2*}

(1.Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2.College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Light is the most significant factor in the regulation of plant growth. With the widespread use of lighting technique in plant flow line production and nursery stock production, the effects of plant lighting and the use of artificial lighting technique for promoting plant growth have been studied constantly and gradually. Accordingly, the present article reviews the effects of light (e.g., intensity, quality and photoperiod) on plants. Light intensity, for example, affects the photosynthetic and growth rates of plants, whereas light quality affects seed germination, morphogenesis, and photosynthesis, and photoperiod affects morphogenesis and photosynthesis. The article also reviews recent progress in artificial lighting methods and strategies, such as the reduction of light waste and the development of dynamic lighting that promotes plant growth, and current trends in the development of lighting technique. That is to take light source, mechanism of light, and multi-factor influence to plant as research focus.

Keywords: plant growth; light intensity; photoperiod; lighting technology; blue-red lighting

光照作为光合作用的能量来源是影响植物生长的重要因素之一,光强、光质、光周期等都会对植物生长发育和形态建成产生较大影响。近年来,设施农业在我国得到很快的发展,为了促进植物更好地生长,在苗木、蔬菜、花卉等农林植物生产中

使用人工光源补光以及采用遮阳网遮阴来改善光照条件已越来越广泛,并取得了缩短植物生长周期、提高产量、改善其形态或提高其品质、抑制休眠、提高幼苗存活率等效果,同时,对于人工光照控制的研究也越来越受到重视。尤其是因为温室大

收稿日期:2018-06-25 修回日期:2018-11-24

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究重大项目(17KJA416002);江苏省重点研发计划项目(BE2018321);中国博士后基金项目(2015M580400);江苏省博士后基金项目(1501112B)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)。

第一作者:王建平(wangfromchina@163.com)。*通信作者:李萍萍(lipingping@uj.s.edu.cn),教授,ORCID(0000-0001-8215-6209)。

引文格式:王建平,王纪章,周静,等.光照对农林植物生长影响及人工补光技术研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(1):215-222.WANG J P, WANG J Z, ZHOU J, et al. Recent progress of artificial lighting technique and effect of light on plant growth[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2020, 44(1): 215-222. DOI:10.3969/j.issn.1000-2006.201806033.

棚内的光强比露地低,弱光常常是影响作物光合作用及生物量积累的重要限制因子,因此作为提高室内光强主要途径的补光技术研究也越来越深入,人们将许多种不同类型的光源如荧光灯、金属卤化物灯、高压钠灯、LED 等应用于植物补光,并从中发现了 LED 光源有光谱可调、发光效率高、发热低、寿命长等优点^[1],在植物工厂补光中得到广泛应用。笔者对近年来国内外有关不同光照条件对植物生长的影响及植物人工补光技术的研究进展进行了总结和展望。

1 光照对农林植物生长发育的影响

1.1 光照强度对植物的影响

光照强度是影响植物光合作用最为重要的因子,在植物生理研究领域一般使用光量子通量密度(photosynthetic photon flux density, PPFD)来衡量光照强度。在光合作用的光补偿点和光饱和点之间,植物净光合速率随着光强而提高。植物生长的最适光辐射强度区间并不固定,它会随着植物种类、品种和生长环境的变化而变化,但大体分布于 200~1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ^[2]。

温室主栽的蔬菜作物中,果菜类作物生长的适宜光强都较高。文献[3-6]的研究结果表明,果菜类作物在正常生长条件下,光饱和点为 1 300~1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光补偿点为 30~50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,进行低温、弱光等逆境处理后,光饱和点下降,补偿点提高,因此光合作用速率下降。张志刚等^[6]的研究却认为在低温、弱光及盐胁迫下,光补偿点和饱和点都下降。由于果菜类作物的光补偿点和饱和点都较高,因此人工补光提高光强后,作物的光合作用速率提高,株高、茎粗和叶面积生长量与叶绿素含量会随着光强增加而显著增加,坐果率和果实纵横径生长速度也得到显著提高^[7-8]。叶菜类作物生菜的适宜光强较低。李萍萍等^[9]研究表明,当温度在 25℃、光辐射强度在 594 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,生菜可以达到光合作用的最大值;Fu 等^[10]研究也发现,生菜的地上部分鲜质量随着光强的增加先上升再下降,400~600 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 是综合考虑生菜产出投入的较优区间。

有关树木和花卉与光照强度的关系也有不少研究。刘欣欣等^[11]对浙江地区 15 个树种的研究结果表明,苦槠的光饱和点最大,达 1 780.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,浙江楠最小为 1 310.4 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,9 个阔叶树种光饱和点排序为苦槠>东南石栎>竹柏>乌桕>杜英>石栎>木荷>乌冈

>浙江楠,3 个针叶树种的光饱和点大小排序为水杉>红豆杉>马尾松,3 种灌木的光饱和点为美丽胡枝子>红花木>红叶石楠,光饱和点与最大净光合率之间呈现一定的正相关性。这一结果与 Wu 等^[12]在杨树上得到的成熟叶片达到光合作用最大值时所需的光辐射强度为 1 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的结论很接近,与果菜类作物的光饱和点也比较接近。陈月华等^[13]对长沙地区 19 种园林植物光合特性进行了研究,结果表明不同种类植物之间差异很大,乔木中以复羽叶栎树的光饱和点最高,达到 1 515.24 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,最低为玉兰的光饱和点[572 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$];灌木中以杜鹃的光饱和点最高,达到了 1 260 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,而八角金盘、洒金东瀛珊瑚光饱和点处于较低水平,分别为 327.84、391.80 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,其光补偿点也仅为 8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;草本植物吉祥草最低,仅有 247.82 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。由于树木在苗期大多比较耐阴,因此有关遮阴处理与苗木生长之间关系的研究较多,如李冬林等^[14]研究了光照强度对浙江楠苗木生长的影响,表明全光和弱度遮阴条件下,苗木具有较大的净光合速率,苗木生长旺盛,生物量增加。葛永金等^[15]研究表明,在 50%适度的遮阴条件下,3 种浙江楠苗木的总生物量随着光强升高而增加,但光强升高到一定程度总生物量反而下降。张放等^[16]对红皮云杉幼树在不同光环境下的生长研究发现,幼树在透光 70%处理下净光合速率值最大,偏弱或偏强的光照不利于树苗的光合作用,但透光度较小光补偿点也较小,说明幼树有一定的弱光适应能力,不同光照条件下幼树的形态特征也存在差异。不同花卉对光强要求差异很大,有些植物如郁金香在遮光处理后生长较好,但也有些补光处理后可以促进生长。如张效平^[17]针对冬季温室内自然光照不足,唐菖蒲生长虽正常,但存在花芽大部分或全部败育的问题,全生育期采用高压钠灯补充 12 h、5 000 lx 光照试验,结果表明,唐菖蒲 3 叶期至开花期对光强很敏感,在此期间补光,可降低花芽败育率。

1.2 光谱能量分布(光质)对植物的影响

光谱能量分布即光质对植物的生长及光合作用发挥着显著的调节作用^[18-20],不同光质对苗木性状的影响也存在显著差异^[21]。关于红、蓝、白光及其比例对植物影响的研究较多。Lin 等^[22]研究表明,红、蓝、白光组合显著提高了生菜的生长、发育、营养物质、外观和食用品质;周成波等^[23]发现蓝光净光合速率提高 21.7%,地上部鲜质量可增加 10%,增加红光也能够提高光合性能;Poulet 等^[24]

对红、蓝光补光的比例进行了优选,发现红、蓝光比为 95:5 时可满足生菜正常生长,且可降低能源消耗,提高能源转换效率,较全光谱补光每单位生物累积量减少 50%;Jishi 等^[25]发现采用 LED 先后补光模式下生菜鲜质量增加,而光合量子通量密度 (PPFD) 的改变会促进植物生长。Hernández 等^[26]研究了在不同比例、红蓝光基础上加入绿光对黄瓜生长的影响,通过对单位叶面积叶绿素含量、净光合速率、气孔导度的测定,发现绿光的变化对黄瓜生长没有任何影响。

在苗木和花卉研究方面,韦秋梅等^[27]研究了 LED 单色光及红、蓝光组合培养对观光木根系生长的影响。结果表明:以红、蓝光比为 2:1 和蓝光处理较佳,根系总根长和根尖数分别是未处理的 2.6 和 1.5 倍。王自布等^[28]研究表明,蓝光和红光对白芨组培苗生长有显著促进作用,绿光的作用不明显。红光和黄光促进白芨生根组培苗的长高和生根,蓝光处理 35~45 d 对抗氧化酶基因表达具有促进作用,不同光质处理总体上提高了白芨氧化酶活性。杨海裕等^[29]对夜间大棚中欧洲云杉苗木进行 350 lx 弱光的光周期补光,结果表明:补光对抑制苗木早期休眠、促进生长的作用明显,不同补光处理苗木全质量是对照的 164%~429%,在白光、黄光、红光、绿光 4 种光源中以白光最佳。欧阳芳群^[30]用日光灯、日光色镝灯和碘钨灯 3 种光源对 10 个引自加拿大的云杉种源容器苗进行了补光处理试验。结果表明,日光色镝灯的处理效果最好,日光灯更经济方便。沈红香等^[31]采用白光、UVB、UVA、蓝光和红光等光质对郁金香进行补光处理,结果表明:不同光质补光对郁金香花朵形态无明显影响,但除白光外,其他补光处理均使郁金香提早开花并提高开花整齐度,红光和蓝光明显促进郁金香植株干物质向花朵分配的比例。此外,谢以萍等^[32]还通过大棚覆盖不同彩色薄膜来模拟不同光质对瓜叶菊生长发育的影响。结果表明:绿膜处理单株开花数最多,而红膜处理瓜叶菊花期最长,且花干物质分配指数也以红光处理最高(0.53),因而红膜的性状最优。

远红外光会直接影响光合作用,紫外光虽不属于有效光合辐射,也同远红外光一样会影响植物形态建成如叶面积扩展从而间接影响光合作用和植株净同化率^[33]。Demotes 等^[34]发现红光与远红外光及两者比例的变化会被植物光敏色素感知,对种子萌发、空间形态建成、开花、光合作用和植物营养成分等整个生命过程产生影响,精确的时间与位置

补光将有助于降低补光成本。Dierck 等^[35]则研究了菊花在不同光谱组合(远红外、红、蓝光)下的生长,发现在红光下芽的生长速度和平均芽长都得到了增加,在蓝光与远红外光组合下则呈现降低趋势,通过调节光质可控制花卉的形态。Huché 等^[36]研究了蓝光与紫外线光对植物发育不同阶段的生理影响,发现通过使用紫外光和红、蓝光相结合的方法可增加生物量、促进生长分枝和开花,使用紫外灯也能够改善植物对病原体和害虫的抗性,增加抗氧化剂等次生代谢产物的产生。

1.3 光周期对植物的影响

自然界中各种植物开花季节很有规律,受日照和黑夜时间长短变化制约,这种现象称为光周期现象。光周期还会影响植物的光合作用和光形态建成,调控和诱导植物生长,进而对植物的形态与果实营养含量产生影响。设施园艺生产中对光周期的控制主要表现在:为了促进提前开花对短日照植物进行遮光,对长日照植物进行补光;也有为提高光合作用强度或延长光合作用时间进行补光。一般光周期补光所需要的光强比较弱,而光合补光需要的强度比较高,至少在光补偿点以上。Demers 等^[37]的研究结果表明,温室番茄作物的最佳光周期为 14 h,光照时间长于 14 h 后番茄植株的生长和产量没有增加,而 20 h 及以上会导致叶黄病,甚至可能降低生长速度和产量。

光周期与温度共同作用影响了树木在不同季节的生长与休眠^[38],因此在苗木补光中,需要延长光周期来加快生长速度。张华丽等^[39]认为针叶树苗期生长缓慢,补光育苗是加速苗期生长的有效措施。杨燕萍等^[40]为濒危植物秦岭冷杉苗木进行夜间延长光周期补光,发现苗木的保存率、苗高与地径等指标均显著提高,人工补光不仅延长了幼苗的高生长期,还缩短了苗木培育年限,显著降低了苗木培育成本。张宋智等^[41]发现夜间补光显著促进了欧洲云杉幼苗的生长,延长光周期补光的效果最为突出。赵文英等^[42]研究了补光对多种云杉树种幼苗生长的影响,发现延长光照和间断补光可加快幼苗的生长,不同品种云杉对补光的反应也存在差异。王梓等^[43]以罗汉松当年生实生苗为对象,研究人工补光延长和施肥时添加寡糖的效果。结果表明:添加寡糖和延长光照处理地径和当年生叶长分别提高 17% 和 79%,苗木质量也相应提高;而单独添加寡糖处理无影响。欧阳芳群等^[44]对 10 个引自加拿大的黑云杉种源容器苗进行了补光处理试验。结果表明:光照处理可以抑制苗木休眠,促

进其持续生长,日光灯午夜补光 8 h 处理 135 d 的种源苗高可达对照的 5.47 倍,午夜连续补光 4 h、日落后连续补光 4 h 和午夜连续补光 1 h 的效果也较好;苗木光周期补光的光合有效辐射为在 $5 \sim 16 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。有关花卉的光周期补光也有报道^[45],光周期与温度也决定着花卉的花期。

2 补光技术与策略

人工补光技术研究的发展可追溯到 1860 年左右科学家将电灯用于培育植物^[46],1951 年已有纯人工补光试验研究,自 20 世纪 90 年代发光二极管(LED)作为一种新型光源逐渐被用于植物生长以来^[47],补光的研究与应用越来越受到重视。为了提高补光效果和降低人工植物补光成本,研究人员基于以上光强、光质与光周期对植物光合作用及其生长影响的理论进行了不同的补光技术与策略研究。

2.1 光强调节补光技术

为保证作物生长适宜的光照强度,研究人员开展了许多人工补光调节光强的研究。目前光强的调节方式主要包括调节光源与作物冠层距离和调节光源的发光强度两种方式。调节光源与作物冠层距离方式是根据光照强度与距光源距离呈二次方反比关系^[48],减小植物与光源间距离可显著减少光衰减。如赵静等^[49]设计了一种补光灯高度实时自动调节系统,可根据光传感器信号调节补光灯与植物间距离进而提供合适的光照环境。吴乐天等^[50]设计了一种通过驱动升降器调节补光灯高度的系统,来调节补光灯与植物间的垂直距离进而达到调节光强的目的,可促进植物的生长与形态发育,提高叶绿素含量,作物产出率可提高 30%,成熟期提前 15~20 d。此类方法旨在缩短补光距离,但气体放电灯等热辐射效应较大的光源近距离补光时会灼伤植物,而 LED 的低发热特性则使近距离人工植物补光得以实现,提高了光利用率。光源调节技术原理是通过调节光源的驱动电流、补光灯的数量等方式来实现,其调节方式相对简单。随着 LED 技术的发展,针对其发光原理,通过 PWM(脉冲宽度调制)方法调节光强,可以提高调节精度,减少能耗。如 Pinho 等^[51]研制了基于温室环境的动态控制光环境控制系统,用电量降低了 20%;张海辉等^[52]研发了一种面向设施农业的光质可调精确补光系统,这个系统与固定补光方式相比可节能 54%以上;Iersel 等^[53]采用 PWM 光照调节原理调节 LED 的光照,基于光合量子通量密度(PPFD)水

平开发了自适应光照调节装置,以降低光能消耗。

补光的目标是满足作物生长的需求,可将作物的光合作用作为反馈控制指标应用于光强的精确调控。如胡瑾等^[54]通过遗传神经网络构建作物叶片光照、温度和 CO_2 对气体光合速率之间的关系,通过人工鱼群算法建立了光照的最优调控模型;而叶绿素荧光技术作为探测植物光合作用状况的探针,具有快速、实时和无损的特点^[55],被逐渐应用于植物补光系统。纪建伟等^[56]利用叶绿素荧光仪 Mini-PAM 作为叶绿素荧光参数测量系统,开发了 LED 光源激发荧光的叶绿素荧光在线监测系统;李峰等^[57]以最大量子产量指标作为光照调节的依据,开发了基于 Mini-PAM 的番茄生长补光控制系统;Iersel 等^[58]设计了基于叶绿素荧光生物反馈的光照控制系统,分析了不同 ETR 下植物的 PS II 和 NPQ 变化情况,为提高光合利用效率、降低光抑制提供了依据。

2.2 光质调节补光技术

为调节配置适当的光质用于植物补光,研究人员设计了多种方法和系统,在强光条件下,可以通过改变作物接收的光质来实现调光,如 Ilić 等^[59]利用彩色遮阴网改变作物微生长环境,并观察了叶面积、叶绿素含量和果实质量等参数,发现光质调节显著影响了有机物合成累积速度及果实贮存时间。由于不同的光源具有不同的光谱范围,可以通过选择光源类型来满足作物补光的需求,如王峰等^[60]研究了花卉生产中高压钠灯、荧光节能灯、LED 农业专用灯等几种类型光源在温室环境下的配光曲线参数,发现 LED 光源在节能方面显现出极大优势,且花卉补光应按照花期等具体条件来设计配光曲线以有效利用光源。LED 具有单色性的特点,可以满足作物对红、蓝光吸收的需求,因此在光质补光中被广泛应用,如 Xu 等^[61]设计了一套以一定红、蓝光比例组合的 LED 补光系统,并研究了对樱桃番茄生长速率的影响,发现红蓝光补光系统大大提高了番茄生长速度。周益民等^[62]则设计了基于单片机的自动调节红蓝光质的 LED 补光系统,通过 PWM 方式调节红、蓝光质比,能够实现智能精确式补光。Li 等^[63]设计了以 ATmega128L 微控制器为核心的环境控制系统,除光质还可以调节光强、湿度和 CO_2 浓度等参数,其中光能有效利用率达到了 80%~90%。刘彤等^[64]还提出了一种基于 LED 的光量子总数恒定调节红蓝光光子数的人工光源配光设计方法,稳定了单位面积的光辐射量并对光质进行调节,可应用于单片机 ARM 等硬件控

制设备。刘晓英等^[65]也进行了 LED 光源系统的硬件与软件设计,可实现光质及光强、光周期占空比的调节,此系统可显著促进植物生长。Ahlman 等^[66]通过在线监测叶绿素荧光参数并以此为依据优化光谱分布,实现植物最大化生长。

2.3 补光效率调节技术

减小光源传播过程的光损耗可以显著提高光能利用率。从光源发出的光经过传播到达植物叶片被吸收转化为化学能会经历许多损耗,如空气中的光衰减和植物叶片与其他物体反射光衰减等。Yano^[67]对整个光传播过程的光衰减与能量传递效率进行了研究,结果表明,改善光在植物冠层的分布、减少无效补光区域和波动补光等都是有效提高人工植物补光效率的方法与策略。

在植物生长过程中,并不是所有叶片均能接收到光照,特别是高植作物和种植密度较大的植物,叶片受光不均匀。Massa 等^[68]指出,改善光在植物冠层的分布会有效提高冠层的光能截获率,原因在于光照射到植物叶表面之后部分光能会被叶片反射与折射。而且植物从幼体发育到旺盛期时,株高与叶面积会逐渐增加,光源的空间位置也需要随之改变以提高光能利用率^[69]。Ferentinos 等^[70]则提出了一种用于温室作物生产辅助照明系统优化设计的遗传算法,调节灯源布局、高度和功率等,可在不牺牲光强的前提下改善光均匀性,降低遮阳效果和投资成本。因此通过植物冠层补光可以提高补光的效率。Ibaraki 等^[71]也提出了一种基于冠层表面光强分布的补光效率评估方法,通过计算叶面图像像素值的 PPFD、叶面积及消耗的能量得出补光效率,此方法可用于指导光源的布局。在植物生长过程中,最常规的光照补光方式为在植株冠层顶部补光,这种补光方式对于叶菜类作物和低矮作物效果较好;而对于高秆类作物,作物底部的光照还是不足。近年来针对温室栽培的黄瓜、番茄等无限生长作物的冠层补光开展了研究。有关研究分析了顶部补光、顶部+冠层补光方式对周年生黄瓜的产量和果实品质的影响,结果表明通过冠层补光有效提升了黄瓜产量和品质^[72];Song 等^[73]分析了底部补光(USL)和冠层补光(ISL)方式对番茄的叶片光合作用特性、植物生长和果实产量的影响,结果表明在底部补光(USL)可以提高番茄的生长和产量。

减少无效补光区域对提高补光效率也有很大帮助,普通光源不加装任何聚光装置所发射出的光为散射光。对于植物照明而言,减少无效补光区域如植物间隙等区域可显著降低补光成本。Li 等^[74]

通过加装凸透镜使光斑覆盖于植物叶片周围,减少了无效区域补光并提高了光能利用率,节省了至少 50% 的能耗。

植物的光合作用效率会在恒温恒湿连续光照下出现规律性的波动,这为高效补光提供了思路与方法。现阶段的植物补光大都是提供连续光照给植物,但是由于光合作用速率波动,植物并不能充分利用这些光照,所以波动补光作为一种可以提高光照利用率来降低光源能量消耗的方法被提出。此外还有一些其他补光技术与策略,如 Kjaer 等^[75]研究了一套基于天气预报、电力价格和日光合辐射积分的补光控制系统,在并未大幅降低植物质量的前提下降低了 25% 的能耗。

3 展 望

1) 人工植物补光源类型的选择应紧随照明科学技术的发展,对新型光源发光原理和补光特性进行分析以将其应用于植物补光。例如一种很有潜力的有机发光二极管(OLED),相较 LED 而言 OLED 在发光效率、重量、发热与光谱范围方面均存在显著优势^[1],能否用于人工植物补光从而显著提高补光效率亟待研究。

2) 从植物内部机理入手可在本质上提高补光效率,而光照条件在植物内部以何种机理影响植物的相关理论知识则尚待完善。认识并掌握光强、光质、光周期和其他光环境参数对植物内部具体机制的影响,可提高植物补光效率。

3) 本研究主要集中于光照单因素对于植物光合作用及其生长的影响,而光照与温度、湿度和 CO₂ 浓度等其他环境因素之间有相互作用,多因素对目标的影响尤其是协同效应则需要进一步的研究,掌握多因素对光合作用的协同作用从而通过多目标优化可实现更高效率的人工植物补光。

参考文献(reference):

[1] 陈育明, 陈大华. 节能照明光源新进展[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 2016.

[2] BERKOVICH Y A, KONOVALOVA I O, SMOLYANINA S O, et al. LED crop illumination inside space greenhouses [J]. Reach, 2017, 6: 11-24. DOI:10.1016/j.reach.2017.06.001.

[3] 熊宇, 杨再强, 薛晓萍, 等. 遮光处理对温室黄瓜幼龄植株叶片光合参数的影响[J]. 中国农业气象, 2016, 37(2): 222-230. XIONG Y, YANG Z Q, XUE X P, et al. Effect of shading on photosynthetic parameters in greenhouse cucumber leaves[J]. Chinese Journal of Agrometeorology. 2016, 37(2): 222-230. DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2016.02.012.

[4] 郭泳, 李天来, 黄广学, 等. 环境因素对番茄单叶净光合速率的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 1998, 29(2): 127-131.

- GUO Y, LI T L, HUANG G X, et al. Effect of environment factors on the net photosynthesis rate of tomato leaf blade [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 1998, 29 (2): 127-131.
- [5] 吴雪霞, 陈建林, 查丁石, 等. 低温胁迫对茄子幼苗叶片光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(5): 185-189. WU X X, CHEN J L, ZHA D S, et al. Effects of low temperature stress on photosynthetic characteristics in leaves of eggplant seedlings [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(5): 185-189.
- [6] 张志刚, 尚庆茂. 低温、弱光及盐胁迫下辣椒叶片的光合特性[J]. 中国农业科学, 2010, 43(1): 123-131. ZHANG Z G, SHANG Q M. Photosynthetic characteristics of pepper leaves under low temperature, weak light and salt stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(1): 123-131. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2010.01.015.
- [7] 蒋欣梅, 刘在民, 于锡宏. 补光强度对冬季温室辣椒生长及光合特性的影响[C]//厦门: 中国园艺学会学术年会, 2015.
- [8] 由泉, 董然, 于锡宏, 等. 不同补光强度对冬季温室茄子生长的影响[J]. 长江蔬菜, 2015(10): 21-23. YOU Q, DONG R, YU X H, et al. Effects of different supplementary lighting intensities on growth of eggplant in winter greenhouse [J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2015 (10): 21-23. DOI: 10.3865/j.issn.1001-3547.2015.10.008.
- [9] 李萍萍, 胡永光, 赵玉国, 等. 叶用莴苣温室栽培单株光合作用日变化规律[J]. 园艺学报, 2001, 28(3): 240-245. LI P P, HU Y G, ZHAO Y G, et al. A study on daily variation of photosynthesis in greenhouse butterhead lettuce [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2001, 28(3): 240-245. DOI: 10.3321/j.issn: 0513-353X.2001.03.010.
- [10] FU W G, LI P P, WU Y Y. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 135: 45-51. DOI: 10.1016/j.scienta.2011.12.004.
- [11] 刘欣欣, 张明如, 温国胜, 等. 浙江省常见 15 个树种的光合特性[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(2): 173-179. LIU X X, ZHANG M R, WEN G S, et al. Photosynthetic characteristics for fifteen potted seedlings common to Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2012, 29(2): 173-179. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0756.2012.02.004.
- [12] WU Q Q, LIU Y, FANG S Z, et al. Photosynthetic response of poplar leaves at different developmental phases to environmental factors [J]. Journal of Forestry Research, 2017, 28(5): 909-915. DOI: 10.1007/s11676-016-0358-3.
- [13] 陈月华, 廖建华, 覃事妮, 等. 长沙地区 19 种园林植物光合特性及固碳释氧测定[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(10): 116-120. CHEN Y H, LIAO J H, QIN S N, et al. Studies on photosynthetic characteristics and carbon fixation and oxygen release capabilities of 19 garden plants in Changsha area [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(10): 116-120.
- [14] 李冬林, 向其柏. 光照条件对浙江楠幼苗生长及光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28(5): 27-31. LI D L, XIANG Q B. Effects of light condition on the growth and photosynthetic characters of *Phoebe chekiangensis* seedlings [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2004, 28(5): 27-31. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.2004.05.007.
- [15] 葛永金, 刘跃钧, 高伟, 等. 不同光照强度下楠木属 3 个树种苗木的形态响应与适应[J]. 江西农业大学学报, 2014, 36(1): 109-114. GE Y J, LIU Y J, GAO W, et al. Morphological responses and adaptation of seedlings of three tree species of *Phoebe nees* to different light regimes [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2014, 36(1): 109-114. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2286.2014.01.017.
- [16] 张放, 胡万良, 孔祥文. 红皮云杉幼树不同光环境下生理生态特征研究[J]. 辽宁林业科技, 2003(5): 1-4, 34. ZHANG F, HU W L, KONG X W. Preliminary study on major eco-physiological characteristics of spruce seedlings under different light environment [J]. Liaoning Forestry Science and Technology, 2003(5): 1-4, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1714.2003.05.001.
- [17] 张效平. 光照强度对唐菖蒲花芽发育的影响[J]. 南京农业大学学报, 1990, 13(4): 35-38. ZHANG X P. Effect of light intensities on development of flower-bud of gladiolus [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1990, 13(4): 35-38.
- [18] SMITH H. Light quality, photoperception, and plant strategy [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 481-518. DOI: 10.1146/annurev.pp.33.060182.002405.
- [19] LI Q, KUBOTA C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 59-64. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2009.06.011.
- [20] SHIN K S, MURTHY H N, HEO J W, et al. The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30(3): 339-343. DOI: 10.1007/s11738-007-0128-0.
- [21] 欧阳芳群, 蒋明, 王军辉, 等. 补光对欧洲云杉苗木生长的生理影响研究[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(1): 50-58. OUYANG F Q, JIANG M, WANG J H, et al. Effects of supplemental lighting on growth and physiological responses of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) from different provenances [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(1): 50-58. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150009.
- [22] LIN K H, HUANG M Y, HUANG W D, et al. The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. *capitata*) [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 150: 86-91. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.10.002.
- [23] 周成波, 张旭, 刘彬彬, 等. 补光光质对叶用莴苣光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, 51(12): 2255-2262. ZHOU C B, ZHANG X, LIU B B, et al. The effect of supplementary light quality on physiological characteristics of lettuce [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(12): 2255-2262. DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2015.0507.
- [24] POULET L, MASSA G D, MORROW R C, et al. Significant reduction in energy for plant-growth lighting in space using targeted LED lighting and spectral manipulation [J]. Life Sciences in Space Research, 2014, 2: 43-53. DOI: 10.1016/j.lssr.2014.06.002.
- [25] JISHI T, KIMURA K, MATSUDA R, et al. Effects of temporally shifted irradiation of blue and red LED light on cos lettuce growth and morphology [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 198: 227-232. DOI: 10.1016/j.scienta.2015.12.005.
- [26] HERNÁNDEZ R, KUBOTA C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 121: 66-74. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2015.04.001.
- [27] 韦秋梅, 龙波, 张海东, 等. 不同光质 LED 对观光木苗木根系的影响[J]. 绿色科技, 2017(15): 121-124. DOI: 10.16663/j.cnki.lskj.2017.15.048.

- [28] 王自布, 杨维, 陈建, 等. 光质对白茋组培苗生理特性及酶基因表达的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(6): 665–670. WANG Z B, YANG W, CHEN J, et al. Effect of light quality on physiological characteristics and expression of antioxidant enzyme genes in *Bletilla striata* L. *in vitro*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2016, 24(6): 665–670. DOI:10.11926/j.issn.1005-3395.2016.06.010.
- [29] 杨海裕, 负慧玲. 补充光照对欧洲云杉苗木生长的影响[J]. 甘肃林业科技, 2006, 31(1): 26–28. YANG H Y, YUN H L. Impact of supplementary illumination on growth of *Picea abies*[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2006, 31(1): 26–28. DOI:10.3969/j.issn.1006-0960.2006.01.008.
- [30] 欧阳芳群. 不同云杉种及种源补光育苗技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008. OUYANG F Q. Techniques of supplemental light seedling of different species and provenances of *Picea asperata*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
- [31] 沈红香, 沈漫, 程继鸿, 等. 不同光质补光处理对郁金香生长和开花的影响[J]. 北京农学院学报, 2007, 22(1): 16–18. SHEN H X, SHEN M, CHENG J H, et al. Effect of supplemental lighting with different light quality on growth and bloom of tulip[J]. Journal of Beijing University of Agriculture, 2007, 22(1): 16–18. DOI:10.3969/j.issn.1002-3186.2007.01.005.
- [32] 谢以萍, 杨再强, 苏天星, 等. 不同光质对瓜叶菊生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2010(3): 53–56. XIE Y P, YANG Z Q, SU T X, et al. Effect of light quality on the development and growth of *Senecio cruentus* DC[J]. Northern Horticulture, 2010(3): 53–56.
- [33] PARK Y, RUNKLE E S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 136: 41–49. DOI:10.1016/j.envexpbot.2016.12.013.
- [34] DEMOTES-MAINARD S, PÉRON T, COROT A, et al. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 121: 4–21. DOI:10.1016/j.envexpbot.2015.05.010.
- [35] DIERCK R, DHOOGHE E, HUYLENBROECK J, et al. Light quality regulates plant architecture in different genotypes of *Chrysanthemum morifolium* Ramat[J]. Scientia horticulturae, 2017, 218: 177–186. DOI:10.1016/j.scienta.2017.02.016.
- [36] HUCHÉ-THÉLIER L, CREPEL L, GOURRIERE J L, et al. Light signaling and plant responses to blue and UV radiations; perspectives for applications in horticulture[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 121: 22–38. DOI:10.1016/j.envexpbot.2015.06.009.
- [37] DEMERS D A, DORAIS M, WIEN C H, et al. Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants and fruit yields[J]. Scientia Horticulturae, 1998, 74(4): 295–306. DOI:10.1016/s0304-4238(98)00097-1.
- [38] SINGH R K, SVYSTUN T, ALDAHMAH B, et al. Photoperiod- and temperature-mediated control of phenology in trees—a molecular perspective[J]. New Phytologist, 2017, 213(2): 511–524. DOI:10.1111/nph.14346.
- [39] 张华丽, 张金凤, 王军辉, 等. 针叶树补光育苗技术研究进展[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 107–111. ZHANG H L, ZHANG J F, WANG J H, et al. Advances in technology of growing seedlings by supplemental lighting in conifers[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(1): 107–111. DOI:10.3969/j.issn.1001-7461.2005.01.028.
- [40] 杨燕萍, 杨亚萍. 濒危植物秦岭冷杉补光育苗技术研究[J]. 中国野生植物资源, 2012, 31(4): 76–77. YANG Y P, YANG Y P. Study on the supplemental lighting system of endangered plant *Abies chensiensis*[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2012, 31(4): 76–77. DOI:10.3969/j.issn.1006-9690.2012.04.020.
- [41] 张宋智, 王军辉, 蒋明, 等. 欧洲云杉不同种源补光育苗试验[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(3): 75–79. ZHANG S Z, WANG J H, JIANG M, et al. Seedling culture of *Picea abies* by supplement light[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(3): 75–79.
- [42] 赵文英, 蒋明, 许娜, 等. 7个云杉树种1年生苗对补光的响应[J]. 甘肃林业科技, 2011, 36(1): 25–27. ZHAO W Y, JIANG M, XU N, et al. Response of supplemental lighting on 1 year old seedling of 7 species of *Picea asperata*[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2011, 36(1): 25–27, 39. DOI:10.3969/j.issn.1006-0960.2011.01.006.
- [43] 王梓, 赵燕, 魏红旭, 等. 补光和寡糖添加处理对罗汉松苗木生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(6): 157–161, 174. WANG Z, ZHAO Y, WEI H X, et al. Effects of oligosaccharide addition and extension of photoperiod on spring growth of buddhist pine seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(6): 157–161, 174. DOI:10.3969/j.issn.1001-7461.2016.06.27.
- [44] 欧阳芳群, 张守攻, 王军辉, 等. 补光处理对黑云杉不同种源苗木生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(5): 82–87. OUYANG F Q, ZHANG S G, WANG J H, et al. Effects of supplemental lighting treatments on seedling growth of varied provenances in black spruce[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(5): 82–87.
- [45] SONG Y H, ITO S, IMAIZUMI T. Flowering time regulation: photoperiod- and temperature-sensing in leaves[J]. Trends in Plant Science, 2013, 18(10): 575–583. DOI:10.1016/j.tplants.2013.05.003.
- [46] MANGON H. Production de la matière verte des feuilles sous l'influence de la lumière électrique[J]. Compt Rend Acad Sci Paris, 1861, 53: 243–244.
- [47] 崔瑾, 徐志刚, 邸秀茹, 等. LED在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249–253. CUI J, XU Z G, DI X R, et al. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8): 249–253. DOI:10.3321/j.issn.1002-6819.2008.08.055.
- [48] BICKFORD E D, DUNN S. Lighting for plant growth[M]. Ohio: The Kent State Univ Press, 1972.
- [49] 赵静, 周增产, 卜云龙, 等. 植物工厂自动立体栽培系统研发[J]. 农业工程, 2018, 8(1): 18–21. ZHAO J, ZHOU Z C, BU Y L, et al. Research and development of automatic transmission system of stereo cultivation bed[J]. Agricultural Engineering, 2018, 8(1): 18–21.
- [50] 吴乐天, 张彩虹, 王瑞, 等. 电动可调型补光系统的研制与应用[J]. 新疆农机化, 2015(3): 29–31. DOI:10.13620/j.cnki.issn1007-7782.2015.03.013.
- [51] PINHO P, HYTÖNEN T, RANTANEN M, et al. Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment[J]. Lighting Research & Technology, 2013, 45(3): 295–304. DOI:10.1177/1477153512444064.
- [52] 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. ZHANG H H, YANG Q, HU J, et al. Self-adaptive and precise supplementary lighting system for plant with controllable LED in-

- tensity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 153–158. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.027.
- [53] IERSEL M W, GIANINO D. An adaptive control approach for light-emitting diode lights can reduce the energy costs of supplemental lighting in greenhouses[J]. HortScience, 2017, 52(1): 72–77. DOI:10.21273/hortsci11385-16.
- [54] 胡瑾. 基于作物光合需求的设施光环境调控方法与技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016. HU J. Research on method and technology of light environment control of facility based on crop photosynthetic demand[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
- [55] MAXWELL K, JOHNSON G N. Chlorophyll fluorescence: a practical guide[J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(345): 659–668. DOI:10.1093/jxb/51.345.659.
- [56] 纪建伟, 解飞, HARBINSON J. LED 激发光源叶绿素荧光参数在线监控系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 145–149. JI J W, XIE F. Online monitoring system for chlorophyll fluorescence parameters using LED excitation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 145–149.
- [57] 李峰, 李征明, 李连凯, 等. 基于 MINIPAM 的番茄生长补光控制系统的软件设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2012, 43(2): 211–215. LI F, LI Z M, LI L K, et al. Software design of supplemental lighting control system for tomato growth based on MINIPAM[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(2): 211–215. DOI:10.3969/j.issn.1000-1700.2012.02.016.
- [58] IERSEL M W, WEAVER G, MARTIN M T, et al. A chlorophyll fluorescence-based biofeedback system to control photosynthetic lighting in controlled environment agriculture[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2016, 141(2): 169–176. DOI:10.21273/jashs.141.2.169.
- [59] ILIC Z S, FALLIK E. Light quality manipulation improves vegetable quality at harvest and postharvest: a review[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 139: 79–90. DOI:10.1016/j.envexpbot.2017.04.006.
- [60] 王峰, 李抒智, 张群力, 等. 花卉生产中花期调节补光灯配光方案设计研究[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(11): 1629–1631. WANG F, LI S Z, ZHANG Q L, et al. The light-shaped design research of lamp for adjusting the florescence of flower[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(11): 1629–1631.
- [61] XU Y C, CHANG Y X, CHEN G Y, et al. The research on LED supplementary lighting system for plants[J]. Optik, 2016, 127(18): 7193–7201. DOI:10.1016/j.ijleo.2016.05.056.
- [62] 周益民, 周国泉, 徐一清, 等. 基于单片机的温室植物 LED 补光系统设计[J]. 激光生物学报, 2013, 22(3): 214–219. ZHOU Y M, ZHOU G Q, XU Y Q, et al. A design of led light system used for greenhouse plants based on MCU[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2013, 22(3): 214–219. DOI:10.3969/j.issn.1007-7146.2013.03.004.
- [63] LI M, TIAN L G, CHEN Z L, et al. A kind of imitated environment system for plant growth based on LED light source[C]//Taiyuan, China: 2012 24th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 652–655. DOI:10.1109/CCDC.2012.6242981.
- [64] 刘彤, 刘雯, 马建设, 等. 可调红蓝光光子比例的 LED 植物光源配光设计方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 154–159. LIU T, LIU W, MA J S, et al. Distribution design method for LED plant light source with tunable ratio of red/blue photons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 154–159. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2014.01.020.
- [65] 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. LIU X Y, XU Z G, JIAO X L, et al. Design on LED flexible light system and its effect on growth of spinach[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 208–212. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.037.
- [66] AHLMAN L, BÅNKESTAD D, WIK T. Using chlorophyll a fluorescence gains to optimize LED light spectrum for short term photosynthesis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 142: 224–234. DOI:10.1016/j.compag.2017.07.023.
- [67] YANO A. Energy balance and energy conversion process of LEDs and LED lighting systems[C]//LED Lighting for Urban Agriculture. Singapore: Springer Singapore, 2016: 417–427. DOI:10.1007/978-981-10-1848-0_30.
- [68] MASSA G D, KIM H H, WHEELER R M, et al. Plant productivity in response to LED lighting[J]. HortScience, 2008, 43(7): 1951–1956. DOI:10.21273/hortsci.43.7.1951.
- [69] 孙爽. 植物工厂中光照效率提升途径简述[J]. 中国照明电器, 2016, (12): 40–46. SUN S. Methods of improving lighting efficiency in plant factory with artificial light[J]. China Light & Lighting, 2016, (12): 40–46. DOI:10.3969/j.issn.1002-6150.2016.12.010.
- [70] FERENTINOS K P, ALBRIGHT L D. Optimal design of plant lighting system by genetic algorithms[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2005, 18(4): 473–484. DOI:10.1016/j.engappai.2004.11.005.
- [71] IBARAKI Y, SHIGEMOTO C. Estimation of supplemental lighting efficiency based on PPFD distribution on the canopy surface[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2013, 69(2): 47–54. DOI:10.2480/agrm.69.2.1.
- [72] HOVI-PEKKANEN T, TAHVONEN R. Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber[J]. Scientia Horticulturae, 2008, 116(2): 152–161. DOI:10.1016/j.scienta.2007.11.010.
- [73] SONG Y, JIANG C Y, GAO L H. Polychromatic supplemental lighting from underneath canopy is more effective to enhance tomato plant development by improving leaf photosynthesis and stomatal regulation[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1832. DOI:10.3389/fpls.2016.01832.
- [74] LI K, LI Z P, YANG Q C. Improving light distribution by zoom lens for electricity savings in a plant factory with light-emitting diodes[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 92. DOI:10.3389/fpls.2016.00092.
- [75] KJAER K H, OTTOSEN C-O, JORGENSEN B N. Cost-efficient light control for production of two campanula species[J]. Scientia horticulturae, 2011, 129(4): 825–831. DOI:10.1016/j.scienta.2011.05.003.