

宿婧,梁彬,郝晓华,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦种子萌发及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(6):125-129.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.06.015

# 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦种子萌发及生理特性的影响

宿婧,梁彬,郝晓华,李媛媛  
(忻州师范学院生物系,山西忻州 034000)

**摘要:**为了研究褪黑素对黑藜麦在干旱胁迫下的生长效果,明确外源褪黑素对黑藜麦抗逆性的增强效应,以黑藜麦种子为试验材料,在干旱胁迫(25% PEG-6000)下,使用不同浓度褪黑素(25、50、75、100、200  $\mu\text{mol/L}$  MT)对黑藜麦种子和幼苗进行处理,测定种子的发芽率、发芽势、活力指数、胚根长等指标,并测定幼苗的异柠檬酸脱氢酶(ICD)活性、琥珀酸脱氢酶(SDH)活性、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性等生理指标。与CK1组相比,在干旱胁迫(CK2)下,黑藜麦种子的发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长显著下降,幼苗POD、CAT、ICD、 $\alpha$ -淀粉酶活性显著下降,MDA含量显著上升;随外源褪黑素浓度升高,黑藜麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长先升后降,黑藜麦幼苗的SOD、POD、CAT、ICD、SDH、 $\alpha$ -淀粉酶活性先升后降,MDA含量先降后升,其中50  $\mu\text{mol/L}$  MT(T2处理)对干旱胁迫下黑藜麦种子萌发和幼苗生长影响的缓解效果最为显著。施加外源褪黑素能够显著提高黑藜麦种子的发芽指数,降低黑藜麦幼苗的MDA含量,提高抗氧化酶、 $\alpha$ -淀粉酶、ICD、SDH活性。

**关键词:**褪黑素;黑藜麦;干旱胁迫;生理特性;种子萌发

**中图分类号:**S519.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)06-0125-05

近年来,由于全球气候变化恶劣,干旱发生的程度也随之加重<sup>[1]</sup>。干旱是一种常见的非生物胁迫,会导致植物气孔关闭、 $\text{CO}_2$ 摄入不足,进而引起植物的光合作用停止、细胞代谢紊乱,最终造成植物死亡<sup>[2]</sup>。干旱会改变植物光合色素和光合成分,破坏卡尔文循环中的光合结构和酶,导致植物产量减少,在干旱时会产生并且积累大量的活性氧,造成光合作用系统严重损伤<sup>[3]</sup>。

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)为一年生草本植物,原产于南美洲安第斯山脉,是古代印加部族的主要谷物之一<sup>[4]</sup>。藜麦被称为最适合人类的“全营养食品”,也是十大营养食品之一<sup>[5]</sup>。藜麦主要有黑、白、红3种颜色,黑藜麦中淀粉含量为63.37%,具有良好的溶解度、透明度和凝沉性,可以调节血糖水平、降低结肠癌的发生率<sup>[6]</sup>。黑藜麦营养价值极高,富含蛋白质及钙、铁、锌、维生素E等微量营养素和全部的必需氨基酸,可以提高人群营养水平,提高记忆力,增强免疫力,同时还可以预防

多种疾病<sup>[7]</sup>。目前藜麦市场发展前景非常广阔,可通过丰富产品种类,增加产量,发挥其在农业生产中的重要作用<sup>[8]</sup>。

褪黑素是一种植物生长调节剂,可以增强植物的抗逆性;大量研究表明,褪黑素对植物盐碱胁迫具有较好的缓解效果<sup>[9]</sup>。外源喷施褪黑素可以提高植物渗透压调节物质的含量,维系植物正常的渗透压,同时还可以提高植物体内保护酶的活性<sup>[10]</sup>。目前,有关不同浓度褪黑素对黑藜麦应对干旱胁迫的影响研究较少。本研究以浓度为25%的PEG-6000模拟干旱胁迫,研究不同浓度褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦种子的萌发及幼苗生理特性的影响,探明促进黑藜麦种子萌发和幼苗生长的最优褪黑素浓度,以为黑藜麦的生产提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

黑藜麦1号种子,由山西省忻州市静乐县火品公司提供。

### 1.2 仪器与试剂

1.2.1 仪器 分析天平FA2004(宁波市鄞州华丰仪器厂);数显恒温水浴锅HH-8(国华仪器制造有限公司);台式低速离心机LC-LCE-O5D(上海力

收稿日期:2024-03-14

基金项目:忻州市重点研发计划(编号:20220210)。

作者简介:宿婧(1985—),女,山西忻州人,硕士,高级实验师,研究方向为植物抗逆性及分子机制。E-mail:15203501824@163.com。

辰邦西仪器科技有限公司);酶标仪 LD-96A(山东莱恩德智能科技有限公司);紫外分光光度计 076120080820090005(上海仪电分析仪器有限公司);电冰箱 BCD-206LSTPF(海尔智家股份有限公司);光照培养箱 BSG-250/300/400 型(上海博讯医疗生物仪器股份有限公司)。

1.2.2 试剂 褪黑素(MT)(上海麦克林生化科技股份有限公司);聚乙二醇(PEG)6000(国药集团化学试剂有限公司);标准麦芽糖溶液( $\mu\text{g/mL}$ );3,5-二硝基水杨酸试剂;0.1 mol/L pH 值为 5.6 的柠檬酸缓冲液;10 g/L 淀粉溶液;0.4 mol/L NaOH 溶液;酒石酸钾钠;次氯酸钠。以上试剂均为分析纯。过氧化氢酶(CAT)活性检测试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)活性检测试剂盒、过氧化物酶(POD)活性检测试剂盒、丙二醛(MDA)含量检测试剂盒,均购自南京建成生物工程研究所;植物琥珀酸脱氢酶(SDH)活性检测试剂盒、植物异柠檬酸脱氢酶(ICD)活性检测试剂盒,均购自江苏酶免实业有限公司。

### 1.3 试验方法

1.3.1 种子萌发及生长指标的测定 试验于 2023 年 4 月 15 日在忻州师范学院植物生理学实验室进行。选取成熟、饱满、无病虫害的黑藜麦种子,用次氯酸钠消毒 2 min,蒸馏水冲洗数次,自然晾干。将消毒后的黑藜麦种子放入铺有 2 层纱布(已消毒)的培养皿中,每个培养皿中放 50 粒种子,进行萌发试验。共设 7 个处理,6 个重复,处理如下:CK1,于蒸馏水中萌发;CK2,25% PEG-6000,不加 MT;T1 处理,25% PEG-6000 + 25  $\mu\text{mol/L}$  MT;T2 处理,25% PEG-6000 + 50  $\mu\text{mol/L}$  MT;T3 处理,25% PEG-6000 + 75  $\mu\text{mol/L}$  MT;T4 处理,25% PEG-6000 + 100  $\mu\text{mol/L}$  MT;T5 处理,25% PEG-6000 + 200  $\mu\text{mol/L}$  MT。向每个培养皿中加入 10 mL 处理液,并将所有培养皿放入培养箱中(25  $^{\circ}\text{C}$ 、光/暗周期为 12 h/12 h)。萌发过程采用称重法控制培养皿中的水分保持不变。每天记录黑藜麦种子萌发数。当胚芽突破种皮 1 mm 时视作有效萌发。第 3 天(发芽高峰期)测定发芽势,第 5 天(发芽率不再变化)测定发芽率,并记录胚根长。发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数计算公式如下:发芽势 = 发芽至第 3 天发芽的种子粒数/供试种子总粒数  $\times$  100%;发芽率 = 发芽至第 5 天发芽的种子粒数/供试种子总粒数  $\times$  100%;发芽指数(GI) =  $\sum G_t/D_t$ ;活力指数(VI) = GI  $\times$  S。式中: $G_t$  为第  $t$  天发芽数, $D_t$

为萌发天数,S 为萌发至第 5 天胚根长度。

1.3.2 幼苗培养及生理指标的测定 采用水培法培养黑藜麦。将已消毒的黑藜麦种子放入铺有 2 层已消毒纱布的培养皿中,每个培养皿中放入 50 粒种子。共设 7 个处理,6 个重复。前期使用蒸馏水等量浇灌,待幼苗长出 2 张真叶时,进行幼苗干旱胁迫处理,处理方式同“1.3.1”节。幼苗培养至第 5 天测定各生理指标。生理指标包括:过氧化氢酶(CAT)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、植物琥珀酸脱氢酶(SDH)活性、植物异柠檬酸脱氢酶(ICD)活性、丙二醛(MDA)含量、 $\alpha$ -淀粉酶活性,采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定<sup>[11]</sup>。

### 1.4 数据处理

试验数据采用 Excel、SPSS、Origin 9.0 等软件进行分析和差异比较,具体参照谭舒心的数据处理方法<sup>[3]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源 MT 对干旱胁迫下黑藜麦种子萌发的影响

由表 1 可知,经过干旱处理后,CK2 的发芽率为 74.23%,较 CK1 明显降低。干旱胁迫下施加不同浓度褪黑素后,种子发芽率呈先升后降的趋势;当外源褪黑素浓度为 50  $\mu\text{mol/L}$  (T2)时发芽率达到最大,较 CK2 提高 20.66 百分点。随着褪黑素浓度的不断增加,T3、T4、T5 处理的种子发芽率逐渐降低,较 T2 处理分别下降 5.66、24.22、34.11 百分点。

在干旱胁迫下(CK2)黑藜麦种子的发芽势比 CK1 显著减少 10.87 百分点( $P < 0.05$ )。在干旱胁迫下,随外源褪黑素浓度的增加,黑藜麦种子发芽势呈先增后减的趋势。与 CK2 相比,T1、T2 处理的发芽势分别显著增高 10.63、16.29 百分点( $P < 0.05$ ),T2 处理达到最大值。T3 处理的发芽势有所降低,但仍然比 CK2 增高 6.63 百分点。T4、T5 处理与 CK2 之间差异不显著。

与 CK1 相比,CK2 降低了黑藜麦种子的发芽指数。在干旱胁迫下,藜麦种子的发芽指数随外源褪黑素的升高而呈先升后降的趋势,T2 处理达到最大值。T3 处理后发芽指数逐渐降低,但 T3 仍然显著高于 CK2( $P < 0.05$ ),T4 处理与 CK2 之间差异不显著。

与 CK1 相比,干旱胁迫下黑藜麦种子活力指数显著下降( $P < 0.05$ )。随着外源褪黑素浓度的不断增加,黑藜麦种子活力指数呈先升后降的趋势,T1、

表 1 不同浓度褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦种子萌发的影响

| 处理  | 发芽率<br>(%)     | 发芽势<br>(%)    | 发芽指数           | 活力指数           | 胚根长<br>(cm)   |
|-----|----------------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| CK1 | 90.56 ± 1.38ab | 88.24 ± 2.37b | 42.12 ± 0.28b  | 203.01 ± 3.03c | 4.82 ± 0.36ab |
| CK2 | 74.23 ± 2.21b  | 77.37 ± 1.29c | 36.78 ± 0.16c  | 79.81 ± 2.66f  | 2.17 ± 0.28c  |
| T1  | 75.64 ± 1.92c  | 88.00 ± 1.98b | 40.62 ± 0.15bc | 124.70 ± 4.21d | 3.07 ± 0.52b  |
| T2  | 94.89 ± 1.01a  | 93.66 ± 2.52a | 55.78 ± 0.23a  | 281.68 ± 3.56a | 5.05 ± 0.16a  |
| T3  | 89.23 ± 1.58b  | 84.00 ± 1.53b | 51.67 ± 0.26a  | 253.69 ± 2.15b | 4.91 ± 0.32a  |
| T4  | 70.67 ± 2.82c  | 79.57 ± 1.14c | 40.36 ± 0.09bc | 108.16 ± 3.06e | 2.68 ± 0.11c  |
| T5  | 60.78 ± 3.40d  | 77.46 ± 1.09c | 32.24 ± 0.12d  | 76.08 ± 1.02f  | 2.36 ± 0.21c  |

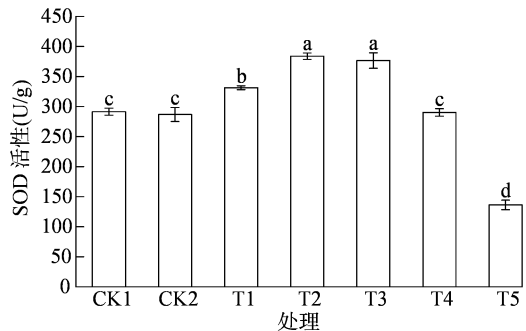
注:同列数据后不同小写字母表示在 5% 水平上差异显著。

T2 处理较 CK2 显著提高 ( $P < 0.05$ ), T2 处理的活力指数达到最大值。T3、T4、T5 处理的活力指数呈下降趋势,但 T3、T4 处理的活力指数仍显著高于 CK2 处理, T5 处理与 CK2 之间无显著差异。

在干旱胁迫下,黑藜麦种子的胚根长也随外源褪黑素浓度的升高而呈先升后降的趋势, T2 处理的胚根长达到最大值。

2.2 外源 MT 对干旱胁迫下黑藜麦幼苗生理指标的影响

2.2.1 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 SOD 活性的影响 由图 1 可知,经过干旱处理后,CK2 的 SOD 活性较 CK1 有所降低。随着外源褪黑素浓度的增加,黑藜麦幼苗的 SOD 活性呈先升后降的趋势,当外源褪黑素浓度为 50  $\mu\text{mol/L}$  (T2) 时, SOD 活性达到最大,较 CK2 显著提高 33.85% ( $P < 0.05$ )。T3、T4、T5 处理的种子 SOD 活性逐渐降低,较 T2 处理分别下降 1.89%、24.39%、66.48%。T2、T3 处理之间无显著差异,表明外源褪黑素浓度从 50  $\mu\text{mol/L}$  提高至 75  $\mu\text{mol/L}$  不会对干旱胁迫下黑藜麦幼苗的 SOD 活性产生显著影响。



柱上不同小写字母表在 5% 水平上差异显著。图 2 至图 7 同  
图 1 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 SOD 活性的影响

2.2.2 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 POD 活性的影响 由图 2 可知,与 CK1 相比,干旱胁迫

处理 CK2 显著降低了黑藜麦幼苗 POD 活性,且 POD 活性随外源褪黑素浓度的增大而呈先升后降趋势, T2 处理达到最大值。T2 处理的 POD 活性比 CK2、T1 处理分别显著提高 38.09%、12.05% ( $P < 0.05$ ),表明外源褪黑素可以显著提高干旱胁迫下黑藜麦幼苗的 POD 活性。T3、T4、T5 处理的 POD 活性较 T2 处理分别显著降低 11.61%、44.82%、56.26% ( $P < 0.05$ )。

2.2.3 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 CAT 活性的影响 由图 3 可知,与 CK1 相比,干旱胁迫处理 CK2 显著降低黑藜麦幼苗的 CAT 活性,且 CAT 活性随外源褪黑素浓度的增大而呈先升后降趋势, T2 处理达到最大值,为 CK2 的 2.66 倍,差异达到显著水平,表明外源褪黑素可以显著提高干旱胁迫下黑藜麦幼苗的 CAT 活性。T3、T4、T5 处理较 T2 处理分别显著降低 28.57%、43.35%、64.86%。

2.2.4 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 MDA 含量的影响 由图 4 可知,干旱处理 CK2 的 MDA 活性比 CK1 显著升高 ( $P < 0.05$ )。不同浓度外源褪黑素对黑藜麦种子的 MDA 含量的影响不同,外源褪黑素浓度为 50  $\mu\text{mol/L}$  (T2) 时的 MDA 含量达到最小值,较 CK2 显著降低 ( $P < 0.05$ )。T3 处理的 MDA 含量较 T2 处理显著提高 72.12% ( $P < 0.05$ )。T4、T5 处理的 MDA 含量较 T2 组均显著提高。

2.2.5 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 SDH 活性的影响 由图 5 可知,在干旱胁迫下,随外源褪黑素处理浓度的增加,黑藜麦幼苗的 SDH 活性先增后减。与 CK2 相比, T1、T2 处理的 SDH 活性分别增加 3.91%、20.73%, T2 处理与 CK2 差异显著 ( $P < 0.05$ )。T3 处理的 SDH 活性开始降低,但仍然比 CK2 显著高 11.73%。T4、T5 处理分别比 CK2 减少 11.75%、22.24%, T4、T5 处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

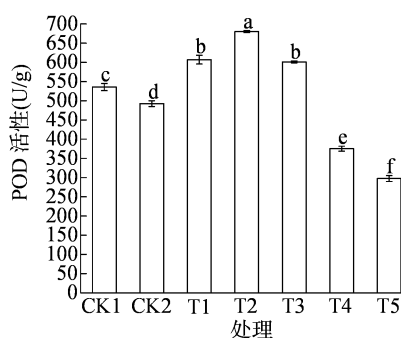


图2 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 POD 活性的影响

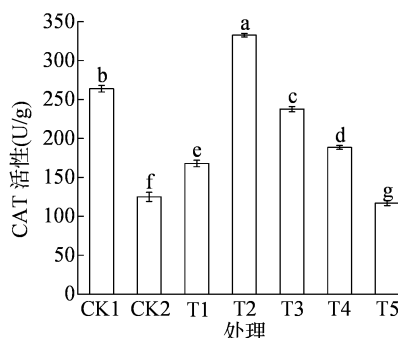


图3 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 CAT 活性的影响

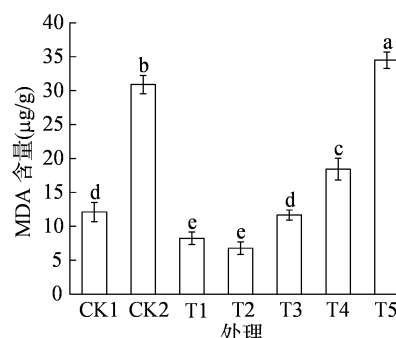


图4 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 MDA 含量的影响

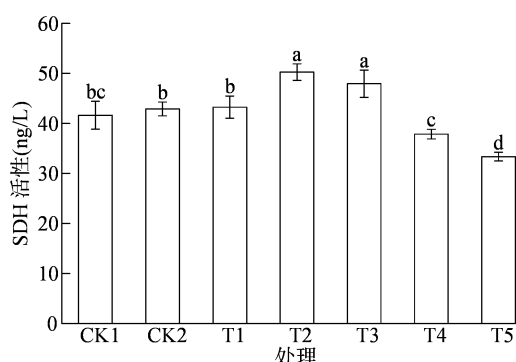


图5 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 SDH 活性的影响

2.2.6 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 ICD 活性的影响 由图 6 可知,在干旱胁迫下黑藜麦幼苗的 ICD 活性比 CK1 显著减少 21.82% ( $P < 0.05$ )。在干旱胁迫下,随外源褪黑素处理浓度的增加,黑藜麦幼苗的 ICD 活性先增后减。较 CK2 组而言,T1、T2 处理后 ICD 活性分别增高 2.86%、49.41%,T2 处理与 CK2 差异显著 ( $P < 0.05$ )。T3 处理后 ICD 活性逐渐降低,T4、T5 处理分别比 CK2 减少 17.41%、22.47%,T4、T5 处理之间差异不显著。

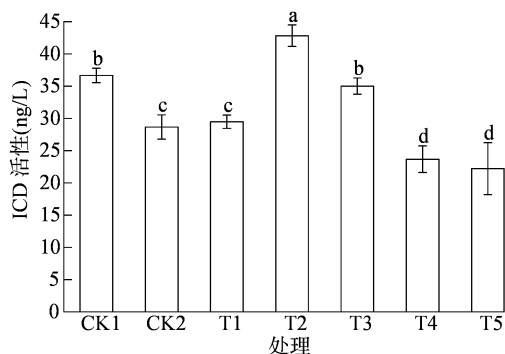
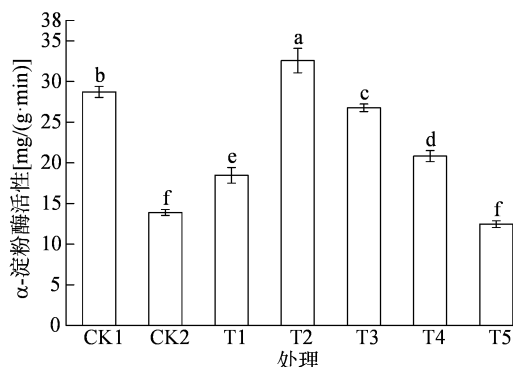


图6 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗 ICD 活性的影响

2.2.7 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗  $\alpha$ -淀粉酶活性的影响 由图 7 可知,与 CK1 相比,干

旱胁迫处理 CK2 显著降低黑藜麦幼苗的  $\alpha$ -淀粉酶活性。 $\alpha$ -淀粉酶活性随外源褪黑素浓度的增大而呈先升后降趋势,T2 处理达到最大值,为 CK2 的 2.34 倍,差异显著 ( $P < 0.05$ )。表明外源褪黑素可以显著提高干旱胁迫下黑藜麦幼苗的  $\alpha$ -淀粉酶活性。T3、T4、T5 处理的  $\alpha$ -淀粉酶活性较 T2 处理分别降低 17.80%、36.04%、61.16%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图7 外源褪黑素对干旱胁迫下黑藜麦幼苗  $\alpha$ -淀粉酶活性的影响

### 3 讨论与结论

干旱可以影响黑藜麦种子的萌发,其萌发指标可以反映种子的生长状况。干旱胁迫 (CK2) 处理下,黑藜麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长较 CK1 (蒸馏水) 处理组均下降,黑藜麦种子的萌发受到抑制。而随着褪黑素的浓度的增大,黑藜麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长均呈先增后降的趋势,说明施加适宜浓度的外源褪黑素可以促进种子萌发,而高浓度的外源褪黑素会抑制种子萌发。本试验中,当外源褪黑素浓度为 50 mol/L (T2) 时,黑藜麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚根长均达到最大值,对干旱胁迫下黑藜麦种子萌发抑制缓解效果

最优。种子萌发需要有足够营养物质供给,呼吸作用会不断消耗干物质,当外源褪黑素浓度为 50 mol/L (T2)时,黑藜麦种子内  $\alpha$ -淀粉酶活性最大,此时黑藜麦幼苗长势最佳,说明该浓度的褪黑素有利于黑藜麦种子的萌发和生长,与对棉花种子的研究结果<sup>[12-13]</sup>一致。

在干旱胁迫下,植物会产生活性氧分子,活性氧会使细胞膜脂过氧化和脱酰化,导致细胞膜损伤,而 SOD、CAT、POD 等抗氧化酶可以快速清除细胞中活性氧<sup>[14]</sup>。本试验中,在干旱胁迫下,与 CK1 相比,黑藜麦幼苗的 POD、CAT 活性均显著下降;施加不同浓度的褪黑素后,随浓度的增加,SOD、POD、CAT 活性均先升后降,在褪黑素浓度为 50  $\mu$ mol/L 时,三者活性最大。说明适宜浓度的褪黑素可以提高植物的抗氧化酶活性,干旱胁迫下施加外源褪黑素可以减缓植物的干旱胁迫,与张二芳等对芡实种子的研究结果<sup>[15]</sup>一致。

干旱胁迫会使幼苗的丙二醛(MDA)含量显著上升,导致膜系统受损。丙二醛水平与细胞膜结构的稳定性呈负相关性。本试验中,与 CK2 相比,T1~T4 处理下,丙二醛含量显著降低,表明添加适宜浓度的外源褪黑素能够缓解干旱胁迫对黑藜麦幼苗细胞膜结构的损伤,从而缓解在逆境中的伤害<sup>[16-18]</sup>,与姜瑛等对玉米幼苗的研究结果<sup>[19]</sup>一致。

异柠檬酸脱氢酶(ICD)是三羧酸循环的关键酶之一,可以催化异柠檬酸氧化脱羧生成  $\alpha$ -酮戊二酸及二氧化碳<sup>[20]</sup>。琥珀酸脱氢酶(SDH)是线粒体电子传递链复合体中的关键酶,可氧化琥珀酸同时也可以传递电子,SDH 是三羧酸循环中唯一嵌入到线粒体膜的蛋白酶,由 4 个亚基组成,在植物中,SDH 与植物胁迫信号通路有关,缺失可致死植物<sup>[21]</sup>。本试验中,添加 50  $\mu$ mol/L MT 为最佳浓度,此时 ICD、SDH 活性最高,可加快植物细胞内的三羧酸循环,从而促进细胞内物质的代谢。

综上所述,与干旱胁迫(CK2)相比,施加外源褪黑素能够显著提高黑藜麦种子萌发指标指数,降低黑藜麦幼苗的 MDA 含量,提高其抗氧化酶、 $\alpha$ -淀粉酶、ICD、SDH 活性,且在一定范围内随褪黑素浓度的变化而改变。外源褪黑素浓度为 50  $\mu$ mol/L 时,提高黑藜麦抗干旱的效果较好。

#### 参考文献:

- [1]牛丛丛,牛京京.褪黑素对干旱胁迫下紫穗槐幼苗生长和生理特性的影响[J].现代园艺,2023,46(6):23-24,27.
- [2]温琦,赵文博,张幽静,等.植物干旱胁迫相应的研究进展[J].江苏农业科学,2020,48(12):11-15.
- [3]谭舒心.混合盐胁迫下藜麦生理特性的研究[D].长春:东北师范大学,2017:7-15.
- [4]王晨静,赵习武,陆国权,等.藜麦特性及开发利用研究进展[J].浙江农林大学学报,2014,31(2):296-301.
- [5]刘建霞,温日宇,张晴雯,等.3种盐胁迫下静乐藜麦种子与幼苗抗逆指标的检测[J].种子,2018,37(2):82-85.
- [6]陈茜,王振兴,孙健,等.藜麦的营养成分、生物活性及加工利用[J].生物加工过程,2023,21(3):292-300.
- [7]王俊敏.黑藜麦山楂酒的研制及抗氧化分析[D].太原:山西大学,2021:1-8.
- [8]魏志敏,李顺国,夏雪岩,等.藜麦的特性及其发展建议[J].河北农业科学,2016,20(5):14-17.
- [9]温日宇,刘建霞,张珍华,等.干旱胁迫对不同藜麦种子萌发及生理特性的影响[J].作物杂志,2019(1):121-126.
- [10]任贵兴,杨修仕,么杨.中国藜麦产业现状[J].作物杂志,2015(5):1-5.
- [11]杜昕,李博,毛鲁泉,等.褪黑素对干旱胁迫下大豆产量及 AsA-GSH 循环的影响[J].作物杂志,2022(1):174-178.
- [12]魏凤言,娄宇轩,徐彩虹.藜麦主要活性物质理化性质及提取技术研究进展[J].粮食与饲料工业,2022(4):21-24,31.
- [13]马鑫颖,宋晨,孟妍君,等.外源褪黑素对铜胁迫下棉花种子萌发、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响[J].棉花学报,2023,35(4):313-324.
- [14]陆昱成.盐胁迫对我国西北两种春小麦种子萌发阶段的生理生化特性的影响[D].兰州:西北师范大学,2017:10-15.
- [15]张二芳,李元圆,郝旺林.外源甜菜碱对干旱胁迫下芡实种子萌发及幼苗生理特性的影响[J].种子,2022,41(12):93-97,105.
- [16]陈明君,蒙柳贝,李玥,等.PEG-6000 模拟干旱胁迫对藜麦种子萌发的影响[J].贵州农业科学,2021,49(11):34-40.
- [17]李嘉文,麻冬梅,苏立娜,等.外源褪黑素对盐胁迫下燕麦幼苗生长及抗氧化系统的影响[J].草地学报,2023,31(2):396-403.
- [18]郝亚微,贺涛.褪黑素对模拟干旱胁迫下罗勒幼苗光合性能及抗氧化酶活性的影响[J].江苏农业科学,2024,52(3):179-184.
- [19]姜瑛,张辉红,魏畅,等.外源褪黑素对干旱胁迫下玉米幼苗根系发育及生理生化特性的影响[J].草业学报,2023,32(9):143-159.
- [20]谢晓娜,杨丽涛,王盛,等.甘蔗 NADP 异柠檬酸脱氢酶基因(SoNADP-IDH)的克隆与表达分析[J].中国农业科学,2015,48(1):185-196.
- [21]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.