

张雪莲, 罗德旭, 杨红, 等. 外源褪黑素和硒对高温胁迫下辣椒生理特性和抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(8): 1729-1738.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.08.013

外源褪黑素和硒对高温胁迫下辣椒生理特性和抗氧化系统的影响

张雪莲¹, 罗德旭¹, 杨红¹, 刁卫平², 王伟玮¹, 孙玉东¹, 白甜¹, 刘璐¹, 尹莲¹

(1. 江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所, 江苏 淮安 223001; 2. 江苏省农业科学院, 江苏 南京 210014)

摘要: 本研究旨在探究外源褪黑素(Melatonin, MT)和硒(Se)对高温胁迫下辣椒的生理特性和抗氧化系统的影响。以耐热品系 R9 和育成品种淮红一号为供试材料, 在6~7片真叶期施用不同含量的褪黑素和 Na_2SeO_3 , 以常温清水处理(CK1)和高温清水处理(CK2)为对照。于花期测定花粉活力、热害指数、叶片相对电导率、抗氧化酶(SOD、POD、APX)活性和MDA含量。于果实成熟期测定植株和果实性状以及地上部分和果实的鲜质量、干质量。结果表明: 在高温胁迫下, 单施0.6 mg/kg Na_2SeO_3 、单施150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素、0.6 mg/kg Na_2SeO_3 和150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素配施3个处理均能明显减少细胞质膜透性, 提高花粉萌发率、抗氧化酶活性和叶绿素含量, 增加果实产量及干物质积累量, 其中同时施用0.6 mg/kg Na_2SeO_3 和150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理效果最好。本研究可为硒和褪黑素在植物抵御高温胁迫上的应用提供理论依据和技术参考。

关键词: 辣椒; 褪黑素; 硒; 高温胁迫; 抗氧化系统

中图分类号: S641.306

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2023)08-1729-10

Effects of exogenous melatonin and selenium on physiological properties and antioxidant systems of chilies under high temperature stress

ZHANG Xue-lian¹, LUO De-xu¹, YANG Hong¹, DIAO Wei-ping², WANG Wei-wei¹, SUN Yu-dong¹, BAI Tian¹, LIU Lu¹, YIN Lian¹

(1. Huaiyin Institute of Agricultural Sciences of the Xuhuai District of Jiangsu Province, Huai'an 223001, China; 2. Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: This study was designed to investigate the effects of exogenous melatonin (MT) and selenium (Se) on the physiological properties and antioxidant systems of chilies under high temperature stress. Using heat-resistant line R9 and cultivated variety Huaihong No.1 as test materials, different contents of melatonin and Na_2SeO_3 were applied during the 6-7 true leaf stage. Pollen vitality, heat damage index, relative conductivity of leaves, activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, APX), and MDA content were measured during the flowering period with ordinary temperature water treatment (CK1) and high temperature water treatment (CK2) as controls. The plant traits, fruit traits, as well as the fresh and dry weight of the

aboveground parts and fruits were measured during the fruit ripening period. The results showed that under high temperature stress, single application of 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 treatment, single application of 150 $\mu\text{mol/L}$ melatonin, combined application of 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 and 150 $\mu\text{mol/L}$ melatonin could significantly reduce plasma membrane permeability, increase pollen germination rate, antioxidant enzyme activity, chlorophyll content, fruit yield

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 淮安市农业科学研究院科技发展基金项目(HNY201906); 江苏省种业振兴“揭榜挂帅”项目[JBGs(2021)065]

作者简介: 张雪莲(1996-), 女, 江苏镇江人, 硕士, 研究实习员, 主要从事蔬菜栽培及育种研究。(E-mail) xuelianzhang2022@163.com

通讯作者: 罗德旭, (E-mail) 498782025@qq.com

and dry matter accumulation. The combined application of 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 and 150 $\mu\text{mol/L}$ melatonin had the best effect. This study can provide theoretical basis and technical reference for the application of selenium and melatonin in plant resistance to high temperature stress.

Key words: pepper; melatonin; selenium; high temperature stress; antioxidant system

辣椒(*Capsicum annuum* L.)起源于中南美洲的玻利维亚,明末传至中国,具有悠久的栽培历史,由于其独特的辛香麻辣味而深受人们的喜爱,是全球消费量最多的调味品^[1]。在自然界植物易遭受极端环境的影响,包括生物胁迫和非生物胁迫,常见的有病虫害以及干旱、低温或高温等环境胁迫。从 20 世纪 50 年代以来,由于人类对环境的肆意破坏,全球气候以每 10 年上升 0.13 $^{\circ}\text{C}$ 的速度逐渐变暖,这种气候对作物的生长和发育产生了极大的影响,尤其是对小麦、水稻、玉米和大豆产生了不利影响,研究结果表明 1980 年到 2008 年,全球玉米和小麦的产量分别下降了 3.8% 和 5.5%^[2],升温 1 $^{\circ}\text{C}$ 将导致小麦、水稻、玉米和大豆分别减产 2.9% \pm 2.3%、5.6% \pm 2.0%、7.1% \pm 2.8% 和 10.6% \pm 5.8%^[3]。

辣椒是喜温植物但不耐热,高温酷暑会导致辣椒产量锐减、经济效益下降。有研究表明,当气温高于 35 $^{\circ}\text{C}$,辣椒就会出现发育不良的现象,如花粉畸形、花器不正常、花瓣增厚等,严重时可能造成辣椒坐果率低、组织萎蔫等^[4-6],气温高于 40 $^{\circ}\text{C}$ 即达到了辣椒的致死温度,极易造成植株短期内死亡,即使耐热品种也难以幸免。何铁光等发现辣椒在高温胁迫下细胞膜结构被破坏,致使细胞质外渗,细胞调节作用失衡,从而失去了抵御高温的能力^[7]。余楚英等^[8]验证了当植物遭受高温胁迫后,会导致活性氧的积累,细胞失去产生和清除自由基的平衡能力,积累的自由基将诱导氧化应激,导致膜脂过氧化,打破了细胞膜的稳定性。后来有学者发现,喷施 150 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素(MT)能有效提高高温胁迫下茄子幼苗叶片中光合色素含量及光合能力^[9];100 mg/kg 质量分数的褪黑素能显著激活番茄抗氧化系统,从而抵御硝酸盐胁迫^[10];另外褪黑素预处理能提高抗氧化酶的活性,减少细胞质外渗和提升膜结构的完整性^[11]。与此同时,硒在植物抵御逆境中也有同样效果,有研究表明硒通过增加抗氧化水平及清除活性氧(ROS)来提高黄瓜的光合能力、叶绿素含量和产量,并降低了高温胁迫伤害^[12];硒还具有提高叶绿素总量和调节抗氧化酶活性的能力^[13]。夏季高温试验结果验证了硒能有效提升辣椒叶片的净光合速率,

从而增加干物质积累^[14]。

夏季辣椒生产中,出现连续高温天气,尤其是当夜间温度较高时,传统的物理降温手段不能完全解决辣椒遭受热害的问题,本试验通过施用外源褪黑素、硒,研究外源褪黑素、硒对辣椒生理特性、抗氧化系统的影响,探索减轻辣椒高温热害的快速有效途径,为外源药剂在克服辣椒高温生产障碍方面的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以耐用品系 R9(辣椒自交系,西北农林科技大学园艺学院辣椒课题组提供)和淮红一号(杂交组合,江苏徐淮地区淮阴农业科学研究所选育)为供试材料。本试验所用的褪黑素是上海凇恩科技发展有限公司旗下的“罗恩试剂”品牌,亚硒酸钠是成都博瑞特化学技术有限公司旗下的“艾科试剂”品牌,两者均为白色结晶粉末。

1.2 试验设计

1.2.1 材料处理 2022 年 8 月,将 R9、淮红一号统一进行催芽,播种于 72 孔塑料穴盘。待幼苗长至 2~3 片真叶,挑选生长整齐的幼苗定植至 1 加仑塑料花盆中培养。冷床育苗,于 6~7 叶期,将幼苗移至光照培养下进行高温处理,白天设定温度 39 $^{\circ}\text{C}$,光照度 30 000 lx,光照培养 12 h,夜间温度设置 28 $^{\circ}\text{C}$,暗培养 12 h,空气相对湿度保持在 75%。常温对照设置为白天温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、夜晚温度 16 $^{\circ}\text{C}$ 。培养 2 d 后,采用定点打孔灌根的方式分别施用不同含量的褪黑素(Melatonin, MT)、 Na_2SeO_3 溶液以及褪黑素(Melatonin, MT)和 Na_2SeO_3 混合溶液。CK1 表示未施用褪黑素和 Na_2SeO_3 溶液的常温对照,CK2 表示未施用褪黑素和 Na_2SeO_3 溶液的高温对照, Na_2SeO_3 含量设置为 0.3 mg/kg(X0.3)、0.6 mg/kg(X0.6)、0.9 mg/kg(X0.9)、1.2 mg/kg(X1.2);褪黑素含量设置为 50 $\mu\text{mol/L}$ (T50)、100 $\mu\text{mol/L}$ (T100)、150 $\mu\text{mol/L}$ (T150)、200 $\mu\text{mol/L}$ (T200);混合溶液设置为 0.3 mg/kg Na_2SeO_3 +50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素(X0.3+T50)、0.6 mg/kg

Na₂SeO₃ + 100 μmol/L 褪黑素 (X0.6 + T100)、0.9 mg/kg Na₂SeO₃ + 150 μmol/L 褪黑素 (X0.9 + T150)、1.2 mg/kg Na₂SeO₃ + 200 μmol/L 褪黑素 (X1.2 + T200),每个处理 3 株,共 3 次重复。于 16:00 灌根,每 2 d 施用 1 次,共计施用 3 次。在温度和药剂处理期间每日定量浇 1 次水,避免植株遭受干旱胁迫,其他栽培管理措施与光照培养箱常规栽培管理措施一致。

1.2.2 指标测定及方法 热害指数:热害分级标准参考姜燕等^[15]的方法进行统计,计算热害指数。

花粉活力:在处理期间采集不同品种辣椒的当日新鲜花粉进行花粉活力测定,测定方法采用离体萌发测定法^[16]。

叶片相对电导率:在处理期间选择不同品种辣椒相同部位的叶片,用打孔器(5 cm)取同等大小的叶圆片,参考杨少瑕等^[17]的电导法测定叶片相对电导率。

抗氧化酶活性和丙二醛含量:处理第 7 d,选取植株分叉前第一和第二片真叶进行液氮冷冻保存。样品用于测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性和丙二醛(MAD)含量,以上指标的测定均采用北京索莱宝检测试剂盒。具体为超氧化物歧化酶检测试剂盒的货号:BC0170,规格:50T/24S;过氧化物酶检测试剂盒的货号:BC0090,规格:50T/48S;抗坏血酸过氧化物酶检测试剂盒的货号:BC0220,规格:50T/48S;丙二醛检测试剂盒的货号:BC0020,规格:50T/48S。

农艺性状:株高、株幅、果实纵径、果实横径、坐果数和茎粗等指标参照中华人民共和国国家标准《NY/T 2234-2012 植物新品种特异性、一致性和稳定性测试指南 辣椒》测定。

鲜质量和干质量:参考余小兰等^[18]的方法分别测定植株和果实的鲜质量和干质量。

叶绿素含量利用 KONICA MINOLTA/SPAD 便携式叶绿素含量测定仪测定;叶面积、叶周长、叶长和叶宽利用万深 LA-S 系列植物图像分析系统-叶分析软件扫描获得;叶片颜色通过 Epson Perfection V39 扫描仪获得图片,与 The Royal Horticultural Society's Colour Chart 标准色卡上相应代码的颜色进行比对,按照最大相似原则,最终确定叶片的颜色;光照度和土壤温度利用高精度光照度计(deil DL333204)和数显温度计测量叶下光照度和土壤温度。

1.3 数据处理

利用 Microsoft Office 2016、IBM SPSS Statistics 23.0 对试验数据进行统计、分析及作图,利用 SPSS 进行方差分析,各品种及处理间采用 *t* 检验进行比较,使用 Image J 和 Photoshop CS6 软件进行图片处理。

2 结果与分析

2.1 辣椒品种(品系)间比较

高温胁迫下,供试品种(品系)淮红一号和 R9 在叶片性状及土壤温度等方面均具有较大差异(表 1、图 1)。方差分析结果表明,淮红一号叶面积、叶周长、叶片长极显著高于 R9 (*P*<0.01),淮红一号土壤温度极显著高于 R9 (*P*<0.001)。R9 叶片宽极显著高于淮红一号(*P*<0.01),叶绿素含量极显著高于淮红一号(*P*<0.001)。不同品种(品系)间辣椒叶片叶绿素含量与叶片颜色一致,叶下光照度与土壤温度一致,而淮红一号和 R9 在叶面积、叶周长、叶片长与叶下光照度、土壤温度一致。

表 1 不同辣椒品种(品系)叶片性状及高温胁迫下土壤温度

Table 1 Leaf traits of different chili varieties (lines) and soil temperature under high temperature stress

品种 (品系)	叶面积 (mm ²)	叶周长 (mm)	叶片长 (mm)	叶片宽 (mm)	叶绿素含量 (mg/ml)	叶下光照度 (lx)	叶片颜色	土壤温度 (℃)
R9	5 493.79±44.16	333.73±26.05	110.13±3.40	72.70±4.08	52.92±0.53	1 153.75±205.33	RHS2015Fan3 139A	30.60±0.24
淮红一号	6 491.88±164.50**	356.19±11.19**	144.47±9.17**	67.11±8.49**	48.14±0.18***	2 406.25±365.61**	RHS2015Fan3 135A	32.10±0.48***

* 表示在 0.05 水平差异显著; ** 表示在 0.01 水平差异极显著; *** 表示在 0.001 水平差异极显著。RHS2015Fan3 139A 和 RHS2015Fan3 135A 为 The Royal Horticultural Society's Colour Chart 标准色卡上相应代码。

2.2 外源褪黑素和硒对对高温胁迫下辣椒热害指数的影响

由表 2 可知,高温胁迫下,相同处理淮红一号热害指数均高于耐热品系 R9。单施 Na₂SeO₃ 的处理中,X0.6 处理 R9 和淮红一号的热害指数最低,且 X0.6 处理淮红一号热害指数高于 R9。单施褪黑素的处理中,

T150 处理 R9 和淮红一号热害指数最低,且 T150 处理淮红一号热害指数高于 R9。所有高温胁迫下,X0.6+T100 处理 R9 和淮红一号热害指数最低,同时 X0.6+T100 处理 R9 热害指数低于 X0.6 处理和 T150 处理,X0.6+T100 处理淮红一号热害指数低于 X0.6 处理和 T150 处理。



图 1 不同品种(品系)辣椒叶片形态
Fig.1 Leaf morphology of different chili varieties (lines)

表 2 不同含量的外源褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒热害指数的影响

Table 2 Effects of different contents of exogenous melatonin and Na_2SeO_3 on the heat damage index of chili peppers under high temperature stress

品种(品系)	处理	热害指数
R9	CK1	0
	CK2	66.7
	X0.3	66.7
	X0.6	16.7
	X0.9	25.0
	X1.2	58.3
	T50	50.0
	T100	33.4
	T150	16.7
	T200	41.6
	X0.3+T50	41.6
	X0.6+T100	8.3
	X0.9+T150	33.4
	X1.2+T200	50.0
淮红一号	CK1	0
	CK2	83.3
	X0.3	66.7
	X0.6	33.4
	X0.9	41.6
	X1.2	75.0
	T50	66.7
	T100	75.0
	T150	41.6
	T200	66.7
	X0.3+T50	66.7
	X0.6+T100	25.0
	X0.9+T150	66.7
	X1.2+T200	75.0

CK1: 常温清水处理; CK2: 高温清水处理; X0.3: 0.3 mg/kg Na_2SeO_3 ; X0.6: 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 ; X0.9: 0.9 mg/kg Na_2SeO_3 ; X1.2: 1.2 mg/kg Na_2SeO_3 ; T50: 50 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素; T100: 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素; T150: 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素; T200: 200 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素。

2.3 外源褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒花粉活力的影响

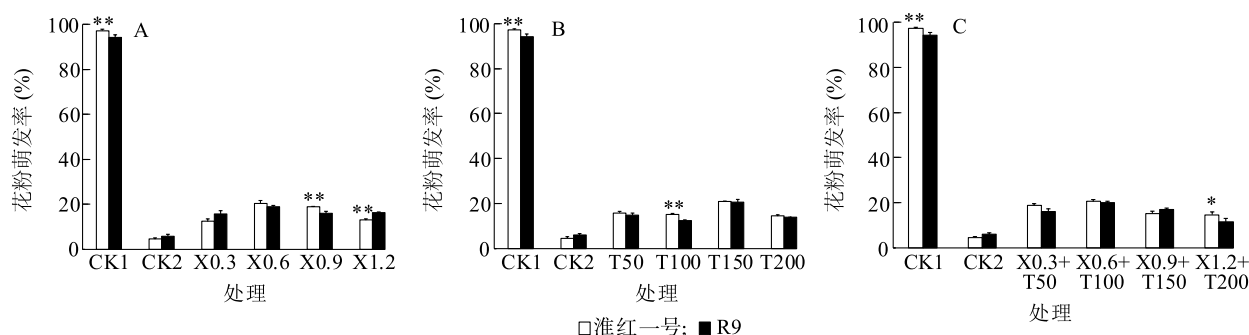
由图 2 显示, CK1 的淮红一号花粉萌发率极显著高于 R9 ($P<0.01$)。高温胁迫下, 单施 Na_2SeO_3 的处理中 X0.6 处理的 2 个辣椒品种(品系)花粉萌发率最高, 花粉受高温伤害最低; X0.9 处理淮红一号花粉萌发率极显著高于 R9 ($P<0.01$); X0.6 处理淮红一号花粉萌发率与 R9 无显著差异 ($P>0.05$)。单施褪黑素的处理中 T150 处理 R9 和淮红一号的花粉萌发率最高; T100 处理淮红一号的花粉萌发率极显著高于 R9 ($P<0.01$)。高温胁迫下, X0.6+T100 处理 R9 和淮红一号花粉萌发率最高。

2.4 外源褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒叶片相对电导率的影响

当植物遭受逆境胁迫时, 细胞膜遭到破坏从而使电解质外渗, 植物组织的浸提液电导率增大。由图 3 可知, CK1 的 R9 叶片相对电导率极显著低于淮红一号 ($P<0.001$)。单施 Na_2SeO_3 的处理中, X0.6 处理 R9 和淮红一号叶片相对电导率最低, 即受到高温的伤害最小。单施褪黑素的处理中, T150 处理 R9 和淮红一号叶片相对电导率最低, 且淮红一号叶片相对电导率极显著高于 R9 ($P<0.01$)。高温胁迫下, X0.6+T100 处理 2 个辣椒品种(品系)的叶片相对电导率最低。综合来看, 混合施用 Na_2SeO_3 和褪黑素比单施 Na_2SeO_3 或褪黑素效果更佳。

2.5 外源褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒抗氧化系统和丙二醛含量的影响

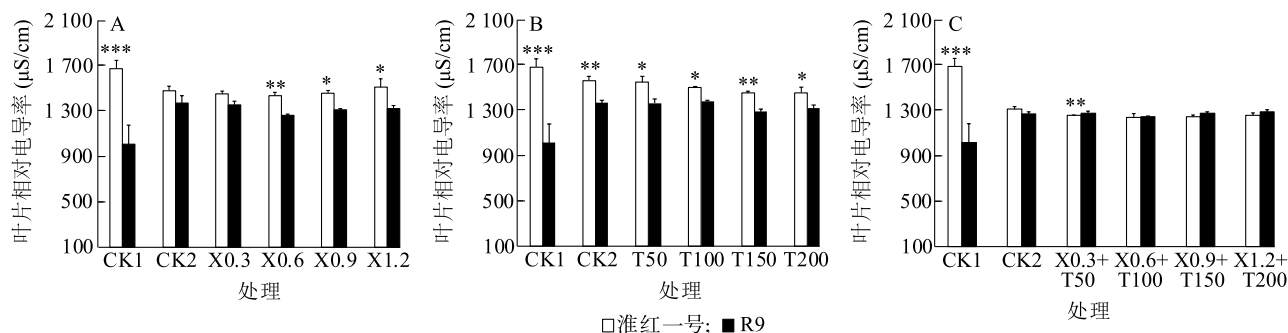
由表 3 可知, CK1 的 R9 MDA 含量极显著低于淮红一号 ($P<0.001$), R9 SOD 酶活性极显著低于淮红一号 ($P<0.01$)。单施 Na_2SeO_3 的处理中, X0.6 处理的 2 个辣椒品种 SOD、POD、APX 酶活性最高, MDA 含量最低。X0.6 处理淮红一号 SOD 酶活性极显著高于 R9 ($P<0.001$), 淮红一号 POD 酶活性极显著低于 R9 ($P<0.001$)。单施褪黑素的处理中, T150 处理 R9 的 SOD、POD 酶活性最大, 而 MDA 含量最低。T150 处理淮红一号 SOD、POD 酶活性极显著低于 R9 ($P<0.001$), 淮红一号 MDA 含量极显著高于 R9 ($P<0.01$)。高温胁迫下, X0.6+T100 处理 2 个辣椒品种 SOD、POD、APX 酶活性到达最大, 而 MDA 含量最低。X0.6+T100 处理淮红一号 POD 酶活性极显著低于 R9 ($P<0.0001$), 淮红一号 APX 酶活性极显著高于 R9 ($P<0.01$)。



CK1、CK2、X0.3、X0.6、X0.9、X1.2、T50、T100、T150、T200 见表2。*表示同一处理不同品种(品系)在0.05水平差异显著;**表示同一处理不同品种(品系)在0.01水平差异显著;***表示同一处理不同品种(品系)在0.001水平差异显著。

图2 不同含量的 Na_2SeO_3 (A)、褪黑素(B)、 Na_2SeO_3 和褪黑素混合溶液(C)对高温胁迫下辣椒花粉萌发率的影响

Fig.2 Effects of different contents of Na_2SeO_3 (A), melatonin (B), Na_2SeO_3 and melatonin mixed solution (C) on the germination rate of chili pollen under high temperature stress



CK1、CK2、X0.3、X0.6、X0.9、X1.2、T50、T100、T150、T200 见表2。*表示同一处理不同品种(品系)在0.05水平差异显著;**表示同一处理不同品种(品系)在0.01水平差异显著;***表示同一处理不同品种(品系)在0.001水平差异显著。

图3 不同含量 Na_2SeO_3 (A)、褪黑素(B)、 Na_2SeO_3 和褪黑素混合溶液(C)对高温胁迫下辣椒叶片相对电导率的影响

Fig.3 Effects of different contents of Na_2SeO_3 (A), melatonin (B), Na_2SeO_3 and melatonin mixed solution (C) on the relative conductivity of pepper leaves under high temperature stress

2.6 外源褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒植株性状和果实的影响

由表4可知,CK1的R9叶绿素含量极显著高于淮红一号($P<0.001$)。高温胁迫对供试品种(品系)的植株和果实影响较大,与CK1的淮红一号相比,CK2的淮红一号株高、株幅分别增加了15.19%、61.11%,果长、果宽、坐果数量和叶绿素含量分别降低了23.77%、27.08%、57.14%和4.01%。与CK1的R9相比,CK2的R9株高、株幅分别增加了6.24%、32.50%,茎粗、果长、果宽、坐果数量和叶绿素含量分别降低了22.22%、21.95%、10.87%、33.33%和47.65%。X0.6处理,淮红一号株幅显著高于R9($P<0.05$),淮红一号叶绿素含量显著低于R9($P<0.05$)。X0.6处理的R9株高和株幅比CK2的R9分别降低了15.17%和25.73%,茎粗、果长、果宽、坐果数量和

叶绿素含量比CK2的R9分别提高了28.57%、14.58%、14.63%、25.00%和6.50%。同时X0.6处理的淮红一号株高和株幅比CK2的淮红一号分别降低了12.09%和12.59%,果长、果宽、坐果数量和叶绿素含量比CK2的淮红一号分别增加了18.28%、34.29%、100.00%和90.08%。T150处理R9果长极显著高于淮红一号($P<0.001$),叶绿素含量显著高于淮红一号($P<0.05$),T150处理的R9株高和株幅比CK2的R9降低了17.94%和19.38%,果长、果宽和叶绿素含量比CK2的R9分别上升了22.92%、2.44%和7.87%。T150处理的淮红一号株高和株幅比CK2的淮红一号分别降低了13.66%和10.34%,茎粗、果宽、坐果数量和叶绿素含量比CK2的淮红一号分别上升了12.50%、25.71%、100.00%和87.30%。X0.6+T100处理淮红一号株幅显著高于R9($P<0.01$)。X0.6+

T100 处理的 R9 株高和株幅比 CK2 的 R9 分别降低了 13.54% 和 29.16%, 茎粗、果长、果宽、坐果数量和叶绿素含量比 CK2 的 R9 分别增加了 28.57%、36.46%、2.44%、25.00% 和 17.72%。同时 X0.6+T100

处理的淮红一号的株高和株幅比 CK2 的淮红一号分别降低了 10.99% 和 13.45%, 果长、果宽、坐果数量和叶绿素含量比 CK2 的淮红一号分别增加了 21.51%、51.43%、66.67% 和 81.34%。

表 3 不同含量褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒 *SOD*、*POD*、*APX* 酶活性和丙二醛含量的影响

Table 3 Effects of different contents of melatonin and Na_2SeO_3 on the activities of *SOD*, *POD* and *APX* and malondialdehyde content in chili under high temperature stress

品种(品系)	处理	<i>SOD</i> 酶活性 (U/g)	<i>POD</i> 酶活性 (U/g)	<i>APX</i> 酶活性 (U/g)	MDA 含量 (nmol/g)
R9	CK1	68.29±0.61	2 232.42±38.80	7.40±0.35	24.13±0.41
淮红一号		104.41±4.47 **	1 471.89±87.31 ***	7.90±0.68	32.66±0.68 ***
R9	CK2	24.58±1.02	4 613.69±38.79	3.07±0.10	26.07±1.13
淮红一号		67.47±0.90 ***	956.92±71.03 ***	3.98±0.15	30.32±0.66
R9	X0.3	48.23±0.31	6 906.81±71.95	6.86±0.22	13.27±0.64
淮红一号		94.74±0.08 ***	1 796.59±101.93 ***	6.20±0.77	8.05±0.57 **
R9	X0.6	54.77±0.93	6 983.00±61.80	9.11±0.48	10.16±0.66
淮红一号		106.06±0.47 ***	2 127.57±27.28 ***	9.80±0.62	6.36±0.50
R9	X0.9	41.55±0.81	4 637.72±40.01	9.93±0.66	18.14±0.65
淮红一号		23.23±0.47 ***	1 114.97±56.70 ***	7.70±0.22 **	9.52±1.18 **
R9	X1.2	34.28±0.67	1 878.45±60.54	8.26±0.30	22.32±0.52
淮红一号		35.04±1.00	851.43±17.21 ***	8.47±0.28	14.31±0.50 ***
R9	T50	36.41±0.58	4 544.75±41.58	6.07±0.09	21.67±0.85
淮红一号		7.48±0.40 ***	519.44±21.28 ***	6.35±0.33	15.35±1.50 **
R9	T100	58.03±1.35	3 143.58±47.62	6.29±0.43	16.32±0.95
淮红一号		8.14±0.19 ***	1 046.47±56.77 ***	7.67±0.21 **	16.90±0.51
R9	T150	86.42±0.76	5 109.67±89.16	7.41±0.40	10.95±0.23
淮红一号		8.32±0.16 ***	4 118.04±82.83 ***	8.57±0.76	12.38±0.80 **
R9	T200	45.43±0.86	3 087.77±86.68	7.70±0.30	12.28±0.50
淮红一号		24.37±0.46 ***	2 457.82±68.91 **	6.31±0.30 **	18.10±0.63 **
R9	X0.3+T50	43.90±0.56	3 842.03±74.22	11.23±1.41	14.58±1.13
淮红一号		54.89±0.75 ***	3 942.50±49.24	9.80±0.29	16.10±0.63
R9	X0.6+T100	70.30±0.73	4 853.64±73.03	11.33±0.54	7.79±0.56
淮红一号		69.71±0.65	3 331.92±51.68 ***	15.67±1.26 **	7.09±0.27
R9	X0.9+T150	63.23±0.60	4 861.99±56.84	11.76±0.20	9.31±1.26
淮红一号		67.08±0.36 ***	2 246.00±52.39 ***	11.12±0.72	10.00±0.68
R9	X1.2+T200	55.26±0.70	3 224.91±52.56	9.80±0.29	14.94±1.05
淮红一号		54.39±0.71	2 159.48±60.50 ***	7.87±0.35 **	19.20±0.36 **

CK1、CK2、X0.3、X0.6、X0.9、X1.2、T50、T100、T150、T200 见表 2。* 表示同一处理不同品种(品系)在 0.05 水平差异显著,** 表示同一处理不同品种(品系)在 0.01 水平差异显著,*** 表示同一处理不同品种(品系)在 0.001 水平差异显著。

2.7 外源褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒不同部位干物质积累的影响

由表 5 可知 CK1 的 R9 地上部分鲜质量、果实鲜质量和干质量极显著高于淮红一号($P<0.001$), CK1 的 R9 地上部分干质量极显著低于淮红一号($P<0.001$)。CK1 的淮红一号地上部分鲜质量比

R9 降低了 53.94%, CK1 的淮红一号地上部分干质量相比 R9 增加了 150.00%, 说明淮红一号地上部分含水量低于 R9, 且淮红一号干物质积累量高于 R9。CK1 的淮红一号果实鲜质量比 R9 极显著降低了 22.33% ($P<0.001$), 果实干质量比 R9 极显著降低了 54.44% ($P<0.001$), 说明淮红一号果实含水量

高于 R9。CK2 的淮红一号地上部分鲜质量比 R9 极显著下降了 21.86% ($P<0.001$),地上部分干质量显著下降了 20.00% ($P<0.05$)。CK2 的淮红一号果实鲜质量比 R9 极显著增加了 72.46% ($P<0.001$),果实干质量比 R9 极显著增加了 20.00% ($P<0.01$)。CK2 的淮红一号地上部分干质量、果实鲜质量、果实干质量均低于 CK1,说明高温胁迫对辣椒的水分含量及干物质积累影响较大。外源施用褪黑素和 Na_2SeO_3 ,可以有效提高辣椒的耐热性。单施

Na_2SeO_3 的处理中,X0.6 处理 R9 和淮红一号的果实干质量和鲜质量最大,X0.6 处理 R9 和淮红一号的果实鲜质量比 CK2 处理分别增加了 11.11%、11.48%。单施褪黑素的处理中,T150 处理的淮红一号地上部分鲜质量、地上部分干质量、果实鲜质量、果实干质量达到最大,T150 处理 R9 果实鲜质量、果实干质量达到最大。在高温胁迫下,X0.6+T100 处理淮红一号和 R9 果实干质量和鲜质量最大。

表 4 不同含量褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒植株性状和果实的影响

Table 4 Effects of different contents of melatonin and Na_2SeO_3 on plant traits and fruits of chili under high temperature stress

品种(品系)	处理	株高 (cm)	株幅 (cm)	茎粗 (cm)	果长 (cm)	果宽 (cm)	单株坐果数	叶绿素含量 (mg/ml)
R9	CK1	57.70±5.50	44.00±1.73	0.90±0.05	12.30±1.15	4.60±0.40	6.00±1.15	52.92±0.53
淮红一号		55.30±1.20	36.00±4.00 *	0.80±0.10	12.20±2.50	4.80±0.30	7.00±1.20	48.14±0.18 ***
R9	CK2	61.30±6.35	58.30±4.73	0.70±0.06	9.60±2.30	4.10±0.96	4.00±0.00	50.8±2.90
淮红一号		63.70±2.30	58.00±5.20	0.80±0	9.30±1.50	3.50±1.30	3.00±1.20	25.20±3.60 ***
R9	X0.3	65.70±7.09	47.70±3.79	0.90±0.08	10.00±1.00	3.40±0.51	3.00±0.58	50.5±1.60
淮红一号		63.30±3.51	56.70±4.04 *	0.80±0.08	7.80±0.76 *	3.40±1.00	4.00±1.00	32.60±3.71 **
R9	X0.6	52.00±3.61	43.30±4.16	0.90±0.06	11.00±1.00	4.70±0.58	5.00±0.58	54.10±2.77
淮红一号		56.00±3.00	50.70±1.50 *	0.80±0.10	11.00±1.00	4.70±0.40	6.00±1.00	47.90±1.10 *
R9	X0.9	64.30±3.51	46.3±14.50	0.80±0.14	10.80±1.25	3.80±0.53	3.00±0.58	52.60±10.74
淮红一号		60.7±2.08	58.00±2.00	0.80±0.03	8.00±0.50 *	3.80±0.25	3.00±1.53	36.40±2.17
R9	X1.2	75.00±4.58	51.20±5.97	0.70±0.36	6.20±3.88	8.50±0.30	3.00±1.53	45.80±6.80
淮红一号		63.70±5.13 *	55.30±3.06	0.80±0.03	7.90±0.31	3.30±0.42	2.00±0.58	33.70±2.71 *
R9	T50	66.00±3.61	54.70±1.15	0.80±0.08	11.50±0.87	3.70±0.58	3.00±0.58	43.30±0.95
淮红一号		65.30±2.50	57.30±4.70	0.80±0.00	7.50±0.40	3.40±0.40	3.00±1.20	34.00±1.70 **
R9	T100	57.70±4.51	52.00±7.21	0.80±0.06	11.70±0.29	4.30±0.25	4.00±1.15	51.40±5.72
淮红一号		65.30±3.51	59.0±1.73	0.80±0.03	7.00±0.45 ***	4.10±0.36	5.00±1.00	38.30±1.50 *
R9	T150	50.30±1.53	47.00±4.36	0.70±0.22	11.80±0.29	4.20±0.64	4.00±0.58	54.8±3.68
淮红一号		55.00±4.00	52.00±3.61	0.90±0.05	8.30±0.29 ***	4.40±0.53	6.00±0.58 *	47.20±2.01 *
R9	T200	63.30±1.53	61.70±2.89	0.70±0.15	10.50±2.60	3.10±0.81	3.00±0.58	47.70±5.51
淮红一号		62.30±3.06	58.00±3.00	0.80±0.03	7.60±0.46	3.80±0.68	5.00±0.58 *	42.6±0.76
R9	X0.3+T50	55.30±3.06	50.20±3.33	0.90±0.01	13.10±1.10	3.30±1.15	3.00±1.00	51.8±3.84
淮红一号		61.70±2.89	58.30±2.08 *	0.70±0.07 *	11.10±0.51 *	4.20±0.76	3.00±1.53	43.40±1.33
R9	X0.6+T100	53.00±3.61	41.30±1.15	0.90±0.07	13.10±2.29	4.20±0.75	5.00±0.58	59.80±6.50
淮红一号		56.70±2.56	50.20±2.75 **	0.80±0.10	11.30±1.15	5.30±0.58	5.00±1.53	45.70±2.08
R9	X0.9+T150	58.00±1.00	47.30±2.31	0.80±0.07	10.90±2.61	3.50±0.87	3.00±0.58	46.10±4.71
淮红一号		72.70±4.16 **	54.3±3.51 *	0.80±0.04	8.70±2.08	4.60±0.51	4.00±2.52	45.50±4.87
R9	X1.2+T200	64.70±2.52	51.70±3.21	0.80±0.10	9.30±0.76	3.30±0.58	2.00±1.73	43.50±2.1
淮红一号		73.7±1.53 **	60.00±1.00 *	0.60±0.19	8.10±0.90	3.50±0.50	3.00±0.58	43.60±2.63

CK1、CK2、X0.3、X0.6、X0.9、X1.2、T50、T100、T150、T200 见表 2。* 表示同一处理不同品种(品系)在 0.05 水平差异显著,** 表示同一处理不同品种(品系)在 0.01 水平差异显著,*** 表示同一处理不同品种(品系)在 0.001 水平差异显著。

表 5 不同含量褪黑素和 Na_2SeO_3 对高温胁迫下辣椒不同部位干物质积累的影响Table 5 Effects of different contents of melatonin and Na_2SeO_3 on the accumulation of dry matter in different parts of chili under high temperature stress

品种	处理	地上部分鲜质量 (kg)	地上部分干质量 (kg)	果实鲜质量 (kg)	果实干质量 (kg)
R9	CK1	0.241±0.002	0.014±0.001	0.515±0.002	0.090±0.005
淮红一号		0.111±0.001 ***	0.035±0.003 ***	0.400±0.004 ***	0.041±0.002 ***
R9	CK2	0.279±0.002	0.015±0.001	0.207±0.001	0.030±0.001
淮红一号		0.218±0.001 ***	0.012±0.001 *	0.357±0.001 ***	0.036±0.001 **
R9	X0.3	0.248±0.002	0.037±0.002	0.227±0.002	0.013±0.001
淮红一号		0.216±0.001 ***	0.011±0.001 ***	0.358±0.004 ***	0.038±0.004 ***
R9	X0.6	0.187±0.002	0.031±0.004	0.230±0.001	0.017±0.001
淮红一号		0.124±0.002 ***	0.039±0.003 *	0.398±0.001 ***	0.040±0.001 ***
R9	X0.9	0.203±0.004	0.032±0.001	0.159±0.001	0.013±0.003
淮红一号		0.119±0.001 ***	0.028±0.001 **	0.387±0.003 ***	0.035±0.001 ***
R9	X1.2	0.222±0.004	0.033±0.001	0.125±0.002	0.008±0.002
淮红一号		0.115±0.002 ***	0.023±0.003 **	0.376±0.002 ***	0.031±0.002 ***
R9	T50	0.230±0.001	0.035±0.004	0.124±0.002	0.004±0.001
淮红一号		0.114±0.002 ***	0.021±0.006 *	0.369±0.005 ***	0.028±0.002 ***
R9	T100	0.173±0.002	0.009±0.002	0.153±0.003	0.014±0.002
淮红一号		0.118±0.003 ***	0.032±0.001 ***	0.375±0.001 ***	0.034±0.003 ***
R9	T150	0.155±0.002	0.021±0.001	0.188±0.003	0.021±0.001
淮红一号		0.126±0.003 ***	0.048±0.001 ***	0.389±0.005 ***	0.041±0.002 ***
R9	T200	0.239±0.003	0.053±0.002	0.179±0.004	0.019±0.004
淮红一号		0.121±0.003 ***	0.041±0.002 *	0.386±0.001 ***	0.040±0.002 ***
R9	X0.3+T50	0.211±0.002	0.027±0.002	0.255±0.001	0.020±0.001
淮红一号		0.261±0.002 ***	0.036±0.002 **	0.287±0.002 ***	0.041±0.003 ***
R9	X0.6+T100	0.210±0.002	0.025±0.001	0.272±0.002	0.033±0.001
淮红一号		0.182±0.007 **	0.022±0.004	0.299±0.003 ***	0.046±0.001 ***
R9	X0.9+T150	0.224±0.004	0.028±0.003	0.270±0.005	0.029±0.006
淮红一号		0.241±0.006 *	0.030±0.002	0.281±0.004 *	0.036±0.001
R9	X1.2+T200	0.238±0.004	0.031±0.001	0.064±0.006	0.004±0.001
淮红一号		0.271±0.005 ***	0.034±0.003	0.260±0.007 ***	0.021±0.001 ***

CK1、CK2、X0.3、X0.6、X0.9、X1.2、T50、T100、T150、T200 见表 2。* 表示同一处理不同品种(品系)在 0.05 水平差异显著,** 表示同一处理不同品种(品系)在 0.01 水平差异显著,*** 表示同一处理不同品种(品系)在 0.001 水平差异显著。

3 讨论

褪黑素于 1958 年由美国科学家 Lerner 在牛松果中首次提取出来^[19],后又在高等植物中发现^[20],包括生长于高海拔地区的植物^[21]。此后研究者将其用于动植物试验中,发现褪黑素具有较强的抗氧化能力,可用于延缓衰老和抵御逆境胁迫^[22-25]。在

黄瓜耐高温试验中发现褪黑素具有抑制活性氧系统酶活性的能力,可以减少逆境对黄瓜的胁迫^[26],赵娜等^[19]发现叶面喷施褪黑素可有效缓解高温胁迫对 *NR*、*GS*、*GOGAT* 和 *GDH* 酶活性的抑制,减轻铵态氮积累对黄瓜幼苗造成的毒害,提高黄瓜幼苗在高温胁迫下的代谢能力,从而抵御高温胁迫;崔婉宁等^[27]发现褪黑素处理后能有效延缓高温胁迫诱导

的半夏基因组的去甲基化;另外在叶菜类莴苣上的研究发现叶面喷施褪黑素能有效提升抗氧化系统的酶活性,从而减少高温对植物细胞质膜的伤害^[28];丁东霞等^[29]发现 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理辣椒,能有效提升低温弱光胁迫下辣椒叶片的叶绿素含量、叶绿素荧光特性和抗氧化能力。而本研究发现外源施用 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素,辣椒能有效降低膜透性,清除活性氧积累,提升抗氧化能力,有效降低植株遭受的热害程度,使花粉致畸率降低,果实和植株受高温影响的程度降低。

硒元素由瑞典科学家 Berzelius 首次发现,后研究者又在多种高等植物中发现。硒是植物生长发育的必须营养元素,植物体内的硒为无机态和有机态形式存在,以有机态为主,硒是以低分子量化合物和高分子量化合物形式存在于生物体内^[30]。有研究发现硒以多种方式如酶促机制或非酶促机制参与生物体的抗氧化过程,在生物的抗逆、抗衰老中发挥重要的作用^[31-32]。尚庆茂等^[13-14,33]发现适宜浓度的硒可以提高高温逆境下辣椒叶片的净光合速率,从而促进植物干物质积累,提高叶片的叶绿素含量,同时 $\leq 0.9 \text{ mg/kg}$ 施硒水平,辣椒 *GPX* 和 *POD* 酶活性相比空白对照分别提高了 150% 和 63.6%,而 *SOD* 和 *CAT* 酶活性相比空白对照降低,说明硒对高温胁迫下辣椒的抗氧化酶活性具有重要影响。Djanaguiraman 等^[34]研究结果表明,短期温度的提升或下降都会影响植物抗氧化系统,外源施用硒可以有效提高脯氨酸含量,加强对线粒体电子传递链的保护,从而提升植物抵御外界高温或低温胁迫的能力。Akladios^[35]发现将小麦种子浸泡在一定浓度的硒溶液里,低温胁迫下可以诱导花青素、叶绿素、生长素的生成并致使抗氧化酶活性上升;陈思蒙等^[36]指出不同价态的硒在植物抗逆领域的研究进展也不同,亚硒酸钠也被多次证实对植物抵御逆境具有一定效用。本研究结果与前人的研究结果一致,外源施用 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 时,抗氧化酶(*SOD*、*POD* 和 *APX*)活性显著提升,丙二醛含量下降,从而增强植株抗氧化能力,同时抑制高温胁迫下细胞膜的透性,降低植株的热害程度。

本研究发现,辣椒的耐热性不仅与不同辣椒品种的基因型相关,还与不同品种间植株的形态、叶片参数和含水量等紧密关联。耐热品系 R9 相比测试品种淮红一号叶下光照度、土壤温度更低,这是由于

R9 具有合理的侧枝分布和叶片排列结构。通过测量辣椒品种的地上部分干质量和鲜质量发现,R9 植株含水量较高且干物质积累少,这是其耐热性较强的原因之一。除此之外,高温胁迫对辣椒的株高、株幅和果实产量影响较大,高温胁迫下的辣椒果实畸形且发育不良,营养生长过旺,株高、株幅和果实产量呈反比,茎秆木质化严重。本试验结果表明施用 Na_2SeO_3 和褪黑素能帮助辣椒抵御高温伤害,具有一定的推广应用价值。但其作用机制尚未完全清楚,下一步应采用分子生物学或多种组学交叉分析手段来揭示其作用机制。

4 结论

本试验以淮红一号和 R9 这 2 个辣椒品种(品系)作为研究对象,探究不同含量 Na_2SeO_3 和褪黑素对高温胁迫下辣椒生理特性和抗氧化系统的影响。本研究发现,在高温胁迫下,单施 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 、单施 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素、 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 和 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素配施 3 个处理均能明显减少辣椒细胞质膜透性、提高花粉萌发率、抗氧化酶活性和叶绿素含量,增加辣椒果实产量、品质及干物质积累量。其中同时施用 0.6 mg/kg Na_2SeO_3 和 150 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素处理效果最好,优于单施 Na_2SeO_3 或褪黑素。

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] HUANG L J, CHENG G X, KHAN A, et al. CaHSP16.4 a small heat shock protein gene in pepper, is involved in heat and drought tolerance[J]. Protoplasma, 2019, 256: 39-51.
- [3] WANG X, ZHAO C, MÜLLER C, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments[J]. Nature Sustainability, 2020, 3: 908-916.
- [4] 余楚英,尹延旭,王飞,等. 茄果类蔬菜热胁迫及耐热性研究进展[J]. 中国蔬菜,2021(4):27-29.
- [5] 王静,梁成亮,张西露,等. 辣椒种质资源的耐热性评价与鉴定[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2020,46(5):551-552.
- [6] 高素燕,吕敬刚,刘文明. 辣椒高温胁迫和耐热机理的研究进展[J]. 天津农业科学,2012,18(1):31-34.
- [7] 何铁光,董文斌,王爱勤,等. 高温胁迫下辣椒生理生化响应机理初步探讨[J]. 西南农业学报,2013,26(2):543-544.
- [8] 余楚英,尹延旭,王飞,等. 茄果类蔬菜热胁迫及耐热性研究进展[J]. 中国蔬菜,2021(4):27-40.

- [9] 余雪娜,李婧娴,谢永东,等. 外源褪黑素对高温胁迫下茄子幼苗光合及抗氧化特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(5):496-497.
- [10] 徐宁,曹娜,王闯,等. 外源褪黑素对硝酸盐胁迫下番茄幼苗抗氧化系统的影响[J]. 北方园艺,2019(3):1-5.
- [11] 徐向东,孙艳,孙波,等. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(5):1295-1296.
- [12] BALAL R M, SHAHID M A, JAVAID M M, et al. The role of selenium in amelioration of heat-induced oxidative damage in cucumber under high temperature stress[J]. Acta Physiol Plant, 2016, 38(6):158.
- [13] 尚庆茂,陈淑芳,张志刚. 硒对高温胁迫下辣椒叶片抗氧化酶活性的调节作用[J]. 园艺学报,2005,32(1):35-36.
- [14] 尚庆茂,陈淑芳,张志刚. 硒对高温逆境下辣椒光合特性的影响[C]//中国园艺学会. 中国园艺学会第六届青年学术讨论会论文集. 西安:陕西科学技术出版社,2004:625-630.
- [15] 姜燕,黄新根,杨寅桂,等. 辣椒苗期耐热性及其生理生化特性研究[J]. 长江蔬菜,2014(12):47-50.
- [16] 张子学,孙峰. 辣椒花粉生活力最佳测定方法的筛选[J]. 种子,2002(1):32-33.
- [17] 杨少瑕,吕庆芳,梁春林. 电导法对32个辣椒品种组合抗寒性的测定及配合力分析[J]. 黑龙江农业科学,2014(2):6-15.
- [18] 余小兰,张静,李光义,等. 辣椒在不同施硒水平下硒累积规律[J]. 热带作物学报,2021,42(7):1988-1990.
- [19] 赵娜,孙艳,王德玉,等. 外源褪黑素对高温胁迫条件下黄瓜幼苗氮代谢的影响[J]. 植物生理学报,2012,48(6):557.
- [20] MURCH S J, SIMMONS C B, SAXENA P K. Melatonin in feverfew and other medicinal plants[J]. Lancet, 1997, 350:1598-1599.
- [21] 张贵友,李萍,戴尧仁. 低温胁迫下褪黑激素对烟草悬浮细胞精氨酸脱羧酶活性的影响[J]. 植物学通报,2005,22(5):555-559.
- [22] 魏茜雅,林欣琪,梁腊梅,等. 褪黑素引发处理提高朝天椒种子萌发及幼苗耐盐性的生理机制[J]. 江苏农业学报,2022,38(6):1637-1647.
- [23] 郭爱华. 外源褪黑素对盐胁迫下苦菜幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(13):153-157.
- [24] 高安静,刘婷婷,周美亮,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下苦荞幼苗生长及生理特性的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(11):3003-3012.
- [25] 叶欣悦,闫见敏,杨雪莲,等. *SICOMT1* 基因克隆及在番茄组织器官中的表达和褪黑素生物合成变化[J]. 江苏农业科学,2022,50(23):49-54.
- [26] 徐向东,孙艳,孙波,等. 高温胁迫下外源褪黑素对黄瓜幼苗活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(5):1295-1300.
- [27] 崔婉宁,杨金荣,刘梦梦,等. 褪黑素对半夏高温倒苗及DNA甲基化的影响[J]. 农业生物技术学报,2023,31(3):500-508.
- [28] 王博伟,陈艳丽,朱国鹏,等. 叶面喷施褪黑素对海南高温节水培叶用莴苣生长生理的影响[J]. 中国蔬菜,2022(11):80-85.
- [29] 丁东霞,李能慧,李静,等. 外源褪黑素对低温弱光胁迫下辣椒叶绿素荧光和抗氧化系统的影响[J]. 浙江农业学报,2022,34(9):1935-1944.
- [30] 陈淑芳. 硒对辣椒幼苗生长发育及耐热性的影响[D]. 晋中:山西农业大学,2003.
- [31] 薛泰麟,侯少范,谭见安,等. 硒在高等植物体内的抗氧化作用 I. 硒对过氧化作用的抑制效应及酶促机制的探讨[J]. 科学通报,1993(3):274-277.
- [32] 罗盛国,刘元英,姜伯文,等. 硒对棚室黄瓜生物抗氧化能力的影响[J]. 北方园艺,2000(3):10-11.
- [33] 尚庆茂,李平兰. 硒在高等植物中的生理作用[J]. 植物生理学通讯,1998(4):284-288.
- [34] DJANAGIHRAMAN M, BELLIRAJ N, BOSSMANN S H, et al. High-temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum [J]. ACS Omega, 2018, 3(3):2479-2491.
- [35] AKLADIIOUS S A. Influencen of different soaking times with selenium on growth, metabolic activities of wheat seedlings under low temperature stress [J]. African Journal of Biotechnology, 2012, 11(82):14792-14804.
- [36] 陈思蒙,李子玮,张璐翔,等. 硒在植物抵御胁迫中作用的研究进展[J]. 中国农业科技导报,2020,22(3):6-13.

(责任编辑:成纾寒)