

# 采收前连续光照光质对三种供氮水平的水培生菜营养元素含量的影响

刘文科<sup>1, 2, 3\*</sup>, 张玉彬<sup>2, 3</sup>, 查凌雁<sup>2, 3</sup>, 刘义飞<sup>1</sup>

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, 北京 100081
3. 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** 红蓝复合光是植物生长发育最有效的光谱组合,且红蓝光 LED 成为植物工厂进行水培叶菜生产的主流光源。采收前进行 LED 红蓝光连续光照具有增产和提高品质的作用,在植物工厂水培叶菜生产中具有应用前景。在植物工厂中应用水培方法和 ICP-AES 分析技术,研究了采收前 LED 红蓝光连续光照(CL)光质对三种供氮水平下水培生菜干物质累积和营养元素含量和累积量的影响。在光强  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  下,试验设置了 8, 10 和 12  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  三种供氮水平(N8, N10 和 N12),并在采收前 3 天设计了 2 种红蓝光质(2R:1B 和 4R:1B)的连续光照处理,光强为  $150 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结果表明,增加供氮水平可促进水培生菜地上部干重增加,采收前三天红蓝光 CL 后生菜地上部干重增加。供氮水平对生菜 N, C 和 P 含量无显著影响,而供氮水平的增加提高了 Ca 和 Mg 含量,但 K, Fe, Mn, Cu 和 Zn 含量却随氮水平升高呈现出降低的趋势。生菜地上部中 N, Ca 和 Mg 的累积量随供氮水平的增加而提高,但 C, K, P 和 Fe 的累积量与供氮水平无关,而微量元素 Mn, Cu 和 Zn 随氮水平升高呈现降低趋势。除 C 以外,其他营养元素含量和累积量均受采收前三天 CL 红蓝光质和供氮水平的共同影响。N 浓度水平 N10 和 N12 条件下,红蓝光 4:1 连续光照更有利于获得较高的营养元素含量和累积量。CL 处理显著提高了生菜干物质中 C 的含量,但降低了 K, P 和 Fe 含量,对 N, Ca, Mg, Mn, Cu 和 Zn 的含量无显著影响;CL 增加了 N, C, K, P, Ca 和 Mg 的累积量,但不影响微量元素的累积量。总之,高氮肥供给有利于提高水培生菜干物质产量和 Ca 和 Mg 含量和累积量。高氮水平下辅以 LED 红蓝光 4:1 连续光照有利于增加较高的营养元素含量和累积量。CL 处理提高了生菜干物质中 C 的含量,增加了 N, C, K, P, Ca 和 Mg 的累积量,但对微量元素的累积量无影响。高氮肥和采收前红蓝光 CL 可提高多数大中量营养元素的含量与累积量。

**关键词** 连续光照;电感耦合等离子原子光谱;光质;氮水平;营养元素吸收

**中图分类号:** O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)12-3884-06

## 引言

LED 光源植物工厂是水培生产叶菜的理想设施,可实现周年生产,生长环境因子可调控,最大程度地利用水肥、电能和空间资源,获得高产优质的叶菜产品<sup>[1]</sup>。光照和营养是两个最为重要的生长要素,在很大程度上决定了水培叶菜的产量和品质<sup>[2]</sup>。氮素是植物干物质中含量最高的矿质元素。研究表明,供氮水平可以显著影响水培叶菜的产量和品质<sup>[3]</sup>,适当的氮水平供给对植物工厂实现优质高产至关重要

要。矿质元素含量,尤其是钙、铁、锌、钾等元素是重要的营养物质,也是叶菜品质的重要衡量指标,研究明确氮水平对水培叶菜营养元素含量影响机制具有重要的科学价值。但是,至今有关氮水平对水培叶菜营养元素含量的影响少有报道,亟待弄清。此外,国内外研究表明,采收前 LED 红蓝光连续光照(continuous light, CL)可显著提高水培生菜的产量和营养品质,是解决水培生菜在高氮肥供给条件下硝酸盐累积和营养物质含量偏低的重要技术手段<sup>[4-5]</sup>。而且,查凌雁等<sup>[6]</sup>研究表明,与 30 天相比,15 天红蓝光连续光照更适用于植物工厂水培生菜生产,对比能量投入可获得盈利的更

收稿日期:2019-10-24,修订日期:2020-02-18

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31672202)资助

作者简介:刘文科,1974 年生,塔里木大学植物科学学院讲座教授 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

高产量。然而, 营养液氮水平与采前连续光照对水培叶菜营养元素含量的影响未见报道, 明确营养液氮水平与采前连续光照在调控水培叶菜营养元素含量上的互作关系, 对制定植物工厂水培叶菜优质高产生产营养与光照管理策略具有重要实践意义。

生菜是一种被世界各国人们广泛喜爱的鲜食蔬菜, 也是人工光植物工厂广泛种植的代表性蔬菜种类, 生菜体内所含的矿质元素种类丰富, 有利于人体健康。已有研究表明, 生菜营养元素含量与其生长过程中所受到的照射光谱有直接关系, 且 LED 红蓝光复合光下生菜中一些营养元素的含量高于在荧光灯<sup>[7]</sup>下。供氮水平、采收前红蓝光 CL 光谱以及两者互作条件下水培生菜生物量及营养元素含量的变化尚不清楚, 需要研究揭示。本研究在人工光植物工厂中, 采用红蓝光 LED 光源, 利用电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES)分析技术对采收后生菜内营养元素进行了检测, 以探明不同供氮水平下采收前 LED 红蓝光 CL 对生菜生长及营养元素吸收的影响, 以期为制定植物工厂水培叶菜氮肥供给与光照管理策略提供科学依据, 实现优质高产。

## 1 实验部分

### 1.1 材料

试验在环境光植物工厂中进行, 栽培环境温度为(25±1)℃, 相对湿度为65%±5%。将大小一致的生菜苗随机移栽于长方形塑料栽培槽(180 cm×60 cm×6 cm)内。营养液配方(mmol·L<sup>-1</sup>)<sup>[7]</sup>: 0.4 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O, 0.75 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0.5 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 0.1 KCl-0.65 MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 1.0×10<sup>-3</sup> H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, 1.0×10<sup>-3</sup> MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O, 1.0×10<sup>-4</sup> CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O, 1.0×10<sup>-3</sup> ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 5×10<sup>-6</sup> (NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O, 0.1 EDTA-Fe。采用 LED 红蓝光面板灯进行光照处理, 试验光强为 150 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 红光与蓝光组成比例为 4:1。试验设置 8, 10 和 12 mmol·L<sup>-1</sup> (N8, N10 和 N12), 通过硝态钾调节氮浓度。每个处理下栽培生菜 26 株, 连续培养 16 d, 光周期为 16 h/8 h。在定植后第 17 d, 进行 72 h 不同光质的 CL 处理。2 种光质处理中红光和蓝光组成比例分别设定为 2:1(Q2)和 4:1(Q4), 光强为 150 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。实验中连续光照的光质处理与采收的时间节点(定植后天数)见图 1。

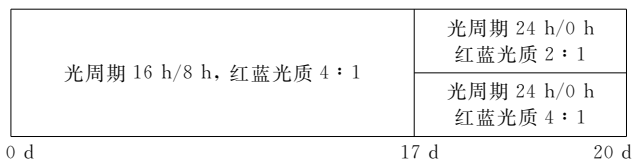


图 1 实验流程中生菜定植后连续光照处理与采收的时间节点及其光照条件

Fig. 1 CL treatment and harvest times as well as light conditions during experiment after transplanting of lettuce

### 1.2 取样与测定方法

在 CL 处理前后分别取样测定相关指标, 于定植后 16 天

和 19 天分两次取生菜地上部样品, 进行各项指标测定。每个处理取样时随机取 4 株生菜, 分成地上部和根系两部分。将生菜地上部放入烘箱中, 在 105℃ 下杀青 15 min, 再在 80℃ 烘干至恒重, 称取干重。烘干样品用组织研磨器研磨成粉状备用。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<sup>[8]</sup>。具体步骤为, 精确称取 0.3 g 样品于消煮管中, 加入 60% 高氯酸和浓硝酸的混合酸于 180℃ 过夜, 消解后加 10 mL 的 1:1 HCl, 定容 50 mL, 上机测定。生菜样品中的 N 和 C 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℃)燃烧, 燃烧后形成的气体在填有还原铜的管内还原为 N<sub>2</sub>, 并生成 CO<sub>2</sub>(650℃)。随后, N<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通过氦载气流经吸附与解吸附柱分离, 再进入同位素质谱仪(IRMS)进行同位素分析<sup>[9]</sup>。

### 1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2013 软件对试验数据进行处理, 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 采收前连续光照对三种供氮水平的水培生菜地上干重的影响

供氮水平对水培生菜的上部干重具有显著影响。由表 1 可知, 随着供应硝态氮水平的增加生菜地上部干重持续增加。此外, 采收前 CL 三天处理显著提高了生菜地上部干重, 但供氮水平之间无显著差异。而且, 两种 CL 光质之间也无显著差异。

表 1 采收前 CL 光质对三种供氮水平的水培生菜的上部干重的影响

Table 1 Effects of CL qualities on the shoot dry weight of hydroponic lettuce under three nitrogen levels

取样时间	处理	上部干重/g
BCL	N8	0.64±0.01c
	N10	0.70±0.00bc
	N12	0.73±0.01b
ACL(2R:1B)	N8	1.19±0.03a
	N10	1.20±0.05a
	N12	1.17±0.02a
ACL(4R:1B)	N8	1.26±0.01a
	N10	1.32±0.04a
	N12	1.31±0.02a

注: 同列数字后的 a, b, c, d 表示处理间差异显著( $p < 0.05$ ); 表中每个值均以平均值±标准误差表示( $n=4$ ), 下表同。

Notes: The little letters (a, b, c, d) following the numbers in the table indicates significant difference between treatments ( $p < 0.05$ ,  $n=4$ ), and the numbers in table are expressed as average value±standard error, the same below.

## 2.2 供氮水平对水培生菜地上部营养元素含量与累积量的影响

营养液供氮水平对生菜地上部中营养元素的含量有不同的影响,因元素种类而异。由表 2 可知,营养液氮水平对生菜 N, C 和 P 含量均无显著影响, Ca 和 Mg 含量随氮水平的升高而逐渐升高。在 12 mmol · L<sup>-1</sup> 氮水平时达到最高。但 K, Fe, Mn, Cu 和 Zn 含量却随氮水平的升高呈现不同程度

的降低趋势,在 8 mmol · L<sup>-1</sup> 氮水平时含量最高。

由表 3 得,生菜地上部中 N, Ca 和 Mg 的累积量随供氮水平的增加而提高,供氮 12 mmol · L<sup>-1</sup> 时累积量达到最大,但是 C, K, P 和 Fe 的累积量与供氮水平无关。微量元素 Mn, Cu 和 Zn 随氮水平升高呈现不同程度的降低趋势,均在 8 mmol · L<sup>-1</sup> 时累积量最大。

表 2 供氮水平对水培生菜地上部营养元素含量的影响

Table 2 Effects of nitrogen level on nutrient content of hydroponic lettuce

氮水平	大中量元素含量/(g · 100 g <sup>-1</sup> )						微量元素含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )			
	N	C	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
N8	5.5 ± 0.0a	38.6 ± 0.4a	6.4 ± 0.2a	0.6 ± 0.0a	0.4 ± 0.0b	0.11 ± 0.00b	159 ± 24a	252 ± 14a	15.3 ± 2.2a	40.2 ± 3.0a
N10	5.7 ± 0.1a	38.5 ± 0.4a	6.3 ± 0.3ab	0.6 ± 0.0a	0.5 ± 0.1b	0.14 ± 0.02ab	102 ± 18ab	121 ± 24b	7.5 ± 1.3b	22.2 ± 5.3b
N12	5.5 ± 0.2a	38.6 ± 0.5a	5.6 ± 0.2b	0.5 ± 0.0a	0.7 ± 0.0a	0.17 ± 0.02a	77 ± 13b	136 ± 14b	9.1 ± 1.2b	26.6 ± 5.3ab

表 3 氮水平对水培生菜营养元素累积量的影响

Table 3 Effects of nitrogen level on nutrient accumulation of hydroponic lettuce

氮水平	大中量元素积累/mg						微量元素积累/μg			
	N	C	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
N8	36.6 ± 1.4b	254 ± 8a	41.9 ± 0.6a	4.3 ± 0.4a	2.8 ± 0.2b	0.7 ± 0.0b	105 ± 18a	166 ± 13a	10.0 ± 1.4a	26.4 ± 1.9a
N10	38.9 ± 1.2ab	260 ± 10a	42.4 ± 2.5a	3.9 ± 0.2a	3.3 ± 0.4b	0.9 ± 0.1b	68 ± 10a	81 ± 17b	5.1 ± 0.9b	15.0 ± 3.7b
N12	42.9 ± 1.8ab	303 ± 24a	43.8 ± 2.6a	4.2 ± 0.1a	5.3 ± 0.3a	1.3 ± 0.1a	62 ± 13a	107 ± 14b	7.1 ± 0.9ab	20.9 ± 4.2ab

## 2.3 采收前 CL 光质对三种供氮水平水培生菜营养元素含量与累积量的影响

由表 4 知,除 C 以外,其他营养元素含量均受 CL 红蓝光质和供氮水平的影响。随采收前 CL 光质红光比例的增加,8 mmol · L<sup>-1</sup> 下的 Ca, Mg 和 Cu 含量显著增加,10 mmol · L<sup>-1</sup> 下的 K 含量显著降低,12 mmol · L<sup>-1</sup> 下的 Cu 含量显著升高。除此之外,采收前 CL 光质处理对同一氮水平下的生菜营养元素含量均无显著影响。CL 红蓝光质 2 : 1 下,氮水平对生菜 N, C, K 和 P 的含量无显著影响, Ca 和 Mg 的含量随氮水平的升高而显著升高,微量元素 Fe, Mn, Cu 和 Zn 的含量随氮水平的升高呈现先升高后降低的趋势。CL 红蓝光

质 4 : 1 下,氮水平对 N, C, Fe, Mn, Cu 和 Zn 含量均无显著影响, Ca 和 Mg 的含量在 12 mmol · L<sup>-1</sup> 时达到最大,氮水平对 N 和 C 含量无显著影响。K, P, Ca 和 Mg 含量均在 12 mmol · L<sup>-1</sup> 时达到最大值,微量元素 Fe, Mn, Cu 和 Zn 含量与 CL 红蓝光质 2 : 1 下的变化趋势一致,均在 10 mmol · L<sup>-1</sup> 时达到最大。本试验中,采收前 CL 光质对不同氮水平水培生菜营养元素含量的影响不一,其中,对 C 含量无显著影响,N10Q2 下, K 和 Mn 含量取得最大值,N10Q4 下, Fe, Cu 和 Zn 含量达到最大,N12Q2 下, N 和 Mg 含量最大,N12Q4 下, P 和 Ca 含量最大。

表 4 采收前 CL 光质对不同氮水平水培生菜营养元素含量的影响

Table 4 Effects of pre-harvest CL light quality on nutrient contents of hydroponic lettuce under different nitrogen levels

处理	大中量元素含量/(g · 100 g <sup>-1</sup> )						微量元素含量/(mg · kg <sup>-1</sup> )			
	N	C	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
N8Q2	5.1 ± 0.3ab	41.8 ± 0.2a	5.3 ± 0.3ab	0.43 ± 0.02ab	0.50 ± 0.05c	0.12 ± 0.01d	41.3 ± 3.5b	81 ± 4b	3.9 ± 0.2c	11.2 ± 1.3b
N8Q4	4.9 ± 0.1b	42.3 ± 0.4a	4.7 ± 0.2b	0.38 ± 0.02b	0.63 ± 0.02b	0.16 ± 0.01bc	55.7 ± 2.2ab	99 ± 6ab	6.3 ± 0.6ab	15.9 ± 1.2ab
N10Q2	5.6 ± 0.2a	41.2 ± 0.5a	5.5 ± 0.2a	0.46 ± 0.01a	0.63 ± 0.02b	0.16 ± 0.00c	59.1 ± 7.6ab	128 ± 18a	5.9 ± 0.8abc	16.2 ± 2.6ab
N10Q4	5.5 ± 0.1ab	42.2 ± 0.1a	4.6 ± 0.1b	0.43 ± 0.02ab	0.68 ± 0.01ab	0.16 ± 0.00c	65.1 ± 5.1a	108 ± 9ab	6.9 ± 0.8a	19.1 ± 1.8a
N12Q2	5.7 ± 0.2a	41.6 ± 1.0a	5.2 ± 0.3ab	0.46 ± 0.02a	0.74 ± 0.06a	0.18 ± 0.01a	58.9 ± 8.8ab	112 ± 20ab	4.4 ± 0.1bc	15.4 ± 3.2ab
N12Q4	5.5 ± 0.1ab	41.2 ± 0.2a	5.5 ± 0.1a	0.48 ± 0.01a	0.78 ± 0.01a	0.18 ± 0.00ab	58.8 ± 1.7ab	104 ± 6ab	6.6 ± 0.7a	18.5 ± 0.7a

除 C 以外,其他营养元素累积量均受 CL 红蓝光质和供氮水平的共同影响。由表 5 知,随采收前 CL 光质红光比例的增加,8 mmol · L<sup>-1</sup> 下的 Ca, Mg 和 Cu 累积量显著增加,10 mmol · L<sup>-1</sup> 下的 K 累积量显著降低,12 mmol · L<sup>-1</sup> 下的

K 和 Cu 累积量显著升高。此外,采收前 CL 光质处理对同一氮水平下的生菜营养元素累积量均无显著影响。采收前 CL 红蓝光质 2 : 1 下,营养液氮水平对 N, C, P, Cu 和 Zn 的累积量无显著影响, K, Fe, Mn, Cu 和 Zn 的累积量随着氮水

平升高先升高后降低, Ca 和 Mg 的累积量随氮水平的升高而逐渐升高。采收前 CL 红蓝光质 4:1 下, 氮水平对 C, Mg, K, Fe, Mn, Cu 和 Zn 的累积量无显著影响, N, P 和 Ca 的

累积量随氮水平的升高而逐渐升高。N10Q2 下, N, C 和 Mg 的累积量最大, N10Q4 下, Fe 累积量最大, N12Q4 下, K, P, Ca, Mg, Cu 和 Zn 达到最大。

表 5 采收前 CL 光质对不同氮水平水培生菜营养元素累积量的影响

Table 5 Effects of pre-harvest CL light quality on nutrient accumulations of hydroponic lettuce under different nitrogen levels

处理	大中量元素积累/mg						微量元素积累/ $\mu\text{g}$				
	N	C	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
N8Q2	60.9 $\pm$ 5.6ab	519 $\pm$ 37a	64.7 $\pm$ 1.1ab	5.4 $\pm$ 0.5ab	6.3 $\pm$ 0.7c	1.5 $\pm$ 0.2b	51.2 $\pm$ 4.3b	101 $\pm$ 9b	4.9 $\pm$ 0.3c	13.9 $\pm$ 1.5b	
N8Q4	60.0 $\pm$ 7.8b	514 $\pm$ 14a	57.6 $\pm$ 3.0bc	4.7 $\pm$ 0.3b	7.8 $\pm$ 0.3b	2.0 $\pm$ 0.1a	68.6 $\pm$ 3.5ab	122 $\pm$ 9ab	7.8 $\pm$ 0.9ab	19.7 $\pm$ 1.8ab	
N10Q2	69.7 $\pm$ 2.7ab	532 $\pm$ 34a	70.1 $\pm$ 2.6a	5.8 $\pm$ 0.4a	8.0 $\pm$ 0.3b	1.9 $\pm$ 0.1a	75.5 $\pm$ 10.5a	164 $\pm$ 26a	7.6 $\pm$ 1.2abc	20.8 $\pm$ 3.7ab	
N10Q4	67.6 $\pm$ 3.1ab	508 $\pm$ 21a	56.0 $\pm$ 2.7b	5.2 $\pm$ 0.3ab	8.3 $\pm$ 0.3b	1.9 $\pm$ 0.1a	79.8 $\pm$ 7.6a	133 $\pm$ 14ab	8.5 $\pm$ 1.1a	23.5 $\pm$ 2.8a	
N12Q2	66.5 $\pm$ 1.1ab	486 $\pm$ 20a	60.9 $\pm$ 3.6bc	5.4 $\pm$ 0.2ab	8.7 $\pm$ 0.6ab	2.1 $\pm$ 0.0a	69.1 $\pm$ 9.3ab	131 $\pm$ 22ab	5.3 $\pm$ 0.0bc	18.0 $\pm$ 3.4ab	
N12Q4	71.1 $\pm$ 3.3a	537 $\pm$ 10a	70.9 $\pm$ 1.3a	6.2 $\pm$ 0.1a	10.1 $\pm$ 0.2a	2.3 $\pm$ 0.1a	76.4 $\pm$ 1.9a	135 $\pm$ 10ab	8.6 $\pm$ 0.9a	24.0 $\pm$ 0.7a	

#### 2.4 采收前两种光质 CL 前后水培生菜地上部营养元素含量与累积量的差异比较

由表 6 可知, 与 CL 前相比, 采收前 CL 后, C 的含量显著升高了 8.14%; 但是, K、P 和 Fe 含量显著降低, 分别降

低了 16.12%, 25.42% 和 45.62%, 采前 CL 对 N, Ca, Mg, Mn, Cu 和 Zn 的含量无显著影响。由表 7 知, CL 后, N, C, K, P, Ca 和 Mg 的累积量均显著升高, 但微量元素的累积量无显著变化。

表 6 采收前 CL 前后水培生菜营养元素含量的差异比较

Table 6 Comparison of nutrient contents in hydroponic lettuce before and after pre-harvest CL

取样时间	大中量元素含量/(g $\cdot$ 100 g $^{-1}$ )						微量元素含量/(mg $\cdot$ kg $^{-1}$ )				
	N	C	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
BCL	5.6 $\pm$ 0.1a	38.6 $\pm$ 0.0b	6.1 $\pm$ 0.2a	0.6 $\pm$ 0.0a	0.5 $\pm$ 0.1a	0.14 $\pm$ 0.0a	100 $\pm$ 12a	170 $\pm$ 42a	10.6 $\pm$ 2.4a	29.7 $\pm$ 5.4a	
ACL	5.4 $\pm$ 0.2a	41.7 $\pm$ 0.2a	5.1 $\pm$ 0.1b	0.4 $\pm$ 0.0b	0.7 $\pm$ 0.1a	0.16 $\pm$ 0.0a	55 $\pm$ 4b	105 $\pm$ 8a	5.7 $\pm$ 0.4a	16.1 $\pm$ 1.3a	

注: BCL 取样数值是三个氮水平处理的平均值( $n=12$ ), ACL 是三个氮水平(每个氮水平下有 2 个 CL 光质子处理)的平均值( $n=24$ )。

Notes: numbers of BCL are averages calculated from twelve replicates of three nitrate levels( $n=12$ ), while numbers of ACL are averages calculated from twenty four replicates of three nitrate levels being composed of six CL treatments( $n=24$ )

表 7 采收前 CL 前后水培生菜营养元素累积量的差异比较

Table 7 Comparison of nutrient accumulations of hydroponic lettuce before and after pre-harvest CL

取样时间	大中量元素积累/mg						微量元素积累/ $\mu\text{g}$				
	N	C	K	P	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn	
BCL	39.5 $\pm$ 1.9b	272 $\pm$ 15b	41.9 $\pm$ 0.2b	4.1 $\pm$ 0.1b	3.8 $\pm$ 0.8b	1.0 $\pm$ 0.2b	68.7 $\pm$ 4.4a	118 $\pm$ 19a	7.1 $\pm$ 1.2a	20.8 $\pm$ 3.3a	
ACL	65.9 $\pm$ 2.8a	516 $\pm$ 3a	63.4 $\pm$ 1.4a	5.5 $\pm$ 0.2a	8.2 $\pm$ 0.7a	1.9 $\pm$ 0.1a	71.4 $\pm$ 2.5a	131 $\pm$ 11a	6.6 $\pm$ 0.2a	19.9 $\pm$ 1.6a	

蔬菜中营养元素含量是一直被关注的品质指标, 通过氮肥和光谱管理提高水培生菜中营养元素含量具有营养学价值。硝态氮是无土栽培中使用的主要无机氮源, 同时也是植物根系吸收的主要氮形式<sup>[10]</sup>。植物体内的氮素水平可通过有关信号调节植株地上部及根系的生长速率。在一定范围内, 提高氮素水平可以促进植物的生长<sup>[11]</sup>。试验结果表明, 在 8~12 mmol $\cdot$ L $^{-1}$  浓度范围内, 随着营养液氮水平的增加水培生菜地上部干重显著提高。光可影响植物对氮素的吸收。本研究表明, 在采收前给生长在不同的氮水平条件下生菜施加不同光质的 CL 会削弱氮水平对生菜生长的影响, 相比较而言红蓝光比例对生菜地上部干重的影响更为显著。有研究也表明, 在一定范围内提高红光比例生菜能获得更高的生物量。采收前 72 h 红蓝光 CL 后生菜地上部干重显著增加, 这一结果与以往研究报道相一致<sup>[12]</sup>。

研究中, 供氮水平的增加虽然提高了生菜地上部 Ca 和 Mg 含量, 但降低了 K, Fe, Mn, Cu 和 Zn 含量, 且对 N, C 和 P 元素的含量无显著影响。张祥明等<sup>[13]</sup>研究发现, 在 P 和 K 供应量不变的条件下, 适当的增加氮素施用量能够提高水稻中 K 元素的含量, 但施氮量过高反而不利于 K 的吸收。景立权等<sup>[14]</sup>的研究结果也说明氮肥施用量过高不利于玉米 N, P 和 K 的吸收利用及其产量的增加。除大量元素外, 作物对微量元素的吸收也受供氮水平影响。本研究中, 高氮水平下, 生菜地上部的 Fe, Zn, Cu 和 Mn 含量均显著降低。以往研究也发现, 一些作物(大豆籽粒、稻米)中的微量元素含量随着施氮量的增加表现为先上升后下降的趋势<sup>[15-16]</sup>。究其原因, 可能是氮素用量增加一定程度上会影响土壤耕层中 Fe, Mn, Cu 和 Zn 等微量元素的有效性, 从而影响作物对微量元素的吸收<sup>[17]</sup>。这表明, 供氮水平对水培生菜体内不同营养元

素吸收的影响是不一致的,高氮水平反而不利于生菜多种矿质元素的吸收。

光合作用是植物体内碳氮代谢的能量来源,因而光照变化可通过光合作用调节植物体内碳氮代谢,从而影响和含氮化合物的含量。反过来,由于氮素是作植物光合作用过程中多种蛋白酶和叶绿素的重要组成元素,因而氮肥可通过增加叶片叶绿素含量来促进植物光合作用,从而提高植物养分的积累。光氮互作既可以提高植物对光的利用效率,同时也可促进植物对氮肥的吸收利用率。从试验结果来看,除 C 以外,其他营养元素含量和累积量均受采收前三天 CL 红蓝光质和供氮水平的共同影响,N10 和 N12 条件下,红蓝光 4:1 连续光照更有利于获得较高的营养元素含量和累积量。其原因在高氮肥供给增加了氮代谢强度,而红蓝光 CL 延长了生菜光合作用时间,可提供更多光合作用产物。CL 红蓝光种比高红光比例比低红光比例更有利于光合作用和碳代谢,从而促进了营养元素的吸收。由此可以认为,高氮肥和红蓝光 CL(特别是红蓝光 4:1 光质)可促进绝大部分大中量营养元素的含量与累积量。但以往研究表明,由于蓝光能够诱导质膜上离子通道的开放,从而促进矿质元素的输出<sup>[18-19]</sup>,在红光为主要光质的光谱范围内( $R > 50\%$ ),生菜<sup>[20-21]</sup>、黄瓜、桑树幼苗等植物的矿质元素含量均表现为随着蓝光比例的增加而升高的趋势。本研究与以往报道的结果有所差异,可能是因为光氮互作的影响。此外,与矿质元素吸收及运输相关的酶的基因表达水平及酶活也受光质调控<sup>[20]</sup>。然而,光质与氮素互作对矿质元素吸收的影响机理尚不明确。李海云<sup>[22]</sup>研究发现黄瓜对 N, P 和 Ca 特别是 K 矿质养分的吸收和积累随着光照时间的延长大幅度增加。但本研究结果表明,除 C 元素外,三种供氮水平条件下,两种红蓝光质 CL 处理降低了作物中 K, P 和 Fe 含量,对 N, Ca, Mg, Mn, Cu 和 Zn

的含量无显著影响。而由于连续光照下干物质质量的显著增加,生菜 N, C, K, P, Ca 和 Mg 的累积量有所增加,但微量元素累积量不受影响。

### 3 结 论

本试验条件下,增加供氮水平可促进水培生菜水上部分干重增加,采收前三天红蓝光 CL 后生菜地上部干重增加,但供氮水平之间及 CL 光质之间无显著差异。营养液氮水平对生菜 N, C 和 P 含量均无显著影响, Ca 和 Mg 含量随供氮水平的升高而逐渐升高,但 K, Fe, Mn, Cu 和 Zn 含量却随氮水平升高呈现出降低趋势。生菜地上部中 N、Ca 和 Mg 的累积量随供氮水平的增加而提高,但 C, K, P 和 Fe 的累积量与供氮水平无关,而微量元素 Mn, Cu 和 Zn 随氮水平升高呈现降低趋势。除 C 以外,其他营养元素含量和累积量均受采收前三天 CL 红蓝光质和供氮水平的共同影响, N10 和 N12 条件下,红蓝光 4:1 连续光照更有利于获得较高的营养元素含量和累积量。三种供氮水平条件下,两种红蓝光质 CL 处理提高了生菜干物质中 C 的含量,但降低了 K, P 和 Fe 含量,对 N, Ca, Mg, Mn, Cu 和 Zn 的含量无显著影响; CL 增加了 N, C, K, P, Ca 和 Mg 的累积量,但不影响微量元素的累积量。

高氮肥供给有利于提高水培生菜干物质产量和 Ca、Mg 含量和累积量。CL 处理提高了生菜干物质中 C 的含量,增加了 N, C, K, P, Ca 和 Mg 的累积量,但不影响微量元素的累积量。高氮水平前提下,采用红蓝光 4:1 的光质进行采收前 72 h 连续光照有利于获得较高的营养元素含量和累积量。高氮肥和红蓝光采收前 CL 可提高水培生菜中多数大中量营养元素的含量与累积量。

### References

- [1] LIU Wen-ke, ZHA Ling-yan(刘文科, 查凌雁). Plant Spectral Physiology and Regulation Technology in Plant Factory(植物工厂植物光质生理及其调控). Beijing: China Agriculture Science & Technology Press(北京: 中国农业科学技术出版社), 2019. 10.
- [2] ZHANG Ying-peng, XU Xu-jun, LIN Xian-yong, et al(张英鹏, 徐旭军, 林咸永, 等). Plant Nutrition and Fertilizer Science(植物营养与肥料学报), 2004, 10(5): 494.
- [3] Liu Wenke, Yang Qichang. Acta Agriculturae Scandinavica Section B- Soil and Plant Science, 2012, 62: 109.
- [4] Zhou Wanlai, Liu Wenke, Yang Qichang. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(3): 481.
- [5] Bian Zhonghua, Cheng Ruifeng, Wang Yu, et al. Environmental and Experimental Botany, 2018, 153: 63.
- [6] ZHA Ling-yan, ZHANG Yu-bin, LI Zong-geng, et al(查凌雁, 张玉彬, 李宗耕, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2019, 39(8): 2474.
- [7] ZHA Ling-yan, LIU Wen-ke(查凌雁, 刘文科). Journal of Plant Physiology(植物生理学报), 2017, 53(9): 1735.
- [8] BAO Shi-dan(鲍士旦). Agrochemical Analysis of Soil(土壤农化分析). Beijing: China Agriculture Press(北京: 中国农业出版社), 2005. 180.
- [9] The State Forestry Administration of the People's Republic of China(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), 2015. 1.
- [10] ZHANG Zhen-hua(张振华). Journal of Plant Nutrition and Fertilizers(植物营养与肥料学报), 2017, 23(1): 217.
- [11] Schiefelbein J W, Benfey P N. Plant Cell, 1994, (3): 1147.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Xiang-ming, WANG Wen-jun, LING Guo-hong, et al(张祥明, 王文军, 凌国宏, 等). Chinese Journal of Soil Science(土壤通报), 2014, 45(1): 180.
- [14] JING Li-quan, ZHAO Fu-cheng, WANG De-cheng, et al(景立权, 赵福成, 王德成, 等). Acta Agronomica Sinica(作物学报), 2013, 39

- (8): 1478.
- [15] YUAN Ji-chao, LIU Cong-jun, E Sheng-zhe, et al(袁继超, 刘丛军, 俄胜哲, 等). Journal of Plant Nutrition and Fertilizers(植物营养与肥料学报), 2006, 12(2): 183, 200.
- [16] ZHANG Guo-zheng, ZHOU Qin, HE Xiao-hong, et al(张国正, 周 琴, 何小红, 等). Soybean Science(大豆科学), 2009, 28(6): 1034.
- [17] ZHANG Shu-xiang, WANG Xiao-bin, JIN Ke, et al(张淑香, 王小彬, 金 柯, 等). Journal of Plant Nutrition and Fertilizers(植物营养与肥料学报), 2001, 7(4): 391.
- [18] Amoozgar A, Mohammadi A, Sabzalian M R. Photosynthetica, 2017, 55(1): 85.
- [19] Lin C. Plant Cell, 2002, 14: S207.
- [20] CHEN Xiao-li, ZHANG Xin, YANG Zi-qiang, et al(陈晓丽, 张 馨, 杨子强, 等). Chinese Journal of Agrometeorology(中国农业气象), 2018, 39(2): 100.
- [21] XU Li, WEI Hui, QI Lian-dong, et al(许 莉, 尉 辉, 齐连东, 等). China Fruit Vegetables(中国果菜), 2010, (4): 19.
- [22] 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.

## Effects of Continuous Light Before Harvest on Nutrient Element Contents of Hydroponic Lettuce Cultivated Supplied With Three Nitrogen Levels and Two LED Red and Blue Light Qualities

LIU Wen-ke<sup>1, 2, 3\*</sup>, ZHANG Yu-bin<sup>2, 3</sup>, ZHA Ling-yan<sup>2, 3</sup>, LIU Yi-fei<sup>1</sup>

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

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3. Key Lab of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China

**Abstract** Red light and blue light are the main active spectra for plant photosynthesis and photomorphogenesis, also red and blue light LEDs have been the dominant light sources for hydroponic leafy vegetable production in plant factory. It is suggested that continuous light (CL) of red and blue light before harvest can improve the yield and quality of hydroponic leafy vegetables. In this study, effects of nitrate levels supplied and 72 h continuous light before harvest with the red and blue light on shoot dry weight and nutrient element content as well as accumulation were conducted using hydroponic method and ICP-AES analysis technology. Three nitrate levels (8, 10 and 12 mmol · L<sup>-1</sup>, N8, N10 and N12) and two light qualities (2R : 1B and 4R : 1B) of 150 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> were designed. The results showed that shoot dry weight increased with supplied nitrate level, and CL also improved shoot dry weight. Nitrate level did not alter N, C and P contents in lettuce shoot. However, Ca and Mg contents were improved with nitrate level increment, also K, Fe, Mn, Cu and Zn contents were decreased with the increase of supplied nitrate level. Moreover, nitrate level did not alter C, K, P and Fe accumulation in lettuce shoot. However, N, Ca and Mg accumulation were improved with nitrate level increment, also Mn, Cu and Zn accumulation were decreased with the increase of supplied nitrate level. Except for C element, contents and accumulation of other nutrient elements were subjected to nitrate levels and CL light qualities. Under N10 and N12 conditions, CL with 4R : 1B is easier to obtain relatively high nutrient element content and accumulation. Through CL, C content in lettuce shoot was improved, but K, P and Fe contents were decreased, and N, Ca, Mg, Mn, Cu and Zn contents did not change significantly. However, CL promoted N, C, K, P, Ca and Mg accumulation in lettuce shoot, but did not alter microelement accumulation. In summary, high nitrate level and CL before harvest with 4R : 1B spectrum facilitates high dry shoot yield of hydroponic lettuce and high contents and accumulation of most major and medium nutrient elements.

**Keywords** Continuous light; Inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy; Light quality; Nitrogen level; Nutrient uptake

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

(Received Oct. 24, 2019; accepted Feb. 18, 2020)

\* Corresponding author