

高飞彪, 马康宁, 张泽玉, 等. 外源褪黑素对日光温室越冬茬辣椒生长及果实品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(9): 1811-1821.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.09.016

外源褪黑素对日光温室越冬茬辣椒生长及果实品质的影响

高飞彪, 马康宁, 张泽玉, 蔡启童, 张婧, 颜建明
(甘肃农业大学园艺学院, 甘肃兰州 730070)

摘要: 为探究外源褪黑素对日光温室越冬茬辣椒生长及果实品质的影响, 本研究以辣椒品种华美 105 为试验材料, 以喷施清水为对照(CK), 于花后 10 d、16 d、22 d、28 d、34 d 叶面喷施不同浓度(50 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$)褪黑素溶液, 测定花后不同时期辣椒生长、光合特性和果实品质等指标。结果表明, 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理能显著提高辣椒叶片光合色素含量, 增强卡尔文循环相关酶活性及光合能力, 促进植株生长, 提高辣椒产量和果实品质。100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理辣椒果实游离氨基酸含量、可溶性蛋白含量、维生素 C 含量、可溶性糖含量及硬度比 CK 显著提高, 果实硝酸盐含量显著降低。综上所述, 叶面喷施不同浓度的褪黑素溶液可以提高辣椒产量, 改善果实品质, 其中, 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素溶液浓度处理对辣椒产量和果实品质的提高效果最佳。

关键词: 辣椒; 外源褪黑素; 光合作用; 产量; 品质

中图分类号: S641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)09-1811-11

Effects of exogenous melatonin on growth and fruit quality of pepper plants in solar greenhouses during the overwintering season

GAO Feibiao, MA Kangning, ZHANG Zeyu, CAI Qitong, ZHANG Jing, XIE Jianming
(College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To explore the effects of exogenous melatonin on the growth and fruit quality of pepper plants in solar greenhouses during the overwintering season, this study used pepper Huamei 105 as the experimental material and sprayed water as the control (CK). Different concentrations (50 $\mu\text{mol/L}$, 100 $\mu\text{mol/L}$, 150 $\mu\text{mol/L}$, 200 $\mu\text{mol/L}$) of melatonin solution were sprayed on the leaves at 10 d, 16 d, 22 d, 28 d and 34 d after flowering. The growth parameters, photosynthetic characteristics and fruit quality indicators of pepper plants at different stages after flowering were measured. The results showed that 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin treatment could significantly increase the photosynthetic pigment content of pepper leaves, enhance the activity of Calvin cycle-related enzymes and photosynthetic capacity, promote plant growth, and improve pepper yield and fruit quality. The free amino acid content, soluble protein content, vitamin C content, soluble sugar content and hardness of pepper

fruits treated with 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin were significantly higher than those of the CK, while the nitrate content of fruits was significantly lower than that of the CK. In summary, foliar spraying of different concentrations of melatonin solution can increase pepper yield and improve fruit quality. Among them, 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin solution treatment has the best effect on pepper yield and fruit quality.

Key words: pepper; exogenous melatonin; photosynthesis; yield; quality

收稿日期: 2024-10-07

基金项目: 甘肃省教育科技创新项目(2024B-069); 甘肃省科技计划项目(23CXNA0037); 甘肃农业大学公招博士科研启动基金项目(GAU-KYQD-2020-8)

作者简介: 高飞彪(1998-), 男, 甘肃庆阳人, 硕士研究生, 主要从事蔬菜栽培与生理生态研究。(E-mail) 3118345055@qq.com

通讯作者: 张婧, (E-mail) zj@gsau.edu.cn; 颜建明, (E-mail) xiejianminggs@126.com

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 为茄科辣椒属一年生或多年生草本植物。辣椒果实具有独特的辛辣风味,富含辣椒素、维生素 C 以及类胡萝卜素等多种营养成分,具有抗炎、抗氧化、促进血液循环、抗癌等多种药理作用,还具有增进食欲、促进消化、暖胃驱寒等诸多功效,深受消费者喜爱^[1-3]。近年来,随着农业现代化的迅速发展,中国设施蔬菜产业取得了长足发展。设施栽培辣椒作为冬春季节日光温室栽培的主要蔬菜之一,因其具有反季节、短周期、高效益等优点,深受广大种植户喜爱^[4-5]。温度和光照是影响辣椒产量和品质形成的重要生态因子。在中国北方越冬茬辣椒种植过程中,极端天气频繁发生,辣椒生长期连续低温弱光^[6-8]等灾害天气时有发生,不但导致辣椒生长缓慢,还严重影响辣椒的产量和品质。因此,探寻辣椒产量和品质的提升措施是目前设施越冬茬辣椒生产的研究热点^[9]。

褪黑素 (Melatonin, MT) 又称褪黑激素、松果体素等,是一类小分子吲哚类物质,于 1958 年从牛的松果体中分离得到,并被证实广泛参与动物的生长发育、代谢调控和信号转导等过程^[10]。褪黑素还广泛存在于高等植物中,具有促进种子萌发^[11]和植株生长^[12]、调控根系发育^[13]、延迟叶片衰老^[14]、影响果实成熟^[15]、保持果实感官品质和营养品质^[16]等功能。近年来,褪黑素在提高作物产量和品质方面的作用得到了广泛研究。贾润普等^[17]研究发现,根施 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素能显著提高葡萄果实的百粒重、葡萄糖含量和果糖含量。吴彩芳等^[18]研究发现,在桃果实膨大期进行桃树叶片喷施褪黑素处理可以提高桃果实的维生素 C 含量、蔗糖含量、果糖含量和山梨醇含量。Sun 等^[19]研究发现,褪黑素处理可提高番茄果实的番茄红素含量,促进乙烯化合物的合成,加速番茄果实软化,进而改善番茄果实的成熟度和品质。Wang 等^[20]研究发现,褪黑素处理能抑制枇杷果实蔗糖含量的下降,增加酚类化合物含量和有机酸含量,提高枇杷果实在冷藏过程中的风味和营养品质。目前,褪黑素在缓解作物逆境胁迫、延缓采后果实衰老等方面的作用已有较多研究,但其对反季节设施辣椒的生长发育和果实品质影响的研究较少。本研究拟以辣椒品种华美 105 为试验材料,通过在不同开花时间喷施不同浓度的褪黑素溶液,分析褪黑素对日光温室越冬茬辣椒生长发育和果实品质的影响,为辣椒的高效设施栽培提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验地概况

供试辣椒品种为华美 105,购自酒泉市华美种子有限责任公司;褪黑素购自上海源叶生物科技有限公司。

不同浓度褪黑素溶液的配制:称取 1.161 4 g 褪黑素粉末,溶于 20 mL 无水乙醇,超声助溶。然后将上述溶液转移至 50 mL 容量瓶,用蒸馏水定容至 50 mL,混匀得 100 mmol/L 褪黑素母液。分别取 1 mL、2 mL、3 mL、4 mL 母液,定容至 2 L,得到 50 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素溶液。

试验在甘肃省白银市靖远县东湾镇大坝高科技农业园区日光温室进行。该温室为土墙钢竹拱架型日光温室,长度 60 m,跨度 8 m。辣椒栽培采用单垄双行覆膜方式进行,垄长 7 m,垄距 90 cm,株距 37 cm,行距 37 cm,每行定植 18 株,每垄共 36 株。

1.2 试验设计与处理

本试验采用随机区组设计,设置 4 个不同浓度褪黑素处理:50 $\mu\text{mol/L}$ (T1)、100 $\mu\text{mol/L}$ (T2)、150 $\mu\text{mol/L}$ (T3)、200 $\mu\text{mol/L}$ (T4),以蒸馏水为对照 (CK)。每个处理和对照均设 3 个重复,共 15 个小区。各处理褪黑素溶液均添加体积比为 0.1% 的吐温 80 作为表面活性剂。辣椒植株第 3 层果开花后第 10 d、16 d、22 d、28 d、34 d 进行叶面喷施不同浓度的褪黑素溶液处理。喷施时确保各处理植株叶片正反面均匀布满液滴。除处理因素外,其他栽培管理措施保持一致。

1.3 测定项目与测定方法

第 3 层果开花后第 16 d、22 d、28 d、34 d、40 d 上午 9:00,对各处理辣椒进行株高和茎粗测定、叶片叶绿素荧光参数测定及叶片取样。用卷尺测量各植株从茎基部到顶端生长点的距离,即得株高。用电子游标卡尺测量辣椒茎基部直径,即得茎粗。上午 09:00-10:00,利用便携式叶绿素荧光仪 Handy PEA (英国 Hansatech 公司产品)测定辣椒叶片叶绿素荧光参数。测定前将叶片暗适应 30 min,依次获取 PS II 最大光化学效率 (F_v/F_m) 和 PS II 潜在光化学活性 (F_v/F_o) 等指标,每处理重复 9 次。选取坐果新梢第 1 穗花序上的健康功能叶片,采集后立即置于液氮中速冻,带回实验室测定相关生理指标。采用丙酮浸提法^[21]测定叶片光合色素含量;利用酶联

免疫吸附试验 ELISA 试剂盒(上海远慕生物科技有限公司产品)测定 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(*Rubisco*)活性、果糖-1,6-二磷酸酯酶(*FBPase*)活性、果糖-1,6-二磷酸醛缩酶(*FBA*)活性和甘油醛-3-磷酸脱氢酶(*GAPDH*)活性,具体方法参照各试剂盒说明书。

第 3 层果开花后 40 d,分别从各处理植株的第 3 层果,随机采摘 20 个果实,每处理 3 次重复,取样后装入自封袋并标记,于-80 ℃超低温冰箱保存,用于品质指标测定。采用电子天平称量果实单果重;使用电子游标卡尺测定果实纵径和横径,并计算果形指数(纵径与横径之比)。

采用 Universal TA 质构仪(上海腾拔仪器科技有限公司产品)测定辣椒果实的质地结构。将辣椒果实置于质构仪的平板上,使用直径为 100 mm 的圆柱形探头进行质构分析。测试参数设置如下:测试速度为 0.5 mm/s,接触点力为 0.2 N,果实形变量为 50%,暂停时间为 4 s,样品回升高度为 60 mm。测定参数包括果实的硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性和回复性。

果实营养品质测定:采用 2,6-二氯靛酚染色法^[22]测定果实维生素 C 含量;采用蒽酮-硫酸比色法^[23]测定可溶性糖含量;采用考马斯亮蓝比色法^[24]测定可溶性蛋白含量;采用水杨酸比色法^[25]测定硝酸盐含量;采用茚三酮比色法^[26]测定游离氨基酸含量;采用蒽酮-硫酸比色法^[27]测定纤维素含量。

果实香气物质检测:参照 Huang 等^[28]的方法,采用 PEN3 电子鼻(德国 AIRSENSE 公司产品)进行辣椒果实香气物质检测。称取 5 g 辣椒果实,用 0.75 g 无水 Na₂SO₄和 2 mL 蒸馏水充分研磨后转移至 20 mL 顶空瓶中,在 65 ℃的条件下,将顶空瓶置于磁力搅拌器上持续加热 15 min,以平衡内部顶空气体,然后将注射针头插入顶空瓶中,进行挥发性化合物的测定。检测条件设置如下:冲洗时间 60 s,传感器调零时间 5 s,预采样时间 5 s,注射流速 400 mL/min,测量时间 200 s。PEN3 电子鼻 10 个传感器的检测物质种类和性能描述如表 1 所示。

于 2024 年 2 月 27 日、2024 年 3 月 16 日和 2024 年 3 月 31 日对辣椒果实进行采收,按批次测定记录产量,试验结束后计算各处理总产量。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2021 软件进行数据统计,采用 SPSS 27.0 软件和 Duncan's 新复极差法进行处理间差异分析($P < 0.05$),采用 Origin 2021 软件作图。

表 1 电子鼻传感器的物质类型和性能描述

Table 1 Substance types and performance descriptions of electronic nose sensors

序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	对芳香成分灵敏
2	W5S	对氮氧化物灵敏
3	W3C	对氨水、芳香类化合物灵敏
4	W6S	对氢气有选择性
5	W5C	对烷烃、芳香类化合物和弱极性化合物灵敏
6	W1S	对甲烷等短链烷烃灵敏
7	W1W	对无机硫化物灵敏
8	W2S	对醇类、醛类、醚类化合物灵敏
9	W2W	对芳香族化合物、有机硫化物灵敏
10	W3S	对长链烷烃灵敏

2 结果与分析

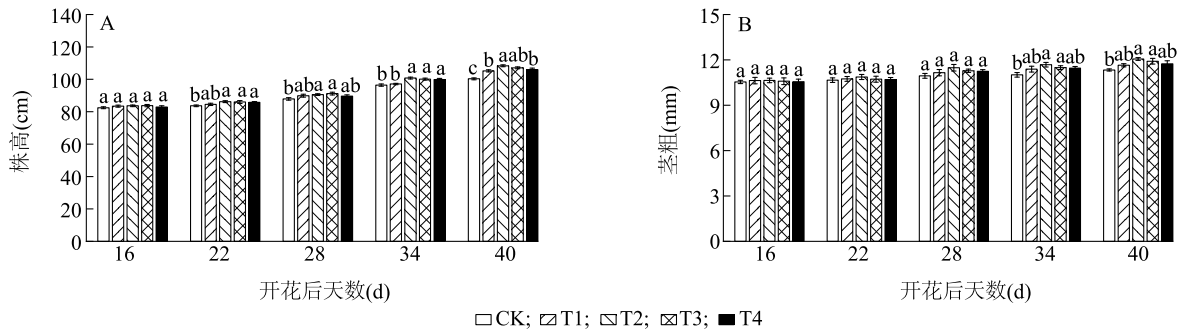
2.1 外源褪黑素对辣椒生长的影响

叶面喷施褪黑素对辣椒植株株高和茎粗的影响如图 1 所示。开花后 16 d,各处理株高无显著差异。开花后 22 d 和 28 d,T2 处理和 T3 处理株高显著高于 CK。开花后 34 d,T2 处理、T3 处理和 T4 处理株高显著高于 CK。开花后 40 d,T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理株高分别比 CK 增加 4.87%、7.97%、6.76% 和 5.65%。开花后 16 d、22 d、28 d,各处理茎粗与 CK 无显著差异。开花后 34 d 和 40 d,T2 处理和 T3 处理茎粗显著高于 CK,其中,开花后 40 d,T2 处理和 T3 处理茎粗分别比 CK 增加 5.44% 和 4.18%。

2.2 外源褪黑素对辣椒叶片光合色素含量的影响

外源褪黑素对辣椒叶片光合色素含量的影响如图 2 所示。从图中可以看出,褪黑素处理有利于叶片叶绿素 a 含量的增加。开花后 16 d,T2 处理和 T3 处理叶绿素 a 含量分别比 CK 显著提高 18.50% 和 20.96%。开花后 22 d,T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理叶绿素 a 含量分别比 CK 显著提高 24.68%、26.47%、24.88% 和 16.88%。开花后 28 d,T1 处理、T2 处理、T3 处理叶绿素 a 含量分别比 CK 显著提高 13.33%、17.26% 和 12.96%,T4 处理叶绿素 a 含量与 CK 无显著差异。开花后 34 d 和 40 d,T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理叶绿素 a 含量均显著高于 CK;开花后 34 d,T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理叶绿素 a 含量分别比 CK 提高 8.79%、16.30%、12.40% 和 10.29%;开花后 40 d,T1 处理、T2 处理、

T3 处理、T4 处理叶绿素 a 含量分别比 CK 提高 9.91%、19.99%、16.66% 和 15.34%。



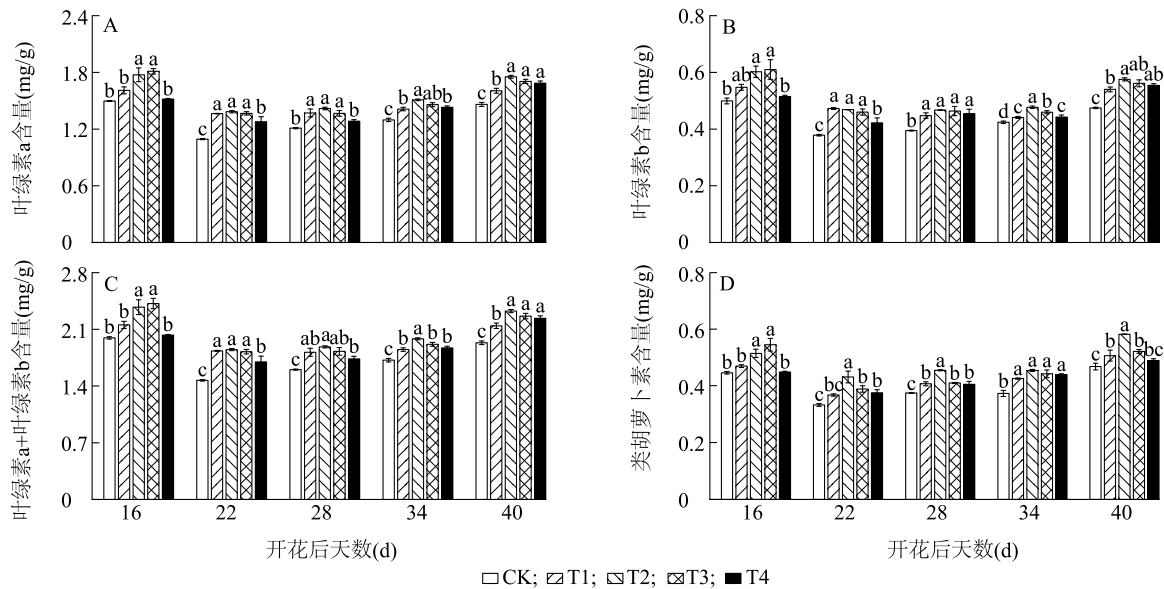
CK、T1、T2、T3、T4 分别为叶面喷施蒸馏水(对照)和 50 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素溶液的处理。同一时期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 外源褪黑素对辣椒植株生长的影响

Fig.1 Effects of exogenous melatonin on the growth of pepper plants

叶绿素 b 含量的变化特征与叶绿素 a 含量基本保持一致。开花后 16 d, T2 处理和 T3 处理叶绿素 b 含量分别比 CK 显著提高 20.60% 和 22.16%。开花后 22 d、28 d、34 d 和 40 d, T2 处理叶绿素 b 含量分别比 CK 显著提高 23.76%、18.26%、12.45% 和 21.22%。开花后 16 d, T2 处理和 T3 处理叶绿素 a+叶绿素 b 含量分别比 CK 显著提高 19.03% 和 21.26%。开花后

22 d、28 d、34 d 和 40 d, T2 处理叶绿素 a+叶绿素 b 含量分别比 CK 显著提高 25.77%、17.50%、15.35% 和 20.29%。开花后 16 d, T2 处理和 T3 处理类胡萝卜素含量分别比 CK 显著提高 15.29% 和 22.11%。开花后 22 d、28 d、34 d 和 40 d, T2 处理类胡萝卜素含量分别比 CK 提高 29.54%、21.36%、21.64% 和 24.28%, 增加最为显著。



CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。同一时期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 外源褪黑素对辣椒叶片光合色素含量的影响

Fig.2 Effects of exogenous melatonin on photosynthetic pigment content in pepper leaves

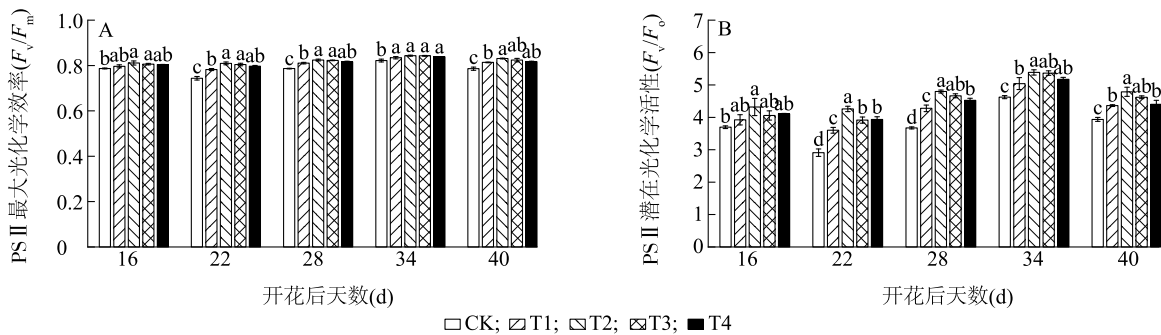
2.3 外源褪黑素对辣椒叶片叶绿素荧光参数的影响

外源褪黑素对辣椒叶片叶绿素荧光参数的影响如图 3 所示。从图中可以看出,叶面喷施不同浓度的

褪黑素溶液处理均能提高辣椒叶片 PSII 最大光化学效率 (F_v/F_m)。开花后 16 d, T2 处理和 T3 处理 F_v/F_m 显著高于 CK, T1 处理和 T4 处理 F_v/F_m 与 CK

差异不显著。开花后 22 d、28 d、34 d、40 d, T1~T4 处理 F_v/F_m 均显著高于 CK。其中, 开花后 40 d, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理 F_v/F_m 分别比 CK 增加 3.40%、5.42%、4.61% 和 3.76%。开花后 16 d, T2 处理 PSII 潜在光化学活性 (F_v/F_o) 显著高于 CK, 其他处理 F_v/F_o 与 CK 无显著差异。开花后 22 d、28 d、34 d

和 40 d, T1~T4 处理 F_v/F_o 均显著高于 CK, 其中, 开花后 40 d, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理 F_v/F_o 分别比 CK 提高 10.81%、21.61%、17.37% 和 11.84%。此外, 从图中还可以看出, 随着开花后天数的增加, 各处理 F_v/F_o 总体呈先减少后增加再减少的趋势, 开花后 34 d, F_v/F_o 达到最大值。



CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。同一时期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 3 外源褪黑素对辣椒叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig.3 Effects of exogenous melatonin on chlorophyll fluorescence parameters of pepper leaves

2.4 外源褪黑素对辣椒叶片卡尔文循环关键酶活性的影响

外源褪黑素对辣椒叶片卡尔文循环关键酶活性的影响如图 4 所示。从图中可以看出, 随着开花后日数的增加, 各处理辣椒叶片 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶 (*Rubisco*) 活性整体呈现先降低后升高的变化趋势。不同浓度的褪黑素处理均可提高叶片 *Rubisco* 活性。开花后 16 d, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理 *Rubisco* 活性分别比 CK 提高 14.78%、27.40%、29.20% 和 16.24%。开花后 22 d、28 d、34 d 和 40 d, T2 处理 *Rubisco* 活性分别比 CK 显著提高 33.36%、24.19%、24.43% 和 33.41%, 增加幅度最大。辣椒叶片果糖-1,6-二磷酸酯酶 (*FBPase*) 活性的变化趋势与 *Rubisco* 总体保持一致。开花后 16 d, T2 处理、T3 处理和 T4 处理 *FBPase* 活性分别比 CK 显著提高 29.45%、30.84% 和 14.38%。开花后 22 d 和 28 d, T2 处理和 T3 处理 *FBPase* 活性显著高于 CK。开花后 34 d, T2 处理、T3 处理和 T4 处理 *FBPase* 活性分别比 CK 显著提高 28.04%、17.42% 和 18.13%。开花后 40 d, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理 *FBPase* 活性分别比 CK 显著提高 13.20%、33.39%、22.23% 和 12.53%。不同浓度褪黑素处理均可提高叶片果糖-1,6-二磷酸醛缩酶 (*FBA*) 活性。开花后 16 d、22 d 和 28 d, T1~T4 处理 *FBA* 活性均显著高于 CK, 其中 T2 处理增加幅度

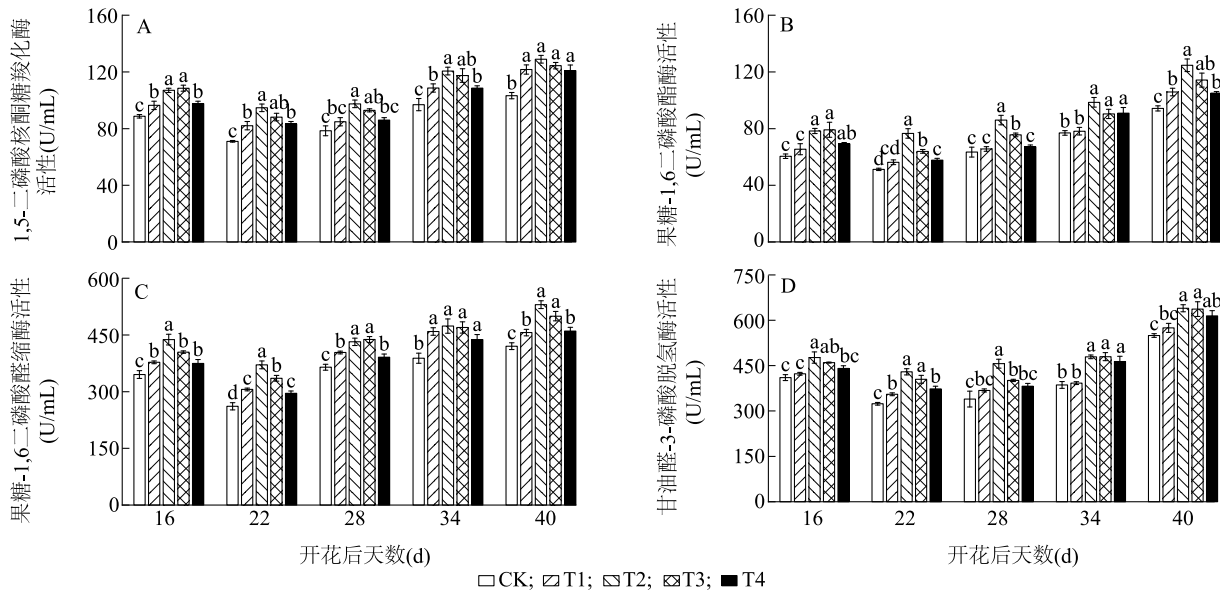
最大。开花后 34 d 和 40 d, T1~T4 处理 *FBA* 活性亦均显著高于 CK, 其中, 开花后 34 d, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理 *FBA* 活性分别比 CK 提高 18.21%、21.88%、20.94% 和 12.64%, 开花后 40 d, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理 *FBA* 活性分别比 CK 提高 8.55%、26.17%、18.88% 和 9.47%。叶面喷施不同浓度褪黑素处理能提高辣椒叶片甘油醛-3-磷酸脱氢酶 (*GAPDH*) 活性。开花后 16 d, T2 处理与 T3 处理 *GAPDH* 活性分别比 CK 提高 16.19% 和 12.08%。开花后 22 d, T1~T4 处理 *GAPDH* 活性均显著高于 CK。开花后 28 d, T2 处理与 T3 处理 *GAPDH* 活性显著高于 CK, 分别比 CK 提高 34.50% 和 18.23%。开花后 34 d 和 40 d, T2 处理、T3 处理和 T4 处理 *GAPDH* 活性均显著高于 CK, 其中, 开花后 34 d, T2 处理、T3 处理和 T4 处理 *GAPDH* 活性分别比 CK 提高 24.14%、24.28% 和 20.10%, 开花后 40 d, T2 处理、T3 处理和 T4 处理 *GAPDH* 活性分别比 CK 提高 27.72%、22.37% 和 18.08%。

2.5 外源褪黑素对辣椒果实生长指标及产量的影响

外源褪黑素对辣椒果实生长指标及产量的影响如表 2 所示。从表中可以看出, 不同浓度褪黑素处理均可显著提高辣椒果实单果重、纵径和横径, 其中 T2 处理辣椒果实单果重、纵径和横径分别比 CK 提高 15.44%、11.17% 和 12.24%, 增加幅度最大。

T1~T4 处理果实果形指数与 CK 均无显著差异。T2 处理和 T3 处理辣椒产量分别比 CK 提高 8.04% 和

5.17%，增加显著。



CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。同一时期图柱上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 外源褪黑素对辣椒叶片卡尔文循环关键酶活性的影响

Fig.4 Effects of exogenous melatonin on the activity of key enzymes in Calvin cycle in pepper leaves

表 2 外源褪黑素对辣椒果实生长指标和产量的影响

Table 2 Effects of exogenous melatonin on growth indexes of pepper fruits and yield

处理	单果重 (g)	纵径 (cm)	横径 (mm)	果形指数	产量 (t/hm^2)
CK	42.35±0.54d	25.24±0.29c	24.27±0.23c	10.40±0.10a	72.01±0.35c
T1	45.94±0.39c	26.99±0.72ab	25.62±0.52b	10.50±0.27a	73.90±0.96bc
T2	48.89±0.70a	28.06±0.29a	27.24±0.31a	10.31±0.13a	77.80±0.66a
T3	47.55±0.34ab	27.68±0.37ab	26.40±0.54ab	10.53±0.28a	75.73±0.84ab
T4	46.62±0.50bc	26.64±0.37b	25.65±0.23b	10.39±0.19a	74.16±0.63bc

CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.6 外源褪黑素对辣椒果实质地结构的影响

外源褪黑素处理对辣椒果实质地结构的影响如表 3 所示。从表中可以看出, T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理果实硬度分别比 CK 提高 16.32%、24.30%、19.33% 和 13.68%。T1~T3 处理果实黏聚性

分别比 CK 增加 14.81%、24.07% 和 22.22%。T2 处理和 T3 处理果实咀嚼性与 CK 差异显著, 分别比 CK 提高 20.18% 和 22.00%。T1~T4 处理果实弹性和回复性均与 CK 无显著差异。

表 3 外源褪黑素对辣椒果实质地结构的影响

Table 3 Effects of exogenous melatonin on the textural structure of pepper fruits

处理	硬度 (N)	弹性	黏聚性	咀嚼性 (N)	回复性
CK	22.30±0.95b	0.82±0.01a	0.54±0.01c	13.68±0.80b	0.33±0.01a
T1	25.94±1.12a	0.84±0.01a	0.62±0.03ab	15.01±0.90ab	0.33±0.02a
T2	27.72±0.63a	0.85±0.02a	0.67±0.02a	16.44±0.84a	0.36±0.03a
T3	26.61±0.35a	0.86±0.01a	0.66±0.02ab	16.69±0.79a	0.39±0.01a
T4	25.35±0.73a	0.86±0.02a	0.59±0.02bc	15.85±0.42b	0.37±0.02a

CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

2.7 外源褪黑素对辣椒果实营养品质的影响

外源褪黑素对辣椒果实营养品质的影响如表 4 所示。从表中可以看出,T2 处理、T3 处理和 T4 处理辣椒果实可溶性蛋白含量分别比 CK 显著提高 29.75%、22.31%和 12.40%。T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理果实游离氨基酸含量分别比 CK 增加 17.16%、32.05%、23.33%、22.62%。T1 处理、T2 处理和 T3 处理果实维生素 C 含量分别比 CK 显著提高

8.73%、15.08%和 10.32%。T2 处理、T3 处理和 T4 处理辣椒果实可溶性糖含量与 CK 差异显著,分别比 CK 提高 19.05%、14.40%和 10.16%。T2 处理、T3 处理和 T4 处理硝酸盐含量分别比 CK 显著降低 24.64%、23.76%和 13.06%。T1 处理、T2 处理、T3 处理、T4 处理辣椒果实纤维素含量分别比 CK 显著降低 20.46%、33.35%、22.56%、25.55%。

表 4 外源褪黑素对辣椒果实营养品质的影响

Table 4 Effects of exogenous melatonin on nutritional quality of pepper fruits

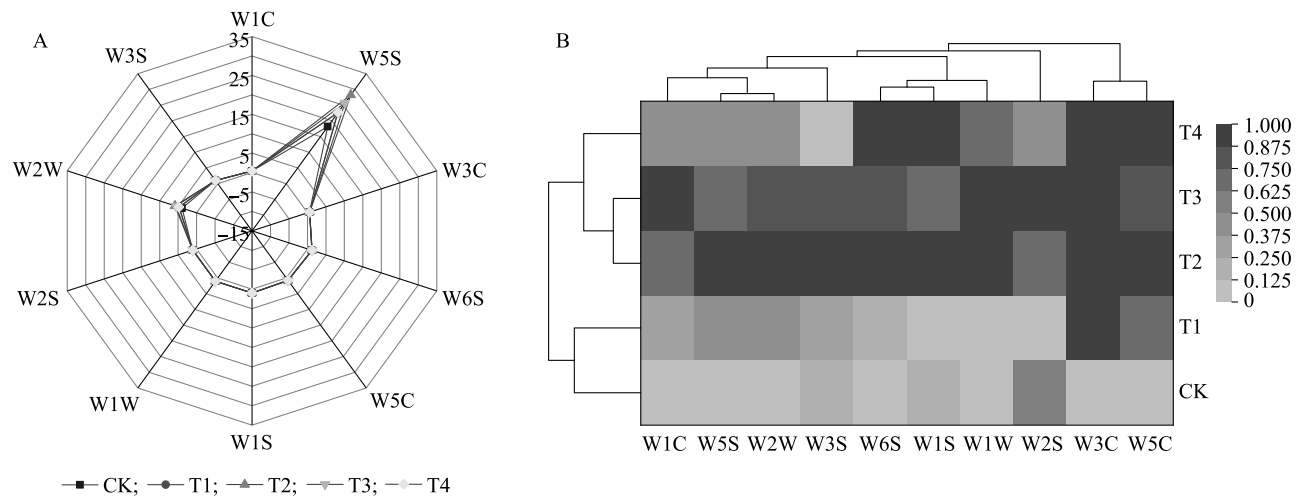
处理	游离氨基酸含量 ($\mu\text{g/g}$)	可溶性蛋白含量 (mg/g)	维生素 C 含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (mg/g)	硝酸盐含量 ($\mu\text{g/g}$)	纤维素含量 (mg/g)
CK	343.52 \pm 3.78c	1.21 \pm 0.01c	1.26 \pm 0.02c	66.86 \pm 1.32c	405.83 \pm 15.27a	327.20 \pm 17.05a
T1	402.48 \pm 5.16b	1.32 \pm 0.02bc	1.37 \pm 0.01b	69.27 \pm 0.18c	367.02 \pm 12.28ab	260.27 \pm 18.22b
T2	453.62 \pm 11.16a	1.57 \pm 0.07a	1.45 \pm 0.01a	79.60 \pm 0.95a	305.85 \pm 16.61c	218.07 \pm 11.68b
T3	423.66 \pm 12.92b	1.48 \pm 0.03a	1.39 \pm 0.02b	76.49 \pm 0.79b	309.40 \pm 12.32c	253.37 \pm 6.47b
T4	421.24 \pm 9.80b	1.36 \pm 0.03b	1.32 \pm 0.02c	73.65 \pm 0.50b	352.84 \pm 11.73b	243.60 \pm 9.41b

CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

2.8 外源褪黑素对果实挥发性物质的影响

不同浓度褪黑素处理辣椒果实之间的挥发性物质存在一定差异(图 5A)。不同处理传感器 W5S 和 W2W 响应值存在一定的差异,说明不同处理氮氧化物、芳香族化合物和有机硫化物等挥发性成分存在一定的差异,而传感器 W1S、W1W、W5C、W6S 和 W3S 的响应值基本一致,说明不同处理芳香成分、短链烷烃、无机硫

化物、醇、醛、醚类化合物、长链烷烃等挥发性物质成分较为相似。不同处理挥发性香气物质的聚类分析热图如图 5B 所示。从图中可以看出,不同处理间挥发性香气物质存在明显差异,整体上可以聚为 2 类,CK 和 T1 处理聚为 1 类,T2、T3 和 T4 处理聚为 1 类,其中 T2 和 T3 处理相似程度更高,且这 2 个处理辣椒果实的 10 类芳香物质总体上高于其他 3 个处理。



CK、T1、T2、T3、T4 见图 1 注。W1C、W3C、W3S、W5S、W2W、W1S、W1W、W2S、W5C、W6S 传感器性能见表 1。图 A 中所用数据为传感器响应值的原始值。图 B 中的颜色为归一化处理后的传感器响应值,浅灰色表示含量较低,深灰色表示含量较高。

图 5 不同处理辣椒果实电子鼻响应值雷达图和挥发性物质聚类分析热图

Fig.5 Radar plot of electronic nose response values and heatmap of volatile compounds cluster analysis for pepper fruits under different exogenous melatonin treatments

3 讨论

植物的光合性能对其生长发育、产量及品质形成具有决定性影响,因此,提高植物光合性能是提升作物产量与品质的关键农艺调控策略^[29]。叶绿素与类胡萝卜素作为绿色植物体内的重要光合色素,是植物进行光合作用最基础的物质,其含量直接影响植物对光能的捕获与转换^[30]。叶绿素荧光参数与植物光合作用关系密切,能揭示植物光合系统对光能的吸收、传递、耗散及分配情况,是研究植物光合作用的有效探针,可快速、准确、无损伤地检测植物的光合作用状况^[31]。 F_v/F_m 和 F_v/F_o 是表征PS II反应中心原初光能转换效率和潜在光化学活性的关键指标。Zhang等^[32]研究发现,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理可有效延缓盐胁迫下黄瓜叶绿素的降解,同时,提高PS II电子传递速率,显著提升黄瓜光合能力,促进黄瓜生长发育。Sun等^[33]研究发现,喷施外源褪黑素能够保持高温胁迫下番茄叶片叶绿体结构的完整性,缓解高温胁迫对光系统II(PS II)结构的损伤,提高番茄的光合性能,增强番茄幼苗的耐热性。本研究结果表明,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理可显著提高辣椒叶片叶绿素含量和类胡萝卜素含量,表明外源褪黑素在一定程度上可以保护光合色素不被降解,光合色素含量的增加有利于提高辣椒叶片的光合速率。喷施不同浓度褪黑素可不同程度地提高辣椒叶片 F_v/F_m 和 F_v/F_o ,说明外源褪黑素可增强辣椒的光合性能,提高叶片的光能转化和利用效率,为辣椒产量与品质提升提供基础。

光合作用光反应为碳同化提供还原力,CO₂的固定效率与卡尔文循环关键酶活性密切相关^[34]。在卡尔文循环中,1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(*Rubisco*)是光合碳同化的双功能酶,其活性高低直接影响植物的光合速率。果糖-1,6-二磷酸酯酶(*FB-Pase*)催化果糖-1,6-二磷酸水解,产生果糖-6-磷酸和无机磷,在卡尔文循环和葡萄糖异生途径中起着关键的调节作用。果糖-1,6-二磷酸醛缩酶(*FBA*)是植物正常生长不可或缺的关键酶,不仅为植物的生理生化过程提供碳骨架,而且在糖酵解、糖异生和碳同化中发挥着重要作用。甘油醛-3-磷酸脱氢酶(*GAPDH*)催化3-磷酸甘油酸还原成3-磷酸甘油醛,其酶活性直接影响光合碳同化的转运效率。吴鹏等^[35]研究发现,施加外源褪黑素能显著提升盐碱复

合胁迫下黄瓜幼苗*Rubisco*活性与*FBPase*活性,缓解盐碱复合胁迫对黄瓜幼苗光呼吸代谢的抑制,进而增强黄瓜幼苗对复合盐碱胁迫的耐受性。王亚芳等^[36]研究发现,褪黑素处理可以显著提高O₃胁迫下葡萄叶片*Rubisco*活性,并通过推动光呼吸来耗散过剩光能,缓解PS II光抑制,进而增强碳同化能力。本研究结果表明,叶面喷施不同浓度褪黑素处理能不同程度提高辣椒叶片*Rubisco*活性、*FBPase*活性、*FBA*活性及*GAPDH*活性,说明外源褪黑素可以增强光合电子传递和CO₂同化效率,促进光合同化力积累,提高光合速率,为作物产量形成提供重要的物质基础。

光合作用是作物生长发育过程中重要的能量转化代谢系统,提高光合能力有助于植物生长发育与籽粒生物量积累,是作物产量形成的物质基础^[37]。邹京南等^[38]的研究结果表明,褪黑素处理能缓解干旱胁迫下大豆百粒重的下降和对叶片结构损伤,提高植株的蔗糖含量和碳同化产物从叶片向籽粒的运输能力,有助于大豆产量的提升。苗含笑等^[39]研究发现,干旱胁迫能显著降低小麦穗数,施加褪黑素处理可以促进干物质向籽粒的转运,进而提高粒重,缓解干旱胁迫对产量的影响。本研究结果表明,不同浓度褪黑素处理均能不同程度促进辣椒生长,这可能由于褪黑素与吲哚乙酸生物合成的前体同为色氨酸,且两者分子结构相似,因此在调控植株生长方面的作用亦相似^[40]。外源褪黑素处理可有效提高辣椒果实单果重、纵径和横径,这说明果实开花后施用褪黑素有助于产量的形成,单果重增加,且不会影响果实的外观特性,这与胡容平等^[41]的研究结果一致。

辣椒质地结构特性包括果肉硬度、弹性、黏聚性、咀嚼性、回复性,这些指标对辣椒果实的贮存和运输具有重要影响。本研究结果显示,褪黑素处理能显著影响辣椒果实的硬度、黏聚性及咀嚼性等参数。不同浓度褪黑素处理能显著提升辣椒果实硬度,这与褪黑素在苹果^[42]、梨^[43]、蓝莓^[44]、猕猴桃^[45]等作物上的研究结果一致。T2处理和T3处理还能提高果实的黏聚性及咀嚼性,说明这些处理能增加辣椒果肉脆度和果肉紧实度。上述结果说明,褪黑素的应用对于提高辣椒果实的品质具有积极作用。

可溶性蛋白可直接或间接地调控果蔬的生长发

育、成熟衰老以及抗逆性等多种生理过程。作为蛋白质的基本组成单位,游离氨基酸与果蔬风味和营养品质息息相关,同时参与组织中多种生理代谢过程。蔬菜果实的硝酸盐含量和纤维素含量同样是影响果实品质的重要因素,过高的硝酸盐含量和纤维素含量不但降低了蔬菜果实的安全性,还影响其食用口感^[46]。Xia等^[47]的研究结果表明,褪黑素处理通过提高蔗糖磷酸合酶的活性进而增加葡萄果实的可溶性糖含量和花青素含量。Fan等^[48]研究发现,褪黑素处理可提高苹果果实可溶性糖含量与抗坏血酸含量,并通过调节蔗糖代谢中的酶活性来维持金冠苹果的品质。本研究结果表明,褪黑素处理可显著提升辣椒果实中可溶性蛋白含量和游离氨基酸含量,这与生吉萍等^[49]、Pang等^[50]在番茄上得到的研究结果一致。本研究还发现,褪黑素处理还能显著提升辣椒果实的维生素C含量与可溶性糖含量,降低辣椒果实的硝酸盐含量和纤维素含量,说明外源褪黑素处理不但可以提高辣椒果实的风味和营养价值,还能提升其安全品质和食用口感,这与豆建华等^[51]、郝金倩等^[52]的研究结果一致。

果实散发出的香气是由多种挥发性化合物组合而成。电子鼻作为一种能够分析、识别和检测复杂嗅味和挥发性成分的人工嗅觉装置,可以通过吸附不同的气味分子并将感知的信号转化成定量的物理信号,并对采集到的气味进行综合评价^[53]。本研究采用电子鼻技术对不同浓度褪黑素处理的辣椒果实挥发性成分的分析结果表明,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理对辣椒果实的W5S和W2W传感器响应值有显著影响,说明该浓度的褪黑素处理对氮氧化物、芳香族化合物和有机硫化物等风味物质的合成具有重要作用,这与杜天浩等^[54]在番茄中的研究结果一致。其原因可能在于褪黑素处理能提高植物叶片的光合作用效率,增强植物的有机物合成及对养分的吸收能力,进而提高果实的营养与风味品质。

4 结论

外源喷施100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素能显著增加辣椒叶片光合色素含量、PS II最大光化学效率、PS II潜在光化学活性、卡尔文循环关键酶活性,促进植株生长,并提高果实产量;同时还能增加果实中游离氨基酸含量、可溶性蛋白含量、维生素C含量与可溶性糖含量,提高果实硬度,降低果实硝酸盐含量,增加

挥发性物质含量,进而改善辣椒果实风味与营养品质。

参考文献:

- [1] 邹学校,胡博文,熊程,等. 中国辣椒育种60年回顾与展望[J]. 园艺学报,2022,49(10):2099-2118.
- [2] 高成安,毛奇,万红建,等. 不同贮藏温度对绿熟期辣椒果实品质的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(2):226-235.
- [3] 郑龙辉,陆红佳,刘雄. 辣椒素生理功能研究进展[J]. 食品科学,2011,32(3):262-265.
- [4] 孙锦,高洪波,田婧,等. 我国设施园艺发展现状与趋势[J]. 南京农业大学学报,2019,42(4):594-604.
- [5] 尹兴,张丽娟,李博文,等. 氮肥与双氰胺配施对温室番茄生产及活性氮排放的影响[J]. 中国农业科学,2018,51(9):1725-1734.
- [6] 胡晨曦,李子恒,张云虹,等. 低温弱光对不同品种辣椒幼苗生长和光合特性的影响[J]. 福建农业学报,2022,37(5):617-625.
- [7] 王春萍,张世才,杨小苗,等. 辣椒苗期耐低温弱光鉴定指标研究[J]. 核农学报,2021,35(4):989-996.
- [8] 李小平,姜宏立,郑传举,等. 低温弱光对典型大棚作物生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(S2):48-51.
- [9] 徐达,闫航,胡佳未,等. 育苗基质配比及育苗方式对辣椒成苗的影响[J]. 江西农业大学学报,2023,45(6):1370-1384.
- [10] LERNER A B, CASE J D, TAKAHASHI Y, et al. Isolation of melatonin, the pineal gland factor that lightens melanocytes[J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(10):2587.
- [11] ZHANG H J, ZHANG N, YANG R C, et al. Melatonin promotes seed germination under high salinity by regulating antioxidant systems, ABA and GA₄ interaction in cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. Journal of Pineal Research, 2014, 57(3):269-279.
- [12] ZHAO H B, SU T, HUO L Q, et al. Unveiling the mechanism of melatonin impacts on maize seedling growth: sugar metabolism as a case[J]. Journal of Pineal Research, 2015, 59(2):255-266.
- [13] YANG L, YOU J, LI J Z, et al. Melatonin promotes *Arabidopsis* primary root growth in an IAA-dependent manner[J]. Journal of Experimental Botany, 2021, 72(15):5599-5611.
- [14] YU J C, LU J Z, CUI X Y, et al. Melatonin mediates reactive oxygen species homeostasis via SICV to regulate leaf senescence in tomato plants[J]. Journal of Pineal Research, 2022, 73(2):e12810.
- [15] SUN Q Q, ZHANG N, WANG J F, et al. A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato[J]. Journal of Pineal Research, 2016, 61(2):138-153.
- [16] GAO H, ZHANG Z K, CHAI H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit[J]. Postharvest Biology and Technolo-

- gy, 2016, 118:103-110.
- [17] 贾润普,王 玥,李 勃,等. 外源褪黑素处理对‘阳光玫瑰’葡萄果实品质的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(10):2034-2044.
- [18] 吴彩芳,李红艳,刘 琴,等. 外源褪黑素对桃生长及果实品质的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(1):40-49.
- [19] SUN Q Q, ZHANG N, WANG J F, et al. Melatonin promotes ripening and improves quality of tomato fruit during postharvest life [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(3):657-668.
- [20] WANG D, CHEN Q Y, CHEN W W, et al. Melatonin treatment maintains quality and delays lignification in loquat fruit during cold storage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 284:110126.
- [21] 李 斗,王宇航,王春恒,等. GABA对葡萄叶片光合色素及糖含量和果实风味的影响[J]. 园艺学报, 2024, 51(4):815-831.
- [22] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [23] LI M Y, WANG Y, WEI X H, et al. Effects of pretreatment and freezing storage on the bioactive components and antioxidant activity of two kinds of celery after postharvest[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 18:100655.
- [24] 曹建康,姜微波,赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京:中国轻工业出版社, 2007.
- [25] 王学奎,黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3版. 北京:高等教育出版社, 2015.
- [26] WU C C, HAO W Z, YAN L, et al. Postharvest melatonin treatment enhanced antioxidant activity and promoted GABA biosynthesis in yellow-flesh peach[J]. *Food Chemistry*, 2023, 419:136088.
- [27] LI Y J, DING S D, KITAZAWA H, et al. Storage temperature effect on quality related with cell wall metabolism of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) and its modeling[J]. *Food Packaging and Shelf Life*, 2022, 32:100865.
- [28] HUANG G L, LIU T T, MAO X M, et al. Insights into the volatile flavor and quality profiles of loquat (*Eriobotrya japonica* Lindl.) during shelf-life via HS-GC-IMS, E-nose, and E-tongue[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20:100886.
- [29] 戴子博,杨江山,李 斗,等. 多巴胺对甘肃河西走廊阳光玫瑰葡萄光合性能及品质的影响[J]. 果树学报, 2025, 42(1):94-111.
- [30] 于鹏澎,宋金修,蔡 玮,等. 夜间LED补光光照度和补光时间对番茄种苗质量的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(9):1917-1926.
- [31] 陈兰英,许 航,徐正刚,等. 生境对药食两用植物接骨草的生长、叶绿素含量与叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态科学, 2021, 40(5):69-77.
- [32] ZHANG T G, SHI Z F, ZHANG X H, et al. Alleviating effects of exogenous melatonin on salt stress in cucumber[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 262:109070.
- [33] SUN C, MENG S D, WANG B F, et al. Exogenous melatonin enhances tomato heat resistance by regulating photosynthetic electron flux and maintaining ROS homeostasis[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, 196:197-209.
- [34] 刘建新,刘瑞瑞,刘秀丽,等. 外源硫化氢对盐碱胁迫下褪黑素光合碳代谢的调控[J]. 植物生态学报, 2023, 47(3):374-388.
- [35] 吴 鹏,吕 剑,郁继华,等. 褪黑素对盐碱复合胁迫下黄瓜幼苗光合特性和渗透调节物质含量的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7):1901-1910.
- [36] 王亚芳,陈征文,杨兴旺,等. 外源褪黑素对O₃胁迫下葡萄叶片光合碳同化和光呼吸的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(4):847-855.
- [37] 张明聪,何松榆,秦 彬,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下春大豆品种绥农26形态、光合生理及产量的影响[J]. 作物学报, 2021, 47(9):1791-1805.
- [38] 邹京南,于 奇,金喜军,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下大豆鼓粒期生理和产量的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(5):745-758.
- [39] 苗含笑,李东晓,王久红,等. 褪黑素对干旱胁迫下小麦生长发育和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5):161-167, 191.
- [40] YANG L, YOU J, LI J Z, et al. Melatonin promotes *Arabidopsis* primary root growth in an IAA-dependent manner[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2021, 72(15):5599-5611.
- [41] 胡容平,范中菡,董义霞,等. 褪黑素对葡萄果实品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(4):39-44.
- [42] FAN Y T, LI C Y, LI Y H, et al. Postharvest melatonin dipping maintains quality of apples by mediating sucrose metabolism[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 174:43-50.
- [43] ZHAI R, LIU J L, LIU F X, et al. Melatonin limited ethylene production, softening and reduced physiology disorder in pear (*Pyrus communis* L.) fruit during senescence[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 139:38-46.
- [44] SHANG F Z, LIU R L, WU W J, et al. Effects of melatonin on the components, quality and antioxidant activities of blueberry fruits[J]. *LWT*, 2021, 147:111582.
- [45] ZHANG Y T, TANG H L, LEI D Y, et al. Exogenous melatonin maintains postharvest quality in kiwiberry fruit by regulating sugar metabolism during cold storage[J]. *LWT*, 2023, 174:114385.
- [46] 刘周斌,毛莲珍,黄 宇,等. 5种不同基因型辣椒果实发育期品质变化[J]. 食品科学, 2021, 42(23):18-26.
- [47] XIA H, SHEN Y Q, DENG H H, et al. Melatonin application improves berry coloration, sucrose synthesis, and nutrient absorption in ‘Summer Black’ grape[J]. *Food Chemistry*, 2021, 356:129713.
- [48] FAN Y T, LI C Y, LI Y H, et al. Postharvest melatonin dipping maintains quality of apples by mediating sucrose metabolism[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 174:43-50.
- [49] 生吉萍,赵瑞瑞,陈玲玲,等. 褪黑素采前喷施对采后番茄果实抗病性和贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(9):188-193.
- [50] PANG L L, CHEN L, JIANG Y Q, et al. Role of exogenous melatonin in quality maintenance of sweet cherry:elaboration in links between phenolic and amino acid metabolism[J]. *Food Biosci-*

- ence, 2023, 56: 103223.
- [51] 豆建华, 张 洋, 袁 鸿, 等. 外源褪黑素对番茄果实品质和挥发性物质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(4): 83-95, 117.
- [52] 郝金倩, 王宝驹, 佟 静, 等. 外源褪黑素对水培韭菜生长和品质的影响[J]. 园艺学报, 2024, 51(4): 847-858.
- [53] 魏昊泰, 李怡雪, 赵嘉诺, 等. 水分条件对不同发育阶段番茄果实外观、营养及风味品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(9): 1701-1710.
- [54] 杜天浩, 周小婷, 朱兰英, 等. 褪黑素处理对盐胁迫下番茄果实品质及挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(15): 69-76.

(责任编辑:石春林)