

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.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.06.023

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

魏茜雅, 林欣琪, 梁腊梅, 秦中维, 李映志
(广东海洋大学滨海农学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 为促进盐胁迫下朝天椒种子萌发和幼苗生长, 以未引发处理为对照, 设置不同浓度(0 $\mu\text{mol/L}$ 、1 $\mu\text{mol/L}$ 、5 $\mu\text{mol/L}$ 、25 $\mu\text{mol/L}$ 、50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、125 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$)的褪黑素引发处理, 分析褪黑素引发处理对朝天椒种子在盐胁迫下(100 mmol/L NaCl)的萌发和幼苗生长状况以及生理指标的影响。结果表明: 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素引发处理能最大程度缓解盐胁迫对朝天椒种子萌发的影响, 并促进幼苗生长。与未引发处理种子相比, 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素引发处理后, 种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别增加了 33.84%、120.27%、108.13%和 312.71%; 植株鲜质量、根鲜质量、地上部鲜质量和植株干质量分别增加了 48.61%、102.57%、52.99%和 180.00%。100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素引发处理后, 与未引发处理相比, 种子丙二醛和过氧化氢含量分别降低了 74.26%、67.16%; 可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量分别增加了 51.88%、157.54%和 28.72%; *POD* 和 *CAT* 活性分别提高了 185.57%和 53.23%; *APX* 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值分别提高了 27.57%、1 377.00%、41.19%和 880.37%; 盐胁迫下, 经 100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素引发处理后生长的朝天椒幼苗过氧化氢和超氧阴离子含量分别比未引发处理对照降低了 58.65%和 42.00%; 可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量分别增加了 38.89%、384.61%和 37.46%; *SOD* 和 *POD* 活性分别提高了 240.24%和 398.59%; *APX* 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值分别提高了 106.89%、618.35%、134.26%和 206.78%, 差异显著。这些结果表明, 使用 100 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素对朝天椒种子进行引发处理, 能够抑制氧化物质的生成, 提高抗氧化酶活性, 进而促进种子在盐胁迫下的萌发和幼苗生长。本研究结果可为朝天椒耐盐栽培和育种提供参考。

关键词: 褪黑素; 盐胁迫; 朝天椒; 种子萌发; 幼苗生长

中图分类号: S641.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)06-1637-11

Physiological mechanism of melatonin soaking on improving seed germination and seedling salt tolerance of pepper

WEI Xi-ya, LIN Xin-qi, LIANG La-mei, QIN Zhong-wei, LI Ying-zhi
(College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: In order to promote the seed germination and seedling growth of pepper under salt stress, different concentrations (0 $\mu\text{mol/L}$, 1 $\mu\text{mol/L}$, 5 $\mu\text{mol/L}$, 25 $\mu\text{mol/L}$, 50 $\mu\text{mol/L}$, 75 $\mu\text{mol/L}$, 100 $\mu\text{mol/L}$, 125 $\mu\text{mol/L}$, 150 $\mu\text{mol/L}$, 200 $\mu\text{mol/L}$) of melatonin soaking were set up with non-soaking as control (CK). The effects of melatonin soaking on seed germination and seedling growth of pepper

under salt stress (100 mmol/L NaCl) and physiological indices were analyzed. The results showed that 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin soaking could alleviate the effects of salt stress on seed germination and promote seedling growth. Compared with non-soaked seeds, the germination rate, germination potential, germination index and vigor index of

收稿日期: 2022-08-19

基金项目: 广东海洋大学创新强校项目 (GDOU2013050217、GDOU2-016050256)

作者简介: 魏茜雅(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为热带园艺作物栽培生理。(E-mail) 1534536534@qq.com

通讯作者: 李映志, (E-mail) liyz@gdou.edu.cn

seeds soaked with 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin increased by 33.84%, 120.27%, 108.13% and 312.71%, respectively. Seedling fresh weight, root fresh weight, shoot fresh weight and plant dry weight increased by 48.61%, 102.57%, 52.99% and 180.00%, respectively. After soaking with 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin, the contents of malondialdehyde and hydrogen peroxide in seeds decreased by 74.26% and 67.16%, respectively, compared with those without soaking. The contents of soluble sugar, soluble protein and proline increased by 51.88%, 157.54% and 28.72%, respectively. The activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) increased by 185.57% and 53.23%, respectively. Ascorbate peroxidase (APX) activity, ascorbic acid (AsA) content, dehydroascorbic acid (DHA) content, AsA/DHA value increased by 27.57%, 1377.00%, 41.19% and 880.37%, respectively. Under salt stress, the contents of hydrogen peroxide and superoxide anion in seedlings treated with 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin decreased by 58.65% and 42.00%, respectively, compared with the CK. The contents of soluble sugar, soluble protein and proline increased by 38.89%, 384.61% and 37.46%, respectively. The activities of superoxide dismutase (SOD) and POD increased by 240.24% and 398.59%, respectively. The APX activity, AsA content, DHA content and AsA/DHA value increased by 106.89%, 618.35%, 134.26% and 206.78%, respectively, and the differences were significant compared to the CK. These results indicated that soaking treatment with 100 $\mu\text{mol/L}$ melatonin could inhibit the production of oxidative substances and increase the activity of antioxidant enzymes, thus promoting the seed germination and seedling growth of pepper under salt stress. The results of this study can provide reference for salt-tolerant cultivation and breeding of pepper.

Key words: melatonin; salt stress; pepper; seed germination; seedling growth

辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 起源于南美洲, 是一年生或有限多年生蔬菜作物, 属浅根系植物, 根系吸水能力较弱^[1]。中国各地均有种植。近年来中国辣椒种植面积稳定在 2.10×10^6 hm^2 以上, 农业产值高达 2.5×10^{11} 元, 已成为中国种植面积最大、消费量最大、加工方式最多的蔬菜^[2]。但近年来, 在对山东、辽宁、江苏、四川的实地调查中发现, 温室大棚栽培条件下, 土壤表面均有大面积白色盐霜出现, 有的甚至出现块状紫红色胶状物, 土壤盐化板结, 作物长势差, 甚至绝产, 其中以山东、江苏两省设施栽培的土壤盐渍化程度最为严重^[3]。因此, 生产上对耐盐辣椒品种或耐盐栽培措施的需求十分迫切。

近年来, 种子引发技术在很多农作物和园艺作物中得到广泛研究和应用, 该技术不仅可以提高种子的萌发速度, 还能提高幼苗对干旱、重金属离子和盐胁迫等的抗逆性^[4]。在辣椒种子引发处理上, 吴凌云等^[5]通过蛭石和硝酸钾 (KNO_3) 对辣椒种子进行引发, 发现蛭石和 KNO_3 引发都可以提高辣椒种子的萌发和幼苗生长; 白占兵等^[6]发现, 适量的赤霉素 (GA_3) 可以促进辣椒种子萌发和幼苗生长; Ahmed 等发现水杨酸能有效缓解盐胁迫对甜椒生理和形态特征的抑制作用^[7]。

褪黑素 (Melatonin, MT) 为色氨酸吲哚类衍生物, 具有很强的抗氧化作用, 能促进植物侧根的生长并延缓叶片衰老^[8-9]。褪黑素也被用于农作物的种子引发处理, 如减轻干旱胁迫对生菜幼苗生长的影

响^[10]; 促进老化燕麦种子的萌发^[11]; 提高紫花苜蓿的耐盐能力^[12]; 降低盐分胁迫对棉花种子的影响^[13]等。然而, 使用褪黑素对辣椒种子进行引发处理的研究还鲜见报道。

本试验利用不同浓度的褪黑素对朝天椒种子进行引发处理, 分析其对盐胁迫下朝天椒种子萌发和幼苗生长的影响及引发后种子和幼苗生理指标变化, 探究褪黑素引发处理的作用机制。

1 材料与方法

1.1 供试材料及试验设计

供试朝天椒品种为茂蔬 360。

将均匀饱满的朝天椒种子分别浸在浓度为 0 $\mu\text{mol/L}$ (T0)、1 $\mu\text{mol/L}$ (T1)、5 $\mu\text{mol/L}$ (T5)、25 $\mu\text{mol/L}$ (T25)、50 $\mu\text{mol/L}$ (T50)、75 $\mu\text{mol/L}$ (T75)、100 $\mu\text{mol/L}$ (T100)、125 $\mu\text{mol/L}$ (T125)、150 $\mu\text{mol/L}$ (T150) 和 200 $\mu\text{mol/L}$ (T200) 的 10 ml 褪黑素溶液中, 在室温、黑暗条件下引发 12 h, 随后滤出种子, 用蒸馏水冲洗干净, 于 25 $^{\circ}\text{C}$ 的暗室中自然风干至原始含水量。以未引发处理的种子为对照 (CK), 取上述不同浓度褪黑素引发处理和 CK 的朝天椒种子各 1~2 g, 分 3 次重复, 进行种子生理指标的测定。

将三层滤纸无褶皱的铺垫在玻璃培养皿中, 并用 100 mmol/L 盐液 (NaCl 溶液) 完全浸湿滤纸。取

经不同浓度褪黑素引发处理后的朝天椒种子和未引发处理的朝天椒种子,间距均匀摆放在培养皿中,每皿放置 60 粒种子,每处理 3 次重复。于温度为 25 ℃ 的恒温培养箱中培养,每天补充处理液,保证滤纸湿润。以胚根长到与种子等长及以上,且胚芽长到种子长度一半以上为发芽标准^[14]。每天记录发芽种子数,第 12 d 结束萌发试验。萌发结束后每个处理取中等长势的幼苗 3 株,测量胚根、胚芽长度。

用蒸馏水将盐液(100 mmol/L)胁迫下发芽的种子冲洗干净,挑选每个处理中萌发的种子播至含 NaCl(100 mmol/L)的基质中,置于人工气候箱内生长。人工气候箱设置温度为 25 ℃,光照周期为 12 h 光照/12 h 黑暗,光照度为 7 600 lx,相对湿度为 60%。每 2 d 浇灌一次盐液(100 mmol/L NaCl),处理 7 d 后,将朝天椒幼苗的根系用去离子水清洗干净后吸干表面水分,取各处理中等长势的幼苗 5 株,重复 3 次,称得地上部鲜质量、根鲜质量及植株鲜质量(地上部鲜质量+根鲜质量),测量株高、根长和植株全长(株高+根长)^[15]。进一步将上述鲜样置于 105 ℃ 烘箱中杀青 15 min,再在 80 ℃ 下干燥至恒质量后,测定植株干质量(地上部干质量+根干质量)^[16]。各处理称取鲜质量 1~2 g 幼苗叶片,重复 3 次,进行生理指标测定。

1.2 指标测定及萌发能力综合评价方法

1.2.1 种子萌发相关指标的算法 根据《国际种子检验规程》及相关文献计算下列指标^[17-21]:

发芽势(GP)=种子发芽达日高峰时的累计发芽数/供试种子数 $\times 100\%$

发芽率(GR)=发芽结束后发芽种子数量/供试种子数 $\times 100\%$;

$$\text{发芽指数}(GI)=\sum_{i=1}^{12} \frac{G_i}{i}$$

式中, i 为发芽天数, G_i 为第 i 天的发芽数。

活力指数= $GI \times S$

式中, GI 表示发芽指数; S 为第 12 d 朝天椒幼苗根的长度。

1.2.2 种子萌发能力综合评价 用下式计算某一指标的隶属函数值:

$$Y=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$$

式中, Y 表示该指标的隶属函数值, X 表示该指标的测定值, X_{\max} 和 X_{\min} 分别表示不同处理下该指标的最大值和最小值^[15]。

进一步计算各指标的隶属函数值均值得到不同处理下种子萌发能力综合评价指标。

1.2.3 生理指标的测定方法 可溶性糖(SS)含量的测定采用蒽酮比色法^[22];丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸比色法^[22];抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性采用 Nakano 法测定^[23];可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝 G-520 法测定^[22];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[24];脯氨酸(Pro)含量采用茚三酮法测定^[25];过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法测定^[26];过氧化氢(H_2O_2)含量采用硫酸钛比色法测定^[27];超氧化物歧化酶(SOD)活性使用黄嘌呤氧化酶-NBT 法测定^[28];超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)含量采用羟胺氧化法测定^[29];抗坏血酸(AsA)含量和脱氢抗坏血酸(DHA)含量测定采用分光光度法^[30]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 软件和 SPSS 24.0 软件进行统计分析和绘图。使用 Duncan's 新复极差法进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒种子萌发的影响

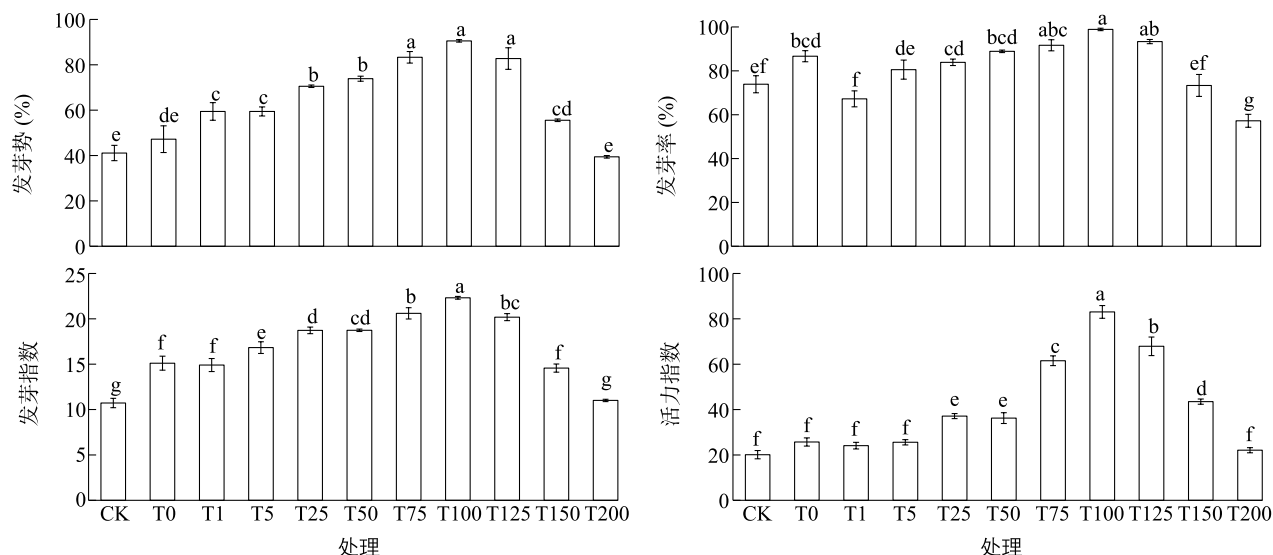
在 100 mmol/L 盐胁迫下,不同浓度褪黑素引发处理后的朝天椒种子的萌发情况如图 1 所示。由图 1 可知,褪黑素溶液浓度低于 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,随褪黑素引发浓度的增加,朝天椒种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数总体都呈增加趋势;但随着褪黑素浓度的进一步增加,各发芽指标都呈现减少趋势。与未引发处理的种子相比,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素溶液引发处理的朝天椒种子发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数分别增加了 33.84%、120.27%、108.13%和 312.71%,差异显著。这表明盐胁迫下,适宜浓度的褪黑素引发处理能显著增强朝天椒种子的萌发能力,本试验条件下最适的褪黑素引发浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 。

2.2 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒幼苗植株全长、根长、鲜质量和干质量的影响

100 mmol/L 盐胁迫下,不同浓度褪黑素引发处理后的朝天椒幼苗的植株全长、根长、株高和根长/株高比值情况如图 2 所示。由图 2 可知,褪黑素溶液浓度低于 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,随褪黑素引发浓度的增

加,朝天椒幼苗的植株全长、根长和株高总体都呈增加趋势;但随着褪黑素浓度的进一步增加,各指标都呈现减少趋势。与未引发处理相比,100 $\mu\text{mol/L}$ 褪黑素溶液引发处理的朝天椒幼苗植株全长、根长和

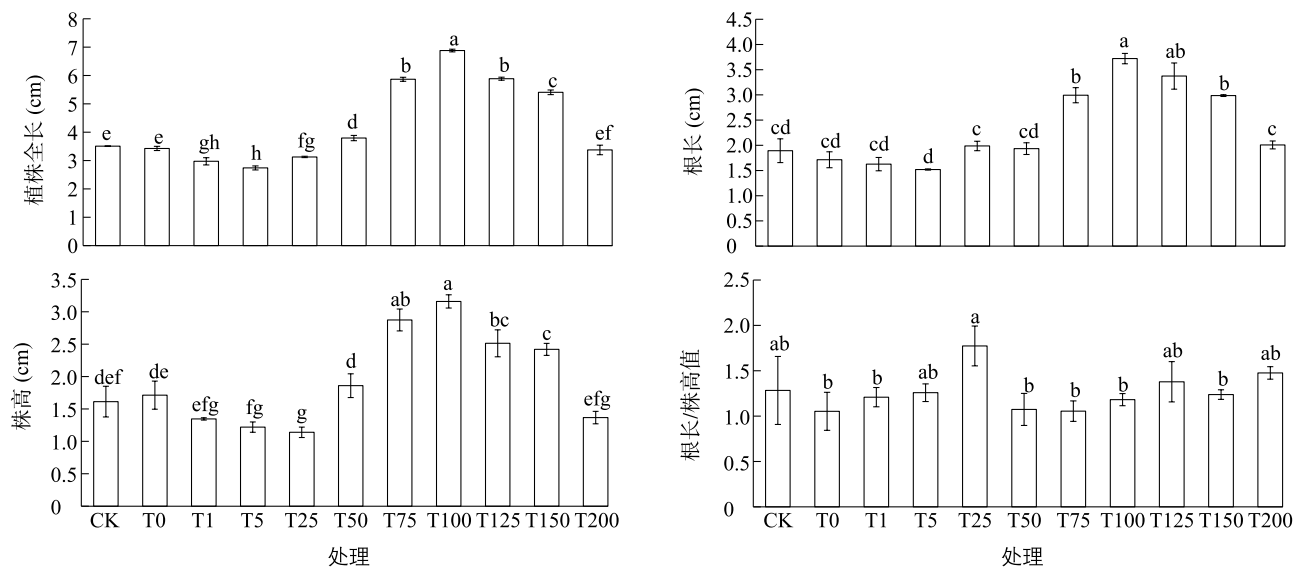
株高分别增加了 96.20%、96.48% 和 95.87%,差异显著;但根长/株高值在褪黑素浓度 25 $\mu\text{mol/L}$ 时为最大值,比未引发处理对照增加了 38.21%,但差异不显著。



柱形图上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 表示褪黑素引发处理浓度分别为 0 $\mu\text{mol/L}$ 、1 $\mu\text{mol/L}$ 、5 $\mu\text{mol/L}$ 、25 $\mu\text{mol/L}$ 、50 $\mu\text{mol/L}$ 、75 $\mu\text{mol/L}$ 、100 $\mu\text{mol/L}$ 、125 $\mu\text{mol/L}$ 、150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$ 的处理,CK 为未引发处理对照。

图 1 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒种子发芽势、发芽率、发芽指数和活力指数的影响

Fig.1 Effects of different melatonin-soaked concentrations on germination potential, germination percentage, germination index and vitality index of pepper under salt stress



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 2 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒幼苗植株全长、根长、株高和根长/株高比值的影响

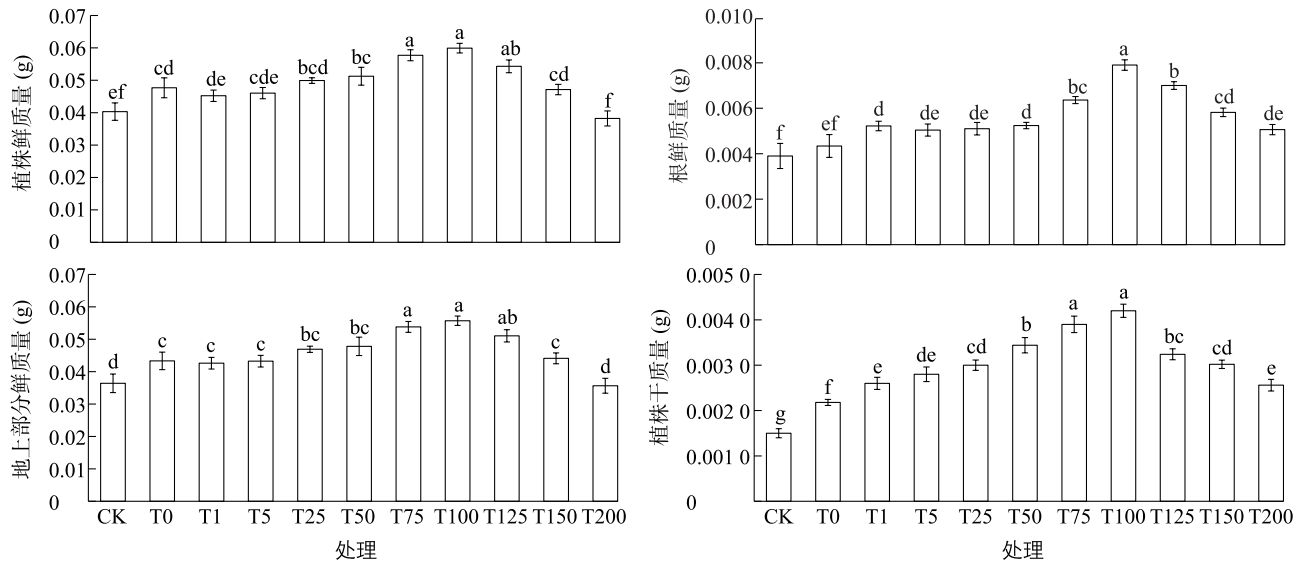
Fig.2 Effects of different melatonin-soaked concentrations on plant height (PH), root length (RL), PH+RL and RL/(PH+RL) of pepper seedlings under salt stress

100 mmol/L 盐胁迫下,不同浓度褪黑素引发处

理对朝天椒植株鲜质量、根鲜质量、地上鲜质量和植

株干质量的影响如图3所示。由图3可知,随着褪黑素引发液浓度的增加,植株鲜质量、根鲜质量、地上鲜质量和植株干质量呈抛物线变化趋势。褪黑素浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,植株鲜质量、根鲜质量、地上

鲜质量和植株干质量达到最大值,分别比未引发处理对照增加了 48.61%、102.57%、52.99% 和 180.00%,差异显著。



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图1注。

图3 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒植株鲜质量、根鲜质量、地上部分鲜质量和植株干质量的影响

Fig.3 Effects of different melatonin-soaked concentrations on plant fresh weight, root fresh weight, shoot fresh weight and plant dry weight of pepper under salt stress

2.3 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒种子萌发及幼苗生长效果的综合评价

采用隶属函数计算综合指标可以清晰判断不同浓度的褪黑素引发处理对朝天椒种子萌发及幼苗抗盐性的作用大小^[31]。由表1可知,在盐胁迫下,隶

属函数综合分析结果显示 $T100 > T125 > T75 > T50 > T150 > T25 > T5 > T0 > T1 > T200 > CK$ 。T100 处理的综合得分值最高,即褪黑素浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时引发的效果最好。

表1 盐胁迫下不同浓度褪黑素引发处理后朝天椒各测定指标的隶属函数值

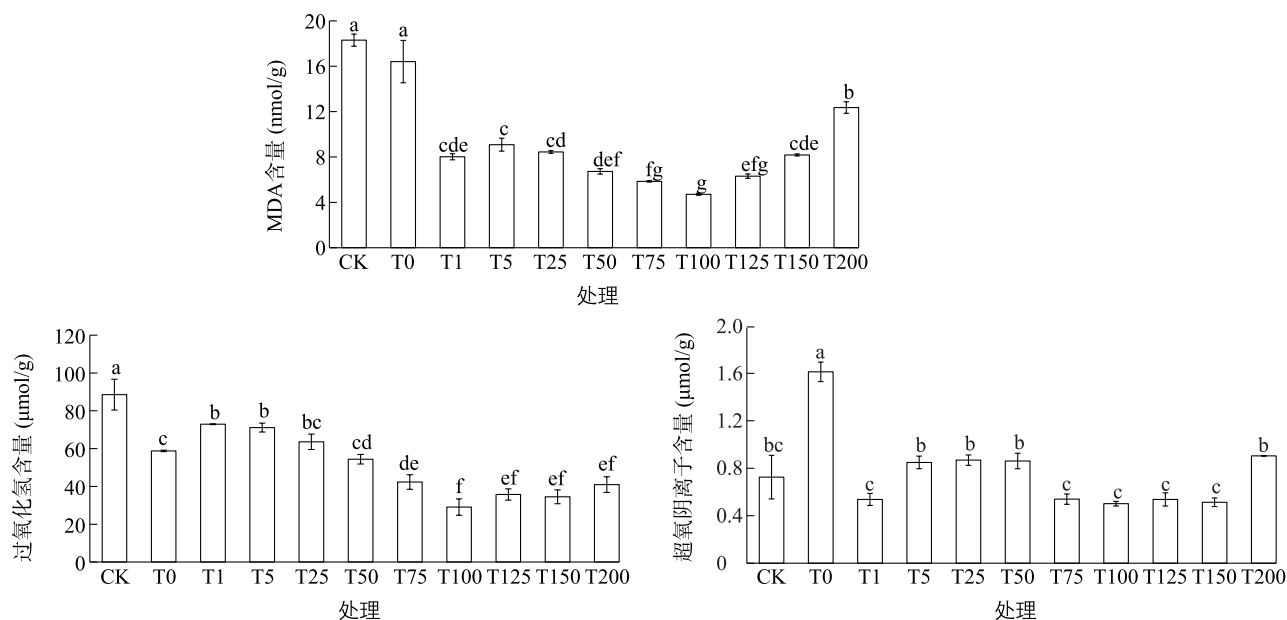
Table 1 Subordinate function values of determination indices of pepper treated with different melatonin-soaked concentrations under salt stress

处理	发芽率	发芽势	发芽指数	活力指数	植株全长	根长	植株鲜质量	根鲜质量	植株干质量	平均隶属值	排序
CK	0.400	0.033	0.000	0.000	0.185	0.170	0.097	0.000	0.000	0.098	11
T0	0.707	0.152	0.378	0.089	0.166	0.088	0.436	0.110	0.252	0.264	8
T1	0.240	0.391	0.361	0.064	0.056	0.048	0.323	0.330	0.407	0.247	9
T5	0.560	0.391	0.526	0.087	0.000	0.000	0.360	0.285	0.481	0.299	7
T25	0.640	0.609	0.690	0.270	0.093	0.212	0.539	0.300	0.556	0.434	6
T50	0.760	0.674	0.691	0.256	0.254	0.188	0.601	0.335	0.719	0.498	4
T75	0.827	0.859	0.852	0.658	0.755	0.670	0.899	0.615	0.889	0.780	3
T100	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1
T125	0.867	0.848	0.816	0.759	0.760	0.842	0.741	0.775	0.644	0.784	2
T150	0.387	0.315	0.332	0.372	0.644	0.667	0.411	0.480	0.563	0.463	5
T200	0.000	0.000	0.024	0.032	0.153	0.221	0.000	0.290	0.393	0.124	10

T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图1注。

2.4 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子生理的影响

2.4.1 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子丙二醛和 ROS 含量的影响 如图 4 所示,不同浓度褪黑素引发处理后的朝天椒种子的丙二醛和过氧化氢含量随着褪黑素浓度的增加呈现先降低后上升的趋势



柱形图上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 4 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子 MDA、过氧化氢和超氧阴离子含量的影响

Fig.4 Effects of different melatonin-soaked concentrations on the contents of malondialdehyde (MDA), hydrogen peroxide and superoxide anion in pepper seeds

2.4.2 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)和脯氨酸(Pro)含量的影响 如图 5 所示,当褪黑素浓度低于 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,随着褪黑素浓度的增加,朝天椒种子的 SS、SP 和 Pro 含量总体上呈增加趋势。浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,朝天椒种子的 SS、SP 和 Pro 含量达到最大值,分别比未引发处理对照增加 51.88%、157.54%和 28.72%,差异显著。但随着褪黑素浓度的进一步增加,朝天椒种子的 SS、SP 和 Pro 含量呈现下降趋势。

2.4.3 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子 POD 和 CAT 活性的影响 如图 6 所示,不同浓度褪黑素引发处理后,随着引发液浓度的增加,朝天椒种子的 POD 和 CAT 活性呈抛物线变化趋势。褪黑素浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,引发处理后种子的 POD 和 CAT 活性为最大值,分别比未引发处理对照增加了 185.57%和 53.23%,差异显著。

2.4.4 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子

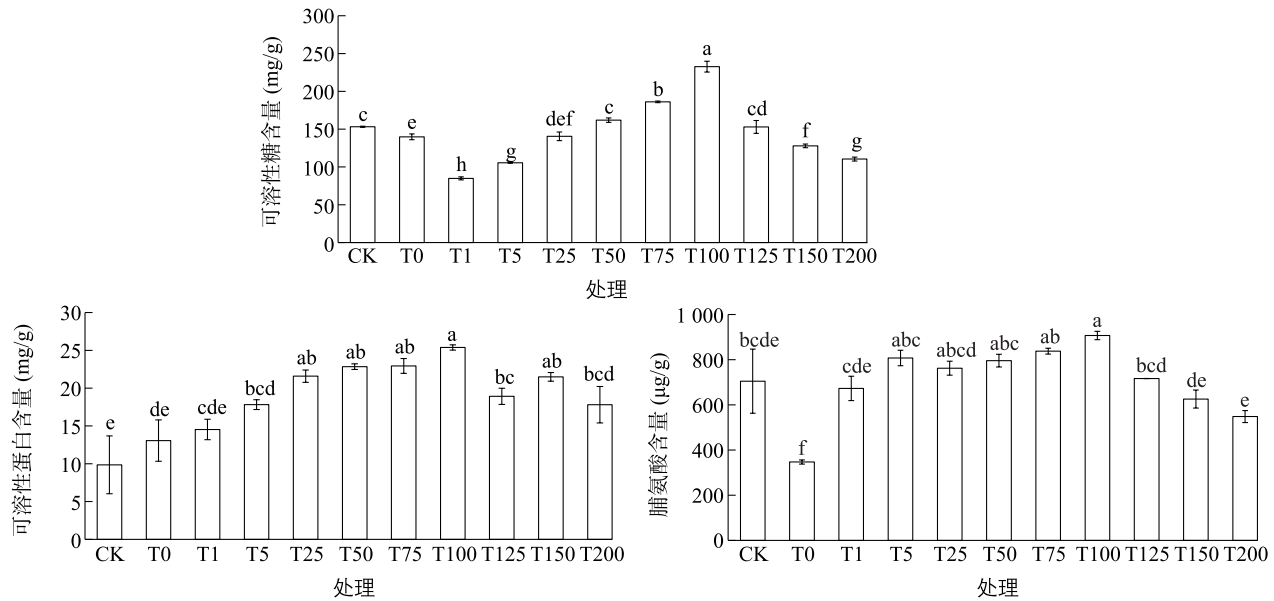
势,褪黑素浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,引发后种子的丙二醛和过氧化氢含量达最小值,分别比未引发处理对照降低了 74.26%、67.16%,差异显著;引发处理后的朝天椒种子的超氧阴离子含量与未引发处理对照相比无显著性差异。

APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值的影响

如图 7 所示,不同浓度褪黑素引发处理后的朝天椒种子的 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值随着褪黑素浓度的增加总体上呈抛物线变化趋势,浓度为 100 $\mu\text{mol/L}$ 时,引发处理后种子的 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值达最大值,分别比未引发处理种子增加了 27.57%、1 377.00%、41.19%和 880.37%,差异显著。

2.5 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗生理的影响

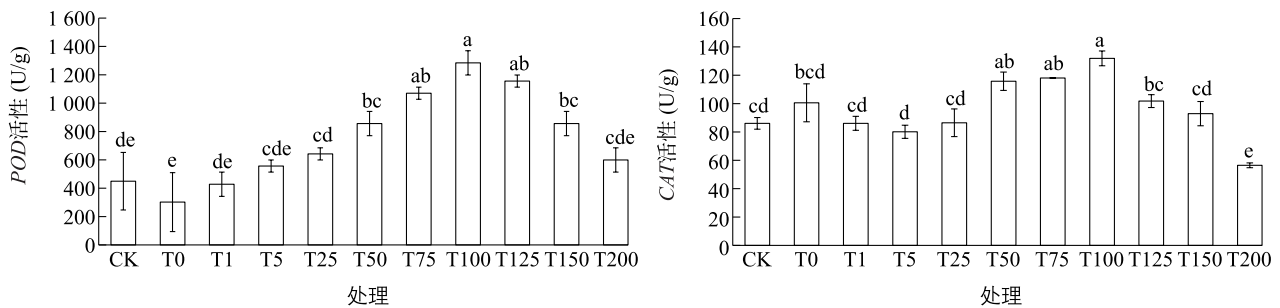
2.5.1 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗丙二醛和 ROS 含量的影响 如图 8 所示,在 100 mmol/L 盐胁迫下,经不同浓度褪黑素引发处理后幼苗丙二醛含量在 75 $\mu\text{mol/L}$ 时含量达最小值,比未引发处理对照降低了 37.54%,差异显著;过氧化氢和超氧阴离子含量在 100 $\mu\text{mol/L}$ 时含量达最小值,分别比未引发处理对照降低了 58.65%和 42.00%,差异显著。



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 5 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

Fig.5 Effects of different melatonin-soaked concentrations on soluble sugar, soluble protein and proline contents of pepper seeds



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 6 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子 POD 和 CAT 活性的影响

Fig.6 Effects of different melatonin-soaked concentrations on peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities of pepper seeds

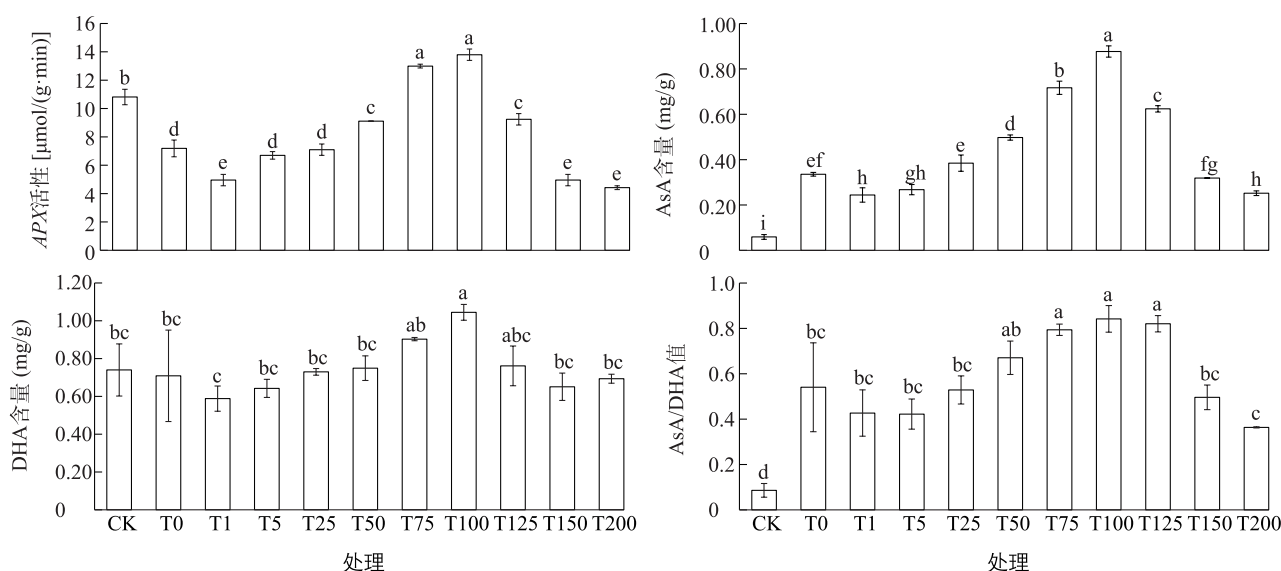
2.5.2 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响 如图 9 所示,在 100 mmol/L 盐胁迫下,经不同浓度褪黑素引发处理后幼苗的可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量随着褪黑素溶液浓度的增大呈先增大后下降的趋势,并在 100 μ mol/L 时达到最大值,分别比未引发处理对照增加了 38.89%、384.61% 和 37.46%,差异显著。

2.5.3 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性的影响 如图 10 所示,在 100 mmol/L 盐胁迫下,随着褪黑素溶液浓度的增大,经不同浓度褪黑素引发处理后的幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性呈先增大后下降的趋势,SOD 和 POD 活性在 100 μ mol/L 达最大值,分别比未引发处理对照增

加了 240.24% 和 398.59%,差异显著;CAT 活性在 75 μ mol/L 达最大值,比未引发处理对照增加了 275.60%,差异显著。

2.5.4 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值的影响

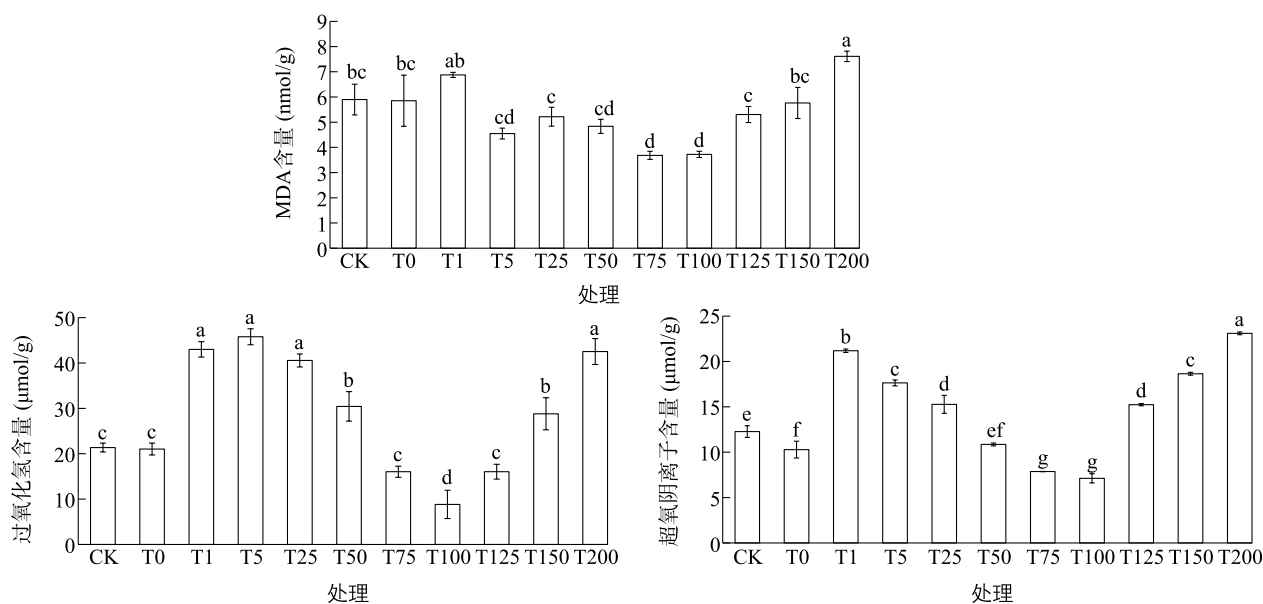
如图 11 所示,在 100 mmol/L 盐胁迫下,褪黑素溶液浓度低于 100 μ mol/L 时,随褪黑素引发处理浓度的增加,朝天椒幼苗的 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值都呈增加趋势;但随着褪黑素浓度的进一步增加,各指标都呈现减少趋势。与未引发处理对照相比,100 μ mol/L 褪黑素溶液引发处理的朝天椒幼苗的 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值分别增加了 106.89%、618.35%、134.26% 和 206.78%,差异显著。



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 7 不同浓度褪黑素引发处理对朝天椒种子 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值的影响

Fig.7 Effects of different melatonin-soaked concentrations on ascorbate peroxidase (APX) activity, ascorbic acid (AsA) content, dehydroascorbic acid (DHA) content and AsA/DHA value of pepper seeds



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 8 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗 MDA、过氧化氢和超氧阴离子含量的影响

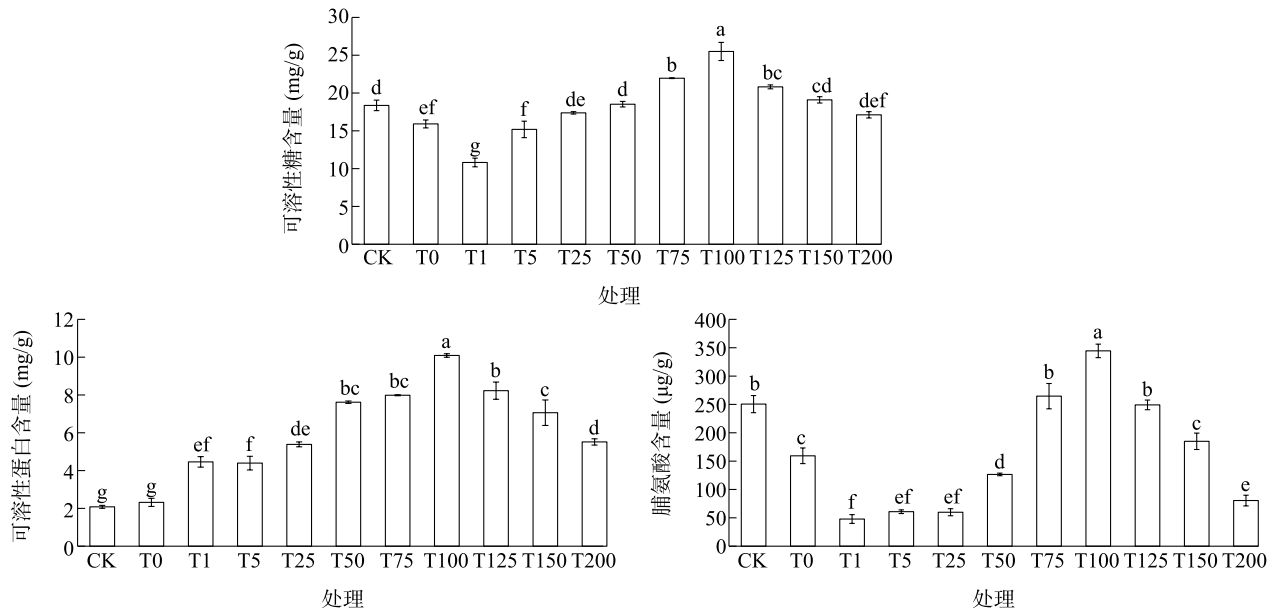
Fig.8 Effects of different melatonin-soaked concentrations on MDA, hydrogen peroxide and superoxide anion contents of pepper seedlings under salt stress

3 讨论

3.1 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒种子萌发的影响

种子萌发不仅代表着植物生命的开始,更是植物生活史耐盐性最差的阶段,其发芽率与植物耐盐

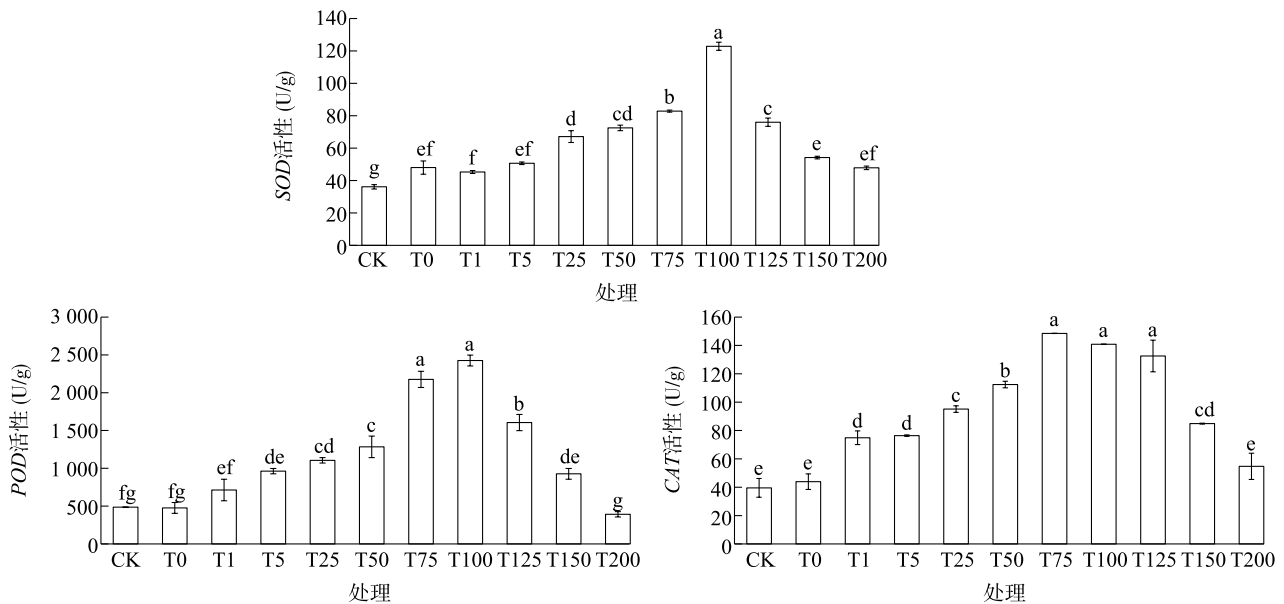
碱能力密切相关。本研究结果表明,100 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素种子引发处理可最大程度促进盐胁迫下朝天椒种子的萌发和幼苗生长;较高浓度 (150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$) 的褪黑素引发处理则会对种子在盐胁迫下的萌发产生不利影响,这与刘佳奇等^[32]发现 NaCl 胁迫下,褪黑素种子引发处理能够明显促进小



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 9 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

Fig.9 Effects of different melatonin-soaked concentrations on soluble sugar, soluble protein and proline contents of pepper seedlings under salt stress



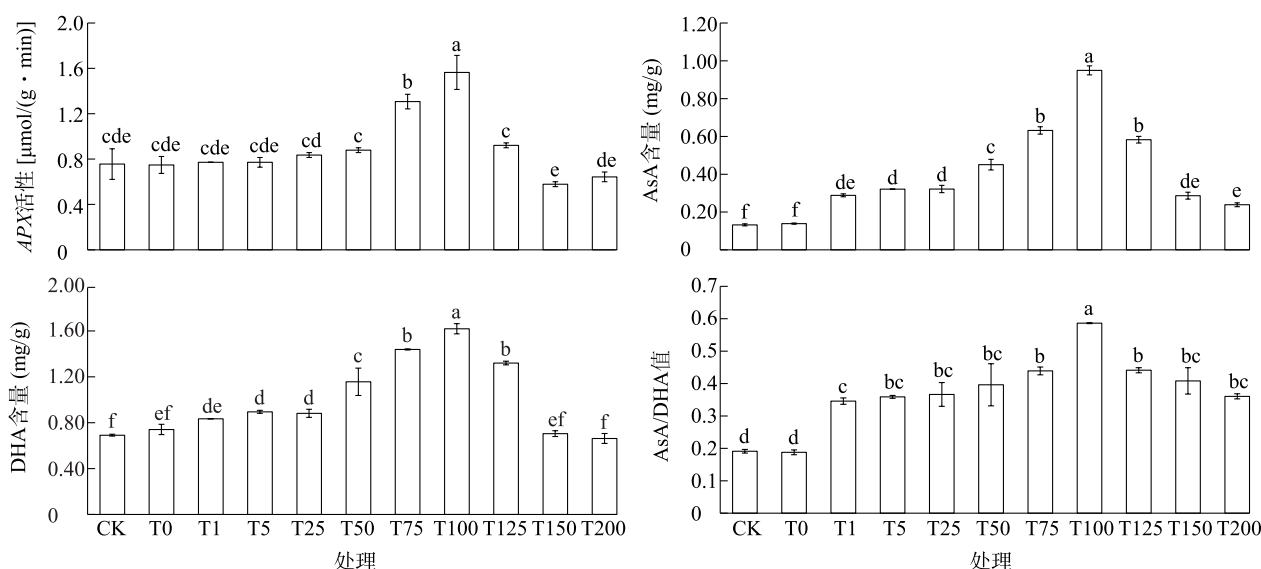
柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 10 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗 SOD、POD 和 CAT 活性的影响

Fig.10 Effects of different melatonin-soaked concentrations on superoxide dismutase (SOD), POD and CAT activities of pepper seedlings under salt stress

麦种子萌发的结果一致。100 $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素种子引发处理促进盐胁迫下的朝天椒种子萌发的原因可能是褪黑素引发处理促进了种子内抗氧化酶 (POD、CAT、APX) 活性、SS、SP、Pro 和抗坏血酸含量的升高,并降低了种子内丙二醛和过氧化氢的含量,从而

促进了种子的活力,并为种子萌发提供了能量^[33]。高浓度 (150 $\mu\text{mol/L}$ 、200 $\mu\text{mol/L}$) 褪黑素引发处理后,反而增加了种子丙二醛和 ROS 含量并降低了抗氧化酶活性,表明其导致了种子细胞膜系统的损伤,降低了种子的氧自由基清除能力。



柱形图上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。T0、T1、T5、T25、T50、T75、T100、T125、T150、T200 及 CK 见图 1 注。

图 11 褪黑素种子引发处理对朝天椒盐胁迫下幼苗 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值的影响

Fig.11 Effects of different melatonin-soaked concentrations on APX activity, AsA content, DHA content and AsA/DHA value of pepper seedlings under salt stress

3.2 不同浓度褪黑素引发处理对盐胁迫下朝天椒幼苗生长的影响

当植物受到盐胁迫时,植物细胞失水,细胞壁破裂,甚至死亡^[13]。本研究结果表明,100 μmol/L褪黑素引发处理后,盐胁迫下幼苗的植株全长、根长、鲜质量和干质量显著增加,说明 100 μmol/L褪黑素引发处理能够促进幼苗生物量的积累以及植株发育;25 μmol/L褪黑素引发处理后,盐胁迫下幼苗的根长/株高值显著增加,说明 25 μmol/L褪黑素引发处理能够促进幼苗根系的发育。与陈莉等^[13]发现低浓度褪黑素引发处理棉花种子可以显著提高幼苗生物量及胚根长;与蒋航等^[34]研究发现褪黑素可以抵抗砷的毒害提高水稻根长和芽长的结果一致。

当植物受到胁迫时,植物体内氧化代谢失调,导致各种膜结构受到过量 ROS 的破坏,形成氧化胁迫^[35-37]。本研究结果表明,100 μmol/L褪黑素引发处理后,盐胁迫下幼苗的丙二醛和 ROS 含量显著降低,渗透调节物质含量和抗氧化酶(SOD 和 POD)的活性显著增加;75~125 μmol/L褪黑素引发处理后 CAT 显著增加,说明 75~125 μmol/L褪黑素引发处理能缓解盐胁迫造成的细胞过氧化伤害,从而提高幼苗的耐盐性。这与郭惊涛等^[38]用褪黑素引发处理萝卜种子来提高幼苗渗透调节物质和抗氧化酶活性去促进幼苗生长和银珊珊等^[39]使用褪黑素引发

处理黄瓜种子提高幼苗渗透调节物质并降低丙二醛和 ROS 含量来抵抗干旱胁迫的研究结果一致。AsA 可以在 APX 作用下与 H_2O_2 反应生成 H_2O ,清除 H_2O_2 的毒性^[40]。本研究结果表明,100 μmol/L褪黑素引发处理后,盐胁迫下幼苗的 APX 活性及 AsA、DHA 含量和 AsA/DHA 值都显著增加,说明 100 μmol/L褪黑素引发处理能提高朝天椒幼苗中 AsA 的产生速率,提高 AsA/DHA 值,增强朝天椒幼苗抗盐胁迫的能力。这与李富宏^[41]发现喷施褪黑素能通过提高抗坏血酸过氧化物酶活性和抗坏血酸等含量提高幼苗耐盐性研究结果一致。

参考文献:

- [1] GOU J Y, SUO S Z, SHAO K Z, et al. Biofertilizers with beneficial rhizobacteria improved plant growth and yield in chili (*Capsicum annuum* L.) [J]. World J Microbiol Biotechnol, 2020, 36 (6): 86.
- [2] 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.
- [3] 余海英,李廷轩,周健民. 设施土壤盐分的累积、迁移及离子组成变化特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 642-650.
- [4] 石晓琪,米素娟,钟天航,等. 种子引发提高草类植物抗旱性的表现及机理[J]. 草地学报, 2022, 30(10): 2692-2700.
- [5] 吴凌云,李明,姚东伟. 种子引发对辣椒和茄子种子在不同温度下萌发和出苗的影响[J]. 上海农业学报, 2017, 33(3): 37-40.

- [6] 白占兵,李雪峰,倪向江,等.种子引发剂对辣椒种子发芽的影响[J].湖南农业科学,2009(1):6-7.
- [7] AHMED W, IMRAN M, YASEEN M, et al. Role of salicylic acid in regulating ethylene and physiological characteristics for alleviating salinity stress on germination, growth and yield of sweet pepper [J]. PeerJ, 2020, 8: e8475.
- [8] 仝亚军,高玉录,刘孟龙,等.喷布外源褪黑素对缓解葡萄叶片晚霜冻害的作用[J].落叶果树,2019,51(2):8-11.
- [9] 董秋丽,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.
- [10] 张盼盼,高研,王小林,等.PEG胁迫下褪黑素对生菜幼苗形态和生理特性的影响[J].北方园艺,2022(10):1-8.
- [11] YAN H, MAO P. Comparative time-course physiological responses and proteomic analysis of melatonin priming on promoting germination in aged oat (*Avena sativa* L.) seeds [J]. Int J Mol Sci, 2021, 22(2):811.
- [12] 黎力乙,高原千惠,邢麟木,等.褪黑素浸种对盐胁迫下紫花苜蓿种子萌发的影响[J].分子植物育种,2022(11):1-16.
- [13] 陈莉,刘连涛,马彤彤,等.褪黑素对盐胁迫下棉花种子抗氧化酶活性及萌发的影响[J].棉花学报,2019,31(5):438-447.
- [14] 王朔楠,孙静,郭嘉莹,等.种子发芽指标及其测算方法[J].麦类作物学报,2022(11):1-7.
- [15] 刘金海,蒋金娟,罗富成,等.外源二聚丙三醇对非洲狗尾草种子萌发及幼苗生长的影响[J].草地学报,2022,30(4):950-956.
- [16] 范海霞,赵飒,李静,等.外源褪黑素对盐胁迫下金盏菊幼苗生长、光合及生理特性的影响[J].热带作物学报,2021,42(5):1326-1334.
- [17] 黄亚军.《1985国际种子检验规程》的修订[J].种子世界,1992(10):35-37.
- [18] 李鹤,郭世荣,束胜,等.48份黄瓜(*Cucumis sativus* L.)嫁接砧木种质资源耐寒性综合评价[J].沈阳农业大学学报,2013,44(5):609-615.
- [19] 谢浩然,杨月娟,朱刚,等.温度及赤霉素预处理对枫香种子萌发的影响[J].现代园艺,2021,44(18):10-13.
- [20] 王辉,马向丽,另如贵,等.舟叶囊吾浸提液对三种牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J].草地学报,2022,30(1):93-99.
- [21] 徐劫,胡博华,戈涛,等.镉胁迫对生菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].湖北农业科学,2014,53(20):4892-4896.
- [22] 刘家尧,刘新.植物生理学实验教程[M].北京:高等教育出版社,2010.
- [23] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts [J]. Plant and Cell Physiology, 1980, 22(5):867-880.
- [24] MOENGA S M, GAI Y, CARRASQUILLA-GARCIA N, et al. Gene co-expression analysis reveals transcriptome divergence between wild and cultivated chickpea under drought stress [J]. The Plant Journal, 2020, 104(5):1195-1214.
- [25] QIAO K, LIANG S, WANG F, et al. Effects of cadmium toxicity on diploid wheat (*Triticum urartu*) and the molecular mechanism of the cadmium response [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 374:1-10.
- [26] WANG H, LI Z, REN H, et al. Regulatory interaction of Bc-WRKY33A and BcHSFA4A promotes salt tolerance in non-heading Chinese cabbage [*Brassica campestris* (syn. *Brassica rapa*) ssp. *chinensis*] [J]. Hort Res, 2022, 9:uhac113.
- [27] SUN Y, CHEN H, HUANG Y, et al. One-pot synthesis of AuPd@FeO_y nanoagent with the activable Fe species for enhanced Chemodynamic-photothermal synergetic therapy [J]. Biomaterials, 2021, 274:120821.
- [28] HUANG Z W, SHI Y, ZHAI Y Y, et al. Hyaluronic acid coated bilirubin nanoparticles attenuate ischemia reperfusion-induced acute kidney injury [J]. J Control Release, 2021, 334:275-289.
- [29] 王爱国,罗广华.植物的超氧化物自由基与羟胺反应的定量关系[J].植物生理学通讯,1990(6):55-57.
- [30] 王俊力,王岩,赵天宏,等.臭氧胁迫对大豆叶片抗坏血酸-谷胱甘肽循环的影响[J].生态学报,2011,31(8):2068-2075.
- [31] 肖珍珍,隋晓青,石国庆,等.外源褪黑素不同浸种浓度和时长对干旱胁迫下无芒雀麦种子萌发的影响[J].草地学报,2022,30(3):655-660.
- [32] 刘佳奇,李丽,杨红红,等.盐胁迫下褪黑素对小麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].麦类作物学报,2022,42(7):857-863.
- [33] 雷新慧,万晨茜,陶金才,等.褪黑素与2,4-表油菜素内酯浸种对盐胁迫下荞麦发芽与幼苗生长的促进效应[J].作物学报,2022,48(5):1210-1221.
- [34] 蒋航,黄益宗,杨秀文,等.外源褪黑素对As³⁺胁迫下水稻种子萌发的影响[J].生态毒理学报,2018,13(1):229-240.
- [35] 马宁,陈碧,杨华,等.黄瓜幼苗光合荧光特性及根系抗氧化系统对外源肉桂酸的响应[J].江苏农业科学,2020,48(12):113-119.
- [36] 苏振华,张泽鑫,李妹芳,等.甜椒内质网小分子热激蛋白基因(*CaHSP22.5*)克隆及其在转基因烟草中的表达分析[J].南方农业学报,2020,51(5):1080-1090.
- [37] 李春牛,李先民,黄展文,等.⁶⁰Co-γ射线辐照对茉莉花种子萌发和幼苗生长及生理的影响[J].热带作物学报,2022,43(1):119-127.
- [38] 郭惊涛,张万萍.褪黑素对萝卜种子萌发与幼苗生长的影响[J].贵州农业科学,2022,50(7):106-112.
- [39] 银珊珊,周国彦,顾博文,等.褪黑素引发对干旱胁迫下黄瓜幼苗生理特性的影响[J].中国农学通报,2022,38(19):30-36.
- [40] 李红玉,王雅聪,夏方山,等.外源H₂O₂引发对燕麦种胚线粒体AsA-GSH循环的影响[J].草地学报,2022,30(9):2298-2305.
- [41] 李富宏.褪黑素增强翅果油树幼苗生理耐盐能力[J].甘肃林业科技,2021,46(4):28-32.

(责任编辑:石春林)