

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0384

外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗生理生长的影响

覃兰丽, 黄金秋, 李燕婷, 谢彦军, 史沉鱼, 覃宝山

(广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室·广西现代蚕桑丝绸协同创新中心·微生物及植物资源
开发利用广西高校重点实验室·河池学院化学与生物工程学院 广西河池 546300)

摘要:为探讨外源褪黑素(MT)对干旱胁迫下西葫芦幼苗生理生长的影响,以西葫芦品种早青一代为材料,利用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫环境,设置7个处理组:CK(正常浇水)、T0(PEG+蒸馏水)、T1(PEG+50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T2(PEG+100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T3(PEG+150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T4(PEG+200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T5(PEG+250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT),测定西葫芦幼苗的生长及生理指标。结果表明,与CK相比,干旱胁迫(T0)显著抑制西葫芦幼苗生长,导致总叶绿素含量下降,渗透调节物质(可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸)及丙二醛(MDA)含量升高,超氧阴离子自由基($\text{O}_2\cdot^-$)积累量及超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)3种抗氧化酶活性上升。与单独干旱胁迫相比,添加适宜浓度外源MT可以提高西葫芦幼苗的生长指标、总叶绿素含量、渗透调节物质含量和抗氧化酶活性,降低MDA含量和 $\text{O}_2\cdot^-$ 积累量。其中,50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT对提高可溶性糖含量等指标效果最佳,100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT对提高总叶绿素、可溶性蛋白含量及降低MDA含量效果最优。综上,在干旱胁迫下,喷施外源MT有利于增加西葫芦幼苗的株高、根长,促进水分吸收,增加渗透调节物质含量,维持水分平衡,以及增强抗氧化能力,减轻氧化损伤,从而缓解干旱胁迫造成的损伤,增强其抗旱性,50~100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为较优浓度。

关键词:西葫芦幼苗;外源褪黑素;干旱胁迫;生理特征

中图分类号:S642.6

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)07-127-08

Effects of exogenous melatonin on the physiological growth of zucchini seedlings under drought stress

QIN Lanli, HUANG Jinqiu, LI Yanting, XIE Yanjun, SHI Chenyu, QIN Baoshan

(Guangxi Key Laboratory of Sericulture Ecology and Applied Intelligent Technology/Guangxi Collaborative Innovation Center of Modern Sericulture and Silk/Guangxi Colleges Universities Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Microbial and Botanical Resources/Institute of Chemical and Biological Engineering, Hechi University, Hechi 546300, Guangxi, China)

Abstract: To investigate the effects of exogenous melatonin(MT) on the physiological growth of zucchini seedlings under drought stress, the zucchini variety Zaoqing F₁ was selected as the experimental material. A drought stress environment was simulated using polyethylene glycol(PEG-6000), and seven treatment groups were established: CK(normal watering), T0(PEG+distilled water), T1(PEG+50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT), T2(PEG+100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT), T3(PEG+150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT), T4(PEG+200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT), and T5(PEG+250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT). Growth and physiological indexes of the seedlings were measured. The results showed that, compared to CK, drought stress(T0) significantly inhibited seedling growth, leading to a decrease in total chlorophyll content, an increase in the levels of osmotic regulators(soluble sugars, soluble proteins, and proline) and malondialdehyde(MDA) content, as well as elevated accumulation of superoxide anion radicals($\text{O}_2\cdot^-$) and enhanced activities of antioxidant enzymes(superoxide dismutase, SOD; peroxidase, POD; catalase, CAT). Compared to the drought stress alone, the application of an appropriate concentration of exogenous MT improved seedling growth parameters, total chlorophyll content, osmotic regulator levels, and antioxidant enzyme activity, while reducing MDA content and $\text{O}_2\cdot^-$ accumulation. Among the treatments, 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT exhibited the most pronounced effects in in-

收稿日期:2024-06-13;修回日期:2025-03-15

基金项目:广西自然科学基金项目(2024GXNSFAA010145);中央政府指导的地方科技发展基金项目(合科ZY230301);河池学院科研项目(2021GCC023,2023XJYB011);“桂西北特色植物资源开发与功能研究中心”研究平台

作者简介:覃兰丽,女,硕士,主要从事植物生理生态与进化研究。E-mail:18776750570@163.com

通信作者:覃宝山,男,副教授,主要从事植物生理生化研究。E-mail:hcxqbs3@163.com

creasing soluble sugar and related indices, while 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MT yielded the best results in enhancing total chlorophyll and soluble protein content while reducing MDA levels. In conclusion, under drought stress, exogenous MT application promoted zucchini seedling growth by increasing plant height and root length (facilitating water absorption), elevating osmotic regulator levels (maintaining water balance), and strengthening antioxidant capacity (reducing oxidative injury). There effects collectively alleviated drought-induced stress and improved drought resistance, with an optimal concentration range of 50-100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ MT.

Key words: Zucchini seedlings; Exogenous melatonin; Drought stress; Physiological characteristics

干旱是常见的环境胁迫因子,制约着农作物的品质和产量,在众多导致农作物减产的因素中,干旱引起的减产占到了一半^[1-2]。干旱胁迫会显著影响植物的生长形态、生理代谢等方面^[3-5]。在形态上,干旱胁迫会显著抑制植物的生长,表现为株高、茎粗、叶面积及生物量的下降^[6]。如在干旱胁迫下,大豆植株的株高、茎粗分别降低了23%、15%^[7],辣椒幼苗的株高、茎粗、主根长则分别下降了21.97%、12.5%、23.4%^[8]。在生理方面,干旱胁迫会破坏叶绿体片层结构引发叶绿素降解,导致光合效率降低^[9],而活性氧(ROS)如超氧阴离子($\text{O}_2 \cdot^-$)和过氧化氢(H_2O_2)的积累,会诱发膜脂过氧化和代谢紊乱^[10-11]。为抵御干旱胁迫,植物一方面合成脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质,通过调节细胞渗透势维持水分平衡^[12-13];另一方面通过激活抗氧化酶系统,如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)清除过量的ROS,以维持细胞稳态^[14-15]。然而,当ROS积累超过植物自身的清除阈值时,将导致膜脂过氧化加剧和代谢失衡,最终导致植株死亡^[16]。

目前,外源生长调节剂处理已成为提高植物抗旱性的重要途径。如水杨酸通过促进渗透调节物质的积累和抗氧化酶活性的提高而增强抗旱性^[17],脱落酸则是通过调节气孔快速关闭以减少蒸腾水分流失应对水分胁迫^[18]。褪黑素(MT),也称为松果体素,是一种重要的吲哚小分子的外源生长调节剂,在动植物体内广泛分布^[19-21]。尽管植物体内MT含量较低,但其可通过促进植株生长、增强抗氧化能力以及维持光合效率等途径缓解干旱胁迫。如根施外源褪黑素的小麦能增加根冠比,促进水分吸收,从而改善植株水分状况,缓解干旱胁迫对小麦幼苗的伤害^[22];外源褪黑素可诱导辣椒幼苗体内抗氧化酶活性增强及渗透调节物质积累,有效清除丙二醛,从而缓解干旱对辣椒幼苗的生长抑制,增强其抗旱性^[8];褪黑素可显著提高干旱胁迫下红小豆叶片光合色素含量、光合速率和叶绿素荧光参数,提高碳水化合物(蔗糖、果糖、可溶性糖)含量,缓解

干旱胁迫对其光合作用的抑制,提高红小豆的抗旱能力^[23]。

西葫芦(*Cucurbita pepo*)为葫芦科南瓜属植物,其果实因质地脆嫩且富含碳水化合物、钙等营养成分而具有较高经济价值^[24],但其幼苗期对水分条件尤为敏感,水分不足会致其生长受阻、生理代谢紊乱导致抗逆性下降,进而影响产量和品质^[25-26]。目前,关于外源褪黑素对干旱胁迫下植物的缓解效应的研究已在大豆、玉米、甜高粱等作物中广泛开展^[7, 27-28],但针对西葫芦幼苗的调控效应及其生理机制尚未见报道。笔者以西葫芦幼苗为试验材料,采用聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫环境,通过叶面喷施不同浓度的褪黑素,研究MT对西葫芦幼苗生长的影响,旨在为干旱胁迫条件下提高西葫芦幼苗的抗旱性提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

西葫芦品种为早青一代西葫芦,由山西省农业科学院蔬菜研究所选育。褪黑素购自南宁科仪生物科技有限公司,相对分子质量为232.28,分子式 $\text{C}_{13}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}$,纯度>99.0%。试验采用西陇科技公司生产的聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱胁迫,其为化学纯。

1.2 试验设计

试验于2023年8月至2024年4月在河池学院植物生理材料培养室进行,培养室平均温度28℃,平均相对湿度为70.85%。选取健康、规格一致的西葫芦种子放入盛有0.1%高锰酸钾溶液的烧杯中浸泡,随后进行10 min 杀菌消毒处理。灭菌后,用蒸馏水洗净种子表面残留的高锰酸钾溶液,再将洗净的种子放入铺有2层滤纸的干净培养皿中,加10 mL 蒸馏水,置于25℃催芽培养。约2 d后,将发芽的种子播种于塑料花盆内(高14 cm,直径20 cm),每盆按照株行距3 cm 种植幼苗,定期浇水。待幼苗长至2叶1心时,均匀喷施25 mL 23.7% PEG 溶液于根部模拟干旱胁迫,随后在叶面

喷施不同浓度的褪黑素,均匀喷施 40 mL(以叶面滴水为准),共处理 7 d。共设 7 个处理:CK(正常浇水)、T0(PEG+蒸馏水)、T1(PEG+50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T2(PEG+100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T3(PEG+150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)、T4(PEG+ 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT) T5(PEG+ 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT)。每个处理 5 盆植株,3 次重复,15 个样本。处理缓苗 4 d 后取样,测定其生理和形态相关指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 西葫芦幼苗生长指标的测定 每个处理取 3 株长势均匀一致的植株样品,经蒸馏水冲洗干净后用吸水纸吸干表面水分,测定植株的株高、根长、茎粗和鲜质量。

1.3.2 西葫芦幼苗生理指标的测定 采用丙酮-乙醇提取法测定总叶绿素含量^[29];采用葱酮比色法测定可溶性糖含量^[29];采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定可溶性蛋白含量^[30];采用酸性茚三酮显色法测定脯氨酸含量^[30];采用硫代巴比妥酸显色法测定丙二醛含量^[31];采用氮蓝四唑(NBT)对叶片染色,NBT 染色法是一种常用的细胞活性分析技术,通过在叶片上施加特定染料并观察其染色后出现的蓝色斑点数量来评估超氧阴离子自由基活性水平,如果叶片中含有的蓝色斑点数量较少或者仅在少数区域出现,表明该样本的活性较弱;相反,则表明样本的活性较强^[31-32];依照王学奎^[29]的方法分别采用氮蓝四唑光化学还原法、紫外吸收法测定 SOD、CAT 活性;采用愈创木酚法^[33]测定 POD 活性。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 作图,采用 SPSS 18.0 进行 Duncan's 检验分析。

2 结果与分析

2.1 外源 MT 对干旱胁迫下西葫芦幼苗生长的影响

由表 1 可知,与 CK 相比,T0 处理的株高、根长、茎粗和鲜质量分别显著下降了 34.25%、56.97%、15.85%和 65.01%。在喷施外源 MT 后,与 T0 处理相比,T1~T5 处理的株高、根长和鲜质量均显著增加;茎粗在 T3、T5 处理下分别下降了 4.04%、1.79%,T1~T5 处理间茎粗均无显著差异,其中 T4 处理的根长、茎粗和鲜质量分别较 T0 处理增加了 75.02%、4.04%和 80.41%,增加幅度最大;T5 处理的株高增加幅度最大。综上所述,干旱胁迫显著抑制了西葫芦幼苗的生长,50~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 能够减

轻干旱胁迫对其生长的抑制作用,其中 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 缓解干旱胁迫的效果最佳。

表 1 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗生长的影响
Table 1 Effects of exogenous melatonin on the growth of zucchini seedlings under drought stress

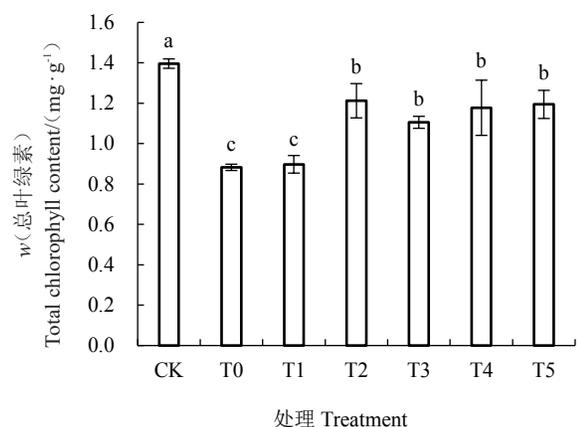
处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	根长 Root length/ cm	茎粗 Stem thick/ mm	鲜质量 Fresh mass/g
CK	36.00±1.00 a	26.33±0.58 a	2.65±0.23 a	4.23±0.06 a
T0	23.67±0.58 e	11.33±0.58 f	2.23±0.21 b	1.48±0.05 e
T1	25.90±0.95 cd	16.43±0.40 d	2.30±0.11 b	1.71±0.17 d
T2	26.10±0.17 cd	13.60±0.87 e	2.25±0.10 b	2.23±0.05 c
T3	25.67±0.76 d	14.63±0.42 e	2.14±0.15 b	2.13±0.06 c
T4	27.50±1.41 c	19.83±0.58 b	2.32±0.14 b	2.67±0.01 b
T5	30.15±0.21 b	18.65±0.21 c	2.19±0.16 b	2.58±0.06 b

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level.

2.2 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗生理指标的影响

2.2.1 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗叶片总叶绿素含量的影响 由图 1 可知,与 CK 相比,T0 处理的总叶绿素含量显著降低了 36.79%。在干旱胁迫条件下,与 T0 处理相比,外源褪黑素处理(T1~T5)均提高了西葫芦幼苗的总叶绿素含量,其中 T2~T5 处理与 T0 处理相比差异显著,T2 处理的总叶绿素含量达到最大值,相较 T0 处理提高了 37.38%。综上所述,干旱胁迫显著抑制了西葫芦幼



注:不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

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

图 1 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗叶片总叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of exogenous melatonin on total chlorophyll content in leaves of zucchini seedlings under drought stress

苗的总叶绿素合成,喷施 50~250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 均可促进其总叶绿素含量增加,100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 效果最佳。

2.2.2 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗渗透调节物质含量的影响 如图 2 所示,T0 处理的可溶性糖含量较 CK 提高了 24.16%。叶面喷施外源褪黑素后,T1~T4 处理的可溶性糖含量比 T0 处理分别提高了 62.03%、42.46%、18.58%和 4.42%,T1 提高幅度最大,与 T0 处理差异显著;而 T5 处理的可溶性糖含量比 T0 处理降低了 27.42%。综上所述,50~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 均可提高干旱胁迫下西葫芦幼苗的可溶性糖含量,50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 效果最佳,但 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 降低了可溶性糖含量。

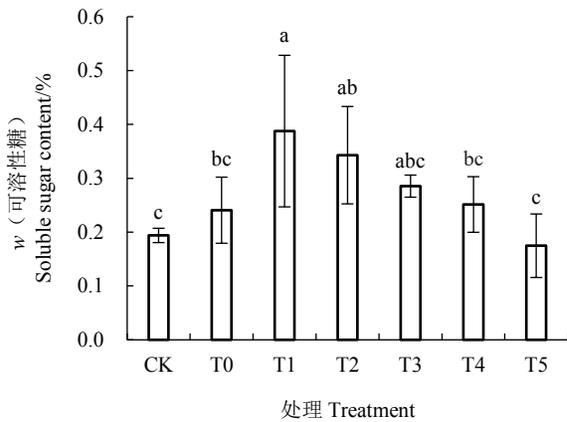


图 2 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗可溶性糖含量的影响

Fig. 2 Effects of exogenous melatonin on soluble sugar content of zucchini seedlings under drought stress

如图 3 所示,T0 处理的可溶性蛋白含量较 CK 显著提高了 27.99%。喷施外源褪黑素后,与 T0 处理相比,T1~T3 处理的可溶性蛋白含量分别提高了 4.37%、5.85%和 2.48%,其中 T2 处理提高幅度最大,与 T0 处理差异显著,而 T4 和 T5 处理的可溶性蛋白含量分别降低了 1.46%、1.87%。综上所述,50~150 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 均可提高干旱胁迫下西葫芦幼苗的可溶性蛋白含量,100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 效果最佳,高浓度(200、250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)褪黑素降低了可溶性蛋白含量。

如图 4 所示,T0 处理的脯氨酸含量较 CK 显著提高 105.33%。喷施外源褪黑素后,T1~T5 处理的脯氨酸含量均高于 T0 处理,分别提高了 12.99%、24.40%、4.73%、158.83%、41.75%,T4 处理与 T0 处理差异显著,提高幅度最大。综上所述,喷施 50~250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 均可增加干旱胁迫下西葫芦

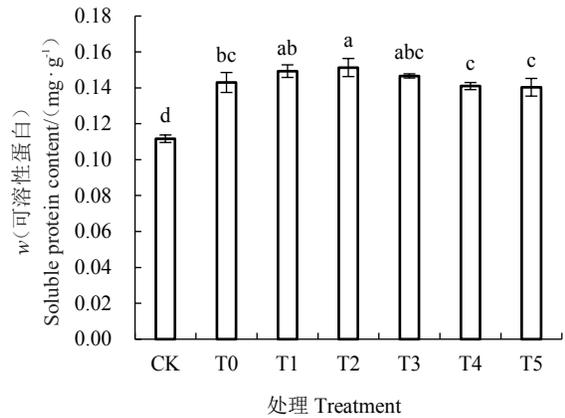


图 3 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig. 3 Effects of exogenous melatonin on soluble protein content of zucchini seedlings under drought stress

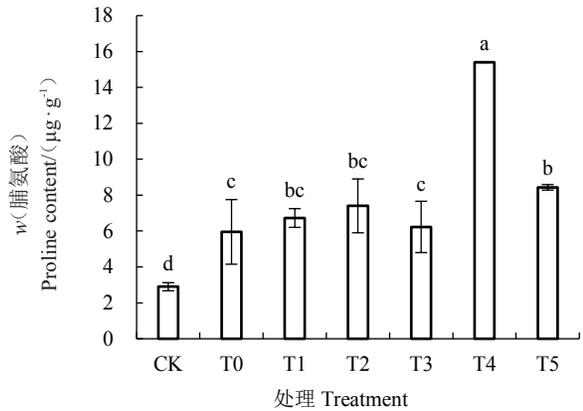


图 4 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗脯氨酸含量的影响

Fig. 4 Effects of exogenous melatonin on proline content of zucchini seedlings under drought stress

幼苗脯氨酸含量,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 效果最佳。

2.2.3 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗丙二醛含量的影响 如图 5 所示,与 CK 相比,T0 处理的丙二醛含量显著提高了 40.92%,说明干旱胁迫提高了西葫芦幼苗的丙二醛含量。在干旱胁迫下对西葫芦幼苗叶片喷施外源褪黑素,结果显示 T1~T5 处理的丙二醛含量较 T0 处理均显著下降。综上所述,干旱胁迫增加了西葫芦幼苗的丙二醛含量,喷施 50~250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 均显著降低了干旱胁迫下的丙二醛含量,其中 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 效果最佳。

2.2.4 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗 NBT 叶片染色的影响 如图 6 所示,与 CK 相比,T0 处理的叶片蓝色斑点数量多、颜色深。喷施外源褪黑素后,与 T0 处理相比,T1~T5 处理的叶片蓝色斑点更少、颜色更浅,其中 T1 处理的叶片蓝色斑点最

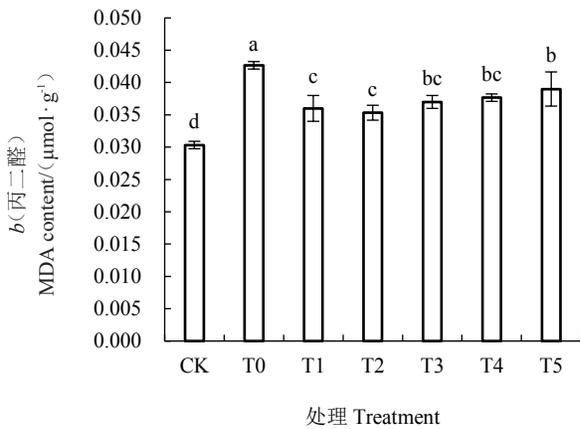


图5 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗丙二醛含量的影响

Fig. 5 Effects of exogenous melatonin on malondialdehyde content in zucchini seedlings under drought stress

少。综上所述,干旱胁迫提高了西葫芦幼苗叶片超氧阴离子自由基活性,喷施 50~250 μmol·L⁻¹ MT 均可减弱叶片超氧阴离子自由基活力,50 μmol·L⁻¹ MT 效果较好。

2.2.5 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗抗氧化酶活性的影响 如图 7~9 所示,T0 处理的 SOD、POD、CAT 活性较 CK 分别显著提高了 63.78%、113.49%、111.85%,喷施外源褪黑素后,与 T0 相比,T1~T5 处理的 SOD、POD、CAT 活性均得到提高,SOD 和 CAT 活性在 T1 处理下提高幅度最大,分别显著提高了 34.38%、34.40%,POD 活性在 T2 处理下提高幅度最大,显著提高了 82.83%。综上所述,干旱胁迫提高了 SOD、POD、CAT 活性,喷施 50~250 μmol·L⁻¹ MT 进一步提高了 3 种酶活性,SOD

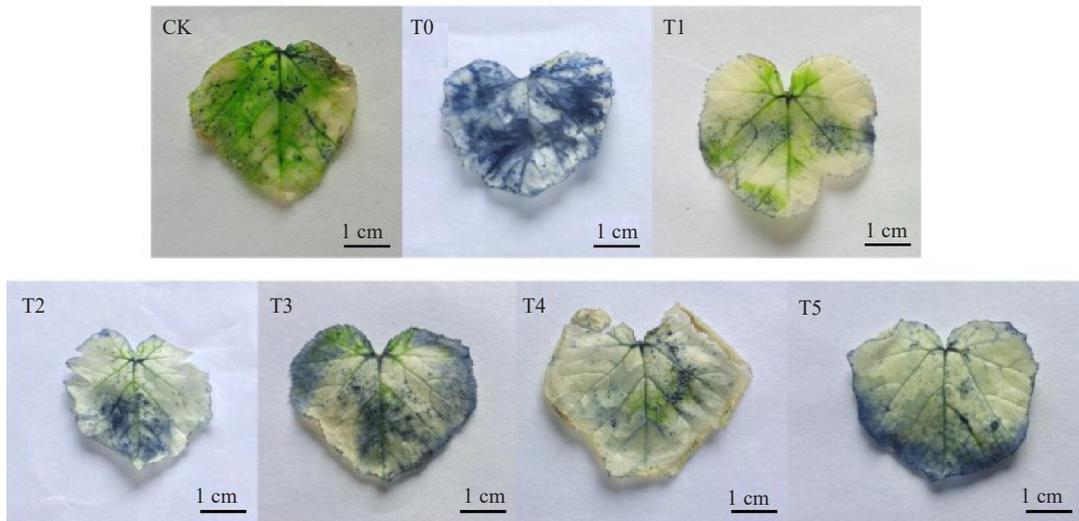


图6 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗 NBT 叶片染色的影响

Fig. 6 Effects of exogenous melatonin on NBT leaf staining of zucchini seedlings under drought stress

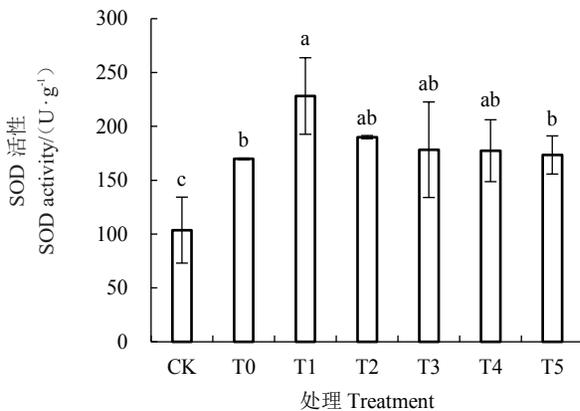


图7 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗 SOD 活性的影响

Fig. 7 Effects of exogenous melatonin on SOD activity of zucchini seedlings under drought stress

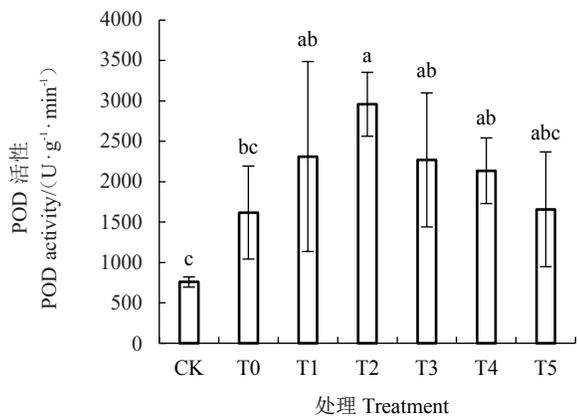


图8 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗 POD 活性的影响

Fig. 8 Effects of exogenous melatonin on POD activity of zucchini seedlings under drought stress

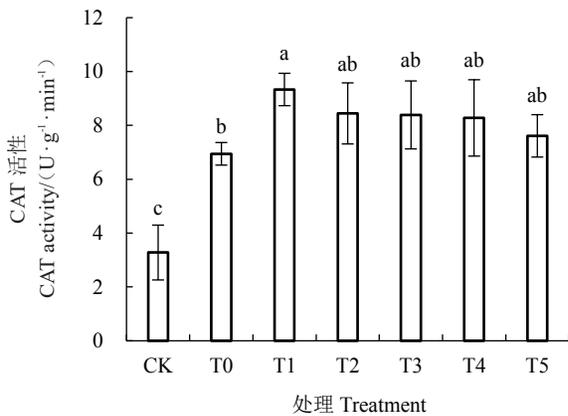


图9 外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗CAT活性的影响

Fig. 9 Effects of exogenous melatonin on CAT activity of zucchini seedlings under drought stress

和CAT活性在50 μmol·L⁻¹ MT处理下效果最佳、POD活性在100 μmol·L⁻¹ MT处理下效果最佳。

3 讨论与结论

植物在干旱条件下会产生形态与生理生化水平上的改变以适应逆境,其生物量累积与形态改变是对干旱的最直接响应^[5]。在本试验中,经PEG胁迫后,西葫芦幼苗的株高、根长、茎粗和鲜质量分别较正常浇水处理减少了34.25%、56.97%、15.85%和65.01%。该试验结果表明,干旱胁迫会导致西葫芦幼苗的生长指标降低,抑制植株生长,这与Xu等^[34]对干旱条件下水稻幼苗的根冠比的研究结果一致。在植物的生长历程中,褪黑素能影响种子萌发、幼苗生长以及开花等^[21]。与T0处理相比,向西葫芦幼苗喷施50~200 μmol·L⁻¹ MT的褪黑素,其株高、根长、鲜质量均得到显著增加,表明在干旱胁迫条件下,喷施外源褪黑素可促进西葫芦幼苗株高、根长、茎粗的生长并增加鲜质量,减轻了干旱胁迫的不利影响。

在长期的干旱条件下,植株叶片中的类囊体会发生解体,导致叶绿体结构遭到破坏,使叶片的总叶绿素含量降低^[35-36]。本研究结果表明,西葫芦幼苗叶片中的叶绿素含量受干旱环境的影响而下降,外源喷施50~250 μmol·L⁻¹ MT均能提高总叶绿素含量,表明在应对干旱胁迫的情况下,褪黑素表现出缓解效果,这与梁佳等^[28]的干旱胁迫降低了甜高粱幼苗叶片中的光合色素含量,经过外源褪黑素处理后光合色素含量显著增加的结果相一致。在植株幼苗受到干旱胁迫时,通过叶面喷施适当浓度的外

源褪黑素,能够有效地减缓因干旱胁迫导致的光合色素分解,这有助于增强幼苗的光合作用能力,进而提升其对干旱环境压力的抵抗力。

在干旱胁迫下,植物细胞膜的通透性显著增强,细胞内的渗透势迅速上升,植物无法有效地从外界环境中汲取水分^[37]。渗透调节物质的累积,能够有效地降低细胞膜的渗透势,从而维持一定的渗透压平衡,减少水分损失,抵御干旱^[13]。在本试验中,经过PEG胁迫后,与CK处理相比,幼苗叶片的可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、脯氨酸含量分别提高了24.16%、27.99%、105.33%,该结果说明在干旱条件下西葫芦幼苗可通过调节体内的渗透调节物质来维持细胞渗透势,这与青藏高原6种植物应对干旱胁迫时的表现相同^[38]。在PEG胁迫下,与T0相比,喷施50~150 μmol·L⁻¹ MT,可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量均提高,说明喷施适宜浓度的外源褪黑素能够积累渗透调节物质来保持胞内渗透电位的动态平衡,减少水分损失,提高西葫芦幼苗的抗旱性,该机制与干旱胁迫下外源褪黑素进一步提高了辣椒、玉米幼苗的渗透调节物质含量的研究结果相一致^[8, 39]。值得注意的是,当喷施外源MT浓度为200、250 μmol·L⁻¹ MT时,可溶性蛋白含量比未添加外源MT(T0)时还低;仅在喷施外源MT浓度为250 μmol·L⁻¹ MT时,可溶性糖含量比未添加外源MT(T0)时还低,说明并非外源MT浓度越高对西葫芦幼苗应对干旱胁迫越有利。研究外源褪黑素对干旱胁迫下辣椒幼苗生理生长的影响也表明,并非试验中最高浓度(250 μmol·L⁻¹)的褪黑素最有利于辣椒幼苗缓解干旱胁迫,而是150~200 μmol·L⁻¹为较优浓度^[8]。

干旱胁迫会导致植物体内积累大量的活性氧自由基,加深膜脂质的过氧化程度,导致丙二醛含量增加,丙二醛含量可评估植物细胞膜脂质过氧化损伤及抗旱性^[32]。在本试验中,西葫芦幼苗的丙二醛含量在PEG胁迫下提高,喷施不同浓度外源MT都显著降低丙二醛含量,这与蒋倩等^[40]在苦水玫瑰上的研究结果一致。在干旱胁迫下喷施外源MT可以清除体内活性氧自由基,减轻膜脂质的过氧化程度,降低丙二醛含量,增强植株抵御干旱的能力。

在干旱胁迫下,植物体内的O₂·、H₂O₂等活性氧类物质被激活,这些物质累积会对植物生长发育系统构成严重的威胁^[10]。前人研究表明,褪黑素处理可降低猕猴桃幼苗干旱胁迫下产生的O₂·、H₂O₂含量^[41]。与前人研究相同,在本试验中,经过干旱胁迫

胁迫后,西葫芦幼苗叶片 NBT 染色产生的蓝色斑点较 CK 更多,颜色更深,喷施不同浓度外源 MT 后,其叶片颜色明显变浅,斑点数量变少,表明外源褪黑素可以明显减少干旱胁迫下西葫芦幼苗叶片 H_2O_2 和 $\text{O}_2\cdot^-$ 的积累量,缓解西葫芦幼苗在干旱胁迫下受到的伤害。

干旱条件会促进植物体内抗氧化酶活性得到提升,缓解细胞膜的氧化性损害^[20]。在本试验中,经过干旱胁迫后,西葫芦幼苗的 SOD 活性、POD 活性和 CAT 活性均较 CK 处理分别提高了 63.78%、113.49%和 111.85%,表明干旱条件下植物可通过提高 3 种抗氧化酶活性来降低干旱胁迫对幼苗生长的影响。在干旱环境中,适当浓度的外源褪黑素能有效地增强西葫芦幼苗中 SOD、POD 和 CAT 活性。巩银轩等^[42]研究表明,施加外源褪黑素可以提高干旱胁迫下普陀狗娃花幼苗体内的 POD、SOD、CAT 活性,这与本试验结果基本一致。表明叶面喷施一定浓度的外源褪黑素可以提高干旱胁迫环境中植物体内 SOD、POD 和 CAT 活性,有效地抵抗自由基的破坏作用,防止细胞内的活性氧(ROS)过量积累导致细胞损伤。

本试验结果表明,在 PEG 模拟的干旱胁迫下,西葫芦幼苗的生理生长受到抑制,使用不同浓度的(50、100、150、200、250 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)褪黑素可缓解干旱胁迫对其的影响,其中,添加 50~100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 效果最佳。喷施 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 对提高可溶性糖含量、SOD 和 CAT 活性以及降低超氧阴离子自由基活性的效果最佳,100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 对提高总叶绿素含量、可溶性蛋白含量及降低丙二醛含量最佳。可见,适宜浓度的外源褪黑素可显著促进西葫芦幼苗生长,提高总叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸含量,降低 MDA 和 H_2O_2 、 $\text{O}_2\cdot^-$ 的积累量,提高 SOD、POD 和 CAT 抗氧化酶活性,从而缓解干旱胁迫对幼苗造成的损伤,增强抗旱性。

参考文献

- [1] 李平,谢淑芹,方璐斌,等.干旱胁迫下不同褪黑素浓度处理下谷子种子萌发特性[J].山西农业大学学报(自然科学版),2022,42(5):76-83.
- [2] BURKE E J, BROWN S J, CHRISTIDIS N. Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the hadley centre climate model[J]. Journal of Hydrometeorology, 2006, 7(5): 1113-1125.
- [3] 侯丽媛,陈禹怀,王育川,等.干旱胁迫时间对藜麦苗期生理特性的影响及耐旱性评价[J].核农学报,2024,38(11):2237-2246.
- [4] GUO C Y, MA L N, YUAN S, et al. Morphological, physiological and anatomical traits of plant functional types in temperate grasslands along a large-scale aridity gradient in northeastern China[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40900.
- [5] LI L J, GU W R, LI J, et al. Exogenously applied spermidine alleviates photosynthetic inhibition under drought stress in maize (*Zea mays* L.) seedlings associated with changes in endogenous polyamines and phytohormones[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 129: 35-55.
- [6] 冯潇,田玲,尹群,等.3种玉兰幼苗生长和生理特性对干旱胁迫的响应[J].北京林业大学学报,2024,46(9):57-67.
- [7] 秦彬.外源褪黑素对大豆苗期干旱的缓解效应[D].黑龙江大庆:黑龙江八一农垦大学,2021.
- [8] 刘微,陈峰清扬,陈晖,等.外源褪黑素对干旱胁迫下辣椒幼苗生长及生理机制的影响[J].湖南生态科学学报,2024,11(4):1-12.
- [9] 张小娇,祁娟,曹文侠,等.干旱胁迫对垂穗披碱草苗期抗旱生理特性的影响[J].草原与草坪,2014,34(5):55-59.
- [10] DE CARVALHO M H C. Drought stress and reactive oxygen species: Production, scavenging and signaling[J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3(3): 156-165.
- [11] 郭玉双,李祥羽,任学良.植物体内活性氧(ROS)的产生及其作用研究进展[J].黑龙江农业科学,2011(8):146-148.
- [12] 沈少炎,吴玉香,郑郁善.植物干旱胁迫响应机制研究进展:从表型到分子[J].生物技术进展,2017,7(3):169-176.
- [13] TURNER N C. Turgor maintenance by osmotic adjustment - 40 years of progress[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(13): 3223-3233.
- [14] 杨瑛斌,付国香,郝文芳.小沙冬青对干旱胁迫的生理响应和转录组分析[J].生态学报,2025,45(2):854-865.
- [15] WANG X P, LIU H L, YU F L, et al. Differential activity of the antioxidant defence system and alterations in the accumulation of osmolyte and reactive oxygen species under drought stress and recovery in rice (*Oryza sativa* L.) tillering[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 8543.
- [16] 陈少裕.膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J].植物生理学通讯,1991(2):84-90.
- [17] 周康宇,何成勇,徐子鸿,等.外源水杨酸对干旱胁迫下猕猴桃砧木生理特性的影响[J].西昌学院学报(自然科学版),2024,38(4):20-25.
- [18] JIANG G F, BRODRIBB T J, RODDY A B, et al. Contrasting water use, stomatal regulation, embolism resistance, and drought responses of two co-occurring mangroves[J]. Water, 2021, 13(14): 1945.
- [19] 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.
- [20] 左佳琦,谢佳恒,薛宇轩,等.褪黑素对缓解植物逆境胁迫作用的研究进展[J].基因组学与应用生物学,2014,33(3):709-715.
- [21] 马仲炼,周苓宇,陈悦,等.褪黑素浸种对辣椒种子萌发及幼苗抗旱性的影响[J].中国瓜菜,2024,37(9):128-135.
- [22] 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.
- [23] 姜珊,刘佳,曹亮,等.外源褪黑素对干旱胁迫下红小豆幼苗生长和产量的影响[J].作物杂志,2023(4):202-209.
- [24] 王锋,杨青珍,赵旗峰,等.褪黑素处理对西葫芦果实冷害和品质的影响[J].北方园艺,2021(24):98-104.
- [25] 马峰,张华锋,张怀友,等.西葫芦生长及生理特性对水分胁迫的响应[J].现代园艺,2015(21):3-5.
- [26] 王艳芳,武月胜,李灵芝,等.不同水分胁迫条件下腐植酸类钾盐对西葫芦幼苗生长及光合荧光特性的影响[J].腐植酸,2022(1):44-51.
- [27] 洪越,周贵兰,刘瑞,等.外源褪黑素对干旱胁迫下不同抗旱型玉米幼苗生理特性的影响[J].北京农学院学报,2024,39(3):39-46.
- [28] 梁佳,胡朝阳,谢志明,等.外源褪黑素缓解甜高粱幼苗干旱胁迫的生理效应[J].草业学报,2023,32(7):206-215.
- [29] 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,2018.
- [30] 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.
- [31] 董亚茹,张艳波,赵东晓,等.外源 24-表油菜素内酯对 NaCl 胁迫下桑树幼苗的缓解效应[J].核农学报,2021,35(6):1466-1475.
- [32] 史沉鱼,韦芳灵,黄彩腰,等.外源独角金内酯对铅胁迫下番茄幼苗生理特性的缓解效应[J].中国瓜菜,2024,37(5):115-123.
- [33] 刘新,刘洪庆.植物生理学实验(生物学实践教学改革系列教材全国高等“十三五”农林规划教材)[M].北京:高等教育出版社,2018.
- [34] XU W, CUI K H, XU A H, et al. Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(2):9.
- [35] 李春雨,陈春宇,毛浩田,等.干旱胁迫下外源褪黑素对小麦生长和光系统活性的影响[J].麦类作物学报,2022,42(7):846-856.
- [36] 马媛,张嘉航,高娅楠,等.干旱胁迫下乙烯利对草地早熟禾叶绿素代谢基因表达的影响[J].中国草地学报,2022,44(12):1-10.
- [37] 宋吉轩,李金还,刘美茹,等.油菜素内酯对干旱胁迫下羊草渗透调节及抗氧化酶的影响研究[J].草业学报,2015,24(8):93-102.
- [38] 潘昕,邱权,李吉跃,等.干旱胁迫对青藏高原 6 种植物生理指标的影响[J].生态学报,2014,34(13):3558-3567.
- [39] 杨娟,姜阳明,周芳,等.PEG 模拟干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种苗期形态与生理特性的影响[J].作物杂志,2021(1):82-89.
- [40] 蒋倩,汪富军,马晓兰,等.外源褪黑素对干旱胁迫下苦水玫瑰生理特性的影响[J].草原与草坪,2022,42(4):39-46.
- [41] 刘芯伶,彭玉婷,王云梅,等.外源褪黑素和脱落酸对干旱胁迫下猕猴桃幼苗生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2021,39(4):95-101.
- [42] 巩银轩,陈旭华,潘泰妙,等.褪黑素对干旱胁迫下普陀狗娃花生生长及生理生化指标的影响[J].植物生理学报,2023,59(5):1017-1025.