

智能激光植物补光器的设计及应用

谷乐¹, 兰艳亭^{1*}, 王春林², 陈晓栋³, 方炜¹, 王瑞峰¹

(1. 中北大学电气与控制工程学院, 太原 030000; 2. 河北省特种设备技术检查中心张家口分中心, 张家口 075000;
3. 北京中农博后农业科学研究院/中国健康农业产学研协同创新平台, 北京 100193)

摘要: 针对目前植物补光设备照射范围有限、电-光转换效率不高、布线安装成本较高和使用环境有限等问题, 该研究设计了一种智能激光植物补光器。系统阐述了智能激光植物补光器的工作原理和结构设计, 以“红颜”草莓为补光试验对象, 分析其补光效果。试验结果表明: 使用该设备能增加草莓植株的叶片厚度和叶绿素含量, 相比自然光照分别增长了6.6%和10.5%; 能显著提高草莓果实的硬度和糖度 ($P<0.05$), 相比自然光照分别增长了20.2%和15.5%。设计的激光驱动电路电流精度达到1 mA, 在调节光照强度时精度高; 使用型号为VMS-300AL-GH-N01的光合有效辐射传感器测得光量子通量密度约为 $55 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 标准偏差仅为2.689, 补光器出光均匀。使用智能激光植物补光器能促进植物的生长发育及果实品质, 在植物补光领域和农业现代化方面具有一定的推动作用。

关键词: 植物; 补光; 激光; 恒流驱动; 智能控制; 调光方式

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305021

中图分类号: TM923

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-18-0211-07

谷乐, 兰艳亭, 王春林, 等. 智能激光植物补光器的设计及应用[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 211-217. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305021 <http://www.tcsae.org>

GU Le, LAN Yanting, WANG Chunlin, et al. Design and application of plant supplemental light with the intelligent laser[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(18): 211-217. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202305021 <http://www.tcsae.org>

0 引言

光照是影响植物生长的重要因素之一, 光环境(包括光强、光质、光周期)会对植物生长发育产生重要影响。光强会提高植物的光合作用速率; 光质能促进植物的生长发育并提高其果实产量; 光周期会调控和诱导植物生长, 对植物的形态与果实质量有着重要影响^[1-4]。在自然光照不足的情况下, 许多地区的农作物会出现收获周期延长、产量降低和品质变差的问题。为了改善这一问题, 研究人员使用人工光源对作物进行补光, 随着照明技术的发展, 研究人员逐渐使用白炽灯、气体放电灯(氙灯和氦灯)、荧光灯、高压气体放电灯、卤素灯、发光二极管(light-emitting diode, LED)作为植物补光的光源^[5]。

近年来, LED以其光谱范围全、寿命长、供应链成熟等优势, 成为植物补光的主要光源。但是, LED植物补光设备的照射范围有限, 电-光转换效率不高。如果为了扩大植物的有效受照范围, 只能采取增加LED的功率的措施, 而功率的增加必会引起散热问题, 加速LED的

老化, 同时增加能耗。并且LED植物补光设备布线安装成本较高, 使得它的使用环境和作用有限, 多用于植物工厂, 不适合农业的大面积推广应用。

为了解决上述问题, 开发一种新型植物补光光源尤为重要, 激光与普通光源相比有着高方向性、单色性、相干性和高亮度的优点, 在过去的几十年内, 激光被广泛应用在各种科学和技术领域, 如医学、材料加工、通信等。随着激光技术的进步, 近年来的研究表明, 激光在农业生产领域取得了突破性的进展^[6-9]。ABOU-DAHAB等^[10]使用激光对桔梗进行照射处理, 试验结果表明, 大多数经过激光处理的桔梗花的形态、总叶绿素、类胡萝卜素和花青素含量都有所增加, 激光照射对植物形态、开花、化学成分和基因突变都有显著影响。HASAN等^[11-12]使用He-Ne红色激光器和Nd:YAG绿色激光器以两种功率密度(2、4 mW/cm²)对玉米种子分别进行4次辐照处理(45、65、85、105 s), 试验结果表明, 使用绿色激光器以2 mW/cm²功率密度预处理105 s的玉米种子有较高的出苗率(96%), 未处理的对照组种子的出苗率较低(62.5%)。相对于对照处理, 经过激光处理的玉米种子的出苗率、蛋白质、油脂和淀粉含量都有显著提高, 与红色激光处理相比, 使用绿色激光对玉米种子进行辐照处理, 可以更好的提高种子的田间出苗、幼苗生长和种子质量。AIL等^[13]使用波长450 nm、1.3 mW/cm²功率密度的激光二极管分别照射草莓3、6、12 min, 把未照射的果实作为对照组, 将其在10℃、85%~90%的相对湿度下冷藏7 d。试验结果表

收稿日期: 2023-05-06 修订日期: 2023-09-04

基金项目: 山西省基础 Research 计划“新型激光植物生长补光装置的研发与应用”(20210302123026)

作者简介: 谷乐, 研究方向为智能农业、农业物联网。

Email: 864541315@qq.com

*通信作者: 兰艳亭, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机器人与智能控制、系统建模与仿真等。Email: lytcyb@foxmail.com

明,使用激光分别照射 3、6 min 后,草莓的失重率和腐烂率显著降低,而未照射和激光照射 12 min 后的草莓失重率和真菌腐烂率显著增加,激光处理能够保持果肉的硬度,保持果实的色度和总可溶性固体。陈怡平等^[14]以菘蓝为研究对象,使用 He-Ne 激光 ($5.23\text{mW}/\text{cm}^2$) 对菘蓝种子分别进行 4 次辐照处理 (3、5、7、9min),试验结果表明,使用激光预处理能提高菘蓝幼苗的叶绿素含量、净光合速率和可溶性糖含量。

上述研究表明了激光处理可以提高种子的出苗率和质量,改善植物的生长和发育,减缓植物果实的腐败。在激光技术的发展中,半导体激光器 (laser diode, LD) 相较其他的激光器有着转换效率高、覆盖波段范围广、使用寿命长、具有直接调制能力、体积小、重量轻、价格便宜等优点^[15]。使用 LD 作为植物补光光源与 LED 相比有以下优点: 1) 体积小,低电压驱动,节能减耗; 2) 劣化少,使用寿命长,光电转化效率高; 3) 光质相干性好,平行度高,亮度高,波长控制精准; 4) 成本低,经济效益高,照射范围广,所耗功率仅约为 LED 植物生长灯输出功率的 1/4^[16]。

利用人工光源进行补光是解决作物全年高效生产的重要因素,也是降低弱光逆境对农业生产不利影响的有效途径。目前,国内外植物生长人工光源的研究与应用多以荧光灯、钠灯和 LED 灯为主,但此类产品在实际应用中受诸多自身因素限制。激光是比 LED 更加节能高效的光源,而当前激光在植物补光方面研究应用的报道较少。本文基于光生物学机理,通过软硬件系统集成,设计一种精准高效、低耗节能的新型智能激光植物补光器,为加快激光在植物生长补光领域的应用研究和技术优化创新提供有益借鉴。

1 智能激光植物补光器的设计方案

1.1 硬件设计

智能激光植物补光器由电源模块、主控模块、光源模组、激光驱动电路、电容触摸屏和云台组成,实物如图 1 所示。



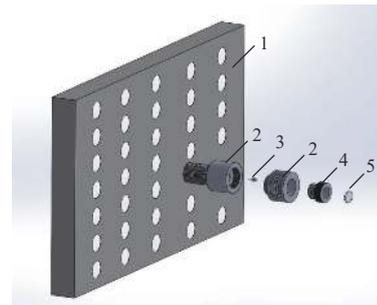
图 1 智能激光植物补光器

Fig.1 Intelligent laser light-supplementation devices

1.1.1 光源模组

光源模组由 LD、散热装置和光束整形装置组成,光源模组的结构如图 2 所示。大量的研究表明,红、蓝光

是植物在光合作用中最主要吸收的光,能促进植物的生长发育^[17]。NADALINI 等^[18]研究表明蓝光可以促进草莓的产量和果实的品质。DÍAZ-GALIÁN 等^[19]研究表明红蓝比例 3:7 能显著提高草莓植株的开花率和果实质量。钱舒婷等^[20]研究表明,红、蓝配比为 4.9:1 和 3:1 的 LED 果实质量和产量最高,红、蓝配比 4.9:1 最有利与草莓的光合作用,红蓝配比为 3:1 草莓果实的 V_C 含量最高。光源模组选用 35 个波长为 450 nm (蓝光) 和 660 nm (红光) 的 LD, LD 的参数见表 1。



1. 壳体 2. 散热装置 3. 半导体激光器 4. 准直透镜 5. 一字波浪镜
1. Shell 2. Heat dissipating arrangement 3. Laser diode 4. Collimation lens 5. Straight wave mirror

图 2 光源模组结构图

Fig.2 Structure diagram of light source module

表 1 半导体激光器参数

Table 1 Laser diode (LD) parameter

| 型号 Type | 波长 Wavelengths/ nm | 输出功率 Light output power/W | 工作电压 Operating voltage/V | 阈值电流 Threshold current/mA | 工作电流 Operating current/mA |
|------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| PL TB450B | 450 | 1.6 | 4.8 | 200 | 650 |
| ML101J29-C | 660 | 0.18 | 2.6 | 80 | 300 |

在长时间工作时, LD 会产生很高的热量,会影响输出功率和输出波长,因此需要对光源模组进行散热处理。如果选择设计 LD 恒温控制电路,其散热效果不明显,LD 的热量还会对主控板造成影响。为了避免这种情况,延长主控板的使用寿命,采用散热方案:将光源模组和主控板通过导线和插座连接,根据 LD 的功率特性曲线,设计一种铝合金的散热装置,并且限制红色 LD 最大输出功率为 0.15 W,蓝色 LD 最大输出功率为 0.8 W,红、蓝 LD 最大输出功率比为 2:1,红、蓝灯数量比为 32:3。散热装置实物如图 3 所示。

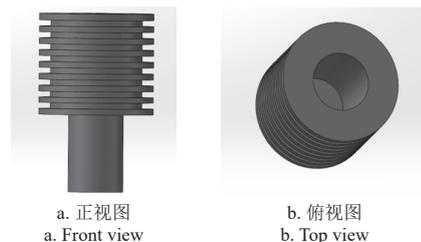


图 3 散热装置

Fig.3 Heat dissipating arrangement

通常把 LD 垂直与 PN 结的方向称为快方向,平行于 PN 结的方向称为慢方向,由于其特殊的工作原理,这两个方向上的光束质量和发散角极不均衡。为了解决

激光的光束质量差、功率密度低的问题，保证植物补光的效果，需要对 LD 进行光束整形。光束整形技术根据光线传播方式主要分为：折射法、反射法和衍射法，折射法是通过曲面透镜对入射光束进行折射从而实现光束整形；反射法是通过全反射光学元件对输出光束在快、慢方向上的宽度进行调整实现光束整形；衍射法是改变输出光束的振幅和相位实现光束的整形。其中，折射法和反射法不会改变 LD 自身的输出特性，折射法有结构简单、精度调整方便、成本低廉等优点^[21-23]。基于折射法，给 LD 选择合适的光束整形装置，该装置由准直透镜和一字波浪镜组成，其实物如图 4 所示。通过光束整形装置后，LD 的光束能量集中，分布均匀，并可近似为矩形光。

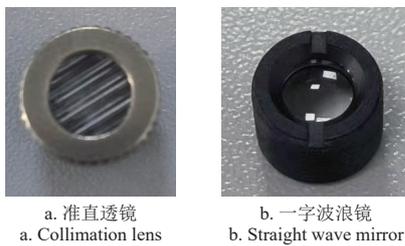


图 4 光束整形装置
Fig.4 Beam shaping device

1.1.2 激光驱动电路

由 LD 的功率特性曲线可知，其工作温度和驱动电流的细微变化会引起光功率的显著变化。本文为 LD 光

源模组设计了一种散热装置，使 LD 的工作温度保持恒定，此时驱动电流是影响光功率的唯一因素。为保证补光效果，应该使用恒流驱动的方式控制 LD 光源模组，为使光功率可调，设计调光电路。常见的调光方式有模拟调光和脉冲宽度调制（pulse width modulation, PWM）调光，模拟调光是改变电流大小实现调光效果，PWM 调光是在一个周期内通过控制占空比的方式实现调光效果^[24-26]。影响 LD 输出波长的唯一因素是工作温度，使用模拟调光的方式不会影响 LD 的输出波长，并且模拟调光比 PWM 调光有电流可连续的优点，因此采取模拟调光方式设计了一种恒流驱动电路，并加入高精度的电流反馈电路构成激光驱动电路^[27-29]，其电路如图 5 所示。

该电路是基于 TPS54202DDCR 芯片设计的恒流 BUCK 电路。TPS54202DDCR 是一款 4.5~28 V 输入、2 A 输出的同步降压转换器，该器件集成了 148、78 mΩ 的 N 沟道 MOSFET，开关频率固定为 500 kHz。该芯片的工作原理是：FB 引脚的反馈电压 (V_{FB}) 与芯片内部的基准电压 (V_{ref}) 进行比较后会得到一个误差信号，芯片内部的控制器根据误差信号控制 MOSFET 的导通与关断，从而控制输出电压的大小，使反馈电压等于基准电压，整个过程处于动态平衡。在 24 V 输入下，负载最多可容许 4 个蓝色 LD 串联或 8 个红色 LD 串联。F2、F3 为电压跟随器，作用是使运算放大器的输出电压等于正向输入电压，隔离前后级，提高带负载能力。

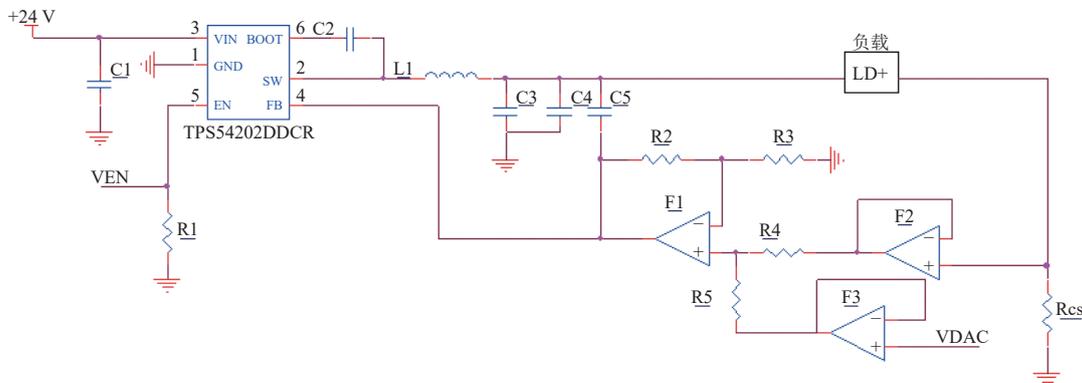


图 5 激光驱动电路
Fig.5 LD driver circuit schematic

注：C1、C2、C3、C4、C5 为电容；L1 为电感；R1、R2、R3、R4、R5、 R_{cs} 为电阻；F1、F2、F3 为运算放大器；LD+ 为激光二极管；TPS54202DDCR 为同步降压转换器； V_{EN} 、 V_{DAC} 为电压。
Note: C1, C2, C3, C4, and C5 are capacitors; L1 is the inductance; R1, R2, R3, R4, R5, and R_{cs} are resistors; F1, F2, and F3 are operational amplifiers; LD+ is a laser diode; TPS54202DDCR is a synchronous step-down converter; V_{EN} and V_{DAC} are voltages.

由图 5 可知，F1 为同相加法运算器，其同相输入电压和反向输入电压如式 (1) 和式 (2) 所示：

$$V_+ = V_{CS} \cdot R_5 / (R_4 + R_5) + V_{DAC} \cdot R_5 / (R_4 + R_5) \quad (1)$$

$$V_- = V_{FB} \cdot R_3 / (R_2 + R_3) \quad (2)$$

式中 V_+ 为 F1 的同相输入电压，V； V_- 为 F1 的反相输入电压，V； V_{CS} 为采样电阻的电压，V； V_{DAC} 为 F3 的同相输入电压，V； V_{FB} 为 TPS54202DDCR 芯片 FB 引脚的电压，V； R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_5 为电阻的阻值， Ω 。

根据运算放大电路“虚短”的概念可得式 (3)。

$$V_+ = V_- \quad (3)$$

$$\text{令：} R_2 = R_3 = R_4 = R_5 \quad (4)$$

联立式 (1) ~ (4) 可得：

$$V_{FB} = V_{CS} + V_{DAC} \quad (5)$$

驱动电路输出电流由式 (6) 所得：

$$I_{LD} = V_{CS} / R_{CS} = (V_{FB} - V_{DAC}) / R_{CS} \quad (6)$$

式中 I_{LD} 为驱动电路的输出电流, A; R_{CS} 为采样电阻的阻值, Ω 。

V_{DAC} 由单片机的 DAC 输出提供, 驱动电路输出电流的精度可以达到 1 mA。 V_{DAC} 由式 (7) 可得, 其中, V_{ref} 的范围是 2.4~3.3 V。

$$V_{DAC} = V_{ref} \cdot D_{OR} / 4095 \quad (7)$$

式中 V_{ref} 为单片机的基准电压, V; D_{OR} 为单片机的 DOR 寄存器值。

目前光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 存在两种度量系统, 一种是辐射通量密度, 主要应用在辐射、气象与气候等方面; 另一种是光量子通量密度 (photosynthetic photon flux density, PPF), 通过光量子传感器直接测量获得, 主要用于植物生理生态、农林等方面^[30]。在植物补光系统中, 光照强度与光量子通量密度意义相同, LD 的功率密度与辐射通量密度意义相同, 这两个度量系统之间可进行换算。该激光驱动电路实现了 LD 的输出功率可调, 因此用户可以自行调整红、蓝灯的光照强度, 设置光配比。

1.2 软件设计

1.2.1 主控程序设计

主控程序流程如图 6 所示。设备上电进行初始化后, 会判断是否有补光数据写入, 如果有则按照写入的补光数据对植物进行补光, 并将写入的数据存入单片机的后备区; 如果没有, 读取后备区的补光数据进行补光。用户可以根据不同作物的采光需求, 自行设置补光数据。

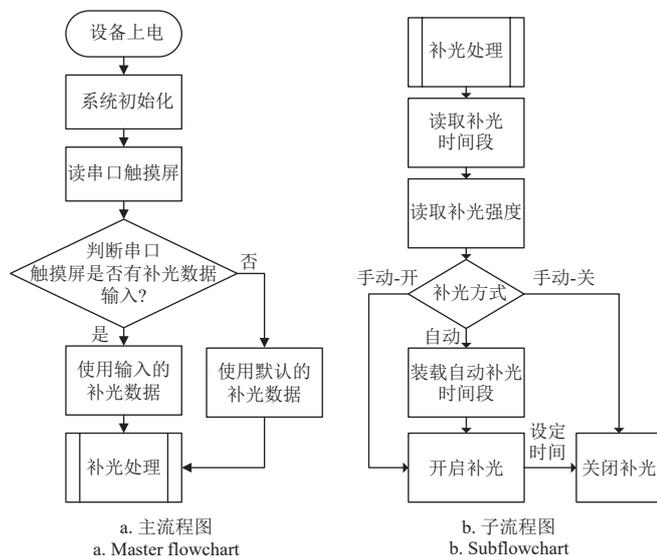


图 6 控制流程图

Fig.6 Control flowchart

1.2.2 上位机设计

考虑到植物补光装置的使用场地和使用人员, 选择使用电容触摸屏作为上位机。其优点在于操作方便, 界面直观。人机交互界面能实时显示补光装置的当前时间、补光强度、补光时间和补光方式, 使用人员也可以通过界面上的“设置”按键, 对系统参数和补光参数进行修改。人机交互界面如图 7 所示。

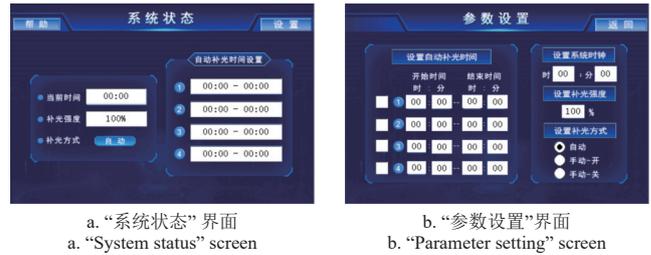


图 7 人机交互界面

Fig.7 Human-computer interaction interface

2 试验

2.1 性能试验

使用型号为 DP3020 的可调直流稳压电源对补光装置进行测试, 测定方法: 调整补光装置为最大输出功率, 记录其工作电压、电流和功率; 使用型号为 VMS-300AL-GH-N01 的光合有效辐射传感器测定补光装置的 PPF, 测定方法: 调整补光装置为最大输出功率, 将其放置在距离传感器 1.5 m 处, 在补光装置的照射范围内移动传感器进行测定, 测试 16 次计算平均值。

2.2 补光试验

为了测试智能激光植物补光器的使用效果, 自 2021 年 12 月至 2022 年 4 月在昌平区兴寿镇进行了实地试验示范。选取一栋草莓日光温室, 全长 100 m、宽 6.5 m, 栽培面积为 400 m², 棚内栽培 70 垄草莓, 草莓品种为“红颜”。土壤类型为砂壤土, 土种肥力中等, pH 值 5.6~6.7, 排灌方便。设置试验组和对照组, 其中对照组为自然光照, 试验组将激光补光器安置在草莓上方 80 cm 处, 于每天 18:00—22:00 进行 4 h 的补光处理, 直至草莓果实成熟, 试验场景如图 8 所示。

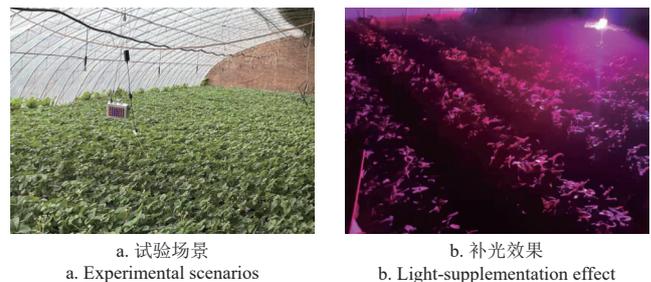


图 8 试验场景

Fig.8 Experimental scenario

测定指标及方法: 待草莓成熟后, 从对照组和试验组中各随机挑选 12 株草莓植株, 每次测试选择一株, 任取 5 片叶片和 5 个草莓果实, 将叶片表面和果实清理干净。1) 用电子厚度计测定叶片的厚度, 测定方法: 把叶片放于厚度计两测量面之间, 将测量面接触叶片, 使其与叶片之间无间隙, 读取测试数据。2) 使用 SPAD-502Plus 便携式叶绿素测定仪测定叶片的叶绿素相对含量, 测定方法: 每个叶片选取 10 个不同的位置进行测定, 取平均值。3) 使用果实硬度仪测定果实硬度, 测定方法: 将硬度计垂直于草莓表面, 压头均与压入草莓中, 当压头压到刻度线处停止, 指针指示的读数即为果实硬度^[31]。4) 使用数字折光仪测定果实糖度, 测定方法: 用四分法对草莓果汁进行取样, 榨取果汁并混合均匀后使

用数字折光仪（电子糖度计）进行测定，测试 3 次取平均值^[32]。

2.3 数据处理方法

使用 SPSS 和 Excel 软件对试验数据进行统计分析。

3 结果与分析

补光装置的光量子通量密度试验数据见表 2，植物补光试验数据及分析见表 3、表 4。

根据表 2 的试验数据计算可得，激光植物补光装置 PPFd 的平均值约为 55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，标准偏差仅为 2.689，验证了光束整形装置可以使补光器出光均匀。使用型号为 DP3020 的可调直流稳压电源测得补光器的额定电压为 24 V，额定电流为 1.6A，额定功率为 38 W。

对试验数据进行显著性分析，结果表明，叶片厚度的显著性水平小于 0.05，叶绿素含量、果实硬度和果实糖度的显著性水平小于 0.01，认为试验组和对照组数据之间有着显著的差异，即使用智能激光植物补光器能促进草莓植株的生长发育及果实品质。通过对其平均值的分析，发现使用该设备相比自然光照草莓植株的叶片厚度增长了 6.6%，叶绿素含量增长 10.5%；草莓果实硬度增长了 20.2%，糖度增长了 15.5%。试验结果表明，使

用智能激光植物补光器对草莓植株的生长发育有促进作用，能显著提高草莓果实的品质 ($P<0.05$)。

表 2 补光装置的光量子通量密度试验数据

Table 2 Experimental data on the photosynthetic photon flux density in the light-supplementation devices

| 试验号 Test No. | 光量子通量密度 Photosynthetic photon flux density/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|--------------|---|
| 1 | 58 |
| 2 | 58 |
| 3 | 55 |
| 4 | 55 |
| 5 | 57 |
| 6 | 52 |
| 7 | 50 |
| 8 | 56 |
| 9 | 54 |
| 10 | 53 |
| 11 | 50 |
| 12 | 57 |
| 13 | 57 |
| 14 | 57 |
| 15 | 58 |
| 16 | 56 |

注：试验环境和条件：在夜间，补光器距离传感器 1.5 m，补光器的电压为 24 v，电流为 1.6 A，功率为 38 W。

Note: Test environment and conditions: At night, the distance between the compensator and the sensor is 1.5 m, and the voltage of the compensator is 24 V, the current is 1.6 A, the power 38 W.

表 3 植物补光试验数据

Table 3 Experimental data on plant supplemental light

| 试验号 Test No. | 叶片厚度 Leaf thickness/mm | | 叶绿素相对含量 Soil and plant analyzer development (SPAD) | | 果实硬度 Fruit firmness/ $(\text{N}\cdot\text{cm}^{-2})$ | | 果实糖度 Fruit brix/% | |
|-------------------------|------------------------|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 试验组 Test group | 对照组 Control group | 试验组 Test group | 对照组 Control group | 试验组 Test group | 对照组 Control group | 试验组 Test group | 对照组 Control group |
| | 1 | 0.32 | 0.35 | 47.8 | 44.6 | 1.81 | 1.35 | 13.7 |
| 2 | 0.39 | 0.36 | 45.4 | 45.2 | 1.98 | 1.78 | 13.4 | 10.1 |
| 3 | 0.38 | 0.34 | 39.2 | 39 | 2.22 | 2.1 | 13.5 | 11.3 |
| 4 | 0.35 | 0.32 | 42.9 | 35.4 | 2.08 | 1.45 | 12.2 | 10.9 |
| 5 | 0.40 | 0.34 | 43.6 | 40.8 | 2.05 | 1.82 | 12.8 | 10.5 |
| 6 | 0.40 | 0.37 | 40.6 | 39.5 | 1.78 | 1.55 | 11.6 | 11.8 |
| 7 | 0.38 | 0.38 | 45.6 | 41.3 | 2.32 | 1.60 | 12.1 | 12.8 |
| 8 | 0.40 | 0.37 | 44.8 | 40.2 | 1.99 | 1.54 | 13.8 | 9.8 |
| 9 | 0.39 | 0.37 | 44.1 | 39.8 | 1.82 | 1.42 | 12.8 | 11.6 |
| 10 | 0.35 | 0.33 | 46.8 | 36.2 | 1.80 | 1.87 | 13.2 | 10.8 |
| 11 | 0.39 | 0.36 | 45 | 40 | 1.99 | 1.76 | 13 | 11.4 |
| 12 | 0.38 | 0.36 | 46.8 | 40.2 | 2.08 | 1.67 | 13.6 | 11.2 |
| 平均值 Average value | 0.378 | 0.354 | 44.383 | 40.183 | 1.993 | 1.659 | 12.975 | 11.232 |
| 标准偏差 Standard deviation | 0.025 | 0.018 | 2.532 | 2.814 | 0.171 | 0.217 | 0.702 | 0.903 |

表 4 植物补光试验分析结果

Table 4 Analysis results on plant supplemental light

| 指标 Index | 叶片厚度 Leaf thickness/mm | SPAD | 果实硬度 Fruit firmness/ $\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$ | 果实糖度 Fruit brix/% |
|----------|------------------------|-------|--|-------------------|
| <i>t</i> | 2.614 | 3.844 | 4.192 | 5.281 |
| <i>P</i> | <0.05 | <0.01 | <0.01 | <0.01 |

4 结 论

本文研究并设计了一种智能激光植物补光器，系统阐述了补光器的工作原理和结构设计。使用型号为 DP3020 的可调直流稳压电源对补光器进行性能试验，试验结果：补光器的额定电压为 24 V，额定电流为 1.6 A，额定功率为 38 W。设计的激光驱动电路电流精度达到 1 mA，在调节光照强度时精度高；使用型号为 VMS-300AL-GH-N01 的光合有效辐射传感器测得光量子通量密度约为 55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ，标准偏差仅为 2.689，因此补光器出光均匀。对草莓植株进行了补光试验，试验结果

表明，使用补光器相比自然光照草莓植株的叶片厚度增长了 6.6%，叶绿素含量增长 10.5%；草莓果实硬度增长了 20.2%，糖度增长了 15.5%。使用智能激光植物补光器对草莓植株的生长发育有促进作用，能显著提高草莓果实的品质 ($P<0.05$)。除此以外，经测试人员反馈，还发现使用该补光器可以有效抑制红蜘蛛虫害。

由于补光试验周期较长，智能激光植物补光器和 LED 补光灯的对照试验还在进行中，目前试验数据不足，无法判断两者的补光效果是否存在差异，下一步将讨论并解决该问题。

[参 考 文 献]

- [1] OLLE M, VIRSILE A. The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality[J]. *Agricultural and Food Science*, 2013, 22(2): 223-234.
- [2] 马旭, 林超辉, 齐龙, 等. 不同光质与光照度对水稻温室立体育秧秧苗素质的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11): 228-235.

- MA Xu, LIN Chaohui, QI Long, et al. Effect of different lighting quality and intensities on quality of rice seedling by greenhouse stereoscopic nursing[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(11): 228-235. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王建平, 王纪章, 周静, 等. 光照对农林植物生长影响及人工补光技术研究进展[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 4(1): 215-222.
WANG Jianping, WANG Jizhang, ZHOU Jing, et al. Recent progress of artificial lighting technique and effect of light on plant growth[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2020, 4(1): 215-222. (in Chinese with English abstract)
- [4] IACONA C, MULEO R. Light quality affects in vitro adventitious rooting and ex vitro performance of cherry rootstock Colt[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125: 630-636.
- [5] 李东, 郭伟玲, 尹飞. LED 植物补光系统控制研究进展[J]. *照明工程学报*, 2022, 33(2): 64-70.
LI Dong, GUO Weiling, YIN Fei. Research progress of LED plant supplementary light system control[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2022, 33(2): 64-70. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈鹤鸣, 赵新彦, 汪静丽. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 3-7.
- [7] 梁雪梅, 贾鹏, 秦莉, 等. 激光在土地保护、农作物生长及害虫防治领域应用研究进展[J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(2): 130-137.
LIANG Xuemei, JIA Peng, QIN Li, et al. Research progress of laser application in land protection, crop growth and pest control[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2021, 43(2): 130-137. (in Chinese with English abstract)
- [8] NADIMI M, SUN DW, PALIWAL J. Recent applications of novel laser techniques for enhancing agricultural production[J]. *Laser Physics*, 2021, 31(5): 053001.
- [9] 万文昌, 石明明, 张彬, 等. 植物激光灯的研究进展[J]. *应用技术学报*, 2020, 20(1): 33-39.
WAN Wenchang, SHI Mingming, ZHANG Bin, et al. Development of plant laser lamp[J]. *Journal of Technology*, 2020, 20(1): 33-39. (in Chinese with English abstract)
- [10] ABOU-DAHAB A D M, MOHAMMED T A, HEIKAL A A, et al. In vitro laser radiation induces mutation and growth in *Eustoma grandiflorum* plant[J]. *Bulletin of the National Research Centre*, 2019, 43(1): 1-13.
- [11] HASAN M, HANAFIAH M M, ALHILFY I H H, et al. Comparison of the effects of two laser photobiomodulation techniques on bio-physical properties of *Zea mays* L. seeds[J]. *PeerJ*, 2021, 9: e10614.
- [12] HASAN M, HANAFIAH M M, TAHA Z A, et al. Laser irradiation effects at different wavelengths on phenology and yield components of pretreated maize seed[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 1189.
- [13] ALI L M, SALEH S S, AHMED A R A R, et al. Novel postharvest management using laser irradiation to maintain the quality of strawberry[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14: 3615-3624.
- [14] 陈怡平, 王勋陵. He-Ne 激光处理对苜蓿幼苗光合作用的影响[J]. *激光技术*, 2004, 28(1): 42-44.
CHEN Yiping, WANG Xunling. Effects of He-Ne laser treatment seeds of *isatis indigotica* on photosynthesis of seedlings[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 42-44. (in Chinese with English abstract)
- [15] 黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 5.
- [16] 党聪聪, 褚庆全. 激光植物生长生理效应及植物工厂应用价值探讨[J]. *照明工程学报*, 2021, 32(2): 19-24.
DANG Congcong, CHU Qingquan. Effects of laser light on plant growth and physiology and its application evaluation in plant factory[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2021, 32(2): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- [17] 付博, 梁俊阳, 韩龙洋, 等. 光照对植物多酚类物质代谢调控的研究进展[J]. *河南农业大学学报*, 2022, 56(3): 355-363, 374.
FU Bo, LIANG Junyang, HAN Longyang, et al. Research progress on the regulation of light on plant polyphenol metabolism[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2022, 56(3): 355-363, 374. (in Chinese with English abstract)
- [18] NADALINI S, ZUCCHI P, ANDREOTTI C. Effects of blue and red LED lights on soilless cultivated strawberry growth performances and fruit quality[J]. *European Journal of Horticultural Science*, 2017, 82(1): 12-20.
- [19] DÍAZ-GALIÁN M V, TORRES M, SANCHEI-PAGÁN J D et al. Enhancement of strawberry production and fruit quality by blue and red LED lights in research and commercial greenhouses[J]. *South African Journal of Botany*, 2021, 140: 269-275.
- [20] 钱舒婷, 李建明. 补光灯类型对设施草莓光合特性与产量的影响[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(4): 41-48.
QIAN Shuting, LI Jianming. Effects of supplement light type on photosynthetic characteristics and yield of strawberry in greenhouse[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2019, 47(4): 41-48. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郭明秀, 沈冠群, 陆雨田. 激光二极管光束整形技术[J]. *激光技术*, 2003, 27(4): 357-361.
GUO Mingxiu, SHEN Guanqun, LU Yutian. The technology of laser diode beam shaping[J]. *Laser Technology*, 2003, 27(4): 357-361. (in Chinese with English abstract)
- [22] 谢洪波, 吕二阳, 祝晓晨, 等. 一种激光二极管像散光束准直整形方法研究[J]. *激光技术*, 2013, 37(4): 551-555.
XIE Hongbo, LÜ Eryang, ZHU Xiaochen, et al. Shaping and collimation of LD beam with astigmatism[J]. *Laser Technology*, 2013, 37(4): 551-555. (in Chinese with English abstract)
- [23] 辛光泽, 陈东启, 蔡毅, 等. 提高半导体激光二极管功率密度的光束整形方法[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 85-91.
XIN Guangze, CHEN Dongqi, CAI Yi, et al. Beam shaping method to improve power density of semiconductor laser diodes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 85-91. (in Chinese with English abstract)
- [24] 程敏, 季清, 吴仁杰, 等. 脉冲能量可控的高效率 LED 植物灯驱动电源设计[J]. *照明工程学报*, 2022, 33(4): 74-81.
CHENG Min, JI Qing, WU Renjie, et al. Design of high efficiency LED plant lamp driving power supply with controllable pulse energy[J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2022, 33(4): 74-81. (in Chinese with English abstract)
- [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.
ZHANG Haihui, YANG Qing, HU Jin, et al. Self-adaptive and precise supplementary lighting system for plant with controllable LED intensity[J]. *Transactions of the Chinese*

- Society of Agricultural Engineering (Transaction of the CSAE), 2011, 27(9): 153-158. (in Chinese with English abstract)
- [26] 付贤松, 王婷, 任梦奇, 等. 新型隔离式 PWM 调光 LED 驱动器设计[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 75-79.
FU Xiansong, WANG Ting, REN Mengqi, et al. Design of a novel isolating PWM dimming LED driver[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 75-79. (in Chinese with English abstract)
- [27] 邢素霞, 王睿, 郭瑞民, 等. 蝶形半导体激光器恒流驱动设计与实现[J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 553-558.
XING Suxia, WANG Rui, GUO Ruimin, et al. Design and implementation of constant current drive of butterfly semiconductor lasers[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(5): 553-558. (in Chinese with English abstract)
- [28] 田亚玲, 李创社, 张朝阳. 高精度和高稳定性半导体激光器恒流驱动电源[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(3): 1-5.
TIAN Yaling, LI Chuangshe, ZHANG Chaoyang. High-accuracy and high-stability constant current power for semiconductor lasers[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(3): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [29] 黄丫, 田小建, 于兰, 等. 高稳定度半导体激光器恒流驱动电路设计[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2020, 21(2): 32-35.
HUANG Ya, TIAN Xiaojian, YU Lan, et al. The design of high stability constant current drive circuit for semiconductor lasers[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2020, 21(2): 32-35. (in Chinese with English abstract)
- [30] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 光合有效辐射表: GB/T 35139-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [31] 杨震峰, 王吉如, 王珊珊, 等. 短波紫外线处理对采后草莓果实腐烂和抗氧化能力的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(5): 775-780.
YANG Zhenfeng, WANG Jiru, WANG Shanshan, et al. Effect of UV-C treatment on fruit decay and antioxidant activity of strawberry[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(5): 775-780. (in Chinese with English abstract)
- [32] 陈卫平. 不同草莓品种果实品质的比较研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(9): 46-48.
CHEN Weiping. Comparative study on fruit quality of different strawberry varieties[J]. Acta Agricultura Jiangxi, 2010, 22(9): 46-48. (in Chinese with English abstract)

Design and application of plant supplemental light with the intelligent laser

GU Le¹, LAN Yanting^{1*}, WANG Chunlin², CHEN Xiaodong³, FANG Wei¹, WANG Ruifeng¹

(1. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030000, China; 2. Hebei Special Equipment Technical Inspection Center Zhangjiakou Branch, Zhangjiakou 075000, China; 3. Beijing Sino-agri Postdoctoral Institute of Agricultural Sciences/China Healthy Agriculture Industry-University-Research Collaborative Innovation Platform, Beijing 100193, China)

Abstract: Light is one of the most important influencing factors on plant growth. Light environments have also a significant impact on plant growth and development. In the absence of natural light, crops in many areas can suffer from long harvest cycles, low yields and poor quality. Fortunately, light-supplementation devices have been invented to supplement the light for the crops. Among them, the light-emitting diodes (LEDs) have been the main light source for the plant-filling light. But the conventional LEDs can not fully meet large-scale production in recent years, due to the limited lighting range, low efficiency of electricity-light exchange, high cost of line installation, and limited usage environment of light filler for plants. It is particularly important to develop a new light source for plant filling. Compared with the commonly used light sources, laser can be expected to the strong directionality, excellent monochromaticity, strong coherence, and high brightness. Moreover, lasers have been widely used in various scientific and technological fields in the past few decades, such as medicine, material processing, and communications. The lasers can also be used to improve the germination rate and the quality of seeds for the better growth and development of plants, even to delay the decay of plant fruits. In this study, the laser diode (LD) was selected as the light source of the fill light device, in order to design a plant light filler with the intelligent laser. The light source module was used as 35 LDs with wavelengths of 450 nm (blue light) and 660 nm (red light). A heat sink was also designed with the aluminum alloy, in order to ensure the output power and wavelength. The reason was that the LDs generated high heat when working for a long time. The laser driver circuit achieved the adjustable LD drive current, that is, the output power of LD was adjustable. The light intensities of red and blue lights were adjusted to set the light-matching ratio. The laser plant light filler was tested using an adjustable direct current (DC) regulator with a voltage of 24 V, a current of 1.6 A, and a power of 38 W. The photosynthetic photon flux density (PPFD) of the laser plant light filler was measured using a sensor for a total of 16 tests, with an average value of about 55 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$. An experimental and the control group were set with the "Red Face strawberry" as the subject of the supplemental light test. The control group received the natural light, while the experimental group received the laser supplemental light of 80 cm above the strawberries for 4 hours from 06:00 pm to 10:00 pm every day until the strawberry fruits ripened. Twelve strawberries were randomly selected from the experimental and control groups and then examined for the leaf thickness, chlorophyll content, fruit firmness and sugar content. The results show that the leaf thickness and chlorophyll content of the plant increased by 6.6% and 10.5%, respectively; and the hardness and sugar content were significantly improved by 20.2% and 15.5%, respectively, compared with the natural light. The light-supplementation device can be expected to promote the growth, development and quality of fruits, particularly on the precise adjustment and uniform light output. The compact structure and fine waterproof properties can greatly contribute to the field of plant light in agricultural modernization.

Keywords: plants; supplemental light; laser; constant current drive; intelligent control; dimming technology