

doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2024.03.04

LED 补光对温室罗勒生长和品质的影响

李志鑫¹, 刘嘉伟¹, 成永三², 杨延杰¹, 闫征南^{1,3}

(1. 青岛农业大学 园艺学院, 山东 青岛 266109; 2. 山西农业大学 园艺学院, 山西 太谷 030801;

3. 七彩庄园蔬菜食品基地有限公司, 山东 寿光 262700)

摘要: 采用适宜的补光调控策略对于温室培育高产优质的罗勒(*Ocimum basilicum*)植株至关重要。试验在补充相同日累积光照量的条件下, 使用白色(W)、蓝色(B)和红蓝(RB)LED对温室罗勒进行补光, 以未补光为对照(CK), 探究不同光质对罗勒植株生长和品质的影响并进行综合评价。结果表明, 与CK相比, RB处理中罗勒叶片的总叶绿素含量、地上部干质量和地上部鲜质量分别提高了45.1%、274.3%和232.7%, 罗勒叶片的可溶性糖含量和维生素C含量分别提高了357.1%和52.9%; B处理中罗勒叶片的叶绿素a含量和维生素C含量分别提高了51.2%和76.5%。采用主成分分析及综合评价, 得出RB处理的罗勒植株综合得分最高, 排名第1。综上, 补光处理的罗勒植株在生长和品质方面均优于未补光处理, 且补充红蓝LED光源有利于罗勒植株的生长, 确定红蓝LED光源为秋冬和早春等弱光季节温室内罗勒栽培的适宜补光策略。

关键词: 罗勒; 补光; LED光源; 品质; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: S649 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2024)03-0021-08

Effects of Supplementary LED Light on the Growth and Quality of Greenhouse Basil

LI Zhixin¹, LIU Jiawei¹, CHENG Yongsan², YANG Yanjie¹, YAN Zhengnan^{1,3}

(1. College of Horticulture, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. College of Horticulture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China;

3. Shandong Qicai Manor Vegetable Food Base Co., Ltd., Shouguang 262700, China)

Abstract: It is important to adopt appropriate regulation strategies of supplementary light for the cultivation of high-yield and high-quality basil(*Ocimum basilicum*) plants in greenhouse. In this experiment, white(W), blue(B), and red plus blue(RB) LED were used as supplementary light for basil in greenhouse with same daily light integral, and the basil grown without supplementary light was used as the control(CK) to explore the influences of different light qualities on the growth and quality of basil plants and conduct comprehensive evaluation. The results showed that the total chlorophyll content and shoot dry and fresh weight of basil plants in treatment RB were increased by 45.1%, 274.3%, and 232.7% compared with CK, respectively, and the soluble sugar content and vitamin C content of basil leaves were increased by 357.1% and 52.9%, respectively. Compared with CK, chlorophyll a content and vitamin C content of basil leaves in treatment B were increased by 51.2% and 76.5%, respectively. In addition, the methods of principal component analysis and comprehensive evaluation showed that the comprehensive scores of basil plants treated by RB were the highest and ranked the first. In summary, the growth and quality of basil plants treated with supplementary light were superior to those treated without supplementary light, and the addition of red plus blue LED was beneficial to the growth of basil plants. Therefore, the red plus blue LED light source was a suitable supplementary strategy for basil cultivation in greenhouse during the weak light seasons such as autumn, winter, and early spring.

Key words: basil; supplementary light; LED lights source; quality; principal component analysis; comprehensive evaluation

罗勒(*Ocimum basilicum*)为唇形科罗勒属1年生草本植物, 喜阳光和温暖环境, 因其较高的营养价值而具有广阔的市场前景^[1]。罗勒为药食两用植物, 全株可入药, 具有抗炎、抗菌、抗病毒、抗氧化等

药理作用^[2-3]。其生长期需要充足的光照, 以保证植株的正常光合作用, 提高其光合能力^[4]。作为植物生长重要的环境因子之一, 光环境在罗勒生长发育过程中起着至关重要的作用^[5]。由于秋冬季节和雾

收稿日期: 2023-08-11

基金项目: 山东省乡村振兴科技创新提振行动计划(2021TZXD007-02); 山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QC174); 山东省蔬菜产业技术体系项目(SDAIT-05); 青岛农业大学大学生创新创业训练项目

作者简介: 李志鑫(1999-), 男, 山东潍坊人, 在读硕士, 研究方向: LED光环境生理。

通信作者: 闫征南(1991-), 男, 河北保定人, 讲师, 博士, 硕士生导师, 主要从事LED光环境生理与设施园艺研究工作。

霾、阴雨天气的光照强度较低和光环境较弱^[6],设施内光照不能满足罗勒的生长需求,严重影响罗勒的生长发育和品质形成。因此,在罗勒生长过程中补充人工光源,弥补自然条件下光照较弱的问题,对罗勒生产具有重要意义^[7-8]。

近年来,LED光源技术快速发展,其在植物生产中具有广阔的应用价值。与传统光源相比,LED光源具有光谱性能好、发光效率高、体积小、无污染和使用寿命长等优势^[9-10],被广泛应用于植物补光栽培方面。在秋冬季或早春设施内低温弱光条件下,采用LED光源进行补光可促进植物生理代谢,为植物的正常生长发育提供有利条件^[11]。不同LED光质具有不同的生物学效应^[12-13],蓝色LED有利于提高植物叶绿素含量和促进品质的形成^[14-15],红色LED可以促进植株的生长和碳水化合物的合成^[16]。母德锦等^[17]探究了红色LED对蚕豆幼苗生长和生理生化特性的影响,发现补充适宜比例的红光有助于提高蚕豆幼苗的生物量,但蚕豆叶片的可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量显著下降。红蓝LED综合了蓝色和红色LED的特点,有利于促进植株的生长发育和品质形成。王丽伟等^[18]探究了不同光质补光对番茄生长的影响,结果表明,红蓝组合光对设施栽培的番茄幼苗生长促进作用显著。与红蓝LED相比,白色LED具有发光效率高和广谱特性。周成波等^[19]研究表明,与红蓝光相比,白色LED更有利于促进生菜的生长和氮、磷、钾和碳元素的累积。而ZHANG等^[20]探究了LED补光对番茄植株生长和生理特性的影响,结果表明,与红蓝LED相比,使用白红LED补光的番茄幼苗更加健壮。红蓝LED与白色LED对植物的生长发育极其重要,但在红蓝LED对植物产量和品质的研究多集中在叶菜和果菜等方面,在高附加值的药用植物方面研究较少,因此,本试验以未补光为对照,研究不同光质补光对罗勒生长和品质形成的影响,并通过综合评价筛选出适宜罗勒植株生长的补光策略,为罗勒的高品质生产提供理论依据和技术支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试罗勒品种为绿罗勒,由北京凤鸣雅世科技发展有限公司提供。罗勒幼苗在青岛农业大学人工气候室内选择72孔育苗穴盘进行培育,育苗基质为草炭、蛭石和珍珠岩(体积比3:1:1)。待幼苗第3片真叶展开后,将罗勒幼苗移栽至育苗钵中进行

试验处理。栽培期间每3d浇灌1次霍格兰营养液,营养成分为(mg/L):Ca(NO₃)₂·4H₂O,945;KNO₃,607;MgSO₄·7H₂O,493;NH₄H₂PO₄,115;Na₂Fe-EDTA,30;MnSO₄·H₂O,2.13;CuSO₄·5H₂O,0.08;ZnSO₄·7H₂O,0.22;H₃BO₃,2.86;(NH₄)₆Mo₆O₂₄·4H₂O,0.02,每次浇灌150~200mL,EC值控制在1.8~2.0mS/cm,pH值控制在5.5~6.5。

1.2 试验设计

试验于2022年11—12月在青岛农业大学Venlo温室进行。温室内自然光的日累积光照量为5mol/(m²·d),设置补光日累积光照量为7.9mol/(m²·d),补光强度183μmol/(m²·s)和补光时长12h/d^[21]。以温室自然光为对照(CK),采用白色(W)(潍坊恒信电器有限公司)、蓝色(B)(潍坊恒信电器有限公司)和红蓝(RB)LED(艾尔之光照明科技有限公司)进行不同补光处理,其中白色LED中蓝光(400~499nm)、绿光(500~599nm)和红光(600~700nm)占比分别为28.5%、49.1%和22.4%,红蓝LED中的蓝光、绿光和红光占比分别为32.1%、1.4%和66.5%。控制温室的温度为(25±3)℃/(18±3)℃(光期/暗期),相对湿度为65%~70%,处理21d后统一采收,并进行相关指标的测定。

1.3 测定指标及方法

每个处理随机选取5株长势均匀的罗勒植株进行指标测定,分别测量株高和茎粗,并将植株地上部和地下部分开测量其鲜质量,烘干后测量其干质量。罗勒叶片叶绿素含量采用分光光度法进行测定。罗勒叶片可溶性蛋白质含量和可溶性糖含量分别采用考马斯亮蓝G-250法和蒽酮比色法测定。维生素C含量采用比色法测定^[22]。

1.4 数据分析

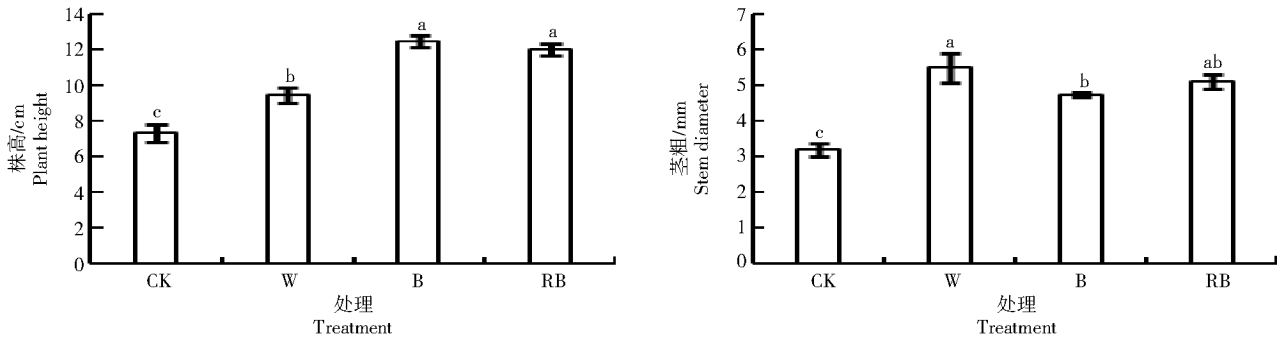
使用SPSS 26.0进行统计分析,差异显著性检验采用LSD法。使用Microsoft Excel 2019、Origin 2023和TBtools(<http://cj-chen.github.io/TBtools/>)进行图表制作和热图分析。

2 结果与分析

2.1 LED补光对罗勒植株生长的影响

从图1可以看出,B处理下罗勒的株高与CK相比增加70%,RB处理下罗勒的株高与CK和W处理相比,分别增加了64.1%和34.9%;W处理培育的罗勒的茎粗最大,W处理、RB处理罗勒茎粗与CK相比,分别增加了71.9%和59.7%。B处理对罗勒的株高促进作用显著,但与RB处理的株高差

异不显著。W处理对罗勒的茎粗促进作用显著,但与RB处理的茎粗差异不显著。



柱形图上不同小写字母表示 $P < 0.05$ 的显著性差异水平。图2-3同
Different lowercase letters in the figure indicated significant differences ($P < 0.05$). The same as Fig.2-3

图1 不同光质处理下罗勒植株的生长指标
Fig.1 Growth indexes of basil plants under different light quality treatments

2.2 LED补光对罗勒植株生物量的影响

由表1可知,与CK相比,RB处理使罗勒地上部鲜质量和干质量分别增加了232.7%和274.3%,与W处理相比,RB处理的罗勒地上部鲜质量增加了32.4%。与CK相比,RB处理对罗勒地上部鲜质

量和地上部干质量的促进作用显著($P < 0.05$),但罗勒的地上部干质量在各补光处理间无显著差异。W处理对罗勒地下部鲜质量和地下部干质量的促进作用显著,但与RB处理相比,W处理的地下部干质量无显著差异。

表1 不同光质处理对罗勒植株生物量的影响
Tab.1 Effects of different light quality treatments on plant biomass of basil g/株

处理 Treatment	地上部鲜质量 Shoot fresh weight	地下部鲜质量 Root fresh weight	地上部干质量 Shoot dry weight	地下部干质量 Root dry weight
CK	4.65±0.31d	1.14±0.12d	0.35±0.04b	0.13±0.02c
W	11.68±0.40c	7.60±0.44a	1.21±0.19a	0.53±0.04a
B	12.69±0.23b	5.65±0.18c	1.21±0.03a	0.42±0.02b
RB	15.47±0.52a	6.65±0.36b	1.31±0.07a	0.51±0.03a

注:表中同列小写字母为0.05水平上的显著性差异。其余表同。
Note: The lowercase letters in the table were significant differences at the 0.05 level. The same as other tables.

2.3 LED补光对罗勒光合色素含量的影响

不同光质处理对罗勒光合色素含量的影响情

况如图2所示。

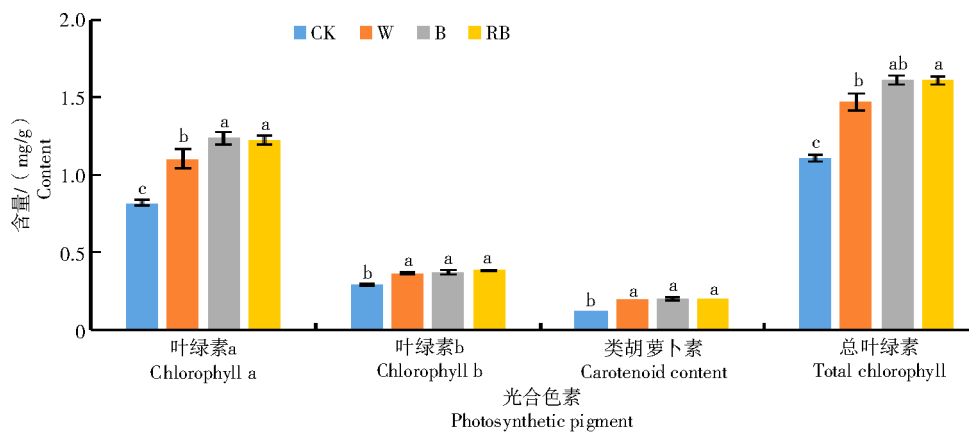


图2 不同光质处理对罗勒光合色素含量的影响
Fig.2 Effects of different light quality treatments on photosynthetic pigment content in basil plants

由图2可知,不同LED光质补光对罗勒叶片的光合色素含量有显著影响。与CK相比,B处理和RB

处理的罗勒叶片叶绿素a含量分别提高了51.2%和48.8%,与CK相比,各补光处理的叶绿素b含量和

类胡萝卜素含量显著提高($P < 0.05$),但各补光处理间无显著差异。与CK相比,B处理和RB处理罗勒叶片的总叶绿素含量分别提高了45.2%和45.1%。

2.4 LED补光对罗勒品质的影响

不同LED光质补光对罗勒品质的影响不同,所有补光处理的罗勒品质指标与CK相比均有显著性提高。从图3可以看出,RB处理的罗勒可溶性

糖含量最高,与CK和W处理相比,分别提高了357.1%和285.7%。B、RB处理的罗勒可溶性蛋白含量与CK相比,分别提高了13.3%和10.3%,各补光处理间可溶性蛋白含量无显著差异。B处理的罗勒维生素C含量最高,与CK相比,提高了76.5%,RB处理的罗勒维生素C含量与CK、W处理相比,分别提高了52.9%和4.9%。

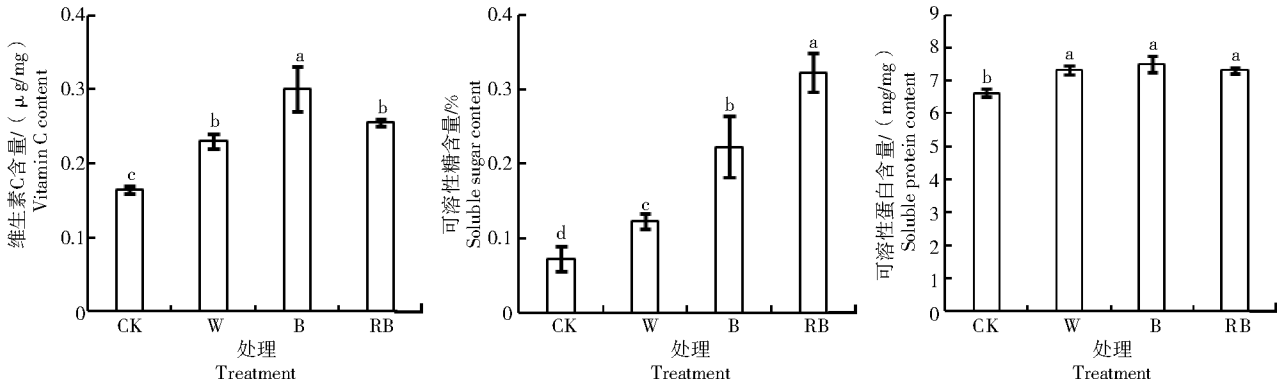


图3 不同LED补光对罗勒植株品质的影响
Fig.3 Effect of supplementary different LED light on basil plant quality

2.5 LED补光下罗勒生长和品质指标的相关性分析

为进一步探究罗勒植株生长和品质之间的关

系,对其进行相关性分析如图4所示。

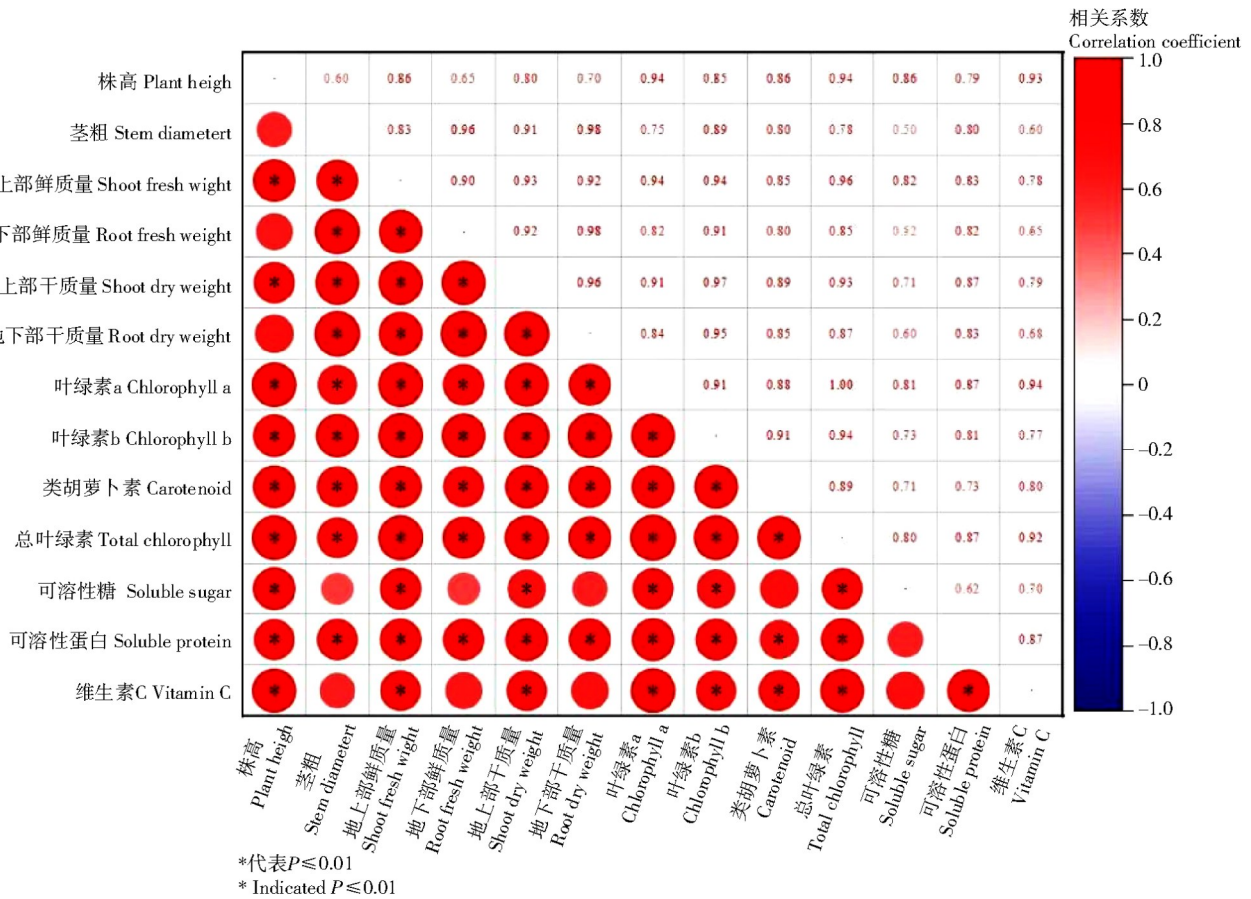


图4 罗勒生长和品质指标相关性分析
Fig.4 Correlation analysis of growth and quality indexes of basil

从图4可以看出,罗勒的地下部干质量与茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量和地上部干质量的相关系数分别为0.98、0.92、0.98和0.96,达到极显著正相关水平($P<0.01$)。总叶绿素含量与株高、茎粗、地上部鲜质量、地下部鲜质量、地上部干质量、地下部干质量、叶绿素a含量、叶绿素b含量和类胡萝卜素含量的相关系数分别为0.94、0.78、0.96、0.85、0.93、0.87、1.00、0.94和0.89,均达到极显著正相关水平($P<0.01$)。罗勒叶片的可溶性糖含量与株高、地上部干质量、地上部鲜质量、叶绿素a含量、叶绿素b含量和总叶绿素含量均达到极显著水平($P<0.01$)。

罗勒的维生素C含量与株高、地上部鲜质量、地上部干质量、叶绿素a含量、叶绿素b含量、类胡萝卜素含量、总叶绿素含量和可溶性蛋白含量的相关系数分别为0.93、0.78、0.79、0.94、0.77、0.80、0.92和0.87,这些指标间呈极显著正相关($P<0.01$)。

2.6 聚类热图分析

3种不同LED光质补光处理的罗勒呈现出一定的聚类性特征(图5),可以按指标划分为4类:第I类为地下部干质量、茎粗和地上部鲜质量,这3组指标中白光处理(W)的茎粗和地上部鲜质量差异大,值得注意的是RB处理的地下部干质量亦较高,其他值较为平均;第II类为类胡萝卜素含量、地上部干质量、叶绿素b含量、地上部鲜质量、叶绿素a含量和总叶绿素含量,RB处理的地上部鲜质量较高,B处理的叶绿素a含量、总叶绿素含量也比较高;第III类为可溶性糖含量,RB处理的可溶性糖含量与第IV类中B处理的维生素C含量最高;第IV类为可溶性蛋白含量、株高和维生素C含量,这组指标中B处理的维生素C含量是4组类别中最高的。由此可见,各指标之间存在不同程度的相关性,可溶性糖含量、维生素C含量和可溶性蛋白含量等受不同LED光质的影响较为明显。

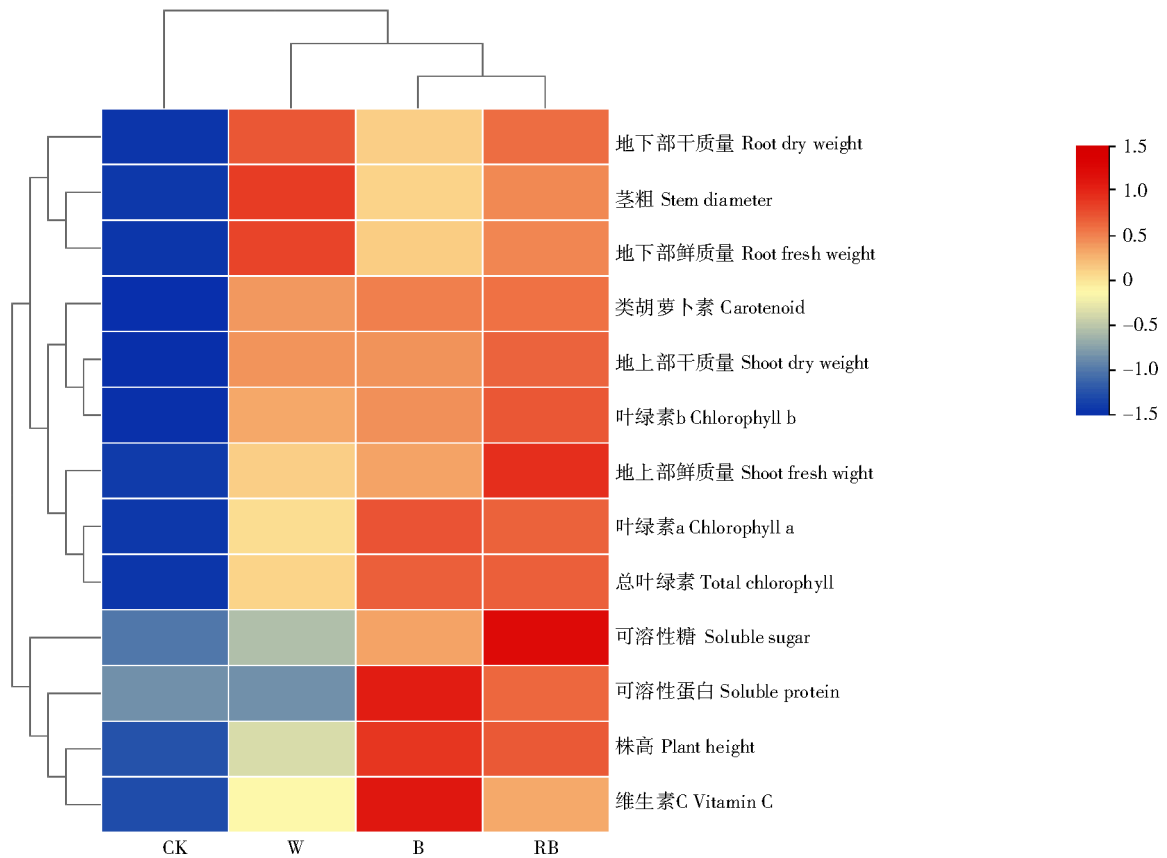


图5 罗勒生长和品质指标的聚类热图
Fig.5 Clustering heat map of growth and quality indexes of basil

2.7 LED补光对罗勒植株生长和生理指标影响的主成分分析

主成分分析是指将有联系的多个指标转化为几个综合指标,以达到降维的多元统计方法,其中

各个主成分为标准化后的随机变量线性组合而来。利用SPSS 26.0软件中的降维因子对罗勒幼苗13个生长和品质指标进行主成分分析,根据特征值大于1的准则,将13个单项指标转换为2个新的综合指

标,分别为主成分 1 和主成分 2。由表 2 可知,2 个主成分的特征值分别为 10.766 和 1.898,方差贡献率分别为 82.815% 和 14.601%,累计贡献率为 97.416%。将 2 个主成分因子的数据命名为变量

$$Z_1=0.28Z_1+0.27Z_2+0.28Z_3+0.24Z_4+0.30Z_5+0.21Z_6+0.30Z_7+0.30Z_8+0.30Z_9+0.30Z_{10}+0.24Z_{11}+0.21Z_{12}+0.27Z_{13} \quad (1)$$

$$Z_2=0.28Z_1+0.34Z_2-0.004Z_3+0.31Z_4+0.10Z_5+0.52Z_6-0.09Z_7+0.06Z_8+0.09Z_9-0.06Z_{10}-0.29Z_{11}-0.51Z_{12}-0.22Z_{13} \quad (2)$$

按 2 个主成分的特征值加权计算 13 个性状的主成分因子的综合得分 Z ,即不同处理综合评价指标计算公式: $Z=82.815 \times Z_1+14.601 \times Z_2$ 。由表 3 综合得分及排名可知, RB 处理综合得分为 1.92,排名第一,即使用红蓝 LED 补光为罗勒植株生长较适宜的补光策略。

表 2 主成分的特征值和贡献率
Tab.2 Eigenvalues and contribution rates of principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalues	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Accumulative contribution
1	10.766	82.815	82.815
2	1.898	14.601	97.416

表 3 成分综合得分及排名
Tab.3 Comprehensive scores and rankings of components

处理 Treatment	得分 Score			排序 Ranking
	F1	F2	F	
RB	2.32	-0.01	1.92	1
B	1.82	-0.68	1.41	2
W	0.66	1.78	0.81	3
CK	-4.81	-1.09	-4.14	4

3 结论与讨论

光是植物生长发育过程中重要的环境因素之一,既是植物进行光合作用、新陈代谢及基因表达的能量来源,也是植物形态建成的环境信号^[23]。植物在不同的环境条件下能够通过调整自身的生理状态来进行光合作用^[24]。弱光条件不利于植株的生长和有机物的积累,植株因缺乏光照而长势和品质不佳;在适宜植株生长的光强和光质下,植株将处于适宜的代谢状态^[25]。本研究结果表明,3 种补光处理中罗勒植株的生长状态和品质均优于未补光处理,且红蓝 LED 有利于促进罗勒的生长。红蓝 LED 光源综合了单色红光和蓝光的特点,具有促进植株生长的优势。由此可见,红蓝组合光对罗

V_1 、 V_2 ,根据 $F_1=\frac{V_1}{\sqrt{10.766}}$ 和 $F_2=\frac{V_2}{\sqrt{1.898}}$,计算得

到系数矩阵,并将得到的系数与标准化后的数据相乘,得到 2 个主成分的函数式。

勒的生长发育起到了促进作用,有利于培育高产的罗勒植株,与前人在番茄上的研究结果一致^[5]。作为光合作用基本能源的来源,红光和蓝光为叶绿体响应的主要光质^[26],从而促进了植株光合色素含量的提高。

徐凯等^[27]和江明艳等^[28]研究表明,红光可提高草莓和一品红的叶绿素含量,而董皓^[29]研究表明,蓝光有利于黄瓜幼苗抗氧化能力、可溶性蛋白含量和根系活力等指标的提高。本研究表明,与 CK 相比,蓝色 LED 处理的植株维生素 C 含量和可溶性蛋白含量最高,说明补充蓝光有利于罗勒维生素 C 的合成,与前人在番茄上的研究结果相一致^[30]。可溶性蛋白含量是表示植物代谢强度的重要指标之一^[31]。本试验表明,补光促进了罗勒可溶性蛋白含量的提高,但各补光处理间无显著差异。糖在叶形成及衰老过程中起调节作用,可溶性糖也可调节植物种子萌发和早期苗的发育,对植物的生长非常重要^[32]。本试验结果表明,使用红蓝 LED 补光,有利于温室罗勒的生物量积累和可溶性糖的合成。

主成分分析已广泛应用于苹果^[33]、鸭梨^[34]和猕猴桃^[35]等不同园艺作物果实品质的综合评价中。本试验利用主成分分析法将有联系的众多指标运用综合的变量进行概括,简化成 2 个彼此独立的主成分,2 个主成分的累计方差贡献率为 97.416%,能充分反映不同 LED 补光处理下罗勒植株品质的绝大部分信息,能较为客观地评价不同 LED 补光对罗勒植株生长和品质的影响。不同 LED 补光的综合得分从高到低依次为 RB(1.92)、B(1.41)、W(0.81)和 CK(-4.14),以 RB 补光的罗勒品质最佳。

不同 LED 光质补光显著影响罗勒植株的生长和品质形成。本研究利用主成分分析和综合评价对不同 LED 光质处理中罗勒生长和品质特性分析得出,补光处理的罗勒生长和品质指标均优于 CK,且与 W 处理相比, RB 处理对罗勒生产的改善效果最为突出,可应用于温室罗勒生产。

参考文献:

- [1] 郑琳,陈微,刘煜宇,等.甜罗勒香气成分分析及正交法优化香料制备工艺[J].食品研究与开发,2014,25(12):66-68.
ZHENG L, CHEN W, LIU Y Y, et al. Study on extract technology of clouds of smoke Zhuang impression of sweet basil by orthogonal design[J]. Food Research and Development, 2014, 25(12):66-68.
- [2] 廖祯妮,李茂娟,邓少华,等.GA₃、光照对不同罗勒种子萌发与幼苗生长的影响[J].中药材,2021,44(1):28-32.
LIAO Z N, LI M J, DENG S H, et al. Effects of GA₃ and light on seed germination and seedling growth of different basil[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2021, 44(1):28-32.
- [3] 魏克强,郭婷婷,宋欣,等.导入野生罗勒基因的烟草对镉胁迫的耐性与生理响应[J].山西农业科学,2019,47(10):1713-1716,1733.
WEI K Q, GUO T T, SONG X, et al. Tolerance and physiological response to cadmium stress in tobacco by introducing wild plant *Ocimum basilicum* L. genes[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(10):1713-1716, 1733.
- [4] 李运丽,侯喜林,李志强,等.光强对紫罗勒花青素含量及光合特性的影响[J].华北农学报,2011,26(3):231-238.
LI Y L, HOU X L, LI Z Q, et al. Effects of light intensity on anthocyanins contents and photosynthetic characteristics in purple basil(*Ocimum basilicum* L.) leaves[J]. Acta Agriculturae Borealsinica, 2011, 26(3):231-238.
- [5] 董桑婕,姜小春,王羚羽,等.远红光补光对辣椒幼苗生长和非生物胁迫抗性的影响[J].中国农业科学,2022,55(6):1189-1198.
DONG S J, JIANG X C, WANG L Y, et al. Effects of supplemental far-red light on growth and abiotic stress tolerance of pepper seedlings[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(6):1189-1198.
- [6] 马肖静,刘志强,刘勇鹏,等.不同红蓝光质组合夜间补光对番茄幼苗生长生理指标的影响[J].山东农业科学,2022,54(2):51-56.
MA X J, LIU Z Q, LIU Y P, et al. Effects of night light supplementation with different red and blue spectrum combinations on growth and physiological characters of tomato seedlings[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(2):51-56.
- [7] 廖建良,方健雄. CCFL补光对黄秋葵种子萌发和幼苗生长的影响[J].广东农业科学,2015,42(21):35-39.
LIAO J L, FANG J X. Influences of CCFL supplemental lighting on seed germination and seedling growth of okra[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(21):35-39.
- [8] 王政,张春玲,何松林,等.LED不同反光及照光方式对非洲菊组培苗生长的影响[J].河南农业科学,2022,51(4):120-129.
WANG Z, ZHANG C L, HE S L, et al. Effects of different LED reflecting and lighting methods on the growth of tissue culture seedlings of *Gerbera jamesonii*[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(4):120-129.
- [9] 刘厚诚.LED植物照明产业的发展现状与趋势[J].照明工程学报,2018,29(4):8-9.
LIU H C. Development status and trend of LED plant lighting industry[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2018, 29(4):8-9.
- [10] 郭林鑫,刘振威,乔丹丹,等.不同LED光质对南瓜幼苗生长及田间性状的影响[J].中国瓜菜,2022,35(2):55-60.
GUO L X, LIU Z W, QIAO D D, et al. Effects of different LED lights on growth and field characteristics of the winter squash seedling[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(2):55-60.
- [11] 韩文.LED补光对番茄幼苗生长调控的研究[D].石河子:石河子大学,2018.
HAN W. Study on the regulate of LED light on growth regulation of tomato seedlings[D]. Shihezi: Shihezi University, 2018.
- [12] DISSANAYAKE P, GEORGE D L, GUPTA M L. Effect of light, gibberellic acid and abscisic acid on germination of guayule (*Parthenium argentatum* Gray) seed[J]. Industrial Crops and Products, 2010, 32(2):111-117.
- [13] 乔新荣,段鸿斌,叶兆伟.植物向光素受体与信号转导机制研究进展[J].生物技术通报,2014(8):1-7.
QIAO X R, DUAN H B, YE Z W. Research advances on phototropin receptor and phototropin signaling mechanism in plant [J]. Biotechnology Bulletin, 2014(8):1-7.
- [14] 谢佐沐,蔡英健,余若莹,等.不同光质补光对火龙果茎生理特性及开花结果的影响[J].广西植物,2022,42(2):191-198.
XIE Z M, CAI Y J, YU R Y, et al. Effects of different supplemental light qualities on physiological characteristics, flowering and fruiting of pitaya stem[J]. Guihaia, 2022, 42(2):191-198.
- [15] 黄薪历.LED补光对番茄幼苗和生菜生长发育、产量及品质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2017.
HUANG X L. Effects of supplemental light on tomato seedlings and lettuce growth and development, yield and quality[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [16] 郭奕.不同光质LED光源组合对番茄及黄瓜育苗效果的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
GUO Y. The effect of different light quality LED light source combination to the tomato and cucumber seedlings[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021.
- [17] 母德锦,吴美珍,余琼芬,等.LED红光对蚕豆幼苗生长和生理生化特性的影响[J].中国瓜菜,2023,36(2):35-41.
MU D J, WU M Z, YU Q F, et al. Effects of LED red light on growth, physiology and biochemistry features of *Vicia faba* seedlings[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2023, 36(2):35-41.
- [18] 王丽伟,李岩,辛国风,等.不同比例红蓝光对番茄幼苗生长和光合作用的影响[J].应用生态学报,2017,28(5):1595-1602.
WANG L W, LI Y, XIN G F, et al. Effects of different proportions of red and blue light on the growth and photosynthesis of tomato seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(5):1595-1602.
- [19] 周成波,刘文科,邵明杰,等.不同光强的LED白光与红蓝光对生菜生长及营养元素含量的影响[J].中国农业科技导报,2021,23(12):76-83.
ZHOU C B, LIU W K, SHAO M J, et al. Effects of white vs. red/blue LED light of different intensity on the growth and nutrient element content of hydroponic lettuce[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(12):76-83.
- [20] ZHANG G, LI Z X, CHENG J, et al. Morphological and physiological traits of greenhouse-grown tomato seedlings as influenced by supplemental white plus red versus red plus blue

- LEDs[J]. *Agronomy*, 2022, 12(10):2450.
- [21] DOU H, NIU G, GU M, et al. Responses of sweet basil to different daily light integrals in photosynthesis, morphology, yield, and nutritional quality[J]. *Hortscience*, 2018, 53(4):496-503.
- [22] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2版. 北京:高等教育出版社, 2006:190-202.
WANG X K. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2006:190-202.
- [23] 王婷婷, 俞少娟, 李鑫磊, 等. LED光源对植物生理生化及品质影响研究进展[J]. *北方园艺*, 2016(2):189-193.
WANG T T, YU S J, LI X L, et al. Research progress of effect of LED light on plant physiological characteristics and quality[J]. *Northern Horticulture*, 2016(2):189-193.
- [24] MA Z Q, LI S S, ZHANG M J, et al. Light intensity affects growth, photosynthetic capability, and total flavonoid accumulation of *Anoectochilus* plants[J]. *HortScience*, 2010, 45(6):863-867.
- [25] 陈美香, 陈雄, 申宝营, 等. 激光和LED补光对番茄幼苗生长、光合作用及生理生化特性的影响[J]. *福建农业学报*, 2022, 37(3):335-343.
CHEN M X, CHEN X, SHEN B Y, et al. Effects of laser and LED on growth, photosynthesis, physiological and biochemical characteristics of *Solanum lycopersicum* seedlings[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(3):335-343.
- [26] 杨俊伟. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长及气孔运动的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
YANG J W. Effects of different ratios of red and blue light on tomato seedlings growth and stomatal movement[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [27] 徐凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2):369-375.
XU K, GUO Y P, ZHANG S L. Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(2):369-375.
- [28] 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.
JIANG M Y, PAN Y Z. Effects of light quality on the photosynthetic characteristics and growth of *Poinsettia*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, 33(2):338-343.
- [29] 董皓. 弱光下光质补光对黄瓜幼苗徒长调控的研究[D]. 广州:华南农业大学, 2016.
DONG H. Control on cucumber seedlings' spindling with LEDs of different light quality under weak light[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [30] 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, 46.
LI H D, JI J Z, ZHENG G J, et al. Effects of different LED light-supplement on the yield and quality of cherry tomato[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(14):37-40, 46.
- [31] 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, 51(8):1217-1234.
XU D Q, GAO W, RUAN J. Effects of light quality on plant growth and development[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(8):1217-1234.
- [32] 王嘉佳, 唐中华. 可溶性糖对植物生长发育调控作用的研究进展[J]. *植物学研究*, 2014(3):71-76.
WANG J J, TANG Z H. The regulation of soluble sugars in the growth and development of plants[J]. *Botanical Research*, 2014(3):71-76.
- [33] 宿夏菲, 崔雪丽, 毛云飞, 等. 不同授粉组合对'威海金'苹果果实品质的影响及综合评价[J]. *山东农业科学*, 2023, 55(1):55-62.
SU X F, CUI X L, MAO Y F, et al. Effects of different pollination combinations on fruit quality of 'Weihai Jin' apple and their comprehensive evaluation[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2023, 55(1):55-62.
- [34] 刘婉君, 张莹, 张玉星, 等. 18个品种授粉'鸭梨'果实品质和香气成分分析与评价[J]. *食品科学*, 2022, 43(2):294-302.
LIU W J, ZHANG Y, ZHANG Y X, et al. Analysis and evaluation of fruit quality and aroma components of 'yali' pear (*Pyrus bretschneideri* rehd.) pollinated with eighteen pollinizers[J]. *Food Science*, 2022, 43(2):294-302.
- [35] 李跃红, 冉茂乾, 徐孟怀, 等. 不同品种猕猴桃果实品质比较与综合评价[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(23):162-168.
LI Y H, RAN M Q, XU M H, et al. Comparison and comprehensive evaluation of fruit quality of different varieties of kiwifruit[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(23):162-168.