



郭水欢,袁思洁,郭楠楠,等. 发光二极管调控芽苗菜品质的研究进展[J]. 轻工学报,2025,40(1):49-57.
GUO S H, YUAN S J, GUO N N, et al. Research progress on the regulatory effect of light emitting diode on quality of microgreens[J]. Journal of Light Industry, 2025, 40(1):49-57. DOI:10.12187/2025.01.006

发光二极管调控芽苗菜品质的研究进展

郭水欢,袁思洁,郭楠楠,陈贤,樊亚敏,高晗,詹丽娟

河南农业大学 食品科学技术学院,河南 郑州 450002

摘要:芽苗菜正逐渐成为一类具有广阔发展前景和巨大市场潜力的新兴健康植物源食品。发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为一种高效、节能、环保的固态光源,已被广泛应用于芽苗菜的栽培和品质调控。基于芽苗菜的营养价值和LED光照技术,综述LED光照对芽苗菜色泽(叶绿素、 β -胡萝卜素)、营养物质(可溶性糖、可溶性蛋白质)、抗氧化物质(酚类物质、维生素C)及抗氧化活性的调控作用,并解析其调控机制。认为,与同种成熟蔬菜相比,芽苗菜含有更多的 β -胡萝卜素、叶绿素、酚类物质、维生素C等生物活性物质,具有更高的营养价值及更强的抗氧化活性。LED能够提供与植物体内光感受器和光合色素(如叶绿素、类胡萝卜素)吸收谱相匹配的最优光波长,对植物生长发育、光合作用、次生代谢产物合成等具有重要促进作用,可实现植物生产效率的最大化。红光、蓝光、红蓝复合光和绿光均能促进芽苗菜中营养物质和抗氧化物质的合成,并提高其抗氧化活性。未来研究将集中在LED光质配比、LED光照协同其他因素、LED光照对采后芽苗菜贮藏保鲜的调控作用及机制等方面,为芽苗菜生产、加工、贮藏保鲜全产业链发展提供理论依据和技术参考。

关键词:芽苗菜;发光二极管(LED);品质调控;色泽;营养物质;抗氧化活性

中图分类号:TS255 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-1553(2025)01-0049-09

0 引言

芽苗菜又称芽菜或微型蔬菜(Microgreens),是指由植物种子或其他营养体在特定环境条件下培育出的可供食用的嫩芽、芽苗、芽球、幼梢、幼茎等未成熟的植物幼苗^[1],通常由中心茎、子叶和一对刚刚发育的真叶组成^[2]。芽苗菜在培育过程中不依赖传统农田,无需使用化肥、农药,不受外界土壤、大气等环境因素的影响,生长周期短,一般在种

子萌发后7~21 d即可采收^[3]。因此,作为一种绿色无污染的新型蔬菜,芽苗菜被列为无公害蔬菜^[4-5],已成为具有广阔发展前景的新兴蔬菜。

近年来,发光二极管(Light Emitting Diode, LED)光照技术被广泛应用于芽苗菜的栽培和品质调控。研究^[6-10]发现,LED的光照周期、光照强度、光质(单色光、复合光)等对芽苗菜的生长发育、形态构建、抗氧化特性等具有显著的调控作用,因此,LED被认为是培育芽苗菜的重要人工光源^[7]。现

收稿日期:2024-06-07;修回日期:2024-10-04;出版日期:2025-02-15

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31972135);河南省重点研发与推广专项项目(212102110196)

作者简介:郭水欢(1990—),女,河南省禹州市人,河南农业大学讲师,博士,主要研究方向为果蔬采后贮藏保鲜与加工。
E-mail:shguo@henau.edu.cn

通信作者:詹丽娟(1978—),女,河南省信阳市人,河南农业大学教授,博士,主要研究方向为果蔬采后贮藏保鲜与加工。
E-mail:ljzhan@henau.edu.cn

有文献主要针对 LED 光照技术在芽苗菜实际栽培中的作用进行综述^[8],有关 LED 光照技术对芽苗菜品质的调控作用及调控机制的综述尚未见报道。因此,本文基于芽苗菜的营养价值及 LED 光照技术,重点对 LED 光照调控芽苗菜品质进行综述,并指出该技术在芽苗菜栽培中存在的问题及未来的研究方向,以为芽苗菜的栽培、品质调控及工业化生产提供参考。

1 芽苗菜营养价值

芽苗菜质地柔嫩、风味独特、营养价值较高,除了富含蛋白质、矿物质、膳食纤维等营养物质,还含有酚类、维生素 C、 β -胡萝卜素等多种天然生物活性物质,这些活性物质对人体健康极为重要,尤其在预防和治疗多种疾病,特别是慢性病方面具有积极作用。因此,芽苗菜被誉为“超级食品”^[9-10],并被认定为极具发展前景的蔬菜产业之一^[11]。研究^[2,12-17]表明,芽苗菜中的生物活性物质含量明显高于同种成熟蔬菜(见表 1)。例如,茼蒿和红甘蓝芽苗菜中的 β -胡萝卜素含量分别为其同种成熟蔬菜的 3 倍和 260 倍^[12];西兰花^[13]和萝卜^[14]芽苗菜中的酚类物质含量显著高于同种成熟蔬菜;菠菜、胡芦巴和玫瑰茄芽苗菜中的维生素 C 含量分别达到同种成熟蔬菜的 127%、120% 和 119%^[15];黄瓜^[16]、黄麻^[16]、绿豆^[17]、红甘蓝^[2]和苋菜^[2]芽苗菜中的维生素 C 含量是同种成熟蔬菜的 1.4~6.0 倍。因此,与同种成熟蔬菜相比,芽苗菜含有更多的生物活性物质,包括色泽物质(β -胡萝卜素等)、抗氧化物质(酚类物质、维生素 C 等)等,这使其具有更高的营养价值及更强的抗氧化活性。

2 LED 光照技术

LED 是一种能够将电能直接转换为可见光和一系列单色光的半导体发光器件,在芽苗菜栽培中的应用日益广泛^[18-19]。与白炽灯、荧光灯、高压钠灯等传统照明光源相比,LED 具有如下优点:1)能效高。LED 的光电转换效率高,其光能利用率高达 80%~90%,消耗电量仅为白炽灯的 1/8,能耗显著降低;2)产热低。LED 是新型冷光源,与表

面温度较高的传统照明光源相比,可近距离照射植物,增加辐射光照强度,降低植株生长环境的温度,有效利用生产空间,进而降低能耗和生产空间成本;3)绿色环保。LED 由无毒无害的半导体材料构成,不含铅、汞等有害重金属元素,且具有良好的回收再利用特性,可大幅度减少废弃物对环境的污染;4)波长丰富,可按需组合获得复合光(在光照强度一致的前提下,复合光中不同单色光之比是指不同单色光灯珠数目之比)。LED 的峰值发射波长能够覆盖从紫外光区域(-250 nm)到红外光区域(-1000 nm)的范围,可按需获得纯正单色光或复合光^[20-22]。例如,LED 能够提供与植物体内光感受器和光合色素(如叶绿素、类胡萝卜素)吸收谱相匹配的最优光波长,从而调控植物的生长发育、形态构建、光合作用等生长生理过程^[23],对优化植物的生长发育、光合作用、次生代谢产物合成等具有重要的促进作用,可实现植物生产效率的最大化。

表 1 芽苗菜及其同种成熟蔬菜中生物活性物质含量对比

Table 1 Comparison of bioactive substance content in microgreens and mature vegetables of the same species

生物活性物质	蔬菜品种	含量对比
β -胡萝卜素	茼蒿 ^[12]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 3 倍
	红甘蓝 ^[12]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 260 倍
酚类物质	西兰花 ^[13]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 10 倍以上
	萝卜 ^[14]	芽苗菜中的含量比同种成熟蔬菜显著高 35.7%
维生素 C	菠菜 ^[15]	芽苗菜中的含量达到同种成熟蔬菜的 127%
	胡芦巴 ^[15]	芽苗菜中的含量达到同种成熟蔬菜的 120%
	玫瑰茄 ^[15]	芽苗菜中的含量达到同种成熟蔬菜的 119%
	黄麻 ^[16]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 3.5 倍
	黄瓜 ^[16]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 1.4 倍
	绿豆 ^[17]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 2.7 倍
	红甘蓝 ^[2]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 6.0 倍
	苋菜 ^[2]	芽苗菜中的含量是同种成熟蔬菜的 3.0 倍以上

3 LED 光照技术对芽苗菜品质的调控作用

3.1 对芽苗菜色泽的调控作用

3.1.1 对叶绿素合成的调控作用 叶绿素是植物进行光合作用的关键色素,也是绿色芽苗菜色泽品质的重要指标,在维持人体抗炎、抗氧化等方面发挥着重要作用^[24]。研究表明,红蓝复合光对芽苗菜中叶绿素的合成具有积极作用。例如,豌豆^[25]芽苗菜经 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 照射 2 d 后,叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量分别比蓝光对照组增加了 33.09% 和 9.04%;绿豆^[26]芽苗菜经红蓝复合光(红光:蓝光=1:1)照射 7 d 后,总叶绿素含量比蓝光对照组显著增加了 44.07%;西兰花^[27]和荞麦^[28]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 照射 7 d 后,总叶绿素含量均随蓝光占比的增大而增加,且分别在红光:蓝光=5:5 或 1:5 时达到最高值,比白光对照组增加了 47.72% 和 29.80%;香椿^[29]芽苗菜经 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光(红光:蓝光=1:4)照射 10 d 后,总叶绿素含量较高,为白光对照组的 1.75 倍。红蓝复合光中蓝光占比越高,对叶绿素合成的促进效果越明显,这可能与红蓝复合光增强了叶片光合电子传递能力,提高了光合速率,上调了卡尔文循环(碳循环)中多种关键酶的表达和活性有关^[30];此外,高等植物叶绿素合成、叶绿体形成及具有高叶绿素 a 与叶绿素 b 比值的叶绿体形成也都需要蓝光信号的刺激^[31]。

白光和绿光对芽苗菜中叶绿素合成也具有一定的促进作用。例如,决明^[32]芽苗菜经 $(35 \pm 5) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 白光照射 2 h 后,总叶绿素含量比自然光对照组显著增加了 33.62%;蚕豆^[33]芽苗菜经 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 绿光按 12 h/d 照射 12 d 后,总叶绿素含量显著高于白光和黑暗对照组。关于白光对芽苗菜叶绿素调控机制的报道较少,可能是因为白光会对芽苗菜产生弱光胁迫,不利于芽苗菜生长及光合色素合成^[34]。而绿光能够提高芽苗菜中叶绿素含量,可能是因为绿光的高穿透性可更好地穿透叶片,增强植株整体的光合作用,刺激光合色素的生成^[35-36]。

综上,红蓝复合光能显著提高芽苗菜的叶绿素含量,且随着蓝光占比的增加,叶绿素累积量也会

增加;白光和绿光对芽苗菜叶绿素的合成也具有一定的正向调控作用,尤其是绿光的高穿透性有利于增强植株整体的光合作用,进而诱导叶绿素累积。

3.1.2 对类胡萝卜素合成的调控作用 类胡萝卜素是植物的天然光合生物活性物质,包括 α -胡萝卜素、 β -胡萝卜素、紫黄质、新黄质、叶黄素等,也是芽苗菜色泽品质的重要指标。红蓝复合光对类胡萝卜素的合成具有显著的调控作用,且芽苗菜种类不同,类胡萝卜素合成所需的最佳红蓝复合光配比也不同。例如,荞麦^[28]芽苗菜中,最佳红蓝复合光配比为红光:蓝光=1:5;香椿^[29]芽苗菜中,最佳红蓝复合光配比为红光:蓝光=1:4;豌豆^[37]芽苗菜中,最佳红蓝复合光配比为红光:蓝光=4:1。芥菜^[38]芽苗菜经 5000 lx 红光按 10 h/d 照射 8 d 后,类胡萝卜素含量显著低于白光对照组,而经红蓝复合光(红光:蓝光=3:2)按 10 h/d 照射 8 d 后,其类胡萝卜素含量与白光对照组无显著性差异,表明红蓝复合光能诱导类胡萝卜素合成。

白光和绿光对芽苗菜中类胡萝卜素合成也具有促进作用。例如,决明^[32]芽苗菜经 $(35 \pm 5) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 白光照射 2 h 后,类胡萝卜素含量比自然光对照组显著增加了 52.71%,这可能是因为白光能够显著诱导类胡萝卜素生物合成基因的表达^[39];蚕豆^[33]芽苗菜经 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 绿光按 12 h/d 照射 12 d 后,类胡萝卜素含量显著高于白光和黑暗对照组。

综上,与叶绿素类似,芽苗菜中类胡萝卜素合成受红蓝复合光、白光和绿光的正向调控,且其含量与复合光配比、芽苗菜种类等密切相关。

3.2 对芽苗菜营养物质合成的调控作用

3.2.1 对可溶性糖合成的调控作用 可溶性糖作为一类广泛存在于植物体内的重要有机物质,是植物光合作用的初级产物,不仅能为植物生长发育提供能量和代谢中间产物,还具有糖信号功能,是植物生长发育和基因表达的重要调节因子^[40]。研究表明,红光有利于芽苗菜中可溶性糖的合成。例如,决明^[32]芽苗菜经 $(35 \pm 5) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红光照射 2 h 后,西兰花芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红光按 12 h/d 照射 7 d^[27] 或按 16 h/d 照射 5 d^[41] 后,可溶性糖含量均显著高于白光对照组,这可能与红光照射下芽苗菜的光合速率较高有关^[42]。也有研究^[43]

认为,红光能影响芽苗菜对碳水化合物的吸收,进而调控可溶性糖的合成。

红蓝复合光也有利于芽苗菜中可溶性糖的合成,且可溶性糖含量随着红蓝复合光中红光占比的增加而逐渐增加。例如,豌豆^[25]和苦荞^[44]芽苗菜经 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 分别照射 2 d 和 21 d 后,可溶性糖含量均显著高于各对照组;芥菜^[38]芽苗菜经红蓝复合光(红光:蓝光=3:2)按 10 h/d 照射 8 d 后,也得到类似结果。荞麦^[28]芽苗菜经 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝复合光(红光:蓝光=5:1)按 12 h/d 照射 7 d 后,豌豆^[45]芽苗菜经 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝复合光(红光:蓝光=3:1)按 8 h/d 照射 5 d 后,可溶性糖含量均达到最高值,且显著高于白光对照组;香椿^[29]芽苗菜经 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝复合光(红光:蓝光=4:1)照射 10 d 后,也得到类似结果;此外,有研究^[46]发现,在红蓝复合光条件下,可溶性糖的含量显著高于红光条件下的结果。因此,在红光中添加一定比例的蓝光,更有利于芽苗菜中可溶性糖的合成,这可能与红蓝复合光在光形态建成中的作用有关。光质变化还会引发芽苗菜中光敏色素对蔗糖代谢酶的调控,影响与蔗糖代谢相关酶的活性,进而影响可溶性糖的合成^[47]。在芽苗菜生长过程中,补充绿光也能促进其生长并提高其品质^[48]。例如,在蓝光基础上增加绿光后,油菜^[49]芽苗菜中可溶性糖含量比蓝光对照组增加了 28.78%。这可能是因为绿光对芽苗菜体内蔗糖代谢相关酶的活性及酶基因具有调控作用,从而增加了其可溶性糖的含量,但有关绿光对芽苗菜品质影响的报道较少,其作用机理尚不明确。

综上,红光和蓝光均能显著提高芽苗菜的可溶性糖含量,且在红蓝复合光下,芽苗菜的可溶性糖含量更高;另外,绿光也能正向调控芽苗菜中可溶性糖的合成,但具体作用机理有待进一步研究。

3.2.2 对可溶性蛋白质合成的调控作用 可溶性蛋白质具有良好的生物利用度,营养价值较高,是多种酶、激素、抗体等生物活性物质的组成成分。研究表明,蓝光和红蓝复合光对芽苗菜中可溶性蛋白质的合成具有显著促进作用。例如,芥菜^[38]芽苗菜经 5000 lx 蓝光或红蓝复合光按 10 h/d 照射 8 d 后,可溶性蛋白质含量均显著高于白光对照组;西兰花^[41]芽苗菜经 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光按 16 h/d 照

射 5 d 后,其子叶中可溶性蛋白质含量比白光对照组显著提高了 18.26%;相似地,决明^[32]芽苗菜经 (35±5) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光照射 2 h 后,香椿^[50]芽苗菜经 (100±10) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光照射 10 d 后,可溶性蛋白质含量均达到最高值,且均显著高于白光对照组。还有研究表明,红蓝复合光中蓝光的占比越大,诱导芽苗菜中可溶性蛋白质合成的效果越明显。例如,西兰花^[27]和荞麦^[28]芽苗菜经 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝复合光(红光:蓝光=5:5或1:5)按 12 h/d 照射 7 d 后,香椿^[29]芽苗菜经 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 红蓝复合光(红光:蓝光=1:4)照射 10 d 后,可溶性蛋白质含量均显著高于白光对照组。蓝光能促进芽苗菜中可溶性蛋白质合成的原因可能是:1) 蓝光通过影响芽苗菜的光合作用和呼吸作用,正向调控其体内氨基酸和蛋白质的合成^[51];2) 蓝光能够促进叶绿素、类胡萝卜素合成,诱使线粒体进行暗呼吸,为氨基酸的合成提供必要的碳架,进而提高芽苗菜体内蛋白质的含量^[52-53];3) 蓝光对硝酸还原酶(NR)的激活作用较其他光质更显著,这增强了氮素的同化过程,为蛋白质的合成提供了更多可同化氮源^[54];4) 蓝光能提升 NR、谷氨酰胺合成酶(GS)和谷氨酸合成酶(GOGAT)的活性,促进蛋白质合成的同时,降低蛋白质的降解^[55]。

综上,芽苗菜中可溶性蛋白质的合成受蓝光和红蓝复合光的正向调控,且红蓝复合光中蓝光的占比越大,越能诱导芽苗菜中可溶性蛋白质的合成。

3.3 对芽苗菜抗氧化物质合成及抗氧化活性的调控作用

3.3.1 对酚类物质合成的调控作用 酚类物质是植物体内重要的次生代谢产物,在植物的生长发育及响应环境胁迫中发挥着关键作用,也是果蔬中最重要的抗氧化物质及抗氧化活性来源。在酚类物质结构中,酚羟基的氧化会消耗环境中的氧,并对活性氧(ROS)具有较强的捕捉能力,这使得酚类物质具有较好的抗氧化活性和清除自由基的能力^[56]。研究表明,蓝光和红蓝复合光能显著促进酚类物质的合成。例如,豌豆^[25]芽苗菜经 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光按 12 h/d 照射 2 d 后,其酚类物质含量最高;香椿^[50]经 (100±10) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 蓝光照射 10 d 后,酚类物质含量比白光对照组显著增加了 27.20%;芥菜^[38]芽苗菜经红蓝复合光(红光:蓝光=3:2)按

10 h/d 照射 8 d 后,酚类物质含量比白光对照组显著增加了 35.69%。研究^[38]还发现,在芥菜芽苗菜中,蓝光可上调酚类物质合成途径中起关键作用的基因 *BjPAL* 和 *BjCHI* 的表达水平,且这两种基因的表达水平分别是白光对照组的 2.03 倍和 2.77 倍。因此,蓝光促进芽苗菜酚类物质合成可能与其上调了酚类物质合成途径中相关基因的表达水平有关。

香椿^[29]芽苗菜经 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光照射 10 d 后,酚类物质含量显著高于白光对照组。荞麦^[28]和西兰花^[27]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 照射 7 d 后,酚类物质含量分别在红光:蓝光=1:5 或 5:3 时达到最高值;豌豆^[45]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 8 h/d 照射 5 d 后,酚类物质含量显著高于白光对照组。研究^[57]发现,在红光基础上加入蓝光,会促进酚类物质合成途径中关键酶(苯丙氨酸解氨酶(PAL)和查尔酮合酶(CHS))基因的表达,并提高其活性,进而诱导酚类物质合成,增加芽苗菜体内酚类物质的含量。例如, $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的蓝光能上调荞麦芽苗菜多酚合成基因 *FtPAL*、*FtF3'*、*H*、*FtCAH*、*FtCHI*、*FtFLS-2* 和 *FtANS* 的转录,显著增加荞麦芽苗的芦丁、矢车菊素-3-O-芸香糖苷和儿茶酚含量^[58]。因此,红蓝复合光有利于芽苗菜酚类物质的合成,这可能与能促进酚类物质合成通路中相关酶的基因表达有关。

黄酮类物质作为酚类物质中一个重要类别,具有抗氧化、抗炎、抗癌、降血糖等作用^[59]。研究表明,蓝光对提高芽苗菜中黄酮类物质含量具有显著正向调控作用。例如,香椿^[50]经 $(100 \pm 10) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 蓝光照射 10 d 后,黄酮类物质含量比白光对照组显著提高了 61.60%;芥菜^[38]芽苗菜经红蓝复合光(红光:蓝光=3:2)按 10 h/d 照射 8 d 后,黄酮类物质含量比白光对照组显著提高了 20.21%;豌豆^[25]芽苗菜经 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 蓝光按 12 h/d 照射 2 d 后,类黄酮含量达到最高值。这主要与蓝光等短波段光能提高 PAL 酶的活性,进而有利于黄酮类物质的合成有关^[60]。此外,不同种类芽苗菜合成黄酮类物质所需的适宜红蓝复合光配比也不相同。例如,荞麦^[28]和西兰花^[27]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 照射 7 d 后,黄酮类物质含量分别在红光:蓝光=1:5 或 5:1 时达到最高值,均显著高于对照组;豌豆^[45]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot$

s) 红蓝复合光按 8 h/d 照射 5 d 后,总黄酮类物质含量在红光:蓝光=3:1 时达到最高值,且显著高于对照组;香椿^[29]芽苗菜经 $60 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光照射 10 d 后,黄酮类物质含量在红光:蓝光=1:4 时达到最高值。因此,不同种类芽苗菜中的黄酮类物质对不同配比红蓝复合光的响应不同,荞麦和西兰花对红光较敏感,香椿对蓝光较敏感,但具体的相关机制目前仍不明确。

综上,红蓝复合光有利于芽苗菜酚类物质的合成和累积,而复合光配比、芽苗菜种类等均能影响其酚类物质的含量;另外,复合光对酚类物质合成的促进作用可能与调节其通路中相关酶的基因表达有关。

3.3.2 对维生素 C 合成的调控作用 维生素 C 广泛存在于新鲜果蔬组织中,是一种高效的抗氧化剂,并具有增强免疫力等作用^[61]。人体无法自行合成维生素 C,必需从饮食中获取,而植物制品是维生素 C 的主要来源。光照对维生素 C 的合成具有重要的调控作用,研究发现,蓝光和红蓝复合光能显著提高芽苗菜的维生素 C 含量。例如,香椿^[50]芽苗菜经 $(100 \pm 10) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 蓝光照射 10 d 后,维生素 C 含量达到最高值,比白光对照组显著提高了 75.00%;芥菜^[38]芽苗菜经 5000 lx 蓝光按 10 h/d 照射 8 d 后,维生素 C 含量达到最高值,约为白光对照组的 1.30 倍;豌豆^[45]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 8 h/d 照射 5 d 后,维生素 C 含量显著高于白光对照组。此外,随着红蓝复合光中蓝光占比的增加,芽苗菜中维生素 C 含量也会增加。例如,荞麦^[28]和西兰花^[27]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 照射 7 d 后,维生素 C 含量分别在红光:蓝光=1:5 或 5:5 时达到最高值。这主要与蓝光能提高维生素 C 合成关键酶 L-半乳糖酸-1,4-内酯脱氢酶(GaLLDH)的活力有关^[62]。也有研究^[63]证明,蓝光通过抑制特定光受体 PAS/LOV 蛋白(PLP)的活性,可减少 PLP 对维生素 C 合成途径控制步骤中 GDP-L-半乳糖磷酸化酶(GGP)的抑制作用,进而促进维生素 C 的合成。因此,蓝光对芽苗菜中维生素 C 合成的促进作用可能与其代谢途径中关键酶的表达和活性相关。

综上,蓝光和红蓝复合光能显著提高芽苗菜的维生素 C 含量,且随着红蓝复合光中蓝光占比的增

加而增加。

3.3.3 对抗氧化活性的调控作用 蓝光和红蓝复合光可显著提高芽苗菜的抗氧化活性,即 DPPH 自由基清除率。香椿^[50]芽苗菜经 $(100 \pm 10) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 蓝光照射 10 d 后, DPPH 自由基清除率显著高于白光对照组;芥菜^[38]芽苗菜经蓝光按 10 h/d 照射 8 d 后, DPPH 自由基清除率达到最高值,是白光对照组的 2.50 倍;西兰花^[27]和荞麦^[28]芽苗菜经 $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 红蓝复合光按 12 h/d 照射 7 d 后, DPPH 自由基清除率均达到最高值,且均显著高于白光对照组。芽苗菜中的生物活性物质(如酚类物质、维生素 C、类胡萝卜素等)是其抗氧化活性的主要贡献者,研究^[64]表明,芽苗菜抗氧化活性的大小与抗氧化活性物质的含量呈显著正相关。因此,蓝光和红蓝复合光能增强芽苗菜的抗氧化活性与其能诱导上述抗氧化活性物质的合成有关。

综上,蓝光和红蓝复合光能显著诱导芽苗菜中抗氧化活性物质的合成,进而增强芽苗菜的抗氧化活性。

4 结语

本文基于芽苗菜的营养价值和 LED 光照技术,综述了不同 LED 光质对芽苗菜色泽、营养物质合成、抗氧化物质合成及抗氧化活性的调控作用,并对其调控机制进行了解析,得出:不同种类的芽苗菜对复合光配比的响应不同,其中红蓝复合光比单色蓝光、红光或绿光更有利于芽苗菜叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖、可溶性蛋白质、酚类物质和维生素 C 的合成及抗氧化活性的提高。红蓝复合光、白光、绿光均有利于芽苗菜中叶绿素和类胡萝卜素的富集;随着红蓝复合光中红光占比的增加,芽苗菜中可溶性糖的含量呈上升趋势;随着红蓝复合光中蓝光占比的增加,芽苗菜中可溶性蛋白质、酚类物质、维生素 C 的含量均增加,抗氧化活性效果更显著。LED 光照技术为芽苗菜的工业化生产提供了切实可行的方案,但在研究和实际应用中仍需进一步确定光质配比,统一光照强度单位,解析 LED 光照与多因素(温度、相对湿度、CO₂ 浓度等)的协同调控作用,以及 LED 光照对采后芽苗菜贮藏保鲜的调控作用及机制,从而为芽苗菜生产、加工、贮藏保鲜产业链提供全方位理论依据和技术指导。

参考文献:

- [1] 游晓清,孙露,彭镰心,等.非豆类芽苗菜的营养成分、生产与加工研究进展[J].食品研究与开发,2021,42(22):179-185.
- [2] XIAO Z L, LESTER G E, LUO Y G, et al. Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: Edible microgreens[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(31):7644-7651.
- [3] GALIENI A, FALCINELLI B, STAGNARI F, et al. Sprouts and microgreens: Trends, opportunities, and horizons for novel research[J]. Agronomy, 2020, 10(9):1424.
- [4] 刘一静,秦倩,张驰松,等.芽苗菜的发芽技术及营养价值的研究进展[J].食品工业,2018,39(10):265-268.
- [5] 刘桂兰.无公害芽苗菜营养价值分析[J].现代农村科技,2009(2):20.
- [6] 崔瑾,张晓燕,鲁燕舞.LED光调控技术在芽苗菜生产中的应用[J].科技导报,2014,32(10):32-35.
- [7] 崔瑾,徐志刚,邸秀茹.LED在植物设施栽培中的应用和前景[J].农业工程学报,2008,24(8):249-253.
- [8] 陈亚云,康玉凡.LED在芽苗菜生产中的应用及前景展望[J].中国食物与营养,2016,22(8):35-39.
- [9] ALRIFAI O, MATS L, LIU R H, et al. Characterization and profiling of polyphenolics of Brassica microgreens by LC-HRMS/MS and the effect under LED light[J]. Journal of Food Bioactives, 2021, 14:60-74.
- [10] VAN DEN DRIESSCHE J J, PLAT J, MENSINK R P. Effects of superfoods on risk factors of metabolic syndrome: A systematic review of human intervention trials[J]. Food & Function, 2018, 9(4):1944-1966.
- [11] 郝良改,胡晶晶.长三角芽苗菜规模化周年生产技术研究与应用[J].长江蔬菜,2024(9):28-32.
- [12] CHOE U, YU L L, WANG T T Y. The science behind microgreens as an exciting new food for the 21st century[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(44):11519-11530.
- [13] TAN L B, NUFFER H, FENG J N, et al. Antioxidant properties and sensory evaluation of microgreens from commercial and local farms[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(1):45-51.
- [14] 郭丽萍,朱英莲,唐娟.十字花科芽苗菜与成熟蔬菜生物活性成分的比较[J].营养学报,2017,39(6):

- 588-593.
- [15] GHOORA M D, BABU D R, SRIVIDYA N. Nutrient composition, oxalate content and nutritional ranking of ten culinary microgreens [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2020, 91: 103495.
- [16] YADAV L P, KOLEY T K, TRIPATHI A, et al. Antioxidant potentiality and mineral content of summer season leafy greens: Comparison at mature and microgreen stages using chemometric [J]. *Agricultural Research*, 2019, 8(2): 165-175.
- [17] EBERT A W, CHANG C H, YAN M R, et al. Nutritional composition of mungbean and soybean sprouts compared to their adult growth stage [J]. *Food Chemistry*, 2017, 237: 15-22.
- [18] D'SOUZA C, YUK H G, KHOO G H, et al. Application of light-emitting diodes in food production, postharvest preservation, and microbiological food safety [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2015, 14(6): 719-740.
- [19] 阎瑞香, 思希军, 刘然然. 低温条件下不同 LED 光源对芦笋颜色变化的影响 [C]//中国制冷空调工业协会. 第六届中国冷冻冷藏新技术、新设备研讨会论文集. 北京: 中国制冷空调工业协会, 2013: 194-198.
- [20] 谢景, 刘厚诚, 宋世威, 等. 光源及光质调控在温室蔬菜生产中的应用研究进展 [J]. *中国蔬菜*, 2012(2): 1-7.
- [21] 杨其长, 徐志刚, 陈弘达, 等. LED 光源在现代农业的应用原理与技术进展 [J]. *中国农业科技导报*, 2011, 13(5): 37-43.
- [22] 詹雨娟, 马亚丹, 张翠翠. 发光二极管 (LED) 照射调控果蔬采后贮藏保鲜研究进展 [J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(4): 264-269, 278.
- [23] MORROW R. LED lighting in horticulture [J]. *Hortscience*, 2008, 43(7): 1947-1950.
- [24] LEE D, NISHIZAWA M, SHIMIZU Y, et al. Anti-inflammatory effects of dulse (*Palmaria palmata*) resulting from the simultaneous water-extraction of phycobiliproteins and chlorophyll A [J]. *Food Research International*, 2017, 100: 514-521.
- [25] 赵梓帆. 微酸性电解水和光质对豌豆芽苗菜生长及品质的影响研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- [26] 谭仁豪, 张艳, 曹亚兰, 等. 不同蓝红光质组合 LED 灯对绿豆芽苗菜生长的影响 [J]. *贵州农业科学*, 2018, 46(2): 112-116.
- [27] 梁文静. LED 光质对西兰花芽苗菜生长及代谢的影响 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
- [28] 吕铮. 不同 LED 光质对荞麦芽苗菜生长及品质的影响 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2023.
- [29] 喻文静. 基于代谢组学评价光质对香椿芽苗菜的影响 [D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [30] LI Y, XIN G F, LIU C, et al. Effects of red and blue light on leaf anatomy, CO₂ assimilation and the photosynthetic electron transport capacity of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings [J]. *BMC Plant Biology*, 2020, 20(1): 318.
- [31] THOMAS B. Specific effects of blue light on plant growth and development [M]. London: Academic Press, 1981: 443-459.
- [32] 王静, 姜静, 王丹, 等. LED 光质对决明芽苗菜光合色素和营养品质的影响 [J]. *河南师范大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45(2): 60-64, 70.
- [33] 白雅晖. 采收期和光环境对蚕豆芽苗菜产量、品质及左旋多巴含量的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [34] 孙丽, 张静祎, 刘振威, 等. 不同光质对萝卜芽苗菜生长和品质的影响 [J]. *资源开发与市场*, 2015, 31(3): 257-261.
- [35] KLEIN R M. Effects of green light on biological systems [J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 1992, 67(2): 199-284.
- [36] SMITH H. Sensing the light environment: The functions of the phytochrome family [J]. *Photomorphogenesis in Plants*, 1994, 15: 377-416.
- [37] 班甜甜, 李晓慧, 马超. 不同光质对豌豆芽苗菜生长和品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2019(13): 77-82.
- [38] 莫言玲, 罗亚兰, 刘义华, 等. 不同 LED 光质对芥菜芽苗菜生长、营养品质和抗氧化特性的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2023(11): 56-62.
- [39] TUAN P A, THWE A A, KIM Y B, et al. Effects of white, blue, and red light-emitting diodes on carotenoid biosynthetic gene expression levels and carotenoid accumulation in sprouts of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(50): 12356-12361.
- [40] 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(3): 71-76.
- [41] 龚春燕, 苏娜娜, 陈沁, 等. 不同光质对西兰花芽苗菜营养品质及抗氧化性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(23): 42-49.
- [42] 储钟稀, 童哲, 冯丽洁, 等. 不同光质对黄瓜叶片光合

- 特性的影响[J]. 植物学报, 1999, 41(8): 867-870.
- [43] 林小苹, 赖钟雄, 黄浅. 光质对植物离体培养的影响[J]. 亚热带农业研究, 2008, 4(1): 73-80.
- [44] 戴林秀, 仇学文, 许建民, 等. 不同光质对苦苣芽苗菜生长和品质的影响[J]. 现代园艺, 2019(15): 23-25.
- [45] 耿灵灵, 陈华涛, 李群三, 等. LED红蓝复合光对豌豆芽苗菜产量和营养品质的影响[J]. 福建农业学报, 2017, 32(10): 1091-1095.
- [46] 周秦, 朱一丹, 朱璞, 等. 光质调控对芽苗菜生长和品质影响的研究[J]. 上海蔬菜, 2017(1): 61-63.
- [47] KASPERBAUER M J. Strawberry yield over red versus black plastic mulch[J]. Crop Science, 2000, 40(1): 171-174.
- [48] 陈晓丽, 杨其长, 张馨, 等. LED绿光补光模式对生菜生长及品质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(21): 4170-4177.
- [49] 李莹, 王永莲, 赵霞, 等. 不同光质比对油葵芽苗菜生长及芳香物质的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(S1): 161-169.
- [50] 丁双双. LED光环境对香椿芽苗菜营养品质的影响及生理基础研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- [51] KOWALLIK W. Blue light effects on respiration[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33: 51-72.
- [52] LI Q, KUBOTA C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 67(1): 59-64.
- [53] 徐文栋, 刘晓英, 焦学磊, 等. 蓝光量对莴苣生长和品质的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(6): 890-895.
- [54] 刘素慧, 张立伟. 红蓝光质对香椿芽苗菜营养品质的影响[J]. 中国农业气象, 2015, 36(3): 306-312.
- [55] 凌丹丹, 雒佳铭, 刘晓英, 等. 不同光质组合对番茄开花初期碳、氮代谢及其关键酶活性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2021, 44(4): 622-627.
- [56] 马亚丹, 张翠翠, 李林杰, 等. 荧光和发光二极管辐射技术调控果蔬采后抗氧化活性及其机制研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 276-281.
- [57] 李娜, 张晓燕, 田纪元, 等. 蓝光连续光照对大豆芽苗菜类黄酮合成的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1): 51-59.
- [58] THWE A A, KIM Y B, LI X H, et al. Effects of light-emitting diodes on expression of phenylpropanoid biosynthetic genes and accumulation of phenylpropanoids in *Fagopyrum tataricum* sprouts[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(21): 4839-4845.
- [59] 茹琪, 金蒙, 苏远, 等. 黄酮类化合物协同增效作用研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(3): 531-538.
- [60] 郭佩瑶, 邓斯颖, 张艺帆, 等. 不同光质对红花檵木愈伤组织生长及黄酮类物质含量的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(1): 118-126.
- [61] JACOB R A, SOTOUDEH G. Vitamin C function and status in chronic disease[J]. Nutrition in Clinical Care, 2002, 5(2): 66-74.
- [62] 齐学会, 张晓燕, 鲁燕舞, 等. 光质和光周期对大豆芽苗菜生长及总酚类物质含量的影响[J]. 中国蔬菜, 2014(7): 29-34.
- [63] BOURNONVILLE C, MORI K, DESLOUS P, et al. Blue light promotes ascorbate synthesis by deactivating the PAS/LOV photoreceptor that inhibits GDP-L-galactose phosphorylase[J]. The Plant Cell, 2023, 35(7): 2615-2634.
- [64] 赵天瑶, 王丽云, 姜宏伟, 等. 豆类种子及其芽苗菜的营养品质、功能性成分及抗氧化性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 83-90.

Research progress on the regulatory effect of light emitting diode on quality of microgreens

GUO Shuihuan, YUAN Sijie, GUO Nannan, CHEN Xian, FAN Yamin, GAO Han, ZHAN Lijuan

College of Food Science and Technology, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Microgreens are emerging as a novel category of healthy plant-derived food sources with vast development prospects and enormous market potential. Light emitting diode (LED), as an efficient, energy-saving, and environmentally friendly solid-state illuminant, has been extensively applied in regulating the growth and quality of microgreens. Based on the nutritional characteristics of microgreens and LED lighting technology, the regulatory effects of LED lighting on color (chlorophyll, β -carotene), nutrients (soluble sugars, soluble proteins),

antioxidants (phenolic substances, vitamin C) and antioxidant activities of sprouts were reviewed, and the possible regulatory mechanisms were analyzed. Compared with the same mature vegetables, microgreens contained more bioactive substances such as β -carotene, chlorophyll, phenolic substances and vitamin C, and had higher nutritional value and stronger antioxidant activity. LED light source provided the optimal wavelength matching the absorption spectrum of photoreceptors and photosynthetic pigments (such as chlorophyll and carotenoids) in the plant body, which played a crucial role in optimizing plant growth and development, photosynthesis, and secondary metabolites synthesis, thereby maximizing plant production efficiency. Red-light, blue-light, red-blue combined light, and green-light promoted the synthesis of nutrients and antioxidants, and increased antioxidant activity in microgreens. Future research will focus on the light-quality ratio, LED light coordination with other factors, and the regulatory effect and mechanisms of LED light on the storage and preservation of microgreens, so as to provide theoretical foundation and technical reference for the production, processing, storage, and preservation of microgreens entire industrial chain.

Key words: microgreens; light emitting diode (LED); quality control; color; nutrients; antioxidant activity

[责任编辑:杨晓娟]

(上接第 31 页)

destruction of collagen fibers compared to single oxidation or thermal treatment. After one hour of oxidative synergistic thermal treatment, the proteoglycan bridge in collagen fibers was obviously broken. After 24 hours, a new thermal absorption peak appeared near from 15~24 °C, indicating that the collagen fibers was gelatinized. With the prolongation of treatment time, the aperture of collagen fibers network was further contracted and broken. Oxidative synergistic thermal treatment promoted the oxidation degree of collagen fibers by thermal treatment, which resulted in the degradation of macromolecular proteins and the dissolution of soluble substances such as hydroxyproline and glycosaminoglycans (GAG). Therefore, oxidative synergistic thermal treatment can cause oxidation, denaturation, aggregation and degradation of collagen fibers, which in turn affects the textural properties of the sea cucumber body wall.

Key words: sea cucumber body wall; collagen fiber; low-temperature long-time thermal treatment; oxidation; texture property

[责任编辑:杨晓娟]