



团 体 标 准

T/CSA 032-2019

---

# 植物光照用 LED 灯具通用技术规范

General technical specification of LED luminaires for horticultural lighting

版本：V02.00

2019-12-30 发布

2019-12-30 实施

---

国家半导体照明工程研发及产业联盟发布

## 目 次

前 言.....	I
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 分类.....	3
4.1 按灯具的用途分类.....	3
4.2 按控制方式分类.....	3
5 技术要求.....	3
5.1 结构和外观.....	3
5.2 电学性能.....	3
5.3 光学性能.....	4
5.4 可靠性.....	5
5.5 外壳防护性能.....	5
5.6 有害物质限值.....	5
5.7 安全性能.....	5
5.8 电磁兼容性能.....	6
5.9 分类和分等.....	6
6 检验方法.....	6
6.1 试验条件.....	6
6.2 结构和外观.....	7
6.3 光电性能.....	7
6.4 可靠性.....	8
6.5 外壳防护性能.....	9
6.6 有害物质限值.....	9
6.7 安全性能.....	9
6.8 电磁兼容性能.....	9
6.9 分类和分等.....	9
附录 A（资料性附录）典型植物光合作用响应曲线.....	10

## 前 言

本标准代替 CSA 032-2016(V01.00)。

本标准与 CSA 032-2016(V01.00)相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 删除范围中“检验规则、标志、包装、运输、储存”等内容（见 V01.00 版 1）；
- 增加并修改了规范性引用文件中所引用的标准（见 2）；
- 删除术语与定义中 3.3、3.4、3.5、3.10、3.12、3.13、3.14 内容，修改 3.6、3.7、3.8 内容（见 V01.00 版 3）；
  - 增加术语与定义中“空间光谱均匀性”的定义（见 3.8）；
  - 删除分类中“按植物光合作用分类”（见 V01.00 版 4.2）；
  - 修改技术要求中“绝对最大额定值”（见 5.4.2，V01.00 版 5.1）；
  - 修改技术要求中 5.2.1.2、5.2.2.3、5.3.2、5.4.2、5.5.1、5.6.2、5.7、5.10.1 内容，删除 5.4.5、5.10.3 内容（见 V01.00 版 5）；
    - 增加技术要求中 5.3.3、5.3.4、5.3.7、5.3.8 内容（见 5）；
    - 修改检验方法中 6.3.2、6.4.1、6.6 内容，删除 6.3.3、6.9.3 内容（见 V01.00 版 6）；
      - 增加检验方法中 6.3.3、6.3.4、6.3.5 内容（见 6）；
      - 删除检验规则和标志、包装、运输、储存的内容（见 V01.00 版 7 和 8）；
      - 删除附录 A 中 A.1、图 A.3 的内容（见 V01.00 版附录 A）；
      - 增加附录 A 中 A.1、A.2、A.4、A.5 的内容（见附录 A）。

本标准由国家半导体照明工程研发及产业联盟标准化委员会（CSAS）制定发布，版权归 CSA 所有，未经 CSA 许可不得随意复制；其他机构采用本标准的技术内容制定标准需经 CSA 允许；任何单位或个人引用本标准的内容需指明本标准的标准号。

到本标准正式发布为止，CSAS 未收到任何有关本标准涉及专利的报告。CSAS 不负责确认本标准的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本标准主要起草单位：北京大学东莞光电研究院、厦门通裕科技股份有限公司、中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所、欧司朗（中国）照明有限公司、杭州远方光电信息股份有限公司、鸿利智汇集团股份有限公司、中国科学院半导体研究所、上海三思电子工程有限公司、杭州华普永明光电股份有限公司、广州市雅江光电设备有限公司、厦门华联电子股份有限公司、福建鸿博光电科技有限公司、横店集团得邦照明股份有限公司、北京大学宽禁带半导体研究中心、昕诺飞（中国）投资有限公司、广州市莱帝亚照明股份有限公司、宁波升谱光电股份有限公司、中关村半导体照明联合创新重点实验室。

本标准主要起草人：丁晓民、王琦、徐虹、魏伟、李涛、张俊斌、李倩、蒋晶晶、吕天刚、宋昌斌、陈磊、黄建明、黄荣丰、肖俊、赵利民、蔡金标、陈志忠、黄峰、吕鹤男、牛宏强、徐浩。



# 植物光照用 LED 灯具通用技术规范

## 1 范围

本标准规定了植物光照用LED灯具（以下简称“灯具”）的分类、技术要求、检验方法。

本标准适用于光谱范围为320nm-800nm在植物正常生长的温度范围内使用的植物光照用LED灯具产品。可作为植物光照用LED灯具产品设计、测试、质量检验和制定相关技术标准/文件的参考。

本标准不适用于株间补光灯具。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 2410—2008 透明塑料透光率和雾度的测定

GB/T 2423.1—2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验A：低温

GB/T 2423.2—2008 电工电子产品环境试验 第2部分：试验方法 试验B：高温

GB/T 2423.3—2016 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验

GB/T 2423.22—2012 环境试验 第2部分：试验方法 试验N：温度变化

GB/T 2900.65—2004 电工术语 照明

GB/T 4208—2017 外壳防护等级（IP代码）

GB 7000.1 灯具 第1部分：一般要求与试验

GB 17625.1 电磁兼容 限值 谐波电流发射限值（设备每相输入电流≤16 A）

GB/T 17743 电气照明和类似设备的无线电骚扰特性的限值和测量方法

GB/T 18595 一般照明用设备电磁兼容抗扰度要求

GB/T 20145 灯和灯系统的光生物安全性

GB/T 24824—2009 普通照明用LED模块测试方法

GB/T 32655—2016 植物生长用LED光照 术语和定义

GB/T 33721—2017 LED 灯具可靠性试验方法

JB/T 9536—2013 户内户外防腐低压电器环境技术要求

SJT 11364—2014 电子信息产品污染控制标识要求

CQC 1328—2019 植物生长灯安全性和性能技术规范

## 3 术语和定义

GB/T 2900.65—2004、GB/T 32655—2016界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

**植物补光灯具 horticultural supplement lighting luminaire**

自然光照不足时，为植物补充光能的灯具。

3.2

**植物生长灯具 horticultural lighting luminaire**

在没有自然光照条件下，为植物生长提供所需光能的灯具。

3.3

**植物吸收光谱 plant absorption spectrum**

植物对不同波长光线的吸收率曲线。

3.4

**光子通量效率 photon flux efficacy**

**PFE**

$\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$

特定波长范围内的灯具输出光子通量除以灯具的电输入功率。

3.5

**光子通量密度 photon flux density**

**PFD**

$E_p$

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

单位时间、单位面积上到达或通过的光量子数。

$$E_p = \frac{d\Phi_p}{dA}$$

其中， $\Phi_p$ 为光子通量，单位 $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ；A为面积，单位 $\text{m}^2$ 。

3.6

**光子通量维持率 photon flux maintain rate**

灯具在规定条件下点亮，在寿命期间内一特定时间灯具所发出的光子通量与初始光子通量的比值，用百分比表示。

3.7

**寿命（植物光照用） life (of plant lighting)**

hrs

植物光照用LED灯具在规定条件下，光子通量衰减到初始值的90%或者标定值时的累计燃点时间。

3.8

**空间光谱均匀性 spatial spectral uniformity**

$U_{R/B}$

LED灯具在空间各个位置的光谱功率分布（SPD）的一致性程度。本标准中使用指定平面上的红蓝比的最小值和平均值的比值来表示。

### 3.9

#### 雾度 haze

透过试样面偏离入射光方向的散射光通量与透射光通量之比，用百分数表示（对于本方法来说，仅把偏离入射光方向 $2.5^\circ$ 以上的散射光通量用于计算雾度）。

## 4 分类

### 4.1 按灯具的用途分类

按灯具的用途分为植物补光灯和植物生长灯。

### 4.2 按控制方式分类

按控制方式分为可调灯具和非可调灯具。

其中可调灯具的可调参数有以下几种：

- a) 光子通量；
- b) 光周期；
- c) 光谱分布。

## 5 技术要求

### 5.1 结构和外观

#### 5.1.1 结构

5.1.1.1 灯具的设计和结构要求外部结构坚固，内部结构、安装结构以及光源连接结构牢固，应能使其在正常使用过程中不会对使用者或周围环境构成危险。

5.1.1.2 灯具外壳内外表面（与外界接触）均应进行防腐处理。

#### 5.1.2 外观

5.1.2.1 灯具应无明显破损、变形，无裂纹、污迹、锈蚀等缺陷，无锐边、毛刺，无松动，无装配缺失，无变色和严重色差，光学材料应无气泡、明显划痕，涂层附着力良好，标志应清晰耐久。

5.1.2.2 灯具应能够满足使用场所的环境要求，在使用寿命期内不应有明显的外观质量变化。

5.1.2.3 灯具的塑料材料（接插件、外部导线等）应具有良好的防紫外线、高温、化学腐蚀、电化学腐蚀、冷热交替循环的稳定性能。

### 5.2 电学性能

#### 5.2.1 功率

灯具的实测功率与标称功率相差不得大于 $\pm 10\%$ 。

## 5.2.2 功率因数

灯具的功率因数要求见表1。

表1 灯具的功率因数要求

标称功率/W	功率因数
$P \leq 5$	$\geq 0.5$
$5 < P \leq 25$	$\geq 0.7$
$P > 25$	$\geq 0.9$

## 5.3 光学性能

### 5.3.1 光子通量

灯具的光子通量实测值不应低于标定值的90%。

### 5.3.2 光子通量效率

灯具的光子通量效率实测值不应低于 $1.91 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ 。

注：如果灯具光源含有远红光（700nm-800nm），则种植效果更好。

### 5.3.3 平面光子通量密度分布

平面光子通量密度分布应符合CQC 1328—2019中第11章的规定。

### 5.3.4 雾度

根据植物光需求特征，面发光LED灯具，发光面雾度不低于30%，非面发光LED灯具不做要求。

### 5.3.5 光谱分布

- a) 植物补光灯具光谱可以由红光、蓝光等光谱按一定比例组合而成。
  - b) 植物生长灯具光谱应由红光、蓝光为主，其他光谱为辅的光谱组成。
    - 1) 一般情况下，红光波段中，峰值波长宜在 640 nm~670 nm；
    - 2) 蓝光波段中，峰值波长宜在 420 nm~470 nm 的范围内；
    - 3) 除红蓝光之外的其余光（380 nm~420 nm，470 nm~640 nm，670 nm~780 nm 等）的光子通量总和，应明显低于红蓝光部分（建议 50%以下）。
  - c) 需方可提出所需植物光照的光谱结构，由供方按需定制。
- 常见的典型光谱分布曲线参见附录 A。

### 5.3.6 光合光子通量密度

对于植物光照用 LED 灯具，植物生长面光合光子通量密度宜大于照射植物的光补偿点对应的光合光子通量密度。

### 5.3.7 空间光谱均匀性



对于单色植物光照用 LED 灯具无需考察空间光谱均匀性；

对于白光或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 30cm 的受照平面上，空间光谱均匀性  $U_{R/B}$  应不低于 80%。

### 5.3.8 光度分布和颜色空间分布

灯具的光度分布和颜色空间分布应满足应用要求。并满足 5.3.3 和 5.3.4、5.3.5、5.3.6、5.3.7 的要求。

## 5.4 可靠性

### 5.4.1 寿命与光子通量维持率

- a) 灯具燃点 36000 hrs 的光子通量维持率应不低于初始值的 90%；
- b) 灯具通过 15000 次的开关试验后，应仍能正常工作。

### 5.4.2 环境适应性

灯具的环境适应性应满足表2要求，按6.4.2规定进行试验后仍能正常工作。

表 2 灯具的环境适应性要求

章条号	参 数	符号	数值		单位
			最小	最大	
5.4.2.1	贮存温度	$T_{stg}$	-25	+55	℃
5.4.2.2	贮存相对湿度	$Rh_{stg}$	20	90	%
5.4.2.3	工作环境温度	$T_{amb}$	-10	+45	℃
5.4.2.4	工作环境相对湿度	$Rh_{amb}$	20	95	%

本标准未列入的环境要求按照GB 7000.1的要求执行。

## 5.5 外壳防护性能

### 5.5.1 防护要求

依据 GB 7000.1，室内灯具外壳的防护等级宜达到 IP54 要求，室外灯具外壳的防护等级宜达到 IP65 要求。

### 5.5.2 防腐等级

依据 JB/T 9536—2013，室内灯具的防腐等级为 F2，室外灯具的防腐等级为 WF1。

## 5.6 有害物质限值

按照 SJ/T 11364—2014 的要求，标识电子电气产品有害物质限制使用标志，并在必要时披露与产品中含有的有害物质相关的信息和标注环保使用期限。

## 5.7 安全性能

### 5.7.1 安全要求

灯具应符合 GB 7000.1 及以下规定。

灯具达到热稳定后，热稳定即温度变化率小于  $1^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，易于触及部位的灯具外壳的最高温度应不高于  $60^{\circ}\text{C}$ 。

### 5.7.2 光生物安全

灯具应按 GB/T 20145 中 6.1.1 的规定评估其光生物安全，如有不符合项，必须在产品上正常使用时醒目位置上加上警示标签，在标签上或说明书上详细描述危害及用建议采取的保护措施（如安全眼镜）。

### 5.8 电磁兼容性能

5.8.1 灯具的输入电流谐波应符合 GB 17625.1 中第 7 章的规定。

5.8.2 灯具无线电骚扰特性应符合 GB/T 17743 中第 4 章的规定。

5.8.3 灯具电磁兼容抗扰度应符合 GB/T 18595 中第 5 章的规定。

### 5.9 分类和分等

#### 5.9.1 光子通量效率分类

光子通量效率分为三类，见表 3。

表 3 光子通量效率分类

章条号	分类	光子通量效率要求 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ )
5.9.1.1	一类	$\eta_p \geq 2.40$
5.9.1.2	二类	$\eta_p \geq 2.18$
5.9.1.3	三类	$\eta_p \geq 1.91$

#### 5.9.2 吻合程度分等

灯具的光谱分布与标称的植物光谱分布的吻合程度划分用等表示，见表 4。

表 4 光源的光谱分布与植物光谱的吻合程度分等

章条号	分等	吻合程度	要求
5.9.2.1	I 等	吻合	符合 5.3.5 b) 的三项要求
5.9.2.2	II 等	部分偏离	符合 5.3.5 b) 的两项要求
5.9.2.3	III 等	严重偏离	符合 5.3.5 b) 的一项要求

## 6 检验方法

### 6.1 试验条件

试验条件应符合 GB/T 24824—2009 中 4.1 的规定。

## 6.2 结构和外观

采用目视法检验。

## 6.3 光电性能

### 6.3.1 电学性能

灯具在额定条件下正常（热）稳定工作时，按照GB/T 24824—2009中5.1的方法对灯具的电学性能进行检测。

### 6.3.2 光子通量

采用光谱分析系统（积分球光谱辐射计或分布光谱辐射计）测量灯具的光谱分布，测试方法参照 GB/T 24824—2009 中 5.2 进行。获得灯具的光谱分布后，根据公式（1）。

$$\Phi_p = dN_p/dt = \int \Phi_{e\lambda} \lambda / (N_A h c) d\lambda \dots\dots\dots (1)$$

注：h—普朗克常数；

c—光速；

$\lambda$ —波长

$N_A$ —阿佛加德罗常数；

$N_p$ —光子个数；

$\Phi_{e\lambda}$ —辐射能通量的光谱密集度；

t—时间。

积分计算可得光子通量。积分球光谱辐射计适用于小型灯具的测量；分布光谱辐射计对任何灯具均适用。

### 6.3.3 平面光子通量密度分布

参照CQC 1328—2019给出垂直于灯具法线方向并距离灯具15cm和30cm的平面上的光子通量密度（PFD）等值分布图，并给出每个平面上50%、40%、30%、20%峰值PFD所围成区域的边长或者直径，列入表5中。

表5 平面光子通量密度分布表

距离	50%PFD 区域 (cm)	40%PFD 区域 (cm)	30%PFD 区域 (cm)	20%PFD 区域 (cm)
15 cm				
30 cm				

### 6.3.4 空间光谱均匀性

对于单色植物光照用 LED 灯具无需考察空间光谱均匀性；对于白光或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 30cm 的平面上，参考 CQC 1328—2019 每隔不大于 5cm 测量光谱辐照度，并采用式（2）计算红蓝比均匀性  $U_{R/B}$ 。

$$U_{R/B} = \frac{X_{min}}{\bar{X}} \dots\dots\dots (2)$$

其中,  $X_{min}$  和  $\bar{X}$  分别表示平面内 R/B 比的最小值和平均值, 计算中仅取 PFD 大于峰值 10% 的点。

R/B 比的计算表达式为:

$$R/B = \frac{\int_{600}^{700} E_e(\lambda, x, y, z) d\lambda}{\int_{400}^{500} E_e(\lambda, x, y, z) d\lambda} \dots\dots\dots (3)$$

式中,  $E_e(\lambda, x, y, z)$  为空间一点的光谱辐照度,  $(x, y, z)$  为空间坐标, 此处  $z=30\text{mm}$ 。

### 6.3.5 雾度

按照 GB/T 2410—2008 的方法进行。

## 6.4 可靠性

### 6.4.1 寿命与光子通量维持率

#### a) 光子通量维持率

按照 GB/T 33721—2017 第 14 章的方法进行;

#### b) 开关次数

将灯具置于额定的工作条件下, 以为“开 30 s、断 30 s”为一个循环, 连续进行至少 15 000 次循环试验后, 产品仍能正常工作。

### 6.4.2 环境适应性

a) 高温存储试验: 按 GB/T 2423.2—2008 的规定在  $(55 \pm 2)^\circ\text{C}$  条件下, 将灯具存储 2 h, 在室温条件下恢复 2 h 后, 对灯具进行检查, 应能正常工作;

b) 高温负荷工作检测试验: 按 GB/T 2423.2—2008 的规定在  $(45 \pm 2)^\circ\text{C}$  条件下, 灯具通电工作 16 h, 在室温条件下恢复 2 h 后, 对灯具进行检查, 应能正常工作;

c) 低温存储试验: 按 GB/T 2423.1—2008 的规定在  $(-25 \pm 3)^\circ\text{C}$  条件下, 将灯具存储 2 h, 在室温条件下恢复 2 h 后, 对灯具进行检查, 应能正常工作;

d) 低温工作试验: 按 GB/T 2423.1—2008 的规定在  $(-10 \pm 3)^\circ\text{C}$  条件下, 灯具通电工作 1 h, 在室温条件下恢复 2 h 后, 对灯具进行检查, 应能正常工作;

e) 高低温冲击试验: 按 GB/T 2423.22—2012 的规定, 灯具在不包装、不通电、以正常工作位置放置的条件下:

1) 降温至  $(-10 \pm 3)^\circ\text{C}$ , 恒温保持 3 h;

2) 升温至  $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 恒温保持 3 h;

3) 降温至  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 恒温保持 3 h;

以上步骤 1) 至步骤 3) 为一个循环, 共进行 10 个循环; 待循环完毕后, 在室温条件下恢复 2 h, 对灯具进行检查, 应能正常工作;

f) 灯具不通电按 GB/T 2423.3—2016 的规定在温度  $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ , 相对湿度  $(93 \pm 3)\%$  的条件下, 放置 96 h 后; 在温度  $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$  (室温), 环境湿度  $(60 \pm 20)\%$ , 恢复 4 h 后, 对灯具进行检查, 应能正常工作。

## 6.5 外壳防护性能

灯具的外壳防护等级按 GB 7000.1 中第 9 章的方法进行检测, 检测结果应符合 5.5 的要求。

灯具的防腐要求, 依据 JB/T 9536—2013 进行检测, 检测结果应符合 5.5 的要求。

## 6.6 有害物质限值

目视检查是否已标注电子电气产品有害物质限制使用标志, 及在适用时提供产品中有害物质的名称及含量信息。

## 6.7 安全性能

安全性能按 GB 7000.1 的规定进行试验, 应符合 5.7 的规定。

## 6.8 电磁兼容性能

6.8.1 灯具的输入电流谐波应按照 GB 17625.1 中的方法进行试验。

6.8.2 灯具无线电骚扰特性应按照 GB/T 17743 中的方法进行试验。

6.8.3 灯具电磁兼容抗扰度应按照 GB/T 18595 中的方法进行试验。

## 6.9 分类和分等

### 6.9.1 光子通量效率分类

按照 5.9.1 的分类方法, 如果得到的光子通量效率小于  $1.91 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ , 则判定为不合格; 如果得到的光子通量效率大于等于  $1.91 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ , 则判定为三类; 如果得到的光子通量效率大于等于  $2.18 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ , 则判定为二类; 如果得到的光子通量效率大于等于  $2.40 \mu\text{mol}\cdot\text{J}^{-1}$ , 则判定为一类。

### 6.9.2 吻合程度分等

按照 6.3 测量方法得到光源的光谱分布, 将光谱分布分为三部分, 红光波段, 蓝光波段和除红、蓝光波段以外的其他波段, 并计算三部分波段的光子通量, 同时标出红光波段和蓝光波段的峰值波长。将以上的结果与 5.3.5 中 b) 三条要求相比较, 判断符合项数目。如果符合三项要求, 则判定为 I 等; 如果符合两项要求, 则判定为 II 等; 如果符合一项要求, 则判定为 III 等。

## 附录 A

## (资料性附录)

## 典型植物光合作用响应曲线

## A.1 植物叶片光合作用光谱响应曲线

植物在进行光合作用时，其光合色素对光能的吸收和利用起着重要的作用。叶绿素吸收光的能力极强。叶绿素吸收光谱最强的吸收区有两个：一个在波长为 600~700nm 的红光波段，另一个在波长为 420~470nm 的蓝光波段。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，并进行了光合速率对光谱的响应分析，提出植物光合作用在蓝光和红光波段的光量子效率最高（如图 A.1 所示）。因此，人们广泛认同红光和蓝光是植物光合作用的主要光谱，目前不同比例的红蓝光是全人工光植物生产的主要光谱。

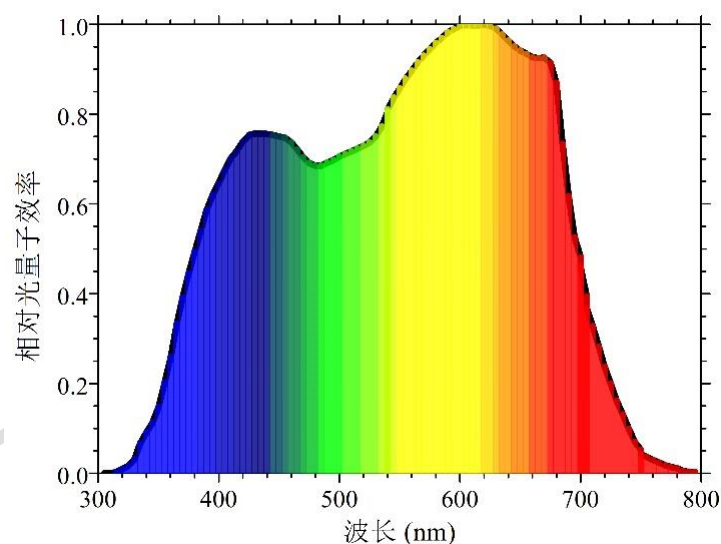


图 A.1 植物叶片光合作用光量子效率光谱响应曲线

## A.2 典型叶菜叶片吸收光谱

在可见光波段（400-700 nm），植物叶片在蓝光和红橙光波段吸收率最高，在绿光波段吸收率较低（如图A.2所示），叶菜在可见光波段平均光吸收率一般为87~93%，具体因物种及叶龄而异。

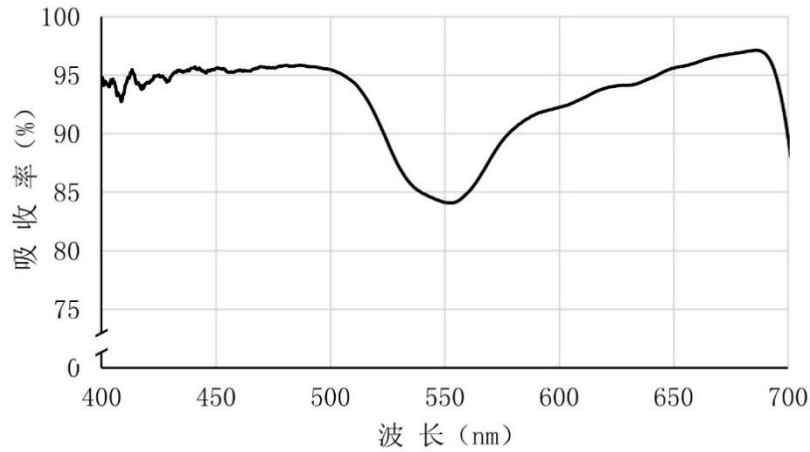


图 A.2 ‘特波斯 Tiberius’ 生菜叶片光吸收率光谱图 (平均光吸收率为 92%)

### A.3 典型的光源光谱结构

典型的光源光谱结构如图A.3所示。

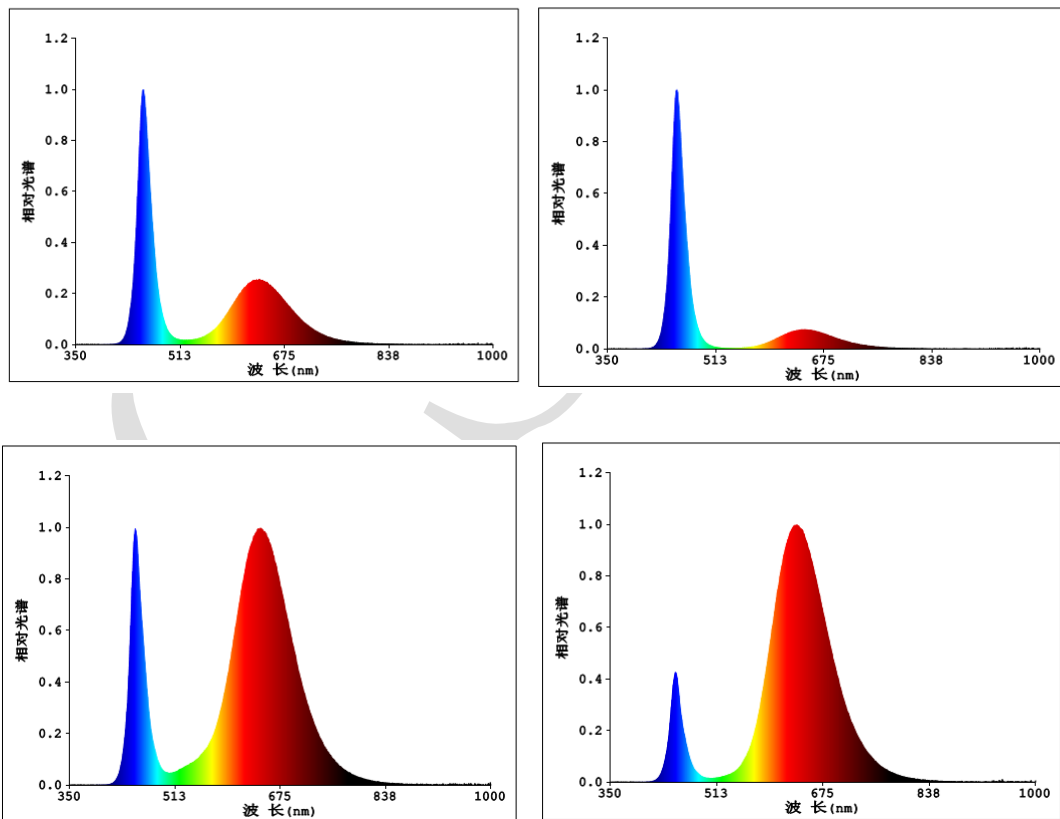
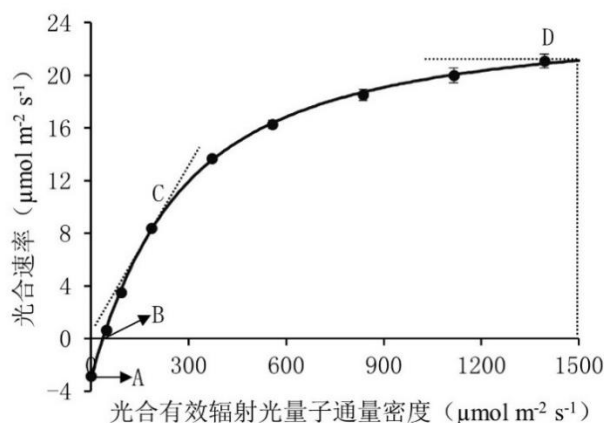


图 A.3 几种典型的光源光谱结构

### A.4 典型叶菜叶片光合作用光子通量密度响应曲线

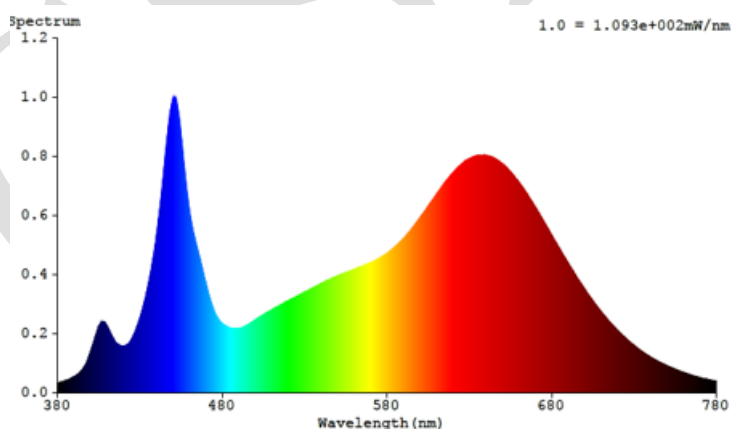
光合作用速率是单位光量子每秒每平方米叶片同化二氧化碳的量。图A.4为典型叶菜叶片光合作用光强响应示意图。如图所示，叶片光合作用光响应曲线有几个重要的节点。在光

合有效辐射为 $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 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。因此在人工光叶菜生产实际应用中，应在这一阶段内寻求合适的光照强度。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。



图A.4 ‘特波斯Tiberius’生菜叶片光合作用光强响应曲线(图中实心圆点代表实测光合速率值，实线为非直线双曲线模型拟合所得叶片光合速率光强响应数值)

#### A.5 典型类太阳光光谱



图A.5 典型类太阳光光谱（380-800nm）





