

# 叶面喷施褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗生长和生理特性的影响

白如意, 宋希梅, 沈 健, 贾蓝溪, 程永安, 马建祥\*, 张 显

(西北农林科技大学 园艺学院, 陕西杨凌 712100)

**摘 要:**以南瓜品种‘永安2号’幼苗为试验材料,采用室内盆栽实验,在叶面喷施不同浓度(0、50、100、150、200和300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )褪黑素(MT)后进行低温(10  $^{\circ}\text{C}$ /7  $^{\circ}\text{C}$ )胁迫处理,考察幼苗生长指标以及相对电导率、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量等抗逆生理指标的变化,初步探讨外源褪黑素缓解南瓜幼苗低温冷害的生理机制。结果表明:(1)在低温胁迫条件下,南瓜幼苗出现叶片萎蔫失水、边缘失绿褪色、向内卷曲等冷害症状;幼苗株高、茎粗、鲜重、干重和壮苗指数等生长指标及叶片相对叶绿素含量均显著降低;叶片相对电导率、MDA含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率显著升高50%以上,超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶、谷胱甘肽还原酶、脱氢抗坏血酸还原酶活性以及可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量也大多显著升高。(2)与低温胁迫处理相比,叶面喷施不同浓度褪黑素后,南瓜幼苗叶片冷害症状均得到不同程度恢复,并以100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT处理生长状态最好,植株形态表型与对照已没有明显差异;幼苗生长指标以及叶片相对叶绿素含量、6种抗氧化酶活性、3种渗透调节物质含量均不同程度提高,并随着MT浓度升高均先升后降,且均在100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT处理最高。研究发现,外源褪黑素能通过提高叶片叶绿素含量、增强抗氧化酶活性、增加渗透调节物质积累,显著降低低温冷害造成的膜质过氧化程度,有效减轻低温胁迫对南瓜幼苗的伤害,增强其抵抗低温能力,恢复幼苗的正常生长,且喷施浓度为100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时效果最佳。

**关键词:**南瓜;低温胁迫;褪黑素;生长特性;抗逆生理特性

**中图分类号:** Q945.78; S642.1 **文献标志码:** A

## Effect of Foliar Spraying Melatonin on Growth and Physiological Characteristics of Pumpkin Seedlings under Cold Stress

BAI Ruyi, SONG Ximei, SHEN Jian, JIA Lanxi,  
CHENG Yong'an, MA Jianxiang\*, ZHANG Xian

(College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** With the pumpkin variety ‘Yong’an No. 2’ seedlings as the tested material, we adopted the indoor pot experiment, sprayed different concentrations (0, 50, 100, 150, 200 and 300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) of melatonin (MT), and then carried out low temperature (10  $^{\circ}\text{C}$ /7  $^{\circ}\text{C}$ ) stress treatment, to investigate the changes of seedling growth index, relative electric conductivity, antioxidant enzyme activity, osmoregulation substance content and other physiological indexes of stress resistance, and preliminarily explore the physiological mechanism of exogenous melatonin alleviating chilling injury of pumpkin seedlings. The results showed that: (1) under cold stress, pumpkin seedlings showed symptoms of chilling injury such as leaf wilting, water loss, edge chlorosis and discoloration, inward curling, etc. The growth indexes such as plant height, stem diameter, fresh weight, dry weight and strong seedling index and the relative chloro-

收稿日期:2022-11-28;修改稿收到日期:2023-03-06

基金项目:西北农林科技大学试验站项目(TGZX2019-4)

作者简介:白如意(1997-),女,在读硕士研究生,主要从事南瓜生理生态研究。E-mail:bairuyiba@126.com

\* 通信作者:马建祥,副研究员,主要从事瓜类新品种选育和栽培技术研究。E-mail:majianxiang@126.com

phyll content of leaves were significantly decreased. The relative electric conductivity, MDA content and  $O_2^-$  production rate of leaves were significantly increased by more than 50%, and the activities of superoxide dismutase, peroxidase, catalase, ascorbic acid peroxidase, glutathione reductase, dehydroascorbic acid reductase, soluble sugar, soluble protein and proline were also significantly increased. (2) Compared with the cold stress treatment, the chilling injury symptoms of pumpkin seedling leaves were recovered to different degrees after spraying different concentrations of melatonin on the leaves, and the growth state of  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT treatment was the best, and there was no significant difference between the plant morphology and phenotype and the control. The seedling growth index, the relative chlorophyll content of leaves, the activities of six antioxidant enzymes, and the contents of three osmoregulatory substances all increased to varying degrees, and all increased first and then decreased with the increase of MT concentration, and all were the highest under  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT treatment. The study found that exogenous melatonin could increase the chlorophyll content of leaves, enhance the activities of antioxidant enzymes, increase the accumulation of osmoregulation substances, significantly reduce the degree of membrane peroxidation caused by low temperature chilling injury, effectively reduce the damage of cold stress on pumpkin seedlings, enhance their ability to resist low temperature, and restore the normal growth of seedlings, and the spraying concentration of  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  had the best effect.

**Key words:** pumpkin; cold stress; melatonin; growth characteristics; physiological characteristics of stress resistance

南瓜(*Cucurbita moschata*)是葫芦科南瓜属一年生蔓生草本植物,分布地域广,在中国各地均有种植<sup>[1]</sup>,不仅营养丰富,还具有多种食疗保健作用及药用价值<sup>[2-3]</sup>。低温是限制瓜类作物产量和品质的重要因素之一<sup>[4]</sup>。低温会改变生物膜透性,导致代谢紊乱,抑制光合作用和能量供给,引起植物体内氧化物质积累,从而抑制植物生长,降低农作物产量<sup>[5]</sup>。南瓜为喜温植物,生长适宜温度为  $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,低于  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  生长不良,在早春设施栽培时,低温及气温回暖后的倒春寒都会对南瓜幼苗发育产生影响,进而影响南瓜产量和品质<sup>[6]</sup>。因此,研究低温胁迫下怎样提高南瓜抗冷性具有重要的理论与实践意义。

褪黑素(melatonin, MT),又称松果体素,是一种重要的植物生长调节剂<sup>[7]</sup>。有研究表明,褪黑素在调控植物生长发育,帮助植物抵御干旱、高温、高盐、重金属等非生物胁迫及细菌和真菌病害方面具有重要作用<sup>[8-9]</sup>。除上述各种胁迫外,褪黑素在提高植物低温抗性方面的研究也有很多报道。如赵海亮等<sup>[10]</sup>研究发现低温下施用外源褪黑素可以平衡光系统 II 的能量分布,增强叶绿体中 AsA-GSH 循环的活性氧清除效率,进而缓解低温引起的光抑制。高青海等<sup>[11]</sup>研究发现,低温弱光下外源褪黑素可以通过提高黄瓜幼苗抗氧化酶活性、叶片质膜及液泡膜  $\text{H}^+$ -ATP 酶活性等来降低质膜过氧化水平,保持细胞膜的完整性和功能,从而增强黄瓜幼苗对低温弱光的适应性,维持其正常生长。李贺等<sup>[12]</sup>研究表明,在低温胁迫下施加外源褪黑素可以提高大豆  $V_1$

期光合速率,增加抗氧化酶活性,减轻膜脂过氧化反应并调节渗透物质含量,从而缓解低温胁迫伤害,提高大豆幼苗耐冷能力。包宇等<sup>[13]</sup>研究表明,外源褪黑素可通过增强番茄幼苗的 POD、SOD 活性和大幅度提高脯氨酸含量来降低相对电导率及 MDA 含量,使叶片细胞内的生理反应保持一种动态平衡,缓解活性氧代谢失调,以提高番茄植株的抗冷性。

目前,外源褪黑素对植物抗寒性影响的研究已经有一定的进展,但关于南瓜的相关研究较少,本试验以南瓜幼苗为材料,采用叶面喷施褪黑素的方法,研究其对低温胁迫下南瓜幼苗生长和生理指标的影响,以期进一步揭示褪黑素调控南瓜抗冷性的生理机制,同时筛选出褪黑素的适宜喷施浓度,为褪黑素在设施南瓜生产上的应用提供理论指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料及幼苗培养

试验材料为南瓜品种‘永安 2 号’,种子由西北农林科技大学园艺学院瓜类课题组提供;褪黑素购买于北京索莱宝生物科技有限公司。挑选大小一致、颗粒饱满的南瓜种子,温汤浸种  $4 \sim 6 \text{ h}$  后,用纱布包裹放入  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  恒温培养箱催芽至种子露白。发芽的种子播种至 50 孔穴盘,待幼苗长至 1 叶 1 心时,将幼苗移栽到营养钵 ( $7 \text{ cm} \times 7 \text{ cm} \times 7.5 \text{ cm}$ ) 中,每钵种植 1 株。供试土壤为蛭石和商业育苗基质(陕西杨凌裕丰种业公司)按 1:3 的体积比均匀混合而成。在光照培养箱中育苗,设置生长条

件为:昼/夜温度 28 °C/20 °C、光周期 12 h、光通量密度(PPFD)600  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,正常水分管理。至 3 叶 1 心期,选取生长均匀一致的南瓜幼苗用于试验处理,每个处理 20 株,重复 3 次。

## 1.2 试验设计

试验共设置 0、50、100、150、200 和 300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  6 个褪黑素(MT)浓度水平,并根据前人研究及前期试验结果设置常温和低温两个温度水平,昼/夜温度分别为 25 °C/15 °C 和 10 °C/7 °C。具体处理组合:(1)CK,常温处理;(2) $T_0$ ,低温处理+0  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT;(3) $T_{50}$ ,低温处理+50  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT;(4) $T_{100}$ ,低温处理+100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT;(5) $T_{150}$ ,低温处理+150  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT;(6) $T_{200}$ ,低温处理+200  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT;(7) $T_{300}$ ,低温处理+300  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT。

每天傍晚进行褪黑素叶喷处理(以叶面凝成水滴又不滴下为准),隔 1 天喷 1 次,共处理 3 次,第 3 次处理完 12 h 后进行低温处理,其他生长条件不变。低温处理 6 d 后,测定南瓜幼苗的生长指标(株高、茎粗、鲜重、干重)、叶片相对叶绿素含量和相对电导率,并采集叶片测定相关生理指标。每个处理取 5 株,重复 3 次。

## 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 生长指标** 使用直尺测量南瓜幼苗的株高(植株子叶节基部到顶部心叶的距离);使用游标卡尺测量南瓜幼苗的茎粗(与子叶展开方向平行的子叶节粗度);鲜重测定要先用自来水洗净植株,再用蒸馏水冲洗 3 遍,吸水纸擦干,用电子天平称量鲜重;干重测定需要先将南瓜幼苗置于烘箱中 105 °C 杀青 15 min,75 °C 烘干至恒重,用电子天平称取干重,据此计算壮苗指数(茎粗/株高 $\times$ 全株干重)<sup>[14]</sup>。

**1.3.2 叶绿素含量** 相对叶绿素含量用叶绿素测定仪 SPAD-502 测定<sup>[15]</sup>。选取距离幼苗生长点第 3 片完全展开叶,进行 SPAD 值测定,每张叶片选取 3 个不同位置分别读数,并取平均值。

**1.3.3 相对电导率** 采用电导仪测定<sup>[16]</sup>。取新鲜南瓜叶片 0.1 g,洗净擦干后放到加有 20 mL 去离子水的 50 mL 离心管中,室温放置 24 h,用电导仪测定水溶液的电导率  $C_1$ ;再放入 100 °C 沸水浴中 15 min,取出放入自来水冷却 10 min,在室温下测其煮沸电导率  $C_2$ ;最后根据公式( $C_1/C_2 \times 100\%$ )计算相对电导率(REC)。

**1.3.4  $\text{O}_2^-$  产生速率** 参考王爱国等<sup>[17]</sup>方法测定。称取 0.15 g 研磨均匀的叶片样品加入 3 mL 50

$\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.8 的 PBS,冰浴放置 30 min,4 °C、12 000 r/min 离心 10 min,上清液即为待测酶液。取 0.2 mL 酶液,加入 0.6 mL PBS 和 0.2 mL 盐酸羟胺,25 °C 水浴保温 20 min 后,再加 1 mL 对-氨基苯磺酸、1 mL  $\alpha$ -萘胺,25 °C 水浴 30 min 后,测定 530 nm 处的吸光度。

**1.3.5 MDA 含量** 采用硫代巴比妥酸(TBA)法<sup>[18]</sup>测定。称取 0.15 g 研磨均匀的叶片样品加入 2.5 mL 10% TCA,8 000 g 离心 15 min,然后取 1 mL 上清液加入 1 mL TBA 反应液;煮沸 15 min,拿出立刻放入冰中停止反应;10 000 g 离心 10 min 后,测定上清液在 450、532 nm 处的吸光度。

**1.3.6 SOD、POD 和 CAT 活性** 称取 0.3 g 研磨均匀的叶片样品加入 6 mL 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.8 的磷酸缓冲液,冰浴放置 30 min 后,4 °C、12 000 g 离心 10 min,上清液即为提取的粗酶液,用于超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性的测定。

(1)SOD 活性:采用氮蓝四唑(NBT)还原法<sup>[18]</sup>测定。酶反应体系为 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.8 磷酸缓冲液、136  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  甲硫氨酸、750  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  氮蓝四唑、100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  乙二胺四乙酸二钠、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  核黄素、0.5 mL 蒸馏水和 0.1 mL 粗酶液(对照加 0.1 mL 蒸馏水),其中一管对照放置黑暗条件下作空白管,将其余各管在光下反应 20 min,以空白调 0,测定反应液在 560 nm 处的吸光度。

(2)POD 活性:采用愈创木酚比色法<sup>[18]</sup>测定。酶反应体系为 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.8 磷酸缓冲液 680  $\mu\text{L}$ 、250  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  愈创木酚 100  $\mu\text{L}$ 、20  $\mu\text{L}$  酶液,最后加入 200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  启动液 200  $\mu\text{L}$ ,立即测定 470 nm 处的吸光度,每隔 15 s 读数 1 次,共测 2 min。

(3)CAT 活性:采用紫外吸收法<sup>[19]</sup>测定。酶反应体系为 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.0 磷酸缓冲液 780  $\mu\text{L}$ 、20  $\mu\text{L}$  酶液,最后加入 200  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{O}_2$  启动液 200  $\mu\text{L}$ ,立即测定 240 nm 的吸光度,每隔 10 s 读数 1 次,共测 1.5 min。

**1.3.7 APX、GR 和 DHAR 活性** 称取 0.2 g 研磨均匀的叶片样品加入 4 mL 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.5 的磷酸缓冲液,冰浴放置 30 min 后,4 °C、12 000 g 离心 10 min,上清液即为提取的粗酶液,用于抗坏血酸过氧化物酶(APX)、谷胱甘肽还原酶(GR)、脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)活性的测定。

(1)APX 活性:采用过氧化氢法<sup>[20]</sup>测定。酶反应体系为 50  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  pH 7.3 磷酸缓冲液 580

$\mu\text{L}$ 、 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  乙二胺四乙酸二钠  $100\ \mu\text{L}$ 、 $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  抗坏血酸  $100\ \mu\text{L}$ 、 $20\ \mu\text{L}$  酶液,最后加入  $5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{H}_2\text{O}_2$  启动液  $200\ \mu\text{L}$ ,立即测定  $290\text{ nm}$  的吸光度,每隔  $5\text{ s}$  读数  $1$  次,共测  $1.5\text{ min}$ 。

(2)GR 活性:采用比色法<sup>[20]</sup>测定。酶反应体系为  $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{pH}\ 8.0$  Tris-HCl  $640\ \mu\text{L}$ 、 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  乙二胺四乙酸二钠  $100\ \mu\text{L}$ 、 $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  GSSG  $120\ \mu\text{L}$ 、 $20\ \mu\text{L}$  酶液,最后加入  $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  NADPH 启动液  $120\ \mu\text{L}$ ,立即测定  $340\text{ nm}$  的吸光度,每隔  $5\text{ s}$  读数  $1$  次,共测  $1.5\text{ min}$ 。

(3)DHAR 活性:参考 Nakano Yoshiyuki 等<sup>[20]</sup>的方法测定。酶反应体系为  $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\ \text{pH}\ 7.0$  Hepes-KOH  $640\ \mu\text{L}$ 、 $25\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  还原型谷胱甘肽(GSH) $120\ \mu\text{L}$ 、 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  乙二胺四乙酸二钠  $100\ \mu\text{L}$ 、 $20\ \mu\text{L}$  酶液,最后加入  $2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  氧化态脱氢抗坏血酸(DHA)启动液  $120\ \mu\text{L}$ ,立即测定  $265\text{ nm}$  的吸光度,每隔  $10\text{ s}$  读数  $1$  次,共测  $1.5\text{ min}$ 。

**1.3.8 渗透调节物质含量** (1)游离脯氨酸含量:采用磺基水杨酸法<sup>[19]</sup>测定。称取  $0.2\text{ g}$  研磨均匀的叶片样品加入  $2\text{ mL}$  磺基水杨酸,沸水浴中提取  $10\text{ min}$ ,冷却后, $6\ 000\text{ g}$  离心  $10\text{ min}$ ;取  $1\text{ mL}$  上清,并加入  $1\text{ mL}$  蒸馏水、 $1\text{ mL}$  冰醋酸、 $2\text{ mL}$  酸性茚三酮,沸水浴中显色  $1\text{ h}$ ,冷却后加  $2\text{ mL}$  甲苯,涡旋震荡  $0.5\text{ min}$ ,静置分层,吸取红色甲苯相,在  $520\text{ nm}$  处测定吸光度。(2)可溶性蛋白含量:采用考马斯亮蓝法<sup>[19]</sup>测定。称取  $0.2\text{ g}$  研磨均匀的叶片样品,加入  $10\text{ mL}$  蒸馏水,取  $2\text{ mL}$  匀浆于离心管中, $5\ 000\text{ g}$  离心  $10\text{ min}$ ,上清液即为蛋白质提取液。吸取蛋白质提取液  $0.1\text{ mL}$ ,加入  $0.9\text{ mL}$  蒸馏水和  $5\text{ mL}$  考马斯亮蓝 G-250 试剂,充分混合,放置  $2\text{ min}$  后在  $595\text{ nm}$  比色,记录吸光值。(3)可溶性糖含量:采用蒽酮比色法<sup>[19]</sup>测定。称取  $1\text{ g}$  研磨均匀的叶片样品,放入研钵中,加入  $5\text{ mL}\ 80\%$  乙醇溶液,

$80\text{ }^\circ\text{C}$  水浴  $30\text{ min}$ ,溶液冷却到室温后  $3\ 500\text{ g}$  下离心  $10\text{ min}$ ,上清液转入  $25\text{ mL}$  容量瓶中,再向沉淀中加入  $5\text{ mL}\ 80\%$  乙醇,如上法重复提取  $2$  次,将上清液合并于  $25\text{ mL}$  容量瓶中,并定容至刻度;吸取提取液  $2\text{ mL}$ (稀释  $50$  倍, $0.1\text{ mL}$  提取液 +  $4.9\text{ mL}$  蒸馏水),与标准管同样操作(空白为  $2\text{ mL}$  蒸馏水 +  $5\text{ mL}$  蒽酮硫酸),记录  $620\text{ nm}$  吸光值。

#### 1.4 数据处理

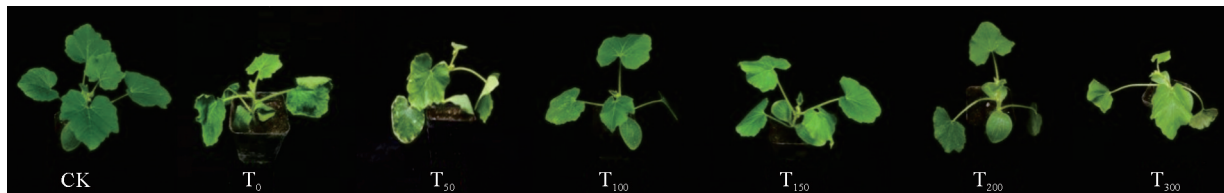
采用 Excel 2019 和 Origin 2019 进行数据整理和作图,用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析,采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗生长的影响

图 1 显示,南瓜幼苗生长在低温胁迫后受到明显抑制,叶片萎蔫失水,边缘失绿褪色,向内卷曲( $T_0$ );外源褪黑素处理可以不同程度地影响南瓜幼苗在低温胁迫下的生长状态。其中,与  $T_0$  处理相比, $T_{50}$  处理下叶片生长状况最差,叶片虽略有恢复,但边缘明显发黄干枯; $T_{100}$  处理下幼苗生长状态良好,植株表型与 CK 相比没有明显差异;随褪黑素浓度的升高( $T_{150}\sim T_{300}$ ),幼苗生长又逐渐受到抑制,叶片逐渐卷曲。

同时,从表 1 可知,与 CK 相比,低温胁迫使南瓜幼苗生长受到显著抑制( $T_0$ ),其单株株高、茎粗、鲜重、干重和壮苗指数分别下降了  $27.79\%$ 、 $20.94\%$ 、 $69.78\%$ 、 $56.76\%$  和  $51.85\%$ ,并以鲜重下降幅度最大。南瓜幼苗单株株高、茎粗、鲜重、干重和壮苗指数在不同浓度的外源褪黑素处理下均比  $T_0$  处理显著增加,且各指标均随着褪黑素浓度增加呈先增加后降低的变化趋势,并均在  $T_{100}$  处理下最大,分别是  $T_0$  处理的  $1.33$ 、 $1.23$ 、 $2.24$ 、 $1.66$  和  $1.54$  倍,并以鲜重增加最大。可见,低温胁迫显著抑



CK 表示常温下喷施清水对照, $T_0$ 、 $T_{50}$ 、 $T_{100}$ 、 $T_{150}$ 、 $T_{200}$  和  $T_{300}$  分别表示喷施  $0$ 、 $50$ 、 $100$ 、 $150$ 、 $200$ 、 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  MT 后昼夜  $10\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ }^\circ\text{C}$  低温处理。下同

图 1 叶面喷施褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗表型的影响

CK means spraying clean water at room temperature as control.  $T_0$ ,  $T_{50}$ ,  $T_{100}$ ,  $T_{150}$ ,  $T_{200}$  and  $T_{300}$  represent the low temperature treatment at  $10\text{ }^\circ\text{C}/7\text{ }^\circ\text{C}$  day and night after spraying  $0$ ,  $50$ ,  $100$ ,  $150$ ,  $200$  and  $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  MT. The same as below

Fig. 1 Effect of foliar spraying of melatonin on the phenotypes of pumpkin seedlings under cold stress

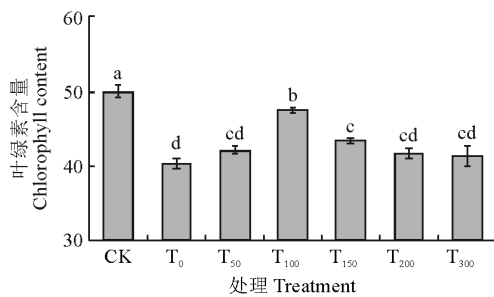
制了南瓜幼苗的生长,叶面喷施适宜浓度外源褪黑素能有效缓解低温胁迫对南瓜幼苗生长的抑制作用,并以  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT 处理效果最佳。

## 2.2 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

从图 2 可以看出,南瓜幼苗叶片相对叶绿素含量 (SPAD) 在低温处理下 (不同程度) 比 CK 显著下降 19.44%, 在不同浓度外源褪黑素处理下又比  $T_0$  处理不同程度提高, 且随着外源褪黑素浓度的升高呈先升高后下降的变化趋势, 并在  $T_{100}$  处理下叶绿素含量最高, 但仅  $T_{100}$ 、 $T_{150}$  处理与  $T_0$  处理差异显著, 而  $T_{50}$ 、 $T_{150}$ 、 $T_{200}$ 、 $T_{300}$  处理间均无显著性差异。可见, 喷施适宜浓度的外源褪黑素能显著提高低温胁迫处理下南瓜幼苗叶片叶绿素含量, 并以  $T_{100}$  处理效果最佳。

## 2.3 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和 $\text{O}_2^-$ 产生速率的影响

由图 3 可知, 南瓜叶片相对电导率、MDA 含量



柱状图上不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

图 2 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片叶绿素含量的影响

Different normal letters indicate significant differences between different treatments ( $P < 0.05$ ). The same as below

Fig. 2 Effect of exogenous MT on chlorophyll content in leaves of pumpkin seedling under cold stress

表 1 叶面喷施褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗生长的影响

Table 1 Effect of foliar spraying of MT on growth characteristics of pumpkin seedlings under cold stress

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/cm	鲜重 Fresh weight/g	干重 Dry weight/g	壮苗指数 Seedling index
CK	13.53 ± 0.18a	4.87 ± 0.03a	11.25 ± 0.42a	0.74 ± 0.04a	0.27 ± 0.01a
$T_0$	9.77 ± 0.12e	3.85 ± 0.08c	3.40 ± 0.12e	0.32 ± 0.01d	0.13 ± 0.01d
$T_{50}$	11.17 ± 0.26c	4.41 ± 0.09b	6.69 ± 0.24c	0.43 ± 0.05c	0.17 ± 0.02bc
$T_{100}$	12.97 ± 0.18a	4.75 ± 0.04a	7.63 ± 0.20b	0.53 ± 0.02b	0.20 ± 0.01b
$T_{150}$	12.03 ± 0.32b	4.42 ± 0.10b	6.61 ± 0.18c	0.44 ± 0.02bc	0.16 ± 0.01cd
$T_{200}$	11.40 ± 0.25bc	4.27 ± 0.05b	5.84 ± 0.25d	0.37 ± 0.02cd	0.14 ± 0.01cd
$T_{300}$	10.43 ± 0.09d	4.03 ± 0.06c	5.18 ± 0.10d	0.36 ± 0.02cd	0.14 ± 0.01cd

注: 同列不同的小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同

Note: The different normal letters in same column indicate significant differences ( $P < 0.05$ ). The same as below

和  $\text{O}_2^-$  产生速率在  $T_0$  处理下均显著高于 CK, 分别增加 60.40%、84.25% 和 52.94%。叶面不同浓度喷施褪黑素均能不同程度降低低温胁迫下南瓜叶片相对电导率、MDA 含量和  $\text{O}_2^-$  产生速率, 且降低幅度随着褪黑素浓度的增加先降低后升高, 并在  $T_{100}$ 、 $T_{150}$ 、 $T_{200}$  处理下降幅均达到显著水平, 其中以  $T_{100}$  处理效果最佳, 分别比  $T_0$  处理显著降低 29.59%、

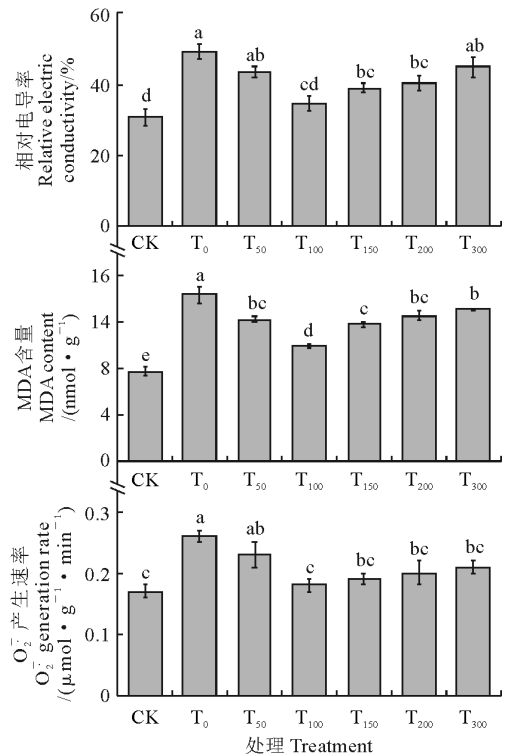


图 3 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片相对电导率、MDA 含量和  $\text{O}_2^-$  产生速率的影响

Fig. 3 Effect of exogenous MT on relative electric conductivity, MDA content and  $\text{O}_2^-$  generation rate in leaves of pumpkin seedling under cold stress

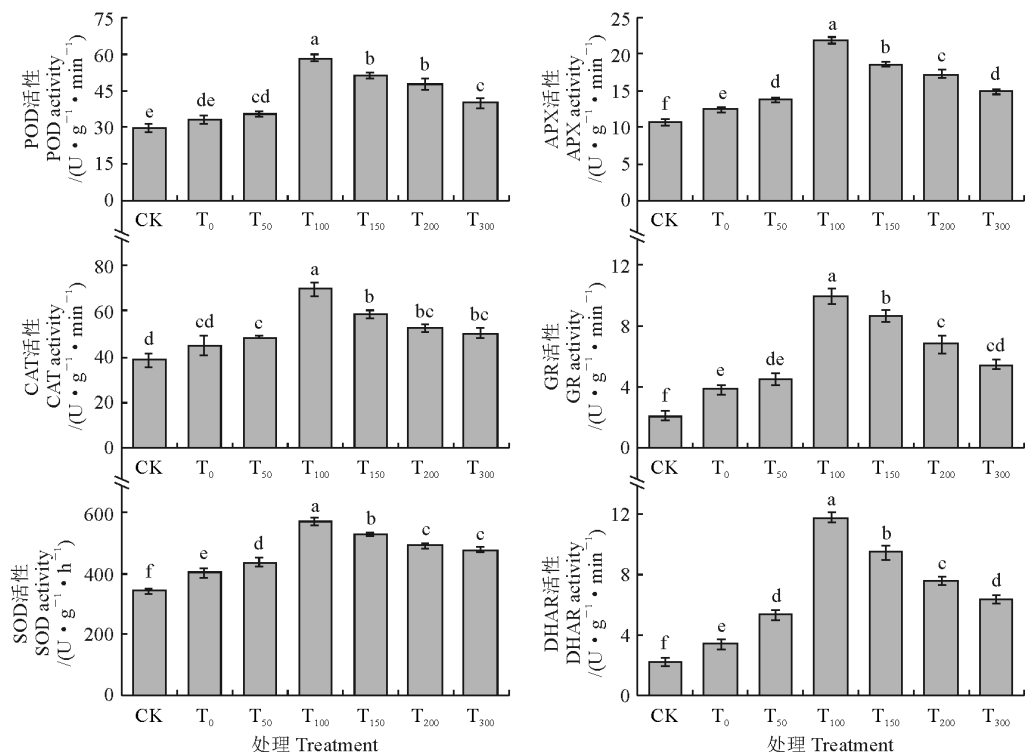


图4 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effect of exogenous MT on antioxidant enzyme activities in leaves of pumpkin seedling under cold stress

30.37%和30.77%。可见,喷施适宜浓度的褪黑素能有效减轻低温胁迫对南瓜幼苗生长造成的伤害,浓度过高反而会削弱缓解效果。

#### 2.4 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

从图4可以看出,南瓜幼苗叶片SOD、POD、CAT、APX、GR和DHAR的活性在低温胁迫下(T<sub>0</sub>)都比CK有不同程度的提高,且增幅除CAT、POD活性外均达到显著水平;同时,叶面喷施不同浓度褪黑素后南瓜幼苗叶片SOD、POD、CAT、APX、GR和DHAR的活性均比相应的T<sub>0</sub>处理不同程度升高,且增幅大多达到显著水平;6种酶活性均随着褪黑素浓度的增加而先升高后下降,并均在T<sub>100</sub>处理下保持最高水平,分别比相应T<sub>0</sub>处理显著提高75.87%、54.91%、41.52%、75.76%、160.21%和240.46%。以上结果表明适宜浓度褪黑素能显著提高低温胁迫下南瓜幼苗相关抗氧化酶活性,从而增强其抵抗低温胁迫的能力,并以T<sub>100</sub>处理效果最佳。

#### 2.5 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片渗透调节物质含量的影响

图5显示,经过低温胁迫后,南瓜幼苗叶片渗透物质含量都比CK有一定程度的提高,且可溶性糖和可溶性蛋白含量与CK相比增幅均达到显著水平;

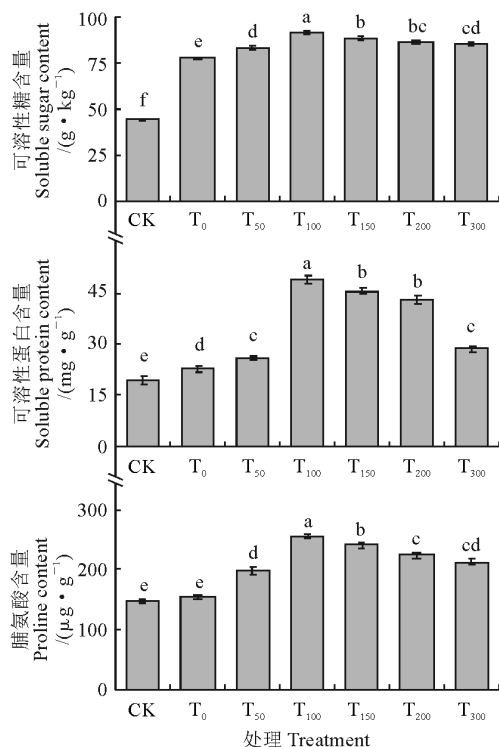


图5 外源褪黑素对低温胁迫下南瓜幼苗叶片可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量的影响

Fig. 5 Effect of exogenous MT on soluble sugar, soluble protein and proline contents in leaves of pumpkin seedling under cold stress

同时,幼苗叶片各渗透物质含量在叶面喷施不同浓度外源褪黑素后均比  $T_0$  处理显著提高,且随着褪黑素浓度增加先升高后降低,并均在  $T_{100}$  处理下含量最高,此时可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量分别比相应  $T_0$  处理提高 17.82%、115.73% 和 65.56%。可见,低温胁迫能诱导南瓜幼苗叶片渗透物质含量的增加,喷施不同浓度的外源褪黑素能有效显著提高低温胁迫下南瓜叶片渗透物质的含量,进一步增强幼苗抵御低温胁迫的能力。

### 3 讨论

低温是植物生长发育过程中常见的自然灾害之一,低温胁迫会抑制光合电子传递进而导致活性氧(ROS)的积累,使植物生长受到抑制,并影响生物量的积累<sup>[21]</sup>。褪黑素在植物的生长发育中发挥着重要作用,不仅促进植物种子萌发及幼苗生长,还能提高植物对低温、干旱等非生物胁迫的耐受性,缓解胁迫对植物生长的抑制作用<sup>[22]</sup>。在本试验中,南瓜幼苗的生长在低温胁迫下(10 °C/7 °C)受到显著抑制,而在叶面喷施不同浓度的褪黑素后,幼苗株高、茎粗、鲜重、干重等明显增加,并以 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT 处理增幅最大,这与李欠敏等<sup>[23]</sup>发现适宜浓度的外源褪黑素能增强大白菜幼苗低温耐受性的结论类似。同时,叶绿体是光合作用的重要场所,其叶绿素含量的高低是反映植物光合能力的一个重要指标<sup>[24]</sup>。本试验结果表明,南瓜幼苗叶片的相对叶绿素含量(SPAD)在低温胁迫下显著降低,在外源褪黑素处理后又显著升高,仍以 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT 处理效果最佳,这与侯雯关于褪黑素能提高低温胁迫下玉米 SPAD 值的研究结论相似<sup>[25]</sup>。这表明外源褪黑素能缓解低温胁迫引起的南瓜幼苗叶片叶绿素降解,有效减轻低温胁迫对南瓜幼苗生长的抑制作用,从而促进南瓜幼苗生长,且以 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT 处理效果最佳。

当植物受到低温胁迫后,活性氧产生和清除的平衡受到破坏,活性氧大量积累,加剧膜脂过氧化作用,使膜的结构和功能遭到破坏,引起一系列生理生化代谢紊乱,进而影响植物生长发育<sup>[26-28]</sup>。许多研究证明,MDA 含量、相对电导率和  $\text{O}_2^-$  产生速率可以反映出细胞膜受到外界逆境伤害的程度以及植物的抗逆性<sup>[29-30]</sup>。同时 SOD、POD、CAT、APX、GR、DHAR 等抗氧化酶能有效清除过量积累的活性氧,

减轻其对细胞膜系统的伤害,抑制膜脂过氧化,从而减轻逆境胁迫对植物细胞的伤害<sup>[31-33]</sup>。本试验利用不同浓度外源褪黑素喷施南瓜叶片,发现 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  MT 处理能够显著降低低温胁迫下南瓜叶片中  $\text{O}_2^-$  产生速率、相对电导率和 MDA 含量,说明外源褪黑素处理可能是通过维持细胞膜的稳定,减轻低温对南瓜幼苗细胞膜的伤害,从而提高南瓜的耐冷性。本试验研究结果同时表明,在低温胁迫下,叶面喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素后南瓜叶片中 SOD、POD、CAT、APX、GR、DHAR 等抗氧化酶活性显著提高,这说明适宜浓度的褪黑素可以提高南瓜叶片抗氧化酶活性,降低细胞膜脂过氧化程度,从而增强南瓜幼苗耐低温性能,这与吴雪霞等<sup>[34]</sup>发现适宜浓度的外源褪黑素可以显著提高茄子叶片中 APX、GR、DHAR 等活性的结论类似。推测褪黑素可能通过调控南瓜幼苗抗氧化酶相关基因表达量,从而调节抗氧化酶的活性,其分子调控机制还需要进一步深入研究。

渗透调节物质是植物抵御外界伤害的防御物质<sup>[35]</sup>。在低温胁迫下,植物通过积累渗透调节物质来调节细胞渗透势,以维持正常的细胞膜结构和各种酶类物质的正常功能<sup>[36]</sup>。可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸是植物细胞内重要的渗透调节物质,通过调节渗透浓度来启动脱落酸的合成,诱发蛋白质的合成,增加抗寒性<sup>[37]</sup>。吴燕等<sup>[38]</sup>研究发现亚低温条件下外源褪黑素和  $\text{Ca}^{2+}$  浸种处理显著促进了西瓜幼苗渗透调节物质可溶性糖和脯氨酸的积累。本研究也发现,低温胁迫下,褪黑素处理明显提高了南瓜叶片中可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量,其中 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素处理效果更为明显,说明叶面喷施褪黑素可以通过诱导南瓜叶片渗透调节物质的积累,维持渗透势平衡,从而提高南瓜抵抗低温能力。

综上所述,在 10 °C/7 °C 低温胁迫下,叶面喷施 100  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  褪黑素能够显著提高叶片叶绿素含量,降低 MDA 含量、相对电导率和  $\text{O}_2^-$  产生速率,提高叶片 SOD、POD、CAT、APX、GR、DHAR 等抗氧化酶活性,促进叶片可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质的积累,从而提高南瓜幼苗低温抗性,促进南瓜幼苗的正常生长。本研究结果为实际生产中南瓜抗寒栽培提供了理论依据和技术支持,并为南瓜的抗寒分子育种奠定了理论基础。

## 参考文献:

- [1] 阳习鹏, 朱卓婷, 姜艳芳, 等. 弱光胁迫对南瓜幼苗光合特性的影响[J]. 现代农业科技, 2022(7): 45-48, 53.  
YANG X P, ZHU Z P, JIANG Y F, *et al.* Effects of low light stress on photosynthetic characteristics of pumpkin seedlings[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022 (7): 45-48, 53.
- [2] 熊玲, 陈京晓, 牟明远, 等. 南瓜的营养保健价值分析及产品的开发现状[J]. 食品工业科技, 2013, 34(23): 395-400.  
XIONG L, CHEN J X, MOU M Y, *et al.* Pumpkin nutrition and health value analysis and product development[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(23): 395-400.
- [3] 郭文忠, 李锋, 秦垦, 等. 南瓜的价值及抗逆栽培生理研究进展[J]. 长江蔬菜, 2002, (9): 30-32.  
GUO W Z, LI F, QIN K, *et al.* The progress of cultivation physiology of stress-resistance in pumpkin and its value[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2002, (9): 30-32.
- [4] 李凤梅, 张洪亮, 崔健, 等. 低温胁迫对砧用南瓜生理生化指标的影响[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 43-51.  
LI F M, ZHANG H L, CUI J, *et al.* Effects of low temperature stress on physiological and biochemical indexes of pumpkin rootstock seedlings[J]. *Journal of Qingdao University of Science and Technology* (Natural Science Edition), 2019, 40(3): 43-51.
- [5] 郭延亮. 褪黑素在嫁接调控西瓜耐冷中的作用及其机理[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [6] 吴旭红, 吕成敏, 冯晶曼. 外源一氧化氮(NO)对低温胁迫下南瓜幼苗氧化损伤的保护效应[J]. 草业学报, 2016, 25(12): 161-169.  
WU X H, LÜ C M, FENG J M. Protective effect of exogenous nitric oxide against oxidative damage in pumpkin seedlings under chilling stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(12): 161-169.
- [7] AGUILERA Y, HERRERA T, LIÉBANA R, *et al.* Impact of melatonin enrichment during germination of legumes on bioactive compounds and antioxidant activity[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 63(36): 7 967-7 974.
- [8] 张融雪, 孙玥, 苏京平, 等. 植物褪黑素研究进展[J]. 生物技术进展, 2021, 11(3): 297-303.  
ZHANG R X, SUN Y, SU J P, *et al.* Research progress on plant melatonin[J]. *Current Biotechnology*, 2021, 11(3): 297-303.
- [9] DEBNATH B, ISLAM W, LI M, *et al.* Melatonin mediates enhancement of stress tolerance in plants[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(5): 1 040.
- [10] 赵海亮, 左璐, 张璐, 等. 低温胁迫下外源褪黑素对番茄幼苗光抑制的缓解效应[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 151-159.  
ZHAO H L, ZUO L, ZHANG L, *et al.* Mitigation of exogenous melatonin on photoinhibition of tomato seedlings under chilling stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(1): 151-159.
- [11] 高青海, 王亚坤, 陆晓民, 等. 低温弱光下外源褪黑素对黄瓜幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(8): 1 608-1 613.  
GAO Q H, WANG Y K, LU X M, *et al.* Effects of exogenous melatonin on growth and antioxidant system of leaves in cucumber seedlings under low temperature and weak light stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(8): 1 608-1 613.
- [12] 李贺, 姜欣悦, 陈忠诚, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下大豆V<sub>1</sub>期幼苗光合荧光及抗氧化系统的影响[J]. 中国油料作物学报, 2020, 42(4): 640-648.  
LI H, JIANG X Y, CHEN Z C, *et al.* Effects of exogenous melatonin on photosynthetic fluorescence and antioxidant system of soybean V<sub>1</sub> seedlings under low temperature[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2020, 42(4): 640-648.
- [13] 包宇, 罗庆熙, 黄娟, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下番茄幼苗生理指标的影响[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(10): 57-61.  
BAO Y, LUO Q X, HUANG J, *et al.* On effect of exogenous melatonin on physiological indexes of tomato seedling under low temperature stress[J]. *Journal of Southwest China Normal University* (Natural Science Edition), 2013, 38(10): 57-61.
- [14] 张振贤, 王培伦, 刘世琦. 蔬菜生理[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1993: 38-39.
- [15] 郝学明, 王响铃, 宋柏权, 等. 甜菜叶片SPAD值和光合色素的相关性研究[J]. 农学学报, 2019, 9(10): 65-70.  
HAO X M, WANG X L, SONG B Q, *et al.* Correlation analysis of SPAD value and photosynthetic pigment in sugarbeet leaves[J]. *Journal of Agriculture*, 2019, 9(10): 65-70.
- [16] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1998.
- [17] 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, 26(6): 55-57.  
WANG A G, LUO G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1990, 26(6): 55-57.
- [18] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] 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.
- [20] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [21] DAT J, VANDENABEELE S, VRANOVÁ E, *et al.* Dual action of the active oxygen species during plant stress responses[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences CMLS*, 2000, 57(5): 779-795.
- [22] TIWARI R K, LAL M K, NAGA K C, *et al.* Emerging roles of melatonin in mitigating abiotic and biotic stresses of horticultural crops[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 272: 109 592.



- [23] 李欠敏, 杨琳, 段巧红, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下大白菜幼苗生长及生理特性的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, **52**(2): 182-186.  
LI Q M, YANG L, DUAN Q H, *et al.* Effects of exogenous melatonin on the growth and physiological characteristics of Chinese cabbage seedlings under chilling stress[J]. *Journal of Shandong Agricultural University* (Natural Science Edition), 2021, **52**(2): 182-186.
- [24] 李雪梅, 黄禹翕, 蔡晓婧, 等. 外源氯化钙对铅胁迫下水稻幼苗生长、SPAD值和荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, **50**(14): 73-79.  
LI X M, HUANG Y X, CAI X J, *et al.* Impacts of exogenous  $\text{CaCl}_2$  on growth, SPAD and fluorescence characteristics of rice seedlings under lead stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, **50**(14): 73-79.
- [25] 侯雯, 杜卓, 王丽, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国糖料, 2020, **42**(2): 33-37.  
HOU W, DU Z, WANG L, *et al.* Effects of exogenous melatonin on maize seedlings growth and physiological traits under low temperature stress[J]. *Sugar Crops of China*, 2020, **42**(2): 33-37.
- [26] 唐鸿吕, 杨顺, 许忠民, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下甘蓝幼苗生理特性的影响[J/OL]. 分子植物育种: 1-12[2023-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211220.1424.004.html>.  
TANG H L, YANG S, XU Z M, *et al.* Effects of exogenous melatonin on the physiological characteristics of cabbage seedlings under low temperature stress[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*: 1-12[2023-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20211220.1424.004.html>.
- [27] 王会良, 何华平, 龚林忠, 等. 植物抗寒性研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, **50**(6): 1 091-1 094, 1 100.  
WANG H L, HE H P, GONG L Z, *et al.* Research progress on cold resistance of plant[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2011, **50**(6): 1 091-1 094, 1 100.
- [28] MITTLER R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2002, **7**(9): 405-410.
- [29] 朱晓丹. 不同乌菜品种在低温胁迫下的生理响应[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2017.
- [30] 毛志滨, 谢晓金, 汤庚国. 7种冬青树种耐低温能力比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, **30**(1): 33-36.  
MAO Z B, XIE X J, TANG G G. The comparison of low temperature tolerance ability of seven species of *Ilex* trees[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2006, **30**(1): 33-36.
- [31] AYYAZ A, FAROOQ M A, *et al.* Exogenous melatonin regulates chromium stress-induced feedback inhibition of photosynthesis and antioxidative protection in *Brassica napus* cultivars[J]. *Plant Cell Reports*, 2021, **40**(11): 2 063-2 080.
- [32] SAMANTA S, BANERJEE A, ROYCHOUDHURY A. Melatonin application differentially modulates the enzymes associated with antioxidative machinery and ascorbate-glutathione cycle during arsenate exposure in indica rice varieties[J]. *Plant Biology* (Stuttgart, Germany), 2020, **23**(Suppl 1): 193-201.
- [33] 尉欣荣, 张智伟, 周雨, 等. 褪黑素对低温和干旱胁迫下多年生黑麦草幼苗生长和抗氧化系统的调节作用[J]. 草地学报, 2020, **28**(5): 1 337-1 345.  
YU X R, ZHANG Z W, ZHOU Y, *et al.* Effects of melatonin on growth and antioxidant system of perennial ryegrass seedlings under cold and drought stresses[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, **28**(5): 1 337-1 345.
- [34] 吴雪霞, 朱宗文, 张爱冬, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下茄子幼苗生长及其光合作用和抗氧化系统的影响[J]. 西北植物学报, 2017, **37**(12): 2 427-2 434.  
WU X X, ZHU Z W, ZHANG A D, *et al.* Effects of exogenous melatonin on the growth, photosynthesis and antioxidant system in eggplant (*Solanum melongena* L.) seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, **37**(12): 2 427-2 434.
- [35] 韦安星. 外源褪黑素对低温胁迫玉米幼苗生理特性的影响[J]. 农业工程技术, 2022, **42**(23): 18, 20.  
WEI A X. Effects of exogenous melatonin on physiological characteristics of maize seedlings under low temperature stress[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, **42**(23): 18, 20.
- [36] 和秋兰, 张航, 王正维, 等. 外源褪黑素对低温胁迫下马铃薯幼苗抗氧化系统的影响[J]. 华北农学报, 2022, **37**(1): 103-111.  
HE Q L, ZHANG H, WANG Z W, *et al.* Effects of exogenous melatonin on antioxidant system of potato seedlings under low temperature stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2022, **37**(1): 103-111.
- [37] 李春燕, 陈思思, 徐雯, 等. 苗期低温胁迫对扬麦16叶片抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J]. 作物学报, 2011, **37**(12): 2 293-2 298.  
LI C Y, CHEN S S, XU W, *et al.* Effect of low temperature at seedling stage on antioxidation enzymes and cytoplasmic osmoticum of leaves in wheat cultivar Yangmai 16[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, **37**(12): 2 293-2 298.
- [38] 吴燕, 耿书德, 王向向, 等. 亚低温条件下外源褪黑素和  $\text{Ca}^{2+}$  对西瓜幼苗生理特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, **35**(2): 61-66.  
WU Y, GENG S D, WANG X X, *et al.* Effects of exogenous melatonin and  $\text{Ca}^{2+}$  on physiological characteristics of watermelon seedlings under sub-low temperature[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2022, **35**(2): 61-66.