

第2章 植物照明光学度量体系优化、测试及应用

2.1 人工光环境评价体系

光点亮了我们的世界。自 1760 年朗伯提出光度学概念以来，对光的评价体系被逐渐建立。朗伯定义了光通量、照度、亮度等一系列光度学参数，并完成对上述参数的数学表述和算式推导，照度叠加性定律、距离平方反比定律、照度余弦定律等也被提出，上述定律已经成为光学基本定理并沿用至今^[43]。在很长一段时间内，照明只针对人类活动，所以人眼可见的可见光波段的光在叠加人眼对波长的敏感度所形成的相关计算被称为光度学^[50]。

但如绪论中所描述，人工光的应用场景已经被大幅扩展，照明服务的目标除了人类外，植物^[51]、除人以外的动物^[52]（本章不讨论）亦成为重要的受体。针对植物，光是光合作用的能量来源，也是激活光形态发生和其他生理过程（如次级代谢）的信号和信息源。光合有效光（400 nm ~ 700 nm）和生理活性光（300 nm ~ 800 nm）的波长重叠，且两个过程均为光化学反应，植物接受的光量并不以焦耳（J）或者勒克斯（lx）衡量，而是以光子摩尔数为单位，我们将基于光子的相关计算定义为光子度量学，一些文章中也称为光量子度学^[53]。新的光学度量方式伴随光源应用的扩展而衍生，简单的基于人眼的光度学已不能满足各个场景的需求。

针对在植物照明的应用，本章 2.2 节将梳理 4 种光学度量体系，包括：基于能量评价的辐射度学、基于人眼评价的光度学、基于光子数评价的光子度量学和基于植物光合响应光谱的植物光子度量学，并推导光源发射通量和接收面接收强度的计算公式，以明确植物照明的正确光学评价方式。

利用 2.2 节公式，本章 2.3 节将基于已普及的光源测量仪器分布光度计的测量结果，开发一套以光子度量学为评价体系的植物光源标准评价软件（PLES），实现利用现有仪器对植物照明参数的准确计算。

本章 2.4 节和 2.5 节将探究 6 种不同种类且光谱迥异的光源在 4 种植物光照光学度量体系下的光照参数，并以茶树为实验材料验证不同光源下光合及次级代谢过程与各植物光照光学度量体系下参数的匹配情况。

2.2 四种植物光照光学度量体系

2.2.1 辐射度学

辐射度学是研究包括人工光源、太阳光等辐射源发射的能量或受体接收到的能量的光学度量体系。

在四种光度学评价体系中，我们核心关注两个量：通量和强度，这两个量分别描述光源发出光的量，以及物体单位面积接收的通量。

辐射通量：在辐射度学中，光源等辐射体单位时间内辐射的总能量称为辐射通量，用 Φ_e 表示，单位为瓦特（W）。辐射的能量其实是波长的函数，该函数的图像即为绝对辐射光谱，用 $\Phi_e(\lambda)$ 表示，则有：

$$\Phi_e = \int_0^{+\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

辐照度：接受体单位面积接收到的辐射量，记作 E_e ，单位是瓦每平方米（W/m²）：

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \quad (2.2)$$

2.2.2 光度学

光度学是以人类为光受体的光学度量体系。长久以来，人工光源的应用范畴集中在人因照明领域，即核心目标是为人类照亮一个区域，对于人工光源的评价体系也依据人眼视见函数需求建立（图 2.1）。人眼视见函数 $V(\lambda)$ 指人眼对不同波长光线的敏感度，其形状呈峰值位于 555 nm 绿光处的高斯分布，并处于 380 nm ~ 780 nm 可见光范围， $V(\lambda)$ 在 555 nm 处被定义等于 1。光度学与 2.2.1 节对应的参数分别是光通量和照度。

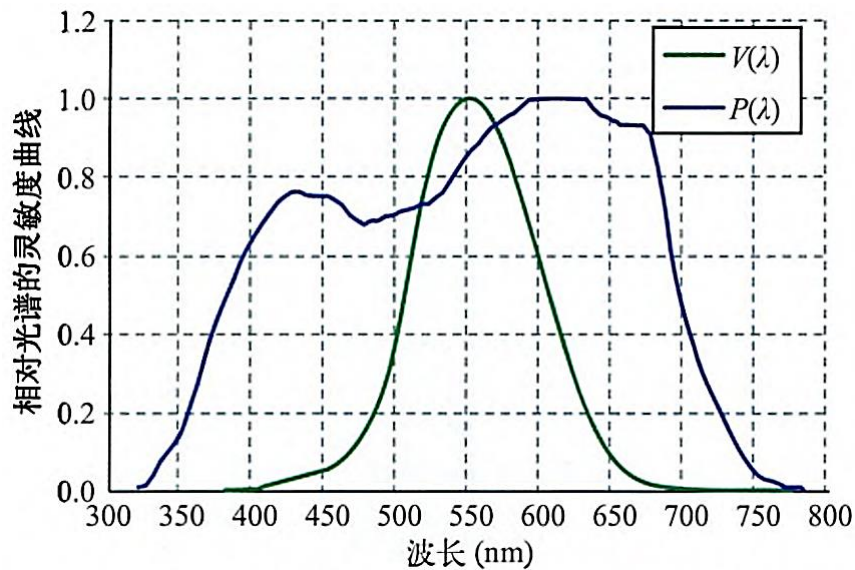


图 2.1 植物光合敏感曲线 $P(\lambda)^{[54]}$ 与人眼视见函数 $V(\lambda)^{[55]}$

光通量：光源等辐射体辐射的能量按人眼视见函数提出的能量，称作光通量，记作 Φ ，其单位被定义为流明（lm），其在波长 λ 处的分布为 $\Phi(\lambda)$ ：

$$\Phi(\lambda) = V(\lambda)\Phi_e(\lambda) \quad (2.3)$$

照度：接受体单位面积接收到的光通量，记作 E ，单位是勒克斯（lx）：

$$E = \frac{d\Phi}{dS} \quad (2.4)$$

2.2.3 光子度量学

光子数量是描述植物对光的响应中的“光强”所必须用到的，许多植物对光的响应是作为一种光化学反应的结果被观察到的。光子度量学，也可被称为光量子度学，对应于通量和强度的两个参数，分别被称为光子通量和光子通量密度。

光子通量：光源在单位时间内发射、传输或接收的光子数，以摩尔（1 mol = 6.03×10^{23} photons）为度量单位，记作 Φ_p ，其单位是摩尔每秒（mol · s⁻¹），由于 1 mol · s⁻¹太大，一般用 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$ 计量。波长 λ 的光对应光子数计为 $\Phi_p(\lambda)$ ，则根据单光子能量公式：

$$e_\lambda = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.5)$$

$$\Phi_p(\lambda) = \frac{\Phi_e(\lambda) \cdot \lambda}{N_A hc} = \frac{1}{\gamma} \Phi_e(\lambda) \lambda \quad (2.6)$$

$$\Phi_p = \frac{1}{\gamma} \int_{\min}^{\max} \Phi_e(\lambda) \lambda d\lambda \quad (2.7)$$

其中 $\gamma = N_A hc = 119.8 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{nm} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ ， c 是光速（ $c = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）， h 是 Planck 常量（ $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}$ ）， N_A 是阿伏加德罗常数（1 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} = 6.022 \times 10^{17} \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ）。

光子通量密度：接受体单位面积接收到的光子通量，记作 E_p ，单位是 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ：

$$E_p = \frac{d\Phi_p}{dS} \quad (2.8)$$

植物光合作用集中于光合有效波段（400 nm ~ 700 nm），故在评价植物照明光参数时，将上述两个值的取值范围限定在该波段得到的数值分别称为光合有效光子通量（PPF）和光合有效光子通量密度（PPFD），由式（2.7）和（2.8）联立得到：

$$PPF = \frac{1}{\gamma} \int_{400}^{700} \Phi_e(\lambda) \lambda d\lambda \quad (2.9)$$

$$PPFD = \frac{dPPF}{dS} = \frac{1}{\gamma} \int_{400}^{700} E_e(\lambda) \lambda d\lambda \quad (2.10)$$

2.2.4 植物光子度量学

如图 2.2 所示, 植物光合敏感曲线 $P(\lambda)$ 的定义参考人眼, 指植物光合作用对不同波长光线的响应程度。在实际应用中, McCree 在 1972 年测量的 22 种大类植物的叶片光子响应光谱均值被作为 $P(\lambda)$ 而广泛接受^[18], 它主要处于 400 nm ~ 700 nm 的 PAR 波段, 且峰值波长分别位于 430 nm 的蓝光及 630 nm 红橙光附近。

仿照基于人眼的光度学定义, 我们可以定义植物光子度量学的两个关键参数为植物光子通量和植物光子通量密度。

植物光子通量: 光源等发出的光子按植物光合敏感曲线 $P(\lambda)$ 拟合的光子, 称作植物光子通量, 记作 Φ_{pp} , 其单位仍然为 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, 则波长 λ 的光为 $\Phi_{pp}(\lambda)$:

$$\Phi_{pp}(\lambda) = P(\lambda) \cdot \Phi_p(\lambda) \quad (2.11)$$

植物光子通量密度: 植物单位面积接收到的植物光子通量, 记作 E_{pp} , 单位是 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$E_{pp} = \frac{d\Phi_{pp}}{dS} = \frac{1}{\gamma} \int_{min}^{max} P(\lambda) \Phi_e(\lambda) \lambda d\lambda \quad (2.12)$$

值得注意的是, 植物光子度量学的理论虽然在上世纪 70 年代就有相关讨论, 但目前尚未被广泛应用, 主要原因包含两个方面: 一是光子度量学的光学度量体系已经比较准确的描述了相关量, PAR 传感器实现了对 $PPFD$ 直接的测量; 二是植物光子度量学中涉及植物光合敏感曲线 $P(\lambda)$, 这意味着需要知道光源发出的绝对光谱, 并将 $P(\lambda)$ 乘入后积分, 这也意味着要使用光谱仪, 且需光谱仪内置 $P(\lambda)$, 该过程增加了测量的成本。但我们相信, 随着植物照明的快速发展和室内人工光种植对能量利用效率的追求, 更高精度的光学度量体系将拥有广阔的应用空间。