

植物生长与光照的关系

高鸿磊, 诸定昌

(复旦大学电光源研究所, 上海 200433)

摘要: 由于人眼视觉函数和植物敏感曲线的不同, 原有的适用于人眼的光度学方法将不适用于植物。该文主要介绍两种全新的适用于植物的测量方法——促进光合作用辐射功率法和光合作用光子流量法, 最后介绍一种使用促进光合作用的辐射功率法来对简单的植物照明方案进行设计的一般步骤。

关键词: 人眼视觉函数, 植物敏感曲线, 促进光合作用辐射功率, 光合作用光子流量, 植物生长灯

1 前言

随着科学技术, 特别是生物科学和电光源事业的发展, 人造光源越来越多地被用于花房、苗圃等地方以补充太阳光照的不足和促进植物的生长。与此同时, 针对植物生长所需光照强度等参数的各种计算和测量方法也应运而生。本文主要介绍各种测量方法的物理含义, 以及各种方法所使用单位之间的换算关系, 最后介绍一种使用促进光合作用的辐射功率(PAR watts)方法来设计简单的植物照明方案的一般步骤。

2 促进光合作用的辐射和植物对光敏感曲线

像水、二氧化碳、营养物质和环境因素一样, 光照的质量和强度是影响植物生长的最重要因素之一。近些年来, 随着人造光源和灯具价格的下降, 高功率、高效率的光源问世, 以及人类对生活质量的要求提高, 人造光源在帮助植物生长方面的使用频率越来越高, 其主要运用于以下三种情况:

(1) 在光照较弱的地区, 全年提供植物生长所需的所有的光;

(2) 在冬季日照时间很短且强度不大的情况下, 为植物的生长补足所需光照;

(3) 为促进特定生长或开花时期的到来, 在天黑后延长光照时间, 促进植物生长, 缩短培养周期。

在考虑光照强度的同时, 不能忽略光照质量对于植物的影响。像人类需要一个平衡的饮食一样,

用于促进光合作用的各种波长的辐射强度的选择和搭配, 对于保证植物的健康生长就显得非常的重要。植物对于光谱中波长范围约在 400 ~ 700 nm 之间的区域就像人眼一样非常敏感, 该波长范围内的光被称为促进光合作用的辐射(photosynthetically active radiation), 或者简称 PAR。这个波长范围与可见光的波长范围基本吻合, 然而植物对于这个区域的敏感程度却和人眼有着完全不同的。人眼对光的敏感度峰值在黄绿区域, 即 555 nm 波长处; 但是植物与人眼的响应曲线不同, 而且植物对于红光和蓝光的敏感度更大一些, 其中在红色区域的峰值出现在 630 nm 左右。图 1 和图 2 分别是人眼和植物对于光的不同敏感曲线, 可见两者的曲线轮廓不同。

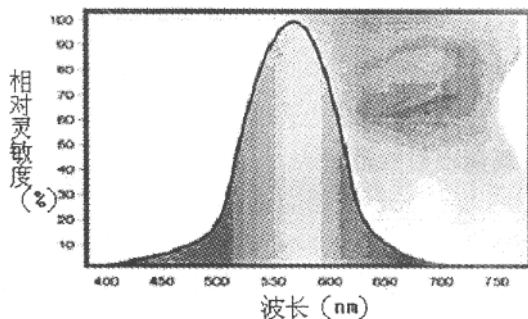


图 1 人眼视觉函数

不同波长的辐射对于植物的影响作用不同。叶绿素作为植物体内最丰富的色素, 其最善于吸收红光和蓝光。园艺学家认为 450 nm 的蓝光对于植物叶片和根系的生长具有极其重要的作用, 600 ~ 700 nm 的红光却有利茎的生长, 并促进植物的开花和叶

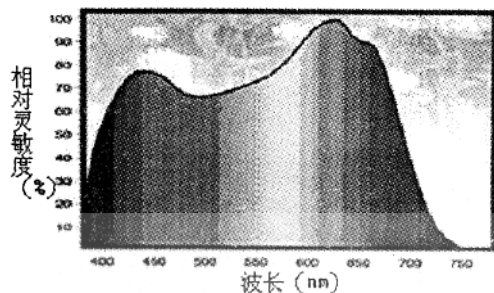


图2 植物对光的敏感曲线

绿素的形成。而绿光则部分被例如胡萝卜素和叶黄素之类的其它色素所吸收,然后将其用于光合作用,但是大部分的绿光将被反射以显示叶片特有的叶绿色。还有许多其它的复杂生长过程需要来自于光谱中不同区域光的照射。因此对于正确的 PAR 光谱范围大家众说纷纭,但有一点可以是肯定的,适量的来自连续辐射光源的光对于植物的健康生长是非常必要的。

3 对于植物用光的不同测量方法

在测量人眼用光时,首先考虑的是光通量和光照度。光通量是在可见光范围内辐射通量与人眼视觉函数的积分,其单位是流明。由于光源所发出的光被分散到所能照到的所有区域。所以光照度的定义即照射到表面上一平方米的区域内的所有光通量,照度的单位是勒克斯(lx)。与此相似,“英寸—坎德拉”即照射到一平方英寸区域上的光通量。但由于光通量和辐射量的转换需要用到人眼视觉函数(见图1),而人眼对于黄绿光特别的敏感,贡献一般多来自于光谱的黄色区域,而蓝光和红光的贡献则大部分都被忽略了。由此可见,流明和勒克斯不适用于植物的照明效果,两者对于植物世界是毫无意义的。现阶段有两种评价植物光照效果的基本测量方法——辐射能量或光子数。

3.1 测量辐射能量法

由于促进光合作用的辐射波长范围在 400 ~ 700 nm 之间,所以测量单位时间该波长区域所辐射出来的总能量值,将其称为促进光合作用的辐射功率(PAR watts)。相对于基于人眼反应的流明这种主观的测量单位,PAR 功率是相当客观的,其可以直接地表明有多少能量的光被有效地用于植物的光合作用。

促进光合作用的辐射功率是一种客观有效地测量每秒钟光源所辐射出能量的方法。一个 100 W 的白炽灯每秒钟可消耗 100 J 的电能,而同时只有大约 6 J 的能量随光而辐射出来,这就是说光源的效率仅仅只有 6%,而其余的能量都被以其它的形式消耗掉

了,如热量。而例如高压钠灯和金卤灯之类的气体放电灯可达到 30% ~ 40% 的能量转化率。功率为 400 W 的白炽灯可以发出能量大约 24 PAR watts 的光,同样功率的金卤灯则可辐射出 140 PAR watts 的光,而 400 W 的高压钠灯的 PAR 功率略少,约在 (120 ~ 128) PAR watts 间。虽然高压钠灯的光效比金卤灯高,但是由于高压钠灯光色为黄色,虽然对于人来说,高压钠灯的流明数很高,但是对于植物来说,其敏感峰值在红光和蓝光,所以金卤灯促进光合作用的辐射功率略胜一筹(人眼视觉单位和植物用光单位的转化方法后面将详细解释)。

植物被照射的程度可用每平方米上促进光合作用的辐射功率数来表示,对于这个单位没有特定的名字,可将其认为是辐照度,单位写作:瓦/平方米或 W/m^2 。

PAR watts 测量法已被有效地运用于农业、林业和海洋学等方面。例如,高产农田的一个要求就是具有合适的促进光合作用的辐射,因此,PAR watts 被用于衡量农业投资的潜力;装于森林不同高度的 PAR 传感器可用于测量辐射的有效率和利用率;在海洋学中,还用其计算海洋透光层的深度。

3.2 计算光子数法(PPF PAR 法)

光的辐射和吸收均是通过不连续的单元进行的,这个单元就是光子,光子是光传递能量过程中的最小单位。光源的功率可用每秒钟光源辐射出多少光子数来标定。

植物学家和研究者通常愿意采用每秒钟照射到表面的光子流量这一方法,这就是 PPF PAR 法。PPF 表示光合作用的光子流量,即每秒照射到每一平方米区域上的光子数目。由于光子所携带的能量非常小,所以 PPF 所代表每秒钟照射的光子数数字通常会很大,科学家们一般用微摩尔来表示光子的数量。如 $1\mu\text{mol}$ 表示 6×10^{17} 个光子,1mol 代表 6×10^{23} 个光子。

因此植物辐照度的单位现在可用两种方法来表示,一种是 PAR watts 法所采用的瓦/每平方米,另一种是 PPF PAR 法所采用的微摩尔每平方米每秒,缩写为 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。有时也可用单位“爱因斯坦”来表示,1“爱因斯坦”单位即代表每秒钟有 6×10^{23} 个光子照射到了 1 m^2 的面积上。

以上介绍的两种方法——PAR watts 和 PPF PAR 虽然形式不同,但这两种方法均不涉及与植物生长无关的人眼视觉函数,所以均是测量植物生长用灯光输出的有效方法。

4 光合作用和光对植物形态的发生作用

在光合作用和光对植物形态的发生作用 (photomorphogenesis) 下 , 当光吸收不足时 , 植物叶片将会呈窄长形 , 茎秆较细 , 且植物总重量较轻 ; 与此相反 , 在吸收了过量光线的情况下 , 植物将会干燥缺水、过度生长 , 而且由于叶绿素的破坏作用 , 植物还将显示出颜色变淡等其他不良的症状。比较图 1 和图 2 的横轴范围可知 , 其实植物对光的反应波长区间大于可见光的范围 , 一些科学家认为 PAR 的区域应该在 350 ~ 750 nm 之间 , 所以不可见区域中的紫外辐射和红外辐射 (有资料认为 800 nm 左右的红外辐射对植物的光形态发生作用有着重要的影响) 对于植物的生长也有一定的影响 , 而过度的红外或紫外辐射也将会导致植物的不健康生长。

在适合的光照强度下植物可以健康地生长 , 而且生长速度与照射的强度存在正相关的关系。图 3 所示的是一种典型的海藻类植物胶球藻 (coccomyxa) 在二氧化碳气氛中、温度为 25 ℃、辐照度为 600 PPF PAR 的情况下的相对生长速度。

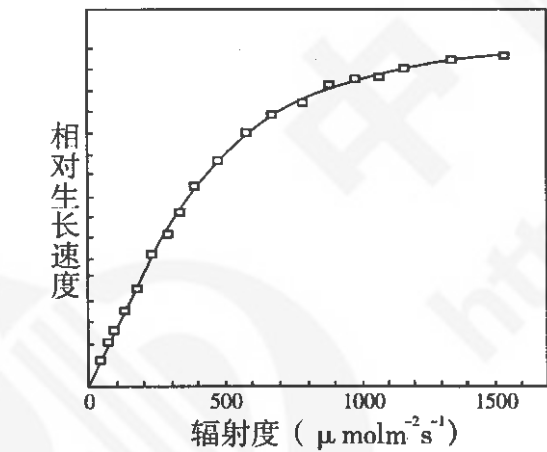


图 3 植物生长速度与光照强度的关系

决定植物光合作用的主要因素是叶绿素 , 已有一些研究者从植物中提取出叶绿素来进行研究 , 计算出叶绿素对于不同波长辐射的反应 , 从而得出光合作用在不同波长辐射下的效率。有研究表明除了叶绿素外 , 还有例如胡萝卜素和藻胆素等化合物也能产生光合作用。由此一来 , 植物的敏感曲线应该是含有多个变量的一个复杂的方程 , 而且不同植物间应该不完全相同。因此 , 在实际照明设计时 , 一般取一个平均值来对植物的生长进行衡量。

除了光合作用可促进植物的生长外 , 发芽和开

花之类的植物成长过程也需要不同波长的光照射 , 由隐花色素 (cryptochrome) 和光敏色素 (phytochrome) 控制的光对植物形态的发生作用甚至需要来自紫外和红外的非可见光辐射。因此 , 在选择光源之前必须首先搞清楚某一特定植物所需要光的光谱范围和强度 , 而这些数据是植物学家研究的课题 , 本文介绍的是在取得这些数据后对光源的选择。现阶段主要用于植物生长的光源是高压钠灯、金卤灯和荧光灯。高压钠灯和荧光灯均有特定的辐射波长 , 而金卤灯的辐射谱线范围较宽。此类植物生长灯与普通照明光源不同 , 其针对植物所需的光谱 , 调整光源辐射范围和强度 , 将更多的能量集中在如红光和蓝光等对于植物来说最敏感的区域。然后根据植物学家提供的数据采用多种光源进行不同的组合以满足植物生长所要求的光谱范围和强度。图 4 和表 1 所示的是某公司的产品类型及主要参量。

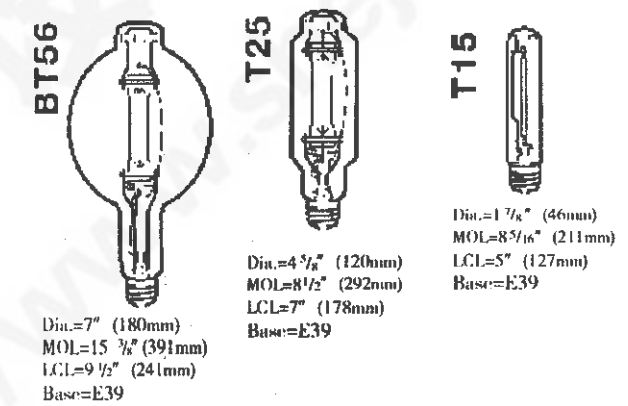


图 4 国外某公司产品形状

表 1 国外某公司产品基本数据

	WATTS	LAMP DESCRIPTION	BALLAST TYPE	ANSI TYPE	INITIAL LUMENS	PAR WATTS	LIFE (HOURS)	OPERATING POSITION
Warm Deluxe	1100	LA.1100W.U37.WDX	MH	N/A	133,000	385	9,000	Universal
	1000	LA.1000W.U37.WDX	MH	M47	105,000	315	12,000	Universal
	1000	SM.1000W.H37.WDX	MH	M47	115,000	345	12,000	Horizontal
	1000	SM.1000W.BU37.WDX	MH	M47	115,000	345	12,000	Base Up
	400	SM.400W.BU37.WDX	MH	M59	38,000	110	20,000	Base Up
	400	SM.400W.H37.WDX	MH	M59	38,000	110	20,000	Horizontal
Neutral Deluxe	1000	LA.1000W.U37.HDX	HPS	S52	105,000	315	12,000	Universal
	1000	LA.1000W.U37.HDX	MH	M47	110,000	315	12,000	Universal
	1000	SM.1000W.BU37.HDX	MH	M47	115,000	345	12,000	Base Up
	400	LA.400W.U28.HDX	HPS	S51	36,000	105	20,000	Universal
	400	LA.400W.U37.HDX	MH	M59	36,000	105	20,000	Universal
	400	LA.400W.U37.HDX	MH	M59	36,000	105	20,000	Universal
Cool Deluxe	1800	LA.1800W.U37.DDX	HPS	S52	108,000	350	9,000	Universal
	1000	LA.1000W.U37.CDX	MH	M47	80,000	320	9,000	Universal
	600	LA.600W.U25.CDX	HPS	S106	50,000	195	10,000	Universal
	400	LA.400W.U37.CDX	MH	M59	30,000	110	15,000	Universal
	1000	SL.1000W.U25.VRD	HPS	N/A	150,000	358	24,000	Universal
	600	SL.600W.U15.VRD	HPS	S106	90,000	215	24,000	Universal

* For optimized performance, lamp must be operated on ballast #V9008910 ** When operating on ballast SM.9002314C

5 植物生长照明方案设计的基本步骤和举例

1)确定植物生长所需要的人造光的光谱范围和强度 这个问题涉及植物的种类、所处的生长阶段、太阳可提供的自然光的照度水平等诸多元素 ,使用者需要查阅大量的资料以确定准确的数值。当然人造光的光谱范围越宽 ,照射的强度越大 ,植物自然能够更加快速的生长 ,但是另一方面 ,该方法导致了电费 的增加。在何等照度下才能使植物快速生长带来的收益减去消耗的电费达到最大值 ? 这就是首先需要搞清楚的问题。在这里假设某植物生长需要 85 PAR W/m²。

2)确定植物生长所需要照射的区域面积。假设总面积为 72 m²。

3)确定植物生长所需要的理论总辐射功率 ,即 区域面积 × 光强 = 6120 PAR W

4)由于光在墙壁、设备以及房顶等处的损失 ,理论值需要除以未损失的百分比。如假设损失因子为 1/3 ,则实际需要的总辐射功率 = 6120/(1 - 1/3) = 9180 PAR W。

5)确定合适的光源及其数量 :光源功率大则需求数量小 ,反之 ,则需求数量大。由于在光源数量小时容易造成均匀度偏低 ,有的植物光照过度 ,有的则光照不足 ,所以一般选择功率稍小的光源。另外还须考虑到光源的光衰 ,随着使用时间的延长 ,光通量会逐渐降低 ,所以为了保持合适的照度 ,一般再将总辐射功率提高 20% 左右。假设某光源的功率为 480 PAR W ,9180 ×(1 + 20%)/480 = 22.95 ,则所需要的总光源数在 23 个左右。

6)根据区域形状确定灯具排布。如区域为长方形 ,且纵横比为 2/3 ,则可确定光源排布应为 4 × 6 ,光源总数为 24 个。

如上述植物生长设计方案所示 ,无论是植物学家给出的植物生长必要光强 ,还是植物生长灯的基本

参数均采用的是本文所介绍的 PAR watts 法或 PPF PAR 法。而不是普通光源给出基于人眼视见函数的勒克斯。由于这两种标准是基于不同的标准而定义的 ,而且最新研究表明植物对光的反应波长范围稍大于可见光范围 ,故两者之间涉及一个复杂的单位转换过程。R. W. Langhans 和 T. W. Tibbitts 编写的《Plant Growth Chamber Manual》一书中详细介绍了两种标准间的转换方法。由于各种灯的光谱分布不同 ,不同灯在两种标准下的转换系数也有所不同。在这里仅仅列举出一些灯转换系数的平均值以供在不精确计算下的参考(见表 2)。

表 2 两种标准下的平均转换系数
(光子数的单位是 PPF μmolm⁻²s⁻¹ ,W/m² 为 PAR W/m² 的缩写)

辐射源	光子数	W/m ²	光子数	Lux -	光子数	F. C.	W/m ²	Lux -
	- W/m ²	- 光子数	- Lux	光子数	- F. C.	- 光子数	- Lux	W/m ²
日光	0.219	4.57	54	0.019	5.02	0.199	0.249	4.02
高压钠灯	0.201	4.98	82	0.012	7.62	0.131	0.408	2.45
金卤灯	0.218	4.59	71	0.014	6.6	0.152	0.328	3.05
低压钠灯	0.203	4.92	106	0.009	9.85	0.102	0.521	1.92
100W	0.2	5	50	0.02	4.65	0.215	0.251	3.99
卤素灯								
冷白色	0.218	4.59	74	0.014	6.87	0.146	0.341	2.93
荧光灯								
植物生长	0.208	4.8	33	0.03	3.07	0.326	0.158	6.34
用荧光灯								

6 结束语

植物生长灯在增加粮食产量、缩短植物培育周期、延长花卉植物开花周期等方面具有极其重要的意义。合理标准的引用和新旧标准的转化计算有利于植物生长灯的推广和国产的标准化。

参考文献：

[1] R. W. Langhans , T. W. TibbittsIowa . 《Plant Growth Chamber Manual》[M] . 1997