



刘文科, 刘家源. 光质交替对LED红蓝光连续光照生菜生理伤害的削减作用机制[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10): 131-138.
LIU Wenke, LIU Jiayuan. Physiological mechanisms of light quality alternation alleviating the injury on lettuce caused by continuous red and blue light illumination[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10): 131-138.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.11

光质交替对LED红蓝光连续光照生菜生理伤害的削减作用机制

刘文科 刘家源

(中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业农村部设施农业节能与废弃物处理重点实验室,
北京 100081)

摘 要 为探明光质交替对LED红蓝光连续光照诱导生菜生理伤害的削减作用机制,在环境可控的植物工厂中,采用水培方法和昼夜6次取样方法(明期6 h间隔取样3次,暗期2 h间隔取样3次)研究相同日光照累积量下LED红蓝光常规光照(NL,光强 $400\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光周期18 h/6 h, $R/B=4:1$)、连续光照(CL,光强 $300\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光周期24 h/0 h, $R/B=4:1$)和红蓝光交替连续光照(CL-A,红光 $320\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 照射18 h,蓝光 $240\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 照射6 h)对水培生菜生长、产量和昼夜自由基清除率(DPPH)及碳水化合物、活性氧和丙二醛(MDA)含量的影响。结果表明:光照处理12 d后生菜叶片产生了生理伤害并改变了植株形态。CL-A处理地上部鲜重、叶面积最高,冠幅更大,叶片伤害等级最低。按NL、CL和CL-A顺序,生菜叶片淀粉和蔗糖含量、DPPH呈现显著递增趋势,过氧化氢和MDA含量呈现先增后降趋势,而超氧阴离子含量呈现增加或先增后降趋势。光质交替削减了连续光照诱导的生菜产生的生理伤害,该研究结果为光质交替连续光照在人工光植物工厂中的应用提供了科学支撑。

关键词 生菜; 连续光照; 光质交替; 碳水化合物; 活性氧

中图分类号 S:625

文章编号 1007-4333(2024)10-0131-08

文献标志码 A

Physiological mechanisms of light quality alternation in alleviating the injury on lettuce caused by continuous red and blue light illumination

LIU Wenke, LIU Jiayuan

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract In environmentally controlled plant factory, the effects of conventional light (NL, $400\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 18 h/6 h photoperiod, $R/B=4:1$), continuous light (CL, $300\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 24 h/0 h photoperiod, $R/B=4:1$) and spectral alternation continuous light (CL-A, red light with $320\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ and 18 h light period, blue light $240\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ with 6 h light period, respectively) on the growth, yield, DPPH radical scavenging rate, and contents of carbohydrate, reactive oxygen species and MDA of lettuce were investigated via hydroponic culture and diurnal six sampling method (3 times at 6 h interval in the light period and 3 times at 2 h interval in the dark period). The results showed that: The lettuce leaves were damaged and the plant morphology was changed after 12 days treatment. The shoot fresh weight and leaf area of lettuce were the highest and the injury grade was the lowest under CL-A treatment. In NL, CL and CL-A order, the contents

收稿日期: 2024-01-04

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-IEDA-T07);国家自然科学基金面上项目(31672202)

第一作者: 刘文科(ORCID: 0000-0003-4066-8120),研究员,主要从事设施园艺环境调控方法与工程技术研究,E-mail: liuwenke@caas.cn

of starch and sucrose, the DPPH free radical scavenging rate increased gradually significantly, while the contents of hydrogen peroxide and MDA increased first and then decreased, but the superoxide anions content increased first and then decreased or always increased. In conclusion, light quality alternation alleviates the injury on lettuce caused by continuous red and blue light illumination. This study provides scientific support for the application of alternating light quality and continuous lighting in artificial light plant factories.

Keywords lettuce; continuous light; spectral alternation; carbohydrate; reactive oxygen species

人工光植物工厂作为新兴的设施园艺系统,适宜生产植株低矮、生长周期短且光照强度需求较低的作物,在种苗、叶菜和药用植物生产等领域具有应用价值^[1]。在高精度环境控制和高水平洁净条件下,作物可周年生产,效率高、品质好,具有推广前景^[2]。但是,由于较高的初装成本和运行成本,通过光照参数和方式调控提升单位电能消耗的作物产能,是人工光植物工厂提质增效的重要途径,已成为国内外学者的关注热点。当前,这一领域的研究已从光强、光质(如红光蓝光比例)和光周期等转向光照模式,如连续光照和交替光照等^[3-5]。LED是新兴的固态半导体光源,具有节能、寿命长、光谱可调、光环境智能可控和冷光源等优势,已成为人工光植物工厂生产用主流光源,可用于植物光质生理相关规律研究。目前,LED光环境调控的因素主要包括光强、光质、光周期、昼夜节律及光照模式等,调控提质增效的有效性已广为认可。借助自动化控制系统,可以集成优化制定出囊括多种光照属性的综合LED照明策略,最大程度地提高人工光植物工厂的光能利用效率和植物生产力。

光照模式创新是人工光植物工厂提质增效的重要研究方向。自然光光照具有相对固定的光周期,是光强、光质日变化明显的波动光,人工光可以实现更加多样的光照模式。人工光条件下可实施恒定光照(光强、光质和光周期恒定)、连续光照(24 h光照无暗期)和交替光照(光强或光质交替)以及采收前或明期结束时的差异化的动态光照模式,均被验证具有促生增效的潜力^[3-10]。虽然较高光强红蓝光连续光照可以对敏感型植物种类产生伤害,但通过红蓝光交替可以削减伤害,获得较高的产量^[5,11-12]。现今,连续光照对植物生理伤害的3种机制为碳水化合物累积、活性氧氧化胁迫和昼夜节律失调^[7],而有关光质交替光照削减连续光照生理伤害的机制尚不明晰。明确光质交替光照削减连续光照生理伤害的机制对建立包含连续光照和交替

光照的光照策略,以提高LED红蓝光植物生理效应和生产效益是人工光植物工厂智慧化管控的重要内容。

为了弄清光质交替降低LED红蓝光连续光照对生菜生理伤害的机制,本试验在环境可控的人工光植物工厂中,采用水培方法研究了相同日光照累积量(DLI)下LED红蓝光常规光照(NL,光强 $400\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光周期18 h/6 h, $R/B=4:1$)、连续光照(CL,光强 $300\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光周期24 h/0 h, $R/B=4:1$)和光质交替连续光照(CL-A,红光 $320\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 照射18 h,蓝光 $240\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 照射6 h)对生菜生长、产量及昼夜碳水化合物含量、自由基清除率(DPPH)和丙二醛(MDA)含量的影响,以期从碳水化合物累积、活性氧氧化胁迫生理指标和昼夜节律失调机制上确定削减机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料及条件

本试验于2022年2—3月在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所植物工厂内进行。选取绿叶意大利生菜为试验材料。2022年2月18日将种子播种于上方开口的浸湿海绵育苗块中,长宽高为 $2.5\text{ cm}\times 2.5\text{ cm}\times 2.5\text{ cm}$,并放置在黑暗环境中2 d。待种子发芽后,2月20日将幼苗转移至光强 $200\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、光周期16 h/8 h的白光LED灯下育苗。在幼苗生长过程中,每2 d向幼苗补充营养液。幼苗生长14 d后,于3月6日将幼苗移栽至营养液循环栽培系统。试验期间植物工厂内昼夜温度和湿度分别维持在 $(23\pm 1/20\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 和 $50\%\sim 60\%$ 。试验期间采用营养液水培,营养液选取霍格兰营养液。选用300W LED红蓝面板灯(无锡华兆泓光电技术有限公司,中国)进行光照处理,面板灯长宽为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$,红光波长655 nm,蓝光波长437 nm。面板灯悬挂于栽培槽上方45 cm处。采用LI-1500辐射照度测量仪(LI-COR公司,美国)测定

栽培槽中心上方 5 cm 处光强,并调节光质和光强至设定值。

1.2 光照处理

为使生菜幼苗适应营养液循环栽培系统,幼苗移栽后在统一的光照条件下($R/B=4:1$ 、 $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 、 $18\ \text{h}/6\ \text{h}$)适应生长 3 d 后再开始连续光照处理。以红蓝光比例 $4:1$ 、光周期为 $18\ \text{h}/6\ \text{h}$ 、光强 $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光照处理作为对照,在相同 DLI 条件下对意大利生菜进行 LED 红蓝光常规光照(NL)、连续光照(CL)和红蓝光交替连续光照(CL-A)处理。试验阶段包括育苗阶段 14 d、适应阶段 3 d 和光照处理阶段 12 d。育苗阶段 3 个处理生菜均处于相同光照条件下,即白光、 $16\ \text{h}/8\ \text{h}$ 光周期和 $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光强;适应阶段 3 个处理生菜均处于相同光照条件下,即红蓝光(比例为 $4:1$)、 $16\ \text{h}/8\ \text{h}$ 光周期和 $200\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的光强;光照处理阶段 NL 光照为 $400\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝光,红光和蓝光比例为 $4:1$,照射时长为 $18\ \text{h}$;CL 光照为 $300\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝光,红光和蓝光比例为 $4:1$,照射时长为 $24\ \text{h}$;CL-A 光照为 $320\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红光照射 $18\ \text{h}$, $240\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光照射 $6\ \text{h}$,交替进行。

1.3 测定项目及方法

在连续光照第 12 天(2022 年 3 月 21 日)的 6:00、12:00、18:00、20:00、22:00 和 24:00 进行 6 次取样。分别于每个处理中随机选 3 株生菜作为重复样本,首先拍照并观察生长情况,用分析天平测定地上部鲜重,用 LI-3100C 叶面积仪(LI-COR)测量生菜的叶面积。将叶片受伤害部分剪下测定受伤害叶面积,根据受伤害叶面积占总叶面积的比例来指示生菜生理损伤的严重程度,共分为四级,即正常(0%)、轻微损伤($<25\%$)、中等损伤($25\%\sim 50\%$)、重度损伤($>50\%$)。然后用液氮快速冷冻叶片(不含叶柄)。将液氮冷冻的植物样品在低温下用高通量组织研磨机研磨成粉末,并储存在 $-80\ ^\circ\text{C}$ 的冰箱中备用。

根据 Fils-Lycaon 等^[13]的方法,使用植物蔗糖检测试剂盒(Solarbio,北京)测定生菜叶片中蔗糖含量。取冷冻样品(0.1 g),在 $80\ ^\circ\text{C}$ 水浴中向样品中加入 5 mL 80% 乙醇,反应 30 min 后常温离心 10 min($12\ 000\ \text{r}/\text{min}$)。将上清液在 $85\ ^\circ\text{C}$ 水浴中蒸发,把沉淀物溶于 20 mL 蒸馏水中,通过 $0.45\ \mu\text{m}$ 微

孔膜。通过配备有 $3.5\ \mu\text{m}$ Waters XBridge Amide 柱($4.6\ \text{mm}\times 150\ \text{mm}$)的 UPLC(Waters, model-e2695,USA),在 $30\ ^\circ\text{C}$ 下测定蔗糖含量。

按照 Clegg^[14]的方法测定生菜叶片中淀粉含量。取冷冻样品(0.1 g)加入 1 mL 蒸馏水,在沸水中糊化 30 min。冷却后加入 1 mL $9.2\ \text{mol}/\text{L}$ 高氯酸和 2 mL 蒸馏水,搅拌 10 min 后,常温离心 6 min($8\ 000\ \text{r}/\text{min}$)。取上清液加入 1 mL $4.6\ \text{mol}/\text{L}$ 高氯酸和 3 mL 蒸馏水,搅拌 10 min,反复冲洗沉淀后取上清液,测定 620 nm 波长下的吸光度,计算淀粉含量。根据试剂盒(Comin Biotechnology, Suzhou, China)说明书测定过氧化氢含量。称取 0.1 g 冷冻样品于 2 mL 离心管中,加入 1 mL 预冷的丙酮溶液,冰浴匀浆,然后 $4\ ^\circ\text{C}$ 离心($8\ 000\ \text{r}/\text{min}$)10 min,取上清液测定 415 nm 处吸光度,计算过氧化氢含量。

参照 Zha 等^[15]的方法测定超氧阴离子含量。称取 0.1 g 冷冻样品于 2 mL 离心管中,加入 1 mL $50\ \text{mmol}/\text{L}$ 磷酸缓冲液($\text{pH}\ 7.8$),磷酸缓冲液中含有: $1\ \text{mmol}/\text{L}$ EDTA, 0.3% Triton X-100 和 2% 聚乙烯吡咯烷酮。然后 $10\ 000\ \text{r}/\text{min}$, $4\ ^\circ\text{C}$ 离心 20 min,取 0.5 mL 上清液加入 0.4 mL $1\ \text{mmol}/\text{L}$ 盐酸羟胺,然后 $37\ ^\circ\text{C}$ 反应 20 min。向反应混合液中加入 $0.3\ \text{mL}\ 17\ \text{mmol}/\text{L}$ 1,4-氨基苯磺酸、 $0.3\ \text{mL}\ 7\ \text{mmol}/\text{L}\ \alpha$ -萘胺,然后 $37\ ^\circ\text{C}$ 反应 20 min。取 0.5 mL 氯仿加入到反应混合液中, $8\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 常温离心 5 min,取 1 mL 上清液在 530 nm 处测吸光度,计算超氧阴离子含量。

根据 Zhang 等^[16]的方法测定 MDA 含量,称取 0.1 g 冷冻样品于 2 mL 离心管中,向离心管中加入 1 mL 预冷的 10% 三氯乙酸,冰浴匀浆,然后在 $4\ ^\circ\text{C}$ 离心($8\ 000\ \text{r}/\text{min}$)10 min。取 0.5 mL 上清液和 0.5 mL 0.6% 硫代巴比妥酸混合后在 $100\ ^\circ\text{C}$ 下水浴 30 min,然后冷却至室温。将反应混合液在 $10\ 000\ \text{r}/\text{min}$ 下离心 10 min。取 0.2 mL 的上清液测定 450、532 和 600 nm 处的吸光度计算 MDA 含量。根据 Çoruh 等^[17]的方法计算 DPPH。称取 0.1 g 样品,使用无水乙醇提取,计算公式如下: $\text{DPPH} = [(A_{\text{空白}} - A_{\text{样品}})/A_{\text{空白}}] \times 100\%$,其中 $A_{\text{空白}}$ 和 $A_{\text{样品}}$ 分别为空白和样品在 517 nm 处的吸光度值。

昼夜节律失调确认方法:对各指标昼夜 6 个时刻所取样品测得的数据进行差异显著性检验,若彼此间有 1 组以上数据存在显著性差异,则认为该指

标存在昼夜节律,相反则昼夜节律失调。

1.4 数据处理

分别用 Microsoft Excel 2010 和 SigmaPlot 10.0 软件处理数据和作图,用方差分析软件对数据进行单因素方差分析,并运用 Duncan 检验法对显著性差异($P<0.05$)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜形态和生物量的影响

常规光照、连续光照和连续光照交替处理下的生菜均出现生理伤害症状,且差异明显。与常规光

照和光质交替连续光照比,连续光照处理下生菜植株冠层生长紧凑,且植株高度降低,冠幅缩小,幼叶叶片坏死,老叶边缘干枯变黄。连续光照处理下的生菜较常规光照处理伤害症状更为严重。光质交替连续光照下生菜的植株较高,冠幅最大,只有少数幼叶出现叶片边缘坏死,伤害症状最弱。3种处理下的生菜根系外观形态差别不大。

连续光照与光质交替连续光照下生菜地上部鲜重、叶面积显著高于常规光照处理,3种处理下比叶重无差异(表1)。3种光照处理下生菜叶片出现不同程度的伤害,以光质交替连续光照下叶片伤害程度最低,其次是NL,最严重的CL为中等伤害等级。

表1 LED红蓝光连续光照和光质交替连续光照下生菜生长和生理伤害等级

Table 1 Growth and physiological injured degrees of lettuces grown under LED red-blue CL and alternating light

处理 Treatment	地上部鲜重/g Shoot fresh weight	叶面积/cm ² Leafy area	伤害叶面积比例/% Injured leafy area ratio	比叶重/(g/cm ²) Specific leafy weight	伤害等级 Injured degrades
NL	39.53±1.74 c	468.00±72.99 b	18.85±4.14 a	0.05±0.01 a	轻微
CL	45.32±2.35 b	606.00±78.82 ab	26.18±2.37 a	0.04±0.01 a	中等
CL-A	54.71±2.59 a	766.00±92.34 a	7.79±2.23 b	0.04±0.01 a	轻微

注:NL为红蓝光常规光照;CL为连续光照;CL-A为红蓝光交替连续光照。下同。

Note: NL is the conventional illumination of red and blue light; CL is continuous lighting; CL-A is a continuous illumination with alternating red and blue light. The same below.

2.2 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜淀粉含量的影响

6个时刻的意大利生菜在LED红蓝光常规光照下淀粉含量最低,光质交替连续光照下淀

粉含量最高(表2)。昼夜节律方面,常规光照下的意大利生菜淀粉含量昼夜节律正常,连续光照和交替光照下的意大利生菜失去正常的淀粉含量昼夜节律。

表2 LED红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜淀粉含量的影响

Table 2 Effects of LED red-blue continuous light and alternating light on starch content of lettuce

处理 Treatment	取样时刻 Sampling time					
	6:00	12:00	18:00	20:00	22:00	24:00
NL	1.74±0.33 c	1.91±0.40 c	1.82±0.25 c	1.84±0.28 c	1.76±0.27 c	1.84±0.03 c
CL	5.23±0.31 b	5.37±0.28 b	5.19±0.27 b	5.38±0.18 b	5.28±0.49 b	5.45±0.43 b
CL-A	8.94±0.32 a	8.76±0.33 a	8.83±0.26 a	9.04±0.31 a	8.77±0.27 a	8.86±0.14 a

2.3 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜蔗糖含量的影响

6个时刻的意大利生菜在LED红蓝光常规光照下蔗糖含量最低,连续光照处理生菜蔗糖含量高于常

规处理,而光质交替连续光照处理高于连续光照处理或与之无差异(表3)。昼夜节律方面,连续光照下的意大利生菜蔗糖含量昼夜节律正常,常规光照和交替光照下的意大利生菜失去正常的蔗糖含量昼夜节律。

表 3 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜蔗糖含量的影响

Table 3 Effects of LED red-blue continuous light and alternating light on sucrose contents of lettuce

处理 Treatment	取样时刻 Sampling time					
	6:00	12:00	18:00	20:00	22:00	24:00
NL	7.45±0.39 cd	7.35±0.73 b	7.84±0.30 b	7.61±0.50 c	7.27±0.89 c	6.68±0.52 c
CL	7.91±0.59 bcd	8.51±0.28 ab	8.77±0.13 a	8.54±0.39 a	8.57±0.34 ab	8.59±0.34 a
CL-A	8.86±0.23 a	8.81±0.27 a	8.79±0.16 a	8.80±0.08 a	9.22±0.52 a	8.82±0.16 a

2.4 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜过氧化氢含量的影响

如表 4 所示,6 个时刻的意大利生菜在 LED 红蓝光常规光照和光质交替连续光照下过氧化氢含量较低,两者无显著差异,而连续光照下过氧化氢含量显著高于其它处理。昼夜节律方面,所有处理下的意大利生菜过氧化氢含量失去正常的昼夜节律。

表 4 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜过氧化氢含量的影响

Table 4 Effects of LED red-blue continuous light and alternating light on hydrogen peroxide content of lettuce

处理 Treatment	取样时刻 Sampling time					
	6:00	12:00	18:00	20:00	22:00	24:00
NL	1.33±0.38 c	1.39±0.29 b	1.53±0.33 b	1.54±0.30 c	1.65±0.38 b	1.37±0.14 c
CL	2.67±0.48 a	2.74±0.21 a	2.51±0.39 a	2.60±0.21 a	2.50±0.45 a	2.56±0.41 a
CL-A	1.42±0.34 c	1.89±0.21 b	1.61±0.35 b	1.60±0.43 c	1.79±0.17 b	1.66±0.40 bc

2.5 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜超氧阴离子含量的影响

6 个时刻的意大利生菜在 LED 红蓝光常规光照和交替光照下超氧阴离子含量较低,但两者间无差异,而连续光照下超氧阴离子含量最高,显著高于 NL,略高于或等同于 CL 处理(表 5)。昼夜节律方面,常规光照和连续光照下的意大利生菜超氧阴离子含量昼夜节律正常,交替光照下的意大利生菜失去正常超氧阴离子含量昼夜节律。

表 5 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜超氧阴离子含量的影响

Table 5 Effects of LED red-blue continuous light and alternating light on superoxide anion content of lettuce

处理 Treatment	取样时刻 Sampling time					
	6:00	12:00	18:00	20:00	22:00	24:00
NL	0.19±0.02 b	0.22±0.02 c	0.27±0.01 c	0.26±0.02 c	0.28±0.01 c	0.18±0.01 d
CL	1.00±0.11 a	0.74±0.21 b	0.77±0.20 b	0.93±0.37 ab	0.83±0.16 b	0.89±0.22 ab
CL-A	0.75±0.38 a	0.69±0.21 b	0.61±0.35 b	0.60±0.43 bc	0.79±0.17 b	0.66±0.40 bc

2.6 LED 红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜自由基清除率的影响

6 个时刻的意大利生菜在 LED 红蓝光常规光照下自由基清除率最低,交替光照下 DPPH 最高;叶片基部、中部和上部的 DPPH 规律一致(表 6)。昼夜节律方面,连续光照和交替光照下的意大利生菜 DPPH 清除率昼夜节律正常,常规光照下的意大利生菜失去正常 DPPH 清除率昼夜节律。

表6 LED红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜自由基清除率的影响

Table 6 Effects of LED red-blue continuous light and alternating light on DPPH free radical scavenging rate of lettuce

处理 Treatment	取样时刻 Sampling time					
	6:00	12:00	18:00	20:00	22:00	24:00
NL	28.81±5.74 de	17.60±1.98 d	26.06±0.35 d	29.19±5.13 c	20.46±6.55 c	21.50±0.56 c
CL	36.97±3.24 cd	34.51±1.94 b	36.97±3.24 bc	41.59±4.89 ab	43.62±2.60 b	36.09±5.02 b
CL-A	42.89±0.73 ab	52.27±5.94 a	45.91±8.04 a	45.67±5.14 a	52.11±1.57 a	49.67±2.85 a

2.7 LED红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜MDA含量的影响

如表7所示,6个时刻的意大利生菜在LED红蓝光

常规光照下MDA含量最低,连续光照下MDA含量最高,常规光照和交替光照间差异较小。昼夜节律方面,所有处理下的意大利生菜失去正常的MDA含量昼夜节律。

表7 LED红蓝光连续光照和光质交替连续光照对生菜MDA含量的影响

Table 7 Effects of LED red-blue continuous and alternating light on MDA content of lettuce

处理 Treatment	取样时刻 Sampling time					
	6:00	12:00	18:00	20:00	22:00	24:00
NL	1.28±0.48 c	1.06±0.34 bc	1.22±0.32 cd	1.20±0.30 bc	1.31±0.32 bc	1.20±0.24 bc
CL	2.37±0.65 ab	2.44±0.32 a	2.57±0.48 a	2.53±0.35 a	2.30±0.35 a	2.46±0.18 a
CL-A	1.59±0.41 bc	1.49±0.45 b	1.51±0.35 bc	1.35±0.44 bc	1.59±0.18 b	1.66±0.62 b

3 讨论与结论

3.1 光质交替可以提高LED红蓝光连续光照下的生菜产量

LED红蓝光短期连续光照可以提高意大利生菜的产量,但长期连续光照却诱导了意大利生菜的叶片伤害。究其原因,作为连续光照敏感型作物种类^[18],意大利生菜难以耐受长期连续光照胁迫,产生了光胁迫伤害,其机理被认为是活性氧和碳水化合物累积及昼夜节律失调3种生理机制。本试验条件下,连续光照下生菜产生了中等叶片伤害,而红蓝光交替连续光照下生菜生理伤害等级下降到了轻微伤害(伤害叶面积比例由26.18%降至7.79%),表明在相同DLI条件下通过光质交替就可以显著降低LED红蓝光连续光照的生理伤害。从试验数据来分析,光质交替可以显著提高LED红蓝光连续光照下生菜产量,改善了外观品质,提高了生菜商品性。其机制可能如下:一是光质交替连续光照下优化了生菜的冠层形态,增加了叶面积,从而增强了冠层对光照的截获能力,而在连续光照

下则恰好相反;二是光质交替削减了LED红蓝光连续光照诱导的生菜生理伤害,促进了生菜的健康和外观品质。总之,生菜冠层形态和叶片生理对光质交替连续光照的响应与对连续光照的响应间存在截然差异,导致了增产效应,而且外观品质较佳。因此,采用LED红蓝光交替连续光照的光照策略来增加人工光植物工厂产能是可行的。

3.2 光质交替可以削减LED红蓝光连续光照诱导的生菜生理伤害

试验数据表明,光质交替削减了红蓝光连续光照对意大利生菜造成的叶片生理伤害,表现为伤害等级降低,外观品质提高。相同DLI下,NL的光强达到了400 μmol/(m²·s),在人工光条件下属于较强光照,也诱导产生了强光生理伤害,但伤害等级也低于连续光照处理。从本试验数据分析,光质交替削减LED红蓝光连续光照叶片生理伤害的机制并非活性氧和碳水化合物累积及昼夜节律失调共同作用形成。数据表明,光质交替连续光照并非是通过削减生菜冠层的光照截获能力来规避光照胁迫的,而且恰恰相反。其次,光质交替连续光照不是

缓解了叶片中碳水化合物的累积水平来削减伤害的。这一结果与课题组前期发表的结果相一致^[18]。实际上,光质交替连续光照是通过降低了ROS累积水平,削减了氧化胁迫,增加了活性氧清除能力和MDA含量,从而削减了生菜叶片的生理伤害。已有学者提出,通过光质交替使得传统意义上的恒定光强和光质的连续光照变为动态光照,最大程度地驱动光合色素和光受体间的功能交替协同^[12],以获得更优的叶片和冠层形态,提升光能截获能力,从而提高叶片和冠层的光合效率和光形态建成效益,最终获得最佳的产量和品质。LED单一红光或蓝光下多数作物无法健康生长,无法完成生活史,研究证明红蓝光虽不是最优光谱,但是人工光植物工厂植物栽培的充要光谱^[19-20]。光质交替恰好是短时的红光和蓝光单色光栽培,拓展了当前红蓝光同时光照栽培认知,并改变了单色红光和蓝光无法栽培健康植物的局限,填补了红蓝光应用的空白。

3.3 LED红蓝光光质交替连续光照在植物工厂中的应用策略

众多试验表明,LED红蓝光连续光照对生菜和番茄易产生危害,而连续光照与交替光照耦合使用是促进LED红蓝光下生菜、番茄生长且免受连续光照诱导伤害的有效方法^[21]。因此,人工光植物工厂未来最佳的光照方式是交替连续光照,该方法可大幅提高植物生产力,提高资源利用效率^[23]。然而,最佳效益的交替连续光照模式需要基于光强梯度深入研究并优化出交替时长和交替频率等技术参数,集成出最佳的交替连续光照策略。光强是决定连续光照生理伤害的最关键因子,通常连续光照对蔬菜的伤害程度与光强、照射时长有关^[15,24-25],开展多光强下光质交替连续光照栽培效应研究非常必要。较高光强LED红蓝光连续光照条件下,生菜叶片产生伤害,表现为植株生长紧凑且植株高度降低、冠幅缩小,幼叶叶片坏死,老叶边缘干枯变黄^[9],而较低光强的连续光照不会产生生理伤害^[15]。

综上所述,相同DLI下光质交替连续光照提高了产量,生菜产量增加与生理伤害削减、叶面积及冠层增加有关。光质交替连续光照削减了CL诱导生菜产生的生理伤害等级,其直接原因是光质交替连续光照降低了叶片中活性氧含量,增加了自由基清除率,而与蔗糖淀粉累积和昼夜节律无关。本研究结果初步揭示了LED红蓝光光质交替削减连续

光照对生菜的生理伤害机制。

参考文献 References

- [1] Kozai T, Kazuhiro F, Runkle E S. *LED Lighting for Urban Agriculture* [M]. Singapore: Springer Science+Business Media Singapore Pte Ltd, 2016
- [2] 刘文科,张国英,郭健,吴小慧. 植物工厂LED照明理论与应用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2022
Liu W K, Zhang G Y, Guo J, Wu X H. *LED Lighting in Plant Factory: Theory and Applications* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2022 (in Chinese)
- [3] Chen X L, Yang Q C, Song W P. Growth and nutritional properties of lettuce affected by different alternating intervals of red and blue LED irradiation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 223:44-52
- [4] Ohtake N, Ishikura M, Suzuki H. Continuous irradiation with alternating red and blue light enhances plant growth while keeping nutritional quality in lettuce[J]. *HortScience*, 2018, 53(12):1804-1809
- [5] Shao M J, Liu W K, Zhou C B, Wang Q, Li B S. Alternation of temporally-overlapped red and blue light under continuous irradiation affects yield, antioxidant capacity and nutritional quality of purple-leaf lettuce[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 295: 110864
- [6] Shao M J, Liu W K, Zha L Y, Zhou C B, Zhang Y B, Li B S. Differential effects of high light duration on growth, nutritional quality, and oxidative stress of hydroponic lettuce under red and blue LED irradiation[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 268:109366
- [7] Velez-Ramirez A I, Ieperen W V, Vreugdenhil D, Millenaar F F. Plants under continuous light [J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 16(6): 310-318
- [8] 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
- [9] Zha L Y, Zhang Y B, Liu W K. Dynamic responses of ascorbate pool and metabolism in lettuce to long-term continuous light provided by red and blue LEDs [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 163: 15-23
- [10] Zhou C B, Shao M J, Liu W K, Li B S, Wang Q, Liu J Y, Wen Y, Yang Q C. Regulation of ascorbate accumulation and metabolism in lettuce by end-of-production high light irradiation provided by red and blue LEDs [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 189: 104567
- [11] Matsuda R, Yamano T, Murakami K. Effects of spectral distribution and photosynthetic photon flux density for overnight LED light irradiation on tomato seedling growth and leaf injury[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 198:363-369
- [12] Lanoue J, Zheng J M, Little C. Alternating red and blue light-emitting diodes allows for injury-free tomato production with continuous lighting [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:1114
- [13] Fils-Lycaon B, Julianus P, Chillet M, Galas C, Hubert O, Rinaldo D, Mbéguié-A-Mbéguié. Acid invertase as a serious candidate to control the balance sucrose versus of banana fruit during ripening[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 129(2): 197-206
- [14] Clegg K M. The application of anthrone reagent to the estimation of starch in cereals [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1956, 7(1): 40-44
- [15] Zha L Y, Liu W K, Zhang Y B, Zhou C B, Shao M J. Morphological and

- physiological stress responses of lettuce to different intensities of continuous light[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10:1440
- [16] Zhang Z, Liu H, Sun C, Ma Q, Bu H, Chong K, Xu Y. A C_2H_2 zinc-finger protein OsZFP213 interacts with OsMAPK3 to enhance salt tolerance in rice[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 229: 100-110
- [17] Çoruh N, Sağdıçoğlu Celep A G, Özgökçe F. Antioxidant properties of *Prangos ferulacea* (L) Lindl, *Chaerophyllum macropodium* Boiss and *Heracleum persicum* Desf from Apiaceae family used as food in Eastern Anatolia and their inhibitory effects on glutathione-S-transferase [J]. *Food Chemistry*, 2007, 100(3): 1237-1242
- [18] Liu J Y, Liu W K. Regulation of accumulation and metabolism circadian rhythms of starch and sucrose in two leaf-color lettuces by red:blue ratios of LED continuous light[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 196:104811
- [19] Goins G D, Yorio N C, Sanwo M M. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1997, 48:1407-1413
- [20] Goins G D, Yorio N C, Sanwo-Lewandowski M M. Life cycle experiments with *Arabidopsis* grown under red light emitting diodes (LEDs) [J]. *Life Support and Biosphere Science*, 1998, 5:143-149
- [21] Shimokawa A, Tonooka Y, Matsumoto M. Development of next-generation light irradiation techniques for Japanese plant factory system powered by light-emitting diode [J]. *Acta Horticulturae*, 2020, 1271: 85-92

责任编辑:董金波



第一作者简介:刘文科,博士,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员,博士生导师。现任中国照明学会农业照明专业委员会委员、中国农机学会种业装备分会委员、中国照明学会学术工作委员会委员、教育部学位中心学位论文评议专家、中国科协财政项目评审专家、中国科协科技人才奖项评审专家、中国照明学会科普工作委员会委员、国家自然科学基金及黑龙江省自然科学基金项目评审专家、佛山大学岭南讲座教授、河北省矿区生态修复产业技术研究院专家指导委员会委员。现为《照明工程学报》《中国照明电器》编委。主持完成国家863课题、国家自然科学基金面上项目和国家重点研发计划项目课题等科研任务10余项,企业委托项目10余项。至今,以第一作者和通讯作者发表文章350余篇,其中SCI收录期刊上发表46篇。以第一作者撰著《植物工厂LED照明理论与应用》等著作6部。获得国家科技进步奖2项、北京市科学技术奖2项、其他省部级科技奖励7项。已培养硕博研究生20余人。