



团 体 标 准

T/CSA 058-2019

人工光叶菜生产用 LED 光照系统一般技术要求

General Technical Requirements of LED Lighting System for

Leafy Vegetable Production with Artificial Light

版本：V01.00

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 录

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 按控制类型.....	3
4.2 按叶菜生长期.....	3
5 技术要求.....	3
5.1 光照产品要求.....	3
5.2 光照系统要求.....	5
5.3 控制系统要求.....	6
5.4 灯具安装要求.....	6
6 检验方法.....	7
6.1 试验条件.....	7
6.2 光照产品.....	7
6.3 光照系统.....	9
附录 A（资料性附录）人工光叶菜生产一般管理措施及光需求特征.....	11

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 的规则起草。

人工光植物工厂作为设施园艺的高级发展阶段，被认为是 21 世纪农业取得革命性突破的重要手段之一。以 LED 作为光照的人工光植物工厂在叶菜生产方面逐渐形成市场规模。希望《人工光叶菜生产用 LED 光照系统一般技术要求》标准的制定能够推动半导体照明产业和设施农业的融合，服务于市场应用，引导产业健康发展。

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：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、易美芯光（北京）科技有限公司、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、广州市莱帝亚照明股份有限公司、鸿利智汇集团股份有限公司、福建鸿博光电科技有限公司、杭州华普永明光电股份有限公司、厦门信达光电物联科技研究院有限公司、佛山市国星光电股份有限公司、北京大学东莞光电研究院、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：李涛、徐虹、杨其长、孙国喜、卓越、张俊斌、李倩、吕鹤男、吕天刚、赵利民、黄建明、陈友三、李宏浩、王永志、徐浩。

人工光叶菜生产用 LED 光照系统一般技术要求

1 范围

本技术要求规定了基于人工光条件下叶菜生产用 LED 光照系统的一般技术要求,包括分类、技术要求和测试方法。

本技术要求仅适用于光谱范围为 320nm-800nm 的人工光、可控环境、无土栽培叶菜生产使用的 LED 光照系统;人工光叶菜生产一般管理措施及光需求特征具体参见附录 A;人工光环境下的其他植物生长可参考使用。

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 2423.3—2016 环境试验 第 2 部分: 试验方法试验 Cab: 恒定湿热试验
- GB/T 2900.65—2004 电工术语 照明
- GB 7000.1—2015 灯具 第 1 部分: 一般要求与试验
- GB 7000.201—2008 灯具 第 2-1 部分: 特殊要求 固定式通用灯具
- GB/T 9468—2008 灯具分布光度测量的一般要求
- 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 $\leq 16A$)
- 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 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
- SJ/T 11364—2014 电子电气产品有害物质限制使用标识要求
- T/CSA 021—2013 植物生长用 LED 平板灯性能要求
- T/CSA 032 植物光照用 LED 灯具通用技术规范

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

叶菜 leafy vegetable

以叶片、叶柄和嫩茎为产品的蔬菜。

3.2

人工光 artificial light

由人工制造的装置产生的光辐射，如 LED、荧光灯光源产生的光辐射。

[GB/T 32655—2016，术语和定义 2.1.2]

3.3

人工光栽培 cultivation with artificial light

植物生长所需的光完全来源于人工光的生产方式。

注：不包含自然光条件下的人工补光生产。

3.4

LED 光照系统 LED lighting system

以 LED 产生光辐射，并应用于叶菜生长的系统。

3.5

光配方 light recipe

根据不同叶菜品种的生长特性，确定的光子通量密度、光谱分布、光周期、光的空间分布参数的组合。

3.6

光子通量密度 photon flux density

PFD

单位时间单位面积上能为植物生长所利用的光量子数。

单位为：微摩尔每秒平方米($\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)。

注：光谱范围为 320 nm -800 nm。

3.7

光子通量效率 photon flux efficacy

PFE

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。

单位为：微摩尔每焦 ($\mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$)。

3.8

光周期 photoperiod

生物体所面临的白昼与黑夜相互交替的自然周期或人工周期。

注：本标准要求中的光周期为日周期，即 24h。

[修改 GB/T 2900.65-2004，定义 845-06-27]

3.9

光照期 light period

昼夜光暗循环中的光照时段。

3.10

黑暗期 dark period

昼夜光暗循环中的黑暗时段。

3.11

种植面 planting surface

栽培槽上方用于种植植物的平面。

3.12

冠面 canopy surface

叶菜定植后各生长阶段冠层表面最高点的水平面。

注：本标准要求中的冠面统一为灯具发光面下垂直距离 10cm 的平面。

3.13

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°以上的散射光通量用于计算雾度）。

3.14

抗冲击性能 shock resistance

LED 灯具结构在受到外力冲击时，其结构最薄弱处的抗冲击防护能力。

3.15

光照系统辐射均匀性 radiation uniformity of lighting system

光照系统水平投影面积上同一高度光子通量密度及光谱分布的一致性。

3.16

电能利用效率 electric utilization efficiency**EUE**

人工光照系统下给定时间段内单位电耗所产生的生物量。

3.17

平均营养值 average nutritive value**ANV**

评价叶菜营养品质的数值，即根据叶菜单位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，并按其重要性乘以相应的权重求和得出的数值。

4 分类

4.1 按控制类型

按控制类型，人工光叶菜生产用 LED 光照系统分为可调光、不可调光。其中可调的光参数包括光子通量密度、光周期、光谱分布等。

4.2 按叶菜生长期

按照叶菜生长期，可分为苗期和营养生长期。

5 技术要求

5.1 光照产品要求

5.1.1 结构和外观

结构和外观应符合 T/CSA 032 中 5.1 的规定。

5.1.2 电学特性

电学特性应符合 T/CSA 032 中 5.2 的规定。

5.1.3 光学特性

光学特性（或辐射学特性）：

- a) 总辐射光子通量实测值不低于标称值 90%；
- b) 灯具发光面雾度宜不低于 30%；
- c) 光子通量效率不低于 $1.91 \mu\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$ 。

注：光谱范围为 320 nm~800 nm。

5.1.4 环境适应性

LED 灯具应能在温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不高于 90%的环境下正常工作。

5.1.5 寿命与光子通量维持率

寿命与光子通量维持率应符合以下要求：

- a) 灯具产品的光子通量维持率在燃点 36000 hrs 后应不低于其初始值的 90%；
- b) 灯具通过 15000 次的开关试验后，应仍能正常工作。

5.1.6 外壳防护性能

外壳防护性能应符合以下要求：

- a) 防护等级宜达到 IP54 的要求，在有淋水的环境中应满足 IP65 的防护等级；
- b) 抗冲击性能应满足 GB 7000.1—2015 中 4.13 的要求；
- c) 灯具防腐等级应达到 JB/T 9536—2013 规定的 F2 要求。

5.1.7 安全要求

LED 灯具应符合 GB 7000.1—2015 及与其类型相对应的 GB 7000 系列标准中的特殊要求。

5.1.8 电磁兼容性能

灯具的电磁兼容性能应符合以下要求：

- a) 无线电骚扰特性应符合 GB/T 17743 的规定；
- b) 输入电流谐波应符合 GB 17625.1 的规定；
- c) 电磁兼容抗扰度应符合 GB/T 18595 的规定。

5.1.9 信息披露要求

产品必须在产品本体/铭牌/标签/说明书上提供如下信息：

- a) 总辐射通量；
- b) 辐射强度分布数据（配光曲线）；
- c) 辐射光谱分布曲线，并标明主要波段峰值长；
- d) 根据 SJ/T 11364—2014，标注电子电气产品有害物质限制使用标志，并在适用时提供产品中有害物质的名称及含量；
- e) 外壳防护等级、防腐等级；
- f) 使用寿命。

5.2 光照系统要求

5.2.1 光配方要求

5.2.1.1 光子通量密度（PFD）

叶菜冠面高度 PFD 宜为 $100\sim 350\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ （注：苗期 PFD 要求稍低，建议 $100\sim 150\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ，营养生长期 PFD 可提升至 $150\sim 350\ \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ ）。

5.2.1.2 光周期

在光照期的调控范围内，设置光照期/黑暗期的时间比例宜为 1/1~5/1。

5.2.1.3 光谱分布

光谱分布应包含蓝光波段（B）和红光波段（R）；宜包含近紫外波段（UVA）、绿光波段（G）、远红光波段（FR）。在本技术要求中，各波段光谱范围及典型峰值波长范围见表 1：

表1 各波段光谱范围及典型峰值波长范围

波段	光谱范围 nm	典型峰值波长范围 nm
UVA	320 ~ 400	360 ~ 400
B	400 ~ 500	440 ~ 470
G	500 ~ 600	520 ~ 540
R	600 ~ 700	640 ~ 670
FR	700 ~ 800	730 ~ 750

5.2.2 辐射均匀度要求

5.2.2.1 PFD 空间分布均匀度

冠面上的 PFD 空间分布均匀度 $u(p)$ 不低于 70%。

5.2.2.2 空间光谱均匀性

对于单色植物光照用 LED 系统无需考察空间光谱均匀性；

对于白光或多色混合的LED植物光照系统，冠面的空间光谱均匀性 $U_{R/B}$ 不低于80%。

5.3 控制系统要求

5.3.1 系统功能要求

系统运行的控制功能应包含以下内容：

- a) 实时开灯、关灯；
- b) 实时调光（调整光配方参数）；
- c) 设置灯的默认/计划开灯时间、关灯时间；
- d) 设置灯默认/计划的光谱输出比例；
- e) 设置灯默认/计划的光子通量密度；
- f) 故障报警。

5.3.2 控制参数要求

5.3.2.1 PFD 调控范围

冠面上的PFD调控范围宜在 $100\sim 350 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可以是分段调控，也可以是无级连续调控， PFD_{\min} ($100 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) \sim PFD_{\max} ($350 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$)。

5.3.2.2 光周期调控范围

建议光照期的调控范围为720~1200 min；相对应的黑暗期调控范围为720~240 min；控制设置的光照期最小值为720 min，最大值为1200 min；光照期+黑暗期=1440 min（即24h）。

5.3.3 控制系统精度

人工光叶菜生产用LED灯具的控制系统要求对PFD、光谱、光周期分别进行独立及组合的设定和调控，经过分段或无级调控过程并处于稳定运行状态时，在冠面上测得的控制参数与设定值的偏差范围规定如下：

- a) PFD控制在稳定运行状态时的实测值相对于设定值的偏差不大于10%；
- b) 光谱控制：在稳定运行状态时，各波段的峰值波长偏差范围；

$$\Delta \lambda \leq \pm 5 \text{ nm}$$
- c) 光周期控制计时器的实时计时精度。

$$\Delta T \leq 2 \text{ s}$$

5.4 灯具安装要求

不论何种形态灯具（线性、面板、模组），建议安装时宜满足以下要求。

- a) 灯具发光面与种植面的垂直距离
苗期不宜低于15 cm；营养生长期不宜低于30 cm；
- b) 灯具发光面与叶菜冠面的垂直距离
不宜低于10 cm；

c) 灯具连接方式

灯具与其驱动控制和通讯装置连接时需同时满足安全性和防护性的要求,系统连接的防护性应达到IP65防护性的要求,公母头对接,即插即用,所输出到灯具的电压应为DC 48V以下,耐压在2000V以上,接地电阻不大于4Ω。

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的相关规定。

6.2 光照产品

6.2.1 结构和外观

采用目视法检验。

6.2.2 光电特性

6.2.2.1 电学特性

在额定条件下正常(热)稳定工作时,按照GB/T 24824—2009中5.1的方法进行检测。

6.2.2.2 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)积分计算可得光子通量,计算的光谱范围为320 nm-800 nm。

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

式中:

h—普朗克常数;

c—光速;

λ—波长;

N_A—阿伏伽德罗常数;

N_p—光子个数;

Φ_{eλ}—总光谱辐射通量;

t—时间。

6.2.2.3 配光曲线

配光曲线测试参考GB/T 9468—2008进行,并使用测量波段覆盖被测LED灯具的辐照度计或光谱辐射计替换GB/T 9468—2008规定的光度计;使用辐照度计时,光谱辐照度计的光谱响应度应与光量子系统的加权函数相匹配,使用具有反射镜的分布光度计应将反射镜的光谱反射率计入探测系统光谱响应度的部分。

6.2.2.4 光子通量效率

按公式（1）计算光子通量，并除以灯具的电输入功率来计算光子通量效率。

6.2.2.5 发光面雾度

测试方法依照 GB/T 2410—2008的方法进行。

6.2.3 环境适应性

6.2.3.1 恒定湿热试验

依照GB/T 33721—2017规定，在高湿度条件下使用的LED灯具应满足恒定湿热试验的要求。试验应在试验箱内进行，试验箱应满足GB/T 2423.3—2016中第4章的要求。试验时，应先使试验箱和试验样品处于试验室环境条件下，然后将试验箱内的温度调节到 $37\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，且使样品达到温度稳定。然后在2h内将试验箱内的湿度调节到 $93\pm 3\%$ ，待箱内的温度和湿度达到规定值并且稳定后进行通断电循环，同时开始计算试验持续时间，通断电循环时间为60 min通，60 min断，试验持续时间最短为1000 h。试验期间，如热保护器会以熄灭或减少其光输出的方式进行保护，则将热保护器短路。当规定的试验持续时间结束时，样品应留在试验箱中恢复，先将试验箱内的湿度调节到 $75\pm 2\%$ ，然后在0.5 h内将温度调节到试验室环境温度，且温度容差为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，待箱内的温度和湿度达到恢复条件并稳定后，保持2h。试验后，样品应无明显的损坏，且光子通量变化不超过10%。

6.2.3.2 高低温试验

- a) 温度冲击试验，按照GB/T 33721—2017第8章“温度冲击试验”进行试验；
- b) 高温操作试验，按照GB/T 33721—2017第10章“高温操作试验”进行试验；
- c) 低温启动试验，按照GB/T 33721—2017第11章“低温启动试验”进行试验。

注1：上述三项试验后，总辐射通量变化不应超过10%。

注2：6.2.3.1及6.2.3.2的测试应在同一个样本上进行。

6.2.4 寿命与光子通量维持率

6.2.4.1 光子通量维持率

按照GB/T 33721—2017中第14章的方法进行试验。

6.2.4.2 电源开关试验

开关试验以30s开，30s关为一个开关循环。循环次数为15000次，试验后，样品应无明显的损坏，且灯具还能正常点亮。

6.2.5 外壳防护性能

- a) 灯具的外壳防护等级按 GB 7000.1 中第 9 章的方法进行试验；
- b) 抗冲击性能应满足 GB 7000.1—2015 中 4.13 的方法进行试验；
- c) 灯具防腐等级应达到 JB/T 9536—2013 规定的方法进行试验。

6.2.6 安全性能

安全性能按照GB 7000.1—2015的规定进行试验。

6.2.7 电磁兼容性能

- a) 灯具的输入电流谐波应按照 GB 17625.1 中的方法进行试验；
- b) 灯具无线电骚扰特性应按照 GB/T 17743 中的方法进行试验；
- c) 灯具电磁兼容抗扰度应按照 GB/T 18595 中的方法进行试验。

6.2.8 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，并需要符合5.1.9中d)的要求。

6.3 光照系统

6.3.1 光配方参数

在无环境杂光影响的条件下（如暗室），使用光谱辐射计在距离发光面10 cm的平面上测量光谱辐照度。

- a) 光谱：测得光谱应符合5.2.1.3的要求；
- b) 光子通量密度：根据公式（2）计算光子通量密度：

$$\text{PFD} = \int E_{e\lambda} \lambda / (N_A hc) d\lambda \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$E_{e\lambda}$ —光谱辐照度；

计算得光子通量密度应符合5.2.1.1的要求。

6.3.2 辐射均匀度

6.3.2.1 PFD 空间分布均匀度

在冠面上，依照T/CSA 021—2013中的分隔方式将测量平面平均分隔为9个区域，用光谱辐照度计测量每个区域内中心点位置的光谱辐射照度。当于测量平面上的辐射区域为矩形时，如图1所示，L为辐射区域长度，W为辐射区域宽度。

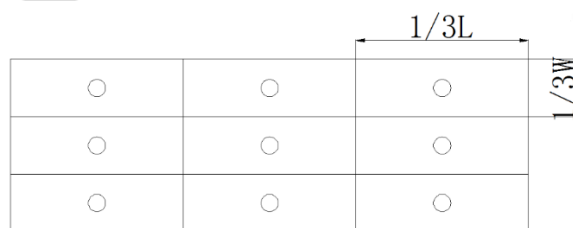


图1 辐射区域分区示意图

按公式（3）计算PFD空间分布均匀度 $u(p)$

$$u(p) = \frac{\text{PFD}_{\min}}{\text{PFD}_{\text{avg}}} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中， PFD_{min} 为9个区域内的中心点上测得的最小光子通量密度； PFD_{avg} 为9个区域内的中心点上测得的光子通量密度算术平均值。

6.3.2.2 空间光谱均匀性

在冠面上，依照T/CSA 021—2013中的分隔方式将测量平面平均分隔为9个区域，用光谱辐射计测量每个区域内中心点位置的光谱分布，并采用公式(4)计算空间光谱均匀性 $U_{R/B}$ 。

$$U_{R/B} = \frac{X_{min}}{\bar{X}} \dots \dots \dots (4)$$

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。

R/B 比的计算表达式为：

$$R/B = \frac{\int_{600}^{700} E_e(\lambda, x, y, z) d\lambda}{\int_{400}^{500} E_e(\lambda, x, y, z) d\lambda} \dots \dots \dots (5)$$

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， z 为冠面到灯具表面的距离。

附录 A (资料性附录)

人工光叶菜生产一般管理措施及光需求特征

A.1 人工光叶菜生产一般栽培管理措施

A.1.1 播种、催芽

播种与催芽要求在相对独立的空间或区域内完成。播种的床板一般由海绵垫和白色塑料泡沫制成，将种子播入海绵垫上的凹处。播种用的海绵垫被平均切割成小立方块。播种后，将吸足营养液的海绵垫苗盘置放在育苗床上，送到催芽室内，通过温、湿度调节催芽2~3天后发芽；催芽室内的环境条件为：无光、恒温（23℃）、恒湿（相对湿度95~100%）。

A.1.2 育苗

出芽后的种苗移到人工光育苗装置中，在全人工光环境下，经过1周左右的时间使其绿化。所谓绿化就是通过光照，促进在暗期发芽的种苗形成叶绿体。再将绿化过的幼苗移植到含有营养液的栽培床中生长。再经过2周左右的时间就可以定植。

A.1.3 定植与栽培

将小植株连同海绵块一同移植到栽培室内进行定植，将小植株定植于栽培板上，在人工光环境下经过3周左右的时间培育，叶菜就可收获。定植密度一般不小于30株/m²。

A.1.4 营养液

营养液是由含各种矿质元素的化合物溶于水配制而成。高等植物正常生长必需有16种元素的合理供给，除碳、氢、氧可从空气和水中获得外，其余13种元素必须通过人为补充来供给。其中包括大量元素氮、磷、钾，中量元素钙、镁、硫，以及微量元素铁、锰、铜、锌、钼、硼和氯等。

a) 组成原则：由于不同作物或同一作物的不同品种需肥情况不同，同一种作物在不同生育期的需肥规律也不一致。因此，以作物需肥规律为中心设计营养液的组成是确立营养液配方的首要原则。另外，需选择合适的化合物种类，以保证营养液中离子的生物有效性、溶液pH的稳定性。最后，从成本上讲，除微量元素以外，其它元素采用组成较为纯净的肥料即可，但必须不含有害物质（有害元素等）。

b) 营养液浓度要求：营养液的总盐分含量应控制在一定的水平，对大多数作物而言，一般需将营养液的总盐分浓度控制在4‰~5‰。具体的作物应根据其需肥规律具体分析。电导度（EC）是表示溶液中离子浓度的重要指标，可用来检测营养液的盐类变化情况。绝大多数营养液栽培均采用EC作为营养液总盐分管理的指标。

c) 营养液的pH要求：pH表示的是水（溶液）中的酸碱度，是指溶液中氢离子（H⁺）或氢氧根离子（OH⁻）浓度（以mol/L表示）的多少。营养液的pH维持在5.5~6.5之间有利于多数植物的生长，因此营养液的工作溶液一般要进行pH调节。

d) **营养液调节与控制**：重点涉及EC、pH、溶解氧、液温等四个要素（见表A.1）。

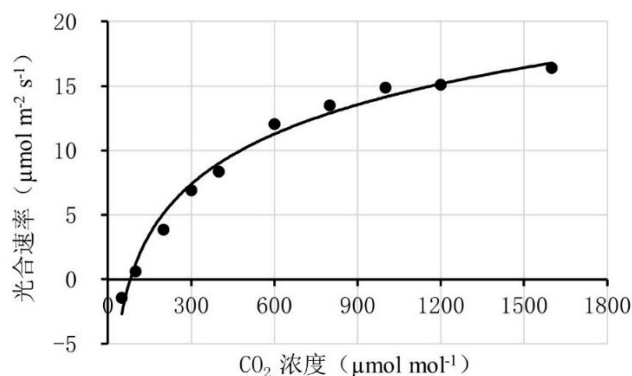
表A.1 营养液调节与控制重点

项目	管理要点
pH	pH 值通常要保持在 5.5~6.5 范围内，该范围内养分的有效性最高，适用于多种作物； pH 的调整通过营养液配方来选定，每一次调整变化的幅度不要超过 0.5。
电导度 EC	要用 EC 计来测定或自动在线检测与控制； 定期分析、化验原水和营养液，检测肥料中各种成分状况； 1.5~2.0 mS/cm：这一指标表明根系发育与养分吸收状况良好，适宜于育苗时和定植后生长初期以及水分蒸发量多的高温期； 2.0~2.5 mS/cm：这是一般性的使用浓度，不同的作物之间会有细微的差异； 2.5~4.5 mS/cm：这个指标适宜于控制生育和水分等特殊的目的。
营养液温 度	不同的作物由于对养分、水分的吸收状况不尽相同，对营养液温度的要求也有细微差异，一般情况下，适宜的液温应保持在 18~22℃； 液温低时（12℃以下）养分溶解度降低，根系生理活性减弱，容易出现磷、镁、钙缺乏症； 液温高时（25℃以上）容易出现根腐病，导致长势和品质下降。
溶解氧	营养液中的溶解氧应保持 4~5mg/L 以上，避免缺氧烂根。
营养液供 给	供液调节与控制必须与水分蒸发量、液温、EC、pH、溶解氧含量以及栽培系统等因素协调起来，特别是根圈营养液浓度、pH 与供液管理水平状况之间关系很大。

e) **通风要求**：目前植物工厂通风模式主要有空调循环式壁面通风口送风和管道送风，由于栽培架、光源、管路等硬件设施和植物本身的影响，气流在植物周围形成绕流，植物冠层气流速度小，影响植物正常生长。基于前人的研究结果，全人工光可控环境下植物生长适宜气流速度为0.3~1.0 m/s。

A.2 全人工光叶菜生产一般环境条件

为正确评价LED光照对可控环境下叶菜的生产效果，需明确叶菜生长的一般环境条件。绝大部分叶菜正常生长的适宜温度范围为20~25℃；空气相对湿度范围为60~80%。图A.1为奶油生菜叶片光合作用CO₂响应示意图。如图所示，在PPFD为200 μmol s⁻¹m⁻²，叶片温度为22℃环境条件下，叶片光合速率随着CO₂浓度升高呈饱和趋势，当CO₂浓度大于1000 μmol mol⁻¹时光合速率不再随着CO₂浓度升高而升高，因此人工光叶菜生产CO₂浓度建议为400~1000 μmol mol⁻¹。



图A.1 奶油生菜叶片光合作用CO₂响应曲线

(图中实心圆点代表实测光合速率值, 实线为拟合曲线。测试环境条件设置: 叶温22°C, PPFD 200 μmol s⁻¹m⁻²。)

A.3 人工光叶菜生产常用栽培模式

A.3.1 深液流栽培 (Deep Flow Technique, DFT)

深液流栽培是一种营养液循环流动且营养液层较深的水培方法, 营养液液层深度约为4~10cm。这种栽培模式由于营养液的液层较深, 根系伸展在较深的液层中, 每株占有的液量较多, 因此, 营养液浓度、溶解氧、酸碱度、温度以及水分存量都不易发生急剧变动, 为根系提供了一个比较稳定的生长环境。营养液的循环流动, 以增加营养液的溶解氧以及消除根表有害的代谢产物的局部累积, 消除根表与根外营养液和养分浓度差, 更充分地满足植物的需要。

A.3.2 营养液膜技术 (Nutrient Film Technique, NFT)

营养液膜技术是一种将植物种植在浅层流动的营养液中的水培方法。营养液膜技术不用固体基质, 在要求一定坡降(1:75左右)的倾斜种植槽中, 营养液仅以数毫米深的薄层流经作物根系, 作物根系一部分浸在浅层流动的营养液中, 另一部分则暴露于种植槽内的湿气中, 可较好地解决根系呼吸对氧的需求。根据营养液液层的深浅不同分为多种类型, 其中包括以1~2cm左右的浅层流动营养液来种植植物的营养液膜技术。

A.3.3 浮板毛管水培 (Floating Capillary Hydroponics, FCH)

浮板毛管水培在较深的营养液液层(约5~6cm)中放置一块上铺无纺布的泡沫塑料, 根系生长在湿润的无纺布上的浮板毛管水培技术。浮板毛管法有效地克服了NFT的缺点, 作物根际环境条件稳定, 液温变化小, 根际供氧充分, 不怕因临时停电而影响营养液的供给。

A.3.4 气雾培 (Mist Culture)

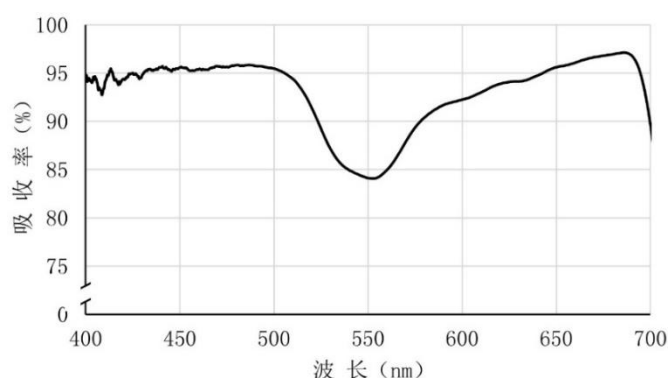
气雾栽培是一种新型的栽培方式, 它是利用经过过滤处理的压力水源通过雾化喷头等专业喷雾喷头将营养液雾化为小雾滴状, 直接喷射到植物根系以提供植物生长所需的水分和养分的一种无土栽培技术。

A.3.5 基质培 (Substrate Culture)

基质培是用固体基质（介质）固定植物根系，并通过基质吸收营养液和氧的一种无土栽培方式。基质种类很多，常用的无机基质有蛭石、珍珠岩、岩棉、沙、聚氨酯等；有机基质有泥炭、稻壳炭、树皮等。因此基质栽培又分为岩棉栽培、沙培等。采用滴灌法供给营养液。其优点是设备较简单、生产成本较低等。但需基质多，连作的陈基质易带病菌，传病。

A. 4 典型叶菜光吸收率光谱图

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。

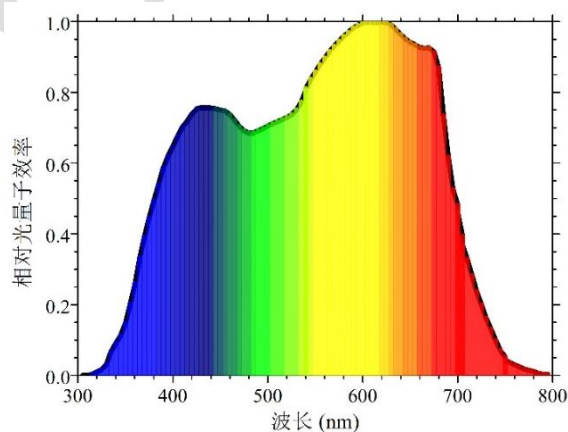


图A.2 ‘特波斯Tiberius’生菜叶片光吸收率光谱图(平均光吸收率为92%)

A. 5 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600~700 nm的红光波段，另一个在波长为420~470 nm的蓝光波段。

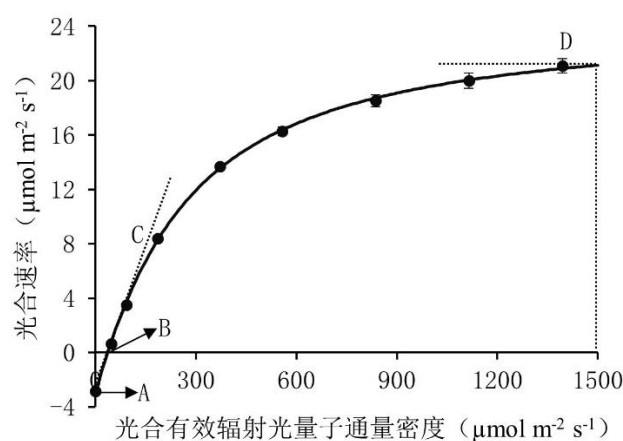
McCree等于1972年通过测定22种常见的植物在生长室以及大田中不同光照条件下的光合作用，并进行了光合速率对光谱的响应分析，提出植物光合作用在蓝光和红光波段的光量子效率最高（如图A.3所示）。因此，人们广泛认同红光和蓝光是植物光合作用的主要光谱，目前不同比例的红蓝光是全人工光植物生产的主要光谱。



图A.3 植物叶片光合作用光量子效率光谱响应曲线

A.6 典型叶菜叶片光合速率光子通量密度响应曲线

光合作用速率是单位光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速率光子通量密度（即光强）响应示意图。如图 A.4 所示，叶片光合速率光子通量密度响应曲线有几个重要的节点。在光合有效辐射为 $0 \mu\text{mol s}^{-1}\text{m}^{-2}$ 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；当光子通量密度增加到某一点后，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子通量密度增加而升高。在此阶段，光合速率与光子通量密度呈线性关系（C），其斜率表示光合作用光能利用效率。在整个光合作用速率光子通量密度响应曲线中，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子通量密度。当光子通量密度升高到一定强度时，叶片光合速率升高减缓直至保持平稳，即光合速率达到最大值，而该点称为光饱和点（D），引起光合速率饱和点的光子通量密度为饱和光强。



图A.4 ‘特波斯Tiberius’生菜叶片光合速率光子通量密度响应曲线

(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子通量密度响应数值)

A.7 人工光叶菜生产 LED 光照系统效果评价方法

同一品种在同一种植环境下，可采用以下指标对LED光照系统进行评定。

1) 电能利用效率(EUE)

根据定植后至采收期间单位栽培面积上叶菜生物量与LED光照系统电耗的比值评价叶菜生产LED光照系统电能利用效率：

$$\text{EUE} (\text{g} \cdot \text{J}^{-1}) = \text{FW} (\text{g}) / \text{E} (\text{J})$$

生物量(FW)定义为单位面积上定植至采收阶段叶菜总鲜重；电能(E)定义为单位面积上定植至采收阶段LED光照系统的累积电耗。

2) 平均营养值 (ANV)

根据各类叶菜每100 g可食部分中，所含蛋白质（Pr）、纤维素（Cel）、钙（Ca）、铁（Fe）、胡萝卜素（Car）和维生素C（Vc）6种主要成分的量，按下式计算出得分结果：

$$ANV = \text{Pr (g)}/5 + \text{Cel (g)} + \text{Ca (mg)}/100 + \text{Fe (mg)}/2 + \text{Car (mg)} + \text{Vc (mg)}/40$$

分数大则营养价值高，分数小则营养价值低。

CSA

