

采前 LED 红蓝光连续光照对不同光质与氮形态 水培生菜生长及营养元素吸收的影响

刘文科^{1,2*}, 张玉彬², 查凌雁²

1. 塔里木大学植物科学学院, 新疆 阿拉尔 843300

2. 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 红光和蓝光是植物进行光合作用和光形态建成的主要有效光谱,且红蓝发光二极管(LED)成为植物工厂的主流光源。为实现LED连续光照在植物工厂中的应用,探明植物对红蓝光谱连续光照的响应特征及其与栽培氮形态和LED红蓝光质的关系十分必要。在环境可控的植物工厂内,采用水培方法和ICP-AES测试技术,研究了采收前LED红蓝光连续光照(CL)对不同光质与氮形态水培生菜生长及营养元素吸收的影响。在光照强度 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 下,试验设置了3种红(R)蓝(B)光质:2R:1B(Q_{2:1}),3R:1B(Q_{3:1})和4R:1B(Q_{4:1}),以及2种氮形态:80%硝态氮(N_{80%})和100%硝态氮(N_{100%})。结果表明,CL前,LED光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的地上干重具有显著影响,对地上鲜重及根鲜干重无显著影响,对N,C,P,K,Ca,Mg,Fe,Mn,Cu,Zn的含量及积累量均无显著影响。CL后,光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的根鲜重与根干重有显著影响,对地上鲜干重的影响无显著差异,只对N,P的含量,N,P,Fe,Zn的积累量有显著影响。CL对水培生菜的生物量,矿质元素含量及积累量有显著影响,与CL前相比,地上鲜重,根鲜重,地上干重及根干重均显著增加;各营养元素含量均有不同程度的降低趋势,其中CL显著降低了N,P,Fe,Zn的含量,而对于C,K,Ca,Mg,Mn,Cu的含量无显著影响。CL均显著提高了N,C,P,K,Ca,Mg,Fe,Mn,Cu,Zn的积累量。综上所述,CL前,LED光质与氮形态对生菜地上干重具有显著影响,对各营养元素的含量及积累量均无显著影响。CL后,LED光质与氮形态对根鲜干重具有显著影响,对N,P的含量及N,P,Fe,Zn的积累量具有显著影响,N_{80%}Q_{4:1}处理积累的量最高。与CL处理前相比,水培生菜的地上鲜重,根鲜重,地上干重及根干重均显著增加;CL显著降低了N,P,Fe,Zn的含量,显著提高了N,C,P,K,Ca,Mg,Fe,Mn,Cu,Zn的积累量。因此,栽培光氮条件N_{80%}Q_{4:1}和采前LED红蓝光连续光照结合可以提高水培生菜营养元素含量。

关键词 连续光照;电感耦合等离子体原子发射光谱;光质;生物量;营养元素

中图分类号: O657.3 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)07-2215-07

引言

光是植物生长发育重要的环境因子之一,作为能量来源和环境信号直接调控植物光合作用和形态建成,而且还通过光合作用影响植物某些酶的活性,气孔的开闭,蒸腾作用以及光合产物而间接调节植物营养元素的吸收^[1]。营养元素是植物光合作用中众多生理代谢物质的必需组成元素以及多种

酶的活化调节因子。目前,有关光谱对植物矿质元素吸收的影响已有一些研究报道,表明光谱组成特征对植物营养元素的吸收确实会产生影响,各元素响应机制不一^[2-3]。发光二极管(light-emitting diode,LED)作为第四代电光源,具有可调制光谱,节能和智能控制的优势,在人工光植物工厂和温室补光领域具有应用价值,被誉为设施园艺应用的理想光源^[4]。国内外研究表明,从植物光合有效辐射角度来看,红蓝光谱是植物光合作用的主要作用光谱,光合作用相对量子

收稿日期:2019-07-01,修订日期:2019-11-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31672202)和塔里木大学昆仑学者项目资助

作者简介:刘文科,1974年生,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员,塔里木大学昆仑学者、讲座教授 e-mail:liuwenke

@caas.cn;张玉彬,1993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:zhangyubin26@163.com

刘文科,张玉彬:并列第一作者 *通讯联系人 e-mail:liuwenke@caas.cn

效率较高。LED 红蓝光谱的生理作用、光强组合比例已在设施园艺中广泛研究和广泛应用^[4]。然而, LED 红蓝光在连续光照等极端情况下的应用对植物营养元素吸收影响尚无报道。前期研究证实, 采前 2~5 d 的 LED 红蓝光连续光照能够显著提高水培生菜的产量和品质^[5], 其效果受光谱条件即光强和光质的控制, 有关采前连续光照对水培生菜营养元素吸收和累积影响的研究未见报道, 亟待探索。前期研究表明, 水培氮素形态和水平会影响采前 LED 红蓝光连续光照对生菜产量和品质的提升效果^[6], 因此探讨采前 LED 红蓝光连续光照对水培生菜营养元素吸收和累积的影响必须考虑栽培氮营养情况, 研究结果更具应用价值。

探明采前 LED 红蓝光连续光照调控水培生菜营养元素吸收和累积的影响对提高植物工厂水培蔬菜品质, 提高蔬菜内健康有益营养物质含量有益, 具有重要应用价值。通过调控 LED 连续光照的光谱、光质等, 调增物工厂水培蔬菜中糖、维生素、矿质元素含量, 减少硝酸盐含量, 可提高有益营养元素的供给水平, 尤其是钙、铁、锌、硒等营养元素的富集尤为重要^[7-8]。生菜是一种被人们广泛食用的世界性蔬菜, 非常适宜在植物工厂中规模化种植。生菜体内所含的营养元素是人体健康不可缺少的营养成分, 已有研究表明生菜营养元素含量与光谱组成密切相关, 且 LED 红蓝光组合光下水培生菜营养元素的含量显著高于荧光灯及自然光。至今, 有关栽培过程中在营养液氮素形态与 LED 光谱互作条件下, 采前 LED 红蓝光连续光照前后水培生菜生长及营养元素的变化规律鲜有报道。因此, 本研究在环境可控的植物工厂内, 创新地采用红蓝组合光谱 LED 为光源, 运用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES), 探究了采前 LED 红蓝光连续光照对不同氮形态与 LED 红蓝光质水培生菜的生长及营养元素吸收的影响, 以期为基于生菜营养元素吸收特征确定连续光照 LED 红蓝光谱及氮营养条件提供科学依据, 为进一步开发具有较高营养价值的植物工厂产品提供技术支撑。

1 实验部分

1.1 材料与处理

本试验在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所密闭植物工厂内完成, 以意大利生菜(*Lactuca sativa* L.)为试验材料。种子播于育苗海绵块中(2.0 cm×2.0 cm×2.0 cm), 14 d 后移栽于正常光周期(16/8 h)的 LED 灯板下进行水培。试验处理光质为红蓝光, 各参数如表 1 所示, 设置统一光强处理为 150 μmol·m⁻²·s⁻¹, 红光与蓝光组成比例为 2:1, 3:1, 4:1, 营养液营养液氮形态设置处理为 100%, 80% 硝态氮, 氮素总浓度为 10 mmol·L⁻¹, 铵态氮由硫酸铵提供。移栽 16 d 后进行 96 h 采前连续光照处理(continuous light, CL), CL 处理时 LED 红蓝光质比统一设置为 4:1, 光强为 150 μmol·m⁻²·s⁻¹。CL 处理前及处理后随机取生菜植株测定相关指标。营养液配方(mmol·L⁻¹): 0.75 K₂SO₄, 0.5 KH₂PO₄, 0.1 KCl, 0.65 Mg SO₄·7H₂O, 1.0×10⁻³ H₃BO₃, 1.0×10⁻³ MnSO₄·H₂O, 1.0×

10⁻⁴ CuSO₄·5H₂O, 1.0×10⁻³ ZnSO₄·7H₂O, 5×10⁻⁶ (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O, 0.1 EDTA-Fe, 4 Ca(NO₃)₂·4H₂O。试验期间植物工厂内昼夜温度为(25±1)℃/(22±1)℃, 湿度为 60~70%, CO₂ 浓度为外界大气 CO₂ 浓度。选用 LED 红蓝光组合灯板(50 cm×50 cm)进行光照处理, 红蓝光波长分别为 655 和 430nm。

表 1 试验中栽培生菜的 LED 光质与营养液氮形态组成参数

Table 1 Composition parameters of LED light qualities and nitrogen forms in nutrient solution during lettuce cultivation

处理	红蓝光质比例	硝态氮占比/%
N _{80%} Q _{2:1}	2:1	80
N _{80%} Q _{3:1}	3:1	80
N _{80%} Q _{4:1}	4:1	80
N _{100%} Q _{2:1}	2:1	100
N _{100%} Q _{3:1}	3:1	100
N _{100%} Q _{4:1}	4:1	100

注: N_{80%}和 N_{100%} 分别表示氮形态中硝态氮比例, Q_{2:1}, Q_{3:1}和 Q_{4:1} 分别表示红蓝光中红蓝光光强比例

Notes: N_{80%} and N_{100%} stand for nitrate nitrogen proportion in nutrient solution, and Q_{2:1}, Q_{3:1} and Q_{4:1} act for ratios of red light to blue light

1.2 取样与测定方法

在 CL 前后分别取样测定生长指标, 每个处理随机取 3 株生菜从茎基部分开, 称取地上部分鲜重后将生菜 105℃ 下杀青 15 min, 80℃ 烘干至恒重, 称取干重。烘干的植物样品用组织研磨器研磨成粉状后精确称取 1 g 放入消煮管中, 加入高氯酸和浓硝酸的混合酸于 180℃ 消煮, 冷却定容后用于测定矿质元素含量。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)测定矿质元素含量。

1.3 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, α=0.05)。

2 结果与讨论

2.1 不同 LED 光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜生物量及形态指标的影响

由表 2 可知, CL 前, 光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的地上干重, 叶面积具有显著影响。其中, N_{80%}Q_{3:1}与 N_{80%}Q_{4:1}的地上干重与其他处理具有显著差异。地上干重, N_{80%}Q_{2:1}下最大为 1.46 g, N_{80%}Q_{3:1}下最小为 1.06 g, 且这两个处理间具有显著差异。CL 前, 光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的地上鲜重, 根鲜重及根干重没有显著影响。CL 后, 光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的根鲜重与根干重有显著影响。其中, N_{100%}Q_{3:1}下的根鲜重与其他处理有显著差异, 最大为 2.53g, N_{80%}Q_{2:1}下最小为

1.30g。N_{100%}Q_{2:1}和 N_{100%}Q_{3:1}下的根鲜重与其他处理具有显著差异。N_{80%}Q_{2:1}下的根干重最小为 0.15g, N_{100%}Q_{2:1}下的根干重最大为 0.22 g。CL 后, 光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的地上鲜重及干重的影响没有显著差异。同一光质与营养液氮形态处理下, CL 对水培生菜的各指标有一定影响。CL 后, 水培生菜的地上鲜重及干重, 根干重均有一定程度的增加, N_{100%}Q_{3:1}下, CL 对水培生菜的地上干重具有显著影响。CL 后, 根鲜重均不同程度的减小, CL 对水培生菜的根鲜重无显著影响。除 N_{80%}Q_{4:1}外, CL 对其他处理的地上干重均有显著促进作用。N_{100%}Q_{2:1}和 N_{100%}Q_{3:1}下, CL 对水培生菜的根干重具有显著影响。

表 2 不同 LED 光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜生物量的影响 (g)

Table 2 Effects of continuous light on the biomass of hydroponic lettuce under different light qualities and nitrogen forms of LED (g)

生物量	处理	连续光照前	连续光照后
地上鲜重	N _{80%} Q _{2:1}	32.73a	32.30a
	N _{80%} Q _{3:1}	22.63a	34.73a
	N _{80%} Q _{4:1}	27.13a	38.87a
	N _{100%} Q _{2:1}	25.56a	39.47a
	N _{100%} Q _{3:1}	26.90a	38.87a
	N _{100%} Q _{4:1}	27.06a	38.70a
根鲜重	N _{80%} Q _{2:1}	2.06a	1.30b
	N _{80%} Q _{3:1}	2.10a	1.79b
	N _{80%} Q _{4:1}	2.20a	2.10b
	N _{100%} Q _{2:1}	2.50a	1.97b
	N _{100%} Q _{3:1}	2.67a	2.53a
	N _{100%} Q _{4:1}	2.23a	2.04b
地上干重	N _{80%} Q _{2:1}	1.46a	1.95a
	N _{80%} Q _{3:1}	1.06b	1.77a
	N _{80%} Q _{4:1}	1.12b	2.15a
	N _{100%} Q _{2:1}	1.16a	2.22a
	N _{100%} Q _{3:1}	1.18a	2.17a
	N _{100%} Q _{4:1}	1.20a	1.77a
根干重	N _{80%} Q _{2:1}	0.12a	0.15b
	N _{80%} Q _{3:1}	0.12a	0.17b
	N _{80%} Q _{4:1}	0.12a	0.16b
	N _{100%} Q _{2:1}	0.14a	0.22a
	N _{100%} Q _{3:1}	0.14a	0.21a
	N _{100%} Q _{4:1}	0.13a	0.17b

注: 同列小写字母(a, b)表示处理间在 0.05 水平上的差异显著性(n=3)

Note: The lowercase letters in the same column indicate the significant difference between treatments at 0.05 level and the CL treatments at 0.05 level(n=3)

2.2 连续光照前后不同 LED 光质与营养液氮形态下对水培生菜营养元素含量的影响

营养元素是植物生长发育所需要的基础营养物质, 可分为大量元素、中量元素和微量元素。表 3 和表 4 分别是 LED

表 3 不同 LED 光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜大量和中量元素含量的影响 (g · 100 g⁻¹)

Table 3 Effects of continuous light on the contents of large and medium elements in hydroponic lettuce under different the light qualities of LED and nitrogen forms of nutrient solution (g · 100g⁻¹)

大量和中量元素种类	处理	连续光照前	连续光照后	
N	N _{80%} Q _{2:1}	5.51a	4.12ab	
	N _{80%} Q _{3:1}	5.07a	4.63ab	
	N _{80%} Q _{4:1}	5.49a	5.43a	
	N _{100%} Q _{2:1}	5.33a	4.48ab	
	N _{100%} Q _{3:1}	5.29a	4.30ab	
	N _{100%} Q _{4:1}	5.63a	3.63b	
	C	N _{80%} Q _{2:1}	44.87a	45.55a
		N _{80%} Q _{3:1}	45.15a	44.73a
		N _{80%} Q _{4:1}	43.72a	44.01a
		N _{100%} Q _{2:1}	44.34a	44.40a
		N _{100%} Q _{3:1}	43.73a	44.57a
		N _{100%} Q _{4:1}	42.58a	45.15a
P	N _{80%} Q _{2:1}	0.78a	0.55b	
	N _{80%} Q _{3:1}	0.76a	0.55b	
	N _{80%} Q _{4:1}	0.76a	0.80a	
	N _{100%} Q _{2:1}	0.76a	0.59b	
	N _{100%} Q _{3:1}	0.67a	0.56b	
	N _{100%} Q _{4:1}	0.75a	0.48b	
K	N _{80%} Q _{2:1}	4.67a	4.54a	
	N _{80%} Q _{3:1}	3.80a	4.89a	
	N _{80%} Q _{4:1}	4.48a	4.47a	
	N _{100%} Q _{2:1}	5.21a	3.45a	
	N _{100%} Q _{3:1}	4.91a	3.38a	
	N _{100%} Q _{4:1}	5.35a	3.54a	
Ca	N _{80%} Q _{2:1}	0.83a	0.89a	
	N _{80%} Q _{3:1}	0.78a	0.79a	
	N _{80%} Q _{4:1}	1.02a	0.94a	
	N _{100%} Q _{2:1}	0.99a	1.14a	
	N _{100%} Q _{3:1}	1.10a	1.15a	
	N _{100%} Q _{4:1}	0.97a	1.00a	
Mg	N _{80%} Q _{2:1}	0.37a	0.34a	
	N _{80%} Q _{3:1}	0.35a	0.32a	
	N _{80%} Q _{4:1}	0.38a	0.39a	
	N _{100%} Q _{2:1}	0.41a	0.43a	
	N _{100%} Q _{3:1}	0.39a	0.45a	
	N _{100%} Q _{4:1}	0.38a	0.43a	

注: 同表 2

光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜大、中量元素及微量元素含量的影响。CL 前, LED 光质与营养液氮形态对 N, C, P, K, Ca, Mg 均没有显著影响。CL 后, 不同 LED 光质与营养液氮形态处理对各大、中量元素有不同程度的影响。其中, N_{80%}Q_{4:1}下的 N 含量最高为 5.43 g · 100 g⁻¹, N_{100%}Q_{4:1}下 N 含量最低为 3.63 g · 100 g⁻¹, 且两处理间具有显著差异。N_{80%}Q_{4:1}下的 P 元素含量最高为 0.80 g · 100

g^{-1} , 与其他处理具有显著差异, $N_{100\%} Q_{1:1}$ 时 P 含量最低为 $0.48 g \cdot 100 g^{-1}$ 。LED 光质与营养液氮形态处理对 C, K, Ca, Mg 均没有显著影响。CL 前后, LED 光质与营养液氮形态处理对微量元素的含量均无显著影响。

表 4 不同 LED 光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜微量元素含量的影响 ($mg \cdot kg^{-1}$)

Table 4 Effects of continuous light on microelement contents of hydroponic lettuce under different LED light qualities and nitrogen forms ($mg \cdot kg^{-1}$)

微量元素种类	处理	连续光照前	连续光照后
Fe	$N_{80\%} Q_{2:1}$	153.00a	95.80a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	148.00a	142.90a
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	181.67a	180.50a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	152.00a	109.25a
	$N_{100\%} Q_{3:1}$	185.33a	101.90a
Mn	$N_{100\%} Q_{4:1}$	151.00a	126.50a
	$N_{80\%} Q_{2:1}$	24.10a	30.75a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	25.46a	36.55a
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	46.43a	30.70a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	50.73a	51.95a
Cu	$N_{100\%} Q_{3:1}$	72.30a	50.85a
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	57.13a	46.30a
	$N_{80\%} Q_{2:1}$	5.37a	5.10a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	7.95a	3.43a
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	6.83a	4.69a
Zn	$N_{100\%} Q_{2:1}$	8.27a	8.25a
	$N_{100\%} Q_{3:1}$	12.19a	7.18a
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	9.62a	6.64a
	$N_{80\%} Q_{2:1}$	46.50a	29.15a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	48.40a	36.35a

注: 同表 2

2.3 连续光照前后 LED 光质与营养液氮形态对水培生菜矿物质元素积累量的影响

由表 5 和表 6 可得, CL 前, 不同 LED 光质与营养液氮形态处理对 N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn 的积累量无显著性影响。CL 后, $N_{80\%} Q_{4:1}$ 和 $N_{100\%} Q_{4:1}$ 下, N 的积累量分别为各处理间的最大值和最小值, 分别为 115.85 和 64.96 mg, 且这两个处理间具有显著差异; $N_{80\%} Q_{1:1}$ 下, P 的积累量最高为 17.05 mg, $N_{100\%} Q_{1:1}$ 下, P 积累量最低为 8.60 mg, 且两个处理具有显著差异。CL 后, LED 光质与营养液氮形态处理对 C, K, Ca, Mg, Mn, Cu 的积累量无显著性影响。 $N_{80\%} Q_{1:1}$ 下, Fe 元素的积累量最高为 $384.86 \mu g$, 与其他处理具有显著差异, $N_{100\%} Q_{3:1}$ 下 Fe 元素的积累量最低为 $218.80 \mu g$ 。 $N_{80\%} Q_{1:1}$ 下, Zn 元素的积累量最高为 $116.84 \mu g$, 与其他处理具有显著差异, $N_{100\%} Q_{1:1}$ 下 Fe 元素的积累量最低为 $60.95 \mu g$ 。CL 后, LED 光质与营养液氮形

表 5 不同 LED 光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜大量和中量元素积累量的影响 (mg)

Table 5 Effects of continuous light on the accumulation of large and medium elements in hydroponic lettuce under different light qualities of LED and nitrogen forms of nutrient solution (mg)

大量和中量元素种类	处理	连续光照前	连续光照后
N	$N_{80\%} Q_{2:1}$	79.94a	80.28ab
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	53.99a	92.62ab
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	62.39a	115.85a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	64.13a	99.45ab
	$N_{100\%} Q_{3:1}$	61.35a	93.19ab
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	67.10a	64.96b
C	$N_{80\%} Q_{2:1}$	654.85a	887.52a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	479.28a	904.76a
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	489.16a	946.34a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	514.43a	986.87a
P	$N_{100\%} Q_{3:1}$	518.34a	965.97a
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	510.81a	799.25a
	$N_{80\%} Q_{2:1}$	11.27a	10.67b
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	8.04a	10.98b
K	$N_{80\%} Q_{4:1}$	8.68a	17.05a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	9.40a	13.04ab
	$N_{100\%} Q_{3:1}$	7.92a	12.06b
Ca	$N_{100\%} Q_{4:1}$	8.92a	8.60b
	$N_{80\%} Q_{2:1}$	68.13a	88.38a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	40.49a	97.32a
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	53.58a	96.23a
Mg	$N_{100\%} Q_{2:1}$	63.60a	76.62a
	$N_{100\%} Q_{3:1}$	57.55a	73.16a
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	64.80a	63.71a
Mg	$N_{80\%} Q_{2:1}$	12.07a	17.32a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	8.33a	15.76a
	$N_{80\%} Q_{4:1}$	12.05a	20.05a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	11.82a	25.24a
Mg	$N_{100\%} Q_{3:1}$	12.71a	24.95a
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	11.95a	17.93a
	$N_{80\%} Q_{2:1}$	5.36a	6.63a
	$N_{80\%} Q_{3:1}$	3.66a	6.31a
Mg	$N_{80\%} Q_{4:1}$	4.44a	8.32a
	$N_{100\%} Q_{2:1}$	4.88a	9.60a
	$N_{100\%} Q_{3:1}$	4.49a	9.80a
	$N_{100\%} Q_{4:1}$	4.65a	7.71a

注: 同表 2

态对水培生菜体内各营养元素的积累量有不同程度的影响。

2.4 采收前连续光照对水培生菜生物量, 矿物质元素含量及积累量的影响

采收前连续光照对水培生菜的地上鲜重、根鲜重、地上干重以及根干重具有显著影响, 如表 7 所示, 地上鲜重, 根鲜重, 地上干重及根干重均显著增加。采收前连续光照对水培生菜体内的 N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn 含量及积累量有显著影响。如表 8 所示, 与 CL 前相比, 各营养元

表 6 不同 LED 光质与营养液氮形态下连续光照对水培生菜微量元素积累量的影响(μg)

Table 6 Effects of continuous light on microelement accumulation of hydroponic lettuce under LED different light qualities and nitrogen forms (μg)

微量元素种类	处理	连续光照前	连续光照后
Fe	N _{80%} Q _{2:1}	186.68a	222.03b
	N _{80%} Q _{3:1}	157.91a	295.67b
	N _{80%} Q _{4:1}	200.21a	384.86a
	N _{100%} Q _{2:1}	183.14a	242.32b
	N _{100%} Q _{3:1}	209.72a	218.80b
	N _{100%} Q _{4:1}	183.37a	222.01b
Mn	N _{80%} Q _{2:1}	34.81a	59.91a
	N _{80%} Q _{3:1}	27.21a	71.84a
	N _{80%} Q _{4:1}	58.16a	65.58a
	N _{100%} Q _{2:1}	59.67a	115.11a
	N _{100%} Q _{3:1}	79.64a	109.43a
	N _{100%} Q _{4:1}	73.39a	83.77a
Cu	N _{80%} Q _{2:1}	7.79a	9.94a
	N _{80%} Q _{3:1}	3.67a	15.74a
	N _{80%} Q _{4:1}	8.15a	10.14a
	N _{100%} Q _{2:1}	9.62a	18.26a
	N _{100%} Q _{3:1}	13.49a	15.43a
	N _{100%} Q _{4:1}	12.15a	12.13a
Zn	N _{80%} Q _{2:1}	56.81a	67.52b
	N _{80%} Q _{3:1}	51.65a	75.45b
	N _{80%} Q _{4:1}	57.95a	116.84a
	N _{100%} Q _{2:1}	63.50a	84.89b
	N _{100%} Q _{3:1}	55.63a	66.64b
	N _{100%} Q _{4:1}	58.59a	60.95b

注: 同表 2

素含量均有不同程度的降低趋势, 其中 CL 显著降低了 N, P, Fe, Zn 的含量, 但对于 C, K, Ca, Mg, Mn, Cu 的含量无显著影响。由表 9 可知, 与 CL 前相比, 水培生菜体内的 N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn 等营养元素的积累

表 7 采收前连续光照对水培生菜生物量的影响(g)

Table 7 Effects of continuous light before harvest on biomass of hydroponic lettuce(g)

项目	地上鲜重	根鲜重	地上干重	根干重
连续光照前	27.01b	1.91b	0.58b	0.13b
连续光照后	35.27a	2.32a	2.04a	0.16a

注: 同表 2

表 8 采收前连续光照对水培生菜营养元素含量的影响

Table 8 Effects of continuous light before harvest on nutrient contents of hydroponic lettuce

项目	大、中量元素含量/(g · 100 g ⁻¹)						微量元素含量/(mg · kg ⁻¹)			
	N	C	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
连续光照前	5.39a	44.07a	0.75a	4.74a	0.95a	0.38a	161.83a	46.01a	7.62a	49.32a
连续光照后	4.43b	44.73a	0.59b	4.04a	0.98a	0.39a	126.14b	41.18a	6.63a	37.22b

注: 同表 2

量均有显著提高, 说明 CL 处理显著提高了各营养元素的积累量。

连续光照前, LED 红蓝光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜的地上干重具有显著影响, 但未影响地上部鲜重。这表明, 红光和蓝光调节了多个植物生理过程, 红蓝光质和氮形态作用下同时改变了生菜的光合产物和水分的累积, 致使鲜重无差异, 但干物质得以累积。红光通过光合色素驱动光合作用, 促进碳水化合物形成, 蓝光促进蛋白质与非碳水化合物化合物的积累, 使植物增重^[9]。本研究结果表明, 与连续光照前相比, 采前 LED 红蓝光连续光照显著提高了水培生菜的地上鲜重、地上干重、根鲜重及根干重。这与前人研究结果一致, 连续光照下多种植物干物质累积均显著增加^[6-7]。究其原因, 采前 LED 红蓝光连续光照可能是通过增加了光合作用的时长提高了光合产物的累积。因此, 通过采前连续光照增产是一个有效途径。

植物对矿质元素的吸收主要是通过根表皮细胞的选择运输过程, 细胞膜上的载体蛋白是决定矿质元素吸收种类和数量的重要因素之一。光可通过调节许多酶的活性而作用于多种蛋白质的合成进而影响矿质元素的吸收和运输^[10]。此外, 红蓝光对植物碳氮代谢的侧重性生理作用, 可能改变了营养元素的吸收和利用强度, 导致生菜体内营养元素含量发生变化。有研究表明光谱成分对矿质元素吸收有显著影响, 相对而言, 有关光周期与植物矿质元素吸收间相互关系的研究较少。前人研究发现随着光照时间的延长, 黄瓜对 N, P, Ca 特别是 K 元素的吸收和积累大幅度增加^[11]。本研究中连续光照显著提高了 N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn 的积累量, 却显著降低了 N, P, Fe, Zn 的含量, 说明连续光照后, 生菜营养元素积累量的增加主要是由于生菜地上部干重的增加。有研究比较了不同红蓝光比例对生菜矿质元素吸收的影响, 发现单一红色光谱下生菜 Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu 和 Mo 含量均达最大, 但该光谱条件下生菜生物量最低, 导致一些元素的累积量反而最小。说明光照可同时影响植物矿质元素含量和生物量, 从而影响其矿质元素积累。长期连续光照会导致植物体内产生过量的活性氧(ROS), ROS 能引起蛋白等生物大分子的损伤, 改变生物膜流动性, 离子运输等基本特性^[12]。此外, 光周期还可能通过改变光敏色素系统来改变细胞膜对离子的渗透性^[11]。矿质元素是植物光合作用必需元素, 例如 Mg 是叶绿素的成分, 催化叶绿素合成的酶需要 Fe²⁺ 激活, 而光合作用中水的光解需要 Mn 的参与。因此, 连续光照下生菜体内矿质元素含量的降低会进一步加剧光合活性的降低和光合器官的伤害^[12]。毫无疑问, 连续光照下植物必须吸收更多的矿质元素以维持正常的生长。

表 9 采收前连续光照对水培生菜营养元素积累量的影响

Table 9 Effects of continuous light before harvest on nutrient accumulation of hydroponic lettuce

项目	大、中量元素积累量/mg						微量元素积累量/ μg			
	N	C	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
连续光照前	64.82b	527.81b	9.04b	58.02b	11.49b	4.58b	192.73b	55.48b	9.15b	59.14b
连续光照后	91.06b	915.12a	12.07a	82.57a	20.21a	8.06a	258.39a	84.27a	13.61a	76.93a

注: 同表 2

结果表明, 水培时红蓝光质与氮形态均对生菜矿质养分的吸收特性无影响, 但采前连续光照过程中却发挥了作用。数据表明, 采前 CL 处理前, LED 光质与氮形态对生菜营养元素的含量及积累量均无显著影响, 但在采前 CL 处理后 LED 光质与氮形态对 N, P 的含量及 N, P, Fe, Zn 的积累量具有显著影响, $N_{80\%}Q_{4:1}$ 以处理积累量最高。这表明, 采前 LED 红蓝光连续光照与水培光质和氮形态条件间存在互作关系。因此, 采取栽培光氮条件和采前 LED 红蓝光连续光照相结合的策略可以提高水培生菜营养元素含量, 其中又以 $N_{80\%}Q_{4:1}$ 处理最佳。

建立适宜的照射光谱配方和营养液配方有助于植物工厂功能性蔬菜的研究与生产。本研究弄清了采前 LED 红蓝光连续光照对不同光质与氮形态水培生菜生长及营养元素吸收的影响, 明确了栽培光质与氮形态对采前 LED 红蓝光连续光照实施效果的影响规律, 研究结果将为基于生菜营养元素

吸收特征确定连续光照 LED 红蓝光谱及氮营养条件提供科学依据, 也将为植物工厂生产高营养物质含量和高营养价值蔬菜提供技术支撑, 促进植物工厂产业发展。

3 结 论

弱光下, LED 光质与营养液氮形态互作处理对水培生菜地上干重具有显著影响, 可显著提高水培生菜的地上干重, 对各营养元素的含量及积累量均无显著影响。采收前进行连续光照可以显著增加生菜的地上鲜干重及根鲜干重, 显著降低了 N, P, Fe, Zn 的含量, 显著提高了 N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn 的积累量。因此, 植物工厂水培氮形态与光质条件为 $N_{80\%}Q_{4:1}$ 的采前 LED 红蓝光连续光照可以提高水培生菜体内部分营养元素的含量或累积。

References

- [1] WANG Zhong(王 忠). Plant Physiology(植物生理学). Beijing: China Agriculture Press(北京: 中国农业出版社), 2000.
- [2] Amoozgar A, Mohammadi A, Sabzalian M R. Photosynthetica, 2017, 55(1): 1.
- [3] LIU Wen-ke, YANG Qi-chang(刘文科, 杨其长). Semiconductor Lighting For Protected Horticulture Production(设施园艺半导体照明). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press(北京: 中国农业科学技术出版社), 2012.
- [4] LI Si-jing, YI Xiao-tong, LI You-fang(李思静, 易晓瞳, 李有芳, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(3): 708.
- [5] Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(3): 481.
- [6] YU Yi, YANG Qi-chang, LIU Wen-ke(余 意, 杨其长, 刘文科). Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报), 2015, 26(11): 3361.
- [7] Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. The Journal of Horticultural Science & Biotechnology, 2012, 87(5): 429.
- [8] LIU Wen-ke, ZHA Ling-yan(刘文科, 查凌雁). Plant Spectral Physiology and Regulation Technology in Plant Factory(植物工厂植物光谱生理及其调控). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press(北京: 中国农业科学技术出版社), 2019.
- [9] Rula R J, Tibbitts T W. Hort Science, 1992, 27(5): 427.
- [10] LIU Xiao-ying, XU Zhi-gang, CHANG Tao-tao, et al(刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 等). Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica(西北植物学报), 2010, 30(4): 725.
- [11] LI Hai-yun, LIU Huan-hong(李海云, 刘焕红). Chinese Agricultural Science Bulletin(中国农学通报), 2013, 29(16): 74.
- [12] Cakmak I, Kirkby E A. Physiologia Plantarum, 2008, 133: 692.

Effect of LED Red and Blue Continuous Lighting before Harvest on Growth and Nutrient Absorption of Hydroponic Lettuce Cultivated under Different Nitrogen Forms and Light Qualities

LIU Wen-ke^{1, 2*}, ZHANG Yu-bin², ZHA Ling-yan²

1. College of Plant Science, Tarim University, Alar 843300, China

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

Abstract Red and blue light are the main active spectra of plants for photosynthesis and photomorphogenesis. Also red and blue light-emitting diodes (LEDs) have been the dominant light source for plant factory. Therefore, the response characteristics and mechanism of plants to continuous light of red and blue spectrum need to be explored. In order to realize the application of continuous lighting in plant factories, effects of LED red and continuous blue light (CL) on lettuce growth and nutrient absorption before harvesting were studied using ICP-AES technology in an environmentally controllable plant. Under the light intensity of $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, three kinds of red and blue light were set up: 2R : 1B ($Q_{2:1}$), 3R : 1B ($Q_{3:1}$) and 4R : 1B ($Q_{4:1}$), and two nitrogen forms: 80% nitrate nitrogen ($N_{80\%}$) and 100% nitrate nitrogen ($N_{100\%}$). The results showed that: The interaction between LED light quality and nutrient liquid nitrogen form had a significant effect on the dry shoot weight of hydroponic lettuce and had no significant effect on the fresh weight of the ground and the dry weight of the root before CL. There was no significant effect on the content and accumulation of N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn before CL. After CL, the interaction between light quality and nutrient liquid nitrogen form had significant effects on fresh root weight and dry root weight of hydroponic lettuce, and there was no significant difference in the effect of the fresh shoot and dry weight, only the content of N and P, N. The accumulation of P, Fe and Zn had a significant effect. CL had a significant effect on the biomass, nutrient elements content and accumulation of hydroponic lettuce. Comparing with pre-CL, the fresh shoot weight, fresh root weight, dry shoot weight and dry root weight increased significantly. The content of each nutrient element decreased in different degrees, and CL significantly reduced the contents of N, P, Fe and Zn, the content has no significant effect on the contents of C, K, Ca, Mg, Mn and Cu. CL significantly increased the accumulation of N, C, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, and Zn. In summary, LED light quality and nutrient solution nitrogen form treatment had a significant effect on the dry weight of the ground and had no significant effect on the content and accumulation of various nutrients before CL. The light quality of LED and nitrogen form of the nutrient solution had significant effects on the fresh and dry weight of root and had a significant effect on the content of N and P, the accumulation of N, P, Fe and Zn after CL. Compared with pre-CL, the fresh shoot weight, fresh root weight, dry shoot weight and dry root weight of hydroponic lettuce increased significantly after CL treatment. CL significantly reduced the contents of N, P, Fe and Zn, but N and C contents were significantly increased. The accumulation of P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, and Zn were increased. In conclusion, the combination of cultivation light quality & nitrogen form (i. e. $N_{80\%} Q_{4:1}$) with pre-harvest continuous lighting by LED red and blue light is an optimal strategy for improving contents and accumulation of some kinds of nutrient elements in lettuce.

Keywords Continuous light; Inductively coupled plasma emission spectrum; Light quality; Biomass; Nutrient elements

(Received Jul. 1, 2019; accepted Nov. 9, 2019)

LIU Wen-ke and ZHANG Yu-bin: joint first authors

* Corresponding author