

# LED 光质调控蔬菜作物几类生物活性物质合成代谢的研究进展

宋华伟, 黄科, 吴秋云, 刘明月, 唐晨晨, 王军伟

(农业农村部园艺作物(蔬菜、茶叶等)基因资源评价利用重点实验室·湖南农业大学黄埔创新研究院·园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心·蔬菜生物学湖南省重点实验室·湖南农业大学园艺学院 长沙 410128)

**摘要:** 蔬菜作物中富含多种具有调节人体新陈代谢、提高免疫力、预防慢性疾病以及防癌抗癌等生物学功能的活性物质。光照是影响蔬菜作物生长发育的重要环境因子之一,同时也是参与调控植物体内各种生物活性物质合成与代谢的重要因子。综述了 LED 光质及比例对蔬菜作物体内酚类化合物、类胡萝卜素、萝卜硫苷、维生素 C 等活性物质合成代谢的影响,并简要概括了光质调控上述活性物质的分子机制。该综述不仅可为蔬菜作物生物活性物质的光质调控提供理论参考,也可为 LED 光质调控高品质蔬菜作物的生产提供理论支撑和技术支持。

**关键词:** 蔬菜;LED 光质;酚类化合物;类胡萝卜素;萝卜硫苷;维生素 C

**中图分类号:** S63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2023)04-019-07

## Advances on the regulation of LED light quality on the anabolism of several bioactive compounds in vegetable crops

SONG Huawei, HUANG Ke, WU Qiuyun, LIU Mingyue, TANG Chenchen, WANG Junwei

(Key Laboratory of Evaluation and Utilization of Genetic Resources of Horticultural Crops (Vegetables, Tea, etc.), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Whampoa Innovation Research Institute, Hunan Agricultural University/Engineering Research Center of Horticultural Crop Germplasm Innovation and New Variety Breeding, Ministry of Education/Hunan Provincial Key Laboratory of Vegetable Biology/Horticulture College, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China)

**Abstract:** Vegetable crops are abundant in a variety of biologically active compounds that have biological effects on human metabolism, immunity, and the prevention of cancer and chronic diseases. Light is one of the environmental elements that has the greatest impact on the growth and development of vegetable crops. It also plays a significant role in controlling the synthesis and metabolism of a variety of bioactive chemicals in plants. The molecular mechanism of light quality regulating the aforementioned active substances was summarized. This article analyzes the effects of LED light quality and ratio on the metabolism of active substances such as phenolic compounds, carotenoid, sulforaphane, and vitamin C in vegetable crops. In addition to serving as a theoretical guide, this review can offer technical assistance for LED light quality control of high-quality vegetables as well as theoretical support for the measurement of bioactive compounds in vegetable crops.

**Key words:** Vegetables; LED light quality; Phenolic compounds; Carotenoid; Sulforaphane; Vitamin C

蔬菜作物中的次生代谢物种类繁多,对人体健康至关重要,一般可分成酚类化合物、萜类化合物、含氮有机碱三大类<sup>[1]</sup>。蔬菜作物中常见的生物活性物质有类黄酮(主要存在于拟南芥、青花菜、甘蓝等蔬菜中)、类胡萝卜素(主要存在于番茄、胡萝卜、西瓜等果实中)、萝卜硫苷(主要存在于甘蓝、芥蓝、花

椰菜等蔬菜中)、维生素 C(主要存在于辣椒、苦瓜、羽衣甘蓝等蔬菜中)、花青素(主要存在于紫茄子和紫甘蓝等蔬菜中)等<sup>[2]</sup>。生物活性物质在维持和促进身体健康、预防人体多种慢性疾病等方面有显著效果,如硫代葡萄糖苷(简称:硫苷, *Glucosinolates*, GLS),水解后产生的异硫氰酸酯类(*Isothiocy-*

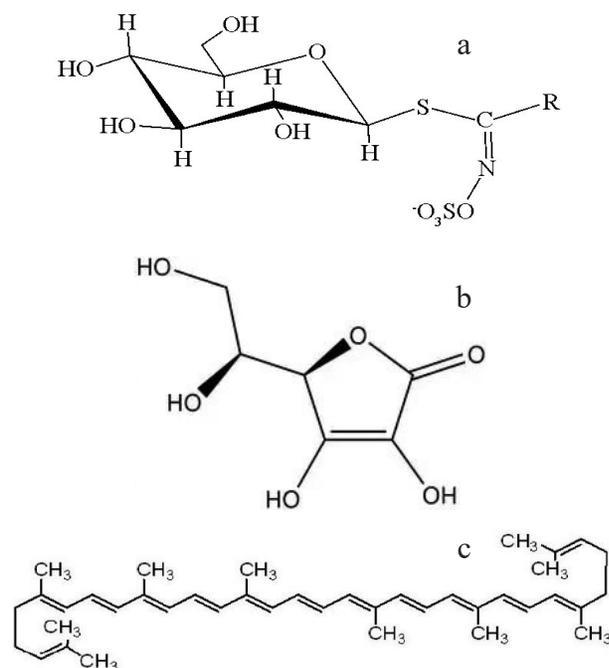
收稿日期:2022-09-16;修回日期:2022-12-05

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2022JJ30297);湖南省重点研发计划项目(2021NK2006);湖南省现代农业(蔬菜)产业技术体系项目;湖南农业大学黄埔创新研究院项目

作者简介:宋华伟,女,在读硕士研究生,研究方向为设施园艺栽培生理。E-mail:shw15237637387@qq.com

通信作者:王军伟,男,副教授,研究方向为设施园艺栽培生理。E-mail:JunweiWang87@126.com

ates, ITCS) 具有极强的促进致癌物质降解、抑制癌细胞生长的作用, 是目前世界上公认的防癌抗癌效果最好的天然产物之一<sup>[3-4]</sup>; 番茄红素具有抗氧化、抑制肿瘤细胞生长、保护心脑血管等功效; 花青素也具有抗氧化、保护心脏、预防心脑血管疾病、增强人体免疫力等多种功效; 维生素 C 则具有提高机体免疫力、预防中风、保护牙齿等作用(图 1)。



注: a. 磺甘的结构式<sup>[5]</sup>; b. 维生素 C 的结构式<sup>[6]</sup>; c. 番茄红素的  
结构式<sup>[7]</sup>。

图 1 3 种代谢物的结构式

植物次生代谢产物的生物合成通常受到环境因素的影响<sup>[8]</sup>, 光照条件(光质、光照度和光周期)是调节植物生长发育和生物活性物质积累的重要环境变量之一。当缺乏光照时, 植物的生长发育就会受到抑制<sup>[9]</sup>。原因是光照环境的不同使植物的代谢产物发生了分布结构的变化<sup>[10]</sup>, 所以调控光照环境对植物次生代谢产物的积累是至关重要的。随着新型 LED 发光二极管节能技术的发展, 可以根据植物的生长发育需要, 精准调控光质比例, 为植物生长发育提供适宜的光照参数<sup>[11]</sup>。有大量研究表明, 不同的光质处理对蔬菜次生代谢产物含量有不同影响, 因此光质处理在蔬菜活性物质积累调控中被广泛应用, 用以促进蔬菜生长发育、提高蔬菜作物产量, 培育出具有对人体有益的次生代谢物含量高的蔬菜产品。

## 1 光质对蔬菜体内酚类化合物的调控

### 1.1 光质对酚类化合物含量的影响

酚类化合物具有较强的抗氧化活性。研究表

明, 类黄酮、花青素、总酚等具有抗炎、抗病毒和抗癌等特性<sup>[12]</sup>。近年来, 随着生活水平的提高, 人们对于蔬菜作物的抗氧化性关注度较高, 且更倾向于选择抗氧化活性高的蔬菜产品。迄今为止, 已经有大量研究证明了光质对蔬菜中酚类化合物的影响, 且这些研究多侧重于 LED 红光、蓝光对酚类化合物的影响, 而黄光、绿光方面的研究相对很少。

目前, 光质对蔬菜作物中酚类化合物影响的研究已经涉及到多种蔬菜作物, Son 等<sup>[13]</sup>研究发现, 不同的红蓝光比例对生菜幼苗的生长发育和酚类物质含量的影响不同。蓝光环境下生长的生菜幼苗抗氧化能力最强且总酚、总黄酮和花青素含量最高。因此, 可以通过调节 LED 的红蓝光比例来改变蔬菜作物总酚的含量。Zhang 等<sup>[14]</sup>研究表明, 黄光能显著降低生菜幼苗中酚类物质的含量。另外, 有研究人员用不同光质照射樱桃番茄幼苗, 并对其酚类物质进行分析。结果显示, 幼苗中的总酚类浓度、类黄酮浓度以及抗氧化能力由高到低依次是蓝光、红光、绿光和白光<sup>[15-16]</sup>。孙洪助<sup>[17]</sup>研究了不同比例红蓝光对青菜品质的影响, 结果表明, 蓝光占比高的混合光更有利于提高青菜类黄酮含量和抗氧化能力。张立伟<sup>[18]</sup>探讨了不同光质对 3 种芽苗菜(香椿苗、豌豆苗、萝卜苗)生理特性及品质的影响, 结果显示, 红光处理能够抑制 3 种芽苗菜类黄酮的合成。李慧敏等<sup>[19]</sup>通过研究紫光对采后番茄果实品质的影响, 发现紫光处理能提高采后番茄果实的总酚含量。常嘉琪等<sup>[20]</sup>研究了采后红光处理对不同贮藏温度下芥蓝芽苗菜中生物活性物质含量的影响, 结果表明, 采后用红光处理能够促进花青素、总酚类物质的积累并且提高芽苗菜的抗氧化能力。鲁燕舞等<sup>[21]</sup>以黑暗为对照, 通过精确调制光质和光量, 研究了光质对萝卜芽苗菜生长、总酚类物质含量、抗氧化能力的影响, 结果表明, 与黑暗组相比, 紫外 UV-B 和蓝光处理能够显著增加总酚类物质含量并提高萝卜芽苗菜的抗氧化能力。

### 1.2 光质调控酚类化合物的分子机制

花青素苷(Anthocyanin)是一类具有抗氧化功能的次生代谢产物, 广泛存在于植物的各部位器官中, 属于黄酮多酚类化合物, 也是一种天然的水溶性色素。花青素苷可以帮助植物抵御环境胁迫。有研究表明, 花青素苷的生物合成途径是迄今为止最为清楚的植物次生代谢产物途径<sup>[22]</sup>。因此, 笔者

以花青素苷为例,来讨论光质调控酚类化合物的分子机制。

迄今的研究表明,光质是调控花青素苷积累的重要环境因素之一,并且不同LED光质对花青素苷合成积累的影响不同。通过对拟南芥的研究表明,蓝光、红光和远红光处理,都可以促进花青素苷显著积累<sup>[23]</sup>。在花青素苷的生物合成积累过程中,红光主要通过激活PHYB(光敏色素)光受体,抑制PIF4和PIF5转录因子活性,从而解除对花青素苷结构基因表达的抑制作用,最终促进花青素苷的积累,其中PIF是bHLH的类转录因子。远红光通过PHYA光受体信号转导等一系列途径促进花青素苷的生物合成<sup>[24]</sup>。同时,PHYB还可以抑制COP1对HY5转录因子的降解,从而促进花青素苷的合成;蓝光促进花青素苷的生物合成积累是通过激活CRY1光受体活性抑制COP1对HY5的降解来完成的<sup>[25]</sup>。LED光质既可以参与调控花青素苷合成途径,也可以间接调控相关基因的表达量,从而决定最终蔬菜作物中的花青素苷生物含量(图2)。光信号转导途径的关键基因通常与调控花青素苷生物合成的转录因子MYB和bHLH存在互作关系,从而在转录和转录后水平调控MYB以及bHLH<sup>[26]</sup>。

## 2 光质对蔬菜体内类胡萝卜素等萜类化合物的调控

### 2.1 光质对类胡萝卜素等萜类化合物含量的影响

类胡萝卜素是一类具有独特理化性质的萜类化合物,也是人体所必需的维生素A合成的前体物质。类胡萝卜素广泛存在于常见的植物中,主要参与植物光合作用、光形态建成以及植物生长发育等多种生理生化过程。具有增强人体免疫力、预防心脑血管疾病等功能<sup>[27]</sup>。

大量研究显示,蔬菜作物体内类胡萝卜素的代谢积累可以受到光质的影响。陈田甜<sup>[28]</sup>在番茄成熟后用不同光质处理番茄果实,以白光为对照组,研究发现,处理后番茄红素含量存在明显差异,与对照组相比,红光和黄光处理能显著提高番茄红素含量,而蓝光和绿光处理明显降低了番茄果实中番茄红素含量。此外,不同光质处理的番茄果实中 $\beta$ -胡萝卜素的含量也有不同变化,其中,黄光处理的类胡萝卜素含量增加幅度最大。李慧敏等<sup>[19]</sup>发现,紫光处理能明显提高采后番茄果实的番茄红素含量。许莉等<sup>[29]</sup>研究结果表明,与白光相比,黄光、红

光、蓝光都降低了叶用莴苣类胡萝卜素含量。张媛媛等<sup>[30]</sup>研究了光质对莴菜愈伤组织生长及甜菜色素和类胡萝卜素合成的影响,结果显示,与黑暗相比,蓝光最有利于莴菜愈伤组织中甜菜色素、类胡萝卜素的合成。班甜甜等<sup>[31]</sup>探究了不同光质对豌豆芽苗品质和生长发育的影响,采用半导体发光二极管光源(LED),以红光(R)、绿光(G)、蓝光(B)、红蓝光4:1(RB=4:1)为处理组,黑暗处理为对照组(CK),研究显示4种光质与对照组相比都提高了豌豆芽苗菜的类胡萝卜素各项指标,其中,红蓝光4:1处理的芽苗菜胡萝卜素含量约是对照组的13倍。

### 2.2 光质调控类胡萝卜素的分子机制

据研究显示,光照可以通过调控番茄果实中某些合成类胡萝卜素的基因从而调控类胡萝卜素的含量<sup>[32]</sup>,如ZDS、DXS、PSY1、PDS和CrtISO等是参与类胡萝卜素合成的基因,这些基因的表达量在避光处理后的番茄果实中出现显著的下调现象, $\beta$ -胡萝卜素、叶黄素和番茄红素的含量也有所减少。迄今为止,国内外对光质调控番茄红素分子机制的研究较为广泛,有研究表明,HY5蛋白在番茄红素合成过程中至关重要,其作用是可以结合番茄红素合成的关键基因PSY1和PDS启动子上的特殊元件转录来激活基因表达,最终促进果实中类胡萝卜素合成与积累<sup>[33]</sup>。李晓萌<sup>[34]</sup>通过双荧光素酶瞬时表达、EMSA等试验也证实了该结论,HY5蛋白可以结合PSY1启动子上的Z-box和PDS启动子上的C/G-box元件并进行转录,从而激活相关基因的表达,试验结果还发现,其对PDS的促进作用更加显著。迄今为止,研究最多的光质是红光/远红光对番茄红素生物合成的调控作用。光敏色素PHY是一种色素-蛋白质复合体,也是红光/远红光的光感受器<sup>[35]</sup>,有研究发现,PHY调控PSY基因的转录<sup>[36]</sup>。红光/远红光调控番茄红素的生物合成是通过光敏色素PHY的两种形式Pr和Pfr之间的相互转换实现对PSY基因的转录调控<sup>[37]</sup>,在红光照射条件下,PHY从Pr无生理活性形式转换为有生理活性的Pfr,而在远红光条件下Pfr迅速转换成无生理活性的Pr<sup>[38]</sup>(图2)。

## 3 光质对蔬菜体内硫苷的调控

### 3.1 光质对硫苷含量的影响

在十字花科作物,包括常见的油菜(*Brassica napus*)、萝卜(*Raphanus sativus*)、甘蓝(*Brassica oleracea*)、青花菜(*Brassica oleracea*)等作物中,存在

一类物质与作物的风味息息相关,这类物质被称为硫代葡萄糖苷(glucosinolates),简称硫苷<sup>[39]</sup>。除了影响作物的风味之外,萝卜硫苷的降解产物萝卜硫素也具有极强的促进致癌物质降解、抑制癌细胞生长的作用,是世界上公认的防御癌症和抗击癌症效果最好的天然产物之一<sup>[40]</sup>。

研究发现,光质对蔬菜作物中的硫苷含量具有一定的影响,在光周期的末期用短暂的红光处理豆瓣菜能显著提高硫苷含量<sup>[41]</sup>。青花菜采后用绿光处理能使硫苷含量维持在一个相对较高的水平<sup>[42]</sup>。王军伟等<sup>[43]</sup>通过研究不同LED光质对青花菜生长发育和其生物活性物质的影响,发现LED光质可以显著影响青花菜花球中硫苷的合成积累。结果显示,用红光(R)、蓝光(B)、红蓝光3:1(RB=3:1)处理可以促进青花菜花球中硫苷的合成积累,且红光(R)处理后花球中总硫苷含量最高;相反,绿光(G)和紫光(P)处理后抑制了花球中硫苷的合成。冯尚坤等<sup>[44]</sup>为探究红光处理对萝卜芽苗菜采后抗氧化能力的影响,对采收后的萝卜芽苗菜进行8 h红光处理之后置于4℃条件下贮藏,于贮藏0、1、2、3 d对其硫苷、叶绿素、花青素和萝卜硫素等含量和总抗氧化能力进行分析,结果表明,与无红光处理的对照组相比,红光处理能够促使萝卜芽苗菜中的脂肪族硫苷和吲哚族硫苷含量分别提高9.5%和20.6%。常嘉琪等<sup>[20]</sup>研究了采后红光处理对不同贮藏温度下芥蓝芽苗菜中生物活性物质含量的影响,进行了采后红光、白光和黑暗处理芥蓝芽苗菜试验,分析了不同贮藏时间对其硫苷、维生素C、花青素和总多酚含量及抗氧化能力的影响,结果表明,红光处理可显著减少芥蓝芽苗菜采后贮藏过程中出现的硫苷含量逐渐下降的现象。

### 3.2 光质调控硫苷合成的分子机制

硫苷经黑芥子酶降解后可产生具有抗氧化性的产物,这些生理活性物质在植物病虫害防御和人体恶性疾病防治等方面均具有显著的功效。萝卜硫苷是青花菜中含量最高的硫苷,萝卜硫苷可以被黑芥子酶水解成具有生理活性的萝卜硫素。萝卜硫素被认为是世界上最有效的天然防癌抗癌化合物之一,可以保护细胞不受损伤,从而起到抗癌防癌的效果。硫苷的生物合成通路可以概括为:前体氨基酸侧链的延伸、核心结构的合成及R侧链的修饰,并且涉及BCATs、MAMs、CYP79s、CYP83s和AOPs等多个基因家族<sup>[45]</sup>。光质通过调控硫苷生物合成关键基因的表达来影响蔬菜作物中的硫苷含

量,而且不同光质的调控效果有所差异。例如Gu等<sup>[46]</sup>在研究不同LED光质对大白菜幼苗硫苷生物合成基因的影响时发现,拟南芥同源基因*CYP79F1*、*ST5a*和*FMOGS-OX1*的表达量在蓝光处理下更高;而*UGT74B1*、*BCAT4*、*MAM1*、*AOP3*的基因表达量在红光处理下达到高峰。因此,从某种意义上来说,光质在调控硫苷生物合成通路上起到关键性作用。有研究表明,在紫外UV-B诱导下的光信号传递过程中,光受体UVR8感受UV-B光信号后与下游COP1相互作用以激活转录因子HY5,进而调控某些硫苷合成关键基因的表达<sup>[47]</sup>;对拟南芥的研究发现,红光/远红光对调控硫苷生物合成至关重要,如Cargnel等<sup>[48]</sup>发现,在低比例的红光/远红光诱导下,红光受体PHYB转变为生理失活型,促使转录因子HY5的活性受到抑制,结果显示,硫苷生物合成关键基因*SUR2*、*CYP79B2*、*CYP79B3*等的表达量降低(图2)。迄今为止,虽然部分光质调控硫苷生物合成关键基因的表达通路已有简要阐述,但是关于光质调控硫苷基因表达的机制仍需进一步探索。

## 4 光质对蔬菜体内维生素C的调控

### 4.1 光质对维生素C含量的影响

维生素C是一种水溶性维生素,别称抗坏血酸,存在于多种新鲜水果蔬菜作物中,能够预防和治疗坏血病,在抗氧化、促进胶原蛋白合成、参与机体的解毒、预防多种恶性疾病等方面占有重要地位<sup>[49]</sup>。

有研究表明,光质可以影响蔬菜作物中维生素C的含量。如班甜甜等<sup>[31]</sup>为探究光质对芽苗菜生长及品质的影响,以豌豆为试材,采用半导体发光二极管光源(LED)调节红光(R)、绿光(G)、蓝光(B)、红蓝光4:1(RB=4:1),以黑暗处理为对照(CK),结果表明,4种光质都可提高豌豆芽苗菜维生素C含量,其中,红光处理效果最好。王晓晶等<sup>[50]</sup>研究LED绿光对生菜品质的影响,结果表明,绿光处理降低了生菜叶片中的维生素C含量。石圆圆<sup>[51]</sup>研究了不同LED光质对莴苣生理性状及营养品质的影响,结果表明,紫光处理提高了莴苣氮代谢相关酶活性,促进莴苣对氮素的吸收,从而提高莴苣维生素C含量。常嘉琪等<sup>[20]</sup>研究发现,采后红光处理芥蓝芽苗菜可以延缓维生素C含量的下降。

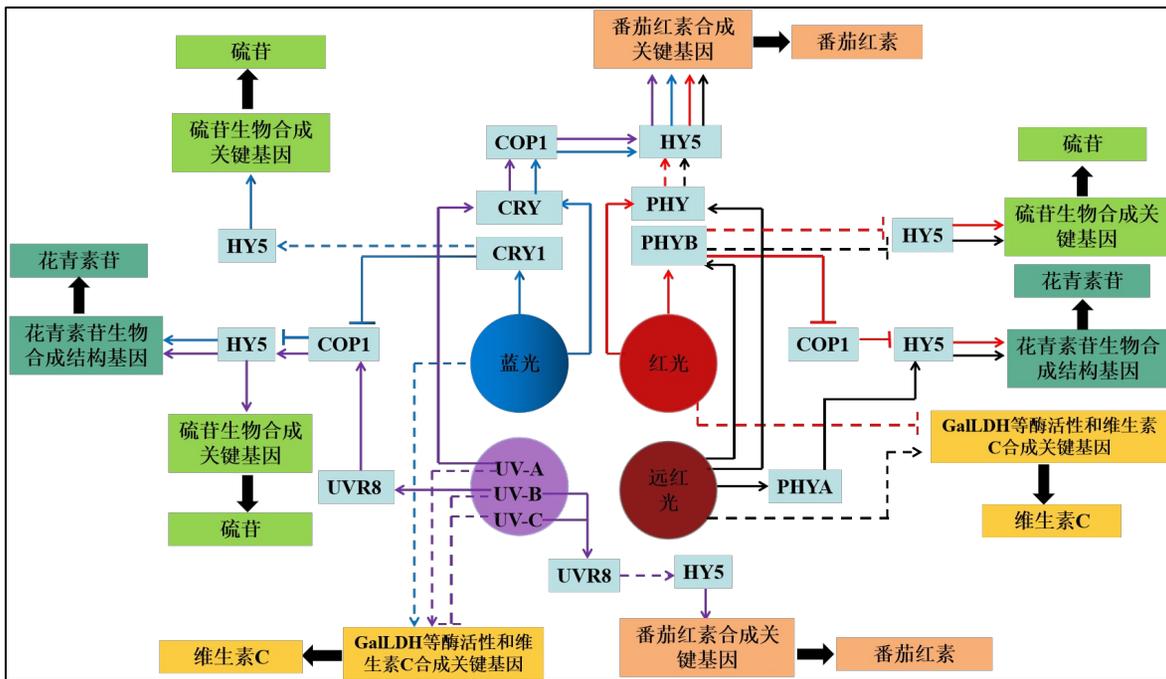
另外,多项研究发现,不同比例红蓝混合光与单色LED红光、LED蓝光相比更能提高蔬菜作物

中的维生素 C 含量。张珂嘉等<sup>[52]</sup>探讨了不同比例红蓝光对奶油生菜生长、光合特性及品质的影响,结果显示,红蓝混合光能够提高奶油生菜中维生素 C 含量。随后在芹菜、番茄、菠菜等蔬菜的研究中也验证了该结论<sup>[53-54]</sup>。周晚来<sup>[55]</sup>采用不同比例的红蓝光连续短暂光照处理,水培生菜叶片和叶柄中的维生素 C 含量显著提高。李聪聪等<sup>[56]</sup>也对水培生菜进行了短暂连续光照的研究,结论与上述结果一致。孙洪助<sup>[17]</sup>的研究结果表明,蓝光占比高的混合光更有利于青菜维生素 C 合成。刘淑娟等<sup>[57]</sup>用冰菜为试材进行试验,结果表明,红蓝紫光(R:B:P)=20:5:1 处理的冰菜维生素 C 含量最高。

4.2 光质调控维生素 C 合成的分子机制

迄今为止,有大量研究证实了植物体内合成维生素 C 的 4 条途径:L-半乳糖途径、半乳糖醛酸途径、古洛糖途径以及肌醇途径<sup>[58]</sup>。L-半乳糖途径是世界上公认的合成维生素 C 最主要的途径<sup>[59]</sup>。

D-葡萄糖是 L-半乳糖途径的初始底物,D-葡萄糖经过多种酶连续催化后转变成 L-半乳糖,L-半乳糖再经过 L-半乳糖脱氢酶(GalDH)催化生成 L-半乳糖-14-内酯,最后再由 L-半乳糖-14-内酯脱氢酶(GalLDH)进行氧化<sup>[60]</sup>。目前,由于大部分研究仅仅是把维生素 C 含量作为评价营养水平的指标,因此研究光质对维生素 C 代谢机制的试验相对较少。但总体来说,大部分研究都表明了蓝光以及红蓝光组合可以促进蔬菜维生素 C 的合成累积。且不同光质条件下大豆芽苗菜的维生素 C 含量与 GalLDH 酶活性变化趋势基本相同,存在显著相关性<sup>[61]</sup>。魏圣军等<sup>[62]</sup>研究发现,UV-A 通过提高 L-半乳糖合成途径中包括 GalLDH 在内的关键基因的表达量以及 GalLDH 和 APX 酶活性从而提高维生素 C 含量<sup>[63]</sup>(图 2)。这些结果说明,光质对维生素 C 的代谢过程存在显著影响,且不同的光质调控位点也不同。



注:实线表示信号转导过程,虚线表示多步反应。

图 2 光质调控几种生物活性物质的分子机制<sup>[24-25, 36-38, 49-50, 63-64]</sup>

5 展 望

进入 21 世纪以来,随着全球科技发展和人类生活水平的提高,营养与健康、食品与安全成了当今社会关注的焦点问题,所以改善蔬菜作物的品质也成了 21 世纪农业最重要的任务之一。另一方面,蔬菜作为人类每日不可或缺的重要食物,产量已经在我国种植业中排到第一位<sup>[65]</sup>。目前,蔬菜产

品的生物活性物质分为酚类化合物、萜类化合物、含氮有机碱三大类。生物活性物质与营养物质不同,它们不是人体所必需的,但是它们可以调节人体的生理机制和维持人体营养健康。如维生素 C、类胡萝卜素、类黄酮和多糖等在维持和促进人体健康、预防诸多慢性疾病等方面至关重要。对蔬菜作物中生物活性物质的研究,不仅关乎国民的营养健康,也关乎我国蔬菜及其加工产品在国际市场上的

经济效益与规模。

随着发光二极管(LED)新型节能技术的发展,LED在植物研究领域中被广泛应用,被认为是21世纪农业与生物领域最有前途的人工光源,也成了众多研究人员使用的新光源<sup>[64]</sup>。迄今为止,大量试验证明光照是植物生长健壮、果实丰满、品质良好所不可缺少的因素。因此,合理运用LED光质可以调控蔬菜作物的生长发育、形态建成、光合作用、物质代谢等。综上所述,光不仅可为植物生长发育提供能量,而且是一种调节植物次生代谢等一系列生理过程的重要因子。不同的光质会对植物体内的生物活性物质产生不同的影响。LED不仅具有体积小、寿命长、低耗能和低发热的优点,而且还能为植物生长发育提供适宜的环境,提高蔬菜体内硫苷、花青素、抗坏血酸、类胡萝卜素等生物活性物质含量,实现传统光源无法替代的节能、环保、高效等功能,为设施环境下的蔬菜作物种植提供了便利。因此,LED光源将取代传统的光源,并将在未来广泛应用于蔬菜种植。合理利用光质是促进蔬菜中有益次生代谢物积累的最有效的方法之一。

#### 参考文献

- 董妍玲,潘学武.植物次生代谢产物简介[J].生物学通报,2002,37(11):17-19.
- 孙立影,于志晶,李海云,等.植物次生代谢物研究进展[J].吉林农业科学,2009,34(4):4-10.
- 毛鹏鹏,郑胤建,杨其长,等.光质对十字花科蔬菜硫代葡萄糖苷调控分子机制研究进展[J].园艺学报,2020,47(9):1633-1647.
- BRIONES-HERRERAA,EUGENIO-PÉREZ D,REYES-OCAMPO J G, et al. New highlights on the health-improving effects of sulforaphane [J]. Food and Function, 2018, 9(5):2589-2606.
- 王军伟,黄科,黄英娟,等.十字花科蔬菜硫代葡萄糖苷合成相关转录因子调控研究进展[J].园艺学报,2019,46(9):1752-1764.
- 李永俊.复合维生素压片在加工和贮藏过程中的变化研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2020.
- 安建勇,白鹏勋,崔茂盛,等.番茄红素特性和应用研究进展[J].广西农学报,2019,34(1):53-56.
- 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.
- 王红星,乔传英,古红梅.影响植物次生代谢产物形成的因素[J].安徽农业科学,2007,35(35):11376-11377.
- 阎秀峰,王洋,李一蒙.植物次生代谢及其与环境的关系[J].生态学报,2007,37(6):2554-2562.
- 姜宗庆.不同LED光质对香椿芽苗菜生长和品质的影响[J].中国瓜菜,2020,33(11):52-55.
- 华晓雨,陶爽,孙盛楠,等.植物次生代谢产物-酚类化合物的研究进展[J].生物技术通报,2017,33(12):22-29.
- SON K H, OH M M. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes [J]. HortScience, 2013, 48(8):988-995.
- ZHANG T, SHI Y Y, PIAO F Z, et al. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture, 2018, 134(2):231-240.
- 刘晓英,徐志刚,常涛涛,等.不同光质LED弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J].西北植物学报,2010,30(4):725-732.
- KIM K M, KOOK H S, JANG Y J, et al. The effect of blue-light-emitting diodes on antioxidant properties and resistance to botrytis cinerea in tomato[J]. Journal of Plant Pathology and Microbiology, 2013, 4(9):203.
- 孙洪助.红蓝光比例对绿叶蔬菜生理特性及品质的影响[D].南京:南京农业大学,2014.
- 张立伟.光质对三种芽苗菜生理特性及品质的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2010.
- 李慧敏,陆晓民.紫光光质对采后番茄果实品质的影响[J].安徽科技学院学报,2017,31(3):20-24.
- 常嘉琪,王梦雨,邓茗丹,等.采后红光处理对芥蓝芽菜生物活性物质的影响[J].核农学报,2021,35(2):481-489.
- 鲁燕舞,张晓燕,耿殿祥,等.光质对萝卜芽苗菜总酚类物质含量及抗氧化能力的影响[J].园艺学报,2014,41(3):545-552.
- 王华,李茂福,杨媛,等.果实花青素生物合成分子机制研究进展[J].植物生理学报,2015,51(1):29-43.
- LIU Z, ZHANG Y, WANG J, et al. Phytochrome-interacting factors PIF4 and PIF5 negatively regulate anthocyanin biosynthesis under red light in *Arabidopsis* seedlings[J]. Plant Science, 2015, 238:64-72.
- SHIN J, PARK E, CHOI G. PIF3 regulates anthocyanin biosynthesis in an HY5-dependent manner with both factors directly binding anthocyanin biosynthetic gene promoters in *Arabidopsis*[J]. The Plant Journal, 2007, 49(6):981-994.
- VANDEBUSSCHE F, HABRICOT Y, CONDIFF A S, et al. HY5 is a point of convergence between cryptochrome and cytokinin signalling pathways in *Arabidopsis thaliana*[J]. Plant Journal, 2007, 49(3):428-441.
- 洪艳,武宇薇,宋想,等.光照调控园艺作物花青素苷生物合成的分子机制[J].园艺学报,2021,48(10):1983-2000.
- 刁卫楠,朱红菊,刘文革.蔬菜作物中类胡萝卜素研究进展[J].中国瓜菜,2021,34(1):1-8.
- 陈田甜.不同光质对番茄果实品质形成的影响[D].广州:华南农业大学,2016.
- 许莉,刘世琦,齐连东,等.不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响[J].中国农学通报,2007,13(1):96-100.
- 张媛媛,张心雨,张毛毛,等.光质对苋菜愈伤组织生长及甜菜色素和类胡萝卜素合成的影响[J].河南农业科学,2018,47(9):114-119.
- 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.
- 陈同强,张天柱,王晓卓.光照对番茄果实中番茄红素生物合

- 成的调控研究进展[J].园艺学报,2022,49(4):907-923.
- [33] 邹礼平,高和平,钟亚琴.植物番茄红素生物合成相关基因的表达调控研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(33):16232-16233.
- [34] 李晓萌.HY5在番茄果实类胡萝卜素合成中的作用研究[D].杭州:浙江大学,2020.
- [35] 姚建刚,张贺,许向阳,等.番茄果实成熟过程中色泽变化的研究进展[J].中国蔬菜,2010(8):1-6.
- [36] ALBA R, CORDONNIER-PRATT M M, PRATT L H. Fruit-localized phytochromes regulate lycopene accumulation independently of ethylene production in tomato[J]. Plant Physiology,2000,123(1):363-370.
- [37] SCHOFIELD A, PALIYATH G. Modulation of carotenoid biosynthesis during tomato fruit ripening through phytochrome regulation of phytoene synthase activity[J]. Plant Physiology and Biochemistry,2005,43(12):1052-1060.
- [38] GANGAPPA S N, BOTTO J F. The multifaceted roles of HY5 in plant growth and development[J]. Molecular Plant,2016,9(10):1353-1365.
- [39] DINKOVA-KOSTOVA A T, KOSTOV R V. Glucosinolates and isothiocyanates in health and disease [J]. Trends in Molecular Medicine,2012,18(6):337-347.
- [40] TANG L, ZIRPOLI G R, JAYAPRAKASH V, et al. Cruciferous vegetable intake is inversely associated with lung cancer risk among smokers: a case-control study[J]. BMC Cancer,2010,10:162.
- [41] ENGELEN-EIGLES G, HOLDEN G, COHEN J D, et al. The effect of temperature, photoperiod, and light quality on gluconasturtiin concentration in watercress (*Nasturtium officinale* R.Br.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2006,54(2):328-334.
- [42] MOREIRA-RODRÍGUEZ M, NAIR V, BENAVIDES J, et al. UVA, UVB light doses and harvesting time differentially tailor glucosinolate and phenolic profiles in broccoli sprouts[J]. Molecules,2017,22(7):1065.
- [43] 王军伟,陈海燕,梁曼恬,等.LED光质对青花菜生长及其生物活性物质的影响[J].应用与环境生物学报,2020,26(6):1478-1483.
- [44] 冯尚坤,陈浩,邵志勇,等.红光处理对萝卜芽菜采收后贮藏过程中芥子油苷和抗氧化能力的影响[J].核农学报,2021,35(6):1340-1346.
- [45] SONDERBY I E, GEU-FLORES F, HALKIER B A. Biosynthesis of glucosinolates - gene discovery and beyond[J]. Trends in Plant Science,2010,15(5):283-290.
- [46] GU L J, KIM Y R, KIM J A, et al. Effect of LED mixed light conditions on the glucosinolate pathway in *Brassica rapa*[J]. Journal of Plant Biotechnology,2015,42(3):245-256.
- [47] MEWIS I, SCHREINER M, NGUYEN C N, et al. UV-B irradiation changes specifically the secondary metabolite profile in broccoli sprouts: induced signaling overlaps with defense response to biotic stressors [J]. Plant and Cell Physiology,2012,53(9):1546-1560.
- [48] CARGNEL M D, DEMKURA P V, BALLARE C L. Linking phytochrome to plant immunity: low red: far-red ratios increase *Arabidopsis* susceptibility to botrytis cinerea by reducing the biosynthesis of indolic glucosinolates and camalexin[J]. The New Phytologist,2014,204(2):342-354.
- [49] 杨建辉.维生素C生物学活性研究进展[J].现代诊断与治疗,2012,23(5):434-437.
- [50] 王晓晶,陈晓丽,郭文忠,等.LED绿光对生菜生长和品质的影响[J].中国农业气象,2019,40(1):25-32.
- [51] 石圆圆.不同LED光质对莴苣生理性状及营养品质的影响[D].郑州:河南农业大学,2018.
- [52] 张珂嘉,邹志荣,杨俊伟,等.不同比例红蓝光对奶油生菜生长、光合特性及品质的影响[J].蔬菜,2018(2):7-12.
- [53] 高波,杨振超,李万青,等.3种不同LED光质配比对芹菜生长和品质的影响[J].西北农业学报,2015,24(12):125-132.
- [54] 黄碧阳,林碧英,李彩霞,等.LED红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响[J].江苏农业科学,2018,46(7):131-135.
- [55] 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].北京:中国农业科学院,2011.
- [56] 李聪聪,吉家曾,丁慧霞,等.连续光照及光质对水培生菜生长及营养品质的影响[J].现代农业科技,2019(16):55-56.
- [57] 刘淑娟,周华,刘腾云,等.LED光质对冰菜生长及营养品质的影响[J].北方园艺,2019(2):71-76.
- [58] 孟纯阳,魏小春,姚秋菊,等.辣椒维生素C生物合成及代谢研究进展[J].基因组学与应用生物学,2018,37(6):2558-2565.
- [59] CONKLIN P L. Recent advances in the role and biosynthesis of ascorbic acid in plants[J]. Plant Cell and Environment,2001,24(4):383-394.
- [60] WHEELER G L, JONES M A, SMIRNOFF N. The biosynthetic pathway of vitamin C in higher plants[J]. Nature,1998,393(6683):365-369.
- [61] XU M J, DONG J F, ZHU M Y. Effects of germination conditions on ascorbic acid level and yield of soybean sprouts[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2005,85(6):943-947.
- [62] 魏圣军,耿殿祥,邬奇,等.UV-A辐射对大豆芽苗菜中抗坏血酸含量的影响[J].大豆科学,2015,34(3):420-426.
- [63] 刘玉兵,王军伟,李洁,等.LED光质对蔬菜生长及品质影响研究进展[J].湖南农业科学,2020(12):105-108.
- [64] 张谨薇,孟清波,马万成,等.LED光源对辣椒幼苗生长和光合特性的影响[J].中国瓜菜,2021,34(6):60-63.
- [65] 辛竹琳,崔彦娟,杨小微,等.全球蔬菜产业现状及中国蔬菜育种发展路径研究进展[J].分子植物育种,2022,20(9):3122-3132.