

CSA

国家半导体照明工程研发及产业联盟技术报告

T/CSA/TR 006- 2018

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



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。

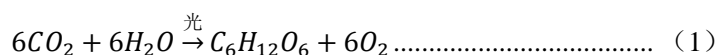
2.2 光合作用

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^[2]。

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。在高光强下，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。

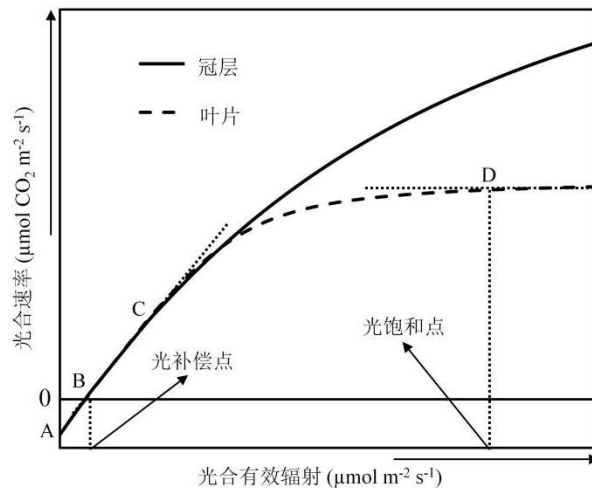


图1 叶片和冠层光合作用光响应曲线

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。

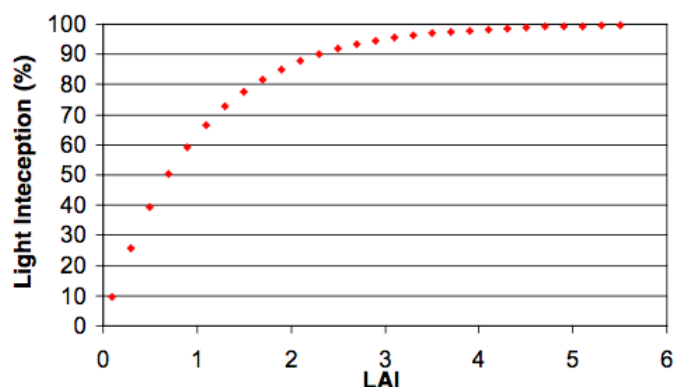


图 2 植物群体叶面积指数与光截获量之间的关系

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）。

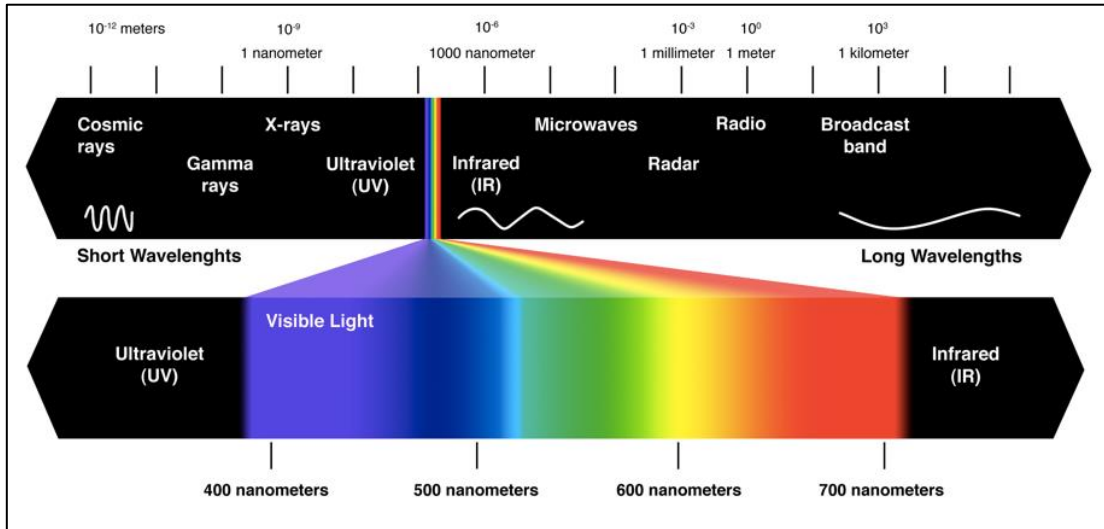


图 3 植物作用光谱在太阳光谱中的位置及不同光质的简单分类

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]。

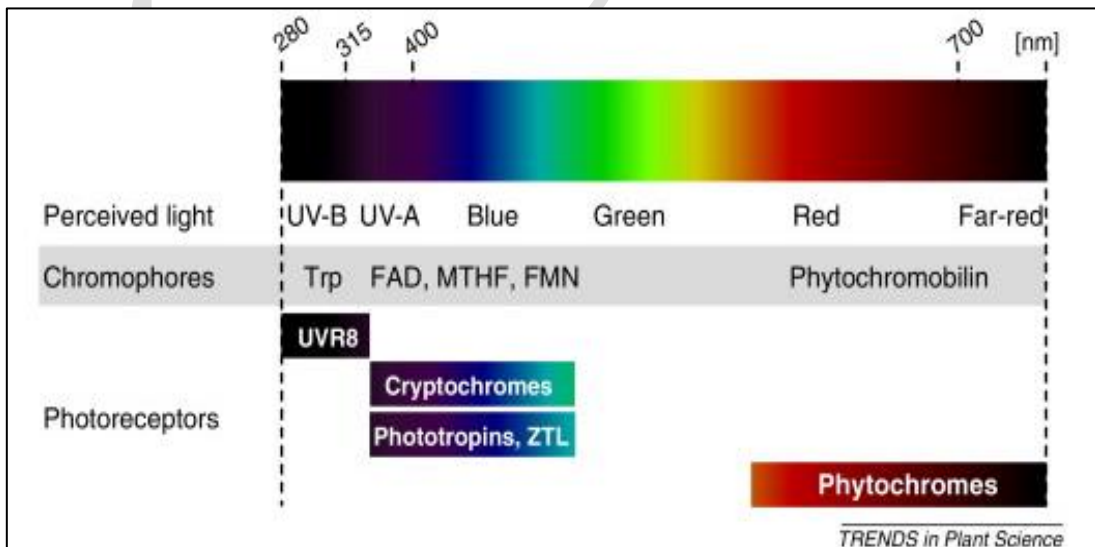


图 4 UVR8、隐花色素、向光素、ZTL 基因家族以及光敏色素的光响应范围

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^[6]。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-natabacumcv.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。

3.1.3 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。

3.1.4 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： g/cm^2 。比叶重是衡量叶片光合作用性能的一个参数。其倒数称为比叶面积。

测量时，将样叶带回实验室用叶面积仪迅速测量其叶面积，然后 80°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 (g/m^2) = 总叶干重/总叶面积。打孔称重法时，用 1cm^2 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。

3.1.5 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，给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、以及激素等。地上部和地下部相互协调促进植物健康生长。

3.2 鲜样质量

3.2.1 地上部鲜样质量

地上部鲜样质量指植物茎基部以上的部分在自然状态下被采集后立即称量得到的质量。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。通过鲜重减干重，可以获得含水量变化信息。

3.2.2 地下部鲜样质量

地下部鲜样质量指植物茎基部以下部分新鲜样品（刚采集，或采集后及时冷藏保存的样品）的质量。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，保障了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。

3.2.3 可食用部位鲜样质量

取自然状态下的某种作物的可食用部位立即称量得到的便是该种作物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。可以衡量经济作物的产量及品质，估测产量，计算经济系数。

3.3 干样质量

3.3.1 地上部干样质量

植物茎基部以上的地上器官烘干至恒重后的质量，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。

3.3.2 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）烘干至恒重后的质量。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。

3.3.3 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，烘干至恒重后的总质量。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。

3.4 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的能力大小。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，通常所指的生物产量为地上部总干物质质量。

3.5 壮苗指数

壮苗指数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。

3.6 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。

3.7 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质量，单位： $\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。植物生长光照能效反映了植株光合产物的积累对光的响应能力。

4 人工光环境光照设计要素分析

4.1 光量子通量密度

在植物学或农业生产领域，光量子通量密度（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量子数，这与光合作用速率的单位一致。如上所述，对植物有影响的波长范围为 280~800 nm。直接参与

光合作用的光量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 400~700nm。光量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, 温室补光光量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量子通量密度。此外, 光合作用受多环境因子的影响, 因此, 确定适宜的人工光光量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 CO₂ 浓度。综上, 在植物生长 LED 人工光环境中确定光量子通量密度时要综合考虑多方面因素, 本技术报告 2.1 部分、图 1 光合作用响应曲线可为参考依据。

用于测量光合作用量子通量密度的仪器为光量子传感器, 目前国际上通用且精确度较高的光量子传感器为 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量子通量密度。光量子通量密度受其测量位置影响较大, 因此, 在定义光量子通量密度参数时, 必须明确其测量高度及方位, 如: 光源正下方 50cm 处的光量子通量密度为 230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

4.2 光谱分布

传统植物生长补光灯以荧光灯和高压钠灯为主。近年来, LED 技术发展迅速, 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 280-800nm。600-700nm 波段的红光和 400-500nm 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^[31], 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 等 (2010) 证实植物生长对蓝光呈质的响应, 研究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。建议蓝光比例不可过高, 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 730nm 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, 中国农业科学院设施植物环境工程团队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; 在以 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的红蓝光 (R/B=9/1) 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 66%。

尽管绿光 (500-600nm) 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为来说, 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 光谱配方还比较混乱, 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。

4.3 光周期

本技术报告 2.6 节已对光周期进行了详细阐述，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。

对于全人工环境下的植物来说，其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量子通量密度计算。

4.4 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 等（2014）研究发现在漫射光条件下，温室番茄全年增产 10% 左右。植物照明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° 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），一般要求在距离光源（不论是点光源，线性光源或者面光源）下 5 厘米处冠面的光谱分布（光质）、辐射照度均匀度建议大于等于 95%。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。

4.5 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：

a) 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，它是由计算机对作物整个生育过程的光照、温度、湿度、CO₂ 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。

b) 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，有效缓解植株弱光胁迫，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的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、株间侧面补光，光环境测量时需要对被照面的测量位置需要做统一规定。

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。

5 标准化工作问题与建议

5.1 光环境评价

5.1.1 标准化相关参数

光照标准化相关影响因素比较多，主要包括种植条件、环境参数、光环境参数、植物评价指标、系统评价指标等。

种植条件包括种植地区、种植面积、品种、株行距、采摘期、基质、营养液等；环境参数包括温度、相对湿度、CO₂ 浓度等；因此，必须在完全相同的环境因子条件、种植条件（种植密度和管理方式）下进行测评，建议用于测试评估的种植面积不应小于 3 平方米。

光环境参数包括被侧面高度、光子通量密度、光谱分布、均匀度、光照周期、单位面积光照功率密度等；

系统评价指标包括总耗电量、光能效指标（g/kWh）、经济收益等。

5.1.2 面临的挑战

光是影响全人工光植物工厂作物产量及品质的重要因素；因此，应用时，需要针对光源的光谱组成、辐照强度等进行调整，优化出最佳的光配方以使其经济效益最大化。

因植物生长评价参数较多，环境影响因素复杂，提出相对优化的光环境参数面临一定的挑战。针对某一类别/种的植物，梳理影响人工光环境的所有因素，哪些可以优化、统一成标准要求，哪些是变量，需要明示，以便产业科学评价人工光效果，数字化计算“光配方”

经济效益，为植物工厂产业化、规模化奠定基础，促进产业的健康发展。

5.2 CSA 标准化工作建议

目前，国家半导体照明工程研发及产业联盟标准化委员会成立了“设施农业光照标准化工作组”，集中产业内研究院所、企业等优势力量，共同开展标准化工作。

在基础性标准方面，已经发布的有 GB/T 32655-2016《植物生长用 LED 光照术语和定义》；在植物叶片光合作用量子效率对光谱的响应方面，目前主要参考 McCree 在上世纪 70 年代测试的系列植物得出的响应曲线^[31]。这一曲线被广泛沿用至今，对推动植物光合作用人工配光技术发展起到了至关重要的作用。

植物生长是一个复杂的生物学过程，其生长不只受制于叶片光合速率的影响，植株形态对光的截获能力更是植物生长的决定因素。已有大量研究证实光质对植物形态影响显著，如 730-740nm 波段的远红光就是植物光形态建成的关键光质。目前，LED 器件已经得到了长足的发展，光谱已经覆盖从 280nm 至 800nm 的波长范围。因此，在未来植物生长 LED 人工光源配光技术方面，不仅要考虑单个叶片的光合作用量子效率，还需考虑不同光谱诱导的植株形态对光的截获能力，从而发挥植物生长 LED 人工光源的最大潜能。

在植物光照应用方面，由于产业化应用范围广，包括组培、育苗、叶菜、果菜、水果、药材、花卉、烟草等，种植目的不同，评价指标有很大差异。在产业化进程相对快速的领域，如育苗、叶菜等方面，建议启动 LED 光环境测试方法、设计规范、应用评价等标准的制定，鼓励部分应用研究优势单位，如研究所、大学、测试机构等布局启动开展第三方测试服务，以支撑正确评价应用效果，为 LED 在我国农业应用的推广奠定基础。

附录 A
(资料性附录)
蔬菜品质评价

A.1 蔬菜品质构成

一般而言，蔬菜的品质主要由下列四项构成：

- a) 感官品质，其中包括外观品质（包括形状、大小、颜色等）、风味（包括味道、香气、组织结构等）；
- b) 必需的营养成分：碳水化合物、蛋白质、维生素、矿物质；
- c) 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；
- d) 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。

A.2 蔬菜品质评价方法

A.2.1 蔬菜品质感观评价方法

蔬菜产品的大小、形状、味道、色泽、口感、质地、风味等感官品质对消费者来说至关重要，在无法快速、准确地了解某种蔬菜营养价值高低和有害物质含量的情况下，蔬菜的外观性状决定着消费者的购买欲望。

蔬菜的大小、形状和色泽等可以通过制定一定的标准进行分类。

A.2.2 蔬菜品质营养成分评价方法

A.2.2.1 平均营养价值估算法

Rinn (1965) 曾提出了“基本营养值” (Essential Nutritive Value) 的概念，后经 Grubben (1978) 修改更名为“平均营养值” (Average Nutritive Value, ANV)，来计算和评价蔬菜的品质。

根据各类蔬菜每 100 g 可食部分中，所含蛋白质、纤维素、钙、铁、胡萝卜素和维生素 C 6 种主要成分的量，按公式计算出分数结果：

$$ANV = \frac{\text{蛋白质 (g)} / 5 + \text{纤维素 (g)} + \text{钙 (mg)} / 100 + \text{铁 (mg)} / 2 + \text{胡萝卜素 (mg)} + \text{Vc (mg)} / 40}{\dots} \quad (5)$$

分数大则营养价值高，分数小则营养价值低。

A.2.2.2 营养评分分类估算法

目前日本学者在综合评估蔬菜营养时采用的方法。在分析各类蔬菜每 100 g 可食部分中含有胡萝卜素、抗坏血酸、核黄素、钙、铁、钾和纤维素的数量之后，按照各类蔬菜的营养物质含量多少而提出的综合评价标准，逐项对照打分后相加得总分，再根据总分的高低，将蔬菜划分为营养价值非常高、相当高、较高和稍高 4 类。

10~22 分者为第一类，称作营养价值非常高，如荷兰芹、辣椒叶、紫苏叶、菠菜、小苾菜、根苾菜、芥菜、萝卜叶、茺青叶、雪里蕻、青花菜、落葵等；

5~9 分者为第二类，称作营养价值相当高，如小葱、抱子甘蓝、茼蒿、嫩荚豌豆、菜豆、三叶芹、辣椒、胡萝卜、韭菜、苦瓜等；

3~4 分者为第三类，称作营养价值较高，如大白菜、青菜、甜椒、慈菇、百合、花椰菜、球茎甘蓝、芹菜、蚕豆等；

1~2 分者为第四类，称作营养价值稍高，如芋、萝卜、南瓜、葱、黄秋葵、牛蒡、甘蓝、冬瓜、石刁柏、姜、大蒜、豆芽等。

李宝树等将营养评分分类法进行改进，认为可把不足 1 分的蔬菜算作第五类，称为营养价值一般。

A. 2. 2. 3 综合评价指数法

营养成分受多种因素的影响，最主要的是受内部遗传机制的影响。

对 10 个品种番茄的可溶性固形物、番茄红素、Vc、氨基酸和蛋白质等营养指标测定结果进行分级，各营养指标以其平均数为基准向两侧等距分级，分级间距 \approx (最大值-最小值)/分级数，由高到低分为 4 个等级（蛋白质差异小，只分为 2 个等级），各个等级的指数值依次为 4、3、2、1。

根据划分标准，求出每个品种营养指标所对应的指数值，将各项指数值累加得出不同品种的营养综合评价指数。综合评价指数越高表明该品种的营养品质越好。

该评价方法主要特点在于能够更明显地反映品种间的品质差异，可为蔬菜新品种选育和品质育种提供参考。

A. 2. 2. 4 隶属函数法

模糊数学的平均隶属函数值可以表示综合指标的相对优劣，结果平均隶属函数值可以反映综合性状中多个构成性状的综合水平，是评价蔬菜营养品质的有效方法。

利用隶属函数法对营养品质（矿物质、可溶性总糖、蛋白质、维生素 C 和粗纤维）进行综合评价，依公式 $X(u) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 计算各品种每个营养指标的隶属函数值，再求其平均隶属函数值。平均隶属函数值越高，综合营养品质越佳。

A. 2. 2. 5 综合营养值及营养供给单位法

葛晓光等通过借鉴前人的经验，考虑到我国的膳食特点及营养供给现状，提出 2 个蔬菜营养综合评价指标。即蔬菜“综合营养值”（Comprehensive Nutritive Value, CNV）及蔬菜“营养供给单位”（Nutritive Provided Unit, NPU）。^[4]

CNV 或 NPU=蛋白质 (g) /5+粗纤维 (g) +钙 (mg) /100+铁 (mg) /2+胡萝卜素 (mg) +维生素 B2 (mg) +维生素 C (mg) /50..... (6)

综合营养值是指一定数量蔬菜(食用部分)按上述公式计算出的各种营养素量的综合值。营养供给单位是指公式(6)中各营养素，依靠膳食(蔬菜除外)平均每日供给的数量与每日膳食对营养素的理论需求量之间的差额，通过公式计算出的综合值。

CNV 及 NPU 这 2 个指标都是蔬菜主要营养产出综合评价的无单位表达量，都能从整体上表达或比较蔬菜主要营养的产出量。

A. 2. 3 蔬菜品质综合评价方法

蔬菜品质的综合定量评价，一般应包括 Vc、可溶性糖、氨基酸、粗蛋白等营养品质和卫生品质两方面的内容，其中卫生品质主要考虑蔬菜中 NO_3^- 、 NO_2^- 、农药残留、重金属、病原细菌以及其他有害物质的含量等可能对人体产生不利的因素。

建立蔬菜品质评价的标准和体系，需要确定评价标准分级、评价因子权重和评价指数的计算等。

CSA

参考文献

- [1] 郭培国,李荣华.夜间高温胁迫对水稻叶片光合机构的影响.植物学报,2000,42(7): 673-678.
- [2] 何诗行,何堤,许春林等.不同LED光质对番茄幼苗生长特性的影响.农业机械学报,2017,48(12): 319-326.
- [3] 胡立勇,丁艳峰.《作物栽培学》,2013,48.
- [4] 李会合,田秀英,季天委.蔬菜品质评价方法研究进展.安徽农业科学 2009,37(13):5920-5922.
- [5] 令狐伟,刘厚诚,宋世威,等.LED绿光补光对黄瓜何番茄幼苗生长的影响.温室园艺,2015: 59-60.
- [6] 刘厚诚.植物工厂发展的机遇与挑战.2016.
- [7] 纳小凡,任树勇,彭励等.光受体UVR8对UV-B响应机制研究进展.西北植物学报,2013,33(8): 1703-1708.
- [8] 宋羽.株间LED补光与温室番茄光能利用特性及生长发育关系的研究[博士学位论文].中国农业大学,2017.
- [9] 徐文栋.光照、种植密度与采收期对植物工厂内生菜产量和品质的影响[硕士学位论文].南京农业大学,2015.
- [10] 许大全.植物光胁迫研究中的几个问题.植物生理学通讯,2003,39(5): 493-495.
- [11] 余让才,潘瑞焱.蓝光对水稻幼苗生长及内源激素水平的影响.植物生理学报,1997,23(2): 175-180.
- [12] Aphalo, P. J. Light signals and the growth and development of plants-a gentle introduction.2006.
- [13] ANSI ASABE S640 JUL Quantities and Units of Electromagnetic Radiation for Plants (Photosynthetic Organisms). American Society of Agricultural and Biological Engineers.2017
- [14] Barnes, P. W., Tobler, M. A., Keefover-ring, K., et al. Rapid modulation of ultraviolet shielding in plants is influenced by solar ultraviolet radiation and linked to alterations in flavonoids. Plant, Cell and Environment, 2016, 39: 222-230.
- [15] Behringer, F. J., Davies, P. J., Reid, J. B. Phytochrome regulation of stem growth and indole-3-acetic acid levels in the lv and lv genotypes of pisum. Photochemistry and Photobiology, 1992, 56(5): 677-684.
- [16] Blum, D. E., Elzenga, J. T. M., Linnemeyer, P. A., et al. Stimulation of growth and ion uptake in bean leaves by red and blue light. Plant Physiology, 1992, 100: 1968-1975.
- [17] Brown, B. A., Cloix, C., Jiang, G. H., et al. A UV-B-specific signaling component orchestrates plant UV protection. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2005, 102(50): 18225-18230.
- [18] Demotes-Mainard, S., Péron, T., Corot, A., et al. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture. Environmental and Experimental Botany, 2016, 121: 4-21.
- [19] Tei, F., Scaife, A., Aikman, D. P. Growth of Lettuce, Onion, and Red Beet. 1. Growth Analysis, Light Interception, and Radiation Use Efficiency. Annals of Botany, 1996, 78(5): 633-643.
- [20] Farquhar, G. D., Sharkey, T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.

- [21] Fierro, A. C., Leroux, O., De Coninck, B., et al. Ultraviolet-B radiation stimulates downward leaf curling in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 93: 9–17.
- [22] Folta, K., Maruhnich, S., Dhingra, A., et al. Green light control of plant form and function. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2007, 146 (4) : S227-S228.
- [23] Frantz, J. M., Ritchie, G., Robinson, J., et al. Exploring the Limits of Crop Productivity : Beyond the Limits of Tipburn in Lettuce. *Journal of the American Society For Horticultural Science*, 2004, 129 (3) : 331–338.
- [24] Gartia, S., Pradhan, M. K., Joshi, P. N., et al. UV-A irradiation guards the photosynthetic apparatus against UV-B-induced damage. *Photosynthetica*, 2003, 41 (4) : 545–549.
- [25] Heijde, M., Ulm, R. UV-B photoreceptor-mediated signalling in plants. *Trends in Plant Science*, 2012, 17 (4) : 230–237.
- [26] Hogewoning, S. W., Trouwborst, G., Maljaars, H., et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61 (11) : 3107-3117.
- [27] Kromdijk, J., Głowacka, K., Leonelli, L., et al. Improving photosynthesis and crop productivity by accelerating recovery from photoprotection. *Science*, 2016, 354 (6314) : 857–862.
- [28] Krizek, D. T. Influence of PAR and UV-A in determining plant sensitivity and photomorphogenic responses to UV-B radiation. *Photochemistry and Photobiology*, 2004, 79 (4) : 307–315.
- [29] Li, T., Heuvelink, E., Dueck, T. A., et al. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: quantifying the contributing factors. *Annals of Botany*, 2014, 114 (1) : 145.
- [30] Kozai, T. *Plant Production Management System for PFAL*. 2015.
- [31] McCREE, K. J. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis crop plants. *Agricultural Meteorology*, 1972, 9 (3) : 191–216.
- [32] Mortensen, L. M., Strømme, E. Effects of light quality on some greenhouse crops. *Scientia Horticulturae*, 1987, 33 (1–2) : 27–36.
- [33] Olvera-gonzalez, E., Alaniz-lumbreras, D., Ivanov-tsonchev, R., et al. Intelligent lighting system for plant growth and development. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 92: 48–53.
- [34] Tezuka, T., Hotta, T., Watanabe, I. Growth promotion of tomato and radish plants by solar UV radiation reaching the Earth's surface. *Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology*, 1993, 19 (1) : 61–66.
- [35] Vr, D., Stroh, M., Materov, Z. Plant Physiology and Biochemistry Protective effect of UV-A radiation during acclimation of the photosynthetic apparatus to UV-B treatment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 96: 90–96.
- [36] Xin, Q., Gong, P., Li, W. Modeling photosynthesis of discontinuous plant canopies by linking the Geometric Optical Radiative Transfer model with biochemical processes. *Biogeosciences*, 2015, 12: 3447–3467.
- [37] Xu, J., Gao, K. Photosynthetic contribution of UV-A to carbon fixation by macroalgae. *Phycologia*. 2016, 55 (3) : 318-322.

[38] Zheng, W., Komatsu, S., Zhu, W., et al. Response and Defense Mechanisms of *Taxus chinensis* Leaves Under UV-A Radiation are Revealed Using Comparative Proteomics and Metabolomics Analyses. *Plant & Cell Physiology*, 2016, 57 (9) : 1839–1853.

CSA

