

植物工厂LED光质调控对芹菜产量和品质的影响

王宇航^{1*}, 王晓庆², 王哲^{1,2#}

¹至农科技发展(浙江)有限公司, 浙江 杭州

²浙江农林大学园艺科学学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年5月15日; 录用日期: 2023年6月13日; 发布日期: 2023年6月21日

摘要

为探讨植物工厂中不同光质对芹菜品质的影响, 本研究选用4种不同红蓝光配比的LED光源开展实验。结果表明: 红光:蓝光 = 3:1促进了芹菜根冠比和产量的增加和提高, 同时提高了维生素C含量、纤维素含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量, 且差异最显著。综合各指标表明, 红光:蓝光 = 3:1是适于植物工厂芹菜生长的光质配比。

关键词

黄瓜, 光质调控技术, LED, 芹菜, 植物工厂, 红蓝组合光, 提高产量, 品质

The Effect of LED Light Quality Control in Plant Factories on Yield and Quality of Celery

Yuhang Wang^{1*}, Xiaoqing Wang², Zhe Wang^{1,2#}

¹Zhinong Science and Technology Development (Zhejiang) Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

²College of Horticulture Science, Zhejiang A&F University, Hangzhou Zhejiang

Received: May 15th, 2023; accepted: Jun. 13th, 2023; published: Jun. 21st, 2023

Abstract

To explore the impact of different light qualities on celery quality in plant factories, this study conducted experiments using four LED light sources with different ratios of red and blue light. The

*第一作者。

#通讯作者。

results showed that red light:blue light = 3:1 promoted the increase and improvement of root-to-shoot ratio and yield of celery, while increasing vitamin C content, cellulose content, soluble sugar content, and soluble protein content, with the most significant differences. The comprehensive indicators indicate that red light:blue light = 3:1 is the optimal light quality ratio for celery growth in plant factories.

Keywords

Cucumber, Light Quality Control Technology, LED, Celery, Plant Factories, Red and Blue Combination Light, Increase Production, Quality

Copyright © 2023 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

芹菜(*Apium graveolens* L.)是伞形科芹属一种一年或有限多年生草本植物,因药食同源在世界各地广泛种植,同时也是香精油、芹菜素等众多化工产品的主要来源[1]。在中国大多采用传统的大田和大棚单层种植,但受到外界环境影响较大,再加上土壤次生盐渍化加剧,很难做到高产、稳产、品质好[2],单层种植极大地消耗着土地、空间、人工和时间。植物工厂可取代不稳定的农业环境,采用立体栽培模式可充分利用有限空间,精确调控水、光、温、气、肥,提高作物种植效率和作物品质[3]。

光是植物生命活动的主要能量源泉,也是制约植物生长发育的最重要非生物因子之一[4]。光质对植物的形态建成、光能转化、物质代谢、信号转导和基因表达等生理生化活动具有重要的调控作用,同时对植物的生物合成和品质的提高有重要影响[5]。由于植物体内存在着一套光接收和转导系统,所以植物会随着光质的改变而做出一定的适应性反应[6] [7]。相比其他光源,LED光源具有节能环保、光电转化效率高、光谱可定制、耐用、稳定性高等优点[8],可保障蔬菜和粮食安全。植物工厂创造出完全可控的植物生长环境,根据不同植物的生长发育特性,来设置环境控制相关参数,为植物生长提供最适宜的条件,以实现高产、优质、高效的目的。红光可通过抑制叶片光合产物的增加,来达到增加淀粉累积的目的,进而对植物的生长发育进行调控[9];蓝光通过调节叶绿体和叶绿素的数量和形成速度、细胞气孔的开闭等措施来对植物的发育形态进行调控。有研究表明,红蓝光 $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光环境可显著提高生菜的维生素C含量[10];提高蓝光含量有利于植物维生素与可溶性蛋白的含量[11],但是蓝光处理下植物体内硝酸盐的含量相对较高[12] [13];单一红光可增加植物体内粗纤维的含量[14],维生素C、类黄酮、可溶性蛋白含量却降低[15];在生菜采收前进行红光:蓝光 = 2:1 补光处理可显著提高可溶性糖的含量,同时降低硝酸盐含量[16];红蓝光处理可显著提高番茄可溶性糖和可溶性蛋白的含量,同时降低可滴定酸的含量[17]。通过人工光源技术,调制利于植物特征生长的光谱,改变植物的生长规律,对提高产量和品质、加快现代农业发展具有重要的现实意义[18]。因此,本文配置不同的LED光质配比组合光源,研究不同光质对比对芹菜品质的影响,筛选芹菜较适宜的光质配比,以期为芹菜工厂化种植和未来农业发展提供参考依据和技术支持。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

供试材料为“四季小香芹”芹菜,由浙江省农科院提供。

2.2. 实验设计

根据光质配比不同实验共设 4 个处理, 分别为 LED 白光对照(CK)、红光:蓝光 = 1:1 (A)、红光:蓝光 = 2:1 (B)、红光:蓝光 = 3:1 (C)。红色 LED 光源的峰值波长为 660 nm, 蓝色 LED 光源的峰值波长为 450 nm。

2.3. 实验方法

经筛选获得籽粒饱满、活性强的芹菜种子, 在 55℃ 下浸种 15 mins 杀菌, 然后浸于 25℃ 水中浸泡 24 h, 然后将种子平铺在湿度适宜的滤纸上并放于培养皿中, 放入 25℃ 培养箱中进行催芽, 等到 80% 种子露白后进行播种, 基质采用珍珠岩、蛭石、草炭混合基质。控制光照时期温度 22℃ ± 2℃, 黑暗时期温度 15℃ ± 2℃, 光照时间 12 h/d, 相对湿度 75%。

当幼苗长至第 4 片真叶展平后, 选取长势均一的幼苗, 定植于水培槽上, 置于各处理 LED 光源下方, 通过调整光源到芹菜冠层表面的距离使实验材料所处的光通量密度为 280 μmol/(m²·s), 每处理 24 株。营养液 pH 值调至 6.5 ± 0.5, EC 值调至 2 ± 0.5 m·S/cm, 7 d 换一次营养液, 栽培时间为 55 d 收获。

2.4. 项目测定

每个处理随机选取 3 株进行形态指标测定, 然后取平均值。维生素 C 采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定 [19], 可溶性糖采用硫酸 - 苯酚比色法测定 [20], 粗纤维含量测定采用酸性洗涤法 [21], 可溶性蛋白质量分数使用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定 [22]。

2.5. 数据分析

本次实验数据采用 Office 2019 和 SPSS 22.0 软件进行方差分析及多重比较。

3. 结果分析

3.1. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜根冠比的影响

由图 1 可知, 在不同光质配比处理下, 芹菜根冠比表现为处理 C > 处理 B > CK > 处理 A。处理 C 达到 37%, 显著高于 CK 和其它处理, 处理 B 显著高于处理 A, CK 和处理 A、B 差异均不显著。说明处理 C 的光质配比比较利于芹菜壮苗培育。

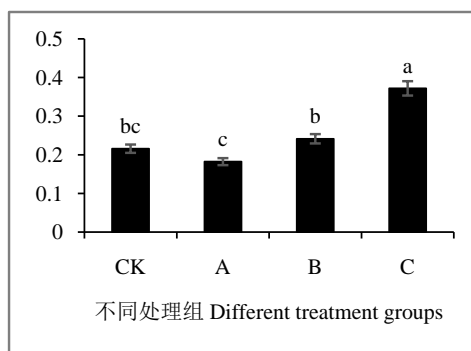


Figure 1. Effect of different light quality ratios on the root crown ratio of celery in plant factories

图 1. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜根冠比的影响

3.2. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜产量的影响

由图 2 可知, 在不同光质配比处理下, 芹菜亩(666.67 m²)产量从高到低表现为处理 C > 处理 B > 处

理 A > CK。各处理均高于 CK，且处理 B 和 C 显著高于 CK 和处理 A，处理 C 产量最高，达到 3675 kg，CK 和处理 A 差异不显著。说明处理 C 的光质配比比较利于芹菜产量的提高。

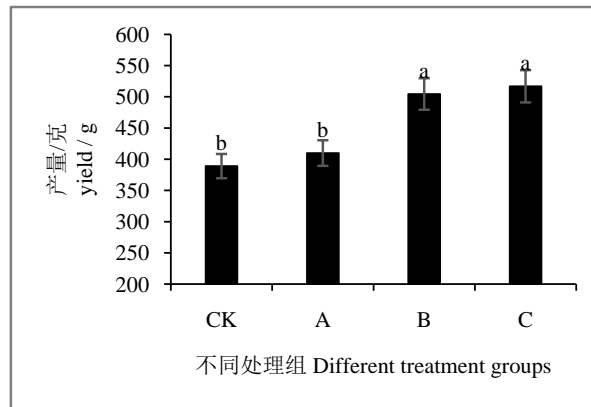


Figure 2. Effect of different light quality ratios on the yield of celery in plant factories
图 2. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜产量的影响

3.3. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜维生素含量的影响

由图 3 可知，在不同光质配比处理下，芹菜维生素含量表现为 CK > 处理 C > 处理 A > 处理 B。CK 组芹菜的维生素含量最高，达到 510.4 mg/kg；处理 C 和 CK 组维生素含量显著高于处理 A 和处理 B，且处理 C 和 CK 组之间差异未达到显著水平，处理 A 和处理 B 之间差异未达到显著水平。说明 CK 和处理 C 的光质配比比较利于芹菜维生素含量的提高。

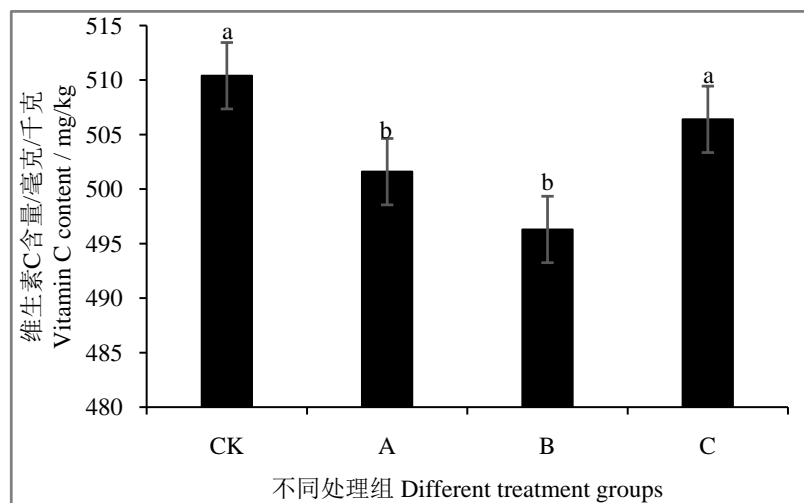


Figure 3. Effect of different light quality ratios on the vitamin content of celery in plant factories

图 3. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜维生素含量的影响

3.4. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜纤维素含量的影响

由图 4 可知，在不同光质配比处理下，芹菜纤维素含量表现为处理 B > 处理 C > 处理 A > CK。处理 B 芹菜纤维素含量最高，达到 3.8 mg/kg，显著高于 CK 和处理 A，与处理 C 之间差异未达到显著水平；

处理 C 显著高于处理 A 和 CK；处理 A 和 CK 之间差异未达到显著水平。说明处理 B 和处理 C 的光质配比比较利于芹菜纤维素含量的提升。

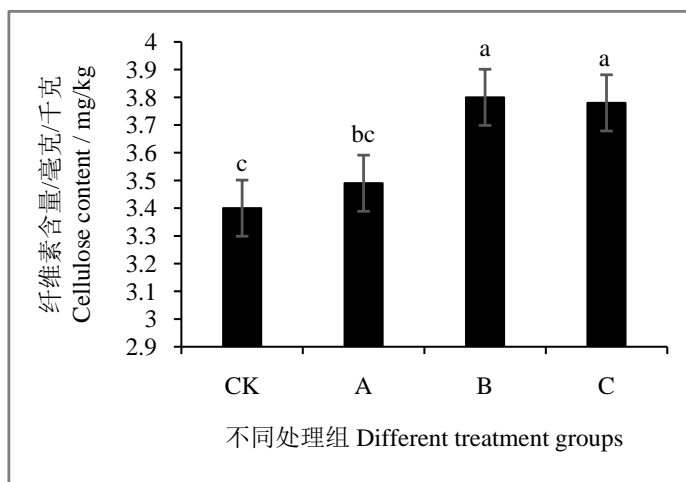


Figure 4. Effect of different light quality ratios on the cellulose content of celery in plant factories

图 4. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜纤维素含量的影响

3.5. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜可溶性糖含量的影响

由图 5 可知，在不同光质配比处理下，芹菜可溶性糖含量表现为处理 C > 处理 B > 处理 A > CK。处理 C 芹菜可溶性糖含量最高，达到 13.5%，显著高于 CK 组，与处理 A 和处理 B 差异未达到显著水平；CK 和处理 A、B 之间差异未达到显著水平。说明处理 C 的光质配比比较利于芹菜可溶性糖含量的积累和提高。

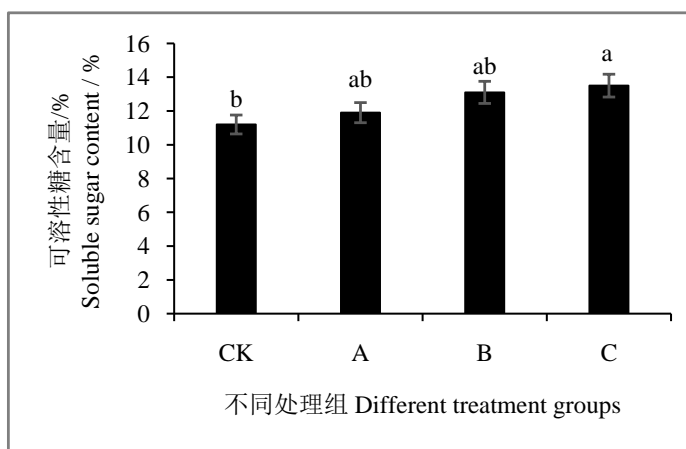


Figure 5. Effect of different light quality ratios on the soluble sugar content of celery in plant factories

图 5. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜可溶性糖含量的影响

3.6. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜可溶性蛋白含量的影响

由图 6 可知，在不同光质配比处理下，芹菜可溶性蛋白含量表现为处理 C > 处理 B > CK > 处理 A。

处理 C 芹菜可溶性蛋白含量最高, 达到 63.07%, 显著高于 CK 和处理 A, 与处理 B 之间差异未达到显著水平; 处理 B 和 CK 之间差异未达到显著水平, 但显著高于处理 A; 处理 A 和 CK 之间差异未达到显著水平。说明处理 C 的光质配比比较利于芹菜可溶性蛋白含量的提高。

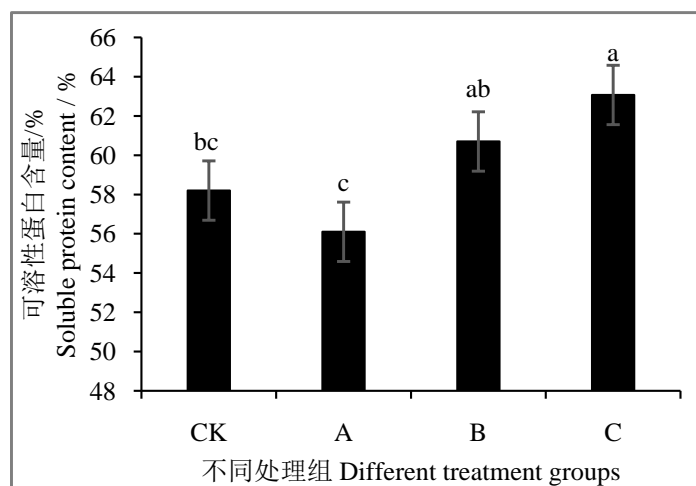


Figure 6. Effect of different light quality ratios on the soluble protein content of celery in plant factories

图 6. 不同光质配比处理对植物工厂芹菜可溶性蛋白含量的影响

4. 讨论

光是制约植物工厂中植物各阶段生长发育的主要非生物因子之一, 在光合作用和植物生长发育调控等方面至关重要。不同光质配比的光源会产生包括形态建成、有机物合成、碳氮代谢等在内的不同的生物学效应[23]。植物叶绿素主要吸收、转化可见光中的红蓝光, 因此, 红光和蓝光是光合作用的基本能源[24]。对大多数植物而言, 红光可促进茎的伸长, 可促进叶片增大, 抑制叶绿素的形成[25]; 蓝光则抑制叶片的增大, 抑制茎的生长, 矮化植株[26], 促进叶绿素的形成[27]; 过量的红光可引起植物的徒长, 造成幼苗抗性低、易倒伏[28], 过量的蓝光抑制植物生长, 节间变短、提前衰老和降低产量[29]。因此, 科学的红蓝光配比在植物的生长过程中尤其重要, 更能促进植物生长[30]。本实验结果表明, 红光:蓝光 = 3:1 的光质配比可显著提高植物工厂芹菜的根冠比和产量。

各营养物质含量决定着芹菜的品质和口感。Fan 等和李海达等的研究表明, LED 的光环境可显著提高可溶性糖和蔗糖的含量[31] [32]。陈娴等研究表明, 红光可促进可溶性糖和粗纤维含量的提高, 蓝光抑制可溶性糖和粗纤维含量的提高, 可显著提高维生素 C 含量, 在红光:蓝光 = 7:1 混合光处理下, 韭菜的维生素 C 和可溶性蛋白含量最高[33]。红蓝光混合光源处理下的植物品质均优于白光对照组。本实验结果表明, 在红光:蓝光 = 3:1 处理下, 芹菜的维生素 C 含量、纤维素含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量均达到较好的指标。

5. 结论

综上所述, 在本实验条件下, 不同红蓝光配比的光源可显著调控植物工厂中芹菜的生长, 与 CK (LED 白光)效果相比, 处理 C 促进了根冠比和产量的增加和提高, 同时提高了维生素 C 含量、纤维素含量、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量, 且差异最显著, 因此, 红光:蓝光 = 3:1 为植物工厂芹菜生产的优选光质配比。

参考文献

- [1] Li, M.Y., Feng, K., Hou, X.L., *et al.* (2020) The Genome Sequence of Celery (*Apium graveolens* L.), an Important Leaf Vegetable Crop Rich in Apigenin in the Apiaceae Family. *Horticulture Research*, **7**, Article No. 9. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0235-2>
- [2] 王哲, 柴里昂, 樊怀福, 等. 植物响应盐胁迫蛋白质组学研究进展[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(6): 1021-1028.
- [3] 陈淑君, 赵凤, 姚慧敏, 等. 人工光植物工厂水培生菜高效生产关键技术[J]. 中国果菜, 2023, 43(1): 80-84.
- [4] 谢景, 刘厚诚, 宋世威, 等. 侧面补光对温室黄瓜(*Cucumis sativus* L. cv. Shenchun)果实生长和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2013, 44(5): 616-621.
- [5] 邢阿宝, 崔海峰, 俞晓平, 等. 光质及光周期对植物生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2018(3): 163-172.
- [6] 施杰, 杨海燕, 吴文龙, 等. 不同光质对蓝莓生长发育及生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2022(6): 15-23.
- [7] Hutchinson, V.A., Currey, C.J. and Lopez, R.G. (2012) Photosynthetic Daily Light Integral during Root Development Influences Subsequent Growth and Development of Several Herbaceous Annual Bedding Plants. *Hortscience*, **47**, 856-860. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.47.7.856>
- [8] 杨其长. LED 在农业领域的应用现状与发展战略[J]. 中国科技财富, 2011(1): 102-107.
- [9] 曹刚, 张帆, 任静, 等. 不同光质 LED 光源对黄瓜幼苗光合参数、水分利用效率和叶绿体超微结构的影响[J]. 中国沙漠, 2013(3): 765-771.
- [10] 王志敏, 宋非非, 徐志刚, 等. 不同红蓝 LED 光照强度对叶用莴苣生长和品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2011(16): 44-49.
- [11] Nair, I., Mazumdar, P., Singh, P., *et al.* (2021) Increasing the Ratio of Blue to Red Light Improves Growth and Phytochemical Content in *Hydrocotyle bonariensis*. *Russian Journal of Plant Physiology*, **68**, 337-346. <https://doi.org/10.1134/S1021443721020126>
- [12] Tembo, Z.N. and Aygun, S.F. (2021) Capillary Electrophoretic Method for the Simultaneous Determination of Nitrate, Nitrite and Bromate Ions in Some Selected Plants. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **101**, 5391-5397. <https://doi.org/10.1002/jsfa.11187>
- [13] Kamath, D., Kong, Y., Dayboll, C., *et al.* (2021) Dynamic versus Concurrent Lighting with Red and Blue Light-Emitting Diodes as the Sole Light Source Can Potentially Improve *Campanula* Stock Plant Morphology for Cutting Production. *HortScience*, **56**, 1439-1447. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.16034-21>
- [14] Fan, Y., Yang, K., Miao, R., *et al.* (2022) Transcriptome Analysis Reveals the Effects of Red and Blue Light on the Physiological and Medicinal Components of *Dendrobium Denneanum*. *Industrial Crops and Products*, **180**, Article ID: 114798. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114798>
- [15] Gao, S., Kong, Y., Lv, Y., *et al.* (2022) Effect of Different LED Light Quality Combination on the Content of Vitamin C, Soluble Sugar, Organic Acids, Amino Acids, Antioxidant Capacity and Mineral Elements in Green Onion (*Allium fistulosum* L.). *Food Research International*, **156**, Article ID: 111329. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111329>
- [16] 刘家源, 张玉彬, 刘文科. 采前红蓝光连续光照光强对水培生菜生长、品质及 AsA 代谢的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(5): 76-84.
- [17] 徐梦珠, 王芽芽, 张铨锋, 等. 红蓝光和外源钙对番茄果实生长及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 101-110.
- [18] 崔文华, 杨立娜. 光源对草莓生长发育影响的研究现状概述[J]. 中国南方果树, 2012, 41(5): 37-39.
- [19] Loktyushkin, A.V., Lovyagina, E.R. and Semin, B.K. (2022) Features of Using 2,6-Dichlorophenolindophenol as an Electron Acceptor in Photosynthesis Studies. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, **76**, 210-215. <https://doi.org/10.3103/S0096392521040088>
- [20] Yu, X., Ali, M.M., Li, B., *et al.* (2021) Transcriptome Data-Based Identification of Candidate Genes Involved in Metabolism and Accumulation of Soluble Sugars during Fruit Development in “Huangguan” Plum. *Journal of Food Biochemistry*, **45**, e13878. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13878>
- [21] Nancy, T. (2009) Evaluation of Analytical Methods for the Determination of Moisture, Crude Protein, Crude Fat, and Crude Fiber in Distillers Dried Grains with Solubles. *Journal of AOAC International*, **92**, 61-73. <https://doi.org/10.1093/jaoac/92.1.61>
- [22] Kaji, H., Tsuji, T., Mawuenyega, K.G., *et al.* (2015) Profiling of *Caenorhabditis elegans* Proteins Using Two-Dimensional Gel Electrophoresis and Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization-Time of Flight-Mass Spectrometry. *Electrophoresis*, **21**, 1755-1765. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1522-2683\(20000501\)21:9<1755::AID-ELPS1755>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1522-2683(20000501)21:9<1755::AID-ELPS1755>3.0.CO;2-S)
- [23] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2015(8): 1217-1234.

- [24] 王哲, 王宇航, 解山森, 等. 植物工厂 LED 光质调控对生菜幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2023(3): 76-81.
- [25] 陈孝丑, 杨芮, 户帅雅, 等. 红蓝复合光对'阳光红心'红掌生长和叶绿素荧光反应的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(2): 224-230.
- [26] Pashkovskiy, P., Kartashov, A., Zlobin, I., *et al.* (2016) Blue Light Alters miR167 Expression and microRNA-Targeted Auxin Response Factor Genes in *Arabidopsis thaliana* Plants. *Plant Physiology & Biochemistry*, **104**, 146-154.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.03.018>
- [27] Miyashita, Y., Kitaya, Y. and Kozai, T. (1995) Effects of Red and Far-Red Light on the Growth and Morphology Plantlet *in Vitro*: Using Light Emitting Diodes as a Light Source for Micropropagation. *Acta Horticulturae*, **393**, 189-194.
<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1995.393.22>
- [28] 史宏志, 韩锦峰, 官春云, 等. 红光和蓝光对烟叶生长、碳氮代谢和品质的影响[J]. 作物学报, 1999, 25(2): 215-220.
- [29] Oyaert, E., Volckaert, E. and Debergh, P. (1999) Growth of Chrysanthemum under Coloured Plastic Films with Different Light Qualities and Quantities. *Scientia Horticulturae*, **79**, 195-205.
[https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00207-6](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00207-6)
- [30] 陈文昊, 徐志刚, 刘晓英, 等. LED 光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1434-1440.
- [31] Fan, X.X., Yang, Y. and Xu, Z. (2021) Effects of Different Ratio of Red and Blue Light on Flowering and Fruiting of Tomato. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **705**, Article ID: 012002.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/705/1/012002>
- [32] 李海达, 吉家曾, 郑桂建, 等. 不同 LED 补光光源对樱桃番茄产量和品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(14): 37-40.
- [33] 陈娴, 刘世琦, 孟凡鲁, 等. 不同光质对韭菜营养品质的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2012, 43(3): 361-366.