

褪黑素浸种对大豆种子萌发过程中 干旱胁迫的缓解效应

秦 彬,张明聪,何松榆,张春宇,王明瑶,
金喜军,王孟雪,张玉先,胡国华

(黑龙江八一农垦大学农学院,黑龙江 大庆 163319)

摘 要:以大豆干旱敏感型品种绥农 26 为材料,采用室内培养法,研究不同浓度褪黑素(0、100、300、500、800 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 浸种对 6%PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下大豆种子萌发的影响。结果表明:干旱胁迫处理抑制了大豆种子萌发,与对照(蒸馏水处理种子)相比,处理 D(6% PEG 处理种子)的发芽势、发芽率、根体积和鲜重显著降低,降幅分别为38.14%、23.72%、21.4%、25.6%;根系电导率、MDA 和 H_2O_2 含量大幅上升,增幅分别为 51.18%、83.33%和 60.60%。而褪黑素浸种处理(100、300、500、800 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)显著缓解了干旱胁迫对种子萌发的抑制,促进了根系生长,其中以根直径和干重提升最为显著,分别增加了 16.38%、29.73%、34.97%、31.72%和 10.70%、14.28%、10.70%、25.00%;抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX)活性提高,其中处理 M500+D(500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素+6%PEG)效果最为显著,增幅分别为 37.61%、40.10%、12.96%和 28.31%。在 6% PEG-6000 模拟的干旱胁迫下,500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素浸种处理对大豆种子萌发过程中干旱胁迫的缓解效果最佳。

关键词:大豆;干旱胁迫;褪黑素浸种;萌发;根系生长;生理机制

中图分类号:S565.1;S351.1 **文献标志码:**A

Alleviating effect of melatonin soaking on drought stress during soybean seed germination

Qin Bin, Zhang Mingcong, He Songyu, Zhang Chunyu, Wang Mingyao, Jin Xijun,
Wang Mengxue, Zhang Yuxian, Hu Guohua

(College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: The drought-sensitive soybean variety, Suinong 26, was used as the material to study the effects of different concentrations of melatonin (0, 100, 300, 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ and 800 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) soaking soybean seeds on the germination under simulated drought stress, 6% PEG-6000. The results showed that the germination of soybean seeds was inhibited through the drought stress treatment. Compared with the control, the germination energy, germination ratio, root volume, dry weight and fresh weight in the groups treated by D (6% PEG) significantly decreased by 38.14%, 23.72%, 21.4%, and 25.6%, respectively. The root conductivity, MDA and H_2O_2 content significantly increased by 51.18%, 83.33%, and 60.60%, respectively. Besides, the seed germination and the growth of roots under the drought stress were significantly promoted with the melatonin soaking treatment. The root diameter and dry weight significantly increased 16.38%, 29.73%, 34.97%, 31.72% and 10.70%, 14.28%, 10.70%, 25.00%, respectively. The activities of antioxidant enzymes (SOD, POD, CAT and APX) were further improved, among which they were increased most significantly with the treatment of M 500 + D (500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ melatonin + 6% PEG) 37.61%, 40.10%, 12.96%, and 28.31%, respectively. It is preliminarily deduced that un-

der 6% PEG-6000 simulated drought stress, the melatonin soaking with melatonin of 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ was the best treatment.

Keywords: soybean; drought; melatonin seed soaking; germination; root growth; physiological mechanism

大豆是我国重要的经济作物,而干旱是限制大豆籽粒萌发的重要限制因素之一。因此,提高大豆抗旱能力,对于扩大我国大豆种植面积和实现大豆增产稳产具有重要的实际意义。干旱胁迫会引发植物生理代谢功能紊乱,导致植物体内的活性氧含量增加,引起细胞膜脂过氧化以及膜通透性发生改变,从而影响植物正常的生长发育^[1-3]。如种子萌发阶段干旱会抑制大豆种子发芽和大豆根系的发育,从而对大豆营养生长造成不利影响^[4]。

现阶段植物生长调节剂被普遍应用于提高作物对逆境的抵抗能力上。褪黑素 (melatonin, MT) 是一类广泛存在于动植物体内的吲哚类激素,其在植物中具有多种功能,包括调节植物生长发育,提高植物对多种逆境的抗性^[5-6]。在小麦的研究中发现,外源褪黑素能提高干旱胁迫下小麦种子的发芽势和发芽率,增强幼苗根系吸水能力^[7]。干旱胁迫也会使植株体内渗透调节物质增加以缓解逆境条件对植株造成的损伤。研究表明^[8],水分胁迫下施用褪黑素处理可显著增加黄瓜萌发期体内的可溶性蛋白、可溶性糖等渗透调节物质的含量,降低膜损伤程度。膜脂过氧化损伤会使细胞内核酸和蛋白质等代谢活性物质失衡,进而导致植物生长发育受阻。而一般认为褪黑素是通过提高抗氧化酶活性 (SOD、POD) 来缓解逆境对植物造成膜脂过氧化损伤。在紫苏幼苗的研究中发现^[9],当受到干旱胁迫时外源褪黑素可增强根系中的抗氧化酶活性,降低丙二醛 (MDA) 含量,有效增强了幼苗的抗旱性。另有研究表明^[10] 外源褪黑素可以通过降低植物体内活性氧 (ROS) 含量,缓解因干旱胁迫造成的植物生物膜损伤,保护细胞结构,提高细胞内渗透调节物质含量,从而增强植物的抗旱能力。

干旱胁迫不利于作物的生长和繁殖,近些年褪黑素对逆境胁迫下植物生长发育调节作用的研究越来越被关注,而褪黑素对干旱胁迫下大豆萌发期根系的生长发育及生理特性影响鲜有报道。本文通过研究干旱胁迫下不同浓度的褪黑素浸种对大豆萌发期生长发育以及生理生化影响,筛选出适宜调节干旱胁迫的最佳施用浓度,为深入探索褪黑素调节干旱胁迫的机制提供参考,为后续试验提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验开始于 2018 年 5 月,在黑龙江省大庆市黑龙江八一农垦大学大豆研究室进行。供试材料为干旱敏感型大豆品种绥农 26^[11],由黑龙江省农业科学院大庆分院提供;褪黑素由国家杂粮工程技术研究中心提供。

选取健康饱满的大豆种子在 5% NaClO 溶液中消毒 10 min 后用蒸馏水冲洗 5 次并恢复至种子初始含水量。配制不同浓度褪黑素溶液 (0、100、300、500、800 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 浸种 12 h 后将种子晾干。通过前期预试验确定 PEG (6000) 6% 浓度对大豆萌发期根系有较明显的抑制作用。共设置 6 个处理,分别包括蒸馏水处理种子 (CK)、6%PEG 模拟干旱胁迫处理+蒸馏水处理种子 (D)、6%PEG+100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理种子 (M100+D)、6%PEG+300 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理种子 (M300+D)、6%PEG+500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理种子 (M500+D)、6%PEG+800 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素处理种子 (M800+D)。根据不同处理将 10 粒大小均匀一致的预处理种子放于铺有 3 层滤纸的培养皿 (直径 9 cm) 内,置床起记为第 0 天。将其放入培养箱中 25℃ 条件下恒温培养,每 2 d 更换一次滤纸,称重法补水,每天定时称重并向培养皿内加入处理液到初始重量,保持处理液浓度不变。每天观察发芽情况,调查种子发芽数,当胚根突破种皮,长度为种长一半时计为发芽种子。3 d 后测定发芽势、7d 后测定发芽率。每个处理设 3 次重复,培养时间为 7 d。

1.2 测定项目与方法

培养 3 d 后统计种子的发芽势,7 d 后统计种子的发芽率。

发芽率 = 培养 7 d 后供试种子的发芽数 / 供试种子数 $\times 100\%$;

发芽势 = 培养 3 d 后供试种子的发芽数 / 供试种子数 $\times 100\%$ 。

平均发芽速度 (GV) = $\sum (D \cdot n) / \sum n$
式中, D 为从种子置床起算的天数, n 为相应各天的发芽粒数。

发芽指数 (GI) = $\sum (G_t / D_t)$
式中, G_t 指在时间 t 日内的发芽数, D_t 为相应的发芽

天数。

活力指数(VI) = $GI \times S$

式中, S 为幼苗鲜重。

萌发 7 d 后,对每个处理的根系进行扫描,并用根系形态学和结构分析应用系统 winRHIZO 分析根的形态指标。用电子天平称量鲜重,用 DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科技有限公司生产)105℃杀青 1 h 后 80℃烘干至恒重,用电子天平称量干重。

每个处理混合取样,并于-80℃保存样品,测定样品的酶活性和其他生理指标。游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮比色法测定^[12];可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[13];可溶性糖含量的测定参照蒽酮比色法^[14];丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[15]。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(CAT)、过氧化氢酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)参照 Zou 等^[16]方法测定;电导率采用电导率仪测定;过氧化氢(H₂O₂)含量按照高洪波等^[17]的方法进行测定。

1.3 数据分析

数据处理用 SPSS 软件的 Duncan's 多重比较法对数据进行统计分析,用 Origin 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆种子萌发的影响

由表 1 可知,对照组(CK)的发芽率与发芽势均为 96.7%,与对照组(CK)相比处理 D 发芽率和发芽势均显著降低,降幅均为 70%,说明干旱胁迫下种子的萌发受到明显抑制。不同浓度褪黑素处理大豆种子的发芽率和发芽势与处理 D 相比均有不同程度的上升,说明褪黑素可有效缓解干旱胁迫对大豆种子萌发的抑制,其中处理 M500+D 效果最为显著,发芽率和发芽势分别达到了 96.00%和93.00%。平均发芽速度、活力指数和种子发芽指数的变化趋势与发芽率和发芽势的变化趋势一致。处理 D 的种子活力指数和发芽指数均明显低于对照组(CK),

与 CK 相比降低了 105.86%和 38.74%。然而处理 M100+D、M300+D、M500+D 的平均发芽速度、活力指数和种子发芽指数与处理 D 相比均有明显的升高,其中处理 M500+D 的平均发芽速度、种子活力指数和发芽指数与处理 D 相比提高了 4.00%、41.86%和 22.88%。但是随着褪黑素浓度的升高,这种促进作用逐渐减弱,处理 M800+D 种子的平均发芽速度、活力指数均显著低于 M500+D,且发芽势、发芽率、发芽指数也有所降低,说明褪黑素浸种对缓解干旱胁迫作用有一定效果,但若浓度过高则会抑制种子萌发。

2.2 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发期根系指标及生物量的影响

由表 2 可知,与对照组(CK)相比处理 D 的根长、表面积、根体积和直径分别降低了 30.29%、32.09%、23.72%和 4.76%,说明处理 D 种子的根系生长受到了明显的抑制。与处理 D 相比其他各处理的根系指标均有不同程度的上升,其中处理 M500+D 效果最为显著,分别上升了 13.67%、11.52%、18.41%和 34.97%。干鲜重的变化趋势与根系指标的变化趋势大致相同。其中干重以处理 M300+D 最高,而鲜重以处理 M500+D 为最大值,与处理 D 相比提高了 10.64%和 22.94%。结果表明,褪黑素浸种在一定程度上能够有效地缓解干旱胁迫对大豆根系生长的抑制和生物量的累积。

2.3 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发期根系抗氧化酶的影响

由图 1 所示,不同浓度的褪黑素浸种对抗氧化酶活性的影响不同。与对照组(CK)相比处理 D 的 SOD、POD、CAT、APX 活性显著提升,而干旱胁迫下不同浓度褪黑素处理的抗氧化酶活性与处理 D 相比呈现先上升后下降的趋势,其中处理 MT500 效果最为显著,分别上升了 37.61%、40.10%、12.96%和 28.31%。结果表明,褪黑素浸种可以提高干旱胁迫下大豆萌发期根系中抗氧化酶活性,有效缓解了干旱胁迫对大豆造成的损伤,但浓度过大亦会产生抑制的情况。

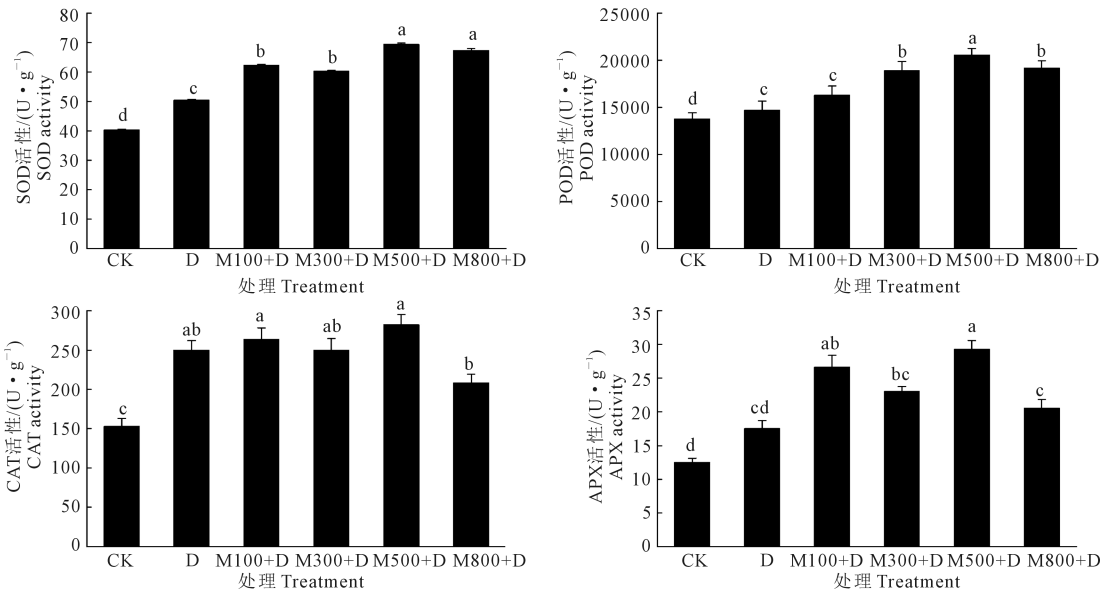
表 1 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发的影响

Table 1 Effects of melatonin soaking on germination of soybean under drought stress					
处理 Treatment	发芽势/% Germination energy	发芽率/% Germination ratio	平均发芽速度/d Germination speed	活力指数 Vigor index	发芽指数 Germination index
CK	96.7±3.3a	96.7±3.3a	4.070±0.012d	14.335±0.38a	23.564±0.63a
D	70.0±11.5bc	70.0±11.5b	4.055±0.084ab	6.963±0.91de	16.983±2.22c
M100+D	66.7±3.3c	76.7±6.7ab	4.185±0.098b	5.883±0.37e	16.495±1.04c
M300+D	87.0±3.3ab	93.0±3.3a	4.198±0.049d	8.939±0.33bc	19.939±0.73abc
M500+D	93.0±3.3a	96.0±3.3a	4.203±0.067a	9.878±0.37b	20.870±0.44ab
M800+D	83.0±3.3abc	83.0±3.3ab	4.155±0.027c	8.198±0.14cd	18.774±0.32bc

注:同列不同小写字母代表差异显著($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences($P<0.05$). The same below.

表 2 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发期根系指标及生物量的影响

处理 Treatment	根长/cm Root length	根表面积/cm ² Surface area	根体积/mm ³ Root volume	根直径/mm Diameter	生物量 Biomass/g	
					干重	鲜重
					Dry weight	Fresh weight
CK	14.621±0.48a	7.151±0.04a	0.305±0.01a	0.121±0.006bc	0.034±0.0025a	0.49±0.035a
D	11.222±0.05d	5.414±0.27b	0.246±0.02a	0.116±0.003c	0.028±0.0005b	0.39±0.009b
M100+D	11.579±0.04cd	5.881±0.09ab	0.294±0.03a	0.134±0.002b	0.031±0.0015b	0.40±0.040b
M300+D	12.119±0.20cd	6.176±0.08ab	0.320±0.02a	0.150±0.006a	0.032±0.0028d	0.40±0.037b
M500+D	12.756±0.12b	6.037±0.11ab	0.292±0.01a	0.156±0.001a	0.031±0.0015b	0.47±0.009b
M800+D	12.257±0.17bc	6.004±0.05ab	0.269±0.01a	0.152±0.003a	0.035±0.0040c	0.44±0.062b



注:不同小写字母代表处理间差异显著 ($P<0.05$),下同。
Note: Different lowercase letters represent significant differences among treatments ($P<0.05$), the same below.

图 1 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发期抗氧化酶活性的影响

Fig.1 Effects of melatonin soaking on antioxidant enzyme activities during soybean germination under drought stress

2.4 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发期根系膜脂过氧化物物质与渗透调节物质的影响

由图 2 可知,干旱胁迫处理可以导致大豆根系体内的 H₂O₂ 大量积聚,对大豆根系造成了膜脂过氧化损伤,MDA、H₂O₂ 含量和电导率的积累可作为膜脂过氧化程度的指标之一。与对照组 (CK) 相比处理 D 的 MDA、H₂O₂ 含量和电导率显著升高,增幅为 53.40%、83.33% 和 60.60%。而不同浓度褪黑素处理的膜脂过氧化物物质与处理 D 相比均有不同程度的下降,其中处理 MT500 效果最为显著,降幅为 31.53%、16.69% 和 32.50%。

渗透调节物质的变化趋势与其他指标不同,处理 D 中的渗透调节物质脯氨酸、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量均明显高于对照组 (CK),与 CK 相比上升了 37.13%、17.42% 和 52.25%。而处理 M100+D、M300+D、M500+D 的渗透调节物质含量与处理 D

相比均有明显升高,其中以处理 M300+D 效果最好, M500+D 其次。处理 M300+D 相比处理 D 的脯氨酸、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量上升了 27.30%、28.56% 和 32.49%。以上结果表明,褪黑素浸种可以抑制干旱胁迫下大豆根系产生的膜质过氧化物物质并增加渗透调节物质的含量,减少膜系统所受到的外界环境损伤。

3 讨 论

干旱胁迫会引发大豆种子生理代谢功能紊乱,从而抑制大豆种子的萌发,莫金刚等^[18]研究表明,干旱胁迫对大豆种子的发芽率、发芽势、平均发芽速度、活力指数和发芽指数有较强的抑制作用。本研究发现,干旱胁迫下大豆种子萌发受到明显抑制,主要表现为发芽率和发芽势显著下降,平均发芽速度减缓,活力指数和发芽指数明显降低。而褪

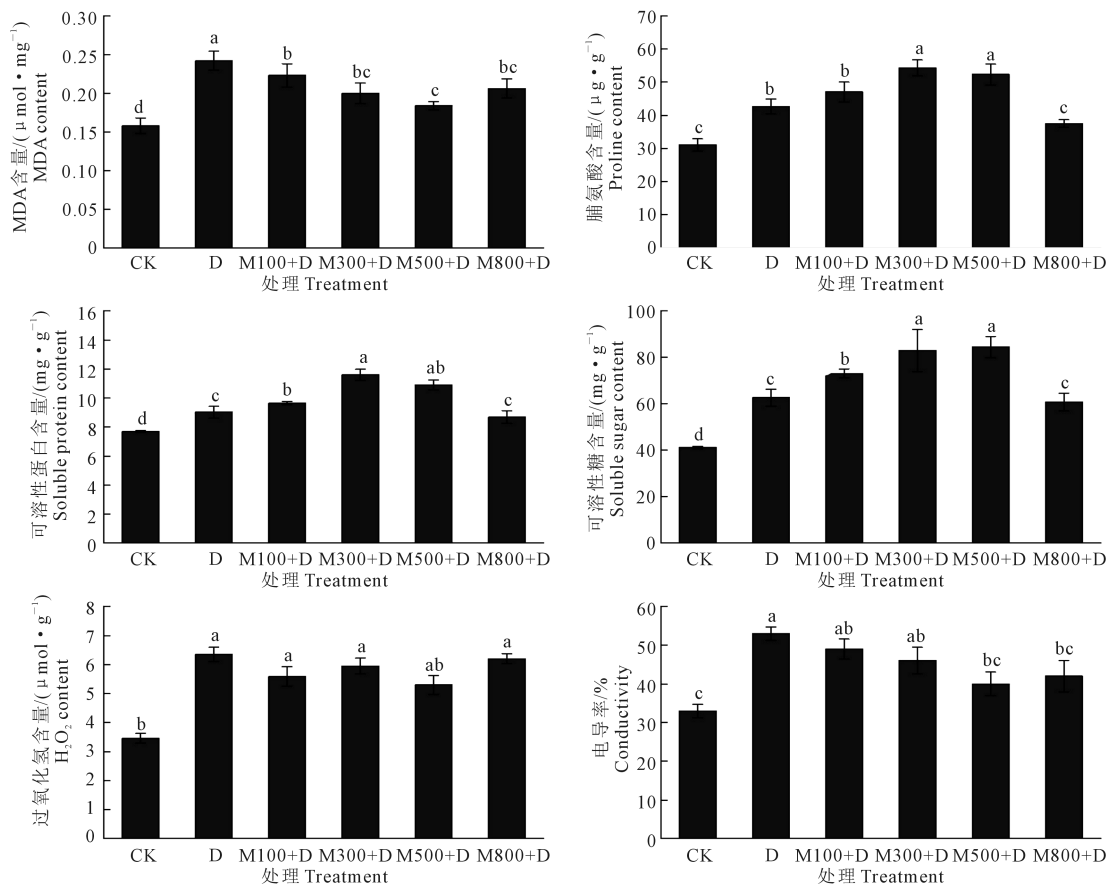


图 2 褪黑素浸种对干旱胁迫下大豆萌发期渗透调节物质的影响

Fig.2 Effects of melatonin soaking on osmotic regulation substances during soybean germination under drought stress

黑素浸种可有效缓解干旱胁迫对大豆种子萌发产生的不利影响,这与 Liu 等^[19]和严加坤等^[20]研究逆境胁迫下褪黑素对水稻和玉米萌发情况的结果一致。

根系是大豆吸收水分和养分的主要器官,其生长情况对大豆发育产生重要影响。本试验通过褪黑素浸种对大豆进行发芽培养,发现干旱胁迫严重抑制大豆萌发期根系的生长。这与前人^[18]对干旱胁迫下大豆生长发育情况的研究结果相同。而干旱胁迫下经过褪黑素浸种处理的大豆根长、根体积与根表面积相较于处理 D 来说并不显著,但根直径与干重不仅显著高于处理 D,甚至超过了对照 (CK)。关于褪黑素可以促进根生长的研究有很多, Cui 等^[21]研究发现在干旱胁迫下褪黑素可以促进小麦种子生根,促进根系生长发育。低浓度褪黑素还可以促进甜樱桃不定根的再生^[22]。由此可推断褪黑素在干旱胁迫下可以通过增加大豆根直径来提升干物质累积,而不是通过增加根的长度来提高根重。褪黑素浸种处理可以促进大豆萌发期根系发育,并可以在干旱胁迫下提高大豆萌发期根系的干

物质累积,从而提高大豆抵御干旱的能力,这与刘月等^[6]认为盐害胁迫下褪黑素通过提升大豆根直径来增加根重的研究结果一致。

干旱胁迫打破了活性氧在植物体内的动态平衡,引起了植物体内细胞氧化损伤^[23]。褪黑素可通过上调编码抗氧化酶基因的转录水平来激活抗氧化酶 (SOD、POD、CAT、APX) 活性来清除植物体内过量的 MDA 与 H_2O_2 ,缓解干旱胁迫带来的氧化损伤^[24-27]。以往的研究表明^[28],外源褪黑素能够显著提高逆境胁迫下植物体内抗氧化酶活性,从而提高植物清除活性氧的能力。本研究发现,干旱胁迫下大豆萌发期根系内电导率、MDA、 H_2O_2 含量快速上升,说明干旱胁迫下活性氧大量累积,细胞膜遭到严重破坏。干旱胁迫同时也提高了大豆萌发期根系中抗氧化酶活性,而经过褪黑素 100~500 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浸种后进一步增强了大豆萌发期根系中抗氧化酶的活性,减少了干旱胁迫下 MDA 和 H_2O_2 的含量。这说明在干旱胁迫下经过褪黑素浸种可以激活大豆萌发期根系中抗氧化酶的活性,有效清除过量的 H_2O_2 ,使得 MDA 含量与电导率维持在较低水

平,缓解了干旱胁迫诱导的膜脂过氧化给大豆根系带来的损伤。适宜的褪黑素浓度有利于清除干旱胁迫诱导的 ROS,稳定膜结构,而过量的褪黑素则破坏了蛋白质的氧化平衡态^[24],所以由此推测高浓度褪黑素可能会干扰抗氧化酶的正常运作从而加重了细胞氧化的损伤。

渗透调节是植物在干旱胁迫下降低渗透势、抵抗逆境胁迫的一种重要方式^[29-30]。脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白作为渗透调节物质,其含量的高低能够衡量植物体对逆境的适应能力。前人研究表明^[31],褪黑素可增加番茄体内脯氨酸含量从而缓解干旱胁迫造成的损伤;另有研究发现^[6],褪黑素可以促进大豆幼苗细胞中可溶性糖的合成,平衡液泡里盐分胁迫,增加其抗逆性。本研究结果表明,大豆萌发期根系的游离脯氨酸、可溶性蛋白与可溶性糖含量在干旱胁迫下均有所增加,而经过褪黑素浸种的种子在干旱胁迫下其根系中渗透调节物质含量进一步提升,说明褪黑素浸种可以促进大豆细胞中有机溶质的合成,增加渗透调节物质的含量,降低细胞渗透势,维持了植物体内的渗透平衡,从而保证了细胞膜结构的完整,提高植物对干旱胁迫的适应能力。本研究结果与李鹏辉等^[32]的研究结果一致。

4 结 论

综上所述,干旱胁迫会导致活性氧的大量累积,致使细胞膜脂过氧化,破坏了细胞的渗透平衡从而抑制了大豆种子的萌发,影响大豆的正常生长发育。而褪黑素浸种显著提高了干旱胁迫下大豆种子的发芽能力,促进了根系发育,激活了大豆体内抗氧化酶活性,清除过量的 MDA 与 H_2O_2 ,降低根系细胞的膜脂损伤,提高了大豆体内渗透调节物质含量,缓解了由干旱胁迫导致的细胞渗透体系失衡所带来的损伤。本试验结果表明 $500\ \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 褪黑素浸种对于缓解干旱胁迫下大豆种子萌发效果最显著。

参 考 文 献:

[1] 张翠梅,师尚礼,吴芳.干旱胁迫对不同抗旱性苜蓿品种根系生长及生理特性影响[J]. 中国农业科学,2018,51(5):868-882.

[2] Rezayian M, Niknam V, Ebrahimzadeh H. Effects of drought stress on the seedling growth, development, and metabolic activity in different cultivars of canola [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2018,64(3):360-369.

[3] 孙晓莉,田寿乐,沈广宁,等.干旱胁迫下 H_2S 对板栗幼苗根系抗氧化特性及呼吸相关酶活性的影响[J].核农学报,2019,33(5):1024-1031.

[4] 邓思雪. 干旱胁迫下不同大豆品种萌发特性及其耐旱性评价[D].

沈阳:沈阳农业大学,2018.

[5] 巩彪,史庆华.园艺作物褪黑素的研究进展[J].中国农业科学,2017,50(12):2326-2337.

[6] 刘月,寇从贤,付桂萍,等.褪黑素对大豆幼苗盐害的缓解效应及机理研究[J].中国油料作物学报,2017,39(6):813-819.

[7] 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.

[8] Zhang N, Zhao B, Zhang H J, et al. Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Journal of Pineal Research, 2012, 54(1):15-23.

[9] 李爱,孙汪亮,李林,等.外源褪黑素对干旱胁迫下紫苏幼苗生长的影响[J].江苏农业科学,2018,46(2):70-73.

[10] 武兰兰,郑耀庭,李国元,等.褪黑素调节植物非生物胁迫耐性的机理[J].植物生理学报,2018,54(11):1669-1677.

[11] 屈春媛,张玉先,金喜军,等.干旱胁迫下外源 ABA 对鼓粒期大豆产量及氮代谢关键酶活性的影响[J]. 中国农学通报,2017,33(34):26-31.

[12] 姜义宝,杨玉容,郑秋红.外源一氧化氮对干旱胁迫下苜蓿幼苗抗氧化酶活性和叶绿素荧光特性的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(2):65-68.

[13] 李合生.植物生理生化实验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2000:169-184.

[14] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000,62-174.

[15] 赵颖,魏小红,马文静,等.硝普钠(SNP)浸种对渗透胁迫下不同紫花苜蓿种子萌发生理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(6):63-70.

[16] Zou J N, Jin X J, Zhang Y X, et al. Effects of melatonin on photosynthesis and soybean seed growth during grain filling under drought stress[J]. Photosynthetica, 2019, 57:512-520.

[17] 高洪波,郭世荣.外源 γ -氨基丁酸对营养液低氧胁迫下网纹甜瓜幼苗抗氧化酶活性和活性氧含量的影响[J].植物生理与分子生物学学报,2004,30(6):651-659.

[18] 莫金钢,马建,张丽辉,等.干旱胁迫对大豆种子萌发的影响[J].大豆科学,2014,33(5):701-704.

[19] Liu S X, Huang Y Z, Luo Z J, et al. Effects of exogenous melatonin on germination of rice seeds under Cd stresses [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016,(6):1034-1041.

[20] 严加坤,周奇,刘莉.褪黑素处理对干旱胁迫下玉米种子萌发的影响[J].山西农业科学,2019,47(2):159-161,193.

[21] Cui G B, Zhao X X, Liu S D, et al. Beneficial effects of melatonin in overcoming drought stress in wheat seedlings [J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2017, 118:138-149.

[22] Sarropoulou V N, Therios I N. Melatonin promotes adventitious root regeneration in in vitro shoot tip explants of the commercial sweet cherry rootstocks CAB-6P (*Prunus cerasus* L.), Gisela 6 (*P. cerasus* × *P. canescens*), and MxM 60 (*P. avium* × *P. mahaleb*) [J]. Journal of Pineal Research, 2012, 52(1):38-46.

[23] Gao X K, Bai L R, Liu G J. Effects of drought stress on seed germination and seedling growth of soybean [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012,(24):5618-5620.

[24] Antolín I, Rodríguez C, Sañz R M, et al. Neurohormone melatonin

prevents cell damage; effect on gene expression for antioxidant enzymes [J]. *Faseb Journal*, 1996, 10(8):882-890.

[25] Rodriguez C, Mayo J C, Sainz R M, et al. Regulation of antioxidant enzymes; a significant role for melatonin[J]. *Journal of Pineal Research*, 2010, 36(1):1-9.

[26] Park S, Lee D, Jang H, et al. Melatonin-rich transgenic rice plants exhibit resistance to herbicide-induced oxidativestress [J]. *Journal of Pineal Research*, 2013, 54(3):258-263.

[27] Reiter R J, Tan D X, Burkhardt S, et al. Melatonin in plants.[J]. *Nutrition Reviews*, 2010, 59(9):286-290.

[28] 邹京南,金喜军,王孟雪,等.外源褪黑素对于旱胁迫条件下大豆苗

期光合及生理的影响[J].*大豆科学*,2018,37(6):896-905.

[29] 王雨婷,王智真,赵婷,等.24-表油菜素内酯预处理对于旱胁迫下葡萄幼苗抗氧化系统和渗透调节物质的影响[J].*西北植物学报*, 2019,39(3):489-497.

[30] 韩冷,徐敏,张萍.干旱胁迫下新疆核桃幼苗叶片渗透调节物质变化研究[J].*天津农业科学*,2018,24(8):1-3.

[31] 李琳琳,宋彦涛,金华,等.外源褪黑素对于旱胁迫下番茄叶片光合特性和抗氧化酶系统的影响[J].*大连民族大学学报*,2019,21(1):33-38.

[32] 李鹏辉,向金友,王林,等.干旱胁迫下外源褪黑素对烟草幼苗生理特性的影响[J].*中国农业科技导报*,2019,21(5):41-48.

(上接第 191 页)

- 2)晴天时夏玉米茎流速率为单峰曲线,雨天时为多峰曲线,且雨天茎流速率小于晴天。多云时由于净辐射等小气候要素不稳定,波动较大,没有特定规律可循。
- 3)茎流速率与净辐射、温度、VPD、风速呈正相关,Pearson 相关系数分别为 0.754、0.622、0.674、0.443。
- 4)茎流速率相较于参考作物蒸散发 ET_0 滞后约 1 h。
- 5)计算得出在灌浆阶段夏玉米基础作物系数为 1.0,成熟期显著下降,收获时为 0.55。

参 考 文 献:

[1] 于金凤,刘文兆,甘卓亭,等.黄土塬区苹果树蒸腾速率变化特征及其影响因子[J]. *干旱地区农业研究*, 2010,28(4):59-63.

[2] 马福生,康绍忠,胡笑涛,等.不同阶段亏水处理对温室栽培梨枣树茎液流变化影响的研究[J]. *农业工程学报*, 2006,(4):6-14.

[3] 张亚雄,孙西欢,马娟娟,等.蓄水坑灌下苹果树茎流速率日变化及其影响因子的研究[J]. *节水灌溉*, 2017,(5):11-15.

[4] 张德来,蔡福,史奎桥,等.东北地区春玉米主要生理参数对拔节至灌浆期干旱的响应[J]. *气象与环境学报*, 2018,34(4):134-138.

[5] 马长健,刘馨惠,卞城月,等.热平衡式茎流计在测定植物蒸腾耗水中的进展[J]. *中国农学通报*, 2015,31(32):241-245.

[6] 孙宏勇,张喜英,张永强,等.用 Micro-Lysimeters 和大型蒸渗仪测定夏玉米蒸散的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2002,20(4):72-75.

[7] 于文颖,纪瑞鹏,冯锐,等.不同程度干旱胁迫及复水对春玉米(丹玉 39)茎流动态的影响[J]. *干旱地区农业研究*[J]. 2016,34(2):163-170.

[8] 杜斌,胡笑涛,王文娥,等.交替沟灌玉米灌浆期茎流影响因子敏感性分析与模型适用性研究[J].*中国农业科学*, 2018,51(2):233-245.

[9] Zhao C, Si J H, Feng Q,et al. Comparative study of daytime and nighttime sap flow of populus euphratica[J]. *Plant Growth Regulation*, 2017,82(2):353-362.

[10] 张静,王力,韩雪,等.不同时间尺度下黄土塬区 19 年生苹果树干液流速率与环境因子的关系[J].*中国农业科学*, 2016,49(3):2583-2592.

[11] 陈博,欧阳竹,程维新,等.近 50a 华北平原冬小麦-夏玉米耗水规律研究[J]. *自然资源学报*, 2012,27(7):1186-1199.

[12] Jiang X L, Kang S Z, Li F S, et al. Evapotranspiration partitioning and variation of sap flow in female and male parents of maize for hybrid seed production in arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2016,176:132-141.

[13] Liu C W, Du T S, Li F S, et al. Trunk sap flow characteristics during two growth stages of apple tree and its relationships with affecting factors in an arid region of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2012,104(1):193-202.

[14] 李宏,刘帮,李长城,等.不同生育期幼龄枣树茎流特征及其与环境因子的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2016,34(5):54-61.

[15] Adiku S G K, Ozier-Lafontaine H, Bajazet T. Patterns of root growth and water uptake of a maize-cowpea mixture grown under greenhouse conditions[J]. *Plant and Soil*, 2001,235(1):85-94.

[16] Zhang B Z, Xu D, Liu Y, et al. Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in North China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016,216:1-12.

[17] 龚雪文,刘浩,孙景生,等.日光温室番茄不同空间尺度蒸散量变化及主控因子分析[J]. *农业工程学报*, 2017,33(8):166-175.

[18] 买尔当·克依木,玉米提·哈力克,古丽卡玛尔·迪力木拉提,等.阿克苏市 3 种绿化乔木树干液流日变化特征[J]. *森林与环境学报*, 2016,36(4):473-479.

[19] Martin T. Winter season tree sap flow and stand transpiration in an intensively-managed loblolly and slash pine plantation[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 1999,10(1-2):155-163.

[20] 丁日升,康绍忠,龚道枝.苹果树液流变化规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004,23(2):21-25.

[21] 李博,王刚卫,田晓莉,等.不同干旱方式和干旱程度对玉米苗期根系生长的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008,26(5):148-152.

[22] Xia J B, Zhao Z G, Sun J K,et al. Response of stem sap flow and leaf photosynthesis in Tamarix chinensis to soil moisture in the Yellow River Delta, China[J]. *Photosynthetica*, 2017,55(2):368-377.

[23] 赵付勇,赵经华,白云岗,等.核桃树茎流速率及土壤水动态分布规律的研究[J]. *节水灌溉*, 2016,(10):34-38.

[24] 聂文果,张吨明,徐先英,等.玉米茎流速率及耗水量研究[J]. *中国农学通报*, 2009,25(7):230-234.

[25] Liu C M, Zhang X Y, Zhang Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002,111(2):109-120.