

高温胁迫下外源褪黑素对胶州大白菜幼苗生理特性的影响

周海月, 刘维信, 陈熙, 倪润茂, 赵紫彤

(青岛农业大学园艺学院 山东青岛 266109)

摘要: 为研究高温胁迫下施加外源褪黑素对大白菜幼苗生理特性的影响, 以胶州大白菜商品种秋季王为试材, 在高温胁迫下用 0、10、50、100、200、500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 外源褪黑素喷施胶州大白菜幼苗叶片, 测定并分析胁迫处理期间不同浓度褪黑素喷施的胶州大白菜幼苗的生长指标、叶绿素含量、渗透调节物质含量、活性氧水平和抗氧化酶活性的变化。结果表明, 与对照相比, 大白菜幼苗叶面喷施一定浓度的褪黑素保持了高温胁迫下胶州大白菜幼苗的正常生长, 减少了叶绿素的流失和相对含水量的下降, 促进了可溶性蛋白质含量的积累, 提高了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性, 显著降低了除胁迫第 1 天外的丙二醛(MDA)含量和相对电导率, 增强了胶州大白菜抵御高温胁迫伤害的能力。50、100、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理均能提高胶州大白菜幼苗耐热性, 尤以 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素处理效应最佳。

关键词: 胶州大白菜; 幼苗; 褪黑素; 高温胁迫; 生理特性

中图分类号: S634.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2023)11-050-07

Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of chinese cabbage seedlings under high temperature stress

ZHOU Haiyue, LIU Weixin, CHEN Xi, NI Runmao, ZHAO Zitong

(College of Horticulture, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China)

Abstract: This paper aims to study the effect of exogenous melatonin (MT) application on the physiological characteristics of Chinese cabbage seedlings under high temperature stress. The commercial variety named Jiaozhou Chinese cabbage Autumn King was used as the test material, 10, 50, 100, 200, 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ exogenous MT sprayed the leaves of Jiaozhou Chinese cabbage seedlings under high temperature stress, and the growth indexes, chlorophyll content, osmomodulator content, reactive oxygen species level and antioxidant enzyme activities of Jiaozhou Chinese cabbage seedlings were determined and analyzed during stress treatment. The results showed that foliar spraying MT maintained the normal growth of Jiaozhou Chinese cabbage seedlings under high temperature stress, reduced the loss of chlorophyll and the decrease of relative water content, promoted the accumulation of soluble protein content, increased the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbyl peroxidase (APX), significantly decreased the content of malondialdehyde (MDA) and relative conductivity, except the first day, and enhanced the ability of Jiaozhou Chinese cabbage seedlings to resist high temperature stress. 50、100、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT treatment could improve the heat tolerance of Jiaozhou Chinese cabbage seedlings. In conclusion, 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT treatment had the best effect on alleviating high temperature stress of Jiaozhou Chinese cabbage seedlings.

Key words: Jiaozhou Chinese cabbage; Seedlings; Melatonin; High temperature stress; Physiological characteristics

大白菜(*Brassica campestris* L. ssp. *pekinensis*)喜低温冷凉环境, 幼苗期适宜温度为 20~25 °C, 因此多在秋季气温偏凉时种植。胶州大白菜原产于山东省青岛市胶州市, 具有味美鲜甜、营养丰富的特点, 是全国农产品地理标志产品, 更是青岛特产,

栽培面积约 4000 hm^2 。然而在实际生产中, 秋后内陆极端高温会使胶州大白菜出现出苗受阻, 叶片萎蔫、发黄甚至枯萎的现象, 制约胶州大白菜生长, 严重影响其产量及商品性。

褪黑素(melatonin, MT)被认为是潜在参与调

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-08-23

基金项目: 青岛市科技惠民计划(20-3-4-24-nsh)

作者简介: 周海月, 女, 硕士研究生, 主要从事蔬菜遗传育种。E-mail: zhy980531@163.com

通信作者: 刘维信, 男, 教授, 主要从事蔬菜遗传育种研究。E-mail: liuweixin2006@163.com

控种子萌发的一种植物激素^[1]。近些年研究发现 MT 广泛存在于高等植物体内,目前在葱科、凤梨科、天南星科、十字花科等 100 多种植物中均已发现 MT 的存在^[2],褪黑素对植物的各种生理活动起重要作用,尤其是可以缓解各种逆境对植物的损伤^[3]。喷施 MT 能显著提高小白菜抗氧化酶的活性^[4],间接增加抗氧化物质的含量,提高西瓜嫁接苗的低温抗性^[5];MT 还能高效清除自由基从而增强黄花的耐冷性^[6]和耐热性^[7-8],提高玉米抗盐胁迫能力^[9],缓解干旱胁迫对小麦幼苗的细胞膜造成的损害^[10]。但目前关于 MT 缓解大白菜幼苗高温胁迫下的生理机制尚不清晰。

笔者利用不同浓度外源 MT 处理胶州大白菜幼苗,并与胁迫对照相比,研究高温胁迫下胶州大白菜的各项生理指标变化,揭示外源 MT 缓解胶州大白菜高温胁迫的作用机制,为胶州大白菜抵抗高温逆境方面的研究和实际生产中的应用提供新的思路和方法。

1 材料与方法

1.1 材料

供试的胶州大白菜商品种为秋季王,购于胶州市东茂蔬菜研究所。褪黑素购于麦克林公司(上海)。

1.2 方法

1.2.1 试验方法 试验于 2022 年 9—12 月在青岛农业大学科技楼进行。大白菜种子消毒后进行催芽,萌发的种子直接播种到 50 孔穴盘进行育苗,待幼苗长到 2 叶 1 心时选取长势一致的幼苗移栽到直径 10 cm 的圆形花盆中,基质加水混匀至成团不滴水状态装盆,每盆 1 棵,放入实验室恒温培养箱进行后续的胁迫处理。每个处理 20 盆幼苗。光周期 12 h(昼)/12 h(夜)、昼夜温度(28±1)°C/(17±1)°C。待植株子叶展平生长到 5 周龄后选择整齐一致的壮苗,进行喷施外源 MT 处理,设置 6 个处理浓度,分别为 0(CK)、10、50、100、200 和 500 μmol·L⁻¹,于夜间避光喷施,以叶片滴水为度,喷布幼苗叶片,一共喷施 3 次,每次间隔 24 h,最后一次喷施 MT 1 d 后将幼苗进行高温处理,培养箱参数设定为:光周期 12 h(昼)/12 h(夜),光照度 1000 μmol·m⁻²·s⁻¹,相对湿度 75%,昼夜温度(39±1)°C/(27±1)°C。

1.2.2 生长指标的测定 高温胁迫 11 d 后进行生长指标的测定,用直尺测定幼苗的株高、叶长、根

长,用游标卡尺测定茎粗。将幼苗清理干净后称鲜质量,烘干至恒质量后分别测定地上部和地下部干质量。

1.2.3 生理指标的测定 分别在胁迫的第 1、3、5、7、9、11 天,选取各处理长势均匀一致的植株,取其第 4 片真叶用于各生理指标的测定。参考高俊凤^[11]的方法测定相对含水量、相对电导率和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,采用氮蓝四唑法(NBT)测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白质含量。参考 Heath^[12]的方法测定叶绿素总含量和叶绿素 a 含量;采用 TAD 法测定丙二醛(MDA)含量^[13]。上述指标均重复测定 3 次,以平均值作为各处理的实测值。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 整理所得数据并绘制表格和柱形图,采用 IBM SPSS Statistics 26 进行方差分析和差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度外源 MT 处理对胶州大白菜形态指标的影响

2.1.1 不同浓度外源 MT 处理对胶州大白菜生长发育特性的影响 由图 1 可以看出,高温胁迫处理前 3 d 大白菜叶片几乎无变化,在高温胁迫第 5 天时 CK 和 500 μmol·L⁻¹MT 处理组叶片出现萎蔫现象;胁迫第 7 天时 CK 和 500 μmol·L⁻¹MT 处理组叶片大部分萎蔫,10 μmol·L⁻¹MT 处理组部分叶片萎蔫;胁迫第 9 天时 200 μmol·L⁻¹MT 处理组叶片出现萎蔫;胁迫第 11 天时 CK 和 500 μmol·L⁻¹MT 处理组出现植株死亡情况,10 μmol·L⁻¹MT 处理组叶片出现发黄、失绿、大面积萎蔫的现象,且无法恢复,50 和 200 μmol·L⁻¹MT 处理组有部分叶片萎蔫,100 μmol·L⁻¹MT 处理组表现正常。由表 1 可以看出,喷施 MT 能显著提高高温胁迫下大白菜的各项生长指标(除地下部干质量和 500 μmol·L⁻¹MT 处理的茎粗),且随喷施浓度的增加总体上呈先上升再下降的趋势,其中喷施 100 μmol·L⁻¹MT 处理的株高、叶长、根长、茎粗、鲜质量、总干质量、地上部干质量和地下部干质量最高,分别比 CK 显著增加 36.17%、46.31%、151.42%、73.31%、115.14%、78.87%、77.41%、192.62%。

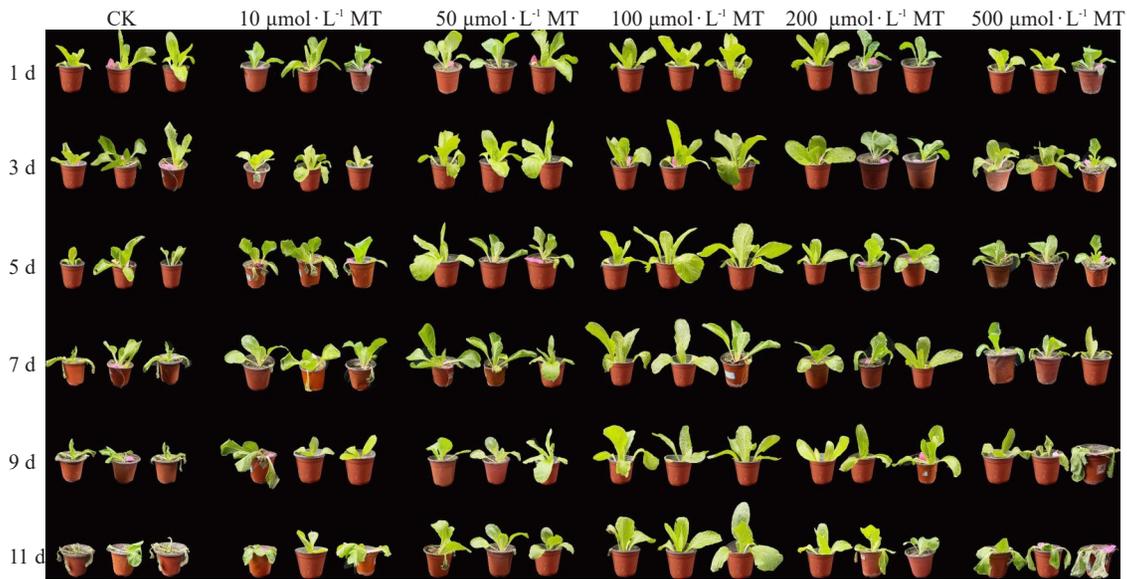


图1 高温胁迫下不同浓度外源 MT 处理 11 d 内大白菜幼苗形态的变化

Fig 1 Changes in the morphology of Chinese cabbage seedlings under high temperature stress with different concentrations of exogenous MT treatments within 11 d

表1 高温胁迫下外源 MT 对胶州大白菜形态指标的影响

Table 1 Effects of exogenous MT on morphological indexes of Chinese cabbage under high temperature stress

| MT 浓度 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | 株高/cm | 叶长/cm | 根长/cm | 茎粗/mm | 鲜质量/g | 总干质量/g | 地上部干 质量/g | 地下部干 质量/g |
|--|----------------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0(CK) | 12.47 ± 1.09 d | 12.87 ± 1.22 d | 8.09 ± 0.74 e | 2.81 ± 0.28 e | 22.32 ± 0.87 f | 2.679 ± 0.258 e | 2.444 ± 0.246 e | 0.149 ± 0.069 c |
| 10 | 15.08 ± 0.78 b | 15.53 ± 0.91 c | 13.71 ± 0.78 d | 3.61 ± 0.21 d | 32.26 ± 1.26 d | 3.658 ± 0.265 c | 3.367 ± 0.270 c | 0.270 ± 0.067 c |
| 50 | 15.47 ± 0.80 b | 16.87 ± 0.95 b | 15.19 ± 0.62 bc | 3.97 ± 0.18 c | 33.14 ± 1.04 c | 3.736 ± 0.200 c | 3.346 ± 0.245 c | 0.369 ± 0.086 b |
| 100 | 16.98 ± 0.63 a | 18.83 ± 0.69 a | 20.34 ± 1.02 a | 4.87 ± 0.23 a | 48.02 ± 3.08 a | 4.792 ± 0.213 a | 4.336 ± 0.265 a | 0.436 ± 0.088 a |
| 200 | 15.01 ± 0.63 b | 15.24 ± 0.63 c | 15.55 ± 0.99 b | 4.23 ± 0.28 b | 36.99 ± 3.27 b | 4.013 ± 0.466 b | 3.731 ± 0.480 b | 0.283 ± 0.086 c |
| 500 | 13.67 ± 0.52 c | 14.88 ± 0.62 c | 14.82 ± 1.10 c | 2.78 ± 0.26 e | 28.06 ± 3.68 e | 3.098 ± 0.276 d | 2.851 ± 0.291 d | 0.228 ± 0.097 c |

注: 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

2.1.2 高温胁迫下 MT 处理对苗期胶州大白菜叶片叶绿素含量的影响 由图 2 可以看出,除第 1 天和第 7 天 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理外,高温胁迫下所有喷施 MT 处理的总叶绿素和叶绿素 a 含量均高于 CK。CK 和 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的总叶绿素和叶绿素 a 含量在 11 d 内持续下降,而 10、50、100、 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的总叶绿素和叶绿素 a 含量随胁迫时间增加呈先上升后下降的变化趋势,各处理的总叶绿素和叶绿素 a 含量在第 5 天达到最高,其中 50、100、 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的总叶绿素和叶绿素 a 含量(第 1 天除外)在高温胁迫时均高于 CK,胁迫第 11 天时分别比 CK 显著增加 56.63%、63.02%、27.67%和 69.04%、87.66%、57.12%。

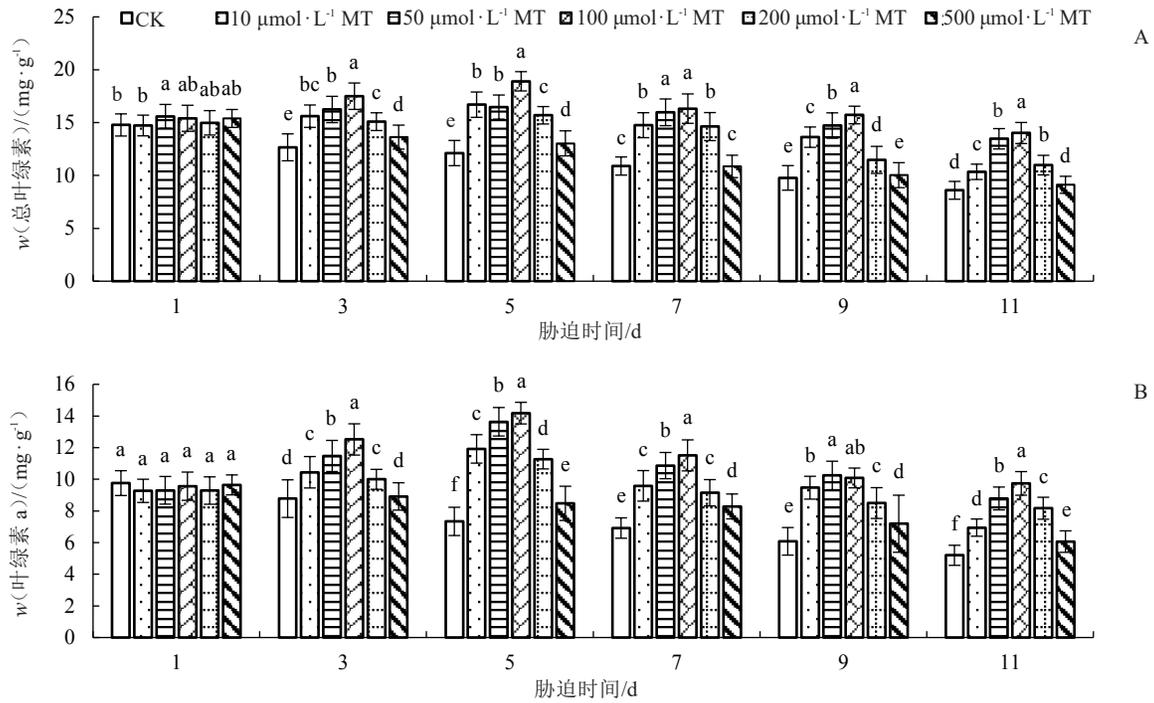
2.2 外源 MT 对高温胁迫下大白菜幼苗生理特性的影响

2.2.1 外源 MT 对高温胁迫下大白菜幼苗渗透调节系统的影响 由图 3-A 可以看出,随胁迫时间增

加,叶片可溶性蛋白质含量呈先上升后下降的变化趋势,第 5 天时所有处理的可溶性蛋白质含量均达到最高,喷施外源 MT 的各处理降幅整体均小于 CK,其中 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的可溶性蛋白质含量(除第 1 天外)均高于其他处理,在高温第 5 天和第 11 天时 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理分别比 CK 显著提高 62.52%和 119.34%。

由图 3-B 可以看出,除 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理外,其他处理随胁迫时间增加叶片相对含水量呈持续下降趋势,喷施外源 MT 各处理组的相对含水量降幅均小于 CK,其中 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的叶片相对含水量在高温 11 d 内下降 10.86%,降幅低于其他处理,在胁迫第 11 天时 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理叶片相对含水量比 CK 显著高 54.21%。

由图 3-C 可以看出,随胁迫时间增加,叶片相对电导率呈持续上升的趋势,喷施外源 MT 各处理组的相对电导率增幅均小于 CK, $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT



注:相同时间处理的不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

图 2 高温胁迫下外源 MT 对大白菜叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effect of exogenous MT on chlorophyll content of Chinese cabbage leaves under high temperature stress

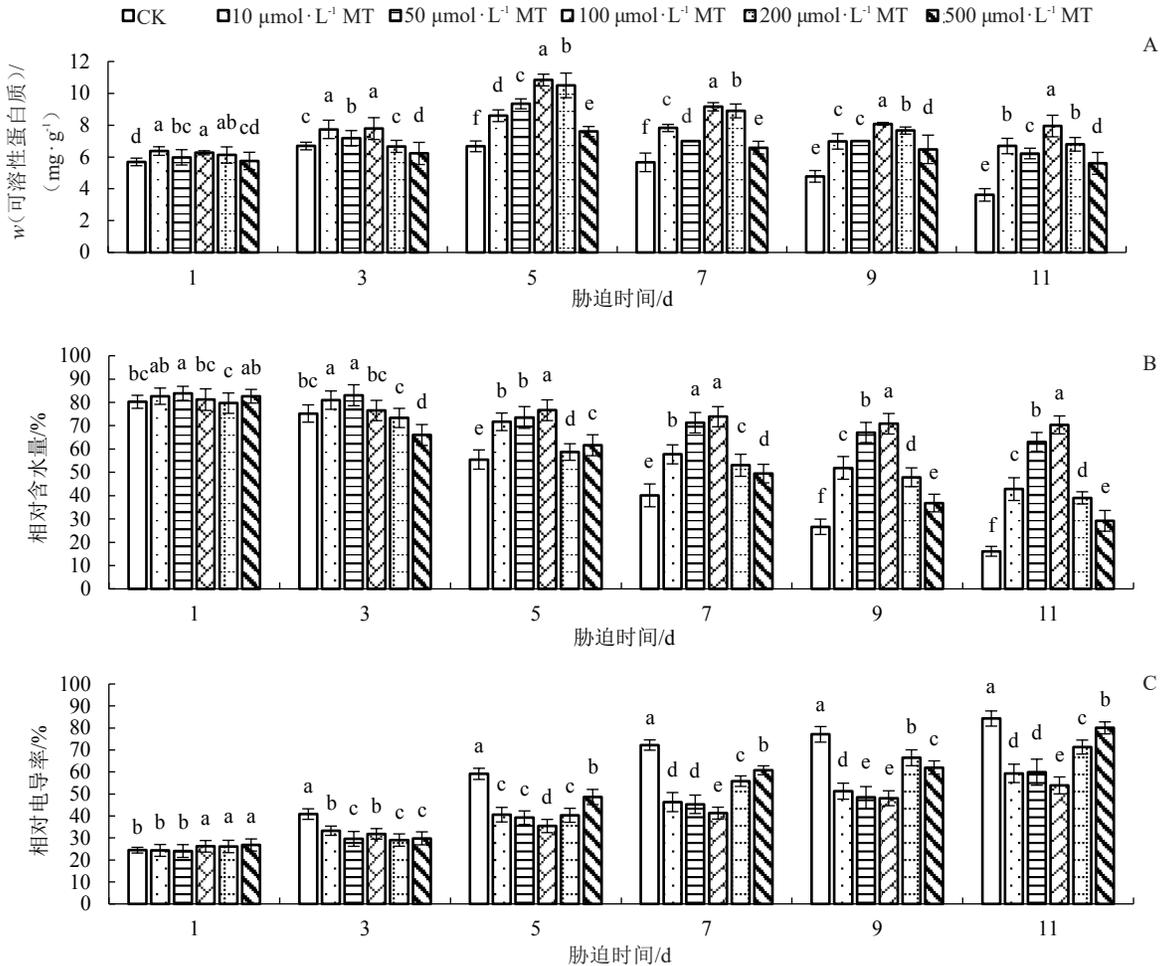


图 3 高温胁迫下外源 MT 对大白菜叶片渗透调节系统的影响

Fig. 3 Effects of exogenous MT on the osmoregulatory system of Chinese cabbage leaves under high temperature stress

处理的叶片相对电导率在高温 11 d 内上升 27.68%，增幅均低于其他处理，在胁迫第 11 天时 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理比 CK 显著低 30.40%。

2.2.2 外源 MT 处理对胶州大白菜抗氧化酶活性的影响 由图 4 可以看出，随胁迫时间增加，抗氧化

酶活性大致呈现先上升后下降的变化趋势(除 CK、 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理组的 APX 活性)，APX、SOD 和 CAT 活性在第 5 天达到最高，POD 活性在第 3 天达到最高。外源 MT 处理组的 SOD 和 CAT 活性在胁迫第 3 天后均高于

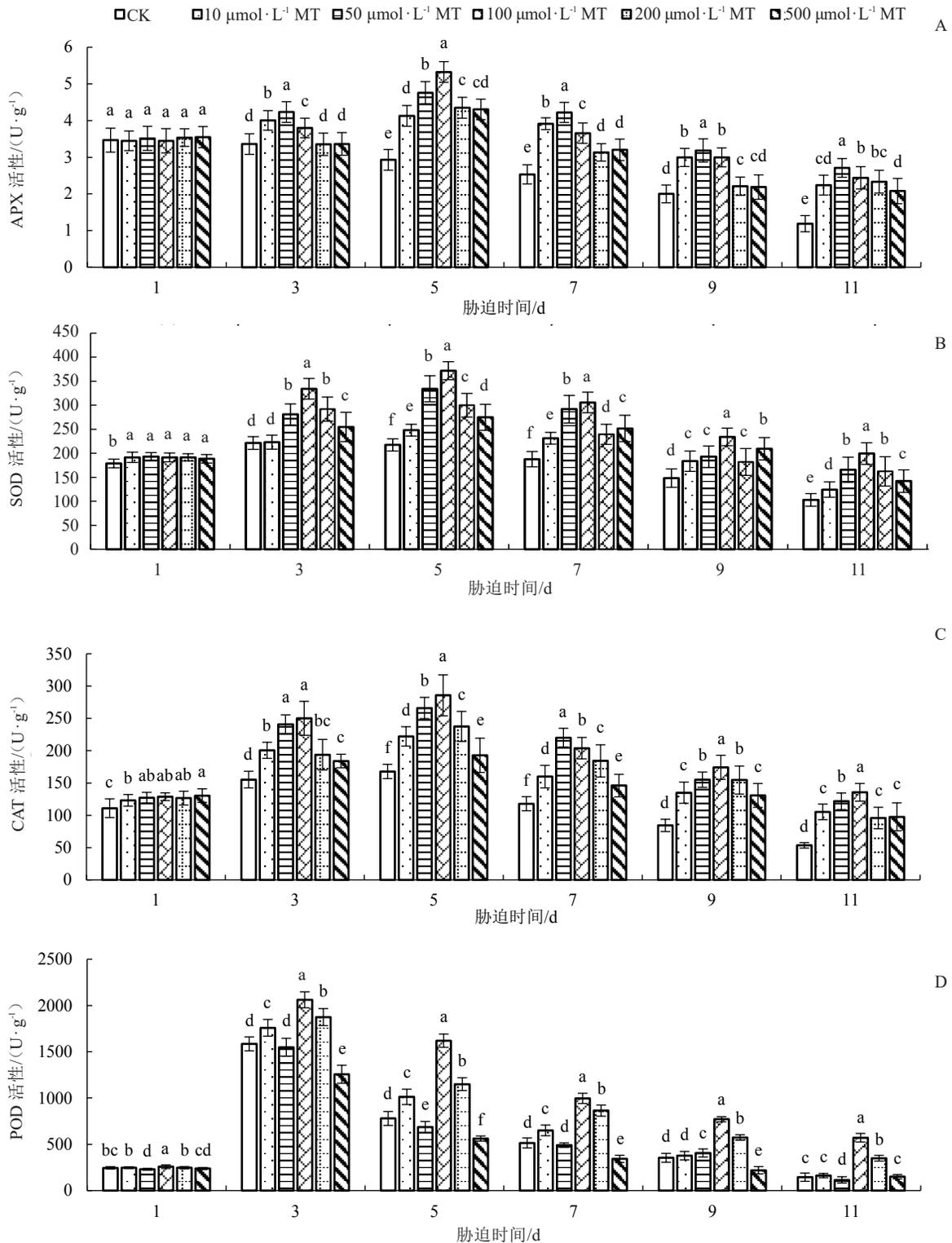


图 4 高温胁迫下外源 MT 对大白菜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effects of exogenous MT on antioxidant enzyme activities of Chinese cabbage seedlings leaves under high temperature stress.

CK, APX 活性在胁迫第 5 天后高于 CK, 10、100、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理组的 POD 活性在胁迫第 3 天后均高于 CK。100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的胶州大白菜幼苗的 SOD 和 POD 活性在胁迫第 3 天后显著高于 CK 和其他处理组。在胁迫第 11 天时, 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理组的 APX、SOD、CAT、POD 活性分别比 CK 显著提高 105.04%、93.96%、

153.48%和 294.21%。

2.2.3 外源 MT 处理对大白菜 MDA 含量的影响

由图 5 可以看出,随胁迫时间的增加,叶片 MDA 含量整体呈先上升后下降的变化趋势,除第 1 天外,喷施 MT 处理的叶片 MDA 含量在整个胁迫时间内均显著低于 CK。100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的 MDA 含量在第 3 天增幅最小,整个胁迫期间(除第 1 天外)

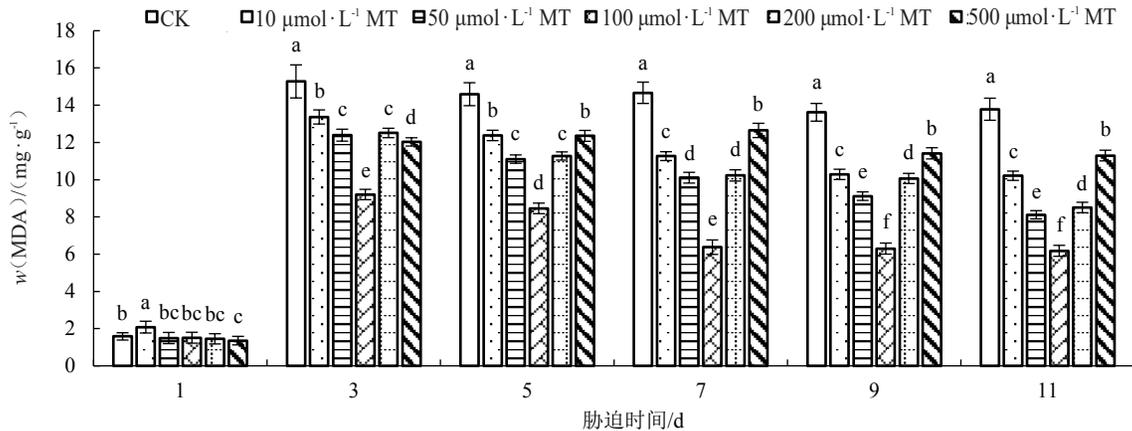


图 5 高温胁迫下外源 MT 对大白菜叶片 MDA 含量的影响

Fig. 5 Effect of exogenous MT on MDA content of Chinese cabbage leaves under high temperature stress

都显著低于其他处理,第 11 天时叶片 MDA 含量比 CK 显著降低 55.15%。

3 讨论与结论

叶绿素是高等植物和所有其他能进行光合作用的生物体中所特有的一类能吸收传递光能和参与光化学反应的光合绿色色素。植物叶绿素含量与其对环境的适应性有关,研究表明,大部分叶绿素 a 和全部叶绿素 b 是主要参与吸收和传递光能的光合色素,叶绿素 a 更是作物光合作用的主要组分,可以反映作物对长波光的吸收程度^[12]。

可溶性蛋白质是重要的渗透调节物质和营养物质,它的增加和积累能提高细胞的保水能力,保护生物膜及细胞的生命物质免受胁迫伤害^[13]。MT 通过增加可溶性蛋白质的含量,提高玉米^[9]、甜瓜^[13]抗盐胁迫的能力,增强菊花幼苗耐热性^[14]。

前人研究表明,外源 MT 处理能够提高高温胁迫下甘蓝^[15]、黄瓜^[7-8]中 APX、SOD、CAT 和 POD 的活性;研究发现,外源 MT 处理能够降低盐胁迫下玉米^[9]、干旱胁迫下油菜^[16]和冷胁迫下黄瓜^[17]中 MDA 的含量。

本试验结果表明,高温胁迫导致胶州大白菜幼苗叶片叶绿素含量明显下降,但喷施 MT 能在短时间内显著提高总叶绿素含量和叶绿素 a 含量,以

100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理效果最佳,说明外源 MT 处理可以增强胶州大白菜幼苗叶片光合色素的稳定性,与在小麦^[10]、小白菜幼苗^[18]、甜瓜^[19]上的研究结果一致。这可能与 MT 可以调节光合色素合成和转运相关基因的表达、提高叶绿素合成过程中的酶活性有关^[10]。本试验结果表明,随胁迫时间增加胶州大白菜叶片可溶性蛋白质含量呈先上升后下降的趋势,喷施不同浓度 MT 在一定程度上提高了叶片可溶性蛋白质含量,这可能是因为 MT 会调节植物的蛋白质代谢,从而影响可溶性蛋白质的合成。100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理的胶州大白菜叶片可溶性蛋白质含量最高,对高温胁迫的缓解效果最好。相对电导率反映细胞膜损坏程度,可以通过这一重要指标鉴定植物高温抗性能力的强弱^[20]。高温导致植物的水分蒸发速率加快,引起植物体内的电解质紊乱,加剧植物叶片水分流失,从而造成叶片萎蔫^[21],严重时甚至会使其死亡。高温胁迫下胶州大白菜叶片相对含水量逐渐降低,叶片相对电导率逐渐升高,说明高温破坏了细胞膜的完整性,导致膜透性增强。喷施 MT 可有效缓解高温胁迫对大白菜细胞膜系统的损伤,减少细胞膜的破裂和细胞质胞液外渗,100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理表现最好,这与前人在油菜幼苗上的研究结果一致^[21]。本试验结果表明,随胁迫时间延长,APX、SOD、CAT、POD 活性和

MDA 含量呈现先上升后下降的趋势, APX、SOD、CAT 活性在高温胁迫下前 5 d 逐渐上升之后第 7 天开始下降; POD 活性在高温胁迫下前 3 d 上升后第 5 天迅速下降, MDA 含量先上升后缓慢下降。然而, 高温胁迫第 3 天开始, 外源 MT 处理组的 SOD 和 CAT 活性均高于 CK, 10、100、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理组的 POD 活性高于 CK; MDA 含量均显著低于 CK。喷施 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 的胶州大白菜幼苗 APX 活性在第 5 天显著高于其他处理组, 自胁迫第 3 天开始, 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MT 处理组的 SOD、CAT(除第 7 天)和 POD 活性最高, MDA 含量最低。抗氧化酶活性的变化, 表明外源 MT 可以通过调节植物的抗氧化系统, 降低高温胁迫对植物的氧化损伤, 从而增强大白菜的耐热性。MDA 含量下降也许是因为抗氧化酶 APX、SOD、POD 和 CAT 活性的提高, 清除了自由基。以上结果说明, 外源 MT 通过调节植物的 MDA 含量减轻氧化应激作用, 降低了高温对胶州大白菜的损伤程度。

综上所述, 与对照相比, 喷施不同浓度的外源 MT, 能够提高胶州大白菜幼苗的生物量、叶绿素含量、可溶性蛋白质含量和多种抗氧化酶(APX、SOD、CAT)活性, 减缓了相对含水量下降和相对电导率提升, 并且显著降低了除胁迫第 1 天外 MDA 含量。同时, 不同浓度 MT 喷施的效果也存在差异, 浓度为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的外源 MT 喷施叶面效果最佳。

参考文献

- [1] 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.
- [2] ZHAO D K, WANG H P, CHEN S Y, et al. Phyto melatonin: An emerging regulator of plant biotic stress resistance[J]. Trends Plant Science, 2021, 26(1): 70-82.
- [3] ZHANG Y P, YANG S J, CHEN Y Y. Effects of melatonin on photosynthetic performance and antioxidants in melon during cold and recovery[J]. Biologia Plantarum, 2017, 61(3): 571-578.
- [4] SINGH B K, SHARMA S R, SINGH B. Antioxidant enzymes in cabbage: Variability and inheritance of superoxide dismutase, peroxidase and catalase[J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124(1): 9-13.
- [5] LI H, GUO Y L, LAN Z X, et al. Methyl jasmonate mediates melatonin-induced cold tolerance of grafted watermelon plants[J]. Horticulture Research, 2021, 8(1): 57.
- [6] POSMYK M M, BALABUSTA M, WIECZOREK M, et al. Melatonin applied to cucumber (*Cucumis sativus* L.) seeds improves germination during chilling stress[J]. Journal of Pineal Research, 2009, 46(2): 214-223.
- [7] 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.
- [8] 徐向东, 孙艳, 郭晓芹, 等. 褪黑素对高温胁迫下黄瓜幼苗抗坏血酸代谢系统的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2580-2586.
- [9] SEZER I, KIREMIT M S, OZTURK E, et al. Role of melatonin in improving leaf mineral content and growth of sweet corn seedlings under different soil salinity levels[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 288: 110376.
- [10] 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.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] HEATH R L, PACKER L. Photoperoxidation in isolated chloroplasts. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation[J]. Archives Biochemistry Biophysics, 1968, 125(1): 189-198.
- [13] ZHANG Y P, YANG S J, CHEN Y Y. Effects of melatonin on photosynthetic performance and antioxidants in melon during cold and recovery[J]. Biologia Plantarum, 2017, 61(3): 571-578.
- [14] 齐晓媛, 王文莉, 胡少卿, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下菊花光合和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2496-2504.
- [15] 曾庆栋, 许忠民, 张恩慧, 等. 外源褪黑素对高温胁迫下甘蓝幼苗生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2017(20): 12-17.
- [16] LI J J, ZENG L, CHENG Y, et al. Exogenous melatonin alleviates damage from drought stress in *Brassica napus* L. (Rapeseed) seedlings[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2018, 40(3): 43.
- [17] 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.
- [18] 刘自力, 黄一凡, 朱正波, 等. 叶面喷施褪黑素对小白菜幼苗耐性的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(4): 660-668.
- [19] 高青海, 郭远远, 吴燕, 等. 盐胁迫下外源褪黑素和 Ca^{2+} 对甜瓜幼苗的缓解效应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1925-1931.
- [20] 张景云, 赵晓东, 万新建, 等. 小白菜耐热性鉴定及其耐热性分析[J]. 核农学报, 2014, 28(1): 146-153.
- [21] ZHU J K. Salt and drought stress signal transduction in plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2002, 53: 247-273.