



高压钠灯与 LED 灯在植物补光中的应用特性分析

耿 博¹, 龙家焕², 郑梦影², 孔 乐², 尤 杰², 苗 辰²

(1. 国家半导体照明工程研发与产业联盟, 北京 100083; 2. 南京农业大学 农学院, 江苏 南京 210095)

摘要:随着现代农业的高速发展, 温室大棚、植物工厂、智慧农业等新型现代农业已经逐渐兴起, 光作为植物生长必不可少的重要环境因素, 植物补光已经变得越来越普遍。高压钠灯和 LED 植物灯是目前比较常用的植物补光灯, 本文主要对比分析高压钠灯和 LED 植物灯的功能特性, 选择出更适用于现代农业植物补光的植物补光灯。

关键词:现代农业; 光; 植物补光; LED 植物灯; 高压钠灯

光是影响植物生长发育众多外界因素(光照、温度、水分、重力、矿物质等)中最重要环境因素之一。光不仅作用于植物的光合作用, 还是调节植物生长发育全生育进程, 包括植物休眠和种子萌发、营养生长、生殖生长、种子和果实的生长与成熟、植物的衰老与脱落等。自然环境中, 光照会随着地理位置、天气状况、季节、早晚变化而变化, 在较高纬度地区或遭遇冬春季的连阴雨以及雾霾天气时, 大气透明度低, 会直接导致了设施蔬菜光照不足, 诱发植株萎蔫、叶片黄化、生长缓慢、落花落果, 以及果实着色不均、转色困难等现象, 在生产上造成严重损失。人工补光已经成为现代农业高效生产的重要保障手段^[1-3]。研究表明人工光照在植物栽培应用上已具有可行性^[4-8], 在现代农业中将发挥越来越重要的作用^[9]。人工补光不仅能增加作物的产量, 还能有效的提高农作物的品质。根据荷兰温室种植者的经验, 1% 的光照带来 1% 的增产; LED 单色红光处理延长了西兰花保鲜期 5 d 左右, 为西兰花的贮藏保鲜提供理论依据^[10]; 龚婷等^[11]研究发现 LED 补光使辣椒、番茄和茄子幼苗的品质得到了提高; LED 植物生长灯可以使红豆杉在较低的蒸腾速率下取得较高的净光合速率^[12]。

近年来, 由于设施农业的快速发展、农业光环境的恶化、自然光的多变性和不可控性等因素, 植物补光研究成为现代农业的热点。植物补光能有效控制光质、光密度、光周期, 满足植物各生长期对光质、光密度、光周期的不同需求, 因而能

使植物生产周期和质量等得到有效控制。通过灯具与光源的合理选型及电器的合理配套, 人工光源已经大量应用于观赏类植物(玫瑰、菊花、百合)培育中, 在蔬菜生产中也大规模应用, 如番茄、黄瓜、甜椒、生菜、马铃薯等温室生产; 同时随着新型光源的开发应用, 人工光源在植物工厂、组培与育苗工厂、规模化畜禽养殖场、害虫防治等领域也开始广泛应用。目前, 在农业生产中应用的人工光源主要有白炽灯、荧光灯、高压钠灯、金属卤灯和 LED 植物灯。本文系统梳理近年来有关 LED 光源和高压钠灯在植物光照中的研究成果, 旨在为现代农业生产的人工光照和光源选型提供借鉴。

1 高压钠灯

钠灯是利用钠蒸气放电、发光而制成的灯的总称。按钠蒸气不同, 可分为低压钠灯、高压钠灯两大类。高压钠灯是 20 世纪 60 年代出现的光效最高的高强度气体放电灯, 是继白炽灯、荧光灯之后的第三代照明光源^[13]。高压钠灯与低压钠灯不同, 它的光谱不再是单色的黄光, 而是展布在相当宽的频率范围内。通过谱线放宽, 高压钠灯发出金白色的光。

1.1 高压钠灯的工作原理

高压钠灯启动后, 电弧管两端电极之间产生电弧, 由于电弧的高温作用, 管内的钠汞齐受热蒸发成为汞蒸气和钠蒸气, 阴极发射的电子在向阳极运动过程中, 撞击放电物质的原子, 使其获得能量产生电离或激发, 然后由激发态回到基态, 或电离态变为激发态, 再回到基态, 如此无限循环, 此时多余的能量以光辐射的形式释放, 便产生了光。

1.2 高压钠灯的光谱特点

高压钠灯是现有高强度气体放电灯中较高效

收稿日期: 2018-03-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0403903)。

第一作者简介: 耿博(1981-), 男, 硕士, 工程师, 从事半导体照明研究。E-mail: gengbo@china-led.net。

的光源,光效可达 $150 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 以上,且因其较强的红光输出正好位于植物对光源的敏感波段范围内,较为适合植物的光合作用过程,对植物的开花和结果有较好的促进作用。国内外研究和实践应用表明,高压钠灯适用于植物生长周期的开花和结果阶段^[14-16]。陈善飞等研究表明对植物采用高压钠灯补光,能大幅度促进植物的光合作用,从而提高果实品质和产量^[17]。

1.3 高压钠灯的伏安特性

高压钠灯和其它气体放电灯泡一样,工作在弧光放电状态时,其伏—安特性曲线为负斜率,即灯泡电流逐渐上升,而灯泡电压却在下降。在恒定电源条件下,为了保证灯泡能正常稳定工作,电路中必须串联一个具有阻性的电路元件(镇流器)来平衡这种负阻特性,稳定工作电流,否则随着高压钠灯电流上升时,电压下降,但供电电压不会随着下降,多出的电压进一步作用在灯管上,使电流进一步上升,如此循环将导致钠灯失效甚至爆炸^[18]。

1.4 高压钠灯的启动特性

高压钠灯启动后,在初始阶段是汞蒸气和钠气的低气压放电状态,此时,灯泡工作电压很低,电流很大;随着放电过程的持续进行,电弧温度渐渐上升,汞、钠蒸气压由放电管最冷端温度所决定,当放电管冷端温度达到稳定时,放电便趋向于稳定,灯泡的光通量、工作电压、工作电流和功率也处于正常工作状态。在正常工作条件下,由于需要经过一些列启动程序,整个启动过程约需4~8 min。目前,通过技术改进,高压钠灯的启动时间已大为缩短。

1.5 高压钠灯应用于植物补光上的特点

1.5.1 高频特点 在植物生长照明领域高压钠灯因其高频特点,容易产生频闪、热膨胀变形等问题存在很多问题;如植物生长钠灯应用于农业照明时,灯功率约高出标称功率10%,因而灯的工作温度很高,热膨胀比较明显,对灯和植物的影响较大^[19]。

1.5.2 伏安特性 根据高压钠灯的伏安特性,为使钠灯正常工作,除了灯泡外,还必须按内触发高压钠灯或外触发高压钠灯分别选用相应的工作电路,如灯泡+镇流器或者灯炮+镇流器+触发器的工作电路,方可达到高压钠灯正常工作的要求;因此不仅让高压钠灯结构变得复杂,附加能耗不

可避免。

1.5.3 发光特性 根据高压钠灯的发光特性,当高压钠灯处于工作状态时,灯腔内的温度可高达 150°C ;散热量过大,使得温室内气温调节成本增加,尤其到夏天,温室内气温时常无法调节至植物所适合的温度,对现代温室生产带来巨大阻碍。

1.5.4 高光效 相比于普通人工补光灯,高压钠灯光效较高,但高压钠灯的光源属球型发光体,大概有60%左右的光要通过反光从40%的出光口射出,亚光面反射往往会造成光在反光罩内部进行多次反射,最终真正到达出口处的光仅剩余20%左右。

此外,在非工作状态下因负压回吸进入灯腔非常多的灰尘、昆虫等,严重影响灯的发光效率和使用寿命。同时由于高压钠灯中存在金属汞、金属钠等对环境有害的物质,后续废品处理对环境有很大危害。

2 LED 植物灯

20 世纪 60 年代,科技工作者利用半导体 PN 结发光的原理,研制成了 LED 发光二极管(Light Emitting Diode, LED)。随着光电技术的发展,LED 灯被不断改进和完善,使得低能耗 LED 光源在农业领域的应用成为现实。LED 是由 III~IV 族化合物,如砷化镓(GaAs)、磷化镓(GaP)、磷砷化镓(GaAsP)等半导体材料制成^[20-21]。LED 灯可以发出多种单波长的光,也可以发出多波长组合的白光或其他类型的混光。LED 植物灯能满足植物生长发育对光的需求,节能便利,被认为是 21 世纪现代农业领域最有应用前景的人工光源。

2.1 LED 植物灯的工作原理

LED 是一种能够将电能转化为可见光的固态的半导体器件,它可以直接把电转化为光。LED 的心脏是一个半导体的晶片,晶片的一端附在一个支架上,一端是负极,另一端连接电源的正极,使整个晶片被环氧树脂封装起来。半导体晶片由两部分组成,一部分是 P 型半导体,在它里面空穴占主导地位,另一端是 N 型半导体。当这两种半导体连接起来的时候,它们之间就形成一个 P-N 结。当电流通过导线作用于这个晶片的时候,电子就会被推向 P 区,在 P 区里电子跟空穴复合,然后就会以光子的形式发出能量,而光的波长也就是光的颜色,是由形成 P-N 结的材料所

决定。

2.2 LED 的光谱特点

植物生长 LED 灯具一直以来都被看作是未来植物照明领域的主流产品。植物光合作用在可见光光谱 380~760 nm,所吸收的光能约占生理辐射光能的 60%~65%,其中主要为波长 610~720 nm 的红、橙光和波长为 400~510 nm 的蓝、紫光;LED 的光谱域宽在±20 nm 左右,波长正好与植物光合作用和形态建成的光谱范围吻合。LED 灯能够发出植物生长所需要的单色光光谱,并能对不同光谱和光输出实现单独控制,在植物补光中易于控制管理。

2.3 LED 的光源特点

2.3.1 优点 LED 作为新型光源,具有寿命长、发光效率高、功耗低、启动时间短、显色指数高、工作温度低、结构牢固、不怕震动、方向性好、工作电压低、无紫外辐射、环保等众多优点^[22-24];张海辉等^[25]设计采用的 PWM 补光控制模式中发现,LED 灯输出光照度正比于能量消耗,可在满足作物需光量的前提下,节约能耗、提高光能利用率,同时系统具有响应速度快、适应性强、部署灵活等特点。

长寿命。LED 是一种固态光源,发光原理完全有别于传统光源,它内部没有灯丝,而是通过半导体材料中不同载流子之间的交换发光。美国 CREE 等公司公布其大功率白光 LED 的寿命超过 50 000 h(光衰小于 30%),如果按照每天使用 8 h 计算,理论上正常条件下一盏 LED 灯可以使用 17 年。LED 灯启动时间短,启动响应时间为毫秒级或纳秒级。

低功耗。同瓦数的 LED 灯比同瓦数的高压钠灯节能得多;如郑丽等研究发现 50 W 的 LDE 灯用电量比同瓦数的高压钠灯低,甚至有研究指出新型 LED 植物补光灯较高压钠灯节能 75%^[26]。

高适配性。LED 光源的发光颜色可以灵活选择,在农业上,可以适应不同植物不同生育期对光质的要求。LED 灯体较小巧,可以制备成各种形状的器件,并且适合于易变的环境,更是能适应不用植物株型和环境。许巧云^[27]总结认为 LED 光源体积小,可以自由设计照明系统的形状,大幅度提高光源利用率和空间利用率,适用于多层多段紧凑式的栽培模式。

高利用率。LED 光源属有方向性的发光,可根据需要封装成 60~180° 的出光角,设计时可根据需要直接采用所需角度的 LED 管,尽量避免因反射造成光损。LED 灯发光体表面温度低,可近距离给植物补光,补光效率较高。LED 灯具的总光通量比高压钠灯小、但是 LED 灯具对光源的利用率却比高压钠灯高得多。

2.3.2 缺点 虽然 LED 灯在很多方面有着其它植物补光灯无法比拟的优势,但是由于一些技术并未成熟,导致还存在一些有待研究解决的缺点。

通常 LED 为多灯串联运行,若其中有器件失效,会影响整个串联电路的工作。设施农业上,生产十分依赖补光,若补光灯线路出现问题,未能及时处理好,则会对植物生长产生很大影响。

半导体材料的导热率只有一般金属的千分之几,散热慢,温升大,散热技术要求高,因而提高其生产成本。

LED 的价格比较昂贵,性价比低,较之于白炽灯,几只 LED 的价格就可以与一只白炽灯的价格相当,而通常每组信号灯需由上 300~500 只二极管构成。这也是目前限制 LED 灯普及的重要原因之一。

3 高压钠灯与 LED 灯的比较

郑丽等^[26]对比两种灯对切花菊分化的影响时发现高压钠灯在半径 2 m 以内,光强大于 50 lx 时可有效抑制切花菊花芽分化,而 LED 灯在半径 2.5 m 以内,光强大于 20 lx 条件下即可有效抑制切花菊的花芽分化。低瓦数的 LED 灯的补光效果可以与高瓦数的钠灯补光效果相当,且耗能低,散热少,大约是高压钠灯和金卤灯的四分之三的能耗。廖瑞辉等^[28]研究比较发现 LED 能效远远强于高压钠灯。LED 光源工作电压低,采用高效率的驱动电源(电源效率可达 90%左右),可以减少额外的功率消耗。但是,LED 灯的驱动系统复杂,元器件多,可靠性差,很多情况下,驱动的寿命低于 LED 芯片自身的寿命,从而导致 LED 灯整个系统的失效,实际使用寿命不一定高于高压钠灯。此外,驱动系统也需要消耗电能,虽然能耗可以做到小些,但引起成本的升高。

据研究发现高压钠灯近距离照射植物会对植物产生热胁迫,从而导致玫瑰花瓣中呼吸作用过度和水分流失,使花瓣变色和同化物的消耗^[29],但在很多情况下,比如在高寒地区或寒冷季节的

植物照明中,这种热辐射特性是有利的。而 LED 整灯温度不超过 60℃,对人体和环境、植物等不会造成任何影响。但是 LED 灯并不是不发热,热量从背面或侧面的散热器散发至环境中,也同样会引起环境温度的上升,导致控温能耗提高。对于大功率植物光照(如 400 W),同等功率的 LED 灯的发热量不一定低于高压钠灯。

基于其发光特点及光谱特性,高压钠灯更适合用于温室等大型空间的植物光照,不适合于近距离照射的场景应用。LED 植物灯更适用于近距离照射的多层培育架、植物工厂等紧凑空间的植物光照,但如果用于大型空间的植物光照,其性价比不及高压钠灯。高压钠灯不适合育苗和幼苗阶段,LED 适合植物生长的全部阶段。黄芸萍等^[30]研究发现在早春西瓜嫁接苗补光上 LED 灯的效果优于高压钠灯,且长期运行的投入成本和使用成本也更低。许多研究者认为 LED 光源是植物工厂目前生产光环境调控的最佳光源^[31-32]。

4 结论

植物补光,其根本目的是实现现代农业的高产、高效、优质和生态型发展。LED 植物灯特别适宜于室内紧凑空间的栽培植物,适用于植物的全生育期栽培。但 LED 植物灯由于其制造技术要求比较高,造价比较昂贵,性价比低,是其广泛应用的制约因素,有待进一步改善提升。高压钠灯的功率大、光密度输出值高、功率与重量的比值小、性价比高,特别适用于大型空间的植物栽培补光,但在紧凑空间的植物栽培补光应用有其局限性。两种光源有各自固有的性能特性和应用特点,互为补充,各自替代不了对方。因此,在今后很长的一段时间内,LED 光源和高压钠灯均会大量应用于现代农业的植物光照领域,为现代绿色农业提供适用技术和先进光照产品的支撑服务。

参考文献:

- [1] 王项羽,郝东生,王虹. 植物补光灯在设施反季节番茄生产中的增产试验[J]. 农业工程,2015,5(S2):66-69.
- [2] 曹源,张翔. 植物补光灯在越冬温室黄瓜栽培中应用的关键技术[J]. 中国瓜菜,2017,30(2):54-55.
- [3] 朱静娴. 人工补光对植物生长发育的影响[J]. 作物研究,2012,26(1):74-78.
- [4] Bula R J, Morrow R C, Tibbitts T W, et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants[J]. Hort Science, 1991, 26(2):203-205.
- [5] Lian M L, Piao X C, Park K Y. Effect of light emitting diodes on morphogenesis and growth of bulblets of *Lilium* in vitro[J]. J. Korean. Soc. Hort. Sci., 2003, 44(1):125-128.
- [6] Lian M L, Piao X C, Park K Y. Effect of light emitting diodes(LEDs) on the in vitro induction and growth of bulblets of *Lilium oriental* hybrid Pesaro[J]. Scientia Hortic., 2002, 94(3-4):365-370.
- [7] Yanagi T, Okamoto K, Takita S. Effects of blue and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants[J]. Acta Hortic., 1996, 440:117-122.
- [8] Kozai T, Ohyama K, Afreen F, et al. Transplant production in closed systems with artificial light for solving global issues on environment conservation, food, resource and energy [C]. Proc. ACESYS Conf. From protected cultivation to phytomation, 1999:31-45.
- [9] 曹静,陈耀星,王子旭,等. 单色光对肉鸡生长发育的影响[J]. 中国农业科学,2007,40(10):2350-2354.
- [10] 张娜,阎瑞香,关文强,等. LED 单色红光对西兰花采后黄化抑制效果的影响[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(4):955-959.
- [11] 龚婷,黄升雄,罗伟,等. 不同光照条件对茄果类蔬菜幼苗生长发育的影响[J]. 农业工程技术,2016(31):35-41.
- [12] 王超,侯奕充,王雯,等. 冬季 LED 补充光照对红豆杉生长发育的影响[J]. 安徽农业科学,2012,40(12):7051-7052.
- [13] 张万奎,丁跃尧. 高压钠灯的技术特性及降压节电应用[J]. 照明工程学报,2006(4):63-65,70.
- [14] 杜宁,韩哲. 高压钠灯用于园艺光照的改进设想[J]. 牡丹江教育学院学报,2008(1):143-144.
- [15] Runkle E S, Padhye S R, Wook Oh, et al. Replacing incandescent lamps with compact fluorescent lamps may delay flowering [J]. Scientia Horticulturae, 2012, 143(16):56-61.
- [16] Blom T J, Zheng Y B. The response of plant growth and leaf gas exchange to the speed of lamp movement in a greenhouse [J]. Scientia Horticulturae, 2009, 119(2):188-192.
- [17] 陈善飞,陈晖,陈善忠,等. 大棚栽培草莓高压钠灯补光效果试验[J]. 中国果树,2015(3):49-51,85.
- [18] 杨光. LED 灯的结构特点及应用[J]. 灯与照明,2012,36(3):27-32.
- [19] 罗珍峰,杨建虎. 植物生长钠灯与镇流器的匹配特性[J]. 中国照明电器,2014(10):34-37.
- [20] 陈元灯. LED 制造技术与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2007.
- [21] 毛兴武,张艳雯,周建军. 新一代绿色光源 LED 及其应用技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2008.
- [22] 纪建伟,解飞,Jeremy H. LED 激发光源叶绿素荧光参数在线监控系统[J]. 农业工程学报,2009,25(4):145-149.
- [23] 王声学,吴广宁,蒋伟,等. LED 原理及其照明应用[J]. 灯与照明,2006,30(4):32-35.
- [24] 王晓明,郭伟玲,高国,等. LED——新一代照明光源[J]. 现代显示,2005,53(7):15-19.

- [25] 张海辉,杨青,胡瑾,等.可控 LED 亮度的植物自适应精准补光系统[J].农业工程学报,2011,27(9):153-158.
- [26] 郑丽,盛爱武,薛建平,等.LED 光源与传统光源对切花菊‘白扇’栽培节能性和有效性对比[C]//中国园艺学会、中国园艺学会观赏园艺专业委员会.中国园艺学会花卉优质、高产、高效标准化栽培技术交流会论文集汇编.中国园艺学会、中国园艺学会观赏园艺专业委员会,2013:8.
- [27] 许巧云.LED 植物照明技术及产业状况分析[J].光源与照明,2016(2):33-35,48.
- [28] 廖瑞辉.LED 路灯与高压钠灯的能效对比[J].企业技术开发,2015,34(32):65-65.
- [29] Lee S J,Wan S K.Shoot growth and flower quality of cut rose ‘Pink Bell’ as affected by supplemental lighting intensity[J].Scientia Horticulturae,2015,23(3):131-135.
- [30] 黄芸萍,张华峰,严蕾艳,等.不同人工补光光源对早春西瓜嫁接苗生长的影响[J].中国蔬菜,2015(10):26-30.
- [31] Zhou W L,Liu W K,Yang Q C.Quality changes of hydroponic lettuce under pre-harvest short-term continuous light with different intensity[J].The Journal of Horticultural Science & Biotechnology,2012,87(5):429-434.
- [32] Zhou W L,Liu W K,Yang Q C.Reducing nitrate concentration in lettuce by elongated lighting delivered by red and blue LEDs before harvest[J].Journal of Plant Nutrition,2013,36(3):481-490.

Analysis of Application Characteristics of High Pressure Sodium Lamp and LED Lamp in Plant Light Supply

GENG Bo¹, LONG Jia-huan², ZHENG Meng-ying², KONG Le², YOU Jie², MIAO Chen²

(1. National Semiconductor Lighting Engineering Research and Development and Industry Alliance, Beijing 100083, China; 2. College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: With the rapid development of modern agriculture, greenhouse shed, plant factory, intelligent agriculture and other new modern agriculture has gradually emerged, light as an essential environmental factor for plant growth. High pressure sodium lamp and LED plant lamp are the commonly used plant light compensators. This paper mainly analyzes the functional characteristics of high pressure sodium lamp and LED plant lamp and select the more suitable for modern agricultural plants to supplement light plant lighting lamp.

Keywords: modern agriculture; light; plant light supply; LED plant lamp; high pressure sodium lamp

欢迎订阅 2019 年《北方园艺》

中文核心期刊(1992—2014)

中国农业核心期刊

美国化学文摘社(CAS)收录期刊

2015、2016 年期刊数字影响力 100 强

《北方园艺》是由黑龙江省农业科学院主管,黑龙江省园艺学会、黑龙江省农业科学院主办的园艺类综合性学术期刊。创刊以来,《北方园艺》始终与时代同频,策划新栏目,报道行业热点,不断推出具有创新价值、学术价值和实用价值的科研成果,在全国园艺类核心期刊中排名第四;在新时代背景下,《北方园艺》积极推动传统媒体与新兴媒体的融合发展,探索新型出版模式,设有专属投稿网站和微信公众号,学术传播力不断提升。

为增加文章的可读性和更好的体现研究成果,本刊增加了内文和封二新品种彩版宣传;作者也可将团队试验成果以音视频形式在本刊微信公众号传播,具体事宜联系编辑部。

栏目设置:研究论文、研究简报、设施园艺、园林花卉、资源环境生态、贮藏加工检测、中草药、食用菌、专题综述、产业论坛、农业信息技术、农业经济、农业经纬、实用技术、新品种(彩版封二)。

国际标准刊号:ISSN 1001-0009 国内统一刊号:CN 23-1247/S

邮发代号:14-150

半月刊 每月 15、30 日出版 单价:15.00 元 全年:360.00 元

全国各地邮局均可订阅,或直接向编辑部汇款订阅。

投稿网址:www.haasep.cn

地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路 368 号《北方园艺》编辑部

邮编:150086

电话:0451-86674276

信箱:bfyybjb@163.com

