

采收前不同蓝光补光时段对生菜生长和品质的影响

郭霖苑, 黄欣欣, 张轶婷*

华南农业大学园艺学院, 广东 广州

收稿日期: 2021年8月15日; 录用日期: 2021年10月13日; 发布日期: 2021年10月20日

摘要

以“芳妮”生菜为试材, 在大棚水培条件下, 研究了在生菜采收前48小时不同时段增补蓝光(对照: 自然光, T1: 连续48 h补光, T2: 仅白天12 h补光总计48 h, T3: 仅夜间12 h补光总计48 h)对生菜生长、品质、抗氧化性、矿物质元素积累量的影响。结果表明: 所有补光处理能提高生菜的生物量。T3处理的效果最为显著。所有补光处理都不同程度的提高了生菜的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、维生素C含量以及生菜的抗氧化性, 同时还降低了生菜叶片中的硝酸盐含量。此外, 夜间增补蓝光的生菜中钾元素含量较对照显著提高, 也高于其他处理, 说明夜间补光处理对生菜的生长量的促进影响较之其他两个处理最为显著, 但是在提高生菜的品质方面, 白天补光的提高效果更为显著, T1处理在生物量与品质提升方面的效果最好, 叶片中的钾含量最低。综合生长与品质指标, 生菜采收前连续48 h的LED蓝光补光处理可作为为低钾优质生菜生产的参考方案。

关键词

生菜, 采收前补光, LED蓝光, 48 h

Effects of Different Pre-Harvest Blue Light Supply Methods on Growth and Quality of Lettuce

Linyuan Guo, Xinxin Huang, Yiting Zhang*

College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou Guangdong

Received: Aug. 15th, 2021; accepted: Oct. 13th, 2021; published: Oct. 20th, 2021

*通讯作者。

文章引用: 郭霖苑, 黄欣欣, 张轶婷. 采收前不同蓝光补光时段对生菜生长和品质的影响[J]. 农业科学, 2021, 11(10): 919-931. DOI: 10.12677/hjas.2021.1110122

Abstract

Using “Fangni” lettuce as material, under the condition of hydroponic cultivation in greenhouse, the effects of adding blue light 48 hours before lettuce harvest (control: Natural Light, T1: Supplement Light 48 hours continuously, T2: supplement light only 12 hours in daytime for 48 hours, T3: supplement light only 12 hours in night for 48 hours) on the growth, quality, antioxidant activity and mineral element accumulation of lettuce were studied. The results showed that all light supply treatments could increase the fresh weight of the above and below ground parts of lettuce, and increase the dry weight of above ground parts. T3 treatment is the best way to promote the growth of lettuce. All light supplement treatments increased the soluble sugar content, soluble protein content, vitamin C content and antioxidant activity of lettuce, and reduced the nitrate content in lettuce leaves. The experiment also found that the potassium content of lettuce treated with blue light at night was significantly higher than that of the control and higher than that of the other two treatments, but in the aspect of improving the quality of lettuce, the effect of supplementing light in the daytime was more significant, and T1 treatment had the best effect in the aspect of biomass and quality. In a word, the aim of the experiment is to improve the quality of lettuce. According to the growth and quality indexes, 48 hours of LED blue light supply before lettuce harvest can be used as a reference for the production of low potassium and high quality lettuce.

Keywords

Lettuce, Pre-Harvest Light, LED Blue Light, 48 h

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生菜(*Lactuca sativa* L.)是属于菊科(Asteraceae)的莴苣属(*Lactuca*) [1]的叶用蔬菜,同时也是人们常用的叶菜。随着人们的生活质量提高,人们为了更健康的生活方式,蔬菜沙拉得到了许多人的喜爱,而不同品种的生菜则是蔬菜沙拉的主要成分。市场需求和蔬菜产业也在快速的增长,我国生菜的设施栽培呈现一个逐年增加的趋势,其中通过露地、大棚、日光温室以及智能连栋温室的多种栽培模式的相互补充,能够保证生菜市场周年均衡的供应[2]。但是无论是哪一种栽培模式,生产出来的蔬菜品质上没有太大的区别,而设施栽培的好处则在于能够利用人工光来干预植物的生长,以达到人们对蔬菜品质的更高需求,还可以减短作物的生长周期,达到工业化的快速生产。

研究发现,LED光源是一个有着先天优势的光源,其有着:节能、光效高等优点,最主要是其容易获得单色光及全光谱[3],在生产中可以根据需求来增补单色或组合光,因此在很多设施试验和生产中多用此光源。光质在植物生长过程中有很重要的影响,在研究中发现,蓝光有利于可溶性蛋白积累[4] [5],同时也可使叶绿素含量增多,使光合作用强等特点[6],利用蓝光处理对改善生菜形态指标的效果最好,在该处理下生菜的各种形态指标(如叶片数、叶长、叶宽、株高、茎长、茎粗和叶面积)均要优于不补光处理[2]。蓝光处理还能增加生菜的叶片数,采用蓝光补光能使生菜叶片的可溶性糖含量、氨基酸含量和VC含量同时得到提高,在实际生产中利用蓝光进行夜间补光对植物的促进效果为最好[6]。

近年来,由于巨大的生活和工作压力导致的不良生活方式,世界上公认的难题也随之显现,即为慢

性肾病的患者数量也在逐年在上升[7]。患有慢性肾病的人肾脏将会丧失排钾功能,因此这类病人适宜低钾饮食[8],许多专家学者开始进行低钾蔬菜的研究。课题组前期研究表明,在生菜采收前连续增补 48 h 蓝光能显著提高生菜产量和品质,同时还显著降低生菜叶片中钾元素含量[9]。试验中的 48 h 补光包含了夜间与白天,所以夜间补光与白天补光之间的差别尚不清楚。近年来有研究表明,利用 LED 夜间补光可以有效地促进番茄植株的生长与提高产量,和白天相比,能耗成本将更低[10]。夜间补光能够提高番茄根系的膨压以及根系活力,提高根系对水分和矿物质离子的吸收速率[11]。为阐明夜间补光与白天补光对生菜生长和品质影响的差异,本试验在水培条件下,设置不同时段补光处理,自然光为对照(CK);连续 48 h 补光(T1);仅白天 12 h 补光总计 48 h (T2);仅夜间 12 h 补光总计 48 h (T3),分析其对生菜生长、生物量、品质、抗氧化能力、矿物质元素含量,特别是钾含量的影响,目的在于为设施工厂化栽培中生产优质低钾的生菜提供理论参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

供试材料为“芳妮”生菜(*Lactuca sativa* L. “Fangni”)。营养液配方采用 1/2 日本园试配方。

2.2. 试验方法

试验于 2019 年 11 月至 2019 年 1 月在华南农业大学园艺学院楼顶温室进行。将实验所用的种子直接放入海绵块中进行催芽,并将其放入水培槽(长 80 cm × 宽 55 cm × 高 11 cm)中进行栽培。当幼苗长至三叶一心时,选择健壮且长势一致的幼苗定植于定植板中,后将定植板放于水培槽上方,水培槽内加入营养液,并且用充气泵进行供氧。在定植后一个月后进行采收。光处理设置了不补光(CK)、采前连续 48 h 补光(T1)、采前白天补光 12 h 共计补光 48 h (T2)、采前晚上补光 12 h 共计补光 48 h (T3)4 个处理。补光光源为 LED 蓝光(430 nm),通过调整补光灯的密度和高度,使植株获取的光照强度为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。每个处理设置 4 个重复,每个重复 12 株。

2.3. 指标测定

生菜于定植后的 30 天采收,测定其生物量,品质,矿物质元素,抗氧化能力等指标。地上部和地下部鲜重将采用百分之一电子天平来称量,干重将会采用千分之一电子天平来称量,光合色素将采用比色法[12]来测定;抗坏血酸(VC)将采用钼蓝比色法[13]来测定;可溶性糖、可溶性蛋白、硝酸盐含量会参考李合生[14]的方法来测定;多酚含量采用 Folin-Cioaltea 法[15]来测定;类黄酮含量将采用 Mashiba 法[16]来测定;DPPH 自由基清除率将采用 Tadolini 法[17]来测定;FRAP 值将采用 Benzie 法[18]来测定;氮、磷、钾、钙、镁矿质元素含量参考《土壤农业化学分析方法》[19]来测定;根系扫描会采用 EPSON 的根系扫描仪扫描,用 WinRHIZO 软件来进行分析。

2.4. 数据分析

试验数据用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,采用 Duncan 法进行数据差异显著性检验。作图软件采用 Excel 2016 软件。

3. 结果与分析

3.1. 不同补光处理对生菜生物量的影响

从表 1 可以看出,采前进行 48 h 不同时段 LED 蓝光补光处理可以提高生菜地下部鲜重、地上部干重、

地下部干重、叶片数。所有补光处理都能不同程度的降低生菜的含水量，但夜间补光处理效果不显著。所有蓝光补光处理的地上部鲜重与 CK 的地上部鲜重差异不显著，而所有补光处理的地上部干重都显著高于 CK。

Table 1. Effects of pre-harvest supplemental lighting supply on lettuce biomass
表 1. 采收前补光处理下对生菜生物量的影响

处理	鲜重/(g/株)		干重/(g/株)		叶片数	含水量(%)
	地上部	地下部	地上部	地下部		
CK	27.44 ± 1.13 a	2.70 ± 0.20 c	0.96 ± 0.08 b	0.13 ± 0.01 b	16.10 ± 0.57 b	96.34 ± 0.22 a
T1	27.36 ± 1.50 a	3.04 ± 0.22 bc	1.23 ± 0.08 a	0.15 ± 0.01 ab	17.57 ± 0.20 a	95.39 ± 0.17 b
T2	27.25 ± 1.43 a	3.57 ± 0.15 ab	1.22 ± 0.06 a	0.16 ± 0.01 ab	16.13 ± 0.30 b	95.48 ± 0.07 b
T3	31.46 ± 1.72 a	4.07 ± 0.31 a	1.26 ± 0.08 a	0.17 ± 0.01 a	17.14 ± 0.34 ab	95.99 ± 0.13 a

注：同列数据 ± 后的数据为标准误。同列不同小写字母表示差异达到显著水平($\alpha = 0.05$)，下同。

3.2. 不同补光处理对生菜的光合色素含量的影响

由表 2 可知，在所有的采收前补光情况下，生菜的叶绿素 a 含量，类胡萝卜素的含量均提高，其叶绿素 a/b 的比值显著升高，其中 T2 处理的叶绿素 a 含量升高的差异不显著，而补光对叶绿素 b 含量无影响，采前进行连续 48 h 补光能够显著的提高总叶绿素的含量。

Table 2. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on photosynthetic pigment content of lettuce
表 2. 采收前补光对生菜光合色素含量的影响

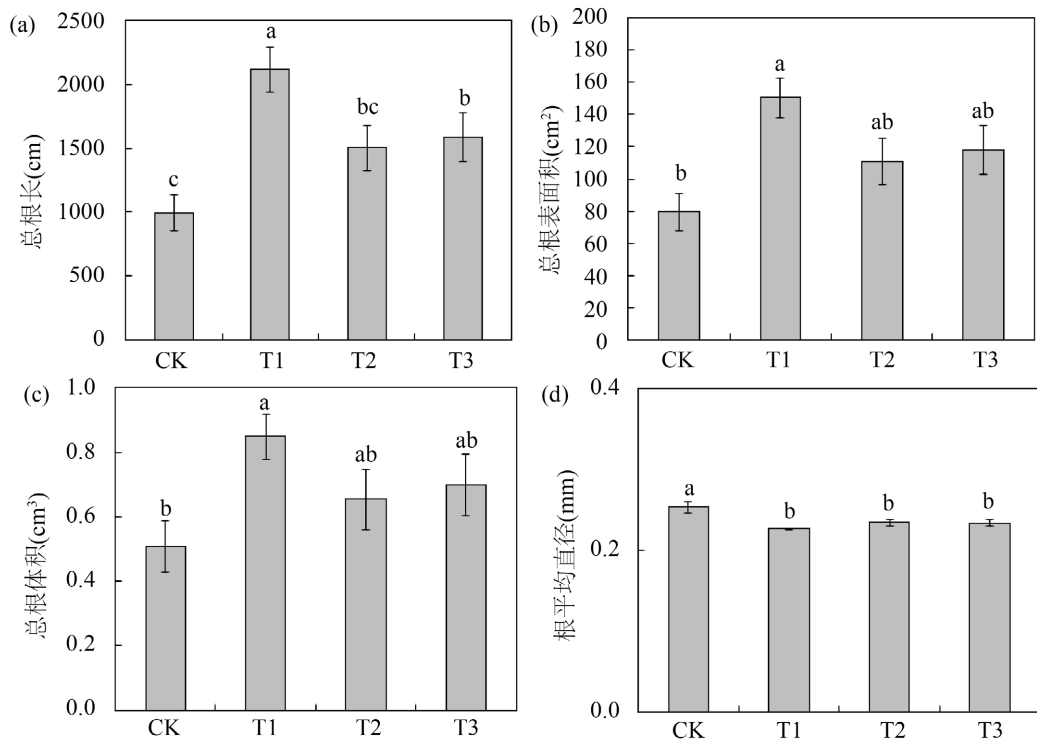
处理	叶绿素 a (mg/g)	叶绿素 b (mg/g)	叶绿素 a/b	总叶绿素(mg/g)	类胡萝卜素(mg/g)
CK	0.38 ± 0.01 c	0.23 ± 0.01 ab	1.70 ± 0.01 b	0.61 ± 0.01 b	0.21 ± 0.004 c
T1	0.48 ± 0.02 a	0.23 ± 0.04 a	1.93 ± 0.04 a	0.74 ± 0.04 a	0.30 ± 0.013 a
T2	0.40 ± 0.01 bc	0.21 ± 0.02 b	1.89 ± 0.04 a	0.61 ± 0.02 b	0.25 ± 0.003 b
T3	0.43 ± 0.02 b	0.22 ± 0.02 ab	1.94 ± 0.02 a	0.66 ± 0.02 b	0.25 ± 0.008 b

3.3. 不同补光处理对生菜根系生长的影响

从图 1 可以看出，所有补光处理都能促进生菜的总根长，总根体积以及总根长面积，其中由高到低顺序是 T1 > T3 > T2 > CK，其中 T2 较之 T3 和 T4 要高约 1/4 (图 1(a)~(c))。其中所有补光处理的生菜根系平均直径都要显著低于不补光处理(图 1(d))。因此，无论何种采前 48 h 补光都有助于生菜根系的伸长增粗生长，但是连续 48 h 补光的效果更佳。

3.4. 不同补光处理对生菜品质的影响

由图 2 可知，采收前补光均能够不同程度的提高生菜中可溶性糖含量，可溶性蛋白含量，维生素 C 含量，与此同时还都降低了硝酸盐的含量。可溶性糖含量在 T3 这个补光处理下达到了最大值，而 T2 的可溶性糖含量的增长较小(图 2(a))。可溶性蛋白质含量较之 CK 处理，其余补光处理几乎能够增长一倍，其中 T1 处理的增长量最大(图 2(b))。T1 的 VC 含量增长最多，比 CK 处理增加了大约 2/3，而 T2 处理增加最少，仅增加 50% (图 2(d))。



注：图中不同小写字母表示差异达到显著水平($\alpha = 0.05$)，下图同此说明。

Figure 1. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on root growth of lettuce

图 1. 采收前补光对生菜根系生长的影响

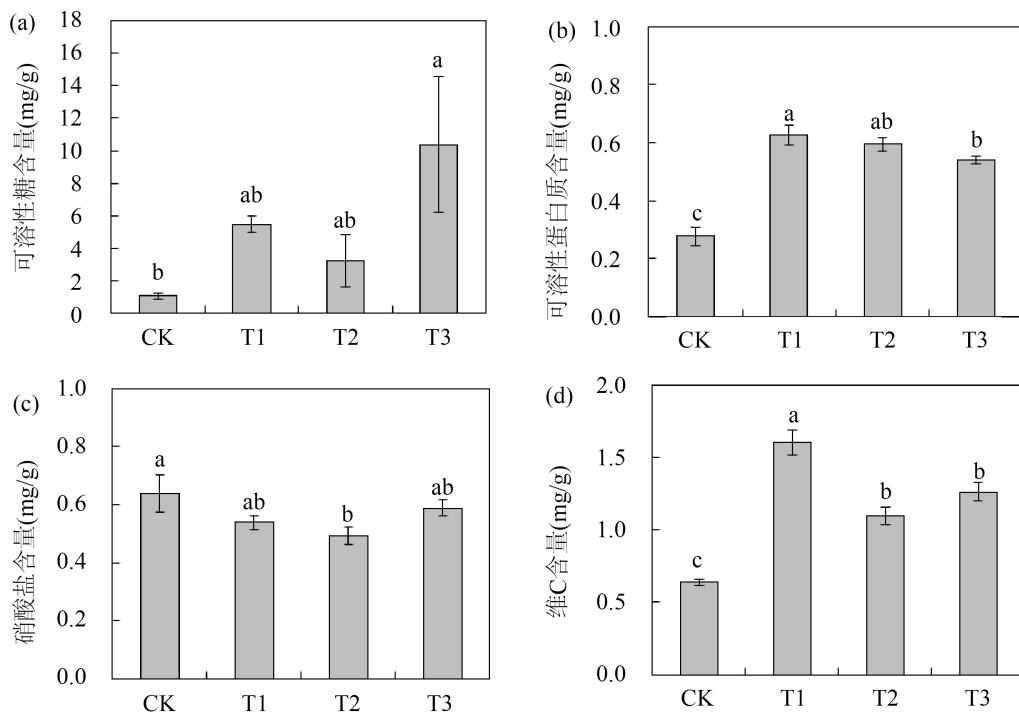


Figure 2. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on lettuce quality

图 2. 采收前补光对生菜品质的影响

3.5. 不同补光处理下对生菜抗氧化能力的影响

由图 3 可得,所有的补光处理都能在一定程度上提高了生菜的 DPPH 自由基清除率、类黄酮含量,多酚含量以及 FRAP 的含量。与 CK 处理相比, T1、T2、T3 处理都显著的提高了几乎一半的 DPPH 自由基清除率并且三个补光处理之间没有明显差异(图 3(a))。在不同的补光时段下,各个补光处理都能提高多酚的含量, T1 处理较之 CK 处理高出约 5 倍,而较之 T2 和 T3 处理高出约 1 倍(图 3(b))。FRAP 的含量也显著增加,同 CK 相比, T1 处理的含量高出 CK 处理近乎 7 倍,而 T2, T3 处理要高出 CK 约 3 倍(图 3(c))。T1 处理的类黄酮含量较之其他三个处理最高(图 3(d))。因此,采前连续 48 小时补光处理最有利于提高生菜的抗氧化能力。

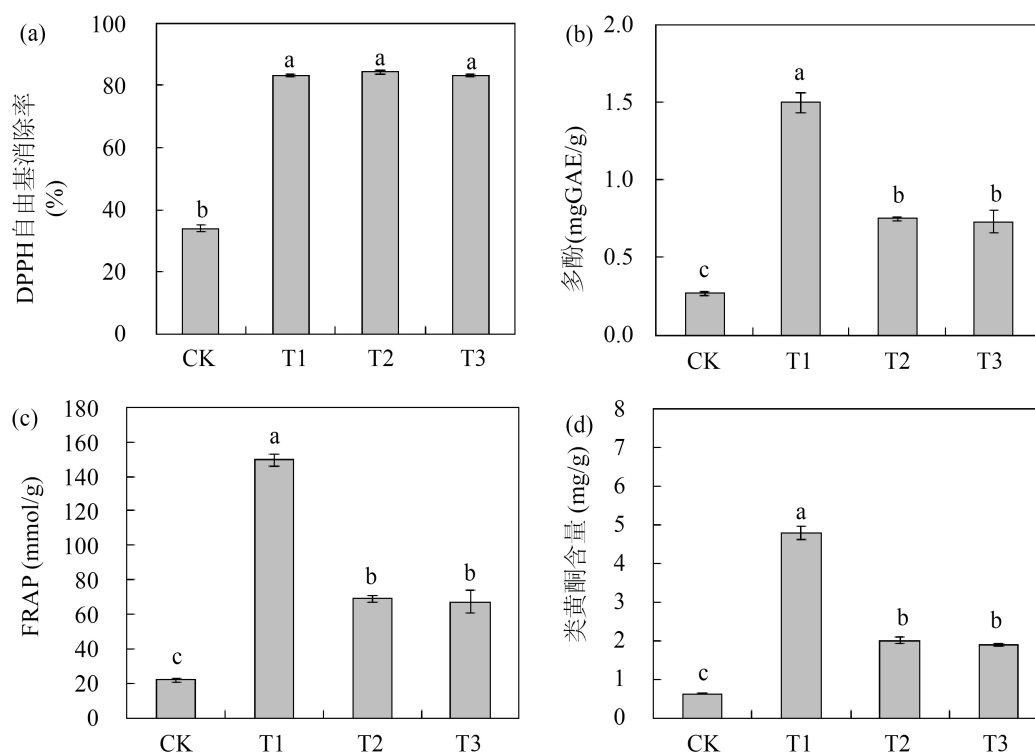


Figure 3. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on antioxidant capacity of lettuce

图 3. 采收前补光对生菜抗氧化能力的影响

3.6. 不同补光处理下对生菜矿物质元素含量的影响

从图 4 可以看出, T1 处理的氮, 磷, 钾, 钙, 镁的叶片离子含量最少。T2 处理除了氮离子含量较之 CK 处理要高以外, 叶片的磷, 钾, 钙, 镁离子含量都要低于 CK 处理, 且分别降低了 37%, 15%, 12% 和 6%。与 CK 处理相比, T3 处理中叶片的磷离子含量, 钙离子含量, 镁离子含量降低, 而叶片的钾离子含量要较之 CK 处理升高。

所有补光处理后的生菜与不补光处理相比, 根系的氮, 钾, 镁, 离子含量都显著升高, 其中根系氮离子含量最高的是 T1 处理, 钾离子含量最高的是 T2 处理, 镁离子含量最高的是 T1 处理, 高出约 20%。而磷和钙离子含量要显著降低, 其中磷离子含量最低的是 T3 处理, 低大约 24%, 钙离子含量最低的是 T1 处理(图 5)。

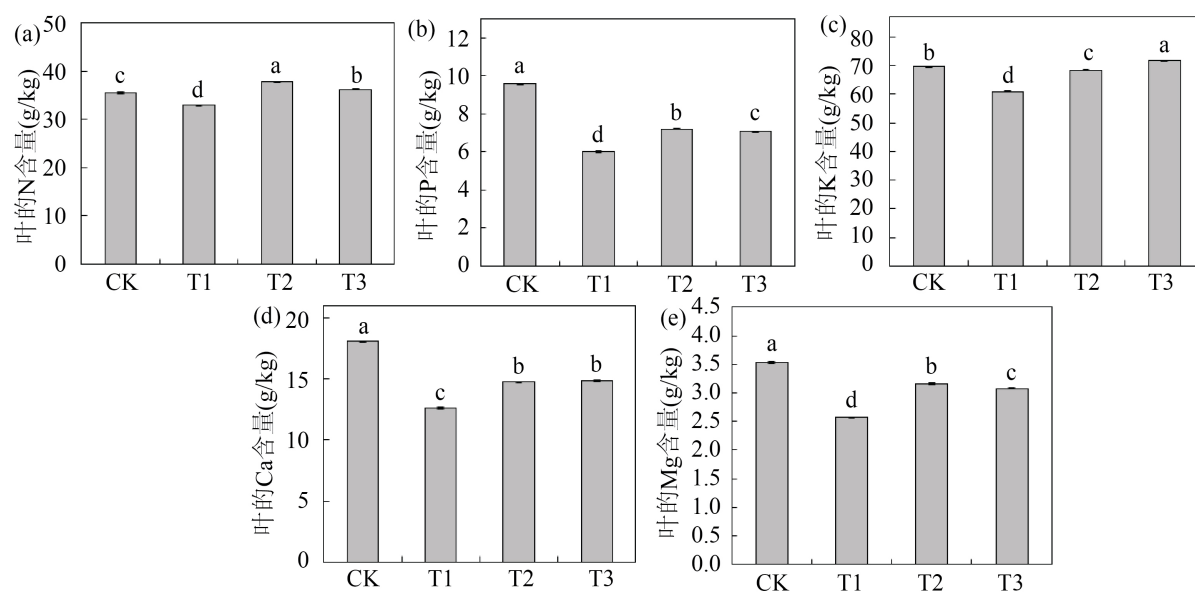


Figure 4. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on ion content in lettuce leaves
图 4. 采收前补光对生菜叶片离子含量的影响

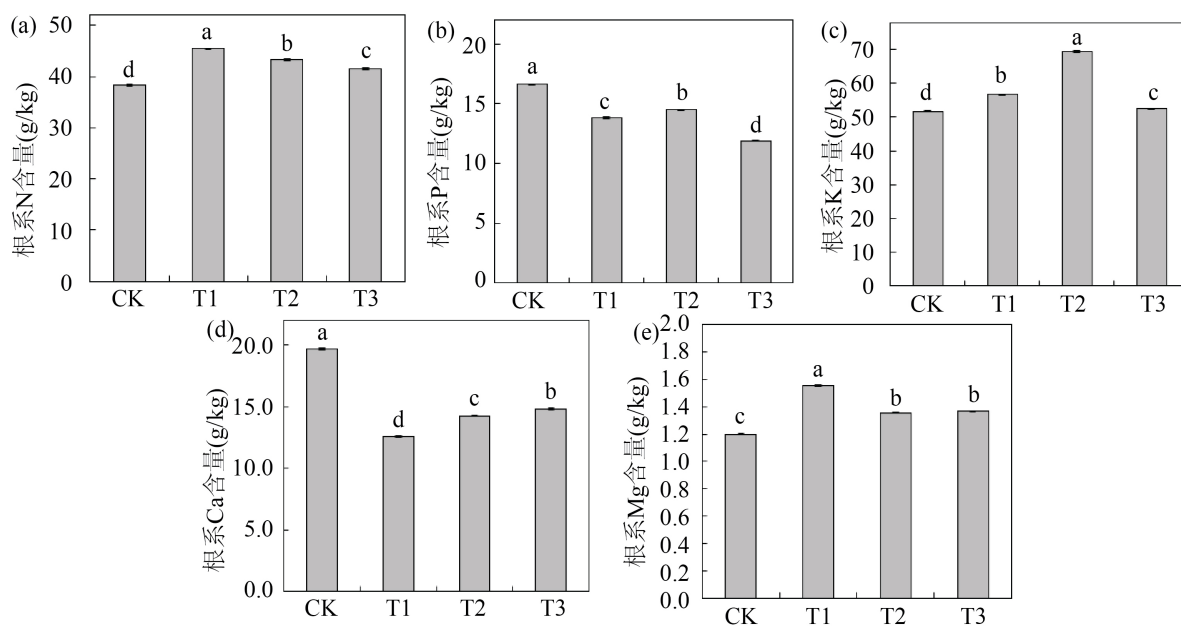


Figure 5. Effects of pre-harvest supplemental lighting supply on ion content in lettuce roots
图 5. 采收前补光对生菜根系的离子含量的影响

3.7. 不同补光处理对生菜叶片中矿物质元素积累的影响

从图 6 可知, T3 处理的叶片氮, 钾, 钙, 镁积累量都高于所有处理, 且叶片离子积累量是所有补光处理中最高的。T1 处理叶片氮离子和钾离子的积累量高于 CK 处理, 分别高 18% 和 8%, 其它三种元素的积累量就要低于 CK 处理。其中 T2 处理除了叶片磷离子积累量略低且不显著外, 其余离子积累量都要高于 CK 处理, 但只有叶片的钾离子积累量较为显著。

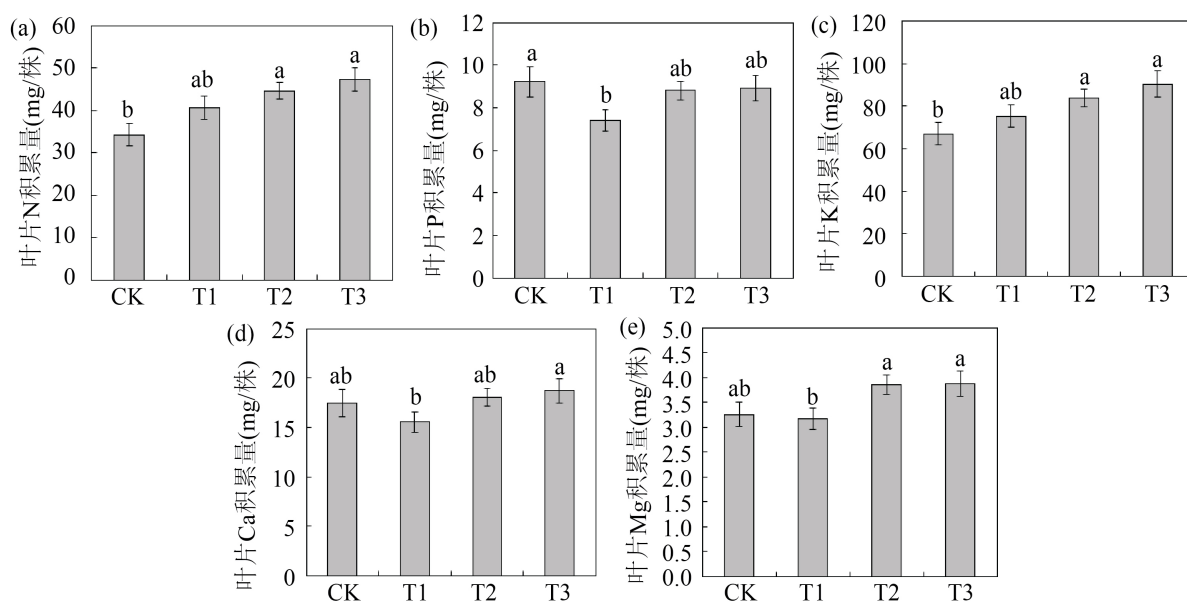


Figure 6. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on leaf accumulation of lettuce

图 6. 采收前补光对生菜叶片积累量的影响

对于生菜中的总离子积累量, 则如图 7 所示, 采前补光能够提高氮离子的总积累量, 从大到小的值为 T2 > T3 > T1 (图 7(a)). 所有补光处理的生菜的磷总积累量都低于 CK 处理, 但是 T2 和 T3 处理只是略低但不显著, 而 T1 处理则是显著降低大约 18% (图 7(b)). 补光处理后, T2 和 T3 处理能显著升高总钾离子的积累量, 分别为 23% 和 26%, 而 T1 处理升高不显著 (图 7(c)). 只有 T1 处理的钙离子总积累量和镁离子总积累量略低于 CK, T2 和 T3 都要高于 CK 处理, 但 T2 处理不显著 (图 7(d), 图 7(e)).

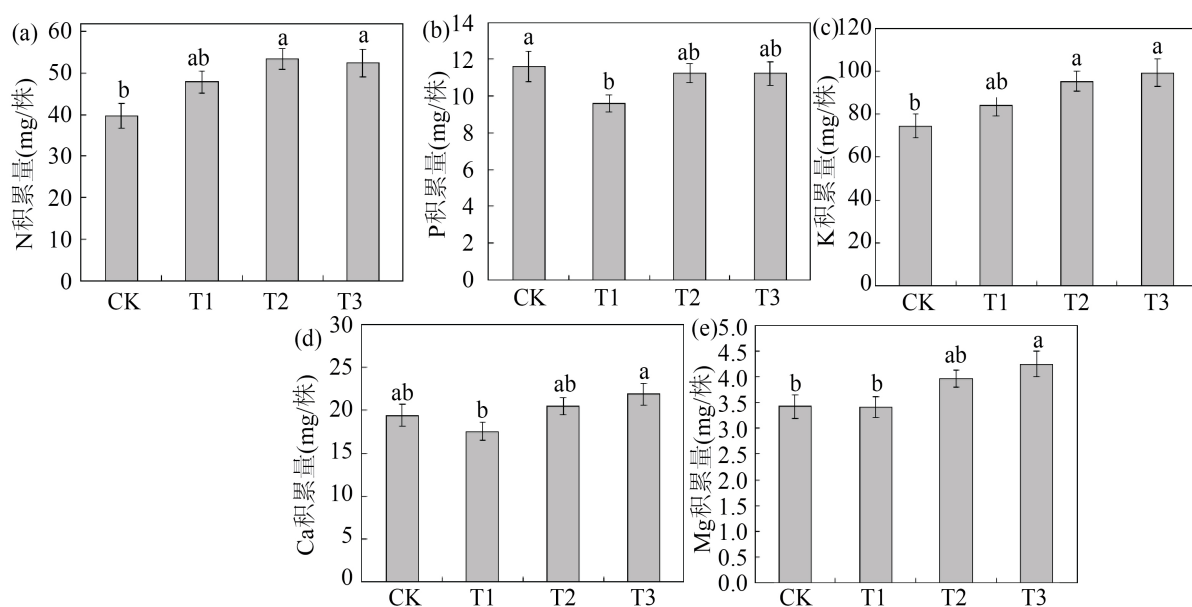


Figure 7. Effect of pre-harvest supplemental lighting supply on total accumulation of lettuce

图 7. 采收前补光对生菜总积累量的影响

3.8. 生菜叶片不同元素的离子含量与生菜品质及抗氧化能力的相关性

从表 3 可得, 与叶片 P 离子含量显著相关的指标有 2 个, 分别为蛋白质的含量和维生素 C 的含量。与叶片 Ca 离子含量显著相关的指标有 3 个, 分别为蛋白质的含量, 维生素 C 的含量和多酚含量。而与叶片 Mg 离子含量显著相关的指标有 4 个, 为维生素 C 含量, 类黄酮含量, 多酚含量和 FRAP 含量。

Table 3. Correlation of leaf ion content with lettuce quality and antioxidant capacity after light supply before harvest
表 3. 采前补光后叶片离子含量与生菜品质及抗氧化能力的相关性

		叶片 N 元素 含量	叶片 P 元素 含量	叶片 K 元素 含量	叶片 Ca 元素 含量	叶片 Mg 元素 含量
元素含量 (g/kg)	CK	35.47 ± 0.17 c	9.56 ± 0.01 a	69.51 ± 0.18 b	18.10 ± 0.02 a	3.53 ± 0.01 a
	T1	33.00 ± 0.06 d	6.01 ± 0.04 d	60.97 ± 0.06 d	12.61 ± 0.06 c	2.57 ± 0.01 d
	T2	37.71 ± 0.13 a	7.21 ± 0.01 b	68.43 ± 0.21 c	14.79 ± 0.03 b	3.16 ± 0.02 b
	T3	36.14 ± 0.11 b	7.07 ± 0.01 c	71.71 ± 0.03 a	14.85 ± 0.08 b	3.07 ± 0.01 c
系数 Index						
	蛋白质含量	0.018	0.954*	0.255	0.928*	0.744
	可溶性糖含量	0.004	0.349	0.032	0.259	0.214
	硝酸盐含量	0.052	0.503	0.154	0.496	0.288
	维生素 C	0.247	0.954*	0.109	0.964*	0.962*
	DPPH	0.003	0.862	0.406	0.779	0.551
	类黄酮含量	0.474	0.764	0.774	0.855	0.964*
	多酚含量	0.398	0.836	0.704	0.912*	0.985**
	FRAP	0.423	0.815	0.724	0.896	0.981**

注: 表中同列数据±后的数据为标准误。同列不同小写字母表示差异达到显著水平($\alpha=0.05$)。系数处数值为相关性中的 R^2 数据, 仅用于陈述, 其中一个*为显著相关, **为极显著相关, 表 4 同此说明。

3.9. 生菜根系不同元素的离子含量与生菜品质及抗氧化能力的相关性

从表 4 可以看到, 与根系 N 离子含量相关的指标有 1 个, 为蛋白质含量。和根系 P 离子含量相关的指标有 1 个, 是可溶性糖含量。与根系 Ca 离子含量相关的指标有两个, 有蛋白质含量和 DPPH 自由基清除率, 其中蛋白质含量与根系 Ca 离子含量呈现极显著的相关性。与根系 Mg 离子含量相关的指标有 4 个, 其中维生素 C 含量、DPPH 自由基清除率为显著相关, 多酚含量, FRAP 含量为极显著相关。

Table 4. Correlation of root element content with lettuce quality and antioxidant capacity after light supply before harvest
表 4. 采前补光后根系元素含量与生菜品质及抗氧化能力的相关性

		根系 N 元素 含量	根系 P 元素 含量	根系 K 元素 含量	根系 Ca 元素 含量	根系 Mg 元素含量
元素含量(g/kg)	CK	38.40 ± 0.18 d	16.61 ± 0.01 a	51.70 ± 0.13 d	19.71 ± 0.07 a	1.20 ± 0.00 c
	T1	45.46 ± 0.11 a	13.86 ± 0.08 c	56.68 ± 0.08 b	12.60 ± 0.06 d	1.56 ± 0.01 a
	T2	43.31 ± 0.14 b	14.50 ± 0.03 b	69.49 ± 0.18 a	14.28 ± 0.02 c	1.36 ± 0.00 b
	T3	41.55 ± 0.16 c	11.90 ± 0.02 d	52.64 ± 0.07 c	14.83 ± 0.06 b	1.37 ± 0.00 b

Continued

系数 Index					
蛋白质含量	0.915*	0.464	0.271	0.991**	0.795
可溶性糖含量	0.096	0.942*	0.065	0.281	0.198
硝酸盐含量	0.661	0.089	0.808	0.625	0.353
维生素 C	0.839	0.503	0.020	0.893	0.962*
DPPH	0.711	0.660	0.252	0.899*	0.597
类黄酮含量	0.840	0.157	0.019	0.715	0.959*
多酚含量	0.886	0.215	0.032	0.791	0.987**
FRAP	0.807	0.199	0.027	0.769	0.980**

4. 讨论

研究总结

利用光环境来调控蔬菜的品质是一种环保且无污染的物理方法,该方法也在设施蔬菜的生产中有着很重要的前景[20]。有研究表明,在红蓝光组合下,随着蓝光比例的增加会使得黄瓜幼苗的叶绿素有明显的增加[21],这说明蓝光能够在一定程度上能促进叶绿素的含量,也有试验证明蓝光是有利于叶绿素 a 的合成[22]。在本次研究中连续 LED 蓝光补光 48 小时能够促进总叶绿素含量的提升(表 2),所有蓝光补光处理都提高了叶绿素 a 和类胡萝卜素的含量,这符合前人所说[7]。

高活力的根系能够更好的促进地上部的发育[23][24],有研究发现,蓝光能够较有利的提高根系的活力以及改善根系的形态生长[25]。在本次的试验中,我们发现通过采前的蓝光补光能够促进根系的伸长和增多生长,但是在一定程度上使得根系较细长(图 1),根系体积显著提高,比表面积增加促进养分吸收,能够更好的促进地上部的生长发育。

评价生菜品质的重要的指标是可溶性糖含量,可溶性蛋白,维生素 C 含量,硝酸盐含量等物质含量[26]。本次试验结果表明,无论采前何种 48 h 补光方式都能显著的增加生菜中可溶性糖,可溶性蛋白,维生素 C 的含量(图 2(a),图 2(b),图 2(d)),这些结果和 Ogawa [27]等的结果是相一致的,在所有蓝光补光处理以后同时还发现硝酸盐的含量也都降低了(图 2(c)),其中 T2 处理的含量处于最低值,造成这种结果的可能原因在于蓝光将会对相关代谢酶活性的协同起到促进作用,使得抗坏血酸和可溶性糖含量的持续积累,而植物中的硝酸盐也在不断地被同化,因而能够降低硝酸盐的含量[28]。而植物在蓝光补光处理下生长后可溶性蛋白的含量提高,原因有可能是蓝光会显著地促进线粒体的暗呼吸,为氨基酸的合成提供了碳架[29][30][31]。

蔬菜的抗氧化能力可由各种的抗氧化活性(FRAP 的值、DPPH 自由基清除率)以及各种的抗氧化物质(类黄酮类,多酚类等)的含量来进行判断[32]。本研究发现采前补光会对生菜的抗氧化能力有很强促进作用(图 3),其中 T1 处理的类黄酮含量和多酚含量值是最高的(图 3(b),图 3(d));FRAP 方法测定的结果显示出 T1 处理的抗氧化的能力是最高的,这和类黄酮含量与多酚含量的变化是相对一致的(图 3(c)),前三种物质的含量在 T2, T3 处理中含量次之,而 DPPH 自由基清除率 T1, T2, T3 三种处理都有较高比率并且显著高于 CK 组(图 3(a)),说明 LED 蓝光补光处理都能促进生菜的抗氧化能力。

有研究能够表明,水培的生菜对 K^+ 的吸收量在荧光灯的全光谱下会达到最高,而在单一的 LED 红、蓝光或组合光谱下吸收能力会降低[33]。本试验结果表明, T1 处理下的生菜叶片 K^+ 含量最低,在 T2 处理下也能降低生菜中的 K^+ 含量(图 4(c))。这些与前人的研究相同。但从夜间 T3 补光处理中我们可以得到,

生菜的 K^+ 含量却升高(图 4(c)), 光照环境的变化通常会引起一些植物激素含量的变化, 从而起到调节钾转运蛋白的表达, 进而影响植物对钾的吸收与积累[34] [35]。有研究表明, 对黄瓜幼苗进行夜间不同时长蓝光补光后发现, 其叶片中的 IAA 和 GA_3 含量提高, 并且显著降低 ABA 的含量[36]。激素间的生理效应既相互促进又相互拮抗, 因此激素间的平衡对植物生长发育有重要的调节作用[37], 本次实验显示夜间补光对生菜的 K^+ 吸收有着促进作用, 应是夜间补光影响激素间的平衡, 光通过何种途径调控这类生理活动有待进一步研究。

不同元素的离子含量与生菜品质及抗氧化能力有一定的相关性, 有研究指出, Ca^{2+} 能够促进植物中活性氧类物质的形成, 还能通过 Ca^{2+} 信号转导来调控植物的免疫应答[38], 从表 3 可以看出, 叶片的 Ca^{2+} 含量与多酚含量与维生素 C 含量有显著的负相关关系, 说明也许蓝光处理能够促进 Ca^{2+} 的利用转化能力, 使植物在 Ca^{2+} 含量较少的情况下还能有较高的活性氧含量。镁离子在植物光合作用中起着重要的作用, 它能够调节光系统 II 和光系统 I 之间的激发能的分配, 帮助促进光合膜的垛叠, 帮助植物提高光合作用的原初光能转化效率、PSII 活性以及光合电子传递的速率, 同时还可以促进光合作用的碳代谢等的作用[39], 叶片的 Mg^{2+} 含量也与生菜的抗氧化能力呈现负相关关系, 尤其是多酚含量以及 FRAP 的含量还呈现极显著的负相关关系, 在此猜测是蓝光补光促进了植物对 Mg^{2+} 的利用, 提高了植物的光合能力的同时提高抗氧化性。根系 Mg^{2+} 含量和品质及抗氧化能力的相关性与其叶片和品质及抗氧化能力的相关性正好相反, 根系的 Mg^{2+} 含量与其抗氧化能力呈现了正相关关系, 其中多酚含量与 FRAP 含量呈现极显著相关性(表 4), 也许说明蓝光能促进根系对 Mg^{2+} 的吸收, 后对生菜的抗氧化能力有提高的作用, 这些猜测都有待进一步验证。

研究表明, 蓝光补光处理有利于次生代谢物的积累[40], 而次生代谢物的积累能提高植物的抗逆性。综合分析, 生菜的生理指标与补光行为呈对应关系, 例如蛋白质的积累与硝酸盐的消耗, 次生代谢物的积累受 LED 蓝光照射影响显著, 推断全天候 48 小时的连续补光会使植物长期处于生理逆境, 从而使得次生代谢物呈现高度积累状态, 而半天的补光则给植物有缓冲时间, 在逆境减弱时代谢部分富余的次生代谢物, 但依旧保持较高的抗氧化活性。夜间补光由于没有太阳光的影响, 在蓝光逆境处理下的作用更为明显, 因此 K^+ 含量提高用于植物抗逆。

本研究表明, 无论何种采前补蓝光 48 小时的处理都能够促进生菜的生物量的增长, 有利于生菜可溶性蛋白, 可溶性糖, 维生素 C 的积累和硝酸根含量的降低, 同时还能够提升生菜的抗氧化的能力, 增强其对环境的抗逆性。但是白天补光与晚上补光对植物的影响不尽相同, 白天补光对植物的品质以及抗氧化能力的促进作用要强于夜间补光, 尤其是连续补光 48 h, 而夜间补光在对植物生长的促进作用是要强于白天补光的, 与此同时夜间补光可能还能促进 K^+ 的吸收。综上所述, 如果通过补光提高生菜产量与品质并降低叶片钾含量, 可以考虑采用在生菜采收前白天和夜间连续补光 48 h, 仅仅是白天或者夜间累计补光 48 h 无法达到此效果。

基金项目

国家重点研发计划资助项目(2017YEE0131000); 广东省自然科学基金资助项目(2018A030313623)。

参考文献

- [1] 林辰壹, 张丽辉, 赵芸, 等. 青霉素对老化茎用莴苣种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2007, 26(5): 20-24.
- [2] 陈瑶, 史盼盼, 万治成, 等. LED 夜间补光对生菜形态特征和营养品质的影响[J]. 河北农业科学, 2017, 21(6): 36-39.
- [3] 石平平, 赵众. LED 全光谱植物工厂的关键技术研究[J]. 科技经济导刊, 2019, 27(33): 46.
- [4] 邓江明, 蔡群英, 潘瑞炽. 光质对水稻幼苗蛋白质、氨基酸含量的影响[J]. 植物学通报, 2000, 17(5): 419-423.

- [5] 郭银生, 谷艾素, 崔瑾. 光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1485-1492.
- [6] Spalding, E.P. and Folta, K.M. (2010) Illuminating Topics in Plant Photobiology. *Plant Cell & Environment*, **28**, 39-53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2004.01282.x>
- [7] Levey, A.S., Eckardt, K., Tsukamoto, Y., et al. (2005) Definition and Classification of Chronic Kidney Disease: A Position Statement from Kidney Disease: Improving Global Outcomes (KDIGO). *Kidney International*, **67**, 2089-2100. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1755.2005.00365.x>
- [8] 栾淑芳, 金字芬, 刘启华. 维持性血透病人的饮食指导[J]. 青岛医药卫生, 2002(6): 22.
- [9] 施玉峰, 张梦展, 方瑶瑶, 张轶婷, 刘厚诚. 采收前补光对营养液断钾下生菜生长及品质的影响[J]. 照明工程学报, 2019, 30(6): 167-173.
- [10] Tewolde Fasil, T., Lu, N., Shiina, K., Maruo, T., Takagaki, M., Kozai T., et al. (2016) Nighttime Supplemental LED Inter-Lighting Improves Growth and Yield of Single-Truss Tomatoes by Enhancing Photosynthesis in Both Winter and Summer. *Frontiers in Plant Science*, **7**, Article No. 448. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00448>
- [11] Paponov, M., Kechasov, D., Lacek, J., Verheul, M.J. and Paponov, I.A. (2020) Supplemental Light-Emitting Diode Inter-Lighting Increases Tomato Fruit Growth through Enhanced Photosynthetic Light Use Efficiency and Modulated Root Activity. *Frontiers in Plant Science*, **10**, Article No. 1656. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01656>
- [12] 张宪政. 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 28-30.
- [13] 李军. 钼蓝比色法测定还原型维生素 C[J]. 食品科学, 2000, 21(8): 42-45.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [15] Singleton, V.L. and Rossi, J.A. (1965) Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic Phosphotungstic Acid Reagents. *American Journal of Enology and Viticulture*, **16**, 144-158.
- [16] 凌关庭. 抗氧化食品与健康[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [17] Tadolini, B., Juliano, C., Piu, L., Franconi, F. and Cabrini, L. (2000) Resveratrol Inhibition of Lipid Peroxidation. *Free Radical Research*, **33**, 105-114. <https://doi.org/10.1080/1071576000300661>
- [18] Benzie, I. and Strain, J.J. (1996) The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay. *Analytical Biochemistry*, **239**, 70-76. <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [20] 刘文科, 杨其长, 邱志平, 等. 不同 LED 光质对生菜生长和营养品质的影响[J]. 蔬菜, 2012(11): 63-65.
- [21] 朱鹿坤, 陈俊琴, 赵雪雅, 等. 红蓝绿 LED 延时补光对日光温室黄瓜育苗的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(4): 402-409.
- [22] 江明艳, 潘远智. 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响[J]. 园艺学报, 2006, 33(2): 338-343.
- [23] Matsuda, H., Mori, S., Fujii, H., et al. (2001) Photosynthetic Rate and Root Activity of Rice Plant with Reference to Application Rate of Topdressed N. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **72**, 667-672.
- [24] 叶宝兴, 毛达超, 刘学春. 超级小麦生育后期根系活力与净光合速率相关性的研究[J]. 山东农业科学, 2005(4): 15-18.
- [25] 魏星, 顾清, 戴艳娇, 等. 不同光质对菊花组培苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 344-349.
- [26] Zhong, H.B., Qi, C.Y. and Wen, K.L. (2015) Effects of Light Quality on the Accumulation of Phytochemicals in Vegetables Produced in Controlled Environments: A Review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **95**, 869-877.
- [27] Ogawa, A., Fujita, S., Toyofuku, K. (2014) A Cultivation Method for Lettuce and Spinach with High Levels of Vitamin C Using Potassium Restriction. *Environmental Control in Biology*, **52**, 95-99. <https://doi.org/10.2525/ecb.52.95>
- [28] 周晚来. 采收前短期连续光照降低水培生菜硝酸盐含量的效果研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [29] Kowallik, W. (1982) Blue Light Effects on Respiration. *Annual Review of Plant Physiology*, **33**, 51-72. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.000411>
- [30] 李慧敏, 陆晓民. 不同光质对甘蓝型油菜幼苗的生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(11): 2251-2257.
- [31] 张立伟, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同光质下香椿苗的生长动态[J]. 西北农业学报, 2010, 19(6): 115-119.
- [32] Niki, E. and Noguchi, N. (2000) Evaluation of Antioxidant Capacity. What Capacity Is Being Measured by Which Method? *IUBMB Life*, **50**, 323-329. <https://doi.org/10.1080/713803736>
- [33] 陈晓丽, 郭文忠, 薛绪掌, 等. LED 组合光谱对水培生菜矿物质吸收的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5):

1394-1397.

- [34] Min, J.K., Ruzicka, D., Shin, R., *et al.* (2012) The *Arabidopsis* AP2/ERF Transcription Factor RAP2.11 Modulates Plant Response to Low-Potassium Conditions. *Molecular Plant*, **5**, 1042-1057. <https://doi.org/10.1093/mp/sss003>
- [35] Kim, H.-H., Goins, G.D., Wheeler, R.M. and Sager, J.C. (2004) Stomatal Conductance of Lettuce Grown Under or Exposed to Different Light Qualities. *Annals of Botany*, **94**, 691-697. <https://doi.org/10.1093/aob/mch192>
- [36] 李海云, 刘焕红. 夜间补光对黄瓜幼苗激素含量及养分吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16): 74-78.
- [37] 唐定台, 徐民新, 冯永红. 石竹试管花的诱导及其影响因子的研究[J]. 园艺学报, 1996(3): 71-74.
- [38] 蒋凌雁, 高梦泽, 杨丽云, 等. 植物质膜蛋白质调控生物胁迫研究进展[J]. 植物生理学报, 2021, 57(2): 323-336.
- [39] 张其德, 张世平, 张启丰. 在植物光合作用中镁离子的作用[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 1992(1): 82-88.
- [40] Wang, W., Su, M., Li, H., Zeng, B., Chang, Q. and Lai, Z. (2018) Effects of Supplemental Lighting with Different Light Qualities on Growth and Secondary Metabolite Content of *Anoectochilus roxburghii*. *PeerJ*, **6**, Article ID: e5274. <https://doi.org/10.1093/aob/mch192>