

LED 红蓝组合光谱下强光照射时长及频率 对生菜生长及营养元素吸收的影响

邵明杰^{1,2}, 刘文科^{1,2*}, 周成波^{1,2}, 王 奇^{1,2}, 李宝石^{1,2}

1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081
2. 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081

摘 要 红蓝光谱作为植物光合色素光吸收的最大波段,是植物光合作用的主要作用光谱,且红蓝 LED 已成为植物工厂的主流光源。因此为实现植物工厂的广泛应用,植物对红蓝光供光模式的响应及其机理亟待研究。在人工光植物工厂中,应用电感耦合等离子体原子发射光谱技术(ICP-AES),研究红蓝 LED 组合光谱下强光照射时长和频率对生菜生长及营养元素吸收的影响。研究包含两个独立试验。试验一设置 5 个光处理:光强为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强光分别在常规光照($150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的光期中间照射 0 h(CK), 0.5 h(HL0.5), 1 h(HL1), 2 h(HL2)和 4 h(HL4)。试验二设置 4 个交替光处理和 1 个常规光照处理(NL, $170 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),在交替光处理中,1 h 的强光($500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)在光期内被分别出现 1 次(A1)、3 次(A3)、6 次(A6)和 12 次(A12),将光强为 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的光期分成相等的时间段。两个试验中光质(4R:1B)、光周期(16/8 h)和处理天数(20 d)相同。结果表明,试验一中生菜的地上部生物量和 N, C, P, K, Ca 和 Mg 等大中量元素累积量均表现出随强光照射时间延长先增加后降低的趋势。和 CK 处理相比,HL4 处理下生菜的地下部干鲜重和比叶重显著提高,叶面积显著降低。HL2 处理下生菜的地上部干重和 N, C, P, K, Ca 和 Mg 元素累积量均最高。在试验二中,相比常规光照,A6 处理显著降低了生菜的地上部鲜重,提高了生菜的根冠比,但其他处理间生菜生物量差异不显著。强光交替照射处理显著提高了生菜碳元素含量,但是强光照射频率对生菜的干物质的量和营养元素累积量无显著影响。综上所述,在光期中间加短时间连续的强光照射能够有效提高生菜体内营养元素和生物量的累积,更适用于植物工厂内的生菜栽培。

关键词 电感耦合等离子体发射光谱; 强光照射; 水培生菜; 养分吸收

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)09-2853-06

引 言

植物工厂作为一种新兴的农业生产模式,可实现工厂内光照、温度、湿度、二氧化碳浓度等环境因素人为调控,使作物生长不受外界自然条件的影响,被认为是 21 世纪解决人口、资源、环境问题的重要途径^[1]。光是控制植物生长发育的重要环境因子之一,对于人工光植物工厂,人工光源的性能和供光策略对其作物生产和经济效益具有重要影响。近年来,由于发光二极管(LED)具有窄波段、高效、光谱光量任意可调等优势,在植物对人工光源组合光谱的生长反应研究中得到广泛应用,针对提高工厂生产率的新型动态 LED

照明策略的研究也日益深入^[2]。

光谱组成是影响植物工厂内植物生长的重要光环境因子,植物在全波谱的自然光下进化而来,不同波段的光谱组成对植物的影响各不相同。红蓝光谱作为植物光合色素光吸收的最大波段,是植物光合作用的主要作用光谱,在调节植物光形态建成和生长代谢方面起着重要作用^[3-5]。植物在单色光条件下往往无法正常生长发育,而红蓝组合光被认为是适合植物生长的光。基于红蓝光在植物生长发育中的不可或缺性和植物工厂目前发展面临的光能耗过高问题,探索 LED 红蓝光最优供光策略可为植物工厂系统能效的提高及广泛应用提供科学的理论支撑。目前对红蓝光在植物生长代谢过程中的相互作用关系尚不明确,但已经有较多关于红蓝光不同

收稿日期: 2020-04-26, 修订日期: 2020-08-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31672202)资助

作者简介: 邵明杰,女,1996年生,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所硕士研究生 e-mail: shao_ranz@163.com

* 通讯作者 e-mail: liuwenke@caas.cn

照射模式对植物影响的研究。例如,有研究表明短期 LED 红蓝光连续光照可提高生菜产量和矿质元素含量,而在相同的能量消耗和日累积光量(DLI)条件下,红光和蓝光交替照射能显著提高生菜的鲜重和干重^[6-7]。与红蓝光同时照射相比,红光延时照射可显著促进生菜的生长,说明光通量密度的日变化有助于促进植物生长^[8]。这些研究表明,非连续供给的红蓝光如同歇供光、交替供光能有效影响植物生长和生理过程,并通过优化产量或品质达到提升植物工厂植物产出效益和光源电能利用率的目的。

生菜是一种世界性的叶菜类蔬菜,具有很高的营养价值和经济价值,常被用作人工光源组合光谱生长反应研究的模式植物。研究表明,生菜的光饱和点低于其他蔬菜,一般生菜在 $500\sim 600\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光强下生长会受到一定程度的光胁迫^[9]。在强光胁迫下,植物吸收更多的光进行光合作用,导致光能过剩。光能系统中过量的激发能积累会引起光合作用的光抑制,产生活性氧(ROS)。有研究表明,适度的强光照射是促进生菜抗氧化物质积累的潜在途径。Oh 等研究发现,与对照组相比,在光强为 $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强光下照射一天的生菜酚类化合物、抗坏血酸、类胡萝卜素等营养物质含量显著提高^[10]。Pérez-López 等通过对绿叶和紫叶生菜进行试验发现,在收获前施加四天的强光照射会增加两种生菜的酚类化合物和抗氧化能力^[11]。因此推测,在光期中间应用短时间的强光照射可以在保证作物产量的同时,通过激活抗氧化物质合成提高植物营养品质。

营养元素含量是影响植物体内活性氧代谢和相应的清除系统的重要因素,植物养分元素胁迫与活性氧代谢之间的关系近年来引起普遍关注^[12]。持续的强光照射下植物易出现叶片失绿、坏死症状,这与缺镁诱导植物体内活性氧代谢失调有关,缺镁引起植物体内光氧化作用增强,从而活性氧含量升高^[13]。强光胁迫下施加外源钙提高了甜椒叶片中超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等活性氧清除酶活性,有效地降低了活性氧积累所引起的伤害,对 PS II (光和系统 II) 反应中心起到保护作用^[14]。营养元素的含量不仅是水培生菜重要的品质指标,也是营养液配方管理的重要依据。因此,探究短时强光照射对植物营养元素吸收的影响,

有利于阐明强光伤害的机制,并为短时强光照在植物工厂中的合理应用提供参考。

本研究在环境可控的人工光植物工厂内,采用波长分别为 655 和 456 nm 的红蓝组合 LED 光源,运用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES),探究 LED 红蓝组合光谱下强光照射时长及频率对生菜生长及矿质元素吸收的影响,以期对植物光配方的探索提供新的研究思路。

1 实验部分

1.1 材料

本研究包含两个试验,均以紫珊生菜(*Lactuca sativa* L. cv. 'Zishan')为供试品种,在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所的人工光植物工厂内完成。采用海绵块(2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm)育苗,待幼苗长出两叶一心时,12 个为一组分别移栽至装有 10L 营养液的水培槽(50 cm×50 cm×5 cm)中并进行光照处理。营养液采用霍格兰配方($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$): 0.75 K_2SO_4 , 0.5 KH_2PO_4 , 0.1 KCl , 0.65 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 1.0×10^{-3} H_3BO_3 , 1.0×10^{-3} $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$, 1.0×10^{-4} $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 1.0×10^{-3} $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.1 EDTA-Fe , 5×10^{-6} $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 3.0 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (pH: 6.3; EC: 1.3 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)。试验期间植物工厂内温度为(23±3) °C,湿度为 40%~50%, CO_2 浓度为环境 CO_2 浓度。LED 灯采用无锡华兆泓光电科技有限公司研发的红蓝组合光强光质即时可调的植物生长灯,灯板规格为 50 cm×50 cm,红、蓝 LED 峰值波长分别为 655 和 456 nm,灯板与水培槽上方的距离均为 45 cm。采用 LI-1500 辐照度测量仪和 LI-190R 光合有效辐射传感器测定并调节栽培槽中心上方 5 cm 处的光强和光质。

1.2 试验设计

试验一设置 5 个光处理:光强为 $500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强光(high light, HL)分别在常规光照($150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的光期中间照射 0 h(CK), 0.5 h(HL0.5), 1 h(HL1), 2 h(HL2)和 4 h(HL4)。光质和光周期分别为 4R:1B, 16/8 h,处理时间为 20 d(见表 1)。

表 1 试验一的光照处理方案

Table 1 Light supply modes of experiment 1

处理	光强/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$		光照时间	
	基础光	强光	基础光	强光
CK	150	—	6:00—22:00	—
HL0.5	150	500	6:00—13:45; 14:15—22:00	13:45—14:15
HL1	150	500	6:00—13:30; 14:30—22:00	13:30—14:30
HL2	150	500	6:00—13:00; 15:00—22:00	13:00—15:00
HL4	150	500	6:00—12:00; 16:00—22:00	12:00—16:00

注: * CK: 强光处理 0 h; HL: 强光处理

试验二设置 4 个交替光处理和 1 个常规光照处理(NL, $170\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),在交替光处理中,1 h 的强光($500\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)在光期内分别出现 1 次(A1)、3 次(A3)、6

次(A6)和 12 次(A12),将光强为 $150\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的光期分为相等的时间段。光质和光周期分别为 4R:1B, 16/8 h,处理时间为 20 天(见图 1)。

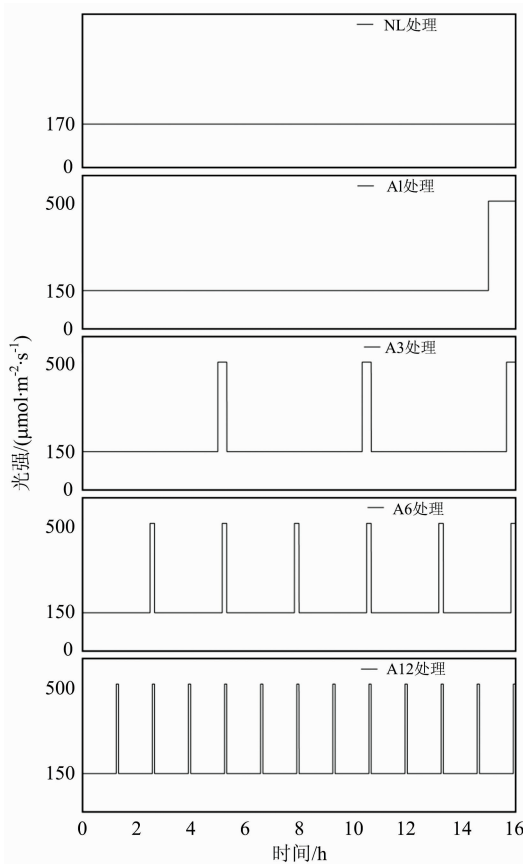


图 1 试验二的光照处理方案

Fig. 1 Light supply modes of experiment 2

1.3 取样与测定方法

光处理结束后, 每个处理随机取 3 株生菜从茎基部分开, 用叶面积仪 (LI-3100, Li-Cor Biosciences, Lincoln, Nebraska, USA) 测量叶面积, 用分析天平称取地上部和地下部鲜重, 将生菜 105 °C 下杀青 15 min, 80 °C 烘干至恒重, 称取干重。

烘干后的植物样品用组织研磨器研磨过筛后采用原子吸收分光光度计 (ATC-006) 和电感耦合等离子体质谱仪 (ATC-155) 测定 K, P, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu 和 Zn 的含量。具体步骤为: 精确称取 0.3 g 研磨过筛后的样品于消煮管中, 加入

60% 高氯酸和浓硝酸的混合酸于 180 °C 加热 >12 h, 消解后加 10 mL 的体积比 1 : 1 HCl, 最后定容到 50 mL 容量瓶, 上机测定。生菜样品中的 C 和 N 含量采用燃烧-同位素分析法进行测定。样品利用 vario PYRO cube 元素分析仪在填充有氧化铜的氧化管中 (920 °C) 燃烧, 燃烧后形成的气体在填有还原铜的管内还原为 N₂ 和 CO₂ (650 °C)。随后, N₂ 和 CO₂ 通过氦载气流经吸附与解吸附柱分离, 然后再进入同位素质谱仪 (IRMS) 进行同位素分析^[15]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件对数据进行处理, 采用 SPSS 25.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验 (LSD 法, $\alpha=0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 强光照射时长对生菜生长的影响

由表 2 可知, 随着强光照射时长增加, 生菜地上部鲜重先增大后减小。与 CK 处理相比, HL1 和 HL2 处理下生菜地上部鲜重分别提高了 21% 和 12%。此外, 与 HL0.5 和 HL4 处理相比, HL1 处理下生菜的叶面积和地上部鲜重显著增加且根冠比显著降低。各处理下生菜地上部干重差异不显著。结果表明, 短期的强光照射可以在不增加能耗的情况下提高生菜产量。HL4 处理下生菜根重和根冠比较高, 地上部鲜重最低, 叶面积最小, 这与之前的研究一致, 即在强光胁迫下生长的生菜根系鲜重和干重显著增加, 而叶面积减少^[10]。植物的生长在很大程度上依赖于植物的光截获和 DLI^[16]。对于植物将更多的生物量分配到地上部而不是根部对增加光截获率, 提高生长速度具有重要意义^[17]。生物量分配不合理, 叶片厚度增加, 必然导致光截获率降低, 这可能是生菜地上部鲜重没有随着强光照射时长增加而持续增加的原因。而短时间强光照射下生菜叶面积和地上部鲜重的增加可能是光合速率随 DLI 的增加而增加的结果。另一方面, 叶面积的变化直接影响光截获, 本试验中生菜地上部鲜重的变化趋势与叶面积的变化趋势一致, 说明随着强光照射时间的增加生菜叶面积减小, 叶片厚度增加。因此, 短时间的强光照射可以提高生菜产量, 而过长时间的强光照射可以通过减少叶面积来抑制生菜的生长, 从而降低产量。

表 2 强光照射时长对生菜生长的影响

Table 2 Effects of high light duration on the growth of lettuce

处理	鲜重/g		干重/g		叶面积/ cm ²	比叶重/ (g · dm ⁻²)	根冠比
	地上部	地下部	地上部	地下部			
CK	19.8bc	4.34b	1.34a	0.24b	584bc	2.0b	0.22b
HL0.5	18.9c	5.33a	1.29a	0.28ab	518cd	2.0b	0.29a
HL1	23.0a	4.38b	1.42a	0.25b	659 a	2.0b	0.19b
HL2	22.1ab	5.36a	1.51a	0.26ab	636ab	2.0b	0.24ab
HL4	17.9c	5.36a	1.27a	0.32a	470 d	2.2a	0.30a

注: a, b, c, d 表示处理间差异显著性 ($p < 0.05$); CK: 强光处理 0 h; HL: 强光处理

2.2 强光照射时长对生菜营养元素含量和累积量的影响

表 3 和表 4 分别为 5 个强光时长处理下生菜矿质元素的

含量和累积量, 可以看出生菜矿质元素含量随强光照射时长的增加无明显的变化趋势。HL2 处理下生菜中 N, P, Fe,

Cu 和 Zn 的含量均低于其他处理。CK 处理下生菜 K, Mg 和 Mn 的含量均低于其他处理, Cu 和 Zn 的含量均高于其他处理。HL0.5 处理下生菜 P, Ca, Mg 和 Mn 元素含量最高。由表 4 可以看出, 生菜的大中量元素(N, C, P, K, Ca, Mg)的累积量均随着强光照射时长的增加呈现先增加后降低的趋势, HL2 处理下生菜的大中量元素累积量最高, CK 处理下最低。相比于 CK 处理, HL1 处理显著提高生菜的 Fe 累积量, HL0.5 和 HL2 处理显著提高生菜的 Mn 累积量, HL0.5, HL2 和 HL4 处理显著降低生菜的 Cu 累积量, 各处理下生菜 Zn 的累积量均无显著差异。本研究中生菜的大中

量元素累积量和其地上部生物量一样, 随强光照射时间的延长有先增加后降低的趋势, 表明强光照射下生菜养分累积量受地上部干重的影响, 光照可以同时影响植物营养元素含量和生物量, 进而影响其营养元素的累积量。强光照射时间过长会导致植物体内产生过多的活性氧(ROS), 无法被清除的 ROS 会引起植物体内生物大分子的损伤, 并改变植物细胞生物膜流动性、离子运输等基本特性^[18], 进而影响营养元素的累积, 而生菜体内营养元素含量降低会进一步加剧光合活性的降低和光合器官的伤害。因此, 提高营养液浓度可能是提高强光照射下生菜产量的重要手段。

表 3 强光照射时长对生菜营养元素含量的影响

Table 3 Effects of high light duration on the nutrient contents of lettuce

处理	N/ (g·100 g ⁻¹)	C/ (g·100 g ⁻¹)	P/ (g·100 g ⁻¹)	K/ (g·100 g ⁻¹)	Ca/ (g·100 g ⁻¹)	Mg/ (g·100 g ⁻¹)	Fe/ (mg·kg ⁻¹)	Mn/ (mg·kg ⁻¹)	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)
CK	5.27 ab	43.78 a	1.08 a	6.91 a	1.21 b	0.24 a	134.50 ab	132.25 b	18.33 a	45.75 a
HL0.5	5.35 a	43.80 a	1.13 a	7.11 a	1.38 a	0.26 a	130.00 b	169.25 a	10.07 b	44.27 a
HL1	5.36 a	43.62 ab	1.10 a	7.51 a	1.24 b	0.25 a	151.50 a	136.25 b	11.85 ab	41.08 ab
HL2	5.17 b	44.07 a	1.06 a	7.08 a	1.21 b	0.25 a	106.25 c	142.00 ab	6.83 b	31.25 b
HL4	5.33 a	43.02 b	1.12 a	7.56 a	1.28 ab	0.25 a	118.13bc	144.75 ab	8.26 b	38.58 ab

注: CK: 强光处理 0 h; a, b, c, d 表示处理间差异显著性

表 4 强光照射时长对生菜营养元素累积量的影响

Table 4 Effects of high light duration on nutrient accumulations of lettuce

处理	N/mg	C/mg	P/mg	K/mg	Ca/mg	Mg/mg	Fe/ μ g	Mn/ μ g	Cu/ μ g	Zn/ μ g
CK	68.19 a	567.03 b	13.90 a	89.29 a	15.61 a	3.07 a	173.59 b	170.15 b	23.74 a	59.05 a
HL0.5	73.10 a	598.51 ab	15.46 a	97.62 a	18.90 a	3.56 a	177.74 b	230.91 a	12.82 b	57.88 a
HL1	78.27 a	636.66 ab	16.07 a	109.25 a	18.14 a	3.66 a	222.12 a	199.70 ab	17.51 ab	60.20 a
HL2	81.16 a	692.72 a	16.69 a	112.05 a	18.98 a	3.85 a	166.98 b	223.16 a	10.74 b	49.00 a
HL4	72.58 a	586.09 ab	15.18 a	102.67 a	17.40 a	3.40 a	160.73 b	195.02 ab	11.31 b	52.76 a

注: CK: 强光处理 0 h; a, b, c, d 表示处理间差异显著性

2.3 强光照射频率对生菜生长的影响

如表 5 所示, 在 CK, A3 和 A12 处理下生菜地上部鲜重显著高于 A6。与 A6 处理相比, A1, A3 和 A12 处理显著增加了生菜的叶面积, 而 A6 处理下生菜根冠比最高, 比其他处理提高了 37%~47%。不同处理间生菜的地上部干重、地

下部干鲜重和比叶重无显著性差异。虽然试验一已经证实, 短时间的强光照射可以促进生菜的生长, 但试验二的结果表明, 当强光时长被分成几个更短的区段进行交替照射时, 其对生菜生长的影响非常小, 这可能是因为光形态反应需要长时间的照射才能完全表达^[20]。

表 5 强光照射频率对生菜生长的影响

Table 5 Effects of alternating frequencies of high light on the growth of lettuce

处理	鲜重/g		干重/g		叶面积/ cm ²	比叶重/ (g·dm ⁻²)	根冠比
	地上部	地下部	地上部	地下部			
CK	13.8 a	2.6a	0.78a	0.11a	376ab	3.67a	0.19b
A1	13.3ab	2.4a	0.74a	0.10a	382 a	3.47a	0.18b
A3	14.1 a	2.5a	0.77a	0.11a	398 a	3.54a	0.18b
A6	11.5 b	2.9a	0.66a	0.12a	331 b	3.48a	0.26a
A12	14.7 a	2.6a	0.62a	0.11a	421 a	3.49a	0.17b

注: CK: 强光处理 0 h; a, b, c, d 表示处理间差异显著性

2.4 强光照射频率对生菜营养元素含量和累积量的影响

表 6 和表 7 分别为 5 个处理下生菜营养元素的含量和累

积量。与 NL 处理相比, 交替光处理下生菜 C 元素含量显著增加, A3 处理下生菜 N 和 Fe 元素的含量显著增加, A6 处

理下生菜 Mn 元素的含量显著增加, 而 A6 和 A12 处理生菜 Ca 元素的含量显著降低。各处理间生菜 P, K, Mg, Cu 和 Zn 各元素的含量均无显著差异。NL 处理下生菜的 Ca, Cu

和 Zn 各元素累积量最高, 生菜的其他元素累积量在 A1 处理下最高, 且各处理间生菜营养元素累积量无显著差异。

表 6 强光照射频率对生菜营养元素含量的影响

Table 6 Effects of alternating frequencies of high light on the nutrient contents of lettuce

处理	N/ (g · 100 g ⁻¹)	C/ (g · 100 g ⁻¹)	P/ (g · 100 g ⁻¹)	K/ (g · 100 g ⁻¹)	Ca/ (g · 100 g ⁻¹)	Mg/ (g · 100 g ⁻¹)	Fe/ (mg · kg ⁻¹)	Mn/ (mg · kg ⁻¹)	Cu/ (mg · kg ⁻¹)	Zn/ (mg · kg ⁻¹)
NL	5.25 b	43.70 c	1.16 a	6.83 a	1.22 a	0.26 a	117.00 b	125.25 b	12.79 a	36.30 a
A1	5.42 ab	46.09 ab	1.25 a	6.16 a	1.09 ab	0.26 a	119.25 b	143.50 ab	5.18 a	28.68 a
A3	5.54 a	46.23 a	1.22 a	6.26 a	1.11 ab	0.27 a	141.75 a	142.50 ab	9.54 a	35.98 a
A6	5.42 ab	45.27 b	1.26 a	6.52 a	1.03 b	0.26 a	133.25 ab	164.25 a	6.15 a	32.58 a
A12	5.31 ab	45.16 b	1.11 a	6.30 a	1.02 b	0.25 a	115.68 b	128.75 b	9.21 a	31.65 a

注: a, b, c, d: 表示处理间差异显著性

表 7 强光照射频率对生菜营养元素累积量的影响

Table 7 Effects of alternating frequencies of high light on nutrient accumulations of lettuce

处理	N/mg	C/mg	P/mg	K/mg	Ca/mg	Mg/mg	Fe/ μ g	Mn/ μ g	Cu/ μ g	Zn/ μ g
NL	40.29 a	335.04 a	8.79 a	52.24 a	9.45 a	1.98 a	90.05 a	96.48 a	10.38 a	28.29 a
A1	44.09 a	372.21 a	10.20 a	49.42 a	8.92 a	2.07 a	100.88 a	123.22 a	4.54 a	24.55 a
A3	40.09 a	339.75 a	8.66 a	45.19 a	8.01 a	1.94 a	100.76 a	100.84 a	6.64 a	25.39 a
A6	37.72 a	315.11 a	8.71 a	45.31 a	7.13 a	1.76 a	92.96 a	115.72 a	4.30 a	22.70 a
A12	41.04 a	349.14 a	8.57 a	48.76 a	7.88 a	1.93 a	89.37 a	99.43 a	7.13 a	24.41 a

注: a, b, c, d: 表示处理间差异显著性

3 结 论

在光期中间进行短时间的强光照射不仅有利于生菜产量的增加, 也有利于营养元素的累积。但是, 当强光照射时间过长, 生菜生物量显著降低, 营养元素累积量也呈下降趋

势。在 DLI 相同的条件下, 将短时间的强光分开进行强弱光交替照射, 显著提高了生菜的 C 元素含量, 但是对生菜生物量的累积和其他营养元素的吸收没有显著影响。因此, 在实际生产中在光期中间进行短时间连续的强光照射是提高生菜产量的有效手段。

References

- [1] Kozai T. Proceedings of the Japan Academy, 2013, 89(10): 447.
- [2] Hu M, Chen Y, Huang L. International Journal of Production Economics, 2014, 152: 49.
- [3] Pfündel E, Baake E. Photosynthesis Research, 1990, 26(1): 19.
- [4] Massa G D, Kim H H, Wheeler R M, et al. Hortscience, 2008, 43: 1951.
- [5] Li Q, Kubota C. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 59.
- [6] Chen X, Yang Q, Song W, et al. Scientia Horticulturae, 2017, 3: 4.
- [7] Kuno Y, Shimizu H, Nakashima H, et al. Environment Control in Biology, 2017, 55(3): 129.
- [8] Jshi T, Kimura K, Matsuda R, et al. Scientia Horticulturae, 2016, 98: 27.
- [9] Fu W, Li P, Wu Y, et al. Horticultural Science, 2012, 39(3): 129.
- [10] Oh M M, Carey E E, Rajashekar C B. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, 47(7): 578.
- [11] Pérez-López U, Sgherri C, Miranda-Apodaca J, et al. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 123: 233.
- [12] WANG Hong, JIN Ji-yun(汪洪, 金继运). Plant Nutrition and Fertilizer Science(植物营养与肥料学报), 2006, 12(5): 738.
- [13] Cakmak I, Marschner H. Plant Physiology, 1992, 98: 1222.
- [14] SUN Ke-xiang, YANG Sha, GUO Feng, et al(孙克香, 杨莎, 郭峰, 等). Plant Physiology Journal(植物生理学报), 2015, 51(3): 280.
- [15] The State Forestry Administration of the People's Republic of China(中华人民共和国国家林业局). Determination of Forest Soil Nitrogen(森林土壤氮的测定). Beijing: China Standards Press(北京: 中国标准出版社).
- [16] Li T, Heuvelink E, van Noort F, et al. Scientia Horticulturae, 2014, 179: 306.

- [17] Marcelis L F, Heuvelink E, Goudriaan J. *Scientia Horticulturae*, 1998, 74(1-2): 83.
- [18] Cakmak I, Kirkby E A. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133: 692.
- [19] Mancinelli A L, Rabino I. *The Botanical Review*, 1978, 44(2): 129.

Effects of High Light Duration and Frequencies on Growth and Nutrient Element Contents of Hydroponic Lettuce Cultivated Under LED Red and Blue Light

SHAO Ming-jie^{1,2}, LIU Wen-ke^{1,2*}, ZHOU Cheng-bo^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, LI Bao-shi^{1,2}

1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Key Lab of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China

Abstract As the largest band of light absorption of plant photosynthetic pigment, the red and blue spectrum is the main function spectrum of plant photosynthesis, and red-blue LED has become the mainstream light source of plant factories. The response of plants to red-blue light and its mechanism needs to be explored. In this study, effects of high light duration and alternating frequencies of high light supplied with red-blue LEDs on growth and nutrient element content as well as accumulation of hydroponic lettuce were conducted using ICP-AES analysis technology in an artificial plant factory. Five treatments were set up in experiment 1: high light ($500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) was irradiated for 0 h (CK), 0.5 h (HL0.5), 1 h (HL1), 2 h (HL2) and 4 h (HL4) in the middle of the light period ($150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), respectively. In experiment 2, set up one conventional treatment (NL, $170 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and four alternate light treatments, in which 1 h high light was separated into four different alternating frequencies: one time (A1), three times (A3), six times (A6) and twelve times (A12). The light quality (4R : 1B), photoperiod (16/8 h), and treatment days (20 days) were the same in the two experiments. The results showed that the biomass production and the accumulation of nutrients of lettuce such as N, C, P, K, Ca, Mg increased first and then decreased with the increase of high light duration. Compared with the CK, the root dry and fresh weight, and specific leaf weight of lettuce grown under HL4, increased significantly, and the leaf area decreased significantly. The dry weight of lettuce and the accumulation of N, C, P, K, Ca and Mg were the highest under HL2. Compared with NL treatment, A6 significantly reduced the fresh weight and increased the root shoot ratio of lettuce, but there was no significant difference among other treatments. The alternating light treatments significantly increased the C element content of lettuce, but the alternating frequencies of high light had no significant effect on the biomass production and the accumulation of nutrient elements. In conclusion, applying a short-term continuous high light irradiation in the middle of the light period can effectively improve the accumulation of nutrients and biomass production in lettuce and is more suitable for lettuce cultivation in plant factories.

Keywords ICP-AES; High light irradiation; Hydroponic lettuce; Nutrient absorption

(Received Apr. 26, 2020; accepted Aug. 19, 2020)

* Corresponding author