

植物生长 LED 人工光环境技术报告

Technical Report on LED Artificial Light for Plant Growth

版本：V01.00

2018-09-07 发布

国家半导体照明工程研发及产业联盟发布

目 录

前 言	III
1 概述	1
2 植物光需求分析	1
2.1 总述	1
2.2 光合作用	1
2.2.1 概述	1
2.2.2 光合作用速率	2
2.2.3 光消散系数与植物光截获能力	3
2.2.4 光合有效辐射日累积量	4
2.3 光形态建成	4
2.3.1 总述	4
2.3.2 红光与远红光	5
2.3.3 蓝光	6
2.3.4 近紫外光 (UV-A)	6
2.3.5 中紫外光 (UV-B)	7
2.3.6 黄绿光	7
2.3.7 光质调控	8
2.4 光周期	8
3 基于光响应的关键植物生长指标	9
3.1 植株形态	9
3.1.1 株高	9
3.1.2 茎粗	9
3.1.3 节间距	10
3.1.4 比叶重	10
3.1.5 根冠比	10
3.2 鲜样质量	10
3.2.1 地上部鲜样质量	10
3.2.2 地下部鲜样质量	10
3.2.3 可食用部位鲜样质量	10
3.3 干样质量	10
3.3.1 地上部干样质量	10
3.3.2 地下部干样质量	11
3.3.3 可食用部位干样质量	11
3.4 收获指数	11
3.5 壮苗指数	11
3.6 根系活力	11
3.7 植物生长光照能效	11
4 人工光环境光照设计要素分析	11
4.1 光量子通量密度	11

4.2 光谱分布	12
4.3 光周期	13
4.4 辐射方向特性	13
4.5 LED 植物生长灯应用模式	13
5 标准化工作问题与建议	14
5.1 光环境评价	14
5.1.1 标准化相关参数	14
5.1.2 面临的挑战	14
5.2 CSA 标准化工作建议	15
附录 A（资料性附录）蔬菜品质评价	16

CSA

前 言

本技术报告针对植物生长 LED 人工光环境，分析了植物光照涉及的光需求，阐述了评价人工光效果的植物生长指标，分析了人工光环境光照设计的重点要素，提出了下一步标准化工作的建议。

本技术报告由国家半导体照明工程研发及产业联盟（CSA）制定发布，版权归 CSA 所有，未经 CSA 许可不得随意复制；其它机构采用本技术报告内容制定标准需经 CSA 允许；任何单位或个人引用本技术报告的内容需指明本技术报告的编号。

到本技术报告正式发布为止，CSAS 未收到任何有关本文件涉及专利的报告。CSAS 不负责确认本文件的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本技术报告主要起草单位：中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所，厦门通裕科技有限公司，南京农业大学，中关村半导体照明联合创新重点实验室。

本技术报告主要起草人：李涛、徐虹、徐志刚、刘厚诚、方焯、徐浩、高伟。

植物生长 LED 人工光环境技术报告

1 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，在农业照明领域的优势明显。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，已被广泛应用于叶菜植物工厂以及果菜人工补光生产领域，以达到提高产量及改进品质的目的。

本技术报告针对植物生长 LED 人工光环境，分析了植物生长涉及的光需求特征，阐述了评价人工光效果的植物生长指标，介绍了蔬菜的品质指标构成和评价方法，分析了人工光环境光照设计的重点要素，提出了下一步标准化工作的建议，以引导科学合理地评价植物生长 LED 人工光环境。

2 植物光需求分析

2.1 总述

植物对光的需求主要体现在光辐射照度、光周期、光谱分布三个方面，也称之为植物生长的“光环境”。光环境通过植物形态、细胞内代谢以及基因表达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。

光对植物生长的影响从所需能量层面来讲分为两类，一类是高能反应，即光合作用，光为该反应提供能量；另一类为低能反应，即光形态建成，光在该过程中主要起信号作用，在较低的光照条件下即可进行，信号的性质与光的波长有关。植物通过一系列光受体来感受不同波段的光进而调节自身生长发育。不同的光谱分布能够调节植物的形态建成，调节植物生长、改变植物形态，使其更加适应自身所处的环境。

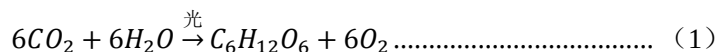
2.2 光合作用

2.2.1 概述

植物光合作用 (Photosynthesis) 指植物利用光能通过叶绿素等光合色素将二氧化碳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，其发生的部位在叶肉细胞的叶绿体中，光合作用分为光反应和碳反应两个阶段，光

反应是指叶绿体分子利用其所吸收的光能将水分解为氧气和还原态氢，并将光能转化为化学能，其发生部位为类囊体膜；而碳反应则是指叶绿体利用光反应产生的还原态氢和化学能将二氧化碳固定并合成葡萄糖的过程，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二氧化碳的量（或释放氧气的量）即光合速率，光合速率是判断植物合成有机物速率的重要指标。理论上讲，植物在光合作用中吸收的二氧化碳越多，制造的碳水化合物越多，植物干物质产量越高。



公式（1）为光合作用能量转化关系，植物利用光照将二氧化碳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、湿度以及环境二氧化碳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^[1]。而在低温情况下植物为保持温度会关闭气孔，减少热量交换，导致胞间二氧化碳浓度降低。

干旱胁迫首先会引起气孔的关闭，减少水分散失，进而阻碍二氧化碳进入叶片，降低光合速率；而二氧化碳的不足会进一步造成光合器官的损伤，导致叶肉细胞光合活性下降^[21]。

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净光合速率^[9]。

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，同时适宜的温度、湿度、二氧化碳浓度等环境因子是保证光合系统高效率运行的必要条件。

2.2.2 光合作用速率

光合作用速率是单位光量子每秒每平方米叶片同化二氧化碳的量。被植物光合作用所利用的光称之为光合有效辐射（Photosynthetically Active Radiation, PAR）。图 1 为典型的植物叶片和冠层光合作用光响应示意图。如图 1 所示，植物叶片光合作用光响应曲线有几个重要的节点。

在光合有效辐射为 $0 \mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 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二氧化碳；当光强增加到某一点后，光合作用同化二氧化碳的量与呼吸作用释放二氧化碳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，光合作用同化的二氧化碳量大于呼吸作用释放的二氧化碳量，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），引起光合作用饱和点的光强为饱和光强。对于冠层来说，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 1 实线）。该现象的出现主要是由于作物冠层光分布不均匀性导致的。在强光下，冠层顶部叶片虽已达光饱和点，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），从而达到最佳补光效果。

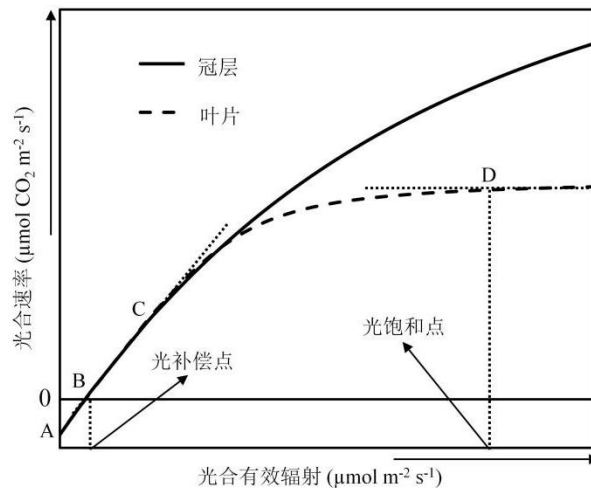


图 1 叶片和冠层光合作用光响应曲线

2.2.3 光消散系数与植物光截获能力

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、叶面积指数（Leaf area index）以及植物自身形态等均有关系。

植物光截获量（Light Interception, LI）指叶片或者植物群体所接受到的光照量，对于单个叶片来说，叶片与太阳光线夹角为 θ （太阳光为平行光），叶片光截获量即其考虑的叶面积与太阳光的光照强度取正弦值的乘积。单个叶片光截获量如公式（2）所示。其中，LI 为光截获量，LA（leaf area）为叶面积，PAR（photosynthetic active radiation）光合有效辐射。

$$LI = LA \times PAR \times \sin \theta \dots\dots\dots (2)$$

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（3）所示，光截获量与叶面积指数和光照强度有关。

$$LAI = \frac{LA}{Cultivation\ area} \dots\dots\dots (3)$$

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2所示,在此情况下,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2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果菜生产人工补光参数至关重要。

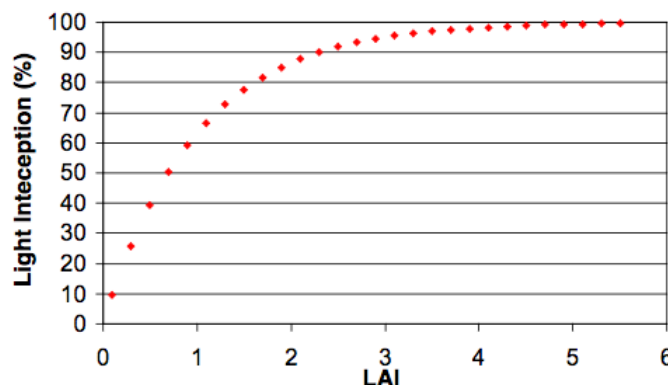


图2 植物群体叶面积指数与光截获量之间的关系

2.2.4 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量子通量密度 (PPFD, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 的总量。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 $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 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, 计算结果的单位为 $11.52\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

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

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 $14\sim 20\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 而最为理想的 DLI 要高于 $20\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

2.3 光形态建成

2.3.1 总述

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。

太阳光中包含的光谱范围极宽, 但能作为光信号调节植物生长的比例非常小, McCree 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作用, 提出对植物生长产生影响的光照范围是 $400\text{nm}\sim 700\text{nm}$, 而这段光谱被定义为光合有效辐射 (photosynthetic active radiation, PAR) [32]。

近年来, 随着植物光合系统以及光受体相关研究的不断发展, 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所发布的《Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms)》[13], 除之前植物

生长通用的光合有效辐射（400nm~700nm）之外，统一将中波紫外线、长波紫外线以及远红光也纳入了植物作用光谱中，明确规定了各种光质的有效范围^[14]。所以，在目前重点研究的植物作用光谱中，波段范围扩展为 280nm~800nm，如图 3 所示，包括中紫外线（280nm~315nm）、近紫外线（315nm~400nm）、蓝光波段（400nm~500nm）、黄绿光波段（500nm~600nm）、红光波段（600nm~700nm）以及远红光波段（700nm~800nm）。

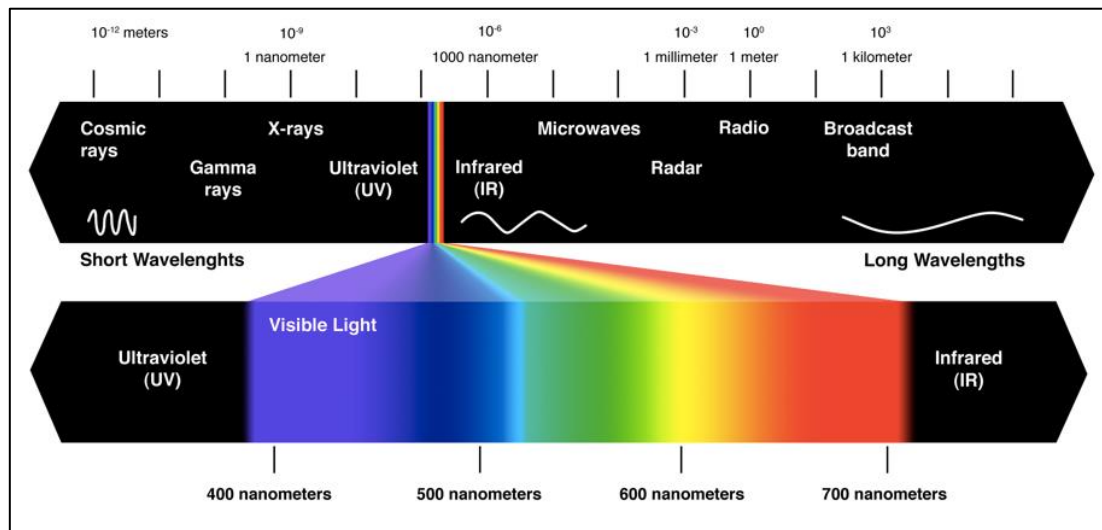


图 3 植物作用光谱在太阳光谱中的位置及不同光质的简单分类

植物通过一系列的光受体来感受光信号，光激发植物体内的光受体，并通过一定的信号传递、信号放大、基因表达、蛋白质合成以及细胞代谢等一系列变化影响植物生长发育。针对不同波段的光，植物接收信号的光受体不同。目前已经确定研究较多的光受体包括 UVR8、隐花色素（Cryptochromes）、向光素（Phototropins）、ZTL 基因家族以及光敏色素（Phytochromes），图 4 显示了几种光受体相应的光响应范围^[27]。

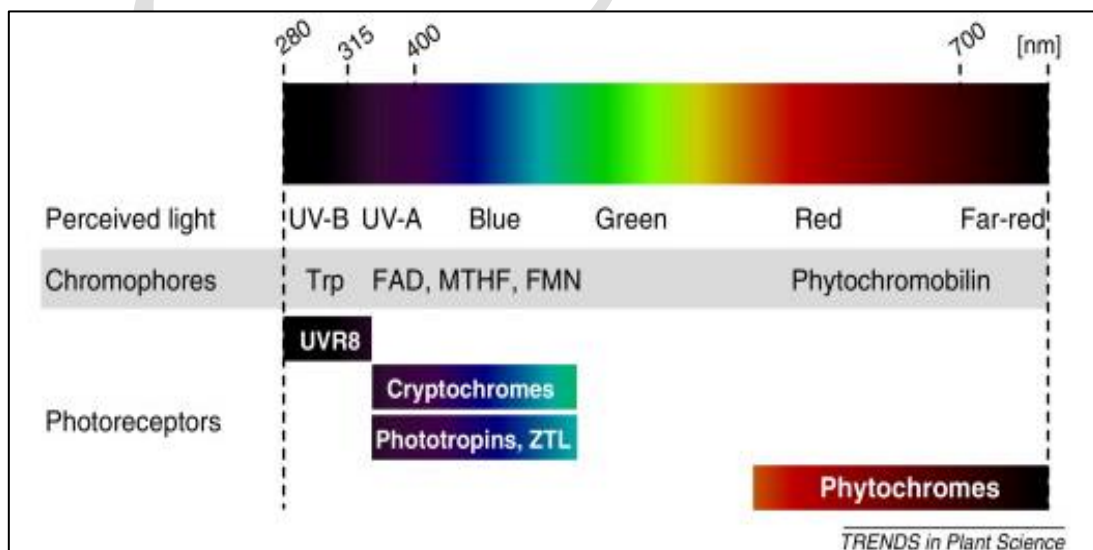


图 4 UVR8、隐花色素、向光素、ZTL 基因家族以及光敏色素的光响应范围

2.3.2 红光与远红光

红光（600~700nm）是植物进行光合作用光谱的主要组成部分，红光和蓝光是植物进行光合作用的主要光谱，目前不同比例的红蓝光是植物 LED 补光及全人工光生产的主要光谱，补充红光主要能够提高植物的光合有效辐射强度，提高光合速率增加植物干物质积累量。

红光作为光信号调节植物光形态建成需要与远红光组合起作用。红光与远红光共同调节光敏色素（Phytochrome）从而调节植物光形态建成，光敏色素分为红光吸收型和远红光吸收型，两种状态在不同比例的红光和远红光下相互转化，调节下游代谢，它能够调控植物生长发育，改变植物形态，还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^[19]。

Mortensen 等发现红光过高会抑制植物节间伸长，促进横向分枝^[32]，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、有利于提高光在垂直方向的均匀分布，远红光虽然并不是光合有效辐射，但是其在光形态建成方面具有非常重要的作用。

2.3.3 蓝光

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、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并且生物量大，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在生产上广泛应用。

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。Mortensen 等（1987）发现与自然光相比蓝光显著降低了菊花和番茄的株高。Hirai 等（2006）研究表明蓝光下茄子和向日葵的茎伸长明显提高；但是，生菜的茎秆伸长在蓝光下显著降低，其原因是蓝光可提高生长素（IAA）氧化酶的活性，降低生长素 IAA 水平，进而抑制植物的伸长生长。蓝光对植物形态的影响因品种而异。

蓝光对于植物生长与形态建成的调控可能与植物激素的浓度变化相关^[16]。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。余让才等（1997）研究表明，与白光相比，蓝光抑制水稻幼苗生长，并能使水稻幼苗体内的自由态 IAA、赤霉素 GA1、玉米素和二氢玉米素含量下降，脱落酸和乙烯的含量上升^[11]。

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。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，并指导人们进一步提高作物产量。

2.3.4 近紫外光（UV-A）

近紫外光（UV-A）是一种长波紫外线，与 UV-B 同属于紫外光，但目前没有研究表明 UV-A 会对 DNA 造成损伤。近紫外光调控植物生长光受体与蓝光相同，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又不相同，研究发现植物叶片组织对 UV-A 有快速的响应，表现为 UV-A 刺激植物加强次生代谢作用，产生更多的次生代谢物质如酚类物质和黄酮类物质。

UV-A 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，过滤部分紫外光，保护叶片，同时叶片表皮细胞层加厚，当紫外光在穿透表皮时对紫外光进行过滤，从而减少到达叶片内部的紫外光，这些是植物保护自身免受太阳光中紫外光伤害的重要机制^[14]。Gartia 等人研究发现一定剂量的 UV-A 处理后能够保护植物避免 UV-B 对叶片内光合器官的损伤^[23]，所以 UV-A 与 UV-B 对植物的影响并不是独立存在的，而是相互影响。

UV-A 会影响植物干物质积累。Tezuka 等人发现 UV-A 能够提高番茄植株中叶绿素的含量促进番茄生长^[34]，而 Krizek 研究则发现在 UV-A 下黄瓜干物质累积量降低^[29]，不同种间或者亚种间植物干物质对 UV-A 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，UV-A 可作为一种刺激信号激发植物产生一系列生理反应从而提高植物的抗逆性，但同时其破坏能力相比于 UV-B 较弱，并不足以伤害植物组织、器官或者 DNA。研究表明 UV-A 能够提升植物叶片光保护作用，UV-A 刺激植物增强次生代谢，从而产生更多的次生代谢物质，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毒光产物，降低光抑制的发生概率。植物在动态光环境或者高光环境中，UV-A 能够起到保护光合系统的作用^[26 36-38]。

2.3.5 中紫外光 (UV-B)

大量研究表明，约 2/3 陆地植物对中紫外线 (UV-B) 辐射响应显著，虽然存在种间和亚种之间的差异，但大多数研究表明，增加 UV-B 辐射对植物生长和发育存在不利的影响，主要体现在减缓植物生长、抑制胚轴伸长、光合速率降低，同时还会引起类黄酮、花青素苷和过氧化物质的积累增加^[18]，叶片变厚变小并向下弯曲^[22]，而这些调控的发生起始于植物通过其特有的光受体 UV-B resistance 8 (UVR8) 感受外界 UV-B 辐射。

UVR8 是一个二聚体蛋白质，UVR8 二聚体感应 UV-B 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 UV-B 响应基因的表达^[7]，而高强度或者长时间的 UV-B 照射不仅会引起植物的响应还会对植物 DNA 造成损伤，对植物造成系统的伤害，所以在人工补光或全人工光植物生产中 UV-B 的使用非常少。近年来，也有研究者提出合理利用 UV-B 辐射可改善园艺产品产量及品质，但具体应用方案还有待深入探讨。

2.3.6 黄绿光

黄绿光 (500~600nm) 介于红蓝光之间，也属于光合有效辐射，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没有贡献；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，Kevin 等发现在红蓝背景下添加绿光补光能够减缓莴苣叶片中叶绿素的降解^[23]，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^[5]。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。

2.3.7 光质调控

作物的营养品质不仅受到遗传基因的调控,环境因子也会对其产生较大的影响。对光环境的合理调控,不仅能提高作物的产量,还能改善作物的营养品质。

Blum 等人提出红光和蓝光是最基本的生长光谱,增加红光和蓝光比例有利于提高植物光合作用^[16]。通常认为,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;而蓝光在促进光合作用的同时能促进蛋白质形成^[32]。

红蓝光有助于减少硝酸盐的吸收量,蓝光可以诱导类黄酮和花青素的积累,增加蓝光比例能促进番茄果实中番茄红素和类黄酮的形成,提高番茄的品质。黄绿光主要影响叶菜类 β -胡萝卜素以及花青素的含量,补充黄绿光能够提高其含量。UV-A 和 UV-B 能够提高植物花和果实内花青素以及芳香类物质含量,但是针对不同种间以及亚种间添加紫外光的剂量以及相应的背景光的数据仍需进一步研究。

2.4 光周期

除了给植物提供光合作用的能量外,光周期也是调节植物生长重要的信号源。如种子萌发、开花以及果实成熟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。光周期是植物能够判断时令变化并调节其自身生长周期的重要光信号。

光周期是指生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。自然界中植物通过感受外界光周期的变化来调节自身发育阶段,例如,某些植物要经历一定的光周期才能形成花芽,这体现了不同地理位置的植物对气候环境适应的结果,保证植物能够在适宜的季节中完成春发、夏华、秋实和冬藏的生命过程。

人类早已注意到多种植物的开花时间相对稳定,但光周期在决定开花期方面所起的作用直到 20 世纪才了解清楚。1912 年法国 J.图尔努瓦发现大麻在每日 6 小时的短日照条件下会开花,但在长日照下则停留于营养生长阶段。1913 年德国 G.A.克莱布斯发现人工延长光周期,可使通常在 6 月开花的长春花属(*Sempervivum*)植物能在冬季开花。

但明确提出光周期理论的是美国园艺学家加奈(W.W.Garner)和阿拉德(H.A.Allard)。他们在 1920 年发现,将美国南部正常开花的烟草(*Nicotia glauca* cv. *Maryland Mammoth*)移至于美国北部栽培,夏季只长叶不开花;但如果在秋冬移入温室则可开花结实。在北方夏季用遮光办法缩短日照时数到每天 14 小时以下,也可使其开花。以后发现大豆(*Biloxi*)、紫苏、高粱等也有这种现象,并各有其日长上限,日照长度短于此数值时即可开花,称此日长限度为临界日长。同时发现菠菜等植物相反,需在日照长度超过某一临界日长才能开花。

许多植物成花有明确的极限日照长度,即临界日长(critical day length)。长日植物的开花,需要长于某一临界日长,即暗期短于某临界值;而短日植物则要求短于某一临界日长,这些植物称绝对长日植物或绝对短日植物,这里的临界日长并不一定是 12h,而是植物的光周期特性。

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。可以看出，长日植物的临界日长不一定都长于短日植物；而短日植物的临界日长也不一定短于长日植物。如短日植物大豆的临界日长为 14h，若日照长度不超过此临界值就能开花。而长日植物冬小麦的临界日长为 12h，当日照长度超过此临界值时才开花。将此两种植物都放在 13h 的日照长度条件下，它们都开花。因此，重要的不是它们所受光照时数的绝对值，而是在于超过还是短于其临界日长。同种植物的不同品种对日照的要求可以不同，如烟草中有些品种为短日性的，有些为长日性的，还有些只为日中性的。

表 1 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 8.5h 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。

同时，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。

3 基于光响应的关键植物生长指标

3.1 植株形态

3.1.1 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；用于评价植物纵向生长的能力。用卷尺或者直尺测量株高。

3.1.2 茎粗

茎粗是指近基部最粗处的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。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/598032030101006123>