

# 光合有效辐射日总量 (DLI) 对植物生长发育的影响

崔佳维<sup>1</sup>, 雷炳富<sup>1</sup>, 刘厚诚<sup>2,\*</sup>

(<sup>1</sup>华南农业大学材料与能源学院, 广东省光学农业工程技术研究中心, 广州 510642; <sup>2</sup>华南农业大学园艺学院, 广州 510642)

**摘要:** 光合有效辐射日总量 (Daily light integral, DLI) 是指一天中用于植物光合作用的光能总量。就 DLI 对植物生长发育的影响展开讨论, 总结其对植物种子萌发、植物营养生长和生殖生长阶段的影响, 以期在生产上设置合适的 DLI 提供借鉴和指导。弱光条件下提高 DLI, 可以促进植物的生长发育: 种子萌发阶段, 需光种子萌发率与 DLI 呈正相关; 营养生长阶段, 适当提高 DLI, 可以促进根系和地上部的生长, 提高生物量的积累; 生殖生长阶段, 提高 DLI 可以促进植物的花芽分化, 提高果实产量和品质。

**关键词:** 光合有效辐射日总量; 植物生长发育; 光调控

**中图分类号:** S 68; Q 945

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0513-353X(2019)09-1670-11

## Effect of Daily Light Integral on Plant Growth and Development

CUI Jiawei<sup>1</sup>, LEI Bingfu<sup>1</sup>, and LIU Houcheng<sup>2,\*</sup>

(<sup>1</sup>College of Materials and Energy, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center for Optical Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; <sup>2</sup>College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** Daily light integral (DLI) is the total amount of photosynthetic light delivered to plants each day. In this paper, the effects of DLI on the seed germination, vegetative growth and reproductive growth of plants were discussed, thus providing reference and guidance for setting up proper DLI in plant production. Increasing DLI under low light conditions could promote the growth and development of plants. The germination rate of photoblastic seed was positively correlated with DLI. Appropriately increasing DLI could enhance the growth of root and shoot, increase plant biomass. During reproductive growth stage, increasing DLI could be conducive to flower bud differentiation and increase both fruit yield and quality.

**Keywords:** daily light integral; plant growth and development; light control

植物的生长发育受光、温度、重力、水分和矿物质等的影响, 其中光的影响最大, 光照强度、光照时间和光质均对植物有重要影响。光照强度一般用光合光子量子密度 (Photosynthetic photon flux density, PPFD) 来表示。光照强度和光照时间分别作为光变量用于探究对植物生长发育的影响, 但

**收稿日期:** 2019-03-15; **修回日期:** 2019-08-04

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2017YFD0701504); 广州市科技计划项目 (201704020058, 201704020006)

\* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: liuhch@scau.edu.cn)

单一方面的光变量并不能完全反映植物对光的响应。光合有效辐射日总量 (Daily light integral, DLI, 单位为  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 指一天中用于植物光合作用的光积累量, 是 PPFD 和每日光照时间的乘积。DLI 可以较为完整地表示植物光合作用的程度和持续时间, 为探究植物对光的响应机制提供较为完善的参数 (Faust & Heins, 1993)。

全人工光照条件下, 植物所需光环境完全由人工光提供, 光照参数 (光照强度和每日光照时间) 由人为设定。合适的 DLI 有利于植物的生长发育, 在一定范围内提高 DLI 可以缩短作物的栽培时间, 提高生产效率。越来越多的研究表明, 温室大棚条件下补光有利于提高作物产量和品质 (孙娜 等, 2014; 吴鹏飞 等, 2016; 崔晓辉 等, 2017; 黄薪历, 2017; 王华硕, 2018), 在一定意义上补光即提高 DLI。外界的光照条件是动态变化的, 补光量也应随之变化, 但目前补光时间和强度设定一般靠经验, 如果能够确定作物合适的 DLI, 就可以根据外界动态的光照条件, 确定补光时间和强度, 在提高作物产量和品质的同时节约生产成本。

生产上采取调节光照强度或光照时间的方式改变 DLI, 植物在各个生长阶段对 DLI 的响应存在差异, 但都遵循一定的规律, 即在一定范围内提高 DLI, 可以改善植物的生长状况, 促进植物体营养物质的积累, 加速发育进程, 而超过一定范围, 促进效果趋于稳定或转变为抑制效应 (Wook et al., 2009; Garland et al., 2012)。

## 1 DLI 对种子萌发的影响

光一般不直接参与调控种子萌发, 而是作为刺激信号 (Pons, 2000; Finch-Savage & Leubner-Metzger, 2006)。根据种子萌发过程对光的不同响应, 可将种子分为需光性、忌光性和光中性 3 类。光促进种子萌发有时仅需几秒闪射, 有时则需要较长时间照射或反复瞬时曝光; 光抑制则一般需较长时间的曝光才能发生作用 (张敏 等, 2012)。种子从萌动到出芽所需要的时间也各不相同, 萌发较长时间的需光性种子需要考虑 DLI 对其的影响。在一定条件下, 一些受长期曝光影响的种子, 重复性短期曝光和长时间曝光效果相同 (Pons, 2000), 即具有能量累积效应, 种子得到的光量子相同, 发芽效果相同。例如光强相同的情况下, 香果树 (管康林, 1985a) 和泡桐 (管康林, 1985b) 种子在两次 4 h 感光中间黑暗 4 h, 萌发效果与连续 8 h 光处理相同; 在小子藨草和早熟禾的发芽试验中发现, 高光强短期曝光和低光强长期曝光处理下萌发率相同 (Ohadi et al., 2010)。一些种子需要 DLI 达到特定值时才能保证一定的发芽率, 并且发芽率随 DLI 的增加而提高。如: Volk 和 Bugbee (1991) 总结前人关于小麦萌发试验发现, 当 DLI 低于  $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 小麦叶片出生速率骤降; 鹅不食草种子的萌发率随光强和光周期的增加而提高, 并且日光期长度与发芽率、芽长和根长存在相关性 (张舒娜 等, 2016)。

DLI 由光照强度和光照时间两部分组成, 种子对两者的响应存在差异, 主效应并无定论, 有待进一步研究。如, 藨草种子的萌发率与光周期 (12 h/12 h、14 h/10 h、16 h/8 h) 无关, 而与光强相关, 其萌发率在 PPFD 为  $11 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的光强下明显高于  $5.5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时的 (Lindig-Cisneros & Zedler, 2001); 水青树种子的萌发率不受光周期的影响, 而在高光强 (1 000 lx) 下比低光强 (220 和 520 lx) 下高 (周佑勋, 2007)。又如, 在一定温度下, 两个桦树品种的种子萌发存在典型的光周期响应, 在较短的暗期下萌发率较高 (Vaartaja, 1956); 有些种子的萌发需一定的光周期, 每天给予 24 h 的全光照, 种子不能充分萌发 (杨期和 等, 2003; 周佑勋, 2007)。

种子萌发的需光量存在一定的阈值, 并非光强和光周期最大时发芽率最高。种子对光的响应在

品种间存在差异, 而且很大程度上取决于预处理和发芽环境, 包括温度、水分、层积与否和激素处理等 (Vaartaja, 1956; Pons, 2000; 王荷和刘燕, 2009; 张敏等, 2012)。

## 2 DLI 对植物营养生长阶段的影响

### 2.1 对苗期根系生长的影响

在扦插苗根系发育的试验中发现, 根系生长的不同时期, 所需的 DLI 不同。花卉植物在根系愈伤组织形成时期, 即根系萌动 8~10 d, 适宜的光强为  $100 \sim 200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 光周期为 12 h, 使 DLI 达到  $4 \sim 6 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; 在根系生长后期, 为实现理想的根系发育和生物积累量, 需要将 DLI 提高到  $6 \sim 8 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 适宜光强为  $200 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 光周期为 12 h (Dole & Hamrick, 2006; Lopez & Runkle, 2008)。

在实生苗或扦插苗育苗期提高 DLI 可以促进根系数量和生物量的积累 (Faust et al., 2005; Hutchinson, 2012b), 如随着 DLI 的升高, 矮牵牛和新几内亚凤仙的根系数量增加, DLI 从 1.3 上升至  $6.1 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 扦插 16 d 后的新几内亚凤仙 ‘Harmony White’、‘Harmony Magenta’ 和 ‘Celebrette Red’ 根系数量分别上升了 200%、108% 和 72% (Lopez & Runkle, 2008); 藿香、秋海棠、凤仙花、万寿菊、矮牵牛、鼠尾草、长春花和百日菊 8 种花坛植物的根部干质量随 DLI 的增加呈指数性增长趋势 (Faust et al., 2005); DLI 从 1.2 上升至  $12.3 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 马鞭草和双距花的根部干质量分别增加了 156% 和 1137% (Currey et al., 2012a)。但 DLI 对扦插苗根长的影响因物种的不同存在差异, 扦插 16 d 后的新几内亚凤仙的根长随 DLI 的升高而升高, 而 DLI 的变化不会影响任何矮牵牛品种的根系长度 (Lopez & Runkle, 2008)。

### 2.2 对地上部形态的影响

在 DLI 较低条件下, 植株容易出现徒长现象, 枝条细弱, 叶片较薄。随着 DLI 的升高, 植株的主茎变粗, 叶片变厚, 徒长现象减轻, 株形紧凑。

DLI 较低时植物会通过茎的伸长和叶面积的增大来捕获更多的光能 (Faust et al., 2005; Currey & Lopez, 2012b)。但这并不意味着株高和叶面积与 DLI 呈负相关的关系。很多研究表明, 植物的高度和 DLI 没有固定的关系, 不同种类间存在差异, 在室温较适宜 ( $22 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的情况下, 各种花坛植物的株高在各自的试验条件下与 DLI 的关系如表 1 所示。并且同种植物在不同环境下与 DLI 的关系也不尽相同, 如一串红的株高在环境温度  $14 \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 随 DLI 的升高而降低, 环境温度  $24 \sim 27 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 则随 DLI 的升高而升高 (Moccaldi & Runkle, 2007)。除温度影响外, 株高同时受光质、昼夜温差、水分、养分、种植密度等的影响 (Mohammed, 2012)。叶片数和叶面积与 DLI 的关系一般是在较低辐射条件下提高 DLI, 叶面积和叶片数会逐渐升高, 但超过一定范围, 叶面积和叶片数又会随之降低。一些草本花卉的变化趋势节点为  $10 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  左右 (Warner & Erwin, 2005; Wook et al., 2009; Garland et al., 2012)。叶面积在一定范围内随 DLI 的升高呈先上升后下降趋势的原因可能是, 在一定范围内提高 DLI, 有利于叶片的生长和形态的建成, 但是在更高的光照条件下, 植物通过降低叶面积的方式减少叶片的蒸腾作用, 以此获得高效率的辐射吸收能力和降低高光对光合系统的伤害 (Garland et al., 2012)。

表 1 花坛植物株高与 DLI 的关系  
Table 1 Correlation of plant height and DLI in bedding plants

关系 Correlation	植物种类 Plant species
正相关 Positive correlation	万寿菊 <i>Marigold</i> (Faust et al., 2005); 黄钟花 <i>Tecoma stans</i> (Torres & Lopez, 2011); 马樱丹 <i>Lantana camara</i> (Currey et al., 2012a); 双距花 <i>Diascia barberae</i> (Currey et al., 2012a)
负相关 Negative correlation	藿香 <i>Ageratum</i> (Faust et al., 2005); 矮牵牛 <i>Petunia</i> (Faust et al., 2005; Lopez & Runkle, 2008); 天使花 <i>Angelonia</i> (Hutchinson et al., 2012a); 龙面花 <i>Nemesia</i> (Hutchinson et al., 2012a); 蓝眼菊 <i>Osteospermum</i> (Hutchinson et al., 2012a)
先正相关后负相关 Positive correlation before negative correlation	鼠尾草 <i>Salvia</i> (Faust et al., 2005); 百日菊 <i>Zinnia</i> (Faust et al., 2005); 凤仙花 <i>Impatiens</i> (Faust et al., 2005)
无关 Independence	秋海棠 <i>Begonia</i> (Faust et al., 2005); 长春花 <i>Vinca</i> (Faust et al., 2005); 新几内亚凤仙 <i>Impatiens hawkeri</i> (Lopez & Runkle, 2008; Mohammed, 2012); 马鞭草 <i>Verbena</i> (Hutchinson et al., 2012a); 木茼蒿 <i>Argyranthemum frutescens</i> (Currey et al., 2012a); 草海桐 <i>Scaevola sericea</i> (Currey et al., 2012a); 天竺葵 <i>Geranium</i> (Currey & Lopez, 2015)

弱光条件下, 由于光能供给不足, 植物未能积累足够的干物质, 造成徒长现象。随着 DLI 的增大, 植物的茎粗有增大的趋势, 叶面积比有减小的趋势。黄钟花扦插苗的茎粗随 DLI 的增加呈线性上升趋势 (Torres & Lopez, 2011)。天使花、木茼蒿、双距花、龙面花、蓝眼菊、马鞭草和新几内亚凤仙的茎粗随着 DLI 的增加而增加 (Currey et al., 2012a; Currey & Lopez, 2015)。DLI 对一品红扦插条母株最上部的枝条茎粗有影响, 当 DLI 从 4 上升到  $10.6 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 茎粗随之从 5.8 mm 上到 7.6 mm; 较高的 DLI 可以增加一品红扦插条收获量, 理想的扦插条生产所需的 DLI 应该达到  $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  以上 (Chong et al., 2014)。叶面积比 (LAR = 叶面积/干质量) 可以间接表示叶片的厚度, 该值越低说明叶片越厚, 植株越健壮。随着 DLI 的升高, 藿香、秋海棠、凤仙花、万寿菊、矮牵牛、鼠尾草、长春花和百日菊 (Faust et al., 2005)、凤仙扦插条 (Currey & Lopez, 2012b)、矾根属植物 (Garland et al., 2012)、黄钟花苗 (Torres & Lopez, 2011) 和水培莴苣 (Gent, 2014) 的叶面积比呈下降趋势。说明 DLI 的提高可以促进单位面积叶片的结构物质和碳水化合物的构建和积累, 提高叶片的厚度和植株的健壮程度。此外, DLI 的提高对实生苗的节数有促进作用 (Pramuk & Runkle, 2005; Torres & Lopez, 2011), 但扦插苗的节数不受影响 (Moccaldi & Runkle, 2007; Currey & Lopez, 2015); 提高 DLI 可以促进矮牵牛苗期枝条数增加 (Mohammed, 2012), 但是提高扦插苗根系建成阶段的 DLI 对定植后枝条数的增加有抑制作用 (Lopez & Runkle, 2008; Hutchinson et al., 2012a)。矾根草的叶柄长度随 DLI 的升高逐渐降低, 冠幅也显著降低 (Garland et al., 2012)。鸡冠花、凤仙花和鼠尾草幼苗株形会随 DLI 的升高变得更为紧凑 (Pramuk & Runkle, 2005)。

### 2.3 对叶片展开和地上、地下部生物量积累的影响

DLI 的提高可以促进叶片的展开速率。随着 DLI 的升高, 非洲堇叶片的展开速率也随之提高, 当 DLI 超过  $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 展开速率趋于稳定 (Faust & Heins, 1993); DLI 的增加对一品红上部冠层叶片展开速率有促进作用, 对最底部冠层无影响; 冠层密度越大, 展开速率越小, 因此随冠层密度的增加而增加 DLI, 可达到较高的叶片展开速率 (Chong et al., 2014)。

通常情况下, 在弱光条件下提高 DLI 可以促进地上部生物量的积累。当给矮牵牛和三色堇后 2/3 生长期或整个生长期补充  $4 \sim 5 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  的 DLI 时, 地上部鲜质量显著提高 (Hutchinson et al., 2012a)。Gerovac 等 (2016) 研究发现, 紫甘蓝、京水菜和芥菜幼苗的鲜质量都随着 DLI 增加而逐步增加。风铃草的干物质积累和 DLI 存在正相关关系 (Kjaer et al., 2012)。天使花、木茼蒿、马樱丹、蓝眼菊和草海桐在 DLI 从 1.2 增加到  $12.3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  时, 地上部干质量提高了 50% ~ 72%, 双距花、龙面花、苏泰拉和马鞭草的地上部干质量增加了 110% ~ 385%; 而这种促进效果存在饱和

现象, 例如将 DLI 从 10.5 提高到 17.5 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 金鱼草、金盏花、凤仙花、沟酸浆和蓝猪耳的地上部干质量均有提高, 但当 DLI 提高到 21.8 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> 时, 金鱼草和沟酸浆的干质量不再提高, 说明这两种植物的 DLI 饱和值低于 21.8 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> (Warner & Erwin, 2005)。矾根草 (Garland et al., 2012) 和仙客来 (Wook et al., 2009) 同样存在这种饱和现象。

植物地上部鲜质量和干质量虽都随 DLI 的升高而升高, 但干质量增长更为显著, 干物质百分率与 DLI 呈正相关。此外, 生物量的分配比例受 DLI 的影响。如新几内亚凤仙、天竺葵和矮牵牛扦插苗的根、茎和叶生物量积累均随着 DLI 的增加而增强, 但根系生物量分配比例逐渐升高, 分配到叶片的比例逐渐下降 (Currey & Lopez, 2015), 导致随着 DLI 的增大, 植物的根冠比呈上升趋势。

总之, 在营养生长阶段, 多数草本植物在 DLI ≤ 15 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> 的范围内, 提高 DLI 可促进生长, 提高生物积累量。

## 2.4 对植株营养物质和次生代谢物质积累的影响

DLI 不仅影响植物的生长和形态, 还对各种营养物质和次生代谢物质的积累有显著影响。DLI 的提高可以促进各种营养物质的积累, 并且提高植物的抗逆性, 但当 DLI 超过某一值时, 各类物质的含量趋于稳定或呈下降趋势。

水培莴苣中钾含量随 DLI 的增加呈线性增加的趋势, DLI 从 1 提高到 14 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 其钾含量提高了 50%, 单位干物质中钙含量从 15 提高到 28 mmol · kg<sup>-1</sup> (Gent, 2014); 但紫甘蓝、京水菜和芥菜幼苗中的大量元素含量和微量元素含量均随 DLI 的增强而降低 (Gerovac et al., 2016)。

在一定范围内提高 DLI 可以促进植物营养物质积累, 抑制硝酸盐生成, 提高植物抗逆性。例如, 提高 DLI 可以显著提高莴苣可溶性糖含量, 抑制地上部硝酸盐的积累 (Gent, 2014), 提高油葵芽苗菜的淀粉与维生素 C 含量 (张欢 等, 2012), 不同程度地提高洋葱幼苗的可溶性蛋白及游离氨基酸的含量 (刘磊 等, 2005)。当 DLI 达到一定的水平时, 各种物质含量不再提升, 甚至会下降, 例如紫白菜和乌塌菜蔗糖含量随 DLI 的升高呈先上升后下降的趋势 (Samuolienė et al., 2013)。

同样地, 一定程度提高 DLI, 可以促进各种次生代谢产物的生成。随着 DLI 的增大, 黄芩幼苗中的药用次生代谢产物黄芩素、黄芩苷、次黄芩苷、黄芩甙元、次黄芩素、木蝴蝶素 A 等均有不同程度的增加 (Liu et al., 2014); 在中等 DLI 条件下, 紫白菜和乌塌菜具有较高的花色苷和总酚含量 (Samuolienė et al., 2013); 从甜菊糖苷含量随 DLI 变化的拟合曲线看, 当 DLI ≤ 10 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> 时, 甜菊苷 A、甜菊苷 C 和甜菊糖苷总含量随着 DLI 的升高而升高, 当 DLI > 10 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 其含量呈稳定状态 (Evans et al., 2015)。

## 3 DLI 对植物生殖生长阶段的影响

### 3.1 对开花的影响

光周期途径是亲缘关系较远植物中最保守的开花响应途径 (刘玉平等, 2001), 此外 DLI 同样存在调控植物开花的作用 (Currey et al., 2012a)。开花对 DLI 的响应十分敏感, 低于某值时, 植物不开花, 但高于某值时, 开花速度不会进一步加快 (Mohammed, 2012)。在一定范围内提高 DLI 可以缩短开花所需天数, 增加花芽数, 促进花色苷的积累。例如, 万寿菊的开花速率随 DLI 的升高而升高, 15 °C 和 25 °C 时, 当 DLI 从 5 提高到 20 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 第 1 朵花开花所需天数分别提前了 6 和 4 d; 花朵数和直径在 DLI 为 25 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup> 时达到最大, DLI 每增加 5 mol · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>, 花朵数

平均增加 1.3 朵, 直径增加 0.16 cm (Moccaldi & Runkle, 2007)。

研究 DLI 对植物生长发育的影响, 综合温度等条件因素, 建立生长模型, 可以提高对植物生长和花期预测的准确性, 从而根据需要调整花期 (Warner & Erwin, 2005; Moccaldi & Runkle, 2007)。此外, DLI 对植物花期的影响遵循递减规律, 即 DLI 持续增加, 对花期的影响力会越来越小, 存在一定的饱和值。例如, 有研究预测凤仙花属的 DLI 饱和值小于  $10 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 勋章菊属大于  $20 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 因此认为 DLI 从 10 增加至  $14 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  可使勋章菊属的花期提前, 而对凤仙花属花期影响不明显 (Blanchard, 2009)。研究植物开花的 DLI 饱和值, 可以指导对植物的补光范围, 提高能源利用效率。不同植物种类, 花发育所需的饱和 DLI 也不相同。表 2 列出了各文献中预测的部分植物在各自试验条件下所需的饱和 DLI。DLI 只是影响作物开花的环境因素之一, 除考虑温度影响外, 还应考虑光周期和氮素营养等对开花的影响。

表 2 部分花坛植物预测饱和 DLI  
Table 2 Saturated DLI for part of bedding plants

日照条件 Sunshine condition	参考文献 Reference	种类 Species	开花速率峰值/ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) DLI peak of flowering rate	花芽数峰值/ ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) DLI peak of flower bud number
短日条件 Short-day ( $< 14 \text{ h}$ )	Warner & Erwin, 2003	野西瓜苗 <i>Hibiscus trionum</i> L.	10.0	—
		芙蓉葵 <i>Hibiscus moscheutos</i> L.	$> 20.0$	—
		木槿 <i>Hibiscus cispalinus</i>	$> 25.0$	—
		辐射刺芙蓉 <i>Hibiscus radiatus</i> Cav.	—	10.0
	Wook et al., 2009	仙客来 <i>Cyclamen persicum</i>	6.0	—
		Lopez & Runkle, 2008	矮牵牛 <i>Petunia</i> × <i>hybrida</i> ‘Tiny Tunia Violet Ice’	$> 10.0$
	矮牵牛 <i>Petunia</i> × <i>hybrida</i> ‘Super-tunia Mini Purple’		8.0	8.0
	新几内亚凤仙 <i>Impatiens hawkeri</i>		8.0	8.0
	黑心金光菊 <i>Rudbeckia hirta</i>		10.5	13.6
	长日条件 Long-day ( $\geq 14 \text{ h}$ )	Blanchard, 2009	天竺葵 <i>Pelargonium</i> × <i>hortorum</i>	17.9
繁星花 <i>Pentas lanceolata</i>			11.1	$> 15.0$
金鱼草 <i>Antirrhinum majus</i>			—	$> 19.0$
四季海棠 <i>Begonia semperflorens</i>			—	14.9
蓝英花 <i>Browallia speciosa</i>			—	9.4
长春花 <i>Catharanthus roseus</i>			—	8.4
矮牵牛 <i>Petunia</i> × <i>hybrida</i> ‘Dream Neon Rose’			10.6	$> 20.0$
矮牵牛 <i>Petunia</i> × <i>hybrida</i> ‘Easy Wave Coral Reef’			14.4	$> 19.0$
矮牵牛 <i>Petunia</i> × <i>hybrida</i> ‘Wave Purple’			14.1	14.7
半枝莲 <i>Portulaca grandiflora</i>			12.0	$> 20.0$
鼠尾草 <i>Salvia farinacea</i>			15.8	$> 18.0$
万寿菊 <i>Tagetes erecta</i> ‘Antigua Primrose’			8.3	—
孔雀草 <i>Tagetes patula</i>			8.6	—
马鞭草 <i>Verbena</i> × <i>hybrida</i>			19.5	13.5
百日草 <i>Zinnia elegans</i>			12.5	$> 19.0$
硫华菊 <i>Cosmos sulphureus</i>			—	$> 18.0$
大丽花 <i>Dahlia</i> × <i>hybrida</i>			—	$> 19.0$
石竹 <i>Diantus chinensis</i>			—	15.8
勋章菊 <i>Gazania rigens</i>			—	$> 20.0$
Blanchard, 2009;			Hutchinson et al., 2012a	蓝眼菊 <i>Osteospermum ecklonis</i>
	天使花 <i>Angelonia angustifolia</i>	$> 12.0$		$> 16.0$
Pramuk & Runkle, 2005	Hutchinson et al., 2012a	青葙 <i>Celosia argentea</i>	15.0	—
		龙面花 <i>Nemesia fruticans</i>	12.0	—
Wook et al., 2009	Moccaldi & Runkle, 2007	美女樱 <i>Verbena</i> × <i>hybrida</i>	9.0	—
		仙客来 <i>Cyclamen persicum</i>	12.0	—
Moccaldi & Runkle, 2007	Moccaldi & Runkle, 2007	一串红 <i>Salvia splendens</i>	$> 28.0$	—
		万寿菊 <i>Tagetes patula</i>	$> 28.0$	$> 28.0$

### 3.2 对果实产量和品质的影响

果实发育前期生物量的积累主要归因于叶片光合产物的运输,弱光使叶片光合速率降低,从而造成果实发育缓慢,畸形甚至花而不实的现象。光照环境不仅影响果实产量,还影响果实的果形、色泽、营养品质和香气等。

在弱光条件下提高 DLI,可以增加单果质量,提高总产量。例如,小麦(沈韞贇等,2014)、大豆(李春杰等,2010)、黄瓜(熊宇,2017)、番茄(杨尚龙,2015)、桃(郝建博,2015)、苹果(王建新等,2011)等的产量随光照强度增大或光照时间延长而显著提高。但这种促进效果同样存在饱和值,如随光照强度的增强(钟霏霖等,2011)或光照时间的延长(刘庆,2015),草莓的单果质量呈先上升后下降的趋势;在高光条件下适当遮光有利于提高核桃坚果的单果质量、出仁率和总产量(张述斌,2017);在南疆7—8月光强最强时期,随着光照强度的减弱,骏枣的单果质量有增大的趋势(李湘钰,2015)。

在较高的 DLI 条件下,水果和蔬菜果实中的果糖(任雷,2010;孟祥云,2014)、葡萄糖(孟祥云,2014)、可溶性糖(任雷,2010;郝建博,2015;李湘钰,2015;杨尚龙,2015;熊宇,2017)、总糖(钟霏霖等,2011)、可溶性固形物(王建新等,2011;郝建博,2015;杨尚龙,2015)、维生素 C 含量(钟霏霖等,2011;郝建博,2015;熊宇,2017)和糖酸比(郝建博,2015;杨尚龙,2015)较高,营养丰富,口感较好;黄瓜(熊宇,2017)、桃(郝建博,2015)、苹果(王建新等,2011)的花青素和番茄(杨尚龙,2015)的番茄红素在高光强条件下含量较高,说明提高 DLI 有利于果实着色,提升商品质量。DLI 的升高可以提高小麦和大豆的淀粉和脂肪含量,而蛋白质含量呈下降趋势(庞青玉和刘汉中,1985;韩天富等,1997;胡国华等,2004;沈韞贇等,2014;刘希伟,2016)。

Celina 和 Mitchell (2016) 报道,在 DLI 相同的情况下,光源类型对番茄果实产量无显著影响,在试验中设置了高压钠灯、LED 和高压钠灯 + LED 3 种不同的光源进行补光,结果发现番茄果实产量没有显著差异,即不受补光光源的影响。孙娜等(2014)发现,在相同光源类型补光条件下,补充红光更有利于提高番茄果实产量。相同 DLI 条件下,长日照更有利于干物质的积累,例如光照强度从 300 提升到  $600 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,小麦籽粒产量增加了 29.3%~43.3%,而光照时间从 12 h 延长至 24 h,籽粒产量增加了 60.1%~77.5%(沈韞贇等,2014),说明延长光照时间更有利于小麦增产。

## 4 结语

DLI 对植物不同生长阶段的影响存在一定的规律,即在弱光条件下提高 DLI 可以促进植物的生长发育,DLI 超过一定的范围,促进效果减缓或变为抑制效应。在种子萌发出芽阶段,一些需光种子具有能量累积效应,萌发率和出土速率与 DLI 呈正相关。在植物营养生长阶段,适当提高 DLI 可以促进生根,提高生物量的积累,抑制徒长,提高植株健壮程度。在植物生殖生长阶段,较高的 DLI 可以促进花芽分化,使花期提前,提高果实产量和品质。推荐喜光植物苗期 DLI 不小于  $10 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,成株 DLI 不小于  $15 \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

此外,不同植物适宜的 DLI 不同(Moe,1994),在一定范围内适当增加 DLI,可以提高作物产量,改善品质,但超过这个范围,则成为抑制植物生长的因素。因此,探究不同植物适宜的 DLI,对于提高生产效率至关重要。目前,DLI 影响植物生长发育的机理尚不明确,光照强度和光照时间

的互作效应有待进一步探索。

## References

- Blanchard M G. 2009. Manipulating light and temperature for energy-efficient greenhouse production of ornamental crops [Ph. D. Dissertation]. East Lansing: Michigan State University.
- Celina G, Mitchell C A. 2016. Physiological and productivity responses of high-wire tomato as affected by supplemental light source and distribution within the canopy. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 141 (2): 196 - 208.
- Chong J A, Samarakoon U C, Faust J E. 2014. Effects of daily light integral and canopy density on shoot growth and development in a poinsettia (*Euphorbia pulcherrima* Willd. ex. Klotsch) stock plant canopy. *HortScience*, 49 (1): 51 - 54.
- Cui Xiao-hui, Guo Xiao-ou, Sun Tian-yu, Qi Hong-yan. 2017. Effects of LED supplementary lighting on seedling growth and fruit quality of oriental melon. *Plant Physiology Journal*, 53 (4): 657 - 667. (in Chinese)
- 崔晓辉, 郭小欧, 孙天宇, 齐红岩. 2017. LED 补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响. *植物生理学报*, 53 (4): 657 - 667.
- Currey C J, Hutchinson V A, Lopez R G. 2012a. Growth, morphology, and quality of rooted cuttings of several herbaceous annual bedding plants are influenced by photosynthetic daily light integral during root development. *HortScience*, 47 (1): 25 - 30.
- Currey C J, Lopez R G. 2012b. Biomass accumulation, allocation and leaf morphology of impatiens hawkeri 'Magnum Salmon' cuttings is affected by photosynthetic daily light integral in propagation. *Acta Horticulturae*, 956 (40): 349 - 356.
- Currey C J, Lopez R G. 2015. Biomass accumulation and allocation, photosynthesis, and carbohydrate status of new guinea impatiens, geranium, and petunia cuttings. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 140 (6): 542 - 549.
- Dole J M, Hamrick D J. 2006. Cutting propagation: a guide to propagating and producing floriculture crops//Dole J, Gibson J L. Propagation basics, Batavia: Ball: 3 - 16.
- Evans J M, Vallejo V A, Beaudry R M, Warner R M. 2015. Daily light integral influences steviol glycoside biosynthesis and relative abundance of specific glycosides in stevia. *HortScience*, 50 (10): 1479 - 1485.
- Faust J E, Heins R D. 1993. Modeling leaf development of the African violet (*Saintpaulia ionantha* Wendl.). *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 118 (6): 747 - 751.
- Faust J E, Holcombe V, Rajapakse N C, Layne D R. 2005. The effect of daily light integral on bedding plant growth and flowering. *HortScience*, 40 (3): 645 - 649.
- Finch-Savage W E, Leubner-Metzger G. 2006. Seed dormancy and the control of germination. *New Phytologist*, 171 (3): 501 - 523.
- Garland K F, Burnett S E, Day M E, van Iersel M W. 2012. Influence of substrate water content and daily light integral on photosynthesis, water use efficiency, and morphology of *Heuchera americana*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 137 (1): 57 - 67.
- Gent M. 2014. Effect of daily light integral on composition of hydroponic lettuce. *HortScience*, 49 (2): 173 - 179.
- Gerovac J R, Craver J K, Boldt J K, Lopez R G. 2016. Light intensity and quality from sole-source light-emitting diodes impact growth, morphology, and nutrient content of Brassica microgreens. *HortScience*, 51 (5): 497 - 503.
- Guan Kang-lin. 1985a. Study on the light demanding germination of the seed of *Emmenopterys henryi* Oliv. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2 (2): 47 - 50. (in Chinese)
- 管康林. 1985a. 香果树种子的光萌发特性初步研究. *浙江林学院学报*, 2 (2): 47 - 50.
- Guan Kang-lin. 1985b. Study on the light demanding germination of the seed of *Paulownia* and *Casuarina equisetifolia*. *Chinese Bulletin of Botany*, 3 (2): 19 - 20. (in Chinese)
- 管康林. 1985b. 泡桐和木麻黄种子的光萌发研究. *植物学通报*, 3 (2): 19 - 20.
- Han Tian-fu, Wang Jin-ling, Yang Qing-kai, Gai Jun-yi. 1997. Effect of post flowering photoperiod on chemical composition of soybeans. *Scientia Agricultura Sinica*, 30 (2): 48 - 54. (in Chinese)
- 韩天富, 王金陵, 杨庆凯, 盖钧镒. 1997. 开花后光照长度对大豆化学品质的影响. *中国农业科学*, 30 (2): 48 - 54.
- Hao Jian-bo. 2015. The effects of shading on photosynthetic characteristics and fruit quality of peach [M. D. Dissertation]. Baoding: Agricultural University of Hebei. (in Chinese)



- 郝建博. 2015. 遮光对桃树光合特性及果实品质的影响[硕士论文]. 保定: 河北农业大学.
- Hu Guo-hua, Ning Hai-long, Wang Han-dong, Wang Ji-an, Zhang Da-yong, Li Wen-bin. 2004. Effect of photo-intensity on quality and yield of soybeans. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 26 (2): 86 - 88. (in Chinese)
- 胡国华, 宁海龙, 王寒冬, 王继安, 张大勇, 李文滨. 2004. 光照强度对大豆产量及品质的影响. *中国油料作物学报*, 26 (2): 86 - 88.
- Huang Xin-li. 2017. Effects of supplemental light on tomato seedlings and lettuce growth and development, yield and quality [M. D. Dissertation]. Yangling: Northwest A & F University. (in Chinese)
- 黄薪历. 2017. LED 补光对番茄幼苗和生菜生长发育、产量及品质的影响[硕士论文]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- Hutchinson V A, Currey C J, Lopez R G. 2012a. Photosynthetic daily light integral during root development influences subsequent growth and development of several herbaceous annual bedding plants. *HortScience*, 47 (7): 856 - 860.
- Hutchinson V A. 2012b. Photosynthetic daily light integral during vegetative propagation and finish stages influence growth and development of annual bedding plant species [M. D. Dissertation]. West Lafayette: Purdue University.
- Kjaer K H, Ottosen C, Jørgensen B N. 2012. Timing growth and development of *Campanula* by daily light integral and supplemental light level in a cost-efficient light control system. *Scientia Horticulturae*, 143: 189 - 196.
- Li Chun-jie, Xu Yan-li, Wei Wei, Pei Xi-chao, Zhang Lei. 2010. Effect of sunlight hours on soybean yield and chemical quality in the pod stage. *Journal of Northwest A & F University (Nat Sci Ed)*, 38 (11): 71 - 74. (in Chinese)
- 李春杰, 许艳丽, 魏巍, 裴希超, 张雷. 2010. 结荚期光照时间对大豆产量和化学品质的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 38 (11): 71 - 74.
- Li Xiang-yu. 2015. Effect of light intensity on leaf development and fruit quality and metabolism of sugar related enzymes of *Zizyphus jujuba* Mill. cv. Junzao [M. D. Dissertation]. Alear: Tarim University. (in Chinese)
- 李湘钰. 2015. 光照条件对骏枣叶片发育和果实品质及糖代谢相关酶变化的影响[硕士论文]. 阿拉尔: 塔里木大学.
- Liu Xi-wei. 2016. Response of different light conditions on photosynthesis characteristics, starch components and quality [M. D. Dissertation]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology. (in Chinese)
- 刘希伟. 2016. 小麦光合特性、籽粒淀粉组分及品质对光照的响应[硕士论文]. 秦皇岛: 河北科技师范学院.
- Lindig-Cisneros R, Zedler J. 2001. Effect of light on seed germination in *Phalaris arundinacea* L. (Reed Canary Grass). *Plant Ecology*, 155 (1): 75 - 78.
- Liu Jinhua, Li Jia, Cui Shulan, Zhang Yongqing. 2014. Germination characteristics and secondary metabolism regulation of *Scutellaria baicalensis* Georgi under different illumination time. *Agricultural Science and Technology*, 15 (8): 1312 - 1316.
- Liu Lei, Liu Shi-qi, Xu Li, Du Hong-tao, Zhang Yun-qi. 2005. Studies on the changes of nitrogen metabolism and peroxidase activity in onions during different photoperiod and vernalization. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 14 (6): 90 - 95. (in Chinese)
- 刘磊, 刘世琦, 许莉, 杜洪涛, 张云起. 2005. 光周期及春化处理对洋葱蛋白质合成代谢与 POD 活性的影响. *西北农业学报*, 14 (6): 90 - 95.
- Liu Qing. 2015. Effects of different photoperiod and different light quality on the physiological characteristic and quality in strawberry [M. D. Dissertation]. Tai'an: Shandong Agricultural University. (in Chinese)
- 刘庆. 2015. 不同光周期及光质对草莓生理特性及品质的影响[硕士论文]. 泰安: 山东农业大学.
- Liu Yu-ping, Li Jian-ping, Lan Su-que, Zhao Feng-wu, Li Xing-pu, Worland A J. 2001. Effects of photoperiod insensitive gene on agronomic characteristic of winter wheat. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 16 (4): 59 - 64. (in Chinese)
- 刘玉平, 李建平, 兰素缺, 赵凤梧, 李杏普, Worland A J. 2001. 光周期迟钝基因对冬小麦农艺性状的影响. *华北农学报*, 16 (4): 59 - 64.
- Lopez R G, Runkle E S. 2008. Photosynthetic daily light integral during propagation influences rooting and growth of cuttings and subsequent development of new guinea impatiens and petunia. *HortScience*, 43 (7): 2052 - 2059.
- Meng Xiang-yun. 2014. Effects of light intensity on grape berries coloring of Red Globe [M. D. Dissertation]. Shihezi: Shihezi University. (in Chinese)
- 孟祥云. 2014. 光照强度对红地球葡萄果实着色的影响[硕士论文]. 石河子: 石河子大学.
- Moccaldi L A, Runkle E S. 2007. Modeling the effects of temperature and photosynthetic daily light integral on growth and flowering of *Salvia*

- splendens* and *Tagetes patula*. Journal of the American Society for Horticultural Science, 132 (3): 283 - 288.
- Moe R. 1994. Vekstfysiologiske aspekter med høje beyningsstyrker. Gartneryrket, 84: 8 - 13.
- Mohammed V T. 2012. Improving the scheduling and profitability of annual bedding plant production by manipulating temperature, daily light integral, photoperiod, and transplant size [M. D. Dissertation]. East Lansing: Michigan State University.
- Ohadi S, Rahimian M H, Tavakkolafshari R, Beheshtian, M M. 2010. Modelling the effect of light intensity and duration of exposure on seed germination of *Phalaris minor* and *Poa annua*. Weed Research, 50 (3): 209 - 217.
- Pang Qing-yu, Liu Han-zhong. 1985. The effect of light intensity after flowering on the yield & quality of soybean seeds. Acta Agriculturae Universitatis Pekinensis, 11 (3): 339 - 343. (in Chinese)
- 庞青玉, 刘汉中. 1985. 大豆开花后光照强度对其产量和品质的影响. 北京农业大学学报, 11 (3): 339 - 343.
- Pons T L. 2000. Seed responses to light. Seeds: the ecology of regeneration in plant communities, Fenner M, UK: CABI, 237 - 260.
- Pramuk L A, Runkle E S. 2005. Modeling growth and development of celosia and impatiens in response to temperature and photosynthetic daily light integral. Journal of the American Society for Horticultural Science, 130 (6): 813 - 818.
- Ren Lei. 2010. Effect of temperature and light intensity to sugar accumulation and sucrose metabolizing enzymes in muskmelon [M. D. Dissertation]. Yangling: Northwest A & F University. (in Chinese)
- 任雷. 2010. 不同光温条件对厚皮甜瓜果实糖分积累与蔗糖代谢相关酶活性的影响[硕士论文]. 杨凌: 西北农林科技大学.
- Samuolienė G, Brazaitytė A, Jankauskienė J, Viršilė A, Sirtautas R, Novičkovas A, Sakalauskienė S, Sakalauskaitė J, Duchovskis P. 2013. LED irradiance level affects growth and nutritional quality of *Brassica* microgreens. Open Life Sciences, 8 (12): 1241 - 1248.
- Shen Yun-ze, Guo Shuang-sheng, Ai Wei-dang, Tang Yong-kang. 2014. Interactive effects of light intensity and illumination time on wheat growth in a closed system. Space Medicine & Medical Engineering, 27 (4): 280 - 285. (in Chinese)
- 沈毓颢, 郭双生, 艾为党, 唐永康. 2014. 密闭系统中光强和光照时间对小麦的交互作用. 航天医学与医学工程, 27 (4): 280 - 285.
- Sun Na, Li Yan, Wei Min, Wang Xiu-feng, Shi Qing-hua, Yang Feng-juan, Mi Qing-hua. 2014. Effect of supplementary lighting on growth, quality and yield of tomato overwintering stand in greenhouse. Tianjin Agricultural Sciences, 20 (3): 91 - 93. (in Chinese)
- 孙娜, 李岩, 魏珉, 王秀峰, 史庆华, 杨凤娟, 米庆华. 2014. 补光对日光温室越冬番茄生长及产量品质的影响. 天津农业科学, 20 (3): 91 - 93.
- Torres A P, Lopez R G. 2011. Photosynthetic daily light integral during propagation of *Tecoma stans* influences seedling rooting and growth. HortScience, 46 (2): 282 - 286.
- Vaartaja O. 1956. Photoperiodic response in germination of seed of certain trees. Canadian Journal of Botany, 34 (3): 377 - 388.
- Volk T, Bugbee B. 1991. Modeling light and temperature effects on leaf emergence in wheat and barley. Crop Science, 31 (5): 1218 - 1224.
- Wang He, Liu Yan. 2009. Study promoting seed germination ways to 4 wild flower species. Seed, 28 (4): 54 - 57. (in Chinese)
- 王荷, 刘燕. 2009. 促进4种野生花卉种子萌发的方法研究. 种子, 28 (4): 54 - 57.
- Wang Hua-shuo. 2018. Effect of LED light on the growth and quality of cucumber, tomato and strawberry in solar greenhouse [M. D. Dissertation]. Handan: Hebei University of Engineering. (in Chinese)
- 王华硕. 2018. LED补光对温室黄瓜、番茄、草莓生长发育及品质的影响[硕士论文]. 邯郸: 河北工程大学.
- Wang Jian-xin, Niu Zi-mian, Li Zhi-qiang, Guo Ai-ping, Gao Hui-qing. 2011. Influences of different canopy structures on their relative light intensity and fruit quality of Naganofuji No. 2 apple. Journal of Fruit Science, 28 (1): 8-14. (in Chinese)
- 王建新, 牛自勉, 李志强, 郭爱萍, 高慧卿. 2011. 乔砧富士苹果不同冠形相对光照强度的差异及对果实品质的影响. 果树学报, 28 (1): 8 - 14.
- Warner R M, Erwin J E. 2003. Effect of photoperiod and daily light integral on flowering of five *Hibiscus* sp. Scientia Horticulturae, 97: 341 - 351.
- Warner R M, Erwin J E. 2005. Prolonged high temperature exposure and daily light integral impact growth and flowering of five herbaceous ornamental species. Journal of the American Society for Horticultural Science, 130 (3): 319 - 325.
- Wook O, Inhye C, Kisun K, Runkle E S. 2009. Photosynthetic daily light integral influences flowering time and crop characteristics of *Cyclamen persicum*. HortScience, 44 (2): 341 - 344.
- Wu Peng-fei, Wang Li-juan, Liu Zhao, Kirriwa Yoshikazu. 2016. Effect of LED supplemental lighting treatment on protected strawberry growth and

- fruit quality. *Northern Horticulture*, (21): 48 - 50. (in Chinese)
- 吴鹏飞, 王丽娟, 刘昭, 切岩祥和. 2016. LED补光对设施草莓生长及果实品质的影响. *北方园艺*, (21): 48 - 50.
- Xiong Yu. 2017. Effect and simulation of low irradiation on growth and quality of protected cucumber [M. D. Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. (in Chinese)
- 熊宇. 2017. 寡照对设施黄瓜生长和品质的影响及模拟研究[硕士论文]. 南京: 南京信息工程大学.
- Yang Qi-he, Song Song-quan, Ye Wan-hui, Yin Shou-hua. 2003. Mechanism of seed photosensitivity and factors influencing seed photosensitivity. *Chinese Bulletin of Botany*, 20 (2): 238 - 247. (in Chinese)
- 杨期和, 宋松泉, 叶万辉, 殷寿华. 2003. 种子感光的机理及影响种子感光性的因素. *植物学通报*, 20 (2): 238 - 247.
- Yang Shang-long. 2015. Effect of light intensity on yield and quality of tomato [M. D. Dissertation]. Shihezi: Shihezi University. (in Chinese)
- 杨尚龙. 2015. 光照强度对番茄产量和品质的影响[硕士论文]. 石河子: 石河子大学.
- Zhang Huan, Zhang Li-li, Li Wei, Xing Ze-nan, Zhang Dan, Cui Jin. 2012. Effects of photoperiod under red LED on growth and quality of Sunflower sprouts. *Acta Horticulturae Sinica*, 39 (2): 297 - 304. (in Chinese)
- 张欢, 章丽丽, 李薇, 邢泽南, 张丹, 崔瑾. 2012. 不同光周期红光对油葵芽苗菜生长和品质的影响. *园艺学报*, 39 (2): 297 - 304.
- Zhang Min, Zhu Jiao-jun, Yan Qiao-ling. 2012. Review on influence mechanisms of light in seed germination. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36 (8): 899 - 908. (in Chinese)
- 张敏, 朱教君, 闫巧玲. 2012. 光对种子萌发的影响机理研究进展. *植物生态学报*, 36 (8): 899 - 908.
- Zhang Shu-bin. 2017. Effects of light intensity on physiological indexes and fruit quality of 'Wen 185' walnut [M. D. Dissertation]. Alear: Tarim University. (in Chinese)
- 张述斌. 2017. 光照强度对'温185'核桃叶片生理指标及果实品质的影响[硕士论文]. 阿拉尔: 塔里木大学.
- Zhang Shu-na, Pan Xiao-xi, Ma Lin, Zhang Ya-yu. 2016. Influence of light on germination and seedling status of *Centipeda herba*. *Seed*, 35 (11): 91 - 93. (in Chinese)
- 张舒娜, 潘晓曦, 马琳, 张亚玉. 2016. 光对鹅不食草种子萌发及幼苗的影响. *种子*, 35 (11): 91 - 93.
- Zhong Pei-lin, Yang Shi-pin, Qiao Rong, Wang Tian-wen. 2011. Effect of light intensity on main quality of strawberry. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 24 (3): 1219 - 1221. (in Chinese)
- 钟霖, 杨仕品, 乔荣, 王天文. 2011. 光照强度对草莓主要品质的影响. *西南农业学报*, 24 (3): 1219 - 1221.
- Zhou You-xun. 2007. Light requirement characteristics for the germination of *Tetracentron sinense* Oliv seeds. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 27 (5): 54 - 57. (in Chinese)
- 周佑勋. 2007. 水青树种子的需光萌发特性. *中南林业科技大学学报*, 27 (5): 54 - 57.