

ICS

CCS

点击此处添加中国标准文献分类号



# 中华人民共和国国家标准

GB/Z XXXXX—XXXX

## 植物生长 LED 人工光环境技术报告

Technical Report on LED Artificial Lighting Environment for Plant  
Growth

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局  
国家标准化管理委员会 发布



## 目 次

1	范围 .....	1
2	概述 .....	1
3	植物生长光环境要素 .....	1
3.1	概述 .....	1
3.2	光谱 .....	1
3.3	光照强度 .....	2
3.4	光周期 .....	4
3.5	光分布 .....	5
4	植物光合作用 .....	5
4.1	植物光合作用概述 .....	5
4.2	植物光合作用速率对光强的响应 .....	6
4.3	植物光合作用对光谱的响应 .....	6
4.4	光合作用对光周期的响应 .....	7
4.5	光合作用日变化 .....	8
4.6	植物群体光分布及其对光合作用的影响 .....	8
5	植物光控生长发育 .....	11
5.1	光形态建成 .....	11
5.2	植物光受体 .....	11
5.3	不同光谱对植物形态建成的影响 .....	11
5.4	植物营养品质光调控 .....	13
5.5	光周期调控植物生长发育 .....	14
6	植物生长光响应关键评判指标 .....	14
6.1	植株形态 .....	14
6.2	生物量 .....	15
6.3	品质 .....	16
6.4	抗逆性 .....	17
6.5	植物生长光照能效 .....	17
7	植物生长对 LED 人工光源的要求 .....	17
7.1	光子效率/光合光子效率 .....	17
7.2	寿命 .....	18
7.3	可靠性 .....	18

7.4 灯具构型 .....	18
7.5 控制功能 .....	19
8 植物生产人工光环境光照设计要素分析 .....	19
8.1 光子通量密度 .....	19
8.2 光谱分布 .....	19
8.3 光周期 .....	20
8.4 辐射方向特性 .....	20
7.5 LED 植物生长灯应用模式 .....	21

## 前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中华人民共和国科学技术部提出并归口。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件主要起草单位：…

本文件主要起草人：…



# 植物生长 LED 人工光环境技术报告

## 1 范围

本文件给出了植物生长人工光环境要素、光合作用、光控生长发育、光响应关键评判指标、LED 人工光源的要求及人工光环境光照设计要素的内容。

本文件适用于相关利益方开展的 LED 人工光植物生长领域涉及的工作。

## 2 概述

光是植物生长所需的最重要环境因子之一，它不仅是植物生长发育过程中的能量源，也是植物形态建成的重要信号源。植物赖以生存的能量来自太阳光，光合作用是植物捕获光能的重要生物学途径，通过光合作用固定二氧化碳以合成有机物并产生氧气，是地球上生命得以延续的决定因素之一。

LED 作为新型光源，具有节能环保、寿命长、响应时间短等特征，在农业光照领域的优势明显。与传统光源相比，LED 可以根据需求对光谱、辐射强度进行调控；其次，LED 属于冷光源，可近距离照射植物而不会造成植物组织灼伤；再次，LED 光源体积小，比较适用于多层立体组合栽培系统，有助于减少栽培层架的层高，增加单位空间栽培密度。LED 在设施农业领域已引起国内外广泛关注，已被广泛应用于全人工光植物工厂以及温室补光生产领域，以达到提高产量及改进品质的目的。

本文件针对植物生长 LED 人工光环境，介绍植物生长光环境要素、植物光合作用与光控生长发育以及植物生长涉及的光需求特征等，提出植物生长光响应的关键指标，分析植物生长对 LED 人工光源的要求与人工光环境光照设计的重点要素，以引导科学合理地评价植物生长 LED 人工光环境。

## 3 植物生长光环境要素

### 3.1 概述

植物对光的需求主要体现在光谱、光照强度、光周期和光分布四个方面，也称之为植物生长的“光环境要素”。光环境通过植株形态、器官发育、细胞内代谢以及基因表达和蛋白质合成等不同层面影响并调节植物生长，理解光对植物生长的影响是农业生产人工光源应用的理论基础。

### 3.2 光谱

太阳光中包含的光谱范围极宽，但能直接作用于植物生长的光谱范围很窄。McCree K. J 等于 1972 年通过测定 22 种常见的植物在生长室以及大田中不同光照条件下的光合速率，提出直接作用于植物光合作用的光谱范围是 400 nm~700 nm，这段光谱被定义为光合有效辐射 (Photosynthetically Active Radiation, PAR) 并沿用至今 (McCree, 1972)。

近年来，随着植物光生物学研究的不断发展，在光合有效辐射的基础上，植物作用光谱也更加丰富，根据 2017 年美国农业与生物工程学会发布的《Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms)》，除植物生长通用的光合有效辐射 (400 nm~700 nm) 之外，

将中波紫外线、长波紫外线以及远红光统一纳入了植物作用光谱中，并明确规定了各种光质的有效范围(2017)。据此，当前业界将植物作用光谱波段范围扩展为 280 nm~800 nm，如图 1 所示，包括中紫外线(280 nm~315 nm)、近紫外线(315 nm~400 nm)、蓝光(400 nm~500 nm)、黄绿光(500 nm~600 nm)、红光(600 nm~700 nm)以及远红光波段(700 nm~800 nm)。

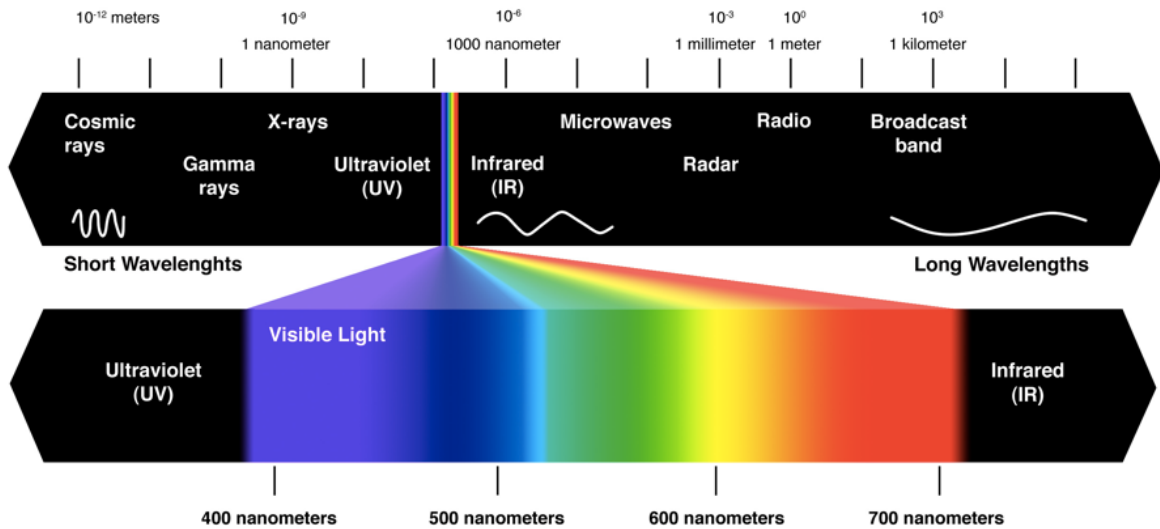


图 1 植物作用光谱在太阳辐射中的位置及不同光质的简单分类

### 3.3 光照强度

#### 3.3.1 光照强度的度量

光照强度是选择人工光源的重要依据，目前光照强度有多种度量(表述)方式，主要包括如下三种：

(1) **光照度** (Illumination)，是指受照平面上接受的光通量面密度(单位面积的光通量)，单位为勒克斯(lx)。光照度表述的是人眼能感觉到的光亮度，是一种与视觉灵敏度有关系的心理物理量。

与光照度相关的光通量则是按照国际约定的人眼视觉特性评价的辐射能通量(辐射功率)，单位为流明(lm)。1流明是指发光强度为1坎德拉(cd)的均匀点光源在1球面度立体角内发出的光通量。坎德拉表述的是每单位立体角(立体角：与以单位长度为半径的球体表面积相同)的光通量，1cd 555 nm的单色光在单位立体角放射的电功率(放射束)为1.46 mW。

$$1 \text{ lx} = 1 \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2} \quad (1)$$

(2) **光辐射能** (Radiation energy)，指单位时间、单位面积上到达或通过的光辐射的能量，常用单位为瓦每平方米(W·m<sup>-2</sup>)，1 W·m<sup>-2</sup> = 1 J·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。

(3) **光子通量密度** (PFD, Photon Flux Density)，即单位时间、单位面积上到达或通过的光子数，单位为 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>；其中光合有效光子通量密度(PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density)是指与光合作用直接相关的光合有效辐射(PAR，波长为400 nm~700 nm)的光子数，是目前植物生长光环境调控领域国际通用单位。

光辐射能(W·m<sup>-2</sup>)和光子通量密度(μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)为植物光经常用单位，二者之间可以通过光



子的能量公式来换算：

单位光子的能量计算公式为：

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (2)$$

式中 E 为光的能量，h 为普朗克常数 ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )，c 为光速 ( $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )， $\lambda$  为波长。因此，各波长下光的能量 ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 与光子数量 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 换算公式为：

$$PFD = \frac{E \times \lambda}{h \times c \times N \times 1000} \quad (3)$$

式中 N 为阿伏伽德罗常数 ( $6.022 \times 10^{23}$ )。

依据公式 (3)，表 1 为各波长下光子通量密度与光辐射能的换算系数；图 2 为换算系数随波长的变化趋势。

表 1 不同波长光子通量密度与光辐射能之间转换的换算系数

波长 nm	换算系数 $\text{J} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$
300	0.398 7
350	0.341 8
400	0.299 1
450	0.265 8
500	0.239 2
550	0.217 5
600	0.199 4
650	0.184 0
700	0.170 9
750	0.159 5
800	0.149 5
850	0.140 7
900	0.132 9
950	0.125 9
1000	0.119 6

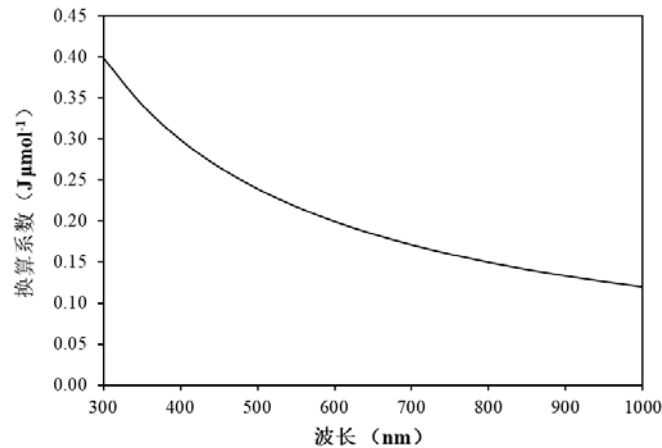


图2 光子通量密度与光辐射能的换算系数随波长的变化趋势图

自然界中光合有效辐射（400 nm~700 nm）光子通量密度与光辐射能之间的换算系数通常默认为  $0.216 \text{ J} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ 。以太阳光为例，光强为  $600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  的太阳光，其 PPFD 的计算方法如下：因太阳辐射中约 50%（系数：0.5）的能量来自可见光波段（400 nm~700 nm），故：

$$\text{PPFD}_{\text{太阳}} = (600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \times 0.5) / 0.216 \text{ J} \cdot \mu\text{mol}^{-1} \approx 1388.9 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

若已知太阳光中 PPFD 为  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，则可见光波段部分光辐射能的计算方法为：

$$E_{\text{PAR}} = 1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \times 0.216 \text{ J} \cdot \mu\text{mol}^{-1} = 216 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

则太阳总辐射能约为：

$$216 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} / 0.5 = 432 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

### 3.3.2 光合有效辐射日累积量

植物光合有效辐射日累积量（Daily Light Integral, DLI）是指单位面积上每天截获到的光合作用光子通量密度（PPFD,  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ）的总量，单位为  $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，也是光照强度的一种通用表述方式。植物光合有效辐射日累积量与植物的光合产物、干物质的积累量以及品质总体上成正相关关系。

以 PPFD 为  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，光周期 16 小时为例，其 DLI 计算如公式（4）所示，式中 3600 为每小时的总秒数。

$$\text{DLI} = (\text{PPFD} \times 16 \times 3600) / 1,000,0 \quad (4)$$

例如，番茄正常生长的最低光合有效辐射日累积量约为  $(10 \sim 12) \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，保证产品品质的光合有效辐射日累积量约为  $(14 \sim 20) \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ，而理想的 DLI 要高于  $20 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

### 3.4 光周期

在一天之中，白天和黑夜的相对长度称之为光周期（Photoperiod）。植物在光期进行光合作用，暗期完成光合产物转运；光周期在调控植物开花、休眠、落叶等生理过程中具有重要作用。在人工光植物工厂生产中，合理安排光、暗期对保证植物正常生长发育至关重要。

### 3.5 光分布

光分布分为光的空间分布和时间分布。

光的空间分布是指植物受光面区域内光强度和色温的分布以及光线相对于植物受光面的空间照射角度。植物生长一致性是工厂化生产和高效管理的基础，光的空间分布均匀性是影响同一栽培面作物生长一致性的重要因素，此外，光空间分布的均匀性也在一定程度上影响种植者的视觉感官。

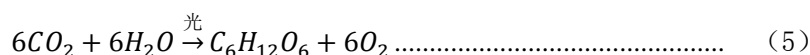
光的时间分布是指同一种光质、光强的组合在一个光周期时间轴上的分布，主要体现在供光模式的差异。根据几种人工光型植物工厂中常见的供光模式，可将光的时间分布分为连续供光型、交替供光型、间歇供光型等。连续供光是指在一个光周期内，同一种光质、光强的组合连续不变，即光在时间轴上的分布是连续、均匀的；交替供光型是指在一个光周期内，两种或多种光强、光质的组合以一定的频率交替出现、规律分布；间歇供光型指在一个光周期内，一种光强、光质的组合以一定的频率间歇出现、规律分布。

## 4 植物光合作用

### 4.1 植物光合作用概述

植物光合作用 (Photosynthesis) 指植物利用光能将二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 和水转化为储存能量的有机物，并释放出氧气的生化过程。植物光合作用是一个复杂而完整的生化系统，发生部位为细胞中的叶绿体。光合作用分为光反应和暗反应两个阶段，光反应是从光合色素吸收光能激发开始，经过水的光解，电子传递，最后将光能转化成化学能，以 ATP 和 NADPH 的形式贮存，其发生部位为叶绿体上的类囊体膜；而暗反应又被称为卡尔文循环 (Calvin cycle)，是指将 CO<sub>2</sub> 固定，并利用光反应产生的 ATP 和 NADPH 合成碳水化合物的循环过程，其发生部位在叶绿体基质中。

光合系统在单位面积单位时间固定 CO<sub>2</sub> 的量 (或释放氧气的量) 即光合速率，光合速率是判断植物合成碳水化合物速率的重要指标。理论上讲，植物在光合作用中吸收的 CO<sub>2</sub> 越多，生成的碳水化合物越多，植物干物质产量越高。



公式 (5) 为光合作用能量转化关系，植物利用光照将 CO<sub>2</sub> 和水转化为有机物和氧气，该过程是地球生命活动的物质基础。

光合作用不仅受其生长环境中光照条件的影响，还受其他环境因子的影响。光照为光合作用提供能量，其他环境因子如温度、水分、湿度以及环境 CO<sub>2</sub> 浓度也会影响植物光合作用。高温胁迫下，叶绿素生物合成的中间产物 5-氨基酮戊酸和原卟啉 IX 会受到影响，叶片中的叶绿素含量降低，同时高温还会使叶片细胞内的单线态氧含量增加，活性氧动态平衡被打破，加速叶绿素降解。低温情况下植物为保持温度会关闭气孔，减少热量交换，进而阻碍 CO<sub>2</sub> 进入叶片，降低光合速率。干旱胁迫与盐胁迫也会引起气孔的关闭，减少水分散失，进而阻碍 CO<sub>2</sub> 进入叶片，降低光合速率。过高空气湿度会导致病害，但过低空气湿度也会降低植物气孔导度影响植物光合速率。综合来说，适宜的光照条件是植物进行光合作用的直接能量来源，并受光强、光质、光周期以及光分布的影响。同时适宜的温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度等环境因子是保证光合系统高效率运行的必要条件。

## 4.2 植物光合作用速率对光强的响应

植物光合作用速率是单位光子每秒每平方米叶片同化  $\text{CO}_2$  的量。图 3 为典型的植物叶片和冠层光合作用光响应示意图，如图所示，植物光合作用速率光强响应曲线有几个重要的节点，理解这些节点对于合理利用植物光照人工光源具有重要指导意义。

在光合有效辐射为  $0 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时（即黑暗条件下，A），植物只进行呼吸作用，即消耗体内有机物和释放  $\text{CO}_2$ ；当光强增加到某一点后，光合作用同化  $\text{CO}_2$  的量与呼吸作用释放  $\text{CO}_2$  的量相等时的节点为光补偿点（B），该点的光照强度即为光补偿光照强度。

当光强高于光补偿光照强度时，光合作用同化的  $\text{CO}_2$  量大于呼吸作用释放的  $\text{CO}_2$  量，且光合作用速率随光强增加而升高。在此阶段，光合速率与光强呈线性关系（C），其斜率表示光合作用光能利用效率。在整个光合作用光响应曲线中，该阶段的光能利用率最大。因此在人工补光实际应用中，应在这一阶段内寻求合适的补光光强。

当光照升高到一定强度时，叶片光合速率升高减缓直至保持平稳，即光合作用达到最大值，而该点称为光饱和点（D），引起光合作用饱和的光强为饱和光强。对于植株冠层来说，光合速率随光强增加而持续升高，光合作用饱和点不易出现（图 3 实线）。该现象的出现主要是由于植株冠层光分布不均匀。在高光强下，虽然冠层顶部叶片已达光饱和点，但冠层中下部叶片仍处于弱光环境。据此，在人工补光实际应用过程中，必须结合作物单叶片和冠层光合特性综合考虑补光灯具光强以及灯具安装位置（如顶部补光结合冠层补光），从而达到最佳补光应用效果。

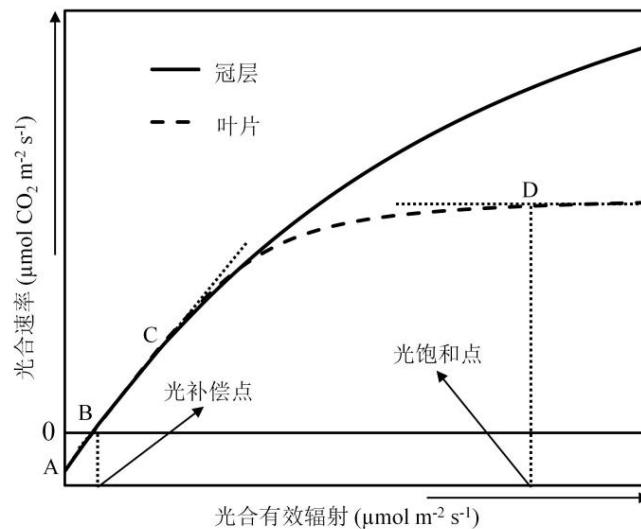


图 3 叶片和冠层光合作用光响应曲线

## 4.3 植物光合作用对光谱的响应

光合色素对光能的吸收和利用效率是植物光合能力的决定因素。在叶绿素的吸收光谱中，有两个最强的吸收区域，即红光区及蓝光区，光合作用在蓝光与红光波段的光子效率较高（图 4），其中红光波段光合作用效率最高，其次为蓝光。因此，红蓝光通常作为植物生产 LED 光源的核心光谱。

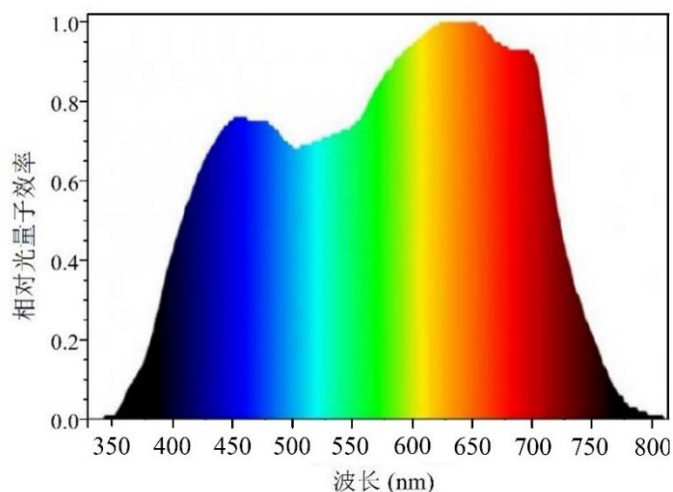


图 4. 植物光合作用在不同波段的相对光子效率

气孔是植物叶片与外界进行气体交换的主要通道，调控  $\text{CO}_2$  进入叶片和植物水分蒸腾。蓝光不仅可以直接驱动植物光合作用，还可作为重要的信号因子诱导气孔开张，从而提高  $\text{CO}_2$  进入叶片的扩散速率，降低光合作用过程中的气孔限制，有助于提高光合速率。但在实际生产应用中，如在全人工光植物工厂条件下由于植物生长光强远低于自然光，对于绝大部分植物来说气孔并不是光合速率的主要限制因子。因此，蓝光是否能够通过气孔调节因素提高光合速率需要结合光强与其他环境因子进行综合分析。

植物叶片对远红光 ( $>700\text{ nm}$ ) 的吸收能力很弱，因此远红光 ( $>700\text{ nm}$ ) 的光合量子产率很低。Emerson and Lewis (1943) 率先提出当波长大于  $685\text{ nm}$  时植物的光合量子产率急剧下降，在  $700\text{ nm}$  处的量子产率不到  $685\text{ nm}$  处量子产率的一半，被称为红降 (Red drop) 现象。Emerson 等进一步研究发现，长波 ( $>685\text{ nm}$ ) 和短波 (约  $400\text{ nm} - 670\text{ nm}$ ) 光同时照射时叶片的光合速率大于两种波长单独照射条件下的光合速率之和，该现象称为双光增益效应，也叫做艾默生增益效应 (Emerson enhancement effect) (Emerson et al., 1957)。据此，Hill and Bendall (1960) 提出了双光系统 (two photosystem) 的概念，把吸收长波长 ( $>680\text{ nm}$ ) 光的系统称为光系统 I (PS I)，吸收短波长 ( $\leq 680\text{ nm}$ ) 光的系统称为光系统 II (PS II)。当在短波光中添加优先激发 PS I 的远红光时，两个光系统平衡地受到激发，这有助于协同提高光化学效率。综上所述，在 LED 植物光照光源中添加远红光对于提高植物光合效率具有重要意义，在实际生产应用中，需根据物种及应用场景来综合考虑远红光应用剂量及应用时段。在植物光照领域，远红光优选波段应为  $720\text{ nm} \sim 750\text{ nm}$ ，其中波峰应在  $730\text{ nm} \sim 740\text{ nm}$  之间。

相较于红蓝光波段，叶绿素对绿光的吸收很少。因此，绿光曾一度被认为是植物光合作用的无效光谱而受到忽略。近年来随着单色绿光 LED 技术的发展及其在植物光生物学领域的研究与应用，绿光对植物生长过程的影响逐渐明晰。在自然环境下，尽管到达叶片表面的太阳光谱中有  $10\% \sim 50\%$  的绿光被植物叶片直接反射，但绿光的穿透能力也远强于其它光谱，故绿光能够到达植株冠层中下部叶片。如图 4 所示，虽然绿光的光合量子效率略低于红蓝光波段，但也能够驱动光合作用，因此，从植株冠层光合作用角度来说，绿光所驱动的植株中下层叶片光合作用也不容忽视。近年来，越来越多的研究证实绿光在 LED 植物光照领域具有重要的作用。

#### 4.4 光合作用对光周期的响应

植物在光期进行光合作用，暗期完成光合产物转运，且光合作用受植物源库关系的调控。由于植物光合细胞中储存淀粉的能力有限，利用光合产物的能力也有限，当光期植物已经累积足够植物生长的碳水化合物时，光合速率会受到反馈抑制进行下调，防止过多的碳水化合物生成进而加重对植物的负担。因此，在植物工厂生产中，合理安排光、暗期对保证植物正常生长发育至关重要。对于同种植物，当光强较弱时，可以适当延长光照时间提高整个光期的光合产物累积；当光强较高时，可以减少光照时间以减轻光合产物的过度累积。

#### 4.5 光合作用日变化

光合作用的强弱在很大程度上取决于一天中光、热、水、气的变化。对于自然光下生长的植物，早晨随着光照增强，气温上升，光合速率不断增强，约 10 时~11 时左右达一天中的最高峰；至正午前后，光照、温度虽然继续升高，但光合速率却出现下降趋势，生物学上称之为“光合午休现象”。午后，光合速率稍有回升，但随着光照强度降低和气温下降，光合速率呈现逐渐降低的趋势，致使光合作用的日变化出现双峰曲线的特点。

在全人工光植物工厂环境下，由于环境因子精准可调，因而植物光合速率在光期基本处于稳定状态，不会出现大幅波动。

#### 4.6 植物群体光分布及其对光合作用的影响

##### 4.6.1 植物群体光强分布及其对光合作用的影响

通常来说，光照强度在植株冠层内部的分布复合朗伯比尔定律（Lambert - Beer Law），即 PPFD 随着冠层高度的降低呈指数下降。图 5 为典型温室番茄植株群体 PPFD 自上而下的变化趋势，在番茄冠层垂直方向上，相对于冠层顶部 PPFD 来说，冠层内部 PPFD 随着叶面积指数（Leaf Area Index, LAI）增加呈指数下降趋势，如当 LAI 为 2 时（即冠层中部）其 PPFD 仅为冠层顶部的 20 %左右。植物冠层 LAI 由顶部向下逐渐升高，在设施农业实际生产中，作物 LAI 一般维持在 4 左右，不应超过 5。图 5 可作为茄果类作物株间补光 LED 灯具安装位置的参考依据。

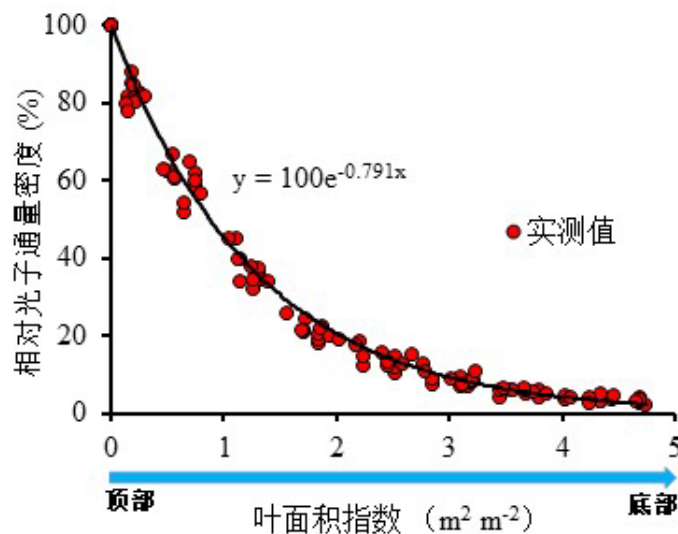


图 5 番茄冠层垂直方向光子通量密度分布规律图

注：点状图标为连栋温室成熟番茄冠层相对光子通量密度实测值，实线为指数方程拟合曲线，由图可知番茄植株光消散系数约为 0.79。

植物光截获量 (Light Interception, LI) 指叶片或者植物群体所接收到的光照量，对于单个叶片来说，叶片与太阳光线夹角为  $\theta$  (太阳光为平行光)，叶片光截获量即叶面积与光照强度以及叶片与太阳光线夹角取正弦值的乘积。单个叶片光截获量如公式 (6) 所示。其中，LI 为光截获量，LA 为叶面积，PAR 为光合有效辐射。

$$LI = LA \times PAR \times \sin \theta \dots \dots \dots (6)$$

对于植物群体来说，垂直方向叶片不断增加并相互重叠，光截获量也变得更为复杂，在已知光照强度的情况下，计算群体的光截获量则需要明确单位栽培面积 (Cultivation area) 上植物群体总叶面积，即叶面积指数 (LAI)，群体叶面积指数计算公式如公式 (7) 所示，光截获量与叶面积指数和光照强度有关。

$$LAI = \frac{LA}{Cultivation\ area} \dots \dots \dots (7)$$

光消散系数 (Light Extinction Coefficient, LEC) 定义为植物冠层顶部光强与冠层底部光强的差除以植物冠层顶部光强。光消散系数越小说明到达植物冠层底部的光照越多，光在植物群体内分布越均匀；光消散系数越大，说明冠层上部叶片密度较高，对下层叶片的遮挡较为严重。不同作物群体光消散指数与植株高度、植株密度、LAI 以及植株自身形态等均有关。

由于植物群体垂直方向光消散系数的存在，群体光截获量并非与单个叶片的计算方式相同，而是一个经验值，研究发现随着植物群体叶面积指数不断增大，其光截获量也不断增加最后趋于稳定。如图 7 所示，植物群体光消散系数理论值为 1，但现实中是不存在的，因为植物群体无法截获全部的光照。图 7 中纵坐标光截获量百分数以实际测量的植物群体冠层顶部光照强度为分母。理解光消散系数与植物光截获能力对明确茄果类等冠幅较大的作物生产人工补光参数至关重要。

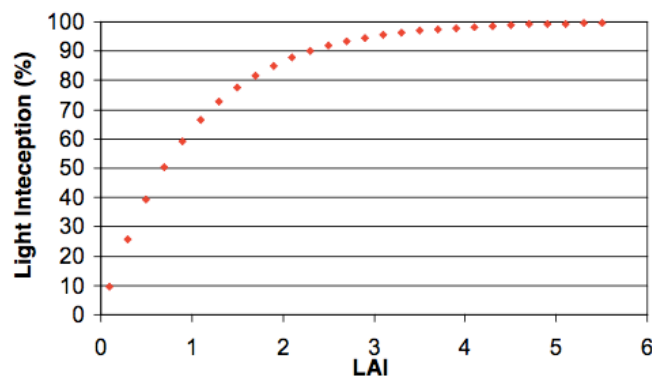


图 7 植物群体叶面积指数与光截获量之间的关系

相对于冠层顶部叶片，冠层中下部叶片长期生长于弱光环境，故植物叶片光合能力也呈现自上而下逐步下降的趋势。图 8 为典型设施番茄冠层顶部、中部及下部成熟叶片净光合速率光子通量密度 (PPFD) 响应示意图。如图所示，番茄冠层叶片光合能力由上而下依次递减。因此，株间补光应重点考虑冠层中下部叶片。

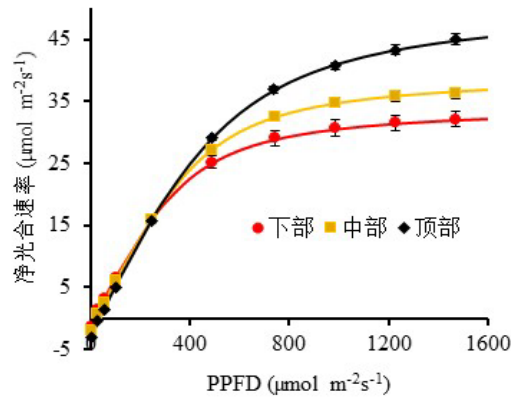


图8 连栋温室番茄成熟植株叶片净光合速率光子通量密度响应曲线

注：图中实心图标代表实测光合速率值；实线为非直角双曲线模型拟合所得叶片光合速率光子通量密度响应数值；该图的测试环境为CO<sub>2</sub>浓度700ppm，叶片温度25℃，相对湿度70%。

#### 4.6.2 植物群体光谱分布

由于光合色素（叶绿素）对红蓝光谱具有极强的吸收能力，植株上层叶片吸收了绝大部分红光与蓝光。因此，植株冠层群体中红光和蓝光在可见光中的比例随着冠层高度的下降而降低；因叶绿素对绿光吸收较少，且其具有极强的穿透能力，故可见光中绿光所占比例随植株高度下降逐步升高。由于植物对可见光的吸收能力远高于远红光，红光与远红光的比例随冠层高度的下降而降低。此外，植物叶片对绿光和远红光也具有极强的反射能力，这也是植株冠层中下部绿光和远红光比例升高的重要原因。图9为虎杖（蓼科虎杖属植物）叶片对太阳光谱的反射特性（绿线）及其与冠层顶部太阳光谱的比较(Franklin and Whitelam, 2005)。

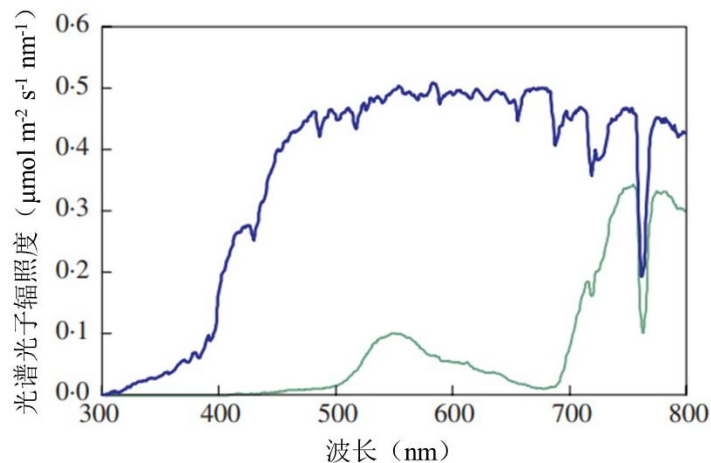


图9 太阳光谱（蓝线）及虎杖（蓼科虎杖属植物）叶片反射光谱（绿线）

在实际生产中，基于LED的冷光源特征及植株群体光分布特性，LED株间补光广泛应用于果类蔬菜（番茄、黄瓜等）反季节生产中，LED株间补光的核心目的是为了提升植株群体的光合速率，而红光的光合作用光子效率最高（图4），因此，LED株间补光光谱组成应以红光为主、蓝光为辅（红光比例应不低于90%），从而提升植株冠层中下部叶片的光合速率。



## 5 植物光控生长发育

### 5.1 光形态建成

形态建成是指植物生命周期中器官形态结构的形成过程；光形态建成是指在光照条件下，植物生长、发育和分化的过程。该过程发生在植物生长的任何时期，从种子萌发、营养生长、生殖生长到衰老死亡，每一个阶段都要接受光信号的调控。光形态建成间接影响植物光合作用。

### 5.2 植物光受体

植物通过光受体感知不同波段的光，并且通过一系列的信号转导调节基因表达，最终诱导植物生长发育过程。目前已知植物体内有五种不同类型的光受体，包括光敏色素（Phytochrome, phy）、隐花色素（Cryptochrome, cry）、向光素（Phototropin, phot）、ZEITLUPE基因家族（Zeitlupe family members, ZTL）和UVB受体（UV Resistance locus 8, UVR8）（Casal, 2013; Rizzini et al., 2011）。

光敏色素（phyA, phyB, phyC, phyD和phyE）主要感受红光（600 nm~700 nm）与远红光（700 nm~800 nm）；隐花色素（cry1和cry2）、向光素（phot1和phot2）以及ZEITLUPE基因家族主要感受蓝光（400 nm~500 nm）和UVA（315 nm~400 nm）；UVR8主要感受UVB（280 nm~315 nm）（Christie et al., 2015; Heijde and Ulm, 2012; Jenkins, 2014; Liu et al., 2016）。图10为几种光受体的光谱响应范围（Heijde and Ulm, 2012）。

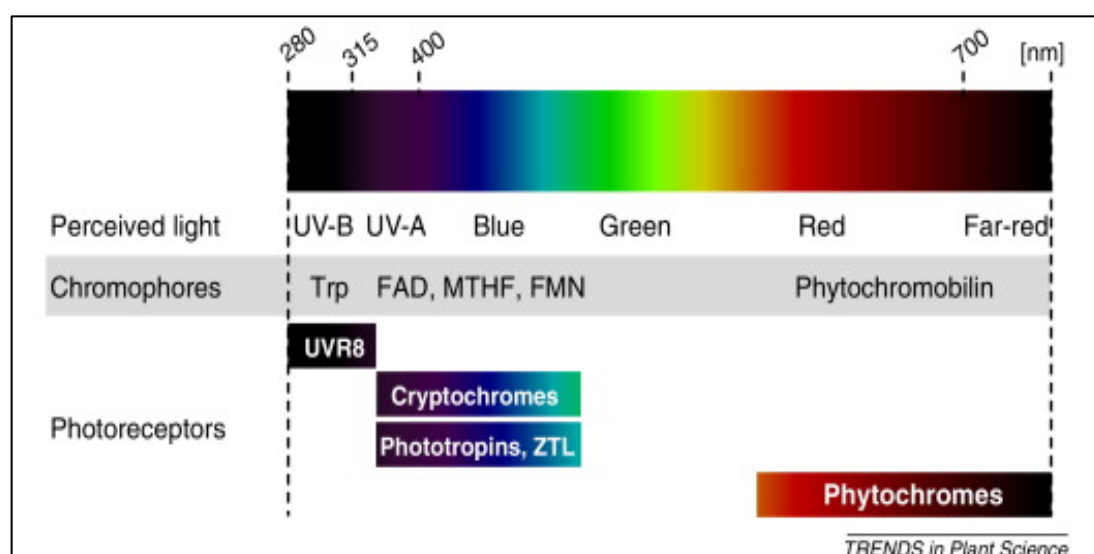


图 10 UVR8、隐花色素、向光素、ZTL 基因家族以及光敏色素的光响应范围

### 5.3 不同光谱对植物形态建成的影响

#### 5.3.1 红光（R）与远红光（FR）

红光作为光信号调节植物光形态建成需要与远红光相结合，通过共同调节光敏色素（Phytochrome）的构型从而调节植物光形态建成。光敏色素从结构上来说分为红光吸收型和远红光吸收型，两种构型在不同比例的红光和远红光下相互转化，能够调节植物内源代谢，调控植物生长发育，改变植物形态，以及介导植物对各种生物和非生物胁迫的响应。光敏色素缺失会导致植物对病原菌、害虫等生物胁迫以及

低温、高温、干旱、盐害等非生物胁迫的抗性发生改变。改变光质（如调节红光/远红光比例）可提高植物对上述逆境胁迫的抗性，并且通过水杨酸、茉莉酸和脱落酸等激素信号途径诱导植物的抗性 (Demotes-Mainard et al., 2016)。

红光过高会抑制植物节间伸长，促进横向分枝；添加远红光能够抑制相关的红光效应，在低比例红光和远红光照射下，植物节间伸长、植株增高、有利于提高光在植株垂直方向的均匀分布。远红光虽然不属于光合有效辐射，但在调控植株形态结构方面具有非常重要的作用。

### 5.3.2 蓝光(B)

蓝光调控植物生长主要通过两种光受体，一种是隐花色素 (Cryptochromes)，另一种是向光素 (Phototropins)。研究发现蓝光对植物的根、茎、叶、花的发育以及生物量累积等均有调控作用。蓝光有利于植物根系的生长发育：蓝光条件下培育的作物幼苗发根数目多且生物量大，而且蓝光能提高幼苗根系活力、总吸收面积和活跃吸收面积。目前，以蓝光对作物根系的影响效应为理论依据的蓝膜育秧已经广泛应用与生产。

蓝光对植物茎秆生长发育具有重要影响。众多研究表明，蓝光可以抑制茎秆伸长，但也因植物种类不同而有所差异。蓝光对于植物生长与形态建成的调控可能与植物激素的变化相关。不同波长的光谱可以通过与其相关的色素作用来影响植物体内的激素平衡，进而引发植物的生理生态变化。蓝光在植物光形态建成中具有重要作用，影响植物的向光性、光形态发生、气孔开放以及叶片的光合作用等。以红光为主，辅以蓝光可实现植物的正常生长发育与产量形成。

### 5.3.3 近紫外光 (UVA)

近紫外光 (UVA) 是一种长波紫外线，目前，植物光生物学研究尚未发现专属于 UVA 波段的光受体。长期以来，人们通常认为 UVA 调控植物生长的光受体与蓝光相同，包括隐花色素 (cryptochromes) 和向光素 (phototropins)，但体外分离两种光受体其吸收光谱的波峰在蓝光区而非近紫外光区，所以近紫外光会对植物产生与蓝光相似的影响但影响程度不尽相同。

研究表明，UVA 能够提升植物叶片光保护能力。UVA 刺激植物增强次生代谢，从而产生更多的次生代谢物质，如酚类物质和黄酮类物质，而该类物质能够从物理和生物化学两方面防御光破坏：一方面次生代谢物质加强对高光强的阻挡与过滤，另一方面次生代谢物质能够消除过氧化物和单线态氧等有害光产物，降低光抑制的发生概率。

UVA 还能改变叶片结构，引起角质、叶片细胞以及栅栏组织等结构发生变化。例如 UVA 诱导叶片表皮细胞层加厚，能够过滤掉部分 UVB，从而减少到达叶片内部的 UVB，这是植物保护自身免受太阳光中 UVB 伤害的重要机制 (Barnes et al., 2016)。Gartia 等人研究发现一定剂量的 UVA 处理能够保护植物叶片内光合器官免受 UVB 损伤 (Gartia et al., 2003)，所以 UVA 与 UVB 对植物的影响并不是独立存在的，而是相互影响。

UVA 也会影响植物干物质积累。Tezuka 等人发现 UVA 能够提高番茄植株中叶绿素的含量进而促进番茄生长 (Tezuka et al., 1993)，而 Krizek 研究则发现在 UVA 下黄瓜干物质累积量降低 (Krizek, 2004)，不同种间或者亚种间植物干物质对 UVA 的响应表现出较大的差异性，目前还没有较为一致的结论。

总的来说，UVA 可作为一种刺激信号诱导植物产生一系列生理反应从而提高植物的抗逆性，同时其破坏能力相比于 UVB 较弱，并不足以伤害植物组织、器官或者 DNA。新近的研究结论以 350 nm 为界限又将 UVA 分为长波 UVA (UVA<sub>L</sub>, 350 nm~400 nm) 和短波 UVA (UVA<sub>S</sub>, 315 nm~350 nm)。通过转录组学研究发现，UVA<sub>L</sub> 对植物基因表达的影响接近于蓝光的影响，而 UVA<sub>S</sub> 对植物基因表达的影响接近于 UVB 的影响，因此，当前初步认为 UVA<sub>L</sub> 主要与蓝光共享光受体，而 UVA<sub>L</sub> 与 UVB 共享光受体。该研究结论对于指导 UVA 在植物光照领域合理应用具有重要意义。当前，短波 UVA LED 光源技术尚未突破，而 360 nm 以上的长波 UVA LED 光源技术已很成熟，可以考虑在植物光照光谱中合理应用 UVA<sub>L</sub>。

### 5.3.4 中紫外光 (UVB)

植物通过其特有的光受体 UVB Resistance 8 (UVR8) 感受外界 UVB 辐射。大量研究表明，约 2/3 陆地植物对中紫外线 (UVB) 辐射响应显著，虽然存在种间和亚种之间的差异，但大多数情况下 UVB 辐射对植物生长和发育存在不利的影 响，主要表现为抑制植物生长、降低光合速率等，同时还会引起类黄酮、花青素苷和过氧化物积累增加 (Brown et al., 2005)，叶片变厚变小并向下弯曲等 (Fierro et al., 2015) 一系列生理和形态改变。

UVR8 是一种二聚体蛋白质，在感应 UVB 后瞬间解聚为单体，并与 E3 泛素连接酶 COP1 (constitutively photomorphogenic1) 相互作用，从而激活 UVB 响应基因的表达 (纳小凡 et al., 2013)。高强度或者长时间的 UVB 照射会对植物 DNA 造成损伤，所以在人工补光或全人工光植物生产中 UVB 的使用非常少。近年来，也有研究者提出合理利用 UVB 辐射可改善园艺植物产量及品质，但具体应用方案还有待深入探讨。

### 5.3.5 黄绿光

黄绿光 (500 nm~600 nm) 介于红蓝光之间，也在光合有效辐射波谱范围内，但是叶绿体对黄绿光波段的吸收较少，即利用率较低，所以通常认为黄绿光并不是植物生长的理想光源，因此在前人研究中一般认为该波段对植物生长贡献很少；但是近期的研究发现绿光对植物下部叶片的光合与生长有显著的调节作用，植物会产生类似于避荫反应的下部伸长现象。Folta and Maruhnich (2007) 发现在红蓝背景下补充绿光能够减缓莴苣叶片中叶绿素的降解，补充绿光还能够提高红蓝背景光下番茄幼苗叶片中叶绿素含量，促进幼苗伸长，提高番茄幼苗的壮苗指数等 (令狐伟 et al., 2015)。但是黄瓜和番茄对绿光的响应不同，所以不同植物种对绿光的响应尚待更多的研究和数据支持。

## 5.4 植物营养品质光调控

植物营养品质受光环境影响很大，尤其是光强和光质，具体因物种而异。

**光强：**维持植物产品品质需要有一定的光照强度。一般来说，增加光强能够增加植物叶绿素、可溶性糖、黄酮、维生素 C 等有益物质含量。如植物工厂叶菜采收前增加光照强度和光照时间，可以大幅提升叶菜可溶性糖、维生素 C 含量，并降低植物体内硝酸盐含量等。

**光质：**不同光质对植物器官中次生代谢物质的影响差异很大。一般来说，红光有利于碳水化合物的积累，能促进可溶性糖的合成，但不利于可溶性蛋白的积累；而蓝光能促进蛋白质形成，且蓝光和 UV

均可诱导类黄酮和花青素的积累，提高类胡萝卜素含量等；红光比例过高会降低植物营养品质，如降低叶绿素、类黄酮等物质含量。

## 5.5 光周期调控植物生长发育

光周期也是调节植物生长的重要信号源。如种子萌发、开花以及果实成熟等生命历程均受到光照时间的调节，植物对周期性的光照时间变化（特别是夜间暗期的长短）的响应被称为植物的光周期现象。光周期是植物判断时令变化并调节其自身生长周期的重要光信号。

许多植物成花有明确的极限日照长度，即临界日长（critical day length）。据此，植物通常被分为长日照植物、短日照植物和日中性植物三大类（如表 2）。长日植物的开花需要暗期短于某临界值；而短日植物开花则要求暗期长于某一临界值；日中性植物成花对日照长短反应不敏感。此外，还有许多植物的开花对日照长度的反应并不十分严格，它们在不适宜的光周期条件下经过一段时间之后也能开花，这些植物称为相对长日植物或相对短日植物。同种植物的不同品种对日照的要求也不同，如烟草中有些品种为短日性的，有些为长日性的，还有些为日中性的。

表 2 长日、短日、中日植物分类表

光周期分类	植物	特点
长日植物	禾本科、十字花科、菊科等	典型的长日植物必须满足一定天数的长于临界日长日照才能开花，如日照长度短于 8.5 h 不能开花。
短日植物	豆科、桑科、草莓、秋海棠等	日照长度短于一定时数才能成花的植物，对这些植物适当延长黑暗或缩短光照可促进或提早开花，相反，如延长日照则推迟开花或不能成花。
日中性植物	茄科、蔷薇科、石蒜科等	日中性植物的成花对日照长度不敏感，只要其他条件满足，在任何长度的日照下均能开花。

人工调节植物光周期的主要方式是人工补光延长光照时间，或者人工遮挡自然光使植物提前进入暗期。相比于日间以促进光合为目的的补光，延长植物光周期所需的光照强度较小，起到光信号的作用即可。此外，除控制绝对光照或者暗期时间以外，若将植物生长时期的长夜打断，无论是短日植物还是长日植物，都会出现短夜现象，即短日植物不能开花，而长日植物正常开花。因为对于植物光周期来说，起决定作用的并不是昼长，而是夜长。但是对暗期打断的光照有强度上的需求，打断时间越短则其光照强度越强。综上所述，通过调控光周期来控制花期为观赏园艺作物高效生产的重要管控措施之一。

长期连续光照环境下，由于植物叶片光合产物（淀粉）累积，容易导致光合器官受损，叶片光合能力下降。自然界中绝大部分植物都难以适应长期连续光照，因此，适当的暗期是保证植物正常生长的关键因素之一。

## 6 植物生长光响应关键评判指标

### 6.1 植株形态

#### 6.1.1 株高

株高是指植株根颈部到顶部之间的距离，其中顶部是指主茎顶部；株高是评价植株形态最明显的指标，用于评价植物纵向生长的能力。一般采用卷尺或者直尺测量株高。

### 6.1.2 茎粗

茎粗是指近基部最粗处茎的纵横二向直径的平均值；用于评价植物生长的健壮程度，茎粗越大，越有利于增加植株中物质的运输能力。用游标卡尺量茎基部直径，读数即为茎粗。

### 6.1.3 节间距

节间距是指植物茎节间与节间之间的长度；一般情况下，节间距指标可以作为植株是否发生徒长的判断依据。在组培苗中，节间长度和株高一起可以反映组培苗的扩繁系数。

### 6.1.4 比叶重

比叶重是指单位叶面积的叶片重量（干重或鲜重），通常用干重来表示，单位： $\text{g}/\text{cm}^2$ 。植物比叶重的变化主要受叶片厚度和叶片密度的影响，它们的变化也会影响光合速率和光能利用率。当光环境变化时，植物叶片可以通过调节比叶重来优化光合速率。

比叶面积测定通常有两种方法：方法一，将样叶用叶面积仪迅速测量其叶面积，然后  $80\text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒重，用电子天平称其叶面积所对应的叶干重，并计算比叶重，比叶重 ( $\text{g}/\text{m}^2$ ) = 总叶干重/总叶面积；方法二，打孔称重法，用  $1\text{ cm}^2$ （或其它已知单位面积）的打孔器在叶片上打若干个小孔，将打取的小圆片放到烘箱烘至干重，用天平称重，用称得的重量比小孔的总面积即为比叶重。

### 6.1.5 根冠比

根冠比是指植物地下部与地上部的鲜重或干重的比值。它反映了植物地下部分与地上部分的相关性。植物地上部与地下部相互依赖又相互竞争，地上部进行光合作用，向地下部分提供营养物质，而地下部分又为地上部分提供水分、矿质元素等。地上部和地下部相互协调促进植物健康生长。

## 6.2 生物量

### 6.2.1 鲜样质量

#### 6.2.1.1 地上部鲜样质量

鲜样质量为自然状态下采集后立即称量得到的质量。

地上部鲜样质量指植物茎基部以上部分的鲜样质量。地上部鲜样质量用于测量地上部分的生物量积累，反映植株地上部对同化产物的积累程度。

#### 6.2.1.2 地下部鲜样质量

地下部鲜样质量指植物茎基部以下部分的鲜样质量。地下部一般指根系，地下部鲜样质量反映生物量向植株地下部积累情况。植物根系发达，表示植物可以获取更多的水和矿质元素，保障植株生长发育的需要，同时增强其抗逆性，在缺水的环境下可以吸收到更多的水分。

#### 6.2.1.3 可食用部位鲜样质量

可食用部位鲜样质量是指自然状态下某种作物的可食用部位的鲜样质量。根据不同作物食用部分的不同，选取的食用部位（叶菜类以地上部分为主，块茎类以储藏器官为主）也不同。可食用部位鲜样质量用于评价植株的经济价值。同种作物，可食用部位质量越高，则说明植株的经济价值越高，用于评价作物产量的高低。也可以衡量经济作物的产量及品质，估测产量，计算经济系数。

## 6.2.2 干样质量

### 6.2.2.1 地上部干样质量

干样质量为植物烘干至恒重后的质量。通过干重与鲜重的比值可以获知植物含水量变化信息。

植物茎基部以上的地上器官干样质量，包括茎、叶、花和果实等。地上部干样质量用于评价植株地上部有机物的积累情况。检测植株茎、叶、果实等完全除去自由水后所得的生物量，可以衡量植株地上部生长的情况，用于计算根冠比，评估地上与地下部的相互关系等。可以通过干样测定方法评测出各个生育期的地上部分干样质量，进而可以推断出某一变量对地上部分生长状况的影响。

### 6.2.2.2 地下部干样质量

地下部干样质量是指植株茎基部以下部分（通常指根系）干样质量。地下部干样质量用于评价植株根系有机物的积累情况，判断根系的生长状况，分析根冠比。

### 6.2.2.3 可食用部位干样质量

通常是指植物中可供人类食用的部分干样质量。不同作物的可食用部位不同。例如：番茄的果实、马铃薯的块茎、小麦、玉米等禾谷类作物的籽粒等。用于衡量作物经济产量状况，分析作物的经济效益。

## 6.2.3 生物量分配

生物量分配是指特定器官（如叶、茎、根、果实等）的干重或鲜重占植株总干重或鲜重的比值。它能够反映在不同环境条件下植物合成的有机物在不同器官的分配情况，是代表植物能量代谢与物质分配的重要指标。如生物量分配至茎的比例越高，则植物倾向于伸长生长；生物量分配至叶片的比例越高，植物更倾向于叶片延展生长。

## 6.2.4 收获指数

收获指数是作物收获时经济产量（籽粒、果实等）与生物产量之比，又名经济系数。收获指数可以评价光合作用积累的有机物转运到有经济价值的产品器官中能力大小。经济产量指栽培目的所需要的主产品收获量。例如，禾谷类作物的经济产量主要是指籽粒；薯类作物的经济产量主要是指块根和块茎。生物产量指作物生产期间生产和积累的有机物质的总量。

## 6.3 品质

总体而言，植物产品品质主要由下列四部分构成：

（1）感官品质：包括外观品质（形状、大小、颜色、含水率等）和风味（味道、香气、组织结构等）；

（2）必需的营养成分：碳水化合物、蛋白质、维生素、矿物质等；

(3) 生物活性物质：硫代葡萄糖苷、类胡萝卜素、多酚、皂角苷、硫化物、植物甾醇类、萜类化合物、膳食纤维等；

(4) 不良物质含量：有害化合物（硝酸盐、草酸、茄碱）、杀虫剂残留、毒枝菌素、重金属等。植物产品品质的评判需依据农业部门相关标准进行综合评判。

## 6.4 抗逆性

### 6.4.1 抗逆性概述

抗逆性是指植物具有的对各种胁迫（或称逆境）或不利环境的抵抗能力，例如抗寒、抗高温、抗旱、抗盐、抗高光胁迫、抗病虫害等。植物在不同光环境下生长会形成对某些环境因子的适应能力，即采取不同的方式去对抗各种胁迫因子。如针对种苗产业需求，可以通过光环境调控达到壮苗生产的目的。例如在育苗过程中进行适当高光处理可以提高种苗光保护能力，从而提升种苗移栽后的适应能力。不同光质对植物抗逆性也有影响，例如蓝光可以提高植物耐高光胁迫的能力(Kang et al., 2021)，而远红光可以提高植物耐低温的能力(Wang et al., 2016)。

### 6.4.2 壮苗指数

壮苗指数是用于衡量秧苗素质的指标。壮苗指数=（茎粗/株高）×单株干重。壮苗指数是衡量幼苗素质的数量指标，它与作物的早熟、优质、丰产有密切关系。

### 6.4.3 根系活力

反映了根的生长情况和活力水平，直接影响地上部的生长和营养状况及产量水平。

### 6.4.4 叶片光系统 II 最大光合效率 ( $F_v/F_m$ )

$F_v/F_m$  为充分暗适应的植物叶片光系统 II 最大或潜在的光子效率。健康植物的  $F_v/F_m$  值是比较恒定的，一般在 0.80~0.85 之间。 $F_v/F_m$  与植物的营养与受胁迫程度密切相关，当植物受到胁迫时， $F_v/F_m$  会低于 0.8，因此该指标是评价植物是否受到胁迫的敏感探针。 $F_v/F_m$  可以通过叶绿素荧光分析系统测定。

## 6.5 植物生长光照能效

植物生长光照能效是指补光情况下植株生长消耗的单位电能所产生的干物质量，单位： $g \cdot kW^{-1}$ 。植物生长光照能效反映了植株光合产物的积累对人工光照的响应能力。

## 7 植物生长对 LED 人工光源的要求

### 7.1 光子效率/光合光子效率

在 LED 植物光照生产领域，LED 光源的电光转化效率可使用光子效率 (Photon Efficacy, PE) 或光合光子效率 (Photosynthetic Photon Efficacy, PPE) 来表征。光子效率和光合光子效率单位均为  $\mu mol \cdot J^{-1}$ ，即消耗单位能量的电能转化的光子数量。光子效率 (PE) 表示消耗单位能量的电能转化的 280 nm~800 nm 植物光生物活性有效光谱范围的光子数量；光合光子效率 (PPE) 表示消耗单位能量的电能转化的 400 nm~700 nm 植物光合有效光谱范围的光子数量。

DLC (DesignLights Consort) 发布的 Technical Requirements for LED-based Horticultural Lighting (Version 3.0) 第一版草案中要求设施植物生长的 LED 产品 PPE 应不低于  $2.3 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ , 允许公差为  $-5\%$ 。在 DLC 公布的用于植物生产的 LED 灯具 PPE 最高可达  $3.8 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ 。当前, 国内相关企业生产的植物生长用白光 LED 光源 PPE 已普遍达到  $2.3 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$  以上, 多个企业相关产品 PPE 超过  $3 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ 。单色光 LED 光源技术水平也在不断提升, 近紫外 (UVA:  $360 \text{ nm} \sim 380 \text{ nm}$ ) 光源 PPE 超过  $1 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ ; 红光 ( $660 \text{ nm}$ ) 光源 PPE 超过  $4 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ ; 远红光 ( $730 \text{ nm}$ ) 光源 PE 可达  $4.0 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ 。

光子效率/光合光子效率是评价植物生产用 LED 光源节能性的重要参数。如在人工光植物工厂生产中, 电能消耗是其运行成本的主要构成部分, 其中人工光照能耗约占整体能耗的  $80\%$  以上, 因此, 使用高光子效率的 LED 光源可有效降低能耗, 减少人工光植物生产的成本。选择高光效的 LED 发光器件、二次光学设计、使用智能控制系统适时调整光照策略等都可有效降低 LED 光源能耗。

## 7.2 寿命

在通用照明领域, 通常用光通量维持率特性来表征 LED 光源寿命, 即其达到初始光通量  $70\%$  的时间, 用  $L_{70}$  表示。鉴于植物生产领域关注的是 LED 光源的光子量, 常用光子通量维持率特性来表征 LED 光源的寿命, 以 Q (quanta) 为前缀。为有效提高植物的光合效率, 白光 LED 光源 ( $400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$ ) 常用其达到初始光通量  $90\%$  的时间, 即  $Q_{90}$  表示。红外 LED 光源 ( $700 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$ ) 也常用  $Q_{90}$  来表征其寿命。不同于白光 LED, 紫外 LED 光源, 尤其是 UVB 波段 LED 光源光子效率较低, 且燃点后其光子通量效率在短时间内快速衰减, 至  $Q_{90}$  甚至  $Q_{70}$  的时间并不稳定。目前, 紫外 LED 光源寿命还未有较为统一的定义及判定参数, 相关企业也不对客户承诺紫外 LED 光源寿命, 部分企业只承诺紫外 LED 的质保期。紫外光作为一种信号来调节植物光形态建成以及品质形成, 较光合作用所需的光子通量密度较低, 根据紫外 LED 光衰特性, 建议使用  $Q_{50}$ , 配合对峰值波长漂移的要求判定紫外 LED 光源的寿命。

DLC 发布的 Technical Requirements for LED-based Horticultural Lighting (Version 3.0) 第一版草案中,  $400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$  范围的白光 LED 光源、单色光 LED 光源及混合 LED 光源要求其  $Q_{90}$  不小于  $36\ 000 \text{ h}$ , 对  $700 \text{ nm} \sim 800 \text{ nm}$  远红光 LED 的  $Q_{90}$  不做要求。国内企业生产的植物生产用  $400 \text{ nm} \sim 700 \text{ nm}$  范围 LED 光源  $Q_{90}$  普遍达到  $30\ 000 \text{ h}$  以上, 紫外 LED 光源)  $Q_{50}$  达到  $20\ 000 \text{ h}$  左右。

## 7.3 可靠性

基于植物生长环境的特殊性, 对 LED 光源可靠性提出了诸多要求。LED 光源首先应符合 GB 7000 系列相关电气安全要求。设施植物生产的环境复杂多样, 为保障 LED 光源在环境温度变化快、高温高湿等较为严苛的环境下正常工作, 可根据实际需求进行恒定湿热试验、温度循环试验等检验 LED 光源的环境适应性。鉴于设施植物生长环境存在的潮湿甚至淋水的情况, LED 光源外壳防护等级宜达到 IP54 的要求, 在有淋水的环境中应满足 IP65 的防护等级。考虑到环境中腐蚀气体物 (如施肥、喷洒农药、植株腐烂等情况) 的影响, LED 光源也应具备一定的防腐性能。

## 7.4 灯具构型

植物生产使用的 LED 灯具形式多样。常见的类型可分为点光源、线光源和面光源。点光源 (如 LED



球泡灯)适用于单株植物集中补光,因其安装方便,成本较低,多用于温室大棚。线光源(如LED管型灯)设计灵活度较高,可根据实际需要设计成不同发光角度、不同发光面、不同形状的灯具,适用于多层植物生产系统顶部光照及大冠幅植物(如茄果类作物)的株间补光等。面光源(如LED面板灯、LED顶棚灯)适用于对光照均匀度较高的单层或多层植物生产系统的顶部光照。

## 7.5 控制功能

由于植物在不同生长阶段的光环境需求不同,可通过调节光照时间、光子通量密度、光谱等要素来满足各类植物在不同生长阶段的光环境需求,提升植物的产量与品质,缩短生长周期,最大程度提高光能利用率。根据需求,LED灯具可实现设置/调节光周期、调节光子通量密度、调节光谱等控制功能。

目前,设施植物生产使用的LED灯具控制功能多为设置/调节光周期、调节光子通量密度,光谱可调灯具多用于科学研究。LED灯具可调可控既满足了植物生产光照需求,又可实现对能源的科学管理,降低植物生产运营能耗。

植物生产LED灯具调光可使用多种控制方法,有线控制如0-10V调光、PWM、或其他有线控制方式。无线控制如蓝牙、Wi-Fi、Zigbee、EnOcean等。

## 8 植物生产人工光环境光照设计要素分析

### 8.1 光子通量密度

在植物学或农业生产领域,光子通量密度(PFD, Photon Flux Density)也即通常所说的光照强度,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,即单位叶面积在单位时间所接受到的光子数,这与光合作用速率的单位一致。如上所述,对植物生长有直接影响的波长范围为280 nm~800 nm。直接参与光合作用的光子通量密度称之为光合作用量子通量密度(PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density),其波长范围为400 nm~700 nm。光子通量密度无固定的参数范围,这一参数因作物种类和应用场景而异,如:果菜需光量明显高于叶菜,温室补光光子通量密度可随自然光强的变化而动态波动,而全人工光植物工厂需要恒定的光子通量密度。此外,光合作用受多环境因子的影响,确定适宜的人工光光子通量密度必须同时考虑其它环境因子的协同作用,尤其是 $\text{CO}_2$ 浓度。综上,在植物生长LED人工光环境中确定光子通量密度时要综合考虑多方面因素,本文件4.1部分、图3光合作用响应曲线可为参考依据。

用于测量光合作用光子通量密度的仪器为光子传感器,目前国际上通用且精确度较高的光子传感器为LI-190R光合有效辐射传感器,对于包含远红光以及紫外波段的光源,可用光谱仪测量其光子通量密度。光子通量密度受其测量位置影响较大,因此,在定义光子通量密度参数时,必须明确其测量高度及方位,如:光源正下方50 cm处的光子通量密度为 $230\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 8.2 光谱分布

传统植物生长补光灯以荧光灯和高压钠灯为主。由于LED光谱精确可调、能耗低、寿命长,被公认为是设施农业生产的理想光源。随着光质生物学研究的不断推进,目前已经被证实的植物生长所需的辐射波长范围已经扩展到280 nm~800 nm。600 nm~700 nm波段的红光和400 nm~500 nm波段的蓝光为驱动光合作用的最主要光质。其中,红光的量子效率高于蓝光(McCree, 1972),因此,在以LED为补光

光源的实际应用过程中，红光比例要高于蓝光。

Hogewoning et al. (2010) 研究证实植物生长对蓝光呈质的响应，以黄瓜幼苗为例，发现植物正常生长需要保证至少 7% 的蓝光，随着蓝光比例升高，其叶片光合潜能增加，即呈阳生植物特性。建议蓝光比例不宜过高，因为高比例蓝光会导致株型紧凑，从而影响冠层光截获能力，降低植株总体光能利用效率。对于盆栽花卉等以紧凑株型为高品质的观赏植物来说，可以通过控制蓝光比例来实现品质调控的目的。

波峰为 730 nm 左右的远红光对植物光形态建成起决定性作用。在设施植物生产领域，远红光于近几年才引起业界的广泛关注，研究发现在玻璃温室番茄生产过程中辅以  $40 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的远红光可增产 12%，主要归因于远红光处理下节间伸长，冠层光强分布更均匀，导致植株光能利用率提升 (Zhang et al., 2019)；在以  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的红蓝光 (R/B=7/1) 植物工厂环境下，添加  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的远红光可提升叶菜鲜重 53%。

尽管黄绿光 (500 nm~600 nm) 的量子效率显著低于红蓝光，但其透射性高，对于冠层较大的果菜类作物来说，适当增加绿光比例有助于促进冠层中下部叶片的光合作用。总体而言，目前基于设施植物生产的 LED 光谱配方众多，难以得出统一的结论，相关研究有待进一步推进。

用于测量光谱分布的仪器为光谱仪，目前常用的有美国海洋光学 (Ocean Optics)、荷兰爱万提斯 (Avantes) 等厂家的系列光纤光谱仪，国产的远方 (EVERFINE) 系列光谱仪应用也较多。

### 8.3 光周期

本节聚焦于人工光环境下光周期确定依据。如前所述，光周期是植物对昼夜周期中光照期和暗期长短交替变化的感知与响应，植物通过感受外界光周期的变化来调节自身发育阶段。因此，对于以开花为目的的植物来说，必须明确植物类型，即长日、短日、日中性植物，以此为依据来确定其光周期。

对于以自然光为主、人工光为辅的温室补光应用而言，需先明确目标作物每天的光需求总量，以历史同期的自然光总量为依据估算每天人工补光的总量，然后设定人工补光光子通量密度，并确定光期时长，对于绝大多数作物来说，每天必须保证至少 4 小时的暗期，否则容易出现光合产物在叶片累积，由此导致光合作用反馈抑制现象，降低光能利用效率。

对于全人工光植物工厂环境下的植物生产来说，光周期可依据目标作物的光需求总量及到达冠层顶部的光子通量密度计算。

### 8.4 辐射方向特性

人工光辐射的方向特性设计具有重要的意义。以生菜为例，相对于直射光而言，漫射光可增加生物量 20% 左右。Li et al. (2014) 研究发现在漫射光条件下，温室番茄全年增产 10% 左右。植物光照灯具的辐射方向特性可用雾度来衡量，雾度 (haze) 是偏离入射光  $2.5^\circ$  角以上的透射光强占总透射光强的百分数。对于用于植物光照的 LED 光源 (芯片)，在光源封装方面可考虑在不影响透光率的前提下增加 LED 辐射的散射性，即雾度，从而达到增加漫射光比例的目的。

植物生长具有向光特性，这也是植物向性运动之一。植物器官的向光性又分为正向光性、负向光性、横向光性，但一般植物的茎向光弯曲，呈正向光性。因此，光照的均匀度 (区域均匀度和株间均匀度以及冠面均匀度) 决定了植物的外观特性和单株植物产品的一致性 (外形和单株生物产量)，对于白光或

者多色混合的植物光照用 LED 灯具，在垂直于灯具法线方向并距离灯具 30 cm 的受照平面上，空间光谱均匀性 UR/B 应不低于 80 %。对于人工光环境植物生产来说，高产优质是其核心目标，因此在光环境设计过程中必须保证光强及光质均匀分布，以保证植株的均一性。

## 7.5 LED 植物生长灯应用模式

目前，LED 植物生长灯应用模式主要有以下两类：

### (1) 全人工光植物工厂 LED 植物生长灯应用

全人工光植物工厂是设施农业发展的最高形式，它是由计算机对植物整个生育过程的光照、温度、湿度、CO<sub>2</sub> 浓度、营养液等环境因素进行自动控制，不受或很少受自然条件制约的一种可实现作物周年连续生产的高效农业系统。植物工厂环境稳定性强，不占用农用耕地，单位面积产量可达露地栽培的几十倍甚至上百倍以上。

高能耗问题一直制约着植物工厂的大规模推广应用。人工光植物工厂中的能消耗主要包括人工光源、空调、风机、加湿器、控制装置等设备的耗电用电，其中人工光源能耗通常约占总体运行成本的 50 %~60 %。降低人工光源能耗可有效降低植物工厂的运行成本，加速植物工厂的普及推广应用。

根据植物工厂总体空间以及目标作物的冠幅，一般采用多层立体栽培方法，将 LED 光源布置于各层栽培架顶端，采用智能或人工控制手段调控光参数。

### (2) 自然光为主、人工光为辅的温室补光应用

为解决温室栽培中的光照不足，有效缓解植株弱光逆境，对植株进行人工补光成为提高设施农业生产效率的重要手段。在荷兰、日本等农业发达国家，温室生产中基本采用了人工补光。但由于我国设施农业人工补光的应用发展较晚，补光的研究与普及与设施农业发达国家还存在相当差距。研究表明，冬春季补光能够促使提前成熟，增产 20 %~30 %。对于种苗来说，人工补光有利于壮苗生产，种苗具有很好的抗逆性，有助于减少病虫害。

按照温室有效补光的位置，分为顶部补光和株间补光，光环境测量时需要对照面的测量位置做统一规定。

对于叶菜或冠幅较小的植物，主要采取顶部补光模式，将光源布置于温室顶部或作物冠层以上某一特定的距离；对于冠幅较大的果菜类作物，如番茄、黄瓜等，主要采取顶部补光结合株间补光模式，顶部补光光源安装于温室顶部，株间补光光源布置于两行植株之间冠层中上部位，LED 光源两侧发光，为保证较高的光能利用率，发光面应上倾 45° 角；也有仅采取株间补光的应用案例。顶部补光光强通常根据外界自然光强来进行调控，一天中呈动态变化趋势；而株间补光光强通常恒定不变，只受光周期调控。

## 参考文献

- [1] ANSI/ASABE S640 2017 Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms)
- [2] Barnes, P.W., Tobler, M.A., Keefover-Ring, K., Flint, S.D., Barkley, A.E., Ryel, R.J., Lindroth, R.L., 2016. Rapid modulation of ultraviolet shielding in plants is influenced by solar ultraviolet radiation and linked to alterations in flavonoids. *Plant Cell Environ* 39, 222-230
- [3] Brown, B.A., Cloix, C., Jiang, G., Kaiserli, E., Herzyk, P., Kliebenstein, D.J., Jenkins, G.I., 2005. A UV-B-specific signaling component orchestrates plant UV protection. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, 18225-18230
- [4] Casal, J.J., 2013. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annu Rev Plant Biol* 64, 403-427
- [5] Christie, J.M., Blackwood, L., Petersen, J., Sullivan, S., 2015. Plant flavoprotein photoreceptors. *Plant Cell Physiol* 56, 401-413.
- [6] Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., Bertheloot, J., Le Gourrierec, J., Pelleschi-Travier, S., Crespel, L., Morel, P., Huché-Théliier, L., Boumaza, R., Vian, A., Guérin, V., Leduc, N., Sakr, S., 2016. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. *Environmental and Experimental Botany* 121, 4-21
- [7] Emerson, R., Chalmers, R., Cederstrand, C., 1957. Some factors influencing the long-wave limit of photosynthesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 43, 133-143.
- Emerson, R., Lewis, C.M., 1943. The dependence of the quantum yield of *Chlorella* photosynthesis on wave length of light. *American Journal of Botany* 30, 165-178
- [8] Fierro, A.C., Leroux, O., De Coninck, B., Cammue, B.P., Marchal, K., Prinsen, E., Van Der Straeten, D., Vandenbussche, F., 2015. Ultraviolet-B radiation stimulates downward leaf curling in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiol Biochem* 93, 9-17
- [9] Folta, K.M., Maruhnich, S.A., 2007. Green light: a signal to slow down or stop. *J Exp Bot* 58, 3099-3111
- [10] Franklin, K.A., Whitelam, G.C., 2005. Phytochromes and shade-avoidance responses in plants. *Ann Bot* 96, 169-175
- [11] Gartia, S., Pradhan, M.K., Joshi, P.N., Biswal, U.C., Biswal, B., 2003. UV-A irradiation guards the photosynthetic apparatus against UV-B-induced damage. *Photosynthetica* 41, 545-549
- [12] Heijde, M., Ulm, R., 2012. UV-B photoreceptor-mediated signalling in plants. *Trends Plant Sci* 17, 230-237
- [13] Hill, R., Bendall, F., 1960. Function of the two cytochrome components in chloroplasts: a working hypothesis. *Nature* 186, 136-137

- [14] Hogewoning, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W., Harbinson, J., 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J Exp Bot* 61, 3107-3117
- [15] Jenkins, G.I., 2014. The UV-B photoreceptor UVR8: from structure to physiology. *Plant Cell* 26, 21-37
- [16] Kang, C., Zhang, Y., Cheng, R., Kaiser, E., Yang, Q., Li, T., 2021. Acclimating Cucumber Plants to Blue Supplemental Light Promotes Growth in Full Sunlight. *Frontiers in Plant Science* 12, 782465
- [17] Krizek, D.T., 2004. Influence of PAR and UV-A in Determining Plant Sensitivity and Photomorphogenic Responses to UV-B Radiation. *Photochemistry and Photobiology* 79, 307-315
- [18] Li, T., Heuvelink, E., Dueck, T.A., Janse, J., Gort, G., Marcelis, L.F.M., 2014. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: quantifying the contributing factors. *Annals of Botany* 114, 145-156
- [19] Liu, B., Yang, Z., Gomez, A., Liu, B., Lin, C., Oka, Y., 2016. Signaling mechanisms of plant cryptochromes in *Arabidopsis thaliana*. *J Plant Res* 129, 137-148
- [20] McCree, K.J., 1972. The action spectrum, absorbance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology* 9, 191-216
- [21] Rizzini, L., Favory, J.J., Cloix, C., Faggionato, D., O'Hara, A., Kaiserli, E., Baumeister, R., Schafer, E., Nagy, F., Jenkins, G.I., 2011. Perception of UV-B by the *Arabidopsis* UVR8 Protein. *Science* 332, 103-106
- [22] Tezuka, T., Hotta, T., Watanabe, I., 1993. Growth promotion of tomato and radish plants by solar UV radiation reaching the Earth's surface. *J. photochem. photobiol. b Biol* 19, 61-66
- [23] Wang, F., Guo, Z., Li, H., Wang, M., Onac, E., Zhou, J., Xia, X., Shi, K., Yu, J., Zhou, Y., 2016. Phytochrome A and B Function Antagonistically to Regulate Cold Tolerance via Abscisic Acid-Dependent Jasmonate Signaling. *Plant Physiol* 170, 459-471
- [24] Zhang, Y.-t., Zhang, Y.-q., Yang, Q.-c., Li, T., 2019. Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intra-canopy lighting with LEDs. *Journal of Integrative Agriculture* 18, 62-69
- [25] 令狐伟, 刘厚诚, 宋世威, 苏蔚, 孙光闻, 陈日远, 2015. LED 绿光补光对黄瓜和番茄幼苗生长的影响. *温室园艺* 10, 37-38
- [26] 纳小凡, 任树勇, 彭励, 郑丽萍, 2013. 光受体 UVR8 对 UV-B 响应机制研究进展. *西北植物学报* 33, 1703-1708
- [27] DLC Technical Requirements for LED-based Horticultural Lighting (Version 3.0 DRAFT 1)