



中国照明电器协会团体标准

T/CALI 1201-2022

人工光型植物工厂光环境技术规范

Optical radiation environment for plant factories based on artificial
lighting – Technical specifications

2022—04—06 发布

2022—04—06 实施

中国照明电器协会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 光子通量密度要求	4
4.1 一般说明	4
4.2 初始光子通量密度指标要求	4
4.3 光子通量密度维持率指标要求	4
5 照明功率密度要求	5
6 测试方法和符合性验证方法	5
6.1 光子通量密度及其分布测试方法	5
6.2 初始光子通量密度指标符合性验证方法（4.2）	5
6.3 光子通量密度维持率指标符合性验证方法（4.3）	5
6.4 照明功率密度符合性验证方法（5）	5
附录 A（规范性） 光子通量密度及其分布的测试方法	7
参考文献	9
图 A.1 典型栽培面上光子通量密度分布布点示意图	8

中国照明电器协会团体标准

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国照明电器协会团体标准化工作委员会提出。

本文件由中国照明电器协会归口。

本文件起草单位：国家电光源质量监督检验中心（北京）、无锡立德时代科技有限公司、杭州远方光电信息股份有限公司、正恒（上海）农业科技有限公司、四维生态科技（杭州）有限公司、昕诺飞（中国）投资有限公司、爱盛生物科技（上海）有限公司、北京电光源研究所有限公司、中国农业大学、杭州华普永明光电股份有限公司、深圳市霍迪科技有限公司、上海时代之光照明电器检测有限公司、鸿利智汇集团股份有限公司、广州市莱帝亚照明股份有限公司、广东加华美认证有限公司、上海应用技术大学、宁波朗格照明电器有限公司、巴比仑庄园（广州）农业科技有限公司、中国照明电器协会、中国农业科学院都市农业研究所、中国科学院空间应用工程与技术中心、中国科学院上海技术物理研究所、江苏新广联光电股份有限公司、浙江正泰照明有限公司、广州赛西标准检测研究院有限公司、中山市半导体照明行业协会。

本文件主要起草人：张伟、洪兵、李倩、郭斗斗、罗长春、黄峰、周华方、王宠、贺冬仙、徐明仲、杨雄、庄晓波、吕天刚、吕鹤男、黄志鹏、李月锋、邹军、樊付洪、王卓、王森、汉鹏武、袁士东、华利生、郭清华、吴杜雄、侯莎、王青松、王伟、黄凡、李艳杰、刘忠祺。

本文件为首次制定。

人工光型植物工厂光环境技术规范

1 范围

本文件规定了人工光型植物工厂光环境技术要求和对应的试验验证方法。
本文件适用于人工光型植物工厂中用于提供植物栽培用途的光环境。
本文件不适用于人工光型植物工厂中用于提供视觉照明用途的光环境。

2 规范性引用文件

本文件没有规范性引用文件。

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

植物工厂 plant factory

通过人工调控植物生长和发育的环境条件实现植物周年连续生产的农业设施。
[来源：GB/T 32655-2016, 2.2.87, 有修改]

3.2

人工光型植物工厂 plant factory based on artificial lighting

光辐射全部基于人工光源的植物工厂。

3.3

安装高度 mounting height

植物工厂内 LED 光辐射产品出光面与栽培面的距离，单位为 m。

注：栽培面是考虑植物高度在内的虚拟平面，并非栽培盖板平面。

3.4

光子；光量子 photon

电磁辐射的量子，被认为是能量为 $h\nu$ 的粒子，其中 h 是普朗克常数， ν 是辐射的频率

注 1：光子是自旋为 1 且静止质量为零的基本粒子。

[来源：IEC 60050-845:2020, 845-21-107]

3.5

光子通量 photon flux

ϕ_p ; ϕ

单位时间内的光子数

$$\phi_p = \frac{dN_p}{dt}$$

式中， N_p 为发射、传输或接收的光子数， t 为时间。

注 1：单色辐射光子通量 ϕ_p 与辐射通量 ϕ_e 的关系为 $\phi_p = \frac{\phi_e}{h\nu}$ ，式中 h 为普朗克常数 $((6.6260755 \pm 0.0000040) \times 10^{-34} \text{ J s})$ ， ν 为相应的电磁波频率。

注2: 光谱分布为 $\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$ 或 $\frac{d\Phi_e(\nu)}{d\nu}$ 的辐射束的光子通量为 $\Phi_p = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} \cdot \frac{\lambda}{hc_0} d\lambda = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{d\Phi_e(\nu)}{d\nu} \cdot \frac{1}{h\nu} d\nu$, 式中, h 为普朗克常数 (6.6260755 ± 0.0000040) × 10⁻³⁴ J s), c_0 为真空中的光速 (299792458 m s⁻¹)。

注3: 相应的辐射度量为“辐射通量”, 相应的光度量量为“光通量”。

注4: 光子通量的单位为s⁻¹。

注5: 园艺领域光子通量的单位通常表示为 μmol · s⁻¹, 其数值为光子通量 Φ_p 除以阿伏伽德罗常数 N_A (6.022 140 76 × 10²³ mol⁻¹) 并乘以 10⁶。

注6: 光子通量可用于定义特定波长范围的光子通量, 例如光生物有效光子通量 (波长范围 280 nm ~ 800 nm)、光合有效光子通量 (波长范围 400 nm ~ 700 nm)、紫外光子通量 (波长范围 280 nm ~ 400 nm)、蓝光光子通量 (波长范围 400 nm ~ 500 nm)、绿光光子通量 (波长范围 500 nm ~ 600 nm)、红光光子通量 (波长范围 600 nm ~ 700 nm)、远红光子通量 (波长范围 700 nm ~ 800 nm)。

[来源: IEC 60050-845:2020, 845-21-040, 有修改]

3.6

光子通量密度 photon flux density (PFD)

光子辐射照度 photon irradiance

E_p ; E

相对于真实平面或虚拟平面上某点处面积的入射光子通量的密度

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

式中, Φ_p 为光子通量, A 为光子通量的入射面积。

注1: 相应的辐射量为“辐照度”, 相应的光度量量为“照度”。

注2: 光子通量密度的单位为 s⁻¹ m⁻²。

注3: 园艺领域光子通量密度的单位通常表示为 μmol · s⁻¹ m⁻², 其数值为光子通量密度 E_p 除以阿伏伽德罗常数 N_A (6.022 140 76 × 10²³ mol⁻¹) 并乘以 10⁶。

注4: 光子通量密度可用于定义特定波长范围的光子通量密度, 例如光生物有效光子通量密度 (波长范围 280 nm ~ 800 nm)、光合有效光子通量密度 (波长范围 400 nm ~ 700 nm)、紫外光子通量密度 (波长范围 280 nm ~ 400 nm)、蓝光光子通量密度 (波长范围 400 nm ~ 500 nm)、绿光光子通量密度 (波长范围 500 nm ~ 600 nm)、红光光子通量密度 (波长范围 600 nm ~ 700 nm)、远红光子通量密度 (波长范围 700 nm ~ 800 nm)。

[来源: IEC 60050-845:2020, 845-21-058, 有修改]

3.7

平均光子通量密度 average photon flux density

$E_{p,av}$

给定平面上各点光子通量密度的平均值。

注: 平均光子通量密度可用于定义特定波长范围的平均光子通量密度, 例如光生物有效平均光子通量密度 (波长范围 280 nm ~ 800 nm)、光合有效平均光子通量密度 (波长范围 400 nm ~ 700 nm)、紫外平均光子通量密度 (波长范围 280 nm ~ 400 nm)、蓝光平均光子通量密度 (波长范围 400 nm ~ 500 nm)、绿光平均光子通量密度 (波长范围 500 nm ~ 600 nm)、红光平均光子通量密度 (波长范围 600 nm ~ 700 nm)、远红平均光子通量密度 (波长范围 700 nm ~ 800 nm)。

3.8

光子通量密度均匀度 photon flux density uniformity

给定平面上的最小光子通量密度与平均光子通量密度之比。

注1: 光子通量密度均匀度为无量纲量, 最大值为 1。

注2: 光子通量密度均匀度可用于定义特定波长范围的光子通量密度均匀度, 例如光生物有效光子通量密度均匀度 (波长范围 280 nm ~ 800 nm)、光合有效光子通量密度均匀度 (波长范围 400 nm ~ 700 nm)、紫外光子通量密度均匀度 (波长范围 280 nm ~ 400 nm)、蓝光光子通量密度均匀度 (波长范围 400 nm ~ 500 nm)、绿光光子通量密度均匀度 (波长范围 500 nm ~ 600 nm)、红光光子通量密度均匀度 (波长范围 600 nm ~ 700 nm)、远红光子通量密度均匀度 (波长范围 700 nm ~ 800 nm)。

(波长范围 500 nm ~ 600 nm)、红光光子通量密度均匀度(波长范围 600 nm ~ 700 nm)、远红光光子通量密度均匀度(波长范围 700 nm ~ 800 nm)。

3.9

光子通量密度差异 diversity of photon flux density

给定平面上的最小光子通量密度与最大光子通量密度之比。

注 1: 光子通量密度差异为无量纲量, 最大值为 1。

注 2: 光子通量密度差异可用于定义特定波长范围的光子通量密度差异, 例如光生物有效光子通量密度差异(波长范围 280 nm ~ 800 nm)、光合有效光子通量密度差异(波长范围 400 nm ~ 700 nm)、紫外光子通量密度差异(波长范围 280 nm ~ 400 nm)、蓝光光子通量密度差异(波长范围 400 nm ~ 500 nm)、绿光光子通量密度差异(波长范围 500 nm ~ 600 nm)、红光光子通量密度差异(波长范围 600 nm ~ 700 nm)、远红光光子通量密度差异(波长范围 700 nm ~ 800 nm)。

3.10

光谱分布 spectral distribution

光谱密集度 spectral concentration

X_λ

在波长 λ 处, 辐射量、光度量或光子量 $X(\lambda)$ 相对于波长 λ 的密度。

$$X_\lambda = \frac{dX(\lambda)}{d\lambda}$$

注 1: 通常, X_λ 也是 λ 的函数, 在这种情况下可用 $X_\lambda(\lambda)$ 表示。

注 2: 辐射通量光谱分布的单位表示为 W nm^{-1} , 光通量光谱分布的单位表示为 lm nm^{-1} , 光子通量光谱分布的单位表示为 nm^{-1} , 其他量的光谱分布的单位做同样处理。

注 3: 园艺领域光子通量光谱分布的单位通常表示为 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \text{nm}^{-1}$ 。

注 4: X 也可以表示为频率 ν 、波长 σ 等的函数, 相应的对应于频率 ν 、波长 σ 等的密度表示为 X_ν 、 X_σ 等, 相应的单位对应调整。

[来源: IEC 60050-845:2020, 845-21-029, 有修改]

3.11

照明功率密度 lighting power density

LPD

单位面积上照明实际消耗的功率(包括光源、镇流器或变压器等), 单位为瓦特每平方米 (W/m^2)。

[来源: GB/T 5700-2008, 3.11]

3.12

额定值 rated value

用于规范目的的特征值, 该值由生产者或责任销售商宣称并基于标准测试条件。

注 1: 当用于表述特定量的额定值时, 将术语中“值”替换为具体的量, 例如额定功率、额定电压、额定电流、额定温度。

注 2: 标准测试条件在相关标准中给出。

[来源: IEC 60050-845:2020, 845-27-100]

3.13

初始值 initial value

老炼和稳定时间结束后所测得的特征值。

注 1: 初始值可用于光度、色度或电参数量。

注 2: 初始值可用于产品或安装场景, 例如初始光子通量、初始平均光子通量密度、初始光谱分布。

注 3: 本文件中初始值所对应老炼时间为 0 h。

[来源: IEC 60050-845:2020, 845-27-107, 有修改]

3.14

维持值 maintained value

指定燃点时间和稳定时间后所测得的特征值。

注1：维持值可用于光度、色度或电参数量。

注2：维持值可用于产品或安装场景，例如为光子通量维持值、平均光子通量密度维持值、光谱分布维持值。

[来源：IEC 60050-845:2020, 845-27-113, 有修改]

3.15

维持率 maintenance factor

维持值与初始值的比率。

注1：维持率考虑了由于辐射源表面灰尘、发光罩退化、光源光子通量衰减等导致的各类光辐射损失。

注2：维持率可用于产品或安装场景，例如为光子通量维持率、平均光子通量密度维持率、光谱分布维持率。

注3：维持率为无量纲值。

4 光子通量密度要求

4.1 一般说明

植物工厂栽培面光子通量密度相关指标应符合 4.2 和 4.3 的要求。

应针对光生物有效、光合有效、紫外、蓝光、绿光、红光、远红波长范围开展符合性测试和评估。

应在 1 000 h、3 000 h、6 000 h、10 000h、17 500 h、25 000 h、36 000 h、50 000 h 燃点时间开展光子通量密度维持特性符合性测试和评估，燃点时间以产品的平均光子通量密度维持率衰减至 90%为上限，且不超过 50 000 h。

当光子通量、安装高度可调时，应在各典型调节状态下做符合性测试和评估。

4.2 初始光子通量密度指标要求

4.2.1 初始平均光子通量密度要求

植物工厂栽培面初始平均光子通量密度应不低于设计值。

4.2.2 初始光子通量密度均匀度要求

植物工厂栽培面初始光子通量密度均匀度应不低于0.8。

4.2.3 初始光子通量密度差异要求

植物工厂栽培面初始光子通量密度差异应优于0.7。

4.3 光子通量密度维持率指标要求

4.3.1 平均光子通量密度维持率要求

栽培面上平均光子通量密度维持率衰减至 90%时，植物工厂内 LED 光辐射产品的燃点时间应符合表 1 的要求。

表1 平均光子通量密度维持率衰减至 90%的时间要求

平均光子通量密度维持特性等级	1	2	3
平均光子通量密度维持率衰减至 90% 的时间 (h)	$\geq 36\ 000$ 且 $< 50\ 000$	$\geq 25\ 000$ 且 $< 36\ 000$	$\geq 17\ 500$ 且 $< 25\ 000$
注：对各波长区域光子通量密度维持率的要求可同时表征产品内不同颜色 LED 器件的衰减差异性情况。			

4.3.2 光子通量密度均匀度维持特性

植物工厂用LED光辐射产品燃点使用过程中，栽培面上光子通量密度均匀度不应降低。

4.3.3 光子通量密度差异维持特性

植物工厂用LED光辐射产品燃点使用过程中，栽培面上光子通量密度差异不应降低。

5 照明功率密度要求

植物工厂栽培面照明功率密度应不超过所宣称设计值。

6 测试方法和符合性验证方法

6.1 光子通量密度及其分布测试方法

按照附录A的规定测试植物工厂栽培面测试位置点的光子通量密度、栽培面光子通量密度分布。

6.2 初始光子通量密度指标符合性验证方法（4.2）

对新安装LED光辐射产品按照附录A的要求测试初始光子通量密度分布，按照测试结果计算各波长范围平均光子通量密度、光子通量密度均匀度、光子通量密度差异，并验证符合性。

可直接测试各波长范围的初始光子通量密度分布，进而计算对应各波长范围的平均光子通量密度、光子通量密度均匀度、光子通量密度差异，并验证符合性。也可以采用其他等效方法，例如测试特定波长范围的初始光子通量密度分布、典型栽培面区域内各测试点的光谱分布，计算特定波长范围的平均光子通量密度、光子通量密度均匀度、光子通量密度差异，并结合各测试点的光谱分布验证各波长范围的符合性。

应分别记录典型栽培面区域各子区域的平均光子通量密度、光子通量密度均匀度、光子通量密度差异，以及总体栽培区域的平均光子通量密度、光子通量密度均匀度、光子通量密度差异。

应按照总体栽培区域的平均光子通量密度、光子通量密度均匀度和光子通量密度差异验证符合性。

6.3 光子通量密度维持率指标符合性验证方法（4.3）

在LED光辐射产品燃点指定时间后，按照附录A的要求测试初始光子通量密度分布，按照测试结果计算平均光子通量密度、光子通量密度均匀度、光子通量密度差异，并验证符合性。

在规定燃点时间后，可直接测试各波长范围的光子通量密度分布，进而计算对应各波长范围的平均光子通量密度维持率、光子通量密度均匀度维持率、光子通量密度差异维持率，并验证符合性；也可以采用其他等效方法，例如，在规定燃点时间后，测试特定波长范围的光子通量密度分布、典型栽培面区域内各测试点的光谱分布，计算特定波长范围的平均光子通量密度维持率、光子通量密度均匀度维持率、光子通量密度差异维持率，并结合各测试点的光谱分布验证各波长范围的符合性。

6.4 照明功率密度符合性验证方法（5）

测试单灯LED光辐射产品的功率，结合植物工厂LED光辐射产品安装布灯方式，计算典型栽培面区域LED光辐射产品安装数量，或直接测试典型栽培面区域所有灯LED光辐射产品的总功率，按照公式1计算照明功率密度，并验证符合性。

$$LPD = \frac{\sum_1^n P_n}{S} \quad (1)$$

式中S为典型栽培面的面积（m²），P_n为典型栽培面所对应安装LED光辐射产品的功率（W）。

中国照明电器协会团体标准

附 录 A
(规范性)
光子通量密度及其分布的测试方法

A.1 测试条件

A.1.1 测试场景及环境条件要求

测试在植物工厂现场进行, 应尽量避免意外干扰光情况。

测试环境条件要求如下:

- 环境温度 $24\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 环境相对湿度50% RH ~ 80% RH;

A.1.2 LED光辐射产品状态要求

按照测试目的, 对新安装LED光辐射产品进行测试, 或使用规定时间后进行测试。测试宜在额定输入条件下进行。

测试应在LED光辐射产品燃点30 min后进行。

A.2 测量仪器

A.2.1 一般说明

测试应采用符合A.2.2规定的光谱辐射计, 或符合A.2.3规定的光子辐照度计。

A.2.2 光谱辐射计要求

所采用光谱辐射计应满足以下要求:

- a) 波长范围应至少覆盖拟测试波长范围;
- b) 测量重复性优于0.5%;
- c) 波长准确度优于0.5 nm;
- d) 光谱带宽 $\leq 12\text{ nm}$;
- e) 光谱测量间隔 $\leq 5\text{ nm}$;
- f) 量值溯源至国家计量机构。

A.2.3 光子辐照度计要求

所采用光子辐照度计应满足以下要求:

- a) 波长范围与拟测试波长范围一致;
- b) 余弦特性(方向性响应)误差 $\leq 4\%$;
- c) 测量重复性优于0.5%;
- d) 量值溯源至国家计量机构, 建议使用与被测光源具有相似光谱功率分布的标准灯进行校准。

A.3 测试方法

A.3.1 光子通量密度测试方法

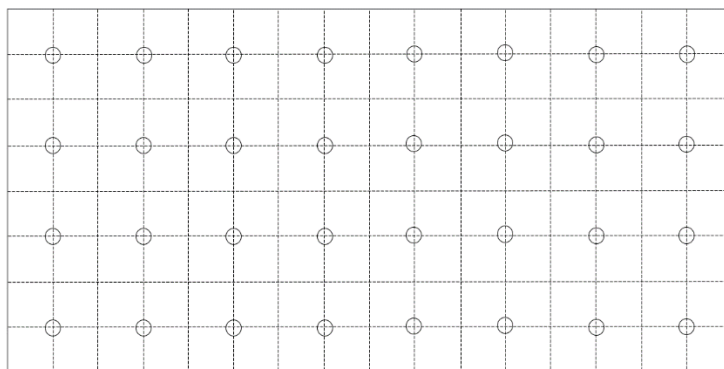
将符合A.2要求的测量仪器置于栽培面测试位置点测试光子通量密度。

测试过程中应将仪器的测试探头信号接收平面与栽培面在同一平面上。

A.3.2 光子通量密度分布测试方法

按照A.3.3的要求选取典型栽培面区域。

对所选取典型栽培面区域，按照15 cm间距进行布点，示意图A.1，图中“○”代表布点位置。



图A.1 典型栽培面上光子通量密度分布布点示意图

在各布点位置按照A.3.1的要求测试各位置点光子通量密度，进而得到典型栽培面区域光子通量密度分布。

对于典型栽培面区域由多个子区域组成的形况，应分别测试各子区域光子通量密度分布。

A.3.3 光子通量密度分布测试典型栽培面区域的选取

A.3.3.1 一般说明

选取光子通量密度分布测试的典型栽培面区域，应充分考虑以下因素：

- 长条形栽培架同一层面上栽培架两端和中间部分之间的光子通量密度差异；
- 植物工厂外围栽培架（或栽培区域）和植物工厂中间栽培架（或栽培区域）之间的光子通量密度差异。

A.3.3.2 选择方法

应按照以下步骤选择测试光子通量密度分布的典型栽培面区域及其子区域。

步骤1：综合考虑植物工厂内栽培架排布、栽培区域分布等情况，选取植物工厂外围栽培架A（或栽培区域A）和植物工厂内紧邻其他栽培架的栽培架B（或栽培区域B）；

步骤2：分别在选区A和选区B选择端区子区域A1、B1，和中间区子区域A2、B2；

步骤3：测试光子通量密度分布用典型栽培面区域至少由A1、A2、B1、B2四个子区域构成。

参 考 文 献

- [1] GB/T 5700—2008 照明测量方法
- [2] GB/T 32655—2016 植物生长用 LED 光照 术语和定义
- [3] IEC 60050-845:2020 International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 845: Lighting

中国照明电器协会团体标准