

张晨, 刘畅, 冯国军, 等. 外源尿囊素对碱胁迫下菜豆种子萌发及抗性的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(2): 392-398.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.02.018

外源尿囊素对碱胁迫下菜豆种子萌发及抗性的影响

张晨, 刘畅, 冯国军, 刘大军, 闫志山, 张泰峰, 杨晓旭
(黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为探究尿囊素对碱胁迫环境下菜豆种子萌发及生理特征的影响, 本研究以碱敏感菜豆品种金冠为试验材料, 在筛选敏感碱胁迫浓度和适宜尿囊素浸种浓度的基础上, 设置蒸馏水浸种+蒸馏水萌发培养对照(CK)、蒸馏水浸种+40 mmol/L NaHCO₃萌发培养处理(S)、2 mmol/L尿囊素浸种+40 mmol/L NaHCO₃萌发培养处理(S+All), 测定培养后12 h、24 h、36 h、48 h、60 h和72 h菜豆种子中可溶性蛋白质、可溶性糖、脯氨酸等渗透调节物质的含量, 菜豆子叶中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶的活性及超氧阴离子自由基(O₂⁻)产生速率、丙二醛(MDA)含量。结果表明, 2 mmol/L尿囊素浸种缓解了菜豆种子萌发的碱胁迫, 发芽势、发芽率分别较蒸馏水处理提高了17.71%、17.76%。培养后12~72 h S处理菜豆种子的可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量及菜豆子叶中的O₂⁻产生速率、MDA含量总体高于CK, 而菜豆子叶的抗氧化酶活性总体低于CK。S+All处理菜豆种子的可溶性蛋白质含量、可溶性糖含量、脯氨酸含量及菜豆子叶的抗氧化酶活性总体高于S处理, 而菜豆子叶的O₂⁻产生速率和MDA含量总体低于S处理。本研究结果为尿囊素在碱胁迫环境下菜豆种植中的应用提供了依据。

关键词: 菜豆; 种子萌发; 碱胁迫; 尿囊素

中图分类号: S643.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2026)02-0392-07

Effect of exogenous allantoin on common bean seed germination and resistance under alkali stress

ZHANG Chen, LIU Chang, FENG Guojun, LIU Dajun, YAN Zhishan, ZHANG Taifeng, YANG Xiaoxu
(College of Modern Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: To explore the effects of allantoin on seed germination and physiological characteristics of common bean under alkali stress, the alkali-sensitive common bean variety Jinguan was used as the experimental material in this study. Based on the screening of sensitive alkali stress concentration and suitable allantoin soaking concentration, distilled water soaking + distilled water germination culture control (CK), distilled water soaking + 40 mmol/L NaHCO₃ germination

culture treatment (S), 2 mmol/L allantoin soaking + 40 mmol/L NaHCO₃ germination culture treatment (S+All) were set. The contents of soluble protein, soluble sugar, proline and other osmotic adjustment substances in common bean seeds, the activities of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT), the production rate of superoxide anion free radical (O₂⁻) and the content of malondialdehyde (MDA) in cotyledons of common bean seeds were measured at 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 60 h and 72 h after cul-

收稿日期: 2025-04-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金项目(YQ2024C046); 黑龙江省“优秀青年教师基础研究支撑计划”项目(YQJH2024198); 黑龙江省高等学校基本科研业务费项目(2024-KYYWF-0110)

作者简介: 张晨(1999-), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事菜豆育种及种质资源创新研究。(E-mail) 3086630848@qq.com

通讯作者: 杨晓旭, (E-mail) sunny19880106@126.com

ture. The results showed that the germination potential and germination rate of seeds treated with 2 mmol/L allantoin were 17.71% and 17.76% higher than those of distilled water treatment, respectively, which alleviated alkaline stress during the germination of common bean seeds. The soluble protein content, soluble sugar content, proline content in common bean seeds, and O_2^- production rate and MDA content of the cotyledons of bean seeds treated with S at 12–72 h after culture were generally higher than those of CK, while the antioxidant enzyme activity was generally lower than that of CK in cotyledons of common bean. The soluble protein content, soluble sugar content, proline content in common bean seeds and antioxidant enzyme activity in cotyledons of common bean of S+All treatment were higher than those of S treatment, while the O_2^- production rate and MDA content in cotyledons of common bean were lower than those of S treatment. The results of this study provide a basis for the application of allantoin in bean planting under alkaline stress.

Key words: common bean; seed germination; alkali stress; allantoin

近年来,受到全球气候变化及农田管理措施不当等自然因素和人为因素的影响,中国盐碱地面积呈增加趋势,且土壤盐碱化程度逐渐加重^[1]。中国东北平原地区盐碱化土壤面积达到了 3.84×10^6 hm²,约1/3耕地出现盐碱化^[2]。土壤盐碱化严重制约着中国农业的可持续发展,影响作物的生长,造成作物减产,使农业经济受创。

利用淡水洗盐是缓解土壤盐碱胁迫的常用手段,但这种方法在干旱地区往往难以实现。加强田间管理、喷施化肥农药等措施一般均不能从根源上解决土壤盐碱化问题。培育抗(耐)盐碱种质是较好的缓解盐碱胁迫的措施,但其进展缓慢,且不能覆盖所有作物类型。近年来利用外源物质浸泡作物种子或喷洒作物植株来增强作物对盐碱逆境的适应能力得到了广泛研究^[3]。目前生产中常用的外源物质有硝普钠(SNP)、亚精胺(Spd)、油菜素内酯(BRs)、硝酸钙 $[Ca(NO_3)_2]$ 、水杨酸(SA)以及赤霉素(GA)等,这些外源物质能通过调节植物代谢,增强作物对盐碱逆境的适应能力,从而减轻盐碱胁迫导致的损失^[4]。

尿囊素是多种动物的内源性代谢产物,也同样被发现存在于山药等草本植物中。植物遭受非生物胁迫时,伴随植物的应激反应,尿囊素会在植物体内累积^[5-8]。植物体内尿囊素的产生能够提高水稻植株叶绿素浓度,降低氧化自由基的生成速度^[9]。

菜豆(*Phaseolus vulgaris* L.)是中国重要的食豆类蔬菜之一,在中国广泛种植。受到土壤盐碱胁迫时,菜豆根部将面临高离子浓度的渗透胁迫,根际细胞膜上转运蛋白的转运效率下降,最终导致植株营养不良、生长受抑,甚至死亡,进而造成经济损失^[10]。目前,利用褪黑素、亚精胺、腐胺等外源物质缓解对菜豆盐碱、低温等逆境胁迫的研究已有开展^[11-13],但尿囊素对碱胁迫下菜豆种子萌发的影响

机制尚不明确。为此,本研究利用NaHCO₃模拟碱胁迫,分析尿囊素浸种对菜豆种子抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响,以期尿囊素的生产应用、盐碱地菜豆生产提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本研究采用的试验材料为碱敏感菜豆品种金冠^[14],由黑龙江大学园艺学课题组提供。NaHCO₃试剂购自天津市天力化学试剂有限公司,尿囊素购自山东优索化工科技公司。

1.2 试验方法及测定项目

1.2.1 菜豆碱敏感浓度试验 试验于2024年11月–2025年1月在黑龙江大学园艺学实验室进行。挑选大小均匀、颗粒饱满的金冠种子210粒,蒸馏水冲洗后使用75%的乙醇冲洗消毒。分别用20 mmol/L、40 mmol/L、60 mmol/L、80 mmol/L、100 mmol/L、120 mmol/L NaHCO₃溶液及蒸馏水浸种24 h,然后将浸种后的种子分别放入铺有双层浸湿滤纸的培养皿中,每皿10粒,每处理3次重复。分别在培养皿中加入相同浸种液10 mL,至滤纸浸湿且有2~3 mL溶液剩余。然后将培养皿置于25℃培养箱中进行暗发芽试验。每12 h补充上述培养液,保持滤纸浸湿并有2~3 mL余液,连续培养7 d。以胚根突破种皮2 mm作为发芽标准,计算发芽率,方法如下:

发芽率 = (第7 d 累计发芽种子数/供试种子数) × 100%

根据发芽率筛选明显抑制金冠种子萌发的碱浓度。

1.2.2 适宜尿囊素浸种浓度筛选试验 挑选大小均匀、颗粒饱满的金冠种子450粒,用蒸馏水冲洗后使用75%的乙醇消毒,分别利用蒸馏水(CK)与1

mmol/L、2 mmol/L、3 mmol/L、4 mmol/L 的尿囊素溶液进行浸种处理。浸种后 24 h 取出,将种子放入铺有双层浸湿滤纸的培养皿中,每皿 30 粒,3 组重复。分别在培养皿中加入 1.2.1 节筛选得到的敏感浓度的 NaHCO_3 溶液进行浸润培养,培养方法参考上述敏感碱浓度试验。以各处理第 3 d 种子发芽势和第 7 d 种子发芽率筛选缓解碱胁迫的适宜尿囊素浓度。

1.2.3 尿囊素对碱胁迫菜豆生理指标影响的测定
选取上述试验中蒸馏水浸种+蒸馏水浸润培养(CK)、蒸馏水浸种+菜豆敏感碱浓度浸润培养(S)、适宜浓度的尿囊素浸种+菜豆敏感碱浓度浸润培养(S+All)3 个处理的菜豆种子浸润培养 12 h、24 h、36 h、48 h、60 h 和 72 h,分别挑选生长一致的菜豆,去除种皮,取 2 g 子叶进行生理指标测定。分别采用氮蓝四唑(NBT)法^[15]、愈创木酚法^[16]、紫外吸收法^[17]、硫代巴比妥酸比色法^[18]、羟胺氧化法^[19]、考马斯亮蓝法^[20]、蒽酮比色法^[21]、茆三酮比色法^[22]测定菜豆子叶超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量、超氧阴离子自由基(O_2^-)生成速率、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量和脯氨酸含量。每个指标重复测定 3 次。

1.3 数据分析

利用 Excel 2021 软件进行数据统计及图表制作,利用 SPSS 27 软件进行不同处理的差异显著性分析($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同浓度 NaHCO_3 溶液对菜豆种子萌发的影响

不同浓度 NaHCO_3 溶液浸种及湿润培养对菜豆种子萌发率有显著影响。蒸馏水浸种和湿润培养(CK)的菜豆种子发芽率为 92%,20 mmol/L 和 40 mmol/L 的 NaHCO_3 溶液浸种和湿润培养的菜豆种子发芽率分别为 70% 和 45%。60 mmol/L、80 mmol/L、100 mmol/L、120 mmol/L NaHCO_3 溶液浸种和湿润培养的菜豆种子发芽率均为 0。因此,本研究认为,菜豆种子的敏感碱胁迫浓度为 40 mmol/L。

2.2 碱胁迫下不同浓度尿囊素溶液浸种对菜豆种子发芽的影响

不同浓度尿囊素溶液浸种对 40 mmol/L NaHCO_3 胁迫菜豆种子发芽的影响如表 1 所示。从表中可以看

出,1~4 mmol/L 浓度的尿囊素浸种对碱胁迫有缓解作用,其中,2 mmol/L 尿囊素浸种处理下碱胁迫菜豆种子发芽势和发芽率分别比 CK 提高 17.71%、17.67%,缓解效果较好。因此,40 mmol/L NaHCO_3 胁迫下,适宜的尿囊素浸种浓度为 2 mmol/L。

表 1 不同浓度尿囊素对碱胁迫下菜豆萌发的影响

Table 1 Effect of different allantoin concentrations on common bean germination under alkali stress

尿囊素浓度 (mmol/L)	发芽势 (%)	发芽率 (%)
0(CK)	53.82±1.81b	73.42±2.30b
1	59.63±2.79ab	81.67±10.13a
2	63.35±1.35a	86.39±1.39a
3	62.81±6.07ab	86.00±0a
4	61.67±2.88ab	82.50±2.50a

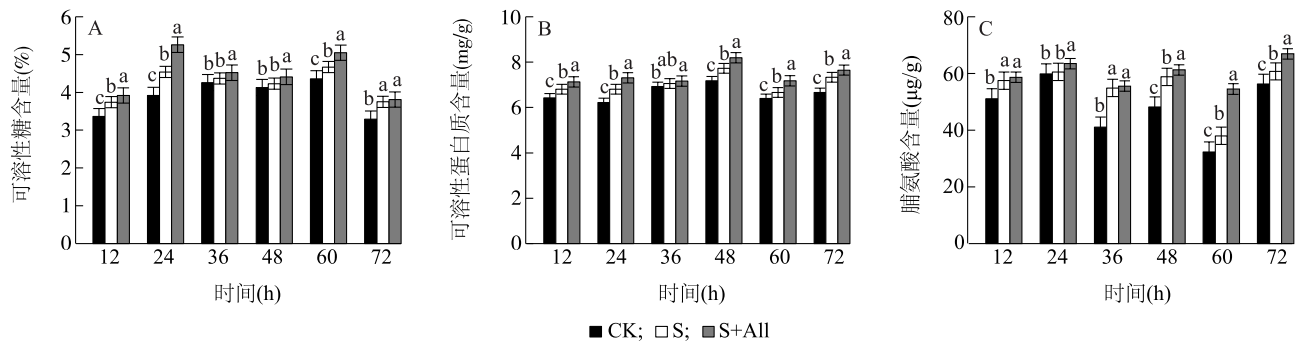
同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.3 外源尿囊素对碱胁迫下菜豆种子渗透调节物质的影响

外源尿囊素对碱胁迫下菜豆种子渗透调节物质的影响如图 1 所示。从图中可以看出,蒸馏水浸种+40 mmol/L 碱胁迫湿润培养处理后 12~72 h 菜豆种子可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量和脯氨酸含量总体高于蒸馏水浸种+蒸馏水培养对照(CK),其中,培养后 12 h、24 h、60 h、72 h 可溶性糖含量分别比 CK 增加 11.3%、15.8%、7.1%、13.9%,培养后 12 h、24 h、48 h、60 h、72 h 可溶性蛋白质含量分别比 CK 增加 6.08%、9.50%、7.67%、4.07% 和 10.23%,培养后 12 h、36 h、48 h、60 h、72 h 脯氨酸含量分别比 CK 增加 12.45%、33.42%、22.10%、17.52%、7.94%。2 mmol/L 尿囊素浸种+40 mmol/L 碱胁迫湿润培养处理后 12~72 h 菜豆种子可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量、脯氨酸含量均显著高于 CK。其中,培养后 12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 可溶性糖含量分别比 CK 增加 16.67%、34.18%、6.10%、6.78%、15.83%、15.81%,培养后 12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 可溶性蛋白质含量分别比 CK 增加 11.14%、17.57%、3.44%、14.17%、12.17%、14.89%,培养后 12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 脯氨酸含量分别比 CK 增加 14.80%、6.03%、35.09%、27.10%、68.47%、18.94%。同样,2 mmol/L 尿囊素浸种+40 mmol/L 碱胁迫湿润培养处理 12~72 h 菜豆种子可溶性糖含量、可溶性蛋白

质含量、脯氨酸含量总体高于蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理,其中,培养后12 h、24 h、36 h、48 h、60 h可溶性糖含量分别比蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理增加4.81%、15.86%、3.43%、4.26%、8.14%,培养后12 h、24 h、48 h、60 h、72 h可溶性蛋白质含量分别比蒸馏水浸

种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理增加4.79%、7.38%、6.01%、7.72%、4.28%,培养后24 h、48 h、60 h、72 h脯氨酸含量分别比蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理增加4.82%、4.09%、43.46%、10.19%。



CK:蒸馏水浸种+蒸馏水萌发培养;S:蒸馏水浸种+40 mmol/L NaHCO₃萌发培养;S+All:2 mmol/L 尿囊素浸种+40 mmol/L NaHCO₃萌发培养。图柱上不同小写字母表示同一时刻处理间差异显著(P<0.05)。

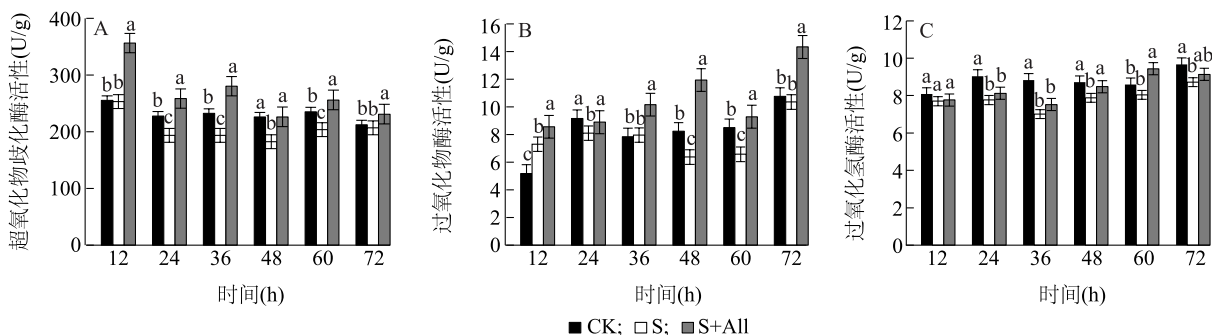
图1 不同处理对菜豆种子可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量和脯氨酸含量的影响

Fig.1 Effects of different treatments on soluble sugar content, soluble protein content and proline content of common bean seeds

2.4 外源尿囊素对碱胁迫下菜豆种子抗氧化酶活性的影响

外源尿囊素对碱胁迫下菜豆种子抗氧化酶活性的影响如图2所示。从图中可以看出,蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h,菜豆子叶超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性总体低于CK。

其中,培养24 h、36 h、48 h、60 h时SOD活性分别下降15.12%、16.84%、19.38%、13.33%,其他时间差异不显著;培养24 h、48 h、60 h时POD活性分别下降11.61%、22.59%、22.64%,其他时间仅12 h活性增加,其余均无差异;培养24 h、36 h、48 h、72 h时CAT活性分别下降14.14%、20.68%、9.59%、9.88%,其他时间差异不显著。



CK、S、S+All 见图1注。图柱上不同小写字母表示同一时刻处理间差异显著(P<0.05)。

图2 不同处理对菜豆子叶超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性的影响

Fig.2 Effects of different treatments on the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in the cotyledons of *Phaseolus vulgaris* L.

2 mmol/L尿囊素浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h菜豆子叶SOD活性、POD活性总体高于蒸馏水浸种+蒸馏水培养对照(CK),其中,

培养12 h、24 h、36 h、60 h、72 h时SOD活性分别增加39.57%、13.40%、20.54%、9.00%、8.86%,培养12 h、36 h、48 h、60 h、72 h时POD活性分别增加

65.38%、29.64%、45.14%、9.38%、33.33%。2 mmol/L尿囊素浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h 菜豆子叶 *CAT* 活性总体低于蒸馏水浸种+蒸馏水培养对照(CK),其中培养24 h、36 h 时 *CAT* 活性分别下降 10.17%和 14.87%。

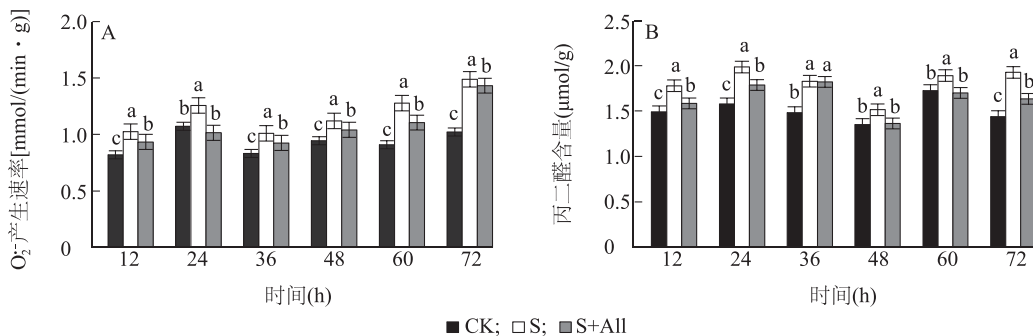
2 mmol/L尿囊素浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h 菜豆子叶超氧化物歧化酶(*SOD*)活性、过氧化物酶(*POD*)活性、过氧化氢酶(*CAT*)活性总体高于蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫培养处理,其中,培养12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时 *SOD* 活性分别增加 40.87%、33.60%、44.94%、24.03%、25.77%、11.74%,培养12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时 *POD* 活性分别增加 17.29%、9.84%、27.50%、87.50%、41.39%、38.46%,培养48 h 和 60 h 时 *CAT* 活性分别增加 7.58%和 17.38%。

上述结果说明,适宜浓度的尿囊素浸种处理能提高因胁迫降低的 *SOD* 活性、*POD* 活性和 *CAT* 活性,帮助清除自由基,缓解碱胁迫下种子受到的氧化损伤,促进种子萌发。

2.5 外源尿囊素对碱胁迫菜豆种子超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率和 MDA 含量的影响

不同处理对菜豆子叶超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)产生速率和丙二醛(MDA)含量的影响如图3所示。从图

中可以看出,蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h 菜豆子叶超氧阴离子自由基产生速率和丙二醛(MDA)含量均高于CK,其中,培养12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时超氧阴离子自由基产生速率分别增加 25.00%、17.26%、21.39%、17.58%、40.48%、44.81%,培养12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时 MDA 含量分别增加 19.33%、26.11%、23.52%、11.85%、9.30%、34.27%。同样,2 mmol/L尿囊素浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h 菜豆子叶超氧阴离子自由基产生速率和丙二醛(MDA)含量总体高于蒸馏水浸种+蒸馏水培养对照(CK),其中,培养12 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时超氧阴离子自由基产生速率分别增加 13.78%、11.06%、10.17%、21.45%、39.92%,培养12 h、24 h、36 h、72 h 时 MDA 含量分别增加 6.04%、13.38%、22.99%、13.99%。而2 mmol/L尿囊素浸种+40 mmol/L碱胁迫浸润培养处理12~72 h 菜豆子叶超氧阴离子自由基产生速率和丙二醛(MDA)含量总体低于蒸馏水浸种+40 mmol/L碱胁迫培养处理,其中,培养12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时超氧阴离子自由基产生速率分别下降 8.98%、19.33%、8.52%、6.31%、13.55%、3.38%,培养12 h、24 h、36 h、48 h、60 h、72 h 时 MDA 含量分别下降 11.14%、10.10%、0.43%、9.93%、10.11%、15.10%。



CK、S、S+All 见图1注。图柱上不同小写字母表示同一时刻处理间差异显著($P < 0.05$)。

图3 不同处理对菜豆子叶超氧阴离子自由基($O_2^{\cdot-}$)含量和丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.3 Effects of different treatments on superoxide anion free radical ($O_2^{\cdot-}$) and malondialdehyde (MDA) contents in common bean cotyledons

上述结果表明,碱胁迫处理发芽菜豆种子会生成较多的超氧阴离子自由基和MDA,而外源尿囊素浸种能降低发芽种子超氧阴离子自由基产生速率和MDA含量,减轻种子氧化损伤,缓解碱胁迫对菜豆种子萌发的抑制。

3 讨论

3.1 碱胁迫对植物种子萌发及生理的影响

植物种子萌发期抵抗外界逆境的能力较弱,种子萌发能力及生理活动极易受环境胁迫影响。干

旱、盐碱等非生物胁迫一方面能直接抑制作物生长,另一方面还能降低作物抗性,增加作物遭受病虫害的风险,进而导致作物减产。土壤适宜的离子浓度是作物种子充分吸胀及顺利发芽的关键^[23-25]。土壤盐碱度异常时,作物种子发芽势和发芽率下降^[26]。本研究结果表明,碱胁迫下菜豆种子发芽受阻,发芽势和发芽率均随碱浓度的增加而降低,且发芽种子的生长速度亦低于蒸馏水对照,与前人研究结果^[26]一致。

盐碱胁迫对植物的伤害主要体现在细胞的渗透胁迫和氧化损伤。盐碱胁迫下植物的渗透调节途径、抗氧化酶调节途径、活性氧代谢调节途径均会作出相应的响应以应对胁迫^[27]。盐碱胁迫下,植物根际土壤中离子浓度升高,渗透压高于植物根细胞,使植物吸收水分受阻。植物通过增加细胞内可溶性糖含量、蛋白质含量以及脯氨酸含量来应对渗透胁迫伤害^[28]。本研究同样发现,40 mmol/L NaHCO₃胁迫下,萌发菜豆子叶可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量及脯氨酸含量总体较蒸馏水对照提高。

逆境下植物产生过量的活性氧(Reactive oxygen species, ROS)是造成氧化损伤的主要因子,为清除游离氧,作物的抗氧化酶系统、代谢系统均会有所响应^[29-30]。本研究结果表明,碱胁迫处理下,萌发菜豆子叶 O₂⁻ 产生速率和 MDA 含量均较 CK 显著上升, SOD 活性、CAT 活性及 POD 活性总体低于 CK,这与前人研究结果^[12, 31-32]基本一致。

3.2 外源尿囊素对碱胁迫下种子萌发及生理的影响

外源物质的添加有助于提高植物的抗胁迫能力。与腐胺、褪黑素、甜菜碱等外源物质一样,尿囊素能直接参与渗透调节、活性氧代谢调节及抗氧化酶活性调节^[33]。本研究结果表明,适宜浓度的尿囊素浸种后,碱胁迫菜豆种子的发芽势和发芽率高于蒸馏水浸种+碱胁迫培养处理,同时,可溶性糖含量、蛋白质含量和脯氨酸含量亦总体高于蒸馏水浸种+碱胁迫培养处理及蒸馏水浸种+蒸馏水培养对照,符合植物对逆境响应时渗透调节物质的变化趋势。

植物正常生长过程中会积累 ROS, ROS 积累会使细胞内核酸、蛋白质、脂质等分子发生氧化,进而导致植物的衰老^[34]。正常植物具有完整的活性氧产生和清除机制,控制游离含氧基含量,保证植物免

受氧化损伤。逆境下,植物体内的 ROS 含量会异常升高,进而导致植物体的氧化损伤。本研究结果表明,尿囊素浸种后,碱胁迫菜豆子叶的 O₂⁻ 产生速率和 MDA 含量总体低于蒸馏水浸种+碱胁迫培养处理,这与前人的研究结果^[35-37]一致。

植物抗氧化酶系统亦参与 ROS 的清除。逆境下,植物体内 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶的活性在植物逆境胁迫初期均有所提高,添加外源物质有利于抗氧化酶活性的增强^[38-39]。本研究发现,尿囊素浸种后,碱胁迫菜豆种子的 SOD、CAT、POD 活性总体高于蒸馏水浸种+碱胁迫培养处理,与前人研究结果^[38-40]一致。

4 结论

碱胁迫处理能显著抑制菜豆种子的萌发,尿囊素浸种能有效缓解碱胁迫对菜豆种子萌发的影响。筛选出的适宜碱抑制浓度为 40 mmol/L,适宜尿囊素浸种浓度为 2 mmol/L。碱胁迫下,菜豆种子的脯氨酸含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量总体高于蒸馏水浸种和培养对照,而尿囊素浸种+碱胁迫培养处理能进一步提高脯氨酸、可溶性糖及可溶性蛋白质等渗透调节物质的含量。尿囊素浸种+碱胁迫培养处理的菜豆种子 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性总体高于蒸馏水浸种+碱胁迫培养处理。尿囊素浸种+碱胁迫培养处理的菜豆种子 O₂⁻ 产生速率和 MDA 含量总体低于蒸馏水浸种+碱胁迫培养处理。因此,一定浓度尿囊素浸种能够有效缓解菜豆萌发期受到的碱胁迫,尿囊素可作为外源调节物质促进盐碱逆境下的菜豆生长。

参考文献:

- [1] 王佳珍,刘倩,高娅妮,等.植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J].生态学报,2017,37(16):5565-5577.
- [2] 马丽娜.东北苏打盐碱地种稻改良条件下土壤微生物响应特征研究[D].哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2020.
- [3] 陈嵘峰,屠静韵,许学文,等.蔬菜作物盐胁迫响应及耐盐机制研究进展[J].中国蔬菜,2024(4):23-33.
- [4] 刘鑫.五种外源物质缓解笔筒树幼苗干旱胁迫的效应及生理机制的研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2022.
- [5] 刘磊.甜菜响应盐胁迫的适应性机制和外源尿囊素的调控作用研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [6] 梅英文.外源尿囊素对水稻孕穗期低温胁迫根系生长和碳氮代谢的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2023.

- [7] 卢强. 尿囊素预处理的甜菜幼苗移栽后对盐碱胁迫的生理响应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [8] WATANABE S, MATSUMOTO M, HAKOMORI Y, et al. The purine metabolite allantoin enhances abiotic stress tolerance through synergistic activation of abscisic acid metabolism [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2014, 37(4): 1022-1036.
- [9] HAN R C, RASHEED A, WANG Y P, et al. Silencing of OsXDH reveals the role of purine metabolism in dark tolerance in rice seedlings [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(8): 1736-1744.
- [10] 靳亚楠, 张霆, 李建波, 等. 外源喷施油菜素内酯对碱胁迫下大麦种子萌发的影响 [J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2023, 38(4): 329-334.
- [11] 胡竞渝, 冯国军, 刘大军, 等. 外源腐胺对盐胁迫下菜豆种子萌发及抗性的影响 [J]. *中国农学通报*, 2023, 39(15): 52-58.
- [12] 刘畅, 李佳荫, 冯国军, 等. 亚精胺在缓解菜豆幼苗低温胁迫中的作用 [J]. *中国农学通报*, 2021, 37(32): 66-72.
- [13] 时侦熙, 苏艺, 杨晓旭, 等. 外源褪黑素对碱胁迫下菜豆幼苗的缓解效应 [J]. *北方园艺*, 2024(7): 17-26.
- [14] 苏艺, 冯国军, 刘大军, 等. 菜豆品种资源幼苗耐碱性鉴定指标筛选及综合评价 [J]. *中国蔬菜*, 2022(6): 16-24.
- [15] WINTERBOURN C C, HAWKINS R E, BRIAN M, et al. The estimation of red cell superoxide dismutase activity [J]. *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 1975, 85(2): 337-341.
- [16] 王伟玲, 王展, 王晶英. 植物过氧化物酶活性测定方法优化 [J]. *实验室研究与探索*, 2010, 29(4): 21-23.
- [17] 杨兰芳, 庞静, 彭小兰, 等. 紫外分光光度法测定植物过氧化氢酶活性 [J]. *现代农业科技*, 2009(20): 364-366.
- [18] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进 [J]. *植物生理学通讯*, 1994, 30(3): 207-210.
- [19] 李忠光, 龚明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进 [J]. *云南植物研究*, 2005, 27(2): 211-216.
- [20] 曲春香, 沈颂东, 王雪峰, 等. 用考马斯亮蓝测定植物粗提液中可溶性蛋白质含量方法的研究 [J]. *苏州大学学报(自然科学版)*, 2006, 21(2): 82-85.
- [21] 刘海英, 王华华, 崔长海, 等. 可溶性糖含量测定(蒽酮法)实验的改进 [J]. *实验室科学*, 2013, 16(2): 19-20.
- [22] 肖家欣. *植物生理学实验* [M]. 合肥: 安徽人民出版社, 2010.
- [23] 王宥薇, 武俊喜, 汪艳, 等. 盐碱胁迫对异株荨麻种子萌发的影响 [J/OL]. [2025-04-01]. *作物杂志*. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20241022.1546.004>.
- [24] 王悦娟, 赵延蓉, 魏玉清. 不同温度条件下盐、碱和干旱胁迫对藜麦种子萌发过程的影响 [J]. *分子植物育种*, 2025, 23(2): 543-553.
- [25] 许洋, 寇贺, 李海燕. Na_2CO_3 胁迫下不同耐性大豆品种萌发过程中保护酶活性差异 [J]. *园艺与种苗*, 2017, 37(3): 53-54.
- [26] 宋晨, 刘莎莎, 王简, 等. 外源褪黑素对盐胁迫下棉花生长发育、抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响 [J]. *棉花学报*, 2024, 36(6): 486-498.
- [27] 陈柯岐, 邓星光, 林宏辉. 植物响应非生物胁迫的分子机制 [J]. *生物学杂志*, 2021, 38(6): 1-8.
- [28] MA S G, GUO S R, CHEN J, et al. Enhancement of salt-stressed cucumber tolerance by application of glucose for regulating antioxidant capacity and nitrogen metabolism [J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2020, 100(3): 253-263.
- [29] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [30] 李格, 孟小庆, 蔡敬, 等. 活性氧在植物非生物胁迫响应中功能的研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2018, 54(6): 951-959.
- [31] 郭远航, 王洪博, 白宝伟, 等. 外源褪黑素对大豆幼苗盐胁迫的缓解效应 [J]. *华北农学报*, 2024, 39(2): 116-125.
- [32] 王译, 韩莹琰, 郝敬虹, 等. 褪黑素对高温胁迫下生菜抗氧化酶系统的影响 [J]. *北京农学院学报*, 2022, 37(2): 45-49.
- [33] 刘领, 李冬, 马宜林, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下烤烟幼苗生长的缓解效应与生理机制研究 [J]. *草业学报*, 2019, 28(8): 95-105.
- [34] DEMIDCHIK V. Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 109: 212-228.
- [35] 张鹏飞. 尿囊素调控甜菜盐碱耐受性的生理机制 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [36] 王彪, 宋世佳, 李东晓, 等. 褪黑素通过 H_2O_2 调控盐胁迫下小豆 Na^+/K^+ 平衡机制 [J]. *华北农学报*, 2023, 38(6): 62-71.
- [37] 赵长延, 柳延涛, 贾秀苹, 等. 盐碱胁迫下褪黑素对作物生理机制影响的研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2025, 41(2): 18-29.
- [38] XIAO F, ZHOU H P. Plant salt response: perception, signaling, and tolerance [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 13: 1053699.
- [39] FARHANGI-ABRIZ S, TORABIAN S. Antioxidant enzyme and osmotic adjustment changes in bean seedlings as affected by biochar under salt stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137: 64-70.
- [40] CARVALHO M, CARMO H, COSTA V M, et al. Toxicity of amphetamines: an update [J]. *Archives of Toxicology*, 2012, 86(8): 1167-1231.

(责任编辑: 石春林)