

褪黑素浸种对辣椒种子萌发及幼苗抗旱性的影响

马仲炼¹, 周苓宇^{1,2}, 陈悦¹, 黄先敏¹, 马永翠¹, 史志龙¹

(1. 昭通学院农学与生命科学学院 云南昭通 657000; 2. 西南大学农学与生物科技学院 重庆北碚 400716)

摘要:为提高辣椒种子及幼苗的耐旱性,设置0(CK)、50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T1)、100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T2)、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T3)褪黑素浸种和15%聚乙二醇(PEG 6000)模拟干旱,以贵农长线王辣椒为试验材料,研究褪黑素(melatonin)对辣椒种子萌发特性和干旱胁迫下幼苗抗旱性的影响。结果表明,褪黑素处理较CK处理能有效提高辣椒种子的发芽率9.06~9.96个百分点和存苗率4.69~5.78个百分点,促进辣椒幼苗生长;在干旱胁迫下,褪黑素处理较CK处理可以有效提高叶片相对含水量14.06~22.74个百分点、羟自由基清除能力3.95%~57.89%、总抗氧化能力23.73%~38.98%,降低细胞膜透性12.96%~22.24%、丙二醛含量9.12%~30.76%、过氧化氢含量5.90%~20.85%;但褪黑素处理较CK处理显著降低叶片可溶性糖含量63.05%~77.61%,降低脯氨酸含量4.43%~62.14%。灰色关联分析表明,褪黑素主要通过增加植株地下生物量、总抗氧化能力以及叶片相对含水量等来提高辣椒幼苗的抗旱性。通过抗旱系数分析表明,T1、T2和T3各处理平均抗旱系数为1.09、1.22和1.05,T2处理抗旱能力最强。抗旱性综合评价获得CK、T1、T2和T3处理的评价值为0.338 0、0.606 7、0.770 0、0.545 6。综上所述,褪黑素浸种能改善辣椒种子萌发生长特性,干旱胁迫下,褪黑素(100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理对辣椒抗旱能力提升最佳。

关键词:辣椒;褪黑素;浸种;萌发;抗旱性

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2024)09-128-08

Effects of melatonin soaking on pepper seed germination and seedling drought resistance

MA Zhonglian¹, ZHOU Lingyu^{1,2}, CHEN Yue¹, HUANG Xianmin¹, MA Yongcui¹, SHI Zhilong¹

(1. College of Agronomy and Life Sciences, Zhaotong University, Zhaotong 657000, Yunnan, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology, Southwest University, Beibei 400716, Chongqing, China)

Abstract: To improve the drought tolerance of pepper seeds and seedlings, 0(CK), 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T1), 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T2), 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (T3) melatonin solution and 15% polyethylene glycol (PEG 6000) to simulate drought were set up, with Guinong Changxianwang as the experimental material to study the effect of melatonin on the germination characteristics of pepper seeds and drought resistance of seedlings under drought stress. The results showed that melatonin treatment could effectively increase the germination rate of pepper seeds by 9.06-9.96 percentage points and seedling survival rate by 4.69-5.78 percentage points, and promote the growth of pepper seedlings compared with CK treatment. Under drought stress, compared with CK treatment, melatonin treatment could effectively increase leaf water retention capacity by 14.06-22.74 percentage points, hydroxyl free radical scavenging capacity by 3.95%-57.89%, and total antioxidant capacity by 23.73%-38.98%, and reduce cell membrane permeability by 12.96%-22.24%, malondialdehyde content by 9.12%-30.76%, and hydrogen peroxide content by 5.90%-20.85%. However, melatonin treatment significantly reduced soluble sugar content by 63.05%-77.61% and proline content by 4.43%-62.14% compared with CK treatment. Grey correlation analysis showed that melatonin mainly improved drought resistance of pepper seedlings by increasing underground biomass, total antioxidant capacity and relative leaf water content. The analysis of drought resistance coefficient showed that the average drought resistance coefficient of T1, T2 and T3 were 1.09, 1.22 and 1.05, respectively, with T2 having the strongest drought resistance. The comprehensive evaluation values of CK, T1, T2 and T3 treatments were 0.338 0, 0.606 7, 0.770 0 and 0.545 6. In summary, seed soaking with melatonin could improve the germination and growth characteristics of pepper seeds. Under drought stress, melatonin(100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) treatment had the best effect on drought resistance of pepper.

Key words: Hot pepper; Melatonin; Seed soaking; Germination; Drought stress

收稿日期:2023-12-12;修回日期:2024-05-13

基金项目:云南省地方高校联合项目(202101BA070001-061);昭通市“兴昭人才支持计划”昭党人才(2023)3号

作者简介:马仲炼,男,讲师,研究方向为作物高产高效栽培。E-mail:mazhongli1988@163.com

通信作者:史志龙,男,副教授,研究方向为植物次生代谢产物。E-mail:shizhiliang@163.com

辣椒是一年或多年生茄科辣椒属草本植物,营养丰富,用途广泛,功能多样^[1]。辣椒属于浅根系植物,木栓化程度高,根细而弱,水分胁迫会使辣椒根系生长不良,造成产量和品质下降等问题^[2]。我国南方季节性、阶段性干旱对辣椒生产的影响突出,尤其是夏季伏旱频发已成为辣椒生产的制约因素。

农业生产中可以通过施用外源化学调控物质来减轻干旱胁迫对作物生长的危害。褪黑素在植物体内广泛存在,作为一种新型植物生长调节物质,其具有调控根系发育、促进植株生长、延迟叶片衰老、影响果实成熟等生理功能^[3-7],在植物响应非生物抗干旱胁迫^[8]、冷害^[9]、盐胁迫^[10]和重金属胁迫^[11]等方面起着重要作用。一方面褪黑素可以直接清除活性氧等来提高植物对胁迫的耐受性,另一方面可以提高光合效率、代谢物含量、抗氧化酶活性和调节应激相关转录因子^[12]。褪黑素处理可提高种子萌发能力、改善生长发育进程,进而提高植物对逆境的抵御能力^[13-14],尤其是在抗旱性研究方面已经取得了一些进展。在干旱胁迫下,外源添加 100 mg·L⁻¹褪黑素可增加渗透调节物质含量,增强抗氧化能力,抑制植株体内过度产生活性氧,降低膜质过氧化水平,增强沙芦草幼苗的耐旱性,促进幼苗生长^[15]。褪黑素可以提高干旱胁迫下桃苗叶片相对含水量和叶绿素含量,增强根系活力和植物抗氧化酶活性,抑制丙二醛和 H₂O₂ 的生成,增强桃苗抗旱性^[8]。0.15 mmol·L⁻¹褪黑素处理能显著提高干旱胁迫下种子活力,促进达乌里胡枝子种子萌发及幼苗生长^[16];褪黑素处理可以减轻小麦活性氧过多而带来的伤害,增加小麦的株高、穗粒数和干物质含量^[17]。然而,用褪黑素进行辣椒种子浸种并综合评价辣椒抗旱性的研究还鲜见报道。笔者采用不同浓度褪黑素浸种以及聚乙二醇(PEG)模拟干旱胁迫,研究褪黑素对辣椒种子活力及叶片生理特性的影响,采用灰色关联分析、抗旱系数分析等方法综合评价褪黑素对辣椒抗旱能力的改善作用,以期明确最佳施用浓度,为褪黑素在辣椒抗旱栽培应用方面提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

以贵农长线王辣椒为材料(贵州力合农业科技有限公司选育),褪黑素购自云南科仪化玻有限公司(分析纯,山东西亚)。

1.2 设 计

试验于 2023 年 3—5 月在昭通学院校内试验基地进行,采用单因素随机区组设计,通过浸种法、育苗盘发芽试验法和 PEG 模拟干旱胁迫法。选取种皮完整、饱满的辣椒种子,50~55 °C 水浴浸泡 15 min,纯净水漂洗后,分别设置 4 个处理,CK(对照):去离子水浸种;T1 处理:50 μmol·L⁻¹褪黑素浸种;T2 处理:100 μmol·L⁻¹褪黑素浸种;T3 处理:200 μmol·L⁻¹褪黑素浸种。浸种 10 h 之后,将种子播于穴盘育苗盘(规格 16 孔×8 孔,共 128 孔)。具体方法为:每孔先加入适量蛭石,用消毒镊子分别夹取 2 粒辣椒种子放入孔穴中央,种子间保持适当距离,再加入蛭石覆盖,每个处理 3 盘,每天使用手提式喷雾器补充水分,观察记录种子萌发情况。种子萌发一段时间后,喷施 Hoagland 营养液,待长到 4 叶 1 心时,将辣椒幼苗转入水培环境加入 PEG-6000 进行干旱胁迫,72 h 后取材测定生理指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 存苗率的测定 计算公式为:

$$\text{存苗率}/\% = 40 \text{ d 内辣椒的存活数量} / \text{发芽总数} \times 100。$$

1.3.2 生理指标的测定 参照李合生^[18]的方法测定叶绿素、脯氨酸、可溶性糖含量和质膜透性;参照王学奎^[19]的方法测定可溶性蛋白含量和叶片的相对含水量(RWC);参照邹琦^[20]的方法测定丙二醛(MDA)含量;使用 Solarbio 试剂盒测定总抗氧化能力、超氧阴离子含量、羟自由基清除能力以及过氧化氢含量。

1.3.3 农艺性状的测定 在 60 d 时,每个处理随机选取 30 株辣椒苗进行农艺性状的测定,采用游标卡尺测定株高、茎粗、根长。

1.4 数据 分析

采用 Excel 2010 软件和 SPSS 23.0 软件 Duncan's 新复极差法进行差异显著性检验和绘图,采用 SPSSAU 23.0 进行灰色关联度分析。

1.5 抗旱性的综合评价

标用模糊隶属函数和抗旱系数评价不同处理抗旱性。

1.5.1 隶属函数值 计算公式为:

$$H_{(bi)} = (H_{bi} - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min})。$$

式中: $H_{(bi)}$ 为 b 处理 i 指标的隶属值, H_{bi} 为 b 处理 i 指标的测定值, H_{\max} 为该指标的最大值, H_{\min} 为该指标的最小值; b 为某个处理; i 为某项指标^[21]。

若某个指标与作物的生长及生产呈负相关,则隶属函数公式为:

$$H(b_i)=1-(H_{bi}-H_{min})/(H_{max}-H_{min})。$$

运用所有生理生化指标隶属函数将所有指标隶属函数值累加,求平均值,均值大小代表了植物抗旱性的强弱^[22],其公式为:

$$\bar{H}_b = \Sigma H_b / k。$$

1.5.2 抗旱系数 计算公式为:

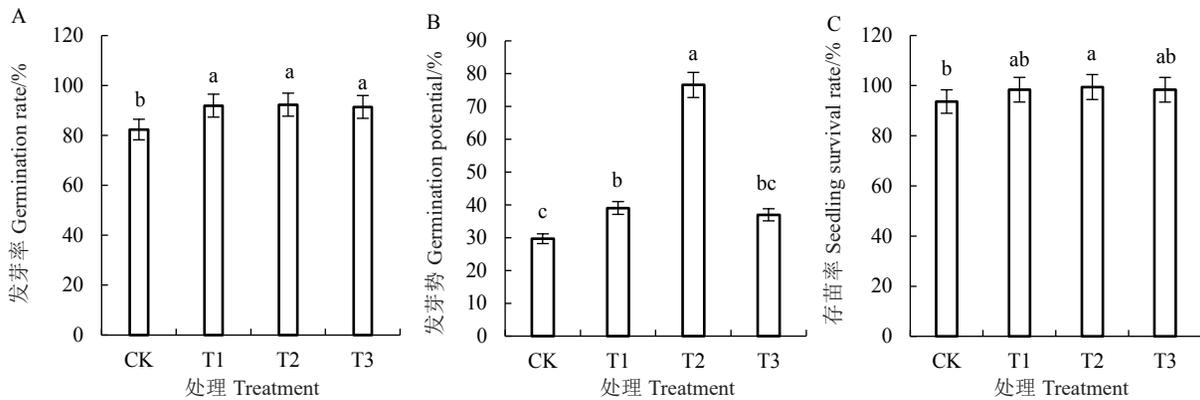
$$X_f = X_c / X_d。$$

X_f :抗旱系数, X_c :各指标在干旱下的测量值, X_d :对照测量值。

2 结果与分析

2.1 褪黑素浸种对发芽率、发芽势和存苗率的影响

如图1所示,T1、T2和T3处理辣椒种子发芽率较CK分别高9.57、9.96和9.06个百分点,T1、T2和T3与CK相比差异显著;T1、T2、T3处理的发芽势比CK分别高9.37、46.87和7.29个百分点,T1、



注:不同小写字母表示在0.05水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

图1 褪黑素对辣椒种子发芽率、发芽势和存苗率的影响

Fig. 1 Effect of melatonin on germination rate, germination potential and surviving rate of hot pepper seed

T2处理与CK相比差异显著;T1、T2和T3处理的存苗率比CK分别高4.71、5.78和4.69个百分点,且T2与CK差异显著。这表明与CK相比,T2处理能显著提高辣椒种子的发芽率、发芽势和存苗率。

2.2 褪黑素浸种对辣椒幼苗农艺性状和干物质量的影响

如表1所示,各处理之间根长、株高、茎粗差异

不显著;T1、T2和T3处理地上部干物质量比CK分别高10.83%、17.33%和8.30%;T1、T2和T3处理地下部干物质量比CK分别高35.29%、182.35%和152.94%。

2.3 褪黑素浸种对辣椒幼苗叶片生理指标的影响

2.3.1 褪黑素浸种对辣椒幼苗叶片相对含水量(RWC)的影响 如图2所示,T1、T2和T3处理的

表1 褪黑素处理对辣椒农艺性状和干物质量的影响

Table 1 Effect of melatonin on agronomic traits and dry matter content of hot pepper

处理 Treatment	根长 Root length/cm	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem thickness/mm	单株干物质量 Single plant dry mass/mg	
				地上部 Aboveground	地下部 Underground
CK	4.06±0.07 a	4.42±0.07 a	0.88±0.040 a	2.77±0.09 b	0.17±0.16 a
T1	3.95±0.15 a	4.36±0.21 a	0.88±0.027 a	3.07±0.09 ab	0.23±0.06 a
T2	4.27±0.34 a	4.45±0.09 a	0.90±0.003 a	3.25±0.08 a	0.48±0.03 a
T3	4.06±0.13 a	4.20±0.21 a	0.84±0.048 a	3.00±0.19 ab	0.43±0.09 a

辣椒幼苗RWC比CK分别高19.88、22.74和14.06个百分点,且T1、T2和T3与CK差异显著。这表明褪黑素处理能显著提高辣椒叶片保水能力。

2.3.2 褪黑素浸种处理对辣椒叶片细胞膜伤害指标的影响 如图3-A所示,T1、T2和T3处理辣椒

叶片MDA含量比CK分别低9.12%、30.76%和28.84%,且CK与T2、T3差异显著。由图3-B可以看出,T1、T2和T3处理辣椒叶片质膜透性比CK分别低12.96%和22.22%和22.24%,CK与T2、T3处理差异显著。这表明与CK相比,T2、T3处理能

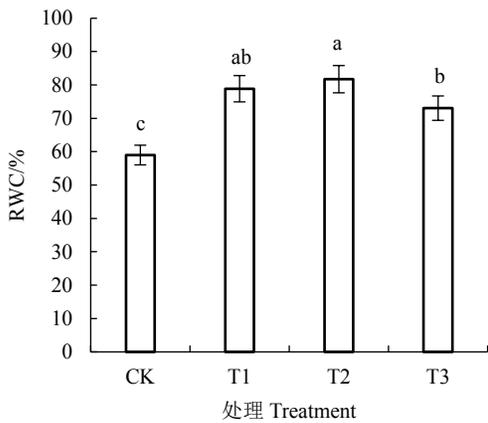


图2 褪黑素浸种对辣椒叶片RWC的影响

Fig. 2 Effect of melatonin on RWC of hot pepper leaves under drought stress

够显著降低干旱胁迫对辣椒叶片的膜脂过氧化程度。

2.3.3 褪黑素浸种处理对辣椒叶片渗透调节物质含量的影响 由图4-A可知,在干旱胁迫下,T2处理辣椒叶片可溶性蛋白含量比CK高38.26%,且差异显著;T1和T3处理辣椒叶片可溶性蛋白含量比CK处理分别低了5.02%和25.51%,T3处理与CK差异显著。说明干旱胁迫下,T2处理可增加辣椒叶片可溶性蛋白含量。

由图4-B可知,T1、T2和T3处理辣椒叶片可溶性糖含量比CK分别低了63.05%、72.78%和77.61%,T1、T2和T3处理与CK相比差异显著。说明干旱胁迫下褪黑素可使辣椒叶片的可溶性糖含量下降。

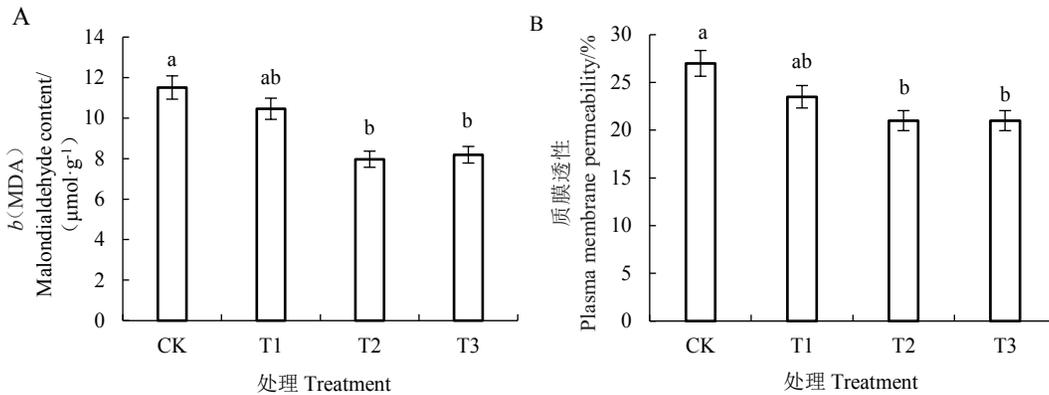


图3 褪黑素浸种对辣椒叶片细胞膜伤害指标的影响

Fig. 3 Effect of melatonin on cell membrane injury indicators in hot pepper leaves under drought stress

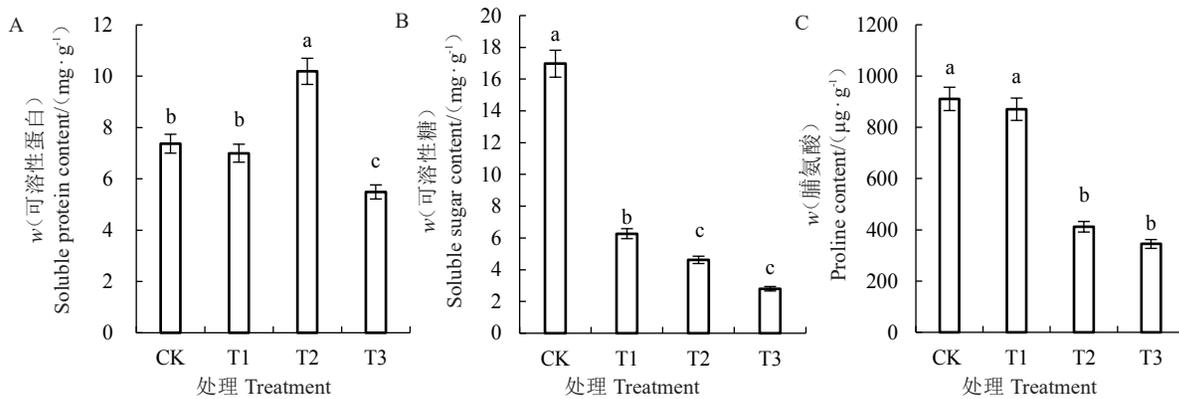


图4 褪黑素浸种对辣椒渗透调节物质含量的影响

Fig. 4 Effect of melatonin on osmoregulation substances content of hot pepper leaves under drought stress

由图4-C可知,T1、T2和T3处理辣椒叶片脯氨酸含量比CK分别低了4.43%、54.77%和62.14%,CK与T2和T3处理差异显著。说明干旱胁迫下褪黑素处理会降低辣椒叶片的脯氨酸含量。
2.3.4 褪黑素浸种对辣椒叶片光合色素含量的影响 如表2所示,干旱胁迫下,T1、T2处理辣椒叶

片叶绿素a含量比CK分别增加了29.43%和15.85%,T1、T2处理与CK差异显著;T1、T2处理辣椒叶片叶绿素b含量比CK分别高53.47%和24.75%,T1处理与CK差异显著;T1、T2处理辣椒叶片总叶绿素含量分别比CK提高了36.07%和18.31%,T1处理与CK差异显著。T3处理辣椒叶

表2 褪黑素浸种对辣椒叶绿素含量的影响
Table 2 Effect of melatonin on chlorophyll content of hot pepper under drought stress

处理 Treatment	w(叶绿素 a) Chlorophyll a content/(mg·g ⁻¹)	w(叶绿素 b) Chlorophyll b content/(mg·g ⁻¹)	w(总叶绿素) Total chlorophyll content/(mg·g ⁻¹)
CK	2.65±0.08 b	1.01±0.04 bc	3.66±0.11 bc
T1	3.43±0.08 a	1.55±0.07 a	4.98±0.14 a
T2	3.07±0.38 a	1.26±0.14 b	4.33±0.36 ab
T3	2.42±0.06 b	0.93±0.03 c	3.35±0.08 c

表3 褪黑素处理对辣椒叶片抗氧化能力及自由基积累水平的影响

Table 3 Effect of melatonin on antioxidant capacity accumulation level of free radicals of hot pepper leaves under drought stress

处理 Treatment	羟自由基清除能力 Scavenge hydroxyl radicals/%	b(总抗氧化能力) Total antioxidative capacity/ (μmol·g ⁻¹)	超氧阴离子含量 Superoxide anion content/(μmol·g ⁻¹)	b(过氧化氢) Hydrogen peroxide content/(μmol·g ⁻¹)
CK	0.76±0.03 b	0.59±0.04 c	0.004 7±0.000 27 a	9.83±0.15 a
T1	1.20±0.02 a	0.79±0.01 ab	0.003 4±0.000 30 b	9.25±0.03 b
T2	0.79±0.09 b	0.82±0.22 a	0.004 7±0.000 27 a	9.08±0.31 b
T3	0.87±0.07 b	0.73±0.23 b	0.003 7±0.000 43 ab	7.78±0.09 c

了33.90%、38.98%和23.73%，T1、T2和T3处理均与CK差异显著。T1和T3处理辣椒叶片超氧阴离子含量与CK相比分别低了27.66%和21.28%，CK与T1处理差异显著。T1、T2和T3处理辣椒叶片过氧化氢含量比CK分别低了5.90%、7.63%和20.85%，T1、T2、T3与CK相比差异显著。说明褪黑素处理能有效提高辣椒的抗氧化能力，减轻超氧阴离子和过氧化氢对辣椒叶片造成的伤害。

2.3.6 褪黑素浸种对辣椒抗旱系数的影响 如表4所示，T1、T2和T3处理抗旱系数均值分别为1.09、1.22和1.05，说明各处理与CK相比均能提高辣椒的抗旱性，以T2处理效果最佳。

如表5所示，CK、T1、T2和T3处理抗旱性综合评价价值分别为0.338 0、0.606 7、0.770 0和0.545 6。说明褪黑素对辣椒的种子萌发、叶片生理特性有一定的促进作用，T2处理效果最佳，T1处理效果次之。

2.3.7 褪黑素浸种对辣椒种子及干旱胁迫下辣椒幼苗生理指标影响的灰色关联度分析 参照灰色关联度分析理论，以褪黑素浓度作为参考序列，所测的各指标看作比较序列，关联度值在0.581~0.877(表6)，其中地下部干物质的综合评价最高(关联度为0.877)，然后是总抗氧化能力(关联度为0.795)和相对含水量(关联度为0.794)，说明褪黑素处理主要通过增强根系活力和总抗氧化能力以及增加叶片相对含水量等生理过程来增强辣椒幼苗的抗旱能力。

片叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均低于CK。说明在干旱胁迫下，T1、T2处理有利于叶片光合色素的积累。

2.3.5 褪黑素浸种对辣椒叶片抗氧化能力及自由基积累水平的影响 如表3所示，T1、T2和T3处理辣椒叶片羟自由基清除能力分别比CK高了57.89%、3.95%和14.47%，且T1与CK差异显著。T1、T2和T3处理辣椒叶片总抗氧化能力比CK高

表4 褪黑素处理对辣椒抗旱系数的影响

Table 4 Effect of melatonin on drought tolerance coefficient of hot pepper

指标 Index	处理 Treatment		
	T1	T2	T3
叶片相对含水量 Leaf relative water content	1.34	1.39	1.24
丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.76	1.53	1.41
可溶性蛋白含量 Soluble protein	1.04	1.52	0.95
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.37	0.20	0.16
质膜透性 Membrane permeability	0.60	1.00	1.14
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	1.29	1.16	0.91
叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	1.53	1.26	0.92
总叶绿素含量 Total chlorophyll content	1.36	1.18	0.92
脯氨酸含量 Proline content	0.87	0.41	0.35
羟自由基清除能力 Scavenge hydroxyl radicals	1.58	1.04	1.14
总抗氧化能力 Total antioxidative capacity	1.34	1.39	1.22
超氧阴离子含量 Superoxide anion content	0.91	1.00	0.98
过氧化氢含量 Hydrogen peroxide content	1.18	0.86	0.88
发芽势 Germination potential	1.32	2.58	1.25
发芽率 Germination rate	1.12	1.12	1.11
存苗率 Seedling survival rate	1.05	1.06	1.05
根长 Root length	0.90	1.05	1.00
株高 Plant height	0.98	1.01	0.95
茎粗 Stem thickness	1.00	1.02	0.95
地上干物质质量 Aboveground dry mass	1.09	1.17	1.08
地下干物质质量 Underground dry mass	1.27	2.64	2.36
均值 Average value	1.09	1.22	1.05

表5 褪黑素处理对辣椒抗旱性影响的综合分析

Table 5 Comprehensive analysis of melatonin treatment on drought resistance in hot pepper

指标 Index	处理 Treatment			
	CK	T1	T2	T3
叶片相对含水量 Leaf relative water content	0.210 2	0.761 9	0.870 5	0.618 5
丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.603 5	0.310 8	0.930 8	0.877 2
可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.177 5	0.340 9	0.901 6	0.233 7
可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.045 6	0.679 1	0.851 4	0.884 5
质膜透性 Membrane permeability	0.818 2	0.333 3	0.818 2	0.909 1
叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	0.283 3	0.933 3	0.633 3	0.091 7
叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	0.173 3	0.893 3	0.520 0	0.066 7
总叶绿素含量 Total chlorophyll content	0.242 3	0.922 7	0.587 6	0.082 5
脯氨酸含量 Proline content	0.195 8	0.340 2	0.870 1	0.851 4
羟自由基清除能力 Scavenge hydroxyl radicals	0.241 9	0.951 6	0.290 3	0.419 4
总抗氧化能力 Total antioxidative capacity	0.205 9	0.794 1	0.882 4	0.617 6
超氧阴离子含量 Superoxide anion content	0.457 1	0.571 4	0.457 1	0.485 7
过氧化氢含量 Hydrogen peroxide content	0.561 5	0.327 8	0.774 5	0.719 2
发芽势 Germination potential	0.055 6	0.222 2	0.888 9	0.185 2
发芽率 Germination rate	0.127 4	0.956 7	0.990 5	0.912 5
存苗率 Seedling survival rate	0.285 2	0.816 2	0.936 9	0.814 0
根长 Root length	0.573 3	0.426 7	0.853 3	0.573 3
株高 Plant height	0.752 9	0.682 7	0.788 2	0.494 1
茎粗 Stem thickness	0.578 9	0.578 9	0.684 2	0.368 4
地上干物质量 Aboveground dry mass	0.196 1	0.490 2	0.764 7	0.470 6
地下干物质量 Underground dry mass	0.312 5	0.406 3	0.875 0	0.781 3
综合评价值 Comprehensive index	0.338 0	0.606 7	0.770 0	0.545 6
排名 Rank	4	2	1	3

表6 褪黑素处理对辣椒农艺性状及生理指标的灰色关联度分析

Table 6 Gray correlation analysis of melatonin treatment on agronomic traits and physiological indicators of pepper

指标 Index	关联度 Correlation degree	排名 Rank	指标 Index	关联度 Correlation degree	排名 Rank
地下部干物质量 Underground dry mass	0.877	1	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	0.756	12
总抗氧化能力 Total antioxidative capacity	0.795	2	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content	0.736	13
叶片相对含水量 Leaf relative water content	0.794	3	总叶绿素含量 Total chlorophyll content	0.732	14
地上部干物质量 Aboveground dry mass	0.785	4	叶绿素 b 含量 Chlorophyll b content	0.726	15
发芽势 Germination potential	0.778	5	过氧化氢含量 Hydrogen peroxide content	0.714	16
根长 Root length	0.776	6	羟自由基清除能力 Scavenge hydroxyl radicals	0.705	17
超氧阴离子含量 Superoxide anion content	0.775	7	质膜透性 Membrane permeability	0.670	18
发芽率 Germination rate	0.773	8	丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.629	19
存苗率 Seedling survival rate	0.768	9	可溶性糖含量 Soluble sugar content	0.602	20
茎粗 Stem thickness	0.760	10	脯氨酸含量 Proline content	0.581	21
株高 Plant height	0.759	11			

3 讨论与结论

高等植物通过协调同化物的分配、耗费与利用来适应环境的变化,最终目的都是生存^[8],外源物质的应用有利于植物在胁迫环境中继续生长,可以促

进相关适应性^[23]。种子的发芽率和发芽势是衡量种子发芽的标志^[24],可根据幼苗的存活率以及幼苗的长势来判断植物的生长情况,褪黑素处理能提高莠苣种子的发芽率和发芽势^[25],增加小麦的株高、茎粗,促进小麦的生长^[26]。在本研究中,适宜浓度的褪

褪黑素处理提高了辣椒种子的发芽率、发芽势和存苗率,增加了辣椒幼苗的株高、茎粗、根长和干物质含量,促进了辣椒幼苗的生长。植物叶片相对含水量高低能反映植物抗旱性强弱,褪黑素能有效提高干旱胁迫下玉米叶片相对含水量,增强其对干旱的抵御能力^[27]。在本研究中,褪黑素浸种能有效地缓解干旱胁迫下辣椒叶片失水,提高其保水能力。叶绿素含量直接影响植物对光能的利用,干旱会导致叶绿素降解,本研究中 T1、T2 处理的总叶绿素含量分别比 CK 高了 36.07%和 18.31%,说明适宜浓度的褪黑素处理能显著提高叶绿素含量,这与叶君等^[28]的研究结果相似。

在干旱胁迫下,植物细胞会产生多种活性氧(过氧化氢、羟自由基等),这会使植物叶片 MDA 含量增加^[29],质膜透性增强^[30]。本研究结果表明,褪黑素处理能有效提高干旱胁迫下辣椒叶片的羟自由基清除能力和总抗氧化能力,降低超氧阴离子和过氧化氢含量,减少叶片的 MDA 含量,降低质膜透性,提高辣椒幼苗的抗氧化能力,这与张明聪等^[31]和杨新元^[32]的研究结果相同。干旱胁迫下,植物为了保持某些生理活动的正常进行,可以通过积累渗透调节物质(脯氨酸、可溶性糖等)来维持细胞膨压,保持吸水能力^[33]。植物叶片相对含水量越高,表明叶片对水分的保持能力越强,对干旱的抵御能力越强^[34]。在本研究中,不同浓度褪黑素处理与对照相比,辣椒叶片可溶性糖和脯氨酸含量分别降低 63.05%~77.61%和 4.43%~62.14%,这与秦彬等^[35]的研究结果不符,其原因可能是经褪黑素处理辣椒幼苗具有较强的抗旱能力,对胁迫的敏感性较强,能保持叶片相对含水量在较高水平,而未经褪黑素处理的辣椒对干旱的敏感程度较差,叶片水分流失较多,通过积累大量的可溶性糖和脯氨酸含量来适应干旱胁迫。

笔者主要研究了不同浓度的褪黑素浸种对辣椒种子萌发及幼苗抗旱性的影响,适宜浓度褪黑素浸种处理能提高辣椒种子的发芽率、发芽势和存苗率,促进辣椒幼苗的生长;在干旱胁迫下,适宜褪黑素处理能够提高辣椒叶片的相对含水量、可溶性蛋白含量,增强抗氧化能力,减少超氧阴离子和过氧化氢含量,降低丙二醛含量,保护细胞膜透性;通过采用抗旱系数、模糊隶属函数综合评价和灰色关联度分析等方法,评价褪黑素对辣椒抗旱能力提升的作用,以 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理辣椒的抗旱性最强。

参考文献

- [1] 周毅飞.辣椒种质资源及创新与利用研究[D].杭州:浙江大学,2014.
- [2] GOTO K, YABUTA S, SSENIONGA P, et al. Response of leaf water potential, stomatal conductance and chlorophyll content under different levels of soil water, air vapor pressure deficit and solar radiation in chili pepper (*Capsicum chinense*)[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 281: 109943.
- [3] LEI K Q, SUN S Z, ZHONG K T, et al. Seed soaking with melatonin promotes seed germination under chromium stress via enhancing reserve mobilization and antioxidant metabolism in wheat[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 220: 112241.
- [4] CASTANARES J L, BOUZO C A. Effect of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth in melon (*Cucumis melo* L.) under salt stress[J]. Horticultural Plant Journal, 2019, 5(2): 79-87.
- [5] YANG L, SUN Q, WANG Y P, et al. Global transcriptomic network of melatonin regulated root growth in *Arabidopsis*[J]. Gene, 2021, 764: 145082.
- [6] TAN D X, HARDELAND R, MANCHESTER L C, et al. Functional roles of melatonin in plants, and perspectives in nutritional and agricultural science[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(2): 577-597.
- [7] ONIK J C, WAI S C, LIA, et al. Melatonin treatment reduces ethylene production and maintains fruit quality in apple during postharvest storage[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127753.
- [8] 古成彬, 陆玲鸿, 宋根华, 等. 外源褪黑素预处理对干旱胁迫下桃苗生长的缓解效应[J]. 植物生理学报, 2022, 58(2): 309-318.
- [9] 朱恒达, 王策, 李伟, 等. 丛枝菌根真菌和外源褪黑素提高黄瓜抗冷性的生理机制[J]. 植物生理学报, 2022, 58(7): 1254-1262.
- [10] 李荣, 焦志阳, 银珊珊, 等. 喷施褪黑素对黄瓜幼苗耐盐效应研究[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(1): 53-58.
- [11] 张珂, 李依, 厉萌萌, 等. 外源褪黑素对镉胁迫下小麦幼苗生长生理特征及镉含量的影响[J]. 轻工学报, 2022, 37(4): 111-117.
- [12] LI J P, LIU J, ZHU T T, et al. The role of melatonin in salt stress responses[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(7): 1735.
- [13] ZOU J N, JIN X J, ZHANG Y X, et al. Effects of melatonin on photosynthesis and soybean seed growth during grain filling under drought stress[J]. Photosynthetica, 2019, 57(2): 512-520.
- [14] 张明聪, 何松榆, 秦彬, 等. 外源褪黑素缓解干旱胁迫对春大豆苗期影响的生理调控效应[J]. 大豆科学, 2020, 39(5): 742-750.
- [15] 王晶, 伏兵哲, 李淑霞, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下沙芦草幼苗生长和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(11): 2947-2957.
- [16] 董秋雨, 王聪聪, 郑川, 等. 褪黑素引发对达乌里胡枝子种子干旱萌发的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(7): 114-120.
- [17] 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.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [19] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [20] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [21] 陈文荣, 曾玮玮, 李云霞, 等. 高丛蓝莓对干旱胁迫的生理响应及其抗旱性综合评价[J]. 园艺学报, 2012, 39(4): 637-646.
- [22] 李娟, 雷霞, 王小利, 等. 干旱胁迫对高羊茅航天诱变新品系生理特性的影响及综合评价[J]. 草业学报, 2017, 26(10): 87-98.
- [23] 冯红玉, 张璐璐, 陈惠萍. 外源乙酸对水稻幼苗根系干旱胁迫的缓解效应[J]. 植物生理学报, 2020, 56(2): 209-218.
- [24] 李本峰, 杜红梅. 褪黑素浸种对多年生黑麦草种子发芽和幼苗生长的初步研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(4): 30-34.
- [25] 滕英姿, 张鑫, 陈丽, 等. 外源褪黑素对不同叶用莴苣种子萌发的影响[J]. 北京农学院学报, 2021, 36(4): 25-29.
- [26] 孟祥萍. 褪黑素引发种子对冬小麦水分胁迫下生长及生理的影响[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [27] 马旭辉, 陈茹梅, 柳小庆, 等. 褪黑素对玉米幼苗根系发育和抗旱性的影响[J]. 生物技术通报, 2021, 37(2): 1-14.
- [28] 叶君, 邓西平, 王仕稳, 等. 干旱胁迫下褪黑素对小麦幼苗生长、光合和抗氧化特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(9): 1275-1283.
- [29] 李继新, 丁福章, 袁有波. 不同强度干旱胁迫对烤烟叶片质膜透性和丙二醛含量的影响[J]. 贵州农业科学, 2008(4): 34-35.
- [30] 廖芳芳, 付文婷, 王永平, 等. 辣椒抗旱性生理机制研究进展[J]. 蔬菜, 2015(10): 27-31.
- [31] 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.
- [32] 杨新元. 外源褪黑素对干旱胁迫下向日葵幼苗生长、光合及抗氧化系统的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(4): 113-121.
- [33] 吴敏, 张文辉, 周建云, 等. 干旱胁迫对栓皮栎幼苗细根的生长与生理生化指标的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4223-4233.
- [34] 刘建宁, 石永红, 侯志宏, 等. 4 份菊苣种质材料苗期抗旱性评价[J]. 草业学报, 2012, 21(2): 241-248.
- [35] 秦彬, 张明聪, 何松榆, 等. 褪黑素浸种对大豆种子萌发过程中干旱胁迫的缓解效应[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 192-198.