

# 补光技术在蔬菜生产中的应用研究进展

王跃荣<sup>1,2</sup>, 陈鹏宇<sup>1</sup>, 王殿发<sup>1</sup>, 杨贵春<sup>1</sup>, 汪磊<sup>1</sup>

(1. 吉林省农业科学院 长春 130033; 2. 吉林农业大学园艺学院 长春 130118)

**摘要:** 北方冬春季节大部分地区的设施植物生长都存在缺光问题。塑料大棚、日光温室、连栋温室等设施受到冬春天气环境影响时, 自然光无法满足植物对光的需求, 导致植物生长不良, 是造成作物减产、绝收、品质下降的重要原因。我国北方冬春季节气温低、日照短, 光照是工厂化蔬菜育苗的主要限制因子之一, 蔬菜幼苗及嫁接苗在弱光环境下易出现弱苗、徒长、生长缓慢等现象, 严重制约了农业生产。为解决设施生产中光照不足的问题, 采用补光技术, 是现代农业的重要手段。主要从不同光环境对蔬菜幼苗生长的影响及冬春补光技术要点等方面进行综述, 旨在为蔬菜育苗和生产提供技术支撑。

**关键词:** 蔬菜; 补光技术; 应用

中图分类号: S63+S64

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)07-001-07

## Application research progress of supplementary light technology in vegetable production

WANG Yuerong<sup>1,2</sup>, CHEN Pengyu<sup>1</sup>, WANG Dianfa<sup>1</sup>, YANG Guichun<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, Jilin, China; 2. College of Horticulture, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China)

**Abstract:** The growth of facility plants in most areas of northern China in winter and spring has the problem of light shortage. When plastic greenhouses, solar greenhouses, multi-span greenhouses and other facilities are affected by winter and spring weather, natural light cannot meet the needs of plants for light, leading to poor plant growth, which is an important reason for crop yield reduction, crop failure and quality decline. In winter or spring season of northern China, the temperature is low and the sunshine is short. Light is one of the main limiting factors for industrial vegetable seedlings. Vegetable seedlings and grafted seedlings are prone to weak seedlings, overgrowth and slow growth in low light environment, which seriously restricts the agricultural production. In order to solve the problem of insufficient light in facility production, the use of supplementary light technology is an important means of modern agriculture. This paper mainly reviews the effects of different light environments on the growth of vegetable seedlings and the key points of winter and spring light supplementation technology, aiming to provide technical support for vegetable seedling raising and production.

**Key words:** Vegetable; Supplementary light technology; Application

地球上的生物绝大多数都离不开光。其中, 植物对光照的需求尤为明显, 光对植物的生长发育具有特殊作用, 影响着植物所有的生长阶段<sup>[1]</sup>。光照是植物生长发育的必备条件之一, 也是设施农业的一个基本要素, 光照不足使蔬菜含糖量降低, 产量下降, 抗性减弱, 贮藏和运输过程中容易衰老。西瓜、甜瓜光照不足, 会导致植株瘦弱, 叶片变黄、变薄、变软, 茎蔓徒长, 引起大量落花、落果<sup>[2]</sup>。但是, 光照过强也有危害, 番茄、茄子和辣椒在炎热

的夏天受强烈日照后, 会产生日灼病, 不能进行贮藏<sup>[3]</sup>。光的强度、光质、模式、均匀性、偏振和相干性均影响植物的产量和品质。在北方冬春季节, 塑料大棚、日光温室、连栋温室等设施中太阳入射角度小、日照时间短, 光线弱以及受到恶劣天气影响时, 自然光无法满足植物对光的需求, 进而导致植物生长不良。随着设施农业的发展, 使用人工光源控制光环境的照明技术在苗木、蔬菜、花卉等农林植物上得到广泛应用, 植物补光灯可以更好地促进植物

收稿日期: 2023-09-27; 修回日期: 2024-02-18

基金项目: 吉林省农业科技创新工程(CXGC2023RCG015)

作者简介: 王跃荣, 女, 在读硕士研究生, 研究方向为瓜类遗传育种与栽培。E-mail: 1974897254@qq.com

通信作者: 杨贵春, 男, 研究员, 研究方向为西甜瓜育种与栽培。E-mail: 18643433081@163.com

汪磊, 男, 研究员, 研究方向为西甜瓜育种与栽培。E-mail: 13356629@qq.com

生长、缩短育苗周期、提高幼苗健康指数。由此可见,补光灯对植物生长发育有显著的促进作用。笔者主要从不同光环境对蔬菜幼苗生长发育的影响及冬春季补光技术要点等方面进行综述,以期对蔬菜育苗和生产提供技术支撑。

## 1 光环境对蔬菜生长的影响

光环境包括光质、光强、光照时间和光照分布。合理控制光环境,同时注意光照的方向和均匀性,可以增强蔬菜对光能的利用率,进行正常的生长发育,进而提高蔬菜产量和品质。

### 1.1 光质对蔬菜生长发育的影响

光质是指具有不同波长的太阳光谱,太阳辐射光谱中波长为380~760 nm的光是最具有生理活性的波段,称为光合有效辐射。在此范围内的光对植物生长发育的作用也不尽相同。植物同化作用吸收最多的是红光,红光不仅有利于植物碳水化合物的合成,还能加速长日照植物的发育、提高叶绿素含量,蓝光促进蛋白质和有机酸的合成<sup>[4]</sup>。有研究表明,红光促进小白菜的细胞伸长生长,对茎的伸长有促进作用,提高赤霉素含量<sup>[5]</sup>。658 nm红光对增加紫叶生菜、紫菘及紫甘蓝3种蔬菜的叶长、叶柄长度、胚根和下胚轴长度均具有促进作用,同时红光可增加紫甘蓝和紫叶生菜的叶绿素、类胡萝卜素、可溶性总糖及淀粉含量<sup>[6]</sup>。并非所有的植物都喜好红光,657.1 nm的红光会使番茄根系生长受阻,根系活力下降,壮苗指数降低<sup>[7]</sup>。波长范围为600~700 nm的LED红光不利于黄瓜植株生长,降低叶片光合效率,阻碍叶片和叶绿体发育,并且延迟雌花开放时间<sup>[8]</sup>。峰值波长为450 nm的蓝光最有利于蕹菜茎的增粗、叶和根可溶性糖含量的积累<sup>[9]</sup>。585 nm黄光不利于人参叶片叶绿体发育,叶绿体形状多为纺锤形,数量少,体积较小<sup>[10]</sup>。豌豆芽苗菜在585 nm黄光处理下,下胚轴显著增长,芽苗菜中Na含量显著提高,有利于提高芽苗菜的产量及改善部分品质<sup>[11]</sup>。峰值波长为530 nm的绿光有利于蕹菜株高的提升,在一定程度上促进了蕹菜根可溶性蛋白、茎维生素C含量的提高<sup>[9]</sup>。520 nm绿光可提高番茄幼苗的根系活力<sup>[12]</sup>。而460~600 nm绿光处理则抑制香蕉组培苗生长<sup>[13]</sup>。

光质是影响植物光合作用的重要因素,植物进行光合作用的器官是叶片,叶绿体中的叶绿素最强吸收光波区有两个:叶绿素与类胡萝卜素在430~450 nm(蓝)吸收比例最大,叶绿素在640~660 nm

(红)吸收率高。前人研究表明,红蓝复合光处理下,番茄幼苗的净光合速率,蒸腾速率、胞间二氧化碳浓度和气孔导度均有显著提高<sup>[14]</sup>。红光有利于番茄幼苗细胞伸长、叶绿素含量增加,促进碳水化合物等干物质积累,使抗氧化酶活性提高,而蓝光可促进番茄非碳水化合物积累<sup>[15]</sup>。在红蓝光的基础上增加紫光能够促进辣椒幼苗同化产物向营养器官的运输和积累,对辣椒幼苗生长最为有利<sup>[16]</sup>。400~500 nm蓝光和红蓝光组合则能提高黄瓜叶片光合效率,促进植株形态建成,增加雌花数目,有利于植株生长<sup>[8]</sup>。红蓝光3:1(R:580~660 nm, B:440~540 nm)处理香蕉组培苗在株高、茎粗、根数、鲜质量等生长状况有明显变化,有利于组培苗的生长<sup>[13]</sup>。

### 1.2 光质对蔬菜营养品质的影响

蔬菜中富含蛋白质、脂肪、无机盐、维生素C、 $\beta$ -胡萝卜素等营养成分。光质可以通过调控维生素C合成和分解酶的活性影响蔬菜维生素C含量,而且对蛋白质和碳水化合物的合成具有一定的调控作用。

红光对生菜幼苗的叶面积增长和 $\beta$ -胡萝卜素积累有促进作用,预照红光后施加近紫外光,红光能增强抗氧化酶活性并提高近紫外光吸收色素的含量,从而减轻近紫外光对生菜幼苗的伤害,降低生菜中的硝酸盐含量<sup>[17]</sup>。不同波长的蓝光处理均可促进紫叶生菜次生代谢物的积累,450 nm蓝光处理的次生代谢产物含量最高,与白光相比较,花青素含量提高了128%,可溶性蛋白含量提高了40%,类黄酮含量提高了71%,总酚含量提高了13%<sup>[18]</sup>。用白光+蓝光处理不仅提高了大葱的可溶性糖、可溶性蛋白、游离氨基酸、粗纤维和重要硫化化合物的含量,而且大葱的适口性和营养价值也得到改善<sup>[19]</sup>。绿黄光防蛾灯照射处理后,总体上提高了大白菜的营养品质,维生素C含量显著升高。565~585 nm波段黄光处理大白菜游离氨基酸含量显著提高,515~535 nm波段绿光处理大白菜可溶性蛋白含量显著提高<sup>[20]</sup>。16 h 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 白光处理的芫荽维生素C含量最高<sup>[21]</sup>。研究表明,黄光能显著降低生菜中维生素C、类黄酮和总酚含量,并抑制莴苣地上部铵态氮的积累<sup>[22]</sup>。红蓝光处理显著提高菠菜维生素C、可溶性糖和可溶性蛋白含量,降低硝态氮和胡萝卜素含量<sup>[23]</sup>。红蓝组合光源有利于南瓜幼苗蛋白质的合成及游离氨基酸的积累<sup>[11]</sup>。芥豆芽苗菜在R1B5(660 nm红光、450 nm蓝光)红蓝光处理下的可溶性蛋白含量最高,叶绿素和类胡萝卜素含量在

各处理组间最大,维生素 C 含量随着蓝光比例的增大而提高<sup>[24]</sup>。红蓝光加白光的组合显著提高了莴苣叶片中的可溶性糖含量<sup>[25]</sup>。

### 1.3 光强对蔬菜生长的影响

光照强度依地理位置、季节变化、云量及雨量等的不同而呈规律性变化,即随纬度的增加而减弱,随海拔的升高而增强。由于不同植物对光的依赖程度不同,所以会形成不同的生态习性,根据作物对光照强度的生态类型可以分成阳性作物、阴性作物、耐阴作物。适宜的光照强度能够促进植物的生长和发育,提高光合速率,提高植物的产量和品质。然而,过强或过弱的光照都会对植物造成不良影响,甚至导致植物死亡。当光照度低于  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  会抑制番茄幼苗的生长,光照度高于  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  会导致番茄幼苗叶片发黄<sup>[26]</sup>。光强度过低 ( $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 也同样不利于生菜的生长,随着光强的提高,生菜的光合效率和产量有所提高<sup>[27]</sup>。 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  光照强度最适于苦苣生长,有利于叶绿素、类黄酮、总酚、维生素 C、可溶性蛋白的积累<sup>[28]</sup>。光强过强或过弱均不利于草莓植株生长,75%光强处理下草莓生长最好,叶片光合色素含量最高<sup>[29]</sup>。

### 1.4 光照时间对蔬菜生长的影响

光照时间影响植物花芽分化、抽薹开花、分枝习性、叶片发育、果实结实等,也影响地下贮藏器官如块茎、块根、球茎、鳞茎等的形成。光周期是昼夜周期中光照期和暗期长短的交替变化,直接影响植物生长发育,植物通过感觉光照的变化并作出相应的形态改变,进而影响植物抽枝长叶、开花结果、衰老死亡等变化<sup>[30]</sup>。根据对日照长短的需求可分为长日照作物、短日照作物、中日照作物、中间型作物。研究发现,光照时长延长至 14~16 h 时,可打破姜荷花休眠,实现周年生产;姜荷花分蘖数随光照时长的增加而显著提高,但是对开花数、开花时间未见影响<sup>[31]</sup>。水芹光照时间由每天 10 h 延长到 14 h,有利于株高增加、产量提升和品质改善<sup>[32]</sup>。长日照有利于芥蓝植株的生长,随着光照时间的延长,芥蓝叶色变深,叶片数增加,根的长度和数目均有所增加<sup>[33]</sup>。弱光条件下延长光照时长,可提高水培生菜的可溶性糖、花青素、维生素 C 和类胡萝卜素含量,改善水培生菜品质<sup>[34]</sup>。研究表明,光周期越长越有利于丝瓜幼苗根系的生长发育,光周期 14 h 处理的丝瓜根系鲜质量显著高于光周期 10、8 和 6 h 处理<sup>[35]</sup>。长光照会抑制青蒜苗假茎和叶伸长生长,但

能促进假茎的加粗生长,提高蒜苗的鲜质量<sup>[36]</sup>。8 h 补光处理对番茄始花期、始果期影响最大,随着补光时间的延长,番茄单果质量、单株产量都随之增加<sup>[37]</sup>。延长苦苣的光照时间,苦苣的光合色素、营养品质、根系活力均发生显著变化<sup>[38]</sup>。光暗周期 14 h/10 h 处理下的人参菜开花较迟,长势佳,光合能力强,品质及抗氧化能力最高<sup>[39]</sup>。延长光照时间显著提高莴苣的产量和品质,叶片长度可达  $28.55 \text{ cm}$ <sup>[40]</sup>。当甜椒幼苗延长光照时间达到  $24 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$  时,进行补光甜椒幼苗的茎粗和生物量分别比未补光的幼苗提高 23.33% 和 90.30%,说明延长光照时间可以促进甜椒幼苗的干物质积累,提高茎粗、根冠比,有利于培育壮苗<sup>[41]</sup>。光照 16 h 有利于阔叶苦苣和细叶苦苣的生长及营养物质的积累,提高叶绿素、类胡萝卜素和维生素 C 含量及根系活力<sup>[42]</sup>。缩短光照时间,增大光照强度,可以促进叶用莴苣花青素和类黄酮等代谢物质的累积及抗氧化酶活性的提高,增强抗氧化能力,有利于提高品质<sup>[43]</sup>。

### 1.5 光照分布对蔬菜生长的影响

在多数蔬菜中,植株顶端和株间需要的光照大不相同,光照分布均匀性对蔬菜生长非常重要。光照分布均匀性分为光质分布均匀性与光照强度均匀性<sup>[44]</sup>。

光照分布不均匀,光照强度高的区域植株生长快,光照强度低的区域植株长势矮小,并导致较高的植物遮阴低矮的植物,形成植株生长的不均衡。中心光照强度太高,会灼伤植物,光照强度太低,作物会生长缓慢,这都会降低作物的产量和品质。采用立体方式给黄瓜补光,与传统冠层补光相比,株高、茎粗分别显著增加了 8.03% 和 7.24%<sup>[45]</sup>。日光温室蔬菜种植密度较高,上层叶片会对下层叶片造成遮挡,影响中下层叶片的光合作用<sup>[46]</sup>。研究表明,补充绿光后,生菜底层叶片利用透射过的绿光进行光合作用,减缓底层生菜叶片的衰老<sup>[47]</sup>。

立体栽培层间补光能够改善层间光照环境和光照分布状况,使光照分布更加均匀,改变生菜生长形态,促进叶片伸展和根系生长,促进干物质积累,显著提高生菜产量和品质<sup>[48]</sup>。采用株间补光方式,可以改善温室番茄冠层光环境,提高叶片光合能力,且随着垂直冠层深度的增加,可以明显改善叶绿素分子状态,提高冠层及植株整体的光合能力,使番茄上部、中部和下部叶片的叶面积显著增加,光合作用增强,果实中可溶性固形物含量、可溶性糖含量、糖酸比、维生素 C 含量和维生素 E 含量

显著提高,生产中可通过提高番茄群体冠层中下部的光照环境,来促进番茄果实的膨大和单果质量的增加<sup>[49-51]</sup>。株间补光环境下可以设置更高的定植密度,既可以提高空间利用率,又能增加产量,实现更高的种植利润<sup>[52-54]</sup>。

## 2 植物补光技术的研究和应用

植物补光技术指利用人造光源通过发射适合于光合作用的电磁波谱来刺激植物生长,主要用于蔬菜、花卉、果树等,以达到调节产期、花期、周年生产等特定需求的技术。植物补光灯是依照植物生长的自然规律,根据植物利用太阳光进行光合作用的原理,使用灯光代替太阳光来提供植物生长发育所需光源的一种灯具。李玟等<sup>[55]</sup>采用紫外(UV-B)补光灯处理茄子苗期接种试验,发现紫外补光灯具有防治灰霉菌、炭疽菌和早疫病的作用,病叶率明显降低,病情指数极显著下降。茄果类植物在温室栽培条件下,采用人工补光技术可使成熟期提前10 d左右,产量提高30%。同时,植株生长更加健壮,显著提高其免疫和抗病能力,果实着色较好,大小均匀,畸形果少,品质优良,含糖量和维生素含量均得到一定程度的提高<sup>[56]</sup>。

瓜类是当前我国设施种植的主要作物之一,但由于设施内光照不足,产量和品质严重下降。研究表明,补充适当比例的蓝光能够促进甜瓜生长发育,促进地上、地下部干物质积累,抑制下胚轴伸长,增大根系表面积和体积及提高壮苗指数,并提高超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性,从而提升甜瓜幼苗健康程度;地上部质量的提高有利于幼苗光合作用,缩短有机物积累时间,而根系发育良好能够增加根系与基质的接触面积,更好地吸收利用水分和营养物质,增强离子交换能力,有利于甜瓜后期保持良好的生长状态,有效提高甜瓜产量以及糖分和香气物质的含量<sup>[57]</sup>。利用准单色冷光源——阳光灯可以促进洋香瓜生长发育,提早成熟上市5~7 d,增产15.3%,经济效益显著<sup>[58]</sup>。中心处光照度在4000~8500 lx、边缘处光照度在3000~5500 lx的LED灯处理白啄瓜嫁接苗,植株矮壮,生物量大,成活率高达100%,是最适合白啄瓜嫁接育苗的人工光源<sup>[59]</sup>。夜间红光补光处理能诱导西瓜对南方根结线虫的抗性,适用于设施栽培<sup>[60]</sup>。对设施黄瓜幼苗进行补光能够抑制苗期徒长,显著提高黄瓜品质及产量<sup>[61]</sup>。绿光能够提高黄瓜幼苗干物质积累和叶片叶绿素含量<sup>[62]</sup>。在红蓝组合光的基础上补充绿光能

明显提高净光合速率,促进干物质积累,提高黄瓜叶片中的叶绿素含量,改善其生长形态进而达到壮苗的效果<sup>[63-64]</sup>。红蓝光组合可明显促进丝瓜、南瓜、黄瓜、苦瓜、节瓜等幼苗的生长,提高壮苗指数<sup>[65-69]</sup>。

## 3 常用补光灯

传统的植物补光源主要有荧光灯、卤素灯、白炽灯等,他们最突出的缺点就是能耗高、光色单调、寿命短<sup>[70]</sup>,严重限制了人工光源在植物补光中的应用<sup>[71]</sup>。随着科学技术的发展,目前最常用的补光灯是LED灯、高压钠灯和稀土灯<sup>[72]</sup>。

LED灯具有绿色环保、能耗低、冷光源、安装方便等优点,目前对黄瓜、生菜、辣椒、芹菜等作物苗期的试验表明,LED补光能够明显促进植物的生长,提高壮苗指数、抗病性及光合能力,有助于达到育苗生产中培育壮苗的目的<sup>[73-76]</sup>。Leonardo等<sup>[77]</sup>比较了白炽灯、荧光灯和LED灯补光效果,结果表明,1000 m<sup>2</sup>区域内,夜间补光4 h,LED灯补光火龙果净收入最高。

高压钠灯具有光效高、照明面积大、透雾性好等优点,光线单一、持续性能差、寿命短等缺点,可见波段红光区域有正好位于植物对光源敏感波段范围内的较强红光输出,能大大提高植物的光合效率,更适用于植物生长周期的开花和结果阶段<sup>[78]</sup>。Gajc-wolska等<sup>[79]</sup>比较了高压钠灯和LED灯的补光效果,发现高压钠灯不仅促进番茄植株的生长,而且还提高了果实产量和品质。

稀土灯的主要成分是铜硒粉末,能形成特定光谱,为植物提供光能。稀土灯的发光很均匀,光谱连续性强,缺点是能耗多、寿命短。利用稀土灯补光较LED灯能更有效地提高白菜光合色素的含量<sup>[80]</sup>。

随着科学技术的发展,新型激光光源,不仅拥有极高的辐射能流、优良的单色性及极好的方向性,而且光电转换率能够达到30%,光合作用饱和点达到30 μmol,相比于上述光源,半导体激光(LD)发射角小,单色性好,相干性强<sup>[81]</sup>,可以高效激活植物光合作用,降低光合补偿点<sup>[82]</sup>。通过对植物产生生物效应的研究,发现合适剂量的激光可以提高植物的光合效率,促进植物生长发育,解决植物光照不足、植物缺少某些波段的光线等问题<sup>[83]</sup>。波长为632.8 nm的He-Ne激光辐照在一定程度上可以促进稻种的萌发和幼苗生长<sup>[84]</sup>。相同波长的He-Ne

激光照射分葱 128 min 后,对分葱的根长、株高和鲜质量等外部形态指标,以及叶绿素 a、叶绿素 b 和可溶性蛋白积累均表现出一定的促进作用<sup>[85]</sup>。

## 4 人工补光技术要点

### 4.1 光源选择

4.1.1 种植环境 在选择补光灯的时候要根据种植环境条件选择合适的补光灯。

4.1.2 作物种类 不同的作物对光照的要求是不同的,对瓜果类的作物和花卉,可以选择红蓝光补光灯,对茎叶生长、开花结果、防止徒长和着色等具有较好的效果。

4.1.3 作物生长要求 在选择补光灯功率的时候,要根据作物对光照强度和光照时间的要求,选择合适功率的补光灯。

### 4.2 植物所需的光照时间

根据天气和不同蔬菜品种而定。如甜瓜幼苗每天接受光照保持 8~12 h<sup>[86]</sup>;辣椒每天的光照时间在 10~12 h<sup>[87]</sup>;番茄每天在 16 h 的光照条件下最适宜生长<sup>[88]</sup>。

### 4.3 补光灯的距离和位置

如果补光灯仅是单纯的补光,可缩短与植物之间的距离,如果补光灯还有加温的效果,则要加大与植物之间的距离,以防对植物造成伤害。一般建议植物顶端距离补光灯控制在 0.5~1.0 m 之间,该距离不仅能让植物接受到充分的光照,还能使补光灯照射的面积更大,降低用灯成本。同时要根据植物生长的速度适当调节补光灯的高度,以控制植物补光灯在最合理的补光位置。

### 4.4 补光灯的光强

在作物刚移植后,尽量避免使用补光灯,待植物经过缓苗、正常生长后再使用补光灯。为植物补光时,要根据植物的种类、作物不同的生长阶段灵活设置。植物在各个生长阶段需要的补光程度不同,在发芽及育苗期需要的光照较弱,可以将补光灯距离升高以减少补光灯数量,避免电能浪费,在植物开花结果时再增加光照。

## 5 补光灯的应用及展望

补光技术是设施种植中的关键生产技术之一,有巨大的市场潜能。植物补光灯适用于温室大棚、家庭栽培和林下种植等场景<sup>[89]</sup>。随着设施栽培环境智能化的不断发展,补光系统逐渐被广泛运用。人工光源在现代农业生产中扮演着重要角色,不仅能

提供必要的光照条件,帮助植物适应不同环境和季节的变化,还能够节约能源,减少对环境的负面影响,是一种可持续发展的农业照明解决方案,对提高农产品产量与品质具有重要作用。飞利浦公司在设施发达的荷兰、芬兰、挪威、乌克兰等国建立了光源研发机构,利用补光灯在农业相关领域进行探索与创新,成功改变了植物工厂的栽培模式,促进农业产业高效发展<sup>[90-91]</sup>。

现代农业补光技术已成为设施农业发展的新引擎。特别是 LD 新型补光灯能够根据不同植物的形态特征及实际需求对光谱进行智能优化组合调整,在蔬菜工厂化育苗及生产中将得到广泛应用,也会应用在蔬菜育种实践中,为缩短育种周期、加快育种进程提供新的思路和方法。

### 参考文献

- [1] 任毛飞,毛桂玲,刘善振,等.光质对植物生长发育、光合作用和碳氮代谢的影响研究进展[J].植物生理学报,2023,59(7):1211-1228.
- [2] 王学梅,崔静英,谢华,等.弱光对温室西瓜株间小气候环境与生长发育的影响[J].宁夏农林科技,2011,52(12):225-226.
- [3] 席亚东,韩帅,张河庆,等.蔬菜病虫害发生特点及绿色防控对策[J].现代农村科技,2023(10):42.
- [4] 赵静,石卫华.光质和光强对植物生长的影响[J].现代园艺,2024,47(1):32-34.
- [5] 樊小雪,高文瑞,孙艳军,等.不同光质对小白菜叶片发育和光合作用的影响[J].信阳师范学院学报(自然科学版),2018,31(4):562-567.
- [6] 乔振升,李嘉其,冯家玉,等.光质对三种蔬菜生长特性及品质的影响[J].北方园艺,2023(21):8-14.
- [7] 孙娜.光质对番茄生长、生理代谢及果实产量品质的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2015.
- [8] 苗妍秀.黄瓜幼苗对红蓝光质响应的生理机制[D].北京:中国农业大学,2015.
- [9] 刘亚男.不同 LED 光质对水培莧菜生长、品质及相关酶的研究[D].福州:福建农林大学,2020.
- [10] 方平,杨鹤,牛晨,等.不同 LED 光质对人参种苗叶片生理特性和超微结构的影响[J].光谱学与光谱分析,2022,42(12):3864-3871.
- [11] 张欢.光环境调控对植物生长发育的影响[D].南京:南京农业大学,2010.
- [12] 朱鹿坤,陈俊琴,赵雪雅,等.红蓝绿 LED 延时补光对日光温室番茄育苗的影响[J].中国蔬菜,2019(10):51-57.
- [13] 杨俊杰,仇明月,郑涛,等.LED 光质对香蕉组培苗生长的影响[J].福建热作科技,2023,48(3):1-3.
- [14] 杨玉凯.不同 LED 光质夜间补光对番茄幼苗生长质量调控的研究[D].福州:福建农林大学,2018.
- [15] 崔瑾,马志虎,徐志刚,等.不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响[J].园艺学报,2009,36(5):

- 663-670.
- [16] 罗鑫辉,刘明月,刘玉兵,等.光质对辣椒幼苗生长、光合特性及氮代谢的影响[J].中国蔬菜,2020(8):33-40.
- [17] CHEN X L, XUE X, GUO W Z, et al. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplementary light provided by light-emitting diode[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 200: 111-118.
- [18] 熊伟任,雷雨田,杨永森,等.不同波长蓝光对紫叶生菜品质形成的影响[J].江苏农业科学,2023,51(1):143-148.
- [19] 高松.大葱对不同光质的响应机理研究[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
- [20] 蒋月丽,吕春芳,郝超群,等.防蛾灯照射对大白菜生长及营养品质的影响[J].南方农业学报,2020,51(2):370-375.
- [21] 张月昌.不同光质及光周期对茼蒿生长的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2023.
- [22] ZHANG T, SHI Y Y, PIAO F Z, et al. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2018, 134(2):231-240.
- [23] 张莹.不同环境因子对菠菜生长发育及生理效应的影响[D].上海:上海师范大学,2020.
- [24] 吕铮.不同LED光质对芥菜芽苗菜生长及品质的影响[D].长春:吉林农业大学,2023.
- [25] 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.
- [26] 丁娟娟.光强变化对番茄幼苗生长和光合特性的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- [27] 周成波,刘文科,查凌雁,等.LED红蓝光强对水培生菜生长以及有机碳和自毒物质分泌的影响[J].植物生理学报,2019,55(4):466-474.
- [28] 刘杰.光强和光周期对水培生菜生长及品质调控研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [29] 彭鑫.不同光照条件对草莓光合性能与果实品质的影响[D].杭州:浙江农林大学,2019.
- [30] 周贤玉,任海龙,孙艺嘉,等.光照时长对菜心生长特性的影响[J].中国种业,2022(9):89-92.
- [31] 何雪娇,史国强,张天翔,等.温度和光周期对姜荷花生长的影响[J].中国农学通报,2022,38(10):53-60.
- [32] 李政璞,佟静,王素娜,等.光周期对植物工厂水芹产量和品质的影响[J].中国农学通报,2022,38(31):38-42.
- [33] 黄忠凯.光周期对芥蓝生长发育的影响及相关基因的表达分析[D].福州:福建农林大学,2017.
- [34] 余意,刘文科.弱光条件下光质和光周期对水培生菜生长与品质的影响[J].中国农业气象,2015,36(6):739-745.
- [35] 吴雪霞,尚静,张圣美,等.不同光周期对丝瓜幼苗生长生理及其内源激素含量和性别分化的影响[J].西北植物学报,2019,39(10):1812-1818.
- [36] 王晓琴,郭小强,何家墩,等.不同光质的光周期对青蒜苗生长、光合特性及蔗糖合酶活性的影响[J].干旱地区农业研究,2023,41(4):151-158.
- [37] 祁娟霞,韦峰,董艳,等.不同补光时间对温室番茄生长发育的影响[J].江苏农业科学,2016,44(8):245-248.
- [38] 刘洋,张悦,蔡尚宸,等.LED补光对“新六号”苦苣品质的试验研究[J].农业工程技术,2021,41(28):66-69.
- [39] 严文一.光照对人参菜开花及品质调控作用的研究[D].四川雅安:四川农业大学,2020.
- [40] 王智勇,唐贝贝,王久兴,等.不同光照时间对叶用莴苣产量及品质的影响[J].农业工程技术,2021,41(25):66-69.
- [41] 董秀霞,刘瑞岭,安林林,等.不同光周期对甜椒幼苗生长的影响[J].农业科技通讯,2023(1):111-113.
- [42] 张悦.不同光质、光照强度及光周期对苦苣生长特性及营养品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2021.
- [43] 周璇.光照时长与光照强度对叶用莴苣生长及生理特性的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
- [44] 吴仁杰,季清,程敏,等.基于多光谱灯珠的LED植物灯光照均匀性优化设计方法[J].照明工程学报,2022,33(6):52-60.
- [45] 张仲雄,李斌,冯盼,等.基于植株需光差异特性的设施黄瓜立体光环境智能调控系统[J].智慧农业(中英文),2020,2(2):94-104.
- [46] LIU H, FU Y, WANG M, et al. Green light enhances growth, photorynthetic pigments and CO<sub>2</sub> assimilation efficiency of lettuce as revealed by 'knock out' of the 480-560 nm spectral waveband[J]. Photorynthetic, 2017, 55: 144-152.
- [47] 陈晓丽,杨其长,张馨,等.LED绿光补光模式对生菜生长及品质的影响[J].中国农业科学,2017,50(21):4170-4177.
- [48] 刘庆鑫,方慧,李宗耕,等.自然光植物工厂多层立体栽培补光对生菜产量和品质的影响[J].中国农业大学学报,2019,24(1):92-99.
- [49] 尤杰.补光方式对设施越冬番茄生长发育的影响及其经济性分析[D].南京:南京农业大学,2022.
- [50] 闫征南,王龙,谭能智,等.冬春季温室补光光强对番茄植株生长及果实品质的影响[J].农业工程技术,2022,42(13):18-22.
- [51] 闫文凯,张雅婷,张玉琪,等.LED株间补光对日光温室番茄产量及光合作用的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(7):132-138.
- [52] 丁小涛,姜玉萍,王虹,等.LED株间补光对番茄生长和果实品质的影响[J].上海农业学报,2016,32(6):48-51.
- [53] 杨冬艳,王丹,桑婷,等.日光温室番茄东西垄向模式下群体光环境及产量分布特征[J].中国农机化学报,2023,44(9):51-58.
- [54] 戴剑锋,李小段,刘湘伟,等.LED植株间补光对温室番茄生长发育、产量、光照和水分利用率的影响[J].农业工程技术,2022,42(7):54-59.
- [55] 李玟,傅敏杰,方月,等.新型UV-B补光灯对茄子幼苗生长、抗性生理及抗病性的影响[J].中国蔬菜,2022(5):60-67.
- [56] 王洪安.北方温室人工补光源特性及优化配置研究[J].吉林农业,2011(1):33-34.
- [57] 崔晓辉,郭小鸥,孙天宇,等.LED补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响[J].植物生理学报,2017,53(4):657-667.
- [58] 刘建辉,常宗堂,贺全民,等.日光温室洋香瓜补光栽培试验简报[J].陕西农业科学,2004(4):26-27.
- [59] 黄歆贤,邹文武,齐振宇,等.白啄瓜嫁接育苗时不同LED灯

- 及砧木品种的筛选[J].浙江农业科学,2021,62(5):959-962.
- [60] 赵仁宗,邓云,朱迎春,等.红光处理西瓜植株对南方根结线虫抗性的影响[J].中国瓜菜,2018,31(3):8-13.
- [61] 令狐伟,刘厚诚,宋世威,等.LED绿光补光对黄瓜和番茄幼苗生长的影响[J].农业工程技术,2015(10):37-38.
- [62] 赵飞,高志奎.光质对黄瓜幼苗绿色叶片叶绿素荧光的影响[J].中国农学通报,2011,27(10):161-167.
- [63] 萧自位,白学慧,肖兵,等.不同遮阴环境对小粒种咖啡光合作用的影响[J].热带农业科技,2023,46(2):69-74.
- [64] 高艺,董皓,刘厚诚,等.不同光质LED灯对丝瓜幼苗生长的影响[C]//中国园艺学会设施园艺分会.2013中国园艺学会设施园艺分会学术年会论文摘要集.2013:11.
- [65] 范雅,蔡红星,李霜,等.不同波长单色光对绿豆幼苗生长发育的影响[J].长春理工大学学报(自然科学版),2013,36(3/4):128-130.
- [66] 申宝营,丁为民,惠娜,等.夜间补光对黄瓜幼苗形态的调节与补光方式的确定[J].农业机械学报,2014,45(6):296-302.
- [67] 苏娜娜,鄂奇,崔瑾,等.LED光质补光对黄瓜幼苗生长和光合特性的影响[J].中国蔬菜,2012(24):48-54.
- [68] 童辉,彭莹,殷武平,等.LED灯补光对早春苦瓜幼苗生长的影响[J].上海蔬菜,2018(4):41-42.
- [69] 符敏,李振宇,叶树才,等.不同红蓝配比LED光源补光对节瓜育苗的影响[J].长江蔬菜,2022(2):6-8.
- [70] 李雅旻,张继业,张轶婷,等.LED补光灯在设施园艺中的应用[J].农业工程技术,2018,38(7):10-16.
- [71] 柴贵贤.LED在设施栽培中的应用和前景[J].种子科技,2022,40(7):142-144.
- [72] 钱舒婷.不同补光灯对设施草莓、番茄光合生长及产量品质的影响[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2018.
- [73] 刘新颖,杨其长,郑胤建,等.不同光质对愈合期黄瓜嫁接苗质量的影响[J].中国瓜菜,2023,36(6):106-113.
- [74] 代绿叶,钟梦江,韩莹琰,等.不同LED光质对紫叶生菜生理特性及品质的影响[J].北京农学院学报,2023,38(3):52-58.
- [75] 蒋宏华,谢玲玲,肖伟,等.不同光质对辣椒幼苗生长特征的影响[J].湖南农业科学,2023(7):40-45.
- [76] 李涵,朱为民,吴珏,等.不同光质处理对芹菜幼苗生长及叶片荧光诱导动力学的影响[J].北方园艺,2023(7):18-24.
- [77] SRIVASTAVA A K, HU C X. Fruit crops[M]. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [78] RUNKLE E, PADHYE S R, OH W, et al. Replacing incandescent lamps with compact fluorescent lamps may delay flowering[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 143: 56-61.
- [79] GAJC-WOLSKA J, KOWALCZYK K, METER A, et al. Effect of supplementary lighting on selected physiological parameters and yielding of tomato plants[J]. Folia Horticulturae, 2013, 25(2):153-159.
- [80] 赵金凤,刘倩倩,赵焕丽,等.稀土光源补光对白菜生长特性的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2015,32(2):108-111.
- [81] 邱志刚,沈萌萌,贾春荣,等.激光测距技术研究现状及发展趋势[J].激光杂志,2023,44(8):1-8.
- [82] 梁雪梅,贾鹏,秦莉,等.激光在土地保护、农作物生长及害虫防治领域应用研究进展[J].吉林农业大学学报,2021,43(2):130-137.
- [83] 万文昌,石明明,张彬,等.植物激光灯的研究进展[J].应用技术学报,2020,20(1):33-39.
- [84] 王晟宇,张宏伟,丁志美,等.He-Ne激光辐照对蒙自栽培优质稻发芽指标的影响[J].红河学院学报,2017,15(5):112-114.
- [85] 高波,张灿邦,蔡晓俊,等.He-Ne激光诱变对分葱外部形态及生理的影响[J].科学技术与工程,2014,14(1):14-18.
- [86] 董晓慧.望奎县优质富硒香瓜温室栽培技术分析[J].园艺与种苗,2020,40(11):19-20.
- [87] 殷琳毅,韩茹鑫,李进.夏秋季辣椒工厂化穴盘育苗技术[J].蔬菜,2018(12):54-56.
- [88] 鲍顺淑,刘庆鑫,武耘,等.珠海大型温室番茄长季节栽培模式补光设计研究[J].中国农学通报,2021,37(2):48-53.
- [89] 汤雄,王鹏,吕玲玲,等.LED植物照明灯具技术发展及应用现状[J].应用技术学报,2023,23(2):120-124.
- [90] 王佳淇,韦晓桐,何莹钰,等.LED补光系统对设施园艺作物的影响[J].浙江农业科学,2020,61(5):950-954.
- [91] 杨小玲,宋兰芳,靳力争,等.设施果菜补光技术应用现状与展望[J].北方园艺,2018(17):166-170.