

毋悦悦, 庞春花, 张永清, 等. 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(4): 114–121.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.04.016

# 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦种子萌发和幼苗生长的影响

毋悦悦<sup>1</sup>, 庞春花<sup>1,2</sup>, 张永清<sup>2,3</sup>, 康书瑜<sup>1</sup>, 侯钰晨<sup>1</sup>, 王嘉祺<sup>1</sup>, 闫晶蓉<sup>1</sup>

(1. 山西师范大学生命科学学院, 山西太原 030031; 2. 山西师范大学现代文理学院, 山西临汾 041000;

3. 山西师范大学地理科学学院, 山西太原 030031)

**摘要:**以陇藜一号为试验材料, 采用温室盆栽法, 设置4种壳聚糖(CTS)引发浓度(0、50、150、250 mg/L)和4种NaCl浓度(0、100、200、300 mmol/L)共16种处理, 探究不同引发浓度对不同梯度盐胁迫下藜麦种子萌发和幼苗生长的影响, 寻求在藜麦生产过程中利用壳聚糖来强化其耐盐碱性的理论依据。结果表明:(1)当CTS引发浓度为150 mg/L时, 藜麦种子的发芽率、发芽势和发芽指数均达峰值;(2)相同引发浓度下, 藜麦种子 $\alpha$ -淀粉酶活性与盐浓度成反比, 种子游离氨基酸含量和幼苗的株高、根长随着盐胁迫浓度的增加呈先升后降趋势, 抗氧化酶活性、丙二醛含量、渗透调节物质含量均随盐浓度的增加而升高;(3)在同一盐浓度下, 藜麦种子 $\alpha$ -淀粉酶活性、游离氨基酸含量, 幼苗的株高、苗长、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量均随壳聚糖引发浓度的增加呈先升后降的变化趋势, 丙二醛含量则呈先降后升的变化趋势。结果表明, 不同浓度的壳聚糖引发能在一定程度上缓解盐胁迫对藜麦造成的伤害, 其中, 150 mg/L浓度引发效果最佳。

**关键词:**壳聚糖; 盐胁迫; 藜麦; 种子引发

**中图分类号:**S519.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)04-0114-08

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.)是藜科藜属一年生双子叶植物, 原产于南美洲安第斯山区, 目

前在我国内蒙古、河北、山西、甘肃等20余省均有种植, 且种植面积逐年增加<sup>[1]</sup>。藜麦不仅具有营养全面、比例均衡的优点<sup>[2]</sup>, 还具有耐寒、耐盐、耐旱等特性, 使其成为应对气候变化、提供营养和粮食安全的战略性作物<sup>[3]</sup>。近年来, 学者们对藜麦的研究大多集中在营养价值、功能特性、相关制品及抗逆性等相关方面, 如何进一步提高藜麦耐盐碱性的研究报道较少。

土壤盐碱化是限制作物生长的重要逆境胁迫因

收稿日期:2023-04-26

基金项目:国家自然科学基金(编号:31571604);山西师范大学现代文理学院基础科研项目(编号:2019JCY15)。

作者简介:毋悦悦(1997—),女,山西运城人,硕士研究生,主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail:13610695263@163.com。

通信作者:庞春花,硕士,教授,主要从事植物生理生态方面的研究工作。E-mail:pangch6269@126.com。

[24] 樊继伟, 王康君, 张广旭, 等. 黄淮海区不同小麦品种氮素利用差异分析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 43–51.

[25] 姚广平, 汪娟梅, 张睿, 等. 关中中部灌区播期密度对农大399小麦产量和品质的效应[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2018, 21(5): 71–77.

[26] 刘庆芳, 苏玉环, 马永安, 等. 不同小麦品种的茎秆特性与抗倒性[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(5): 48–54.

[27] 孟志令, 买春艳, 于立强, 等. 黄淮冬麦区部分小麦品种(系)抗倒伏相关性状分析[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(7): 888–895.

[28] 姚金保, 马鸿翔, 姚国才, 等. 小麦抗倒性研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2013, 14(2): 208–213.

[29] 邵庆勤, 万成, 李晓庆, 等. 取样后处理措施对小麦抗倒伏性状测定结果的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(4): 632–640.

[30] 王丹, 丁位华, 冯素伟, 等. 不同小麦品种茎秆特性及其与抗倒性的关系[J]. 应用生态学报, 2016, 27(5): 1496–1502.

[31] Dai Z, Yin Y, Zhang M, et al. Distribution of starch granule size in grains of wheat grown under irrigated and rainfed conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008, 34(5): 795–802.

[32] 许倍铭, 冯健超, 郝紫瑞, 等. 种植密度对不同小麦品种籽粒淀粉含量及其特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(9): 1109–1116.

[33] 穆培源, 何中虎, 徐兆华, 等. CIMMYT普通小麦品系Waxy蛋白类型及淀粉糊化特性研究[J]. 作物学报, 2006(7): 1071–1075.

[34] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮水平对小麦籽粒淀粉粒度分布及淀粉粒糊化特性的影响[J]. 西北农业学报, 2010, 19(11): 43–47.

素之一<sup>[4]</sup>。我国盐碱土面积在逐年增加<sup>[5]</sup>,据统计,至 2022 年,我国盐碱地约为 9 913 万  $\text{hm}^2$ ,其中,具有农业综合利用潜力的盐碱地约为 1 333 万  $\text{hm}^2$ ,有近 80% 的盐碱地未合理开发利用<sup>[6]</sup>。在盐碱胁迫下,植物会受到离子毒害、渗透胁迫,营养亏缺和高 pH 值伤害,造成植株体内氧化损伤和代谢紊乱<sup>[7-8]</sup>,严重影响种子萌发和幼苗生长,致使作物产量及品质降低。对于盐碱地的改良措施有物理、化学、生物和综合改良<sup>[9]</sup>,但由于盐碱地的土壤障碍因素繁杂,导致其改造困难且周期漫长<sup>[10]</sup>。因此,采用一些种子处理技术如生物活性物质引发种子,是改良和利用盐碱土耕地资源措施中兼具生态效益和经济效益的方法。

种子引发 (seed priming) 是由 Heydecker 等于 1973 年提出的一项控制种子缓慢吸水并停留在吸涨的第 2 阶段,然后在胚根伸出前将种子脱水回干至初始状态<sup>[11]</sup>。引发能够促进种子萌发<sup>[12]</sup>,增强种子的发芽速度和出苗率<sup>[13]</sup>、打破种子休眠<sup>[14]</sup>、提高植株抗盐、抗旱、抗重金属<sup>[15-17]</sup>能力等。壳聚糖 (chitosan, CTS) 是甲壳素脱乙酰化后得到的一种纯天然、可再生、无副作用的高分子碱性多糖<sup>[18-19]</sup>,作为具有潜力的非生物胁迫抗性诱导剂,其来源丰富、价格低廉。有研究表明,一定浓度的 CTS 可促进盐胁迫下水稻、小麦、白三叶、玉米种子的萌发和幼苗生长<sup>[20-23]</sup>。CTS 也可通过提高虹豆、黄瓜抗氧化酶活性,从而提高其渗透调节能力和活性氧清除能力,缓解植株盐胁迫<sup>[24-25]</sup>。CTS 也可降低黄瓜幼苗的盐害指数和死苗率<sup>[26]</sup>。可见,CTS 可在种子萌发、渗透调节、活性氧清除、缓解植株盐害等方面发挥积极的调控作用。目前,关于化学诱抗剂引发对盐胁迫下藜麦种子萌发及幼苗生长影响的研究报道较少。因此,本研究以陇藜一号为材料,研究 4 种 CTS 引发浓度对 4 种盐浓度梯度下藜麦种子萌发、幼苗生长的影响,探讨 CTS 缓解藜麦种子及幼苗盐胁迫下的生理应答机制,以期为 CTS 作为抗盐剂来缓解藜麦盐胁迫提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点以及供试材料

本试验于 2022 年 5 月在山西师范大学生命科学院实验室进行。供试品种为山西亿隆有限公司生产的陇藜 1 号,生育期约 130 d。

壳聚糖为白色半透明粉末,脱乙酰度 (DD)  $\geq$

95%,黏度 100 ~ 200  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ,购于上海国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 试验设计

1.2.1 种子引发处理 将颗粒饱满均匀的藜麦种子,采用 3%  $\text{H}_2\text{O}_2$  灭菌 50 s,采用蒸馏水洗净,置于 20 ~ 25  $^{\circ}\text{C}$  干燥室温下通风保存。试验共设 4 个 CTS 引发处理:0 (蒸馏水)、50、150、250  $\text{mg/L}$  (分别以 S0、S50、S150、S250 表示);4 个 NaCl 溶液浓度:0、100、200、300  $\text{mmol/L}$  (分别以 N0、N1、N2、N3 表示),N1、N2、N3 代表藜麦可承受耐盐范围内的轻、中、重度盐胁迫。种子质量与引发溶液体积比约为 1 g : 3 mL,在 25  $^{\circ}\text{C}$ 、黑暗发芽箱内引发 12 h,采用去离子水将种子洗净,吸水纸吸干水分后,置于 25  $^{\circ}\text{C}$  的鼓风干燥箱中回干至原含水量 (约为 15.7%)。

1.2.2 种子萌发试验 采用滤纸皿床发芽试验,在直径为 9 cm 的培养皿中铺双层滤纸作为发芽床,将不同处理的种子各 60 粒均匀放置在加有 10 mL 浓度为 150  $\text{mmol/L}$  NaCl 溶液的培养皿中,于 (25  $\pm$  1)  $^{\circ}\text{C}$  人工气候培养箱中进行暗处理。每天记录萌发种子数,萌发标准为胚根突破种皮 2 mm,及时取出萌发种子,直至剩余种子不再发芽为止,并将有关的数据进行记录。

1.2.3 幼苗生长试验 将引发后的藜麦种子播种于装有蛭石和土 [ $m_{\text{蛭石}} : m_{\text{土}} = 1 : 1$ ] 的发芽盒中 (规格 19 cm  $\times$  16 cm  $\times$  13 cm),每盆播种 30 粒。之后置于 28  $^{\circ}\text{C}$  的光照培养箱中,待种子出土后,设定昼夜温度为 28  $^{\circ}\text{C}$  / 20  $^{\circ}\text{C}$ ,光/暗交替为 12 h / 12 h,光照度为 6 klx,期间正常浇水。每个发芽盒每天采用不同盐溶液定量浇灌 160 mL,蒸馏水作对照,每个处理重复 3 次。4 叶 1 心时期定苗,每盆留苗 10 株,18 d 后选取长势一致的幼苗测定相关指标。

### 1.3 测定指标

1.3.1 发芽指标的测定 根据如下公式计算发芽相关的指标:

$$\text{发芽势} = (\text{前 7 d 发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% ;$$

$$\text{发芽率} = (\text{发芽种子数} / \text{供试种子数}) \times 100\% ;$$

$$\text{发芽指数} = \sum G_t / D_t (G_t \text{ 表示 } t \text{ d 内的发芽数, } D_t \text{ 表示相应的发芽天数})。$$

1.3.2 幼苗生长指标的测定 当苗龄达 18 d 时,将幼苗用清水洗净,采用滤纸拭去表层的水分,采

用米尺测量株高、根长和苗长。每个处理3次重复。

1.3.3 幼苗生理指标的测定 茚三酮比色法测定游离氨基酸含量;3,5-二硝基水杨酸比色法测定 $\alpha$ -淀粉酶活性<sup>[27]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定采用NBT法;过氧化物酶(POD)活性的测定采用愈创木酚法;丙二醛(MDA)含量用硫代巴比妥酸法检测;可溶性糖含量用蒽酮比色法测定;脯氨酸(Pro)含量采用水合茚三酮法测定;考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量,每个处理重复3次。

#### 1.4 数据处理

运用Office、Origin Pro 2022软件,对测量的数据进行处理与绘制,使用SPSS 17.0软件进行方差分析,利用Duncan's法进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 壳聚糖引发对藜麦种子萌发的影响

由表1可知,壳聚糖引发可以促进藜麦种子萌发生长。经引发后的种子发芽率、发芽势和发芽指数较对照组S0均有所升高;且S50、S150引发的发芽指标显著高于S0( $P < 0.05$ )。从整体上观察,藜麦种子发芽率、发芽势、发芽指数随引发浓度的升高呈先升后降的变化趋势,均在S150处理时达最大,较S0分别提高22.62%、24.65%和25.84%。由此表明,低浓度的壳聚糖引发可促进藜麦种子萌发,浓度过高时促进作用减弱。

### 2.2 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦种子游离氨基酸含量、 $\alpha$ -淀粉酶活性的影响

由图1-a可知,CTS引发浓度一定时,藜麦种子游离氨基酸含量随着盐浓度的增加呈先升后降的趋势,在N2处达峰值,分别比N0增加了38.18%、

表1 壳聚糖引发对藜麦种子萌发的影响

处理	发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数
S0	75.6 ± 1.5c	72.2 ± 2.0c	15.237 ± 0.389c
S50	86.7 ± 2.9ab	83.9 ± 1.5ab	17.809 ± 0.916ab
S150	92.7 ± 2.4a	90.0 ± 2.5a	19.175 ± 1.042a
S200	81.1 ± 2.1bc	78.9 ± 1.5c	16.563 ± 0.144ab

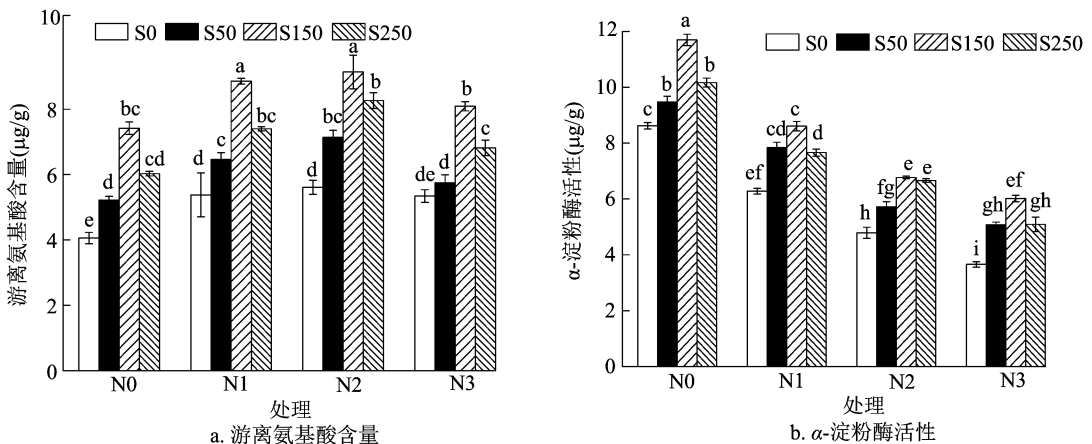
注:同列数据后不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著, $P < 0.05$ 。表2同。

36.78%、23.18%、37.09%。说明中度盐胁迫对种子游离氨基酸含量有促进作用,重度盐胁迫促进作用减弱。在同一盐浓度下,藜麦种子游离氨基酸含量随CTS引发浓度的升高呈先升后降的变化趋势,在S150处理下达到峰值,分别比S0增加82.76%、64.68%、62.92%、51.43%。说明CTS引发可促进种子游离氨基酸含量的积累,增强种子抗逆性,且在150 mg/L引发浓度下积累效果最佳。

由图1-b可知,在同一CTS引发浓度下,藜麦种子 $\alpha$ -淀粉酶活性随盐浓度的增加显著降低,在N3S0处理下含量最低。说明盐胁迫会显著抑制种子 $\alpha$ -淀粉酶活性,阻碍能量代谢,进而影响种子萌发。在同一盐浓度下,藜麦种子 $\alpha$ -淀粉酶活性随CTS引发浓度的升高呈先升后降的变化趋势,在S150处理下达到最大值,分别比S0增加35.69%、37.05%、41.34%、64.39%。说明CTS引发可提高种子 $\alpha$ -淀粉酶活性,加速淀粉水解,为种子萌发提供充足能量,且在150 mg/L引发浓度下促进效果最佳。

### 2.3 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗生长的影响

由表2可知,在同一盐浓度下,藜麦的株高和苗



不同小写字母表示各处理间在0.05水平上差异显著。下图同

图1 壳聚糖引发对盐胁迫下种子游离氨基酸含量和 $\alpha$ -淀粉酶活性的影响

长随着壳聚糖浓度的升高呈先升后降的趋势,在 S150 时达到最大值,分别比 S0 增加 21.27%、45.64%、34.49%、15.59% (株高),20.17%、30.67%、20.55%、17.85% (苗长),根长无明显规律。说明低壳聚糖引发浓度可以促进藜麦株高和苗长的增长,浓度过高时,不仅不会缓解盐胁迫,还

会产生抑制作用。在同一引发浓度下,藜麦的株高和盐浓度成反比,根长则随着盐浓度的增加呈先升后降的趋势,在 N2 处理达到最大值,分别比 N0 增加了 44.54%、57.94%、26.27%、63.30%,说明盐胁迫会抑制藜麦幼苗地上部生长,而中度盐胁迫可以促进藜麦幼苗根系的生长发育。

表 2 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗生长的影响

壳聚糖浓度	氯化钠浓度	株高 (cm)	根长 (cm)	苗长 (cm)
S0	N0	18.48 ± 0.25c	7.05 ± 0.17gh	25.53 ± 0.42de
	N1	14.11 ± 0.29e	8.58 ± 0.15de	22.69 ± 0.43gh
	N2	13.22 ± 0.17ef	10.19 ± 0.13ab	23.41 ± 0.30k
	N3	12.70 ± 0.15f	6.24 ± 0.14ij	18.94 ± 0.26fg
S50	N0	21.45 ± 0.23ab	6.11 ± 0.11ij	27.56 ± 0.35cd
	N1	19.46 ± 0.17bc	7.91 ± 0.11cd	27.37 ± 0.28e
	N2	15.15 ± 0.22d	9.65 ± 0.28bc	24.80 ± 0.48ef
	N3	13.67 ± 0.13ef	5.66 ± 0.16e	19.33 ± 0.28jk
S150	N0	22.41 ± 0.21a	8.26 ± 0.22ef	30.68 ± 0.42a
	N1	20.55 ± 0.29b	9.10 ± 0.15cd	29.65 ± 0.44ab
	N2	17.78 ± 0.24cd	10.43 ± 0.04a	28.22 ± 0.26bc
	N3	14.68 ± 0.19e	7.64 ± 0.08fg	22.32 ± 0.27gh
S250	N0	15.60 ± 0.16d	5.15 ± 0.09kl	20.75 ± 0.25ij
	N1	13.52 ± 0.12ef	6.81 ± 0.10hi	20.32 ± 0.22jk
	N2	12.86 ± 0.17ef	8.41 ± 0.08de	21.20 ± 0.25hi
	N3	12.44 ± 0.18f	4.62 ± 0.09l	17.06 ± 0.27l

## 2.4 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗抗氧化酶活性的影响

由图 2 可知,在同一 CTS 引发浓度下,随着盐胁迫的加剧,藜麦幼苗 POD、SOD 活性也增强,在重度胁迫 N3 处理达到峰值,分别比 N0 增加 90.75%、74.68%、64.52%、59.12% (POD 活性),66.21%、68.41%、49.98%、75.24% (SOD 活性),可见随着盐胁迫的增强,藜麦会通过增强抗氧化酶的活性来淬灭超氧负离子 ( $O_2^-$ ) 的毒性,增强其抗逆性。在同一盐浓度下,随 CTS 引发浓度的增加,藜麦幼苗 POD、SOD 的活性呈先升后降的趋势,均在 S150 处理达到峰值,分别比 S0 增加了 67.54%、61.77%、54.73%、44.50% (POD 活性),45.02%、45.28%、33.43%、30.86% (SOD 活性)。由此表明,同一盐胁迫下,低浓度的 CTS 引发,可以显著加强藜麦 POD、SOD 活性,缓解盐胁迫对藜麦的盐害作用,增强其抗逆性,但浓度过高时,促进作用会减弱。其中,以 150 mg/L 的引发效果最好。

## 2.5 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗丙二醛含量的影响

由图 3 可知,在同一 CTS 引发浓度下,藜麦幼苗的丙二醛含量与盐胁迫强度成正比,在重度胁迫 N3 处理达最大值,与 N0 相比增幅分别为 57.36%、56.85%、96.08%、82.22%。说明随着盐胁迫强度增强,加重了幼苗的膜脂过氧化程度。在同一盐浓度下,藜麦幼苗丙二醛含量随 CTS 引发浓度的升高呈先降后升的变化趋势,在 S50 处理下 MDA 含量达最小值,分别比 S0 降低 36.45%、36.24%、49.00%、45.12%,表明低浓度的壳聚糖引发能够抑制生命大分子如蛋白质、核酸等的交联聚合,减轻生物膜损伤,缓解盐胁迫对藜麦幼苗的伤害,但壳聚糖引发浓度过高时,不仅不能缓解盐害,还会产生抑制作用。

## 2.6 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗渗透调节物质的影响

由图 4 可知,CTS 引发浓度一定时,藜麦幼苗的

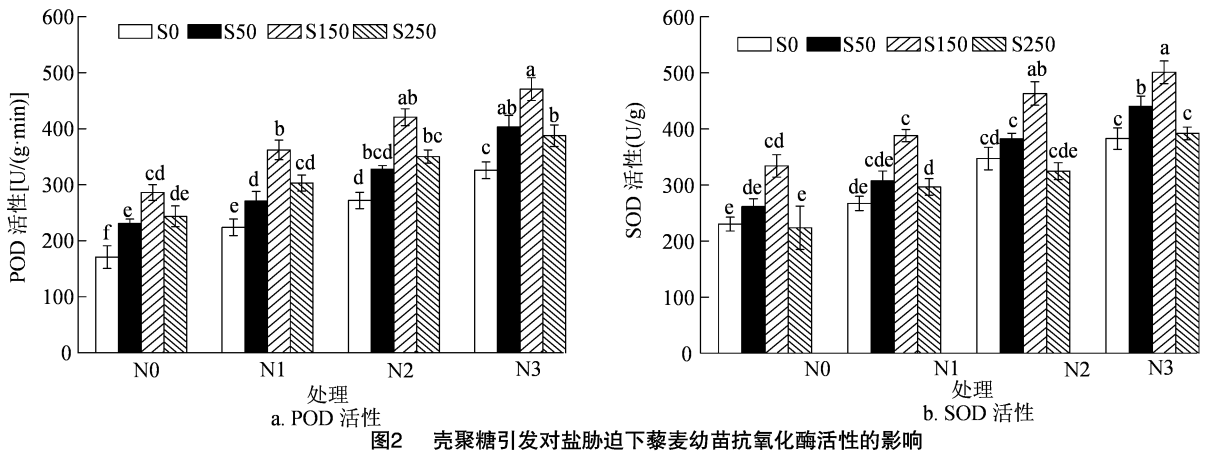


图2 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗抗氧化酶活性的影响

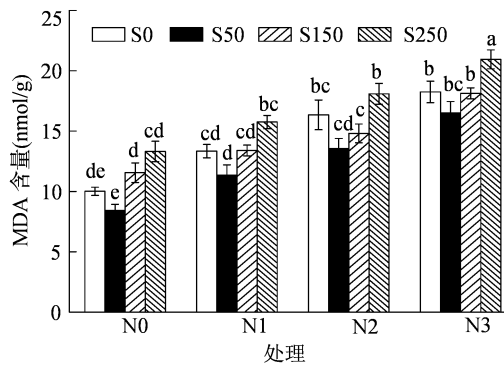


图3 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦丙二醛含量的影响

渗透调节物质含量与盐浓度成正比,均在重度盐胁迫 N3 处理时达最大值,比 N0 分别提高 93.78%、53.06%、61.51%、83.25% (脯氨酸含量), 85.57%、86.79%、65.53%、60.25% (可溶性蛋白含量)和 79.21%、56.22%、62.13%、51.12% (可溶性糖含量)。结果表明,随着盐强度增加,藜麦幼苗渗透调控因子的含量也随之增加。在同一盐胁迫下,随着 CTS 引发浓度的升高,藜麦幼苗的脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖含量均呈现先升后降的趋势,在 S150 处理达峰值,分别较 S0 增加 96.26%、

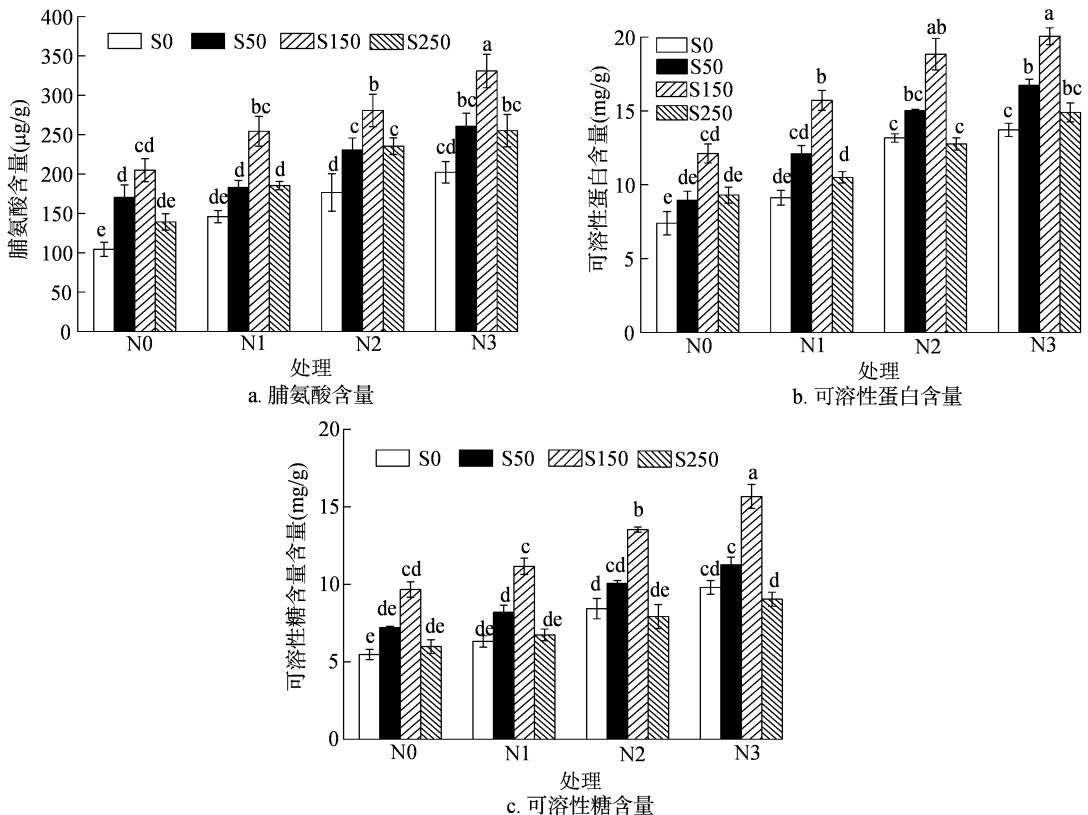


图4 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦渗透调节物质含量的影响

74.34%、59.07%、63.24% (脯氨酸含量), 63.89%、72.26%、43.13%、46.19% (可溶性蛋白含量) 和 76.66%、76.77%、60.56%、59.81% (可溶性糖含量)。说明在同一盐胁迫下, 低浓度的 CTS 引发可使渗透调节物质含量增加, 维持细胞膨压, 浓度过高时, 促进作用减弱, 其中浓度为 150 mg/L 的引发效果最好。

### 3 讨论

#### 3.1 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦种子萌发的影响

种子萌发是植物生命的开始, 也是植物受盐碱胁迫最敏感的阶段<sup>[28]</sup>。盐胁迫下, 由于土壤中水势降低, 导致种子吸水困难, 内溶物外渗, 抑制了种子萌发<sup>[29]</sup>。本研究发现, 壳聚糖引发可提高藜麦种子在盐胁迫下的发芽能力, 表现为低浓度促进萌发, 高浓度促进萌发效果减弱, 其中, 150 mg/L CTS 溶液引发效果最佳。说明利用适当的 CTS 溶液引发可激发藜麦种子发芽, 提高种子的吸水速率和代谢能力, 降低细胞膜透性, 克服由盐胁迫引发的萌发障碍, 这与何昊等利用 CTS 提高玉米、水稻、黄瓜及苜蓿种子的萌发指标研究结果<sup>[20,23,30-31]</sup>一致。

#### 3.2 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦种子游离氨基酸含量、 $\alpha$ -淀粉酶活性的影响

游离氨基酸是结构蛋白、贮藏蛋白和酶类等的重要合成前体物质及降解组分<sup>[32]</sup>, 作为一种有机渗透调节物质, 其具有降低渗透势, 保护生物膜、清除活性氧等功能<sup>[33]</sup>。游离氨基酸含量越多, 结合水越多, 植物的抗逆性就越强<sup>[34]</sup>。本研究发现, 在同一引发浓度下, 游离氨基酸含量随盐胁迫的增强呈先升后降趋势, 说明在轻、中度盐胁迫下, 藜麦通过增加游离氨基酸含量, 维持胞内较高浓度的溶质, 降低细胞渗透势, 保护细胞膜免受损伤, 从而促进藜麦种子的萌发。这与陈珊等的研究结果<sup>[33]</sup>一致。在同一盐浓度下, 游离氨基酸含量随引发浓度的增加呈先升后降趋势, 在 S150 处游离氨基酸含量最高。说明低浓度的壳聚糖引发可提高种子质量, 缓解盐胁迫。淀粉酶作为种子活力的一个重要指标, 可催化淀粉降解以供应胚生长所需的可吸收的小分子物质, 其高低关系到种子萌发和幼苗生长的速度<sup>[35-36]</sup>。在同一引发浓度下,  $\alpha$ -淀粉酶活性与盐浓度成反比, 说明盐离子会对细胞代谢产生毒性, 降低  $\alpha$ -淀粉酶的活性从而抑制藜麦种子的淀粉降

解, 减少了 ATP 产生, 进而影响种子萌发。在同一盐浓度下,  $\alpha$ -淀粉酶活性随引发浓度的增加呈先升后降趋势, 在 S150 处  $\alpha$ -淀粉酶活性最强。说明低浓度的壳聚糖引发可促进淀粉水解, 为种子萌发提供充足能量, 缓解盐离子的伤害, 这与卫丹丹等研究结果<sup>[37]</sup>一致。

#### 3.3 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗生长的影响

盐胁迫会阻碍幼苗生长发育和能量代谢, 使植株出现生长滞缓、植株矮小等明显盐害症状, 形态建成可直观表现出植株受胁迫情况和外源物质的缓解效果<sup>[7,38-39]</sup>。本研究显示, 同一 CTS 引发浓度下, 藜麦幼苗的株高和苗长与盐胁迫强度成反比, 根长呈先升后降的趋势, 均在中度胁迫 N3 处理达最小值。说明盐胁迫可显著抑制藜麦幼苗的形态建成, 但轻、中度盐胁迫可加强藜麦根部的生长发育, 重度盐胁迫会抑制根系的形态建成。盐浓度一定时, 藜麦幼苗的株高和苗长随 CTS 引发浓度的增加呈先升后降趋势, 均在 S150 处理达峰值, 在 S250 处理为最小值, 说明低浓度壳聚糖引发能够抵御盐胁迫对藜麦幼苗的损害, 但浓度过高时, 则会产生抑制作用。这与王玉萍等发现的壳聚糖可有效缓解盐胁迫下白三叶、小麦幼苗的形态建成结论<sup>[21-22]</sup>相似。

#### 3.4 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗丙二醛含量的影响

逆境胁迫下, 由于活性氧 (ROS) 过度积累, 导致脂质过氧化。MDA 作为膜质过氧化的有毒代谢产物, 常用其含量高低来表示膜脂过氧化的程度<sup>[40]</sup>。本研究显示, CTS 引发浓度一定时, 藜麦幼苗的 MDA 含量会随盐胁迫的加剧而增加。说明盐胁迫使 MDA 大量积累, 导致膜系统选择透过能力降低, 细胞内稳态失衡, 造成膜的损伤, 代谢功能紊乱, 影响藜麦的生长发育。相同盐浓度下, 随 CTS 引发浓度的增加, MDA 含量呈现先降后升的变化趋势。说明低浓度壳聚糖引发可在一定程度上维持膜稳定性, 降低膜损伤, 缓解盐胁迫对藜麦幼苗的伤害; 高浓度壳聚糖引发, 不仅不能缓解盐胁迫带来的损伤, 还会加剧对藜麦的伤害作用。这与何昊等报道的壳聚糖对盐胁迫下水稻幼苗的 MDA 积累变化趋势<sup>[20]</sup>基本一致。与王玉萍等报道的适当浓度壳聚糖可降低小麦幼苗的 MDA 含量的结论<sup>[21]</sup>相类似, 表明壳聚糖可以降低幼苗中 MDA 的积累, 维持膜系统的稳定性, 提高幼苗的抗盐性。

### 3.5 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦幼苗抗氧化酶系统的影响

SOD、POD 作为植物抗氧化系统中的保护酶,维持超氧自由基和过氧化物含量的动态平衡<sup>[23]</sup>。逆境胁迫下,SOD、POD 使活性氧代谢保持平衡,维持膜系统的稳定性,加强苗的抗性和素质。本研究结果发现,CTS 引发浓度一定时,随着盐胁迫的加剧,藜麦幼苗的 SOD、POD 活性增强,清除植株体内过量的自由基和活性氧,维持酶促作用平衡,保护细胞结构和功能。相同盐胁迫下,藜麦幼苗的抗氧化酶活性随 CTS 引发浓度的增加呈现先升后降的变化趋势,均在 S150 处理达峰值。说明低浓度的壳聚糖引发可以提高抗氧化酶活性,使活性氧代谢保持平衡,保护生物膜系统,减轻和修复藜麦盐害损伤;高浓度的壳聚糖引发,由于体内自由基大量积累,蛋白质合成受阻,导致抗氧化酶活性降低,进而对植物抵御盐胁迫起到反作用。这与张成冉等报道壳聚糖可有效促进盐胁迫下玉米幼苗的 POD、SOD 活性的变化趋势<sup>[23]</sup>相似,与何昊等报道的壳聚糖能够提高盐胁迫下水稻幼苗的 POD、SOD 活性的研究结果<sup>[20]</sup>一致。试验表明适当浓度的壳聚糖引发,能够促进盐胁迫下藜麦的抗氧化酶系统,提高藜麦的抗盐性。

### 3.6 壳聚糖引发对盐胁迫下藜麦渗透调节系统的影响

在逆境胁迫下,脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖等渗透调节物质不仅可以维持细胞膨压,减少水分的流失<sup>[41]</sup>,保护细胞膜和蛋白免受破坏,维持正常生理活性,也可以调控离子含量,清除活性氧及其代谢产物,缓解植物的氧化损伤<sup>[42]</sup>。本研究结果显示,在同一盐胁迫下,不同的壳聚糖引发浓度对藜麦幼苗渗透性调控物质的含量表现出明显的差异,总体呈先升后降的变化趋势。这可能是由于壳聚糖引发改变细胞膜相对透性,使细胞内溶物外渗。在相同的 CTS 引发处理下,藜麦幼苗中的渗透调节物质含量与其盐分浓度之间存在显著的相关性,这可能是由于盐胁迫使植物细胞内水分倒流胞外,导致渗透调节物质含量的增加,降低细胞受损程度。这与 Singh 等研究发现,CTS 可加强番茄、油菜苗的细胞渗透调节能力和活性氧清除能力,延缓细胞膜脂过氧化作用,降低盐胁迫对作物的损害的研究结果<sup>[43-44]</sup>一致。本研究证实,壳聚糖引发能够增加渗透调节物质的含量,提高藜麦幼苗抗盐能力,抵御

逆境伤害。

## 4 结论

(1)盐胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生长具有显著影响。

(2)壳聚糖引发种子可在一定程度上提高藜麦的发芽指标,增强种子游离氨基酸含量和  $\alpha$ -淀粉酶活性,改善盐胁迫下藜麦幼苗的农艺性状,影响抗氧化酶活性和渗透调节物质含量,诱导藜麦种子及幼苗抗盐性能提高,因此 CTS 具有应用于藜麦耐盐生产的潜力。CTS 最佳引发浓度为 150 mg/L。

(3)壳聚糖来源丰富,具有低毒性、高效能、低成本、高环保等优点,在绿色健康发展的农业领域具有可行性,可有效缓解植物在逆境下的损害。

(4)本试验为盆栽试验,有关壳聚糖在大田中的应用以及壳聚糖对藜麦产量与品质的影响还需进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Li R, Shi F, Fukuda K. Interactive effects of various salt and alkali stresses on growth, organic solutes, and cation accumulation in a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 68(1): 66-74.
- [2] Nowak V, Du J, Charrondière U R. Assessment of the nutritional composition of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) [J]. *Food Chemistry*, 2016, 193: 47-54.
- [3] Li G T, Zhu F. Quinoa starch: structure, properties, and applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 181: 851-861.
- [4] 肖雪峰, 刘丽, 郭巧生, 等. 种子引发对 NaCl 胁迫下通关藤种子萌发及幼苗生理特性的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2015, 40(2): 218-225.
- [5] 周琦, 祝遵凌. 盐胁迫对鹅耳枥幼苗光合作用和荧光特性的影响 [J]. *林业科技开发*, 2015, 29(2): 35-40.
- [6] 张隆隆, 朱晓华, 刘晓瑜, 等. “白茫茫”变成“绿油油”: 张北坝上盐碱地之新生 [J]. *自然资源科普与文化*, 2022(3): 18-21.
- [7] 吴鹏, 吕剑, 郁继华, 等. 褪黑素对盐碱复合胁迫下黄瓜幼苗光合特性和渗透调节物质含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1901-1910.
- [8] 杨洋, 庞春花, 张永清, 等. PAM 与磷肥互作对盐碱地藜麦生长及产量的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(9): 180-185.
- [9] 何欣燕. 盐碱地改良对宁夏盐碱土水盐特性及树木生长的影响 [D]. 北京: 北京林业大学, 2018: 1-62.
- [10] 王金才, 尹莉. 盐碱地改良技术措施 [J]. *现代农业科技*, 2011(12): 282, 284.
- [11] Heydecker W, Higgins J, Gulliver R L. Accelerated germination by osmotic seed treatment [J]. *Nature*, 1973, 246(5427): 42-44.
- [12] 李玉祥, 林海荣, 梁倩, 等. 多巴胺引发对盐胁迫下水稻种子

- 萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国水稻科学,2021,35(5):487-494.
- [13]张瑞栋,梁晓红,刘静,等. 种子引发对干旱胁迫下高粱种子发芽及生理特性的影响[J]. 作物杂志,2022(6):234-240.
- [14]Finch-Savage B. Seeds: physiology of development, germination and dormancy (3rd edition)[J]. Seed Science Research,2013,23(4):289-289.
- [15]胡亚丽,聂靖芝,吴霞,等. 水杨酸引发对红麻幼苗耐盐性的影响[J]. 中国农业科学,2022,55(14):2696-2708.
- [16]Srivastava A K, Lokhande V H, Patade V Y, et al. Comparative evaluation of hydro-, chemo-, and hormonal-priming methods for imparting salt and PEG stress tolerance in Indian mustard (*Brassica juncea* L.) [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 32(6):1135-1144.
- [17]辛艳. 引发技术是提高种子活力的新手段[J]. 种子科技, 2002,20(5):281-282.
- [18]Katiyar D, Hemantaranjan A, Singh B. Chitosan as a promising natural compound to enhance potential physiological responses in plant;a review [J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2015, 20(1):1-9.
- [19]秦曼丽,朱永兴,刘续立,等. 外源壳聚糖对干旱胁迫下生姜幼苗光合特性及水分代谢的影响[J]. 中国瓜菜,2022,35(9):48-56.
- [20]何昊,李丹丹,潘非凡,等. 壳聚糖引发对盐胁迫下水稻种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江西农业大学学报,2022,44(5):1066-1074.
- [21]王玉萍,于丹,李成,等. 壳聚糖对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(1):180-185.
- [22]潘丽芹,韦海忠,张浩,等. 壳聚糖对盐胁迫下白三叶种子萌发及幼苗生长的缓解作用[J]. 分子植物育种,2018,16(11):3740-3744.
- [23]张成冉,徐广海,宋朝玉,等. 糖浸种对盐胁迫玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子,2021,40(8):51-56.
- [24]周娟,邹礼平. 壳聚糖对盐胁迫下豇豆幼苗生长发育的影响[J]. 北方园艺,2014(23):30-33.
- [25]董涛,张志刚,尚庆茂. 水杨酸和壳聚糖对黄瓜幼苗耐盐性的共诱导作用[J]. 中国蔬菜,2009(2):46-50.
- [26]宋士清,刘微,郭世荣,等. 化学诱抗剂诱导黄瓜抗盐性及其机理[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1871-1876.
- [27]郁飞燕,张联合,李艳艳,等. 干旱胁迫对水稻种子萌发的影响[J]. 山东农业科学,2011,43(8):36-39.
- [28]孙绍营,王健鸿,王静文,等. 盐碱胁迫对细叶百合种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(24):106-112.
- [29]杨若鹏,李爷福,李杰. 蛭石引发对盐胁迫下番茄种子萌发、幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(4):135-139.
- [30]张志刚,尚庆茂. 水杨酸和壳聚糖对NaCl胁迫下黄瓜种子萌发的促进作用[J]. 中国蔬菜,2010(8):26-29.
- [31]常青山,张利霞,刘龙昌,等. 壳聚糖浸种对盐胁迫苜蓿种子萌发受阻的缓解作用[J]. 贵州农业科学,2015,43(5):69-71.
- [32]Zaynab M, Kanwal S, Furqan M, et al. Proteomic approach to address low seed germination in *Cyclobalnoopsis gilva* [J]. Biotechnology Letters, 2017, 39(10):1441-1451.
- [33]陈珊,毕鑫屹,刘美玲,等. 玉米萌发成苗期渗透调节机制的研究进展[J]. 江西农业学报,2020,32(6):34-40.
- [34]宿婧,史晓晶,梁彬,等. 干旱胁迫对藜麦种子萌发及生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2019,34(6):928-932.
- [35]李东,甄春燕,陈德富,等.  $\alpha$ -亚麻酸对干旱胁迫下水稻种子萌发的影响[J]. 广西植物,2018,38(8):1025-1031.
- [36]柳苗,高捍东,高燕,等. 休眠解除过程中紫楠种子生理生化特征的变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):9-17.
- [37]卫丹丹,王丙全,赵丽娟,等. 亚精胺对盐胁迫下藜麦种子萌发和呼吸速率的影响[J]. 种子,2022,41(12):7-13.
- [38]赵肖琼,梁泰帅,李琪,等. 调环酸钙对旱盐交叉胁迫下玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(1):99-103.
- [39]赵军,许泽宏. 不同氮形态对盐胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(11):82-90.
- [40]姚军朋,姚拓,王小利. ACC脱氨酶的应用研究进展与评述[J]. 生物技术,2010,20(2):87-91.
- [41]张天泽,孟凡君,尹大川. 干旱胁迫下外生菌根菌对山新杨幼苗生物量、渗透调节物质和抗氧化酶的影响[J]. 菌物学报,2023,42(7):1558-1574.
- [42]Serraj R, Sinclair T R. Osmolyte accumulation: can it really help increase crop yield under drought conditions? [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2):333-341.
- [43]Singh T, Vesentini D, Singh A P, et al. Effect of chitosan on physiological, morphological, and ultrastructural characteristics of wood-degrading fungi [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2008, 62(2):116-124.
- [44]丁振中,曾哲灵,龚劲松,等. NaCl胁迫下壳寡糖对油菜苗生长的影响[J]. 生物化工,2018,4(3):29-33.