DOI:10.16861/j.cnki.zggc.2026.0035

外源褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗生长的影响

龚 攀,刘 格,楚晓真,刘 璇,梁 峥,琚志君,田朝辉

(郑州市农业科技研究院 郑州 450000)

摘 要:为探究低温胁迫下褪黑素对苦瓜幼苗生长及其生理特性的影响,以不同浓度(0、50、100、150、200 μmol·L^{-1})褪黑素处理低温胁迫下的苦瓜幼苗,测定其生长指标、光合特性、叶绿素相对含量及抗氧化酶活性等生理指标。结果表明,在低温 10 ℃胁迫处理 5 d 条件下,苦瓜幼苗生长受到抑制,光合作用能力下降,与常温(25 ℃)对照相比,苦瓜幼苗叶绿素相对含量显著降低 13.87%,可溶性糖、可溶性蛋白及丙二醛含量分别显著升高 15.64%、10.55%、44.58%。叶面喷施褪黑素后,苦瓜幼苗生长指标均有不同程度提高,光合作用能力增强,并以 T100(100 μmol·L^{-1}褪黑素处理)和 T150(150 μmol·L^{-1}褪黑素处理)效果最佳。T100 处理的苦瓜幼苗叶长、叶宽、株高、鲜质量和干质量分别比 T0 处理(0 μmol·L^{-1}褪黑素处理)显著提高 7.29%、5.86%、46.74%、48.08%、65.00%;叶绿素相对含量及可溶性糖、可溶性蛋白含量分别比 T0 处理显著提高 16.79%、9.12%、13.36%,丙二醛含量比 T0 处理显著降低 25.61%;苦瓜幼苗抗氧化酶活性显著提高,以 T150 处理效果最佳,其 POD、SOD、CAT 活性分别比 T0 处理显著提高 59.90%、82.11%、194.74%。综上,100~150 μmol·L^{-1}的外源 MT 能有效缓解苦瓜幼苗的低温胁迫。本研究结果为苦瓜幼苗低温胁迫下的健壮生长奠定了基础。

关键词:苦瓜;褪黑素;低温胁迫;表型性状;生理指标

中图分类号:S642.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-2871(2026)10-109-06

Effects of exogenous melatonin on the growth of bitter gourd seedlings under low-temperature stress

Gong Pan, Liu Ge, Chu Xiaozhen, Liu Xuan, Liang Zheng, Ju Zhijun, Tian Zhaohui

(*Zhengzhou Institute of Agricultural and Technology Science, Zhengzhou 450000, Henan, China*)

Abstract: To explore the effects of exogenous melatonin on the growth and physiological characteristics of bitter gourd seedlings under 10 ℃ low-temperature stress for 5 d, seedlings were treated with different concentrations melatonin(0, 50, 100, 150 and 200 μmol·L^{-1}). Growth parameters, photosynthetic characteristics, relative chlorophyll content and activities of antioxidant enzymes were measured. The results showed that low-temperature stress inhibited seedling growth and impaired photosynthetic capacity of bitter gourd. Compared with the control at normal temperature(25 ℃), the relative chlorophyll content of seedlings significantly decreased by 13.87%, while the content of soluble sugar, soluble protein and malondialdehyde significantly increased by 15.64%, 10.55% and 44.58%, respectively. Foliar spraying with exogenous melatonin improved various growth performance and photosynthetic capacity to varying degrees, with the optimal effects observed under T100 (100 μmol·L^{-1}) and T150 (150 μmol·L^{-1}) treatments. Compared with the T0 treatment (0 μmol·L^{-1}), the T100 treatment significantly increased leaf length, leaf width, plant height, fresh mass and dry mass by 7.29%, 5.86%, 46.74%, 48.08% and 65.00%, respectively. Additionally, chlorophyll, soluble sugar and soluble protein content significantly increased by 16.79%, 9.12%, and 13.36%, respectively, while MDA content significantly decreased by 25.61%. In addition, melatonin significantly promoted the activities of antioxidant enzymes, and the T150 treatment achieved the maximum improvement, with POD, SOD and CAT activities rising by 59.90%, 82.11% and 194.74%, respectively, compared with the T0 treatment. In conclusion, exogenous MT at 100-150 μmol·L^{-1} effectively mitigates low-temperature injury in bitter gourd seedlings. These findings lay a foundation for promoting the robust growth of bitter gourd seedlings under low-temperature conditions.

Key words: Bitter gourd; Melatonin; Low-temperature stress; Phenotypic trait; Physiological indicator

收稿日期:2026-01-14;**修回日期:**2026-06-08

基金项目:河南省科技攻关项目(242102110306);国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-23)

作者简介:龚 攀,男,副研究员,主要从事蔬菜栽培及育种研究。E-mail:gongpan-01@163.com

苦瓜（*Momordica charantia* L.）是葫芦科苦瓜属一年生草本植物，因其果实内含有苦瓜苷而具有特殊的苦味得名。苦瓜主要分布于热带、亚热带和温带地区，在我国南北方各地均广泛种植。苦瓜作为世界性重要蔬菜作物，富含维生素C、膳食纤维、粗蛋白、氨基酸等营养物质，同时还含有皂苷、酚类、黄酮和多糖等化合物，具有清热解毒、养血滋肝、抗菌和抗病毒等药用价值[1]。苦瓜是一种喜温作物，北方早春种植时容易遇到冷害，造成种子活力下降、发芽率低、幼苗停止生长、叶片发黄和根茎萎缩等问题，严重影响苦瓜产量和品质[2]。

褪黑素（melatonin，MT）是一种广泛存在于动植物体内的吲哚胺类物质，对动植物的生长发育具有重要调控作用[3]。研究表明，褪黑素在植物逆境响应中具有重要作用，能够提高植物对干旱[4]、高温[5]、冷害[6]、盐胁迫[7]和重金属[8]的耐受性，清除植株体内的自由基，保护叶绿素，并在一定程度上促进植物生长。目前关于褪黑素缓解植物低温胁迫的报道较多。白如意等[9]研究表明，外源褪黑素能显著降低低温胁迫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，增强其抵抗低温的能力。研究表明，外源褪黑素能促进渗透调节物质的积累，缓解低温胁迫对茄子幼苗生长的抑制作用[10]。唐鸿吕[11]研究表明，在低温条件下，外源添加褪黑素可显著增加甘蓝株高、茎粗及提高壮苗指数，增强其耐冷性。雷云[12]研究表明，叶面喷施褪黑素能够有效缓解低温胁迫对辣椒生长的抑制作用。冯一清等[13]研究表明，叶面喷施75 μmol·L^{-1}褪黑素可促进低温下日光温室黄瓜光系统和卡尔文循环，减轻低温对叶片光合机构的伤害，从而提高日光温室黄瓜耐冷性。曾春涛等[14]研究发现，在低温胁迫条件下，施加外源褪黑素可以提高豇豆种子的发芽率，促进渗透调节物质的积累，有效缓解低温胁迫对豇豆种子萌发时的损伤，增强其对低温的耐受性。

目前，外源褪黑素对缓解植物低温胁迫的研究已有一定的进展，但关于褪黑素缓解苦瓜幼苗低温胁迫的研究尚未见报道，鉴于此，笔者探究了不同浓度褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗生长及生理指标的影响，以期为苦瓜早春高效栽培提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验苦瓜材料选用KG899，由郑州市农业科技研究院提供，试验于2024年3—5月在郑州市农业科技研究院马寨园区进行。

1.2 试验设计

挑选大小一致、颗粒饱满的苦瓜种子，用55 ℃温水浸泡30 min，然后在清水中浸泡12 h，用湿毛巾包裹后放入种子催芽箱（28~30 ℃）中催芽2 d，播种于50孔穴盘中育苗，待苦瓜幼苗长至2叶1心时期，将其移栽到营养钵中，每钵1株，育苗以及植株生长使用的育苗基质来自寿光市恒先农业科技有限公司，将营养钵置于恒温光照培养箱中，设置25 ℃，光周期为12 h光照/12 h黑暗，正常水分管理，待幼苗长至4叶1心时，挑选长势一致的幼苗进行处理。试验共设置6个处理。CK：25 ℃常温处理；T0：低温处理+0 μmol·L^{-1}褪黑素溶液；T50：低温处理+50 μmol·L^{-1}褪黑素溶液；T100：低温处理+100 μmol·L^{-1}褪黑素溶液；T150：低温处理+150 μmol·L^{-1}褪黑素溶液；T200：低温处理+200 μmol·L^{-1}褪黑素溶液。用褪黑素溶液进行喷施（T0用蒸馏水喷施），每个处理5株，3次重复，喷施标准为叶面湿润且不滴水，每2 d喷1次，处理3次，最后1次处理后将其进行低温处理，温度为10 ℃，其他条件不变，处理5 d，其间正常浇水。5 d后取出幼苗，将叶片用液氮速冻后置于−80 ℃冰箱保存，用于测定相关生理生化指标。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 株高、茎粗、鲜质量、干质量的测定 处理5 d结束后，用直尺测量株高（根茎部到顶端生长点的高度）；使用游标卡尺测量茎粗（子叶节下胚轴的粗度）；鲜质量（地上部和地下部）使用电子天平称量，洗净根部上的基质，用吸水纸吸干水分后测量；干质量（地上部和地下部）使用电子天平称量，将幼苗放入烘箱中105 ℃杀青30 min，85 ℃烘干至恒质量后测量。

1.3.2 植株光合特性的测定 处理5 d结束后，使用FS-3080D Pro光合作用测定仪测定苦瓜幼苗自生长点向下第3片完全展开叶的净光合速率（P_n）、气孔导度（G_s）、蒸腾速率（T_r）和胞间CO_2浓度（C_i）。

1.3.3 叶绿素相对含量、可溶性糖和可溶性蛋白含量的测定 叶绿素相对含量采用SPAD-502便携式叶绿素测定仪测定；可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定，可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定[15]。

1.3.4 叶片中丙二醛含量和抗氧化酶活性的测定 用试剂盒检测叶片中丙二醛（MDA）含量（货号：BC0020）及CAT（货号：BC0200）、POD（货号：BC0090）、SOD（货号：BC0170）活性，所用试剂盒均

购自索莱宝生物科技有限公司。

1.4　数据分析

采用 Excel 2019 和 SPSS 16.0 处理试验数据，采用 Origin 2019 软件作图。

2　结果与分析

2.1　褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗生长的影响

从表 1 可以看出，T0 处理下的苦瓜幼苗叶长、叶宽和株高均显著低于 CK，说明低温会抑制苦瓜幼苗的生长。随着褪黑素浓度的升高，叶长、叶宽、茎粗和株高表现为先升高后降低的变化趋势，其中 T100 或 T150 处理下幼苗的株高、叶长和叶宽达到最大值，且显著高于 T0 处理，但与 CK 无显著差异。由此可见，叶面喷施适宜浓度褪黑素能有效缓解低温胁迫对苦瓜幼苗生长的抑制作用，并以 100~150 μmol·L^{-1} 的褪黑素处理效果最佳。此外，各处理间茎粗无显著差异，说明低温对苦瓜幼苗的茎粗无显著影响。

表 1　MT 处理对低温胁迫下苦瓜幼苗表型的影响

Table 1　Effects of MT treatment on the phenotype of bitter gourd seedlings under low-temperature stress

处理 Treatment	叶长 Leaf length/mm	叶宽 Leaf width/mm	茎粗 Stem diameter/mm	株高 Plant height/cm
CK	43.32±0.55 a	53.17±0.92 a	3.42±0.30 a	15.86±0.07 a
T0	40.21±1.26 c	50.20±1.27 c	3.22±0.12 a	13.32±0.75 bc
T50	41.42±0.73 bc	51.50±0.82 b	3.41±0.11 a	14.17±0.31 b
T100	43.14±1.17 a	52.19±0.38 ab	3.23±0.30 a	15.55±0.37 a
T150	43.14±0.93 a	53.14±0.63 a	3.27±0.12 a	15.45±0.29 a
T200	41.43±0.46 b	51.47±0.60 bc	3.14±0.10 a	14.01±0.11 b

注：同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2　褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗干物质积累的影响

从表 2 可以看出，与 CK 相比，T0 处理下的整株鲜质量、地上鲜质量、地下鲜质量、整株干质量、地上干质量、地下干质量均显著降低，说明低温会抑制苦瓜幼苗干物质的积累，随着褪黑素浓度的升高，幼苗的整株鲜质量、地上鲜质量、地下鲜质量、整株干质量、地上干质量、地下干质量均表现出先升高后降低的趋势，除地上鲜质量外，均在 T100 处理下达到最大值，较 T0 处理分别显著提高 48.08%、50.17%、42.80%、65.00%、67.07%、57.14%，且显著高于 T200 处理，与 CK、T50、T150 处理均无显著差异，说明适宜浓度的褪黑素有利于缓解苦瓜幼苗的低温胁迫，促进幼苗干物质的积累。不同处理间根冠比无显著差异，说明低温胁迫对苦瓜幼苗根冠比的影响较小。

表 2　MT 处理对低温胁迫下苦瓜幼苗干物质累积的影响

Table 2　Effects of MT treatment on the dry matter accumulation of bitter gourd seedlings under low-temperature stress

处理 Treatment	整株鲜质量 The whole plant fresh mass/g	地上鲜质量 Aboveground fresh mass/g	地下鲜质量 Fresh root mass/g	整株干质量 The whole plant dry mass/g	地上干质量 Aboveground dry mass/g	地下干质量 Dry root mass/g	根冠比 Root-shoot ratio
CK	2.283±0.166 a	1.711±0.148 a	0.572±0.028 b	0.303±0.018 a	0.252±0.017 a	0.051±0.002 a	0.201±0.010 a
T0	1.643±0.053 b	1.178±0.016 b	0.465±0.041 c	0.200±0.009 b	0.164±0.006 b	0.035±0.004 b	0.215±0.016 a
T50	2.359±0.115 a	1.741±0.084 a	0.618±0.036 ab	0.306±0.014 a	0.254±0.012 a	0.051±0.002 a	0.202±0.001 a
T100	2.433±0.009 a	1.769±0.078 a	0.664±0.031 a	0.330±0.034 a	0.274±0.029 a	0.056±0.005 a	0.205±0.011 a
T150	2.432±0.125 a	1.771±0.109 a	0.661±0.019 a	0.322±0.030 a	0.267±0.027 a	0.055±0.004 a	0.206±0.009 a
T200	1.575±0.045 b	1.137±0.057 b	0.437±0.014 c	0.199±0.016 b	0.164±0.014 b	0.034±0.002 b	0.209±0.005 a

2.3　褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗光合指标的影响

从表 3 可以看出，在低温胁迫下，T0 处理的 P_n、T_r、C_i 均显著低于 CK，说明低温胁迫会降低幼苗的光合作用效率，随着褪黑素浓度的升高，幼苗的光合作用参数先升高后下降。T100 处理下的 P_n、G_s、C_i 最高，分别较 T0 处理提高 42.28%、22.53%、34.40%，T100 和 T150 处理之间无显著差异，T100 处理的 P_n、C_i 显著高于 CK、T0、T50 和 T200 处理，T100 处理的 G_s 显著高于 T200 处理；T150 处理的

表 3　MT 处理对低温胁迫下苦瓜幼苗光合作用参数的影响

Table 3　Effects of MT treatment on the photosynthetic parameters of bitter gourd seedlings under low-temperature stress

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/（μmol·m^{-2}·s^{-1}）	蒸腾速率 Transpiration rate/（mmol·m^{-2}·s^{-1}）	气孔导度 Stomatal conductivity/（mol·m^{-2}·s^{-1}）	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration/（μmol·mol^{-1}）
CK	6.526 7±0.320 5 b	0.921 1±0.045 3 b	0.127 0±0.013 2 ab	325.200 0±17.541 9 b
T0	5.426 8±0.117 4 c	0.840 8±0.036 1 c	0.117 2±0.016 4 ab	276.566 7±9.830 7 c
T50	6.523 5±0.166 7 b	0.917 8±0.052 1 b	0.125 6±0.008 5 ab	324.066 7±8.991 3 b
T100	7.721 1±0.214 7 a	1.105 8±0.026 3 a	0.143 6±0.009 4 a	371.700 0±16.488 5 a
T150	7.642 4±0.326 0 a	1.107 5±0.036 7 a	0.142 1±0.017 1 a	369.233 3±14.330 5 a
T200	4.514 0±0.230 2 d	0.842 1±0.025 4 c	0.116 3±0.009 9 b	277.133 3±19.414 5 c

T_r 最高，较 T0 处理显著提高 31.72%，与 T100 处理无显著差异，显著高于 CK、T0、T50 和 T200 处理。由此可见，100~150 μmo·L^{-1} 褪黑素处理可有效提高低温胁迫下苦瓜幼苗的光合作用能力。

2.4　褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗生理指标的影响

由表 4 可知，T0 处理下的苦瓜幼苗叶片中叶绿素相对含量比 CK 显著降低 13.87%，叶面喷施褪黑素能提高苦瓜幼苗叶片中叶绿素相对含量，随着褪黑素浓度的升高表现出先升高后降低的趋势，并在 T100 处理下达到最大值，较 T0 处理显著提高 16.79%，说明适宜浓度褪黑素可显著提高低温胁迫下苦瓜幼苗叶片叶绿素相对含量，以 100 μmol·L^{-1} 褪黑素处理效果最佳。

经低温胁迫后，苦瓜幼苗中可溶性糖和可溶性蛋白含量较 CK 显著升高，叶面喷施褪黑素能提高苦瓜幼苗叶片中可溶性糖和可溶性蛋白含量，随着褪黑素浓度的增加呈先升高后降低的趋势，并在 T100 处理下达到最大值，较 T0 处理分别显著提高 9.12%、13.36%，且显著高于 T50 和 T200 处理，而与 T150 处理差异不显著。由此可见，喷施不同浓度的外源褪黑素能显著提高低温胁迫下苦瓜叶片渗透物质的含量，增强幼苗抵御低温胁迫的能力。

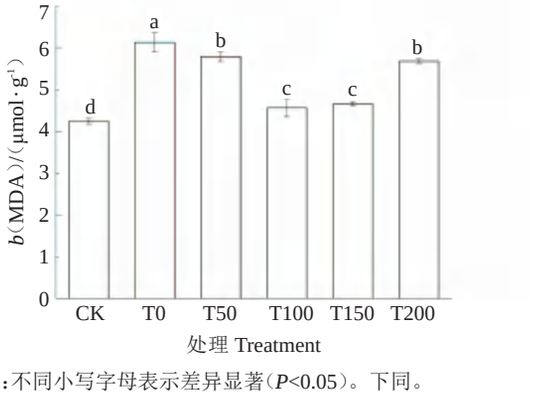
表 4　MT 处理对苦瓜幼苗生理指标的影响

Table 4　Effects of MT treatment on physiological indicators of bitter gourd seedlings

处理 Treatment	叶绿素相对含量 Chlorophyll relative content/SPAD	w（可溶性糖）Soluble sugar content/（mg·g^{-1}）	w（可溶性蛋白）Soluble protein content/（mg·g^{-1}）
CK	32.37±1.90 a	30.89±0.27 c	25.59±0.36 c
T0	27.88±3.13 c	35.72±0.17 b	28.29±1.71 b
T50	29.54±1.89 bc	36.29±0.48 b	28.85±0.53 b
T100	32.56±1.09 a	38.98±0.31 a	32.07±0.15 a
T150	31.48±0.98 a	38.51±0.30 a	31.65±0.18 a
T200	28.28±0.67 b	35.57±0.10 b	28.13±0.31 b

2.5　褪黑素对低温胁迫下 MDA 含量的影响

MDA 是植物膜脂过氧化的产物，能在一定程度上反映植物逆境下质膜的受破坏程度。由图 1 可以看出，T0 处理下苦瓜幼苗叶片 MDA 含量显著高于 CK，叶面喷施褪黑素能显著降低低温胁迫下苦瓜幼苗叶片中 MDA 含量，且随着浓度的升高表现出先降低后升高的趋势。其中以 T100 处理效果最佳，较 T0 处理显著降低 25.61%，且显著低于 T50 和 T200 处理，与 T150 处理差异不显著。以上结果表明，褪黑素能显著降低低温胁迫下苦瓜叶片中膜脂过氧化物含量，有效缓解低温胁迫对苦瓜幼苗造成的伤害。



注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。下同。

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

图 1　不同浓度褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗中 MDA 含量的影响

Fig. 1　Effects of different concentrations of melatonin on MDA content in bitter gourd seedlings under low-temperature stress

2.6　褪黑素对低温胁迫下抗氧化酶活性的影响

由图 2 可知，T0 处理下苦瓜幼苗叶片中 POD、SOD 和 CAT 活性较 CK 显著降低，叶面喷施褪黑素可显著提高苦瓜幼苗叶片中 POD、SOD、CAT 活

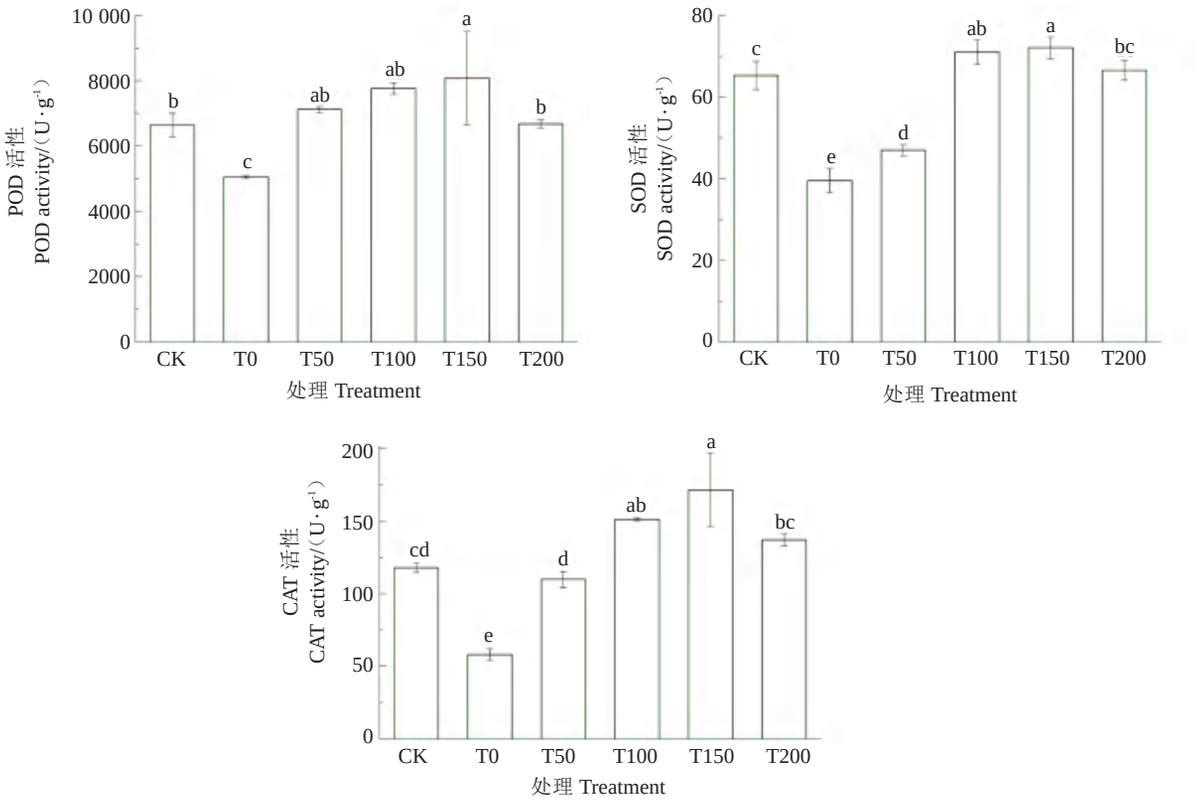


图 2　不同浓度褪黑素对低温胁迫下苦瓜幼苗中 POD、SOD 和 CAT 活性的影响

Fig. 2　Effects of different concentrations of melatonin on POD, SOD and CAT activity in bitter gourd seedlings under low-temperature stress

性，且随着褪黑素浓度的上升总体表现为先升高后降低的趋势。在 T150 处理下抗氧化酶活性达到最大值，POD、SOD、CAT 活性较 T0 处理分别显著提高 59.90%、82.11%、194.74%，且 T150 处理显著高于 T0 和 T200 处理，与 T100 处理无显著差异。综上，适宜浓度的褪黑素处理能显著提高低温胁迫下苦瓜叶片中抗氧化酶活性，增强其抵抗低温胁迫的能力。

3　讨论与结论

低温胁迫会造成植物出现失水现象，导致叶片卷曲或萎蔫，影响组织中的自由水和结合水比例，进而影响植物的抗逆性[16]。本研究表明，低温抑制了植株的株高和干鲜质量的增加，但褪黑素能够缓解低温对苦瓜幼苗的胁迫，具体表现为，株高、干鲜质量、叶长和叶宽显著增加，且随着褪黑素浓度的升高，表现为先升高后降低的趋势。这与褪黑素在黄瓜[13]、花椒[17]作物上的表现相似。

低温胁迫还会损伤细胞光合系统，抑制光合酶活性、降低气孔导度和叶绿素相对含量。而褪黑素能够通过提高植物中叶绿素和类胡萝卜素含量，提高植物低温下的光合作用能力[18]。徐令旗等[19]研究表明，褪黑素能提高低温胁迫下水稻叶片的光合速率和气孔导度。本研究中，低温胁迫下，叶绿素相对含量、净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度显著下降，使用褪黑素处理后，苦瓜叶片中叶绿素相对含量、净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO_2 浓度明显升高，说明褪黑素能有效缓解低温损害，保护光反应系统，提高低温下的光合作用能力。覃兰丽等[20]研究表明，低温胁迫下施用褪黑素能显著提高西葫芦叶片中叶绿素含量，增强其耐旱性，与本试验结果一致。

可溶性糖和可溶性蛋白是重要的渗透调节物质，在低温胁迫下，通过积累可溶性糖和可溶性蛋白能够增强细胞的吸水和保水能力，维持细胞稳态[21]。此外，可溶性糖可作为信号分子使植株响应低温胁迫[22]。本试验中，褪黑素能有效提高低温胁迫下可溶性糖和可溶性蛋白含量，增强植株耐低温能力。

低温会损伤植物的脂膜使其过氧化产生 MDA，MDA 含量过多会影响膜结构和功能的完整性，因此 MDA 含量能够反映植株遭受低温胁迫的

程度。本试验结果表明，低温胁迫导致苦瓜幼苗MDA含量显著增加，而褪黑素作为一种抗氧化剂，可以有效清除活性氧，维持细胞膜完整性，降低MDA含量，其中100和150 μmol·L^{-1}的褪黑素处理效果最佳，与CK相比，分别显著下降了25.61%和23.98%。本试验结果与周志国等[23]、代泽敏等[24]的研究结果一致。

低温胁迫会导致植物细胞产生过量的自由基，大量自由基的积累会对细胞产生损害。本研究表明，褪黑素处理能显著提高细胞中SOD、POD、CAT活性，有效清除细胞中的活性氧，减轻氧化损伤。其中100、150 μmol·L^{-1}处理的缓解效果最为显著，T150处理的POD、SOD、CAT活性较T0处理分别显著提高59.90%、82.11%、194.74%。这与任利明等[25]在花椒上的研究结果一致。

综上所述，在低温胁迫下，苦瓜幼苗生长受到明显抑制，而100~150 μmol·L^{-1}的外源MT能有效缓解苦瓜幼苗的低温胁迫。褪黑素的作用存在浓度效应，低浓度下（50 μmol·L^{-1}时）效果较弱，高浓度下（大于等于200 μmol·L^{-1}），可能因渗透胁迫或代谢紊乱导致作用效果下降，未来可进一步探究褪黑素与其他植物激素的互作机制，以及其在低温胁迫信号转导中的分子调控路径，以期为苦瓜抗逆栽培提供参考。

参考文献

[1] 丁雷，胡玉立，李梅，等.苦瓜的药食价值研究概括[J].中国医药导报，2021，18(13)：117-120.

[2] 杨乐.低温弱光下苦瓜生理生化变化规律及品种耐性鉴定研究[D].四川雅安：四川农业大学，2017.

[3] Tan D X，Hardeland R，Manchester L C，et al. Functional roles of melatonin in plants，and perspectives in nutritional and agri-cultural science[J]. Journal of Experimental Botany，2012，63(2)：577-597.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 周光怡，刘晓娟，王睿，等.外源褪黑素对高粱苗期冷害的缓解作用研究[J].山东农业科学，2025，57(2)：55-63.

[7] 杨元玲，刘慧英，关思慧，等.外源褪黑素对盐胁迫下石榴幼苗光合及抗氧化特性的影响[J].果树学报，2025，42(2)：360-375.

[8] 李承青，温广超，郑炳松，等.褪黑素缓解植物镉胁迫机制研究进展[J].植物生理学报，2023，59(9)：1749-1759.

[9] 白如意，宋希梅，沈健，等.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[J].西北植物学报，2023，43(5)：805-813.

[10] Song L J，Tan Z，Zhang W W，et，al. Exogenous melatonin improves the chilling tolerance and preharvest fruit shelf life in eggplant by affecting ROS- and senescence-related processes[J]. Horticultural Plant Journal，2023，9(3)：523-540.

[11] 唐鸿吕.外源褪黑素对低温胁迫下甘蓝苗期生长、生理特性及成株产量的影响[D].陕西杨凌：西北农林科技大学，2022.

[12] 雷云.外源物质对低温胁迫下辣椒生长及生理特性的调控[D].贵阳：贵州大学，2025.

[13] 冯一清，仇胜囡，吴月，等.褪黑素对日光温室黄瓜耐冷性的影响[J].园艺学报，2024，51(11)：2633-2644.

[14] 曾春涛，张舒悦，仇学文，等.褪黑素浸种对低温胁迫下豇豆种子萌发和生理指标的影响[J].北方园艺，2024(20)：8-15.

[15] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京：高等教育出版社，2006.

[16] 吴广霞，唐献龙，杨德光，等.植物低温胁迫生理研究进展[J].作物杂志，2008(3)：17-19.

[17] 杨映，梁华儒，张玲玲，等.花椒对低温胁迫的响应机制研究进展[J].植物遗传资源学报，2025，26(1)：14-26.

[18] 林佳怡，陈强，张磊，等.褪黑素在植物低温胁迫中的研究进展[J].生物技术通报，2025，41(7)：37-48.

[19] 徐令旗，杜晓东，蔡永盛，等.外源褪黑素对不同生育时期低温处理水稻光合特性、抗氧化系统及产量的影响[J].山东农业科学，2025，57(9)：64-71.

[20] 覃兰丽，黄金秋，李燕婷，等.外源褪黑素对干旱胁迫下西葫芦幼苗生理生长的影响[J].中国瓜菜，2025，38(7)：127-134.

[21] 焦德志，赵泽龙.盐碱胁迫对植物形态和生理生化影响及植物响应的研究进展[J].江苏农业科学，2019，47(20)：1-4.

[22] Sadak M S，El-Bassiouny H M S，Dawood M G. Role of trehalose on antioxidant defense system and some osmolytes of quinoa plants under water deficit[J]. Bulletin of the National Research Centre，2019，43：5.

[23] 周志国，邓晨，冯雪.外源褪黑素对盐胁迫下茄子幼苗生理特性的影响[J].中国蔬菜，2025(3)：126-133.

[24] 代泽敏，赵晏俪，王玉琢，等.不同复配外源物质对低温下番茄生长生理特性及产量品质的影响[J].中国生态农业学报(中英文)，2026，34(1)：81-91.

[25] 任利明，谢芳，丁飞，等.褪黑素对花椒幼苗低温伤害的缓解效应[J].西北林学院学报，2023，38(4)：34-43.