

刘昌壮, 陶雨朝, 杨富强, 等. 硫酸锰溶液浸种对玉米种子萌发期抗盐碱生理特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39( 3 ): 645-656.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.03.004

## 硫酸锰溶液浸种对玉米种子萌发期抗盐碱生理特性的影响

刘昌壮, 陶雨朝, 杨富强, 刘佳奇, 李明

(东北农业大学农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:** 土壤盐碱化是影响作物生长发育和产量形成的主要非生物胁迫之一。提高盐碱胁迫下作物的出苗率和成苗率是增强作物耐盐碱能力研究的关键。本研究以郑单 958 为试验材料, 设置盐碱胁迫和无盐碱胁迫 2 个生长环境, 探讨了不同硫酸锰浓度[ 0 mmol/L( CK)、5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L] 浸种对玉米种子萌发能力及生理特性的影响。结果表明: 5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种处理, 能够有效提高盐碱胁迫下玉米种子萌发期的芽长、根长以及发芽率, 显著提高胚根的抗坏血酸和还原型谷胱甘肽等抗氧化物质的含量; 胚根和胚芽的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、谷胱甘肽还原酶和谷胱甘肽过氧化物酶的活性和抗超氧阴离子自由基活力在 0~20 mmol/L 的硫酸锰溶液浸种处理中呈现先上升后下降的趋势, 其中以 5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种表现较好; 在盐碱胁迫下, 随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加, 玉米胚芽和胚根内的渗透调节物质如可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量呈现先下降后上升的趋势; 无盐碱胁迫时, 随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加, 玉米幼苗胚芽和胚根的可溶性糖含量及游离脯氨酸含量呈现一个持续上升的趋势, 丙二醛含量呈现低浓度促进高浓度抑制的特征。综上所述, 利用 5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种可以提高盐碱胁迫下玉米植株 AsA-GSH 循环中关键物质含量和酶活性, 增强清除活性氧物质相关酶活性, 有效促进玉米萌发期抗氧化系统运转, 减弱膜脂过氧化作用, 维持植株细胞膜透性, 有效提高玉米种子的萌发能力以及耐盐碱能力。

**关键词:** 盐碱胁迫; 玉米; 硫酸锰; 种子萌发; 抗氧化酶; AsA-GSH 循环

**中图分类号:** S513.041 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440( 2023) 03-0645-12

## Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on saline-alkali resistance of maize seeds during germination

LIU Chang-zhuang, TAO Yu-zhao, YANG Fu-qiang, LIU Jia-qi, LI Ming

( College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China )

**Abstract:** Soil salinization is one of the major abiotic stresses affecting crop growth and yield formation. Improving the emergence rate and seedling rate of crops under saline-alkali stress is the key to enhance the saline-alkali tolerance of crops. In this study, Zhengdan 958 was used as the experimental material, and two growth environments of saline-alkali stress and no saline-alkali stress were set up. The effects of different manganese sulfate concentrations ( 0 mmol/L, 5 mmol/L, 10 mmol/L, 20 mmol/L ) on the germination ability and physiological characteristics of maize seeds were dis-

cussed, and the 0 mmol/L manganese sulfate solution treatment was used as control ( CK ). The results showed that soaking seeds with 5 mmol/L manganese sulfate solution could effectively improve the bud length, root length and germination rate of maize seeds during germination under saline-alkali stress, and significantly increase the contents of ascorbic acid and reduced glutathione in radicle.

收稿日期: 2022-06-24

基金项目: 黑龙江省玉米超高产关键技术研究项目( 2017YFD03005-006-2 )

作者简介: 刘昌壮( 1996- ), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事玉米耐盐碱生理研究。( E-mail ) liu891578576@163.com

通讯作者: 李明, ( E-mail ) liming@neau.edu.cn

The activities of superoxide dismutase, catalase, glutathione reductase and glutathione peroxidase and the activity of anti-superoxide anion free radical in radicle and plumule increased first and then decreased in the treatment of 0–20 mmol/L manganese sulfate solution. Among them, 5 mmol/L manganese sulfate solution treatment was better. Under saline-alkali stress, with the increase of manganese sulfate soaking concentration, the osmotic adjustment substances such as soluble protein content, soluble sugar content and free proline content in maize germ and radicle decreased first and then increased. Under no saline-alkali stress, with the increase of manganese sulfate soaking concentration, the soluble sugar content and free proline content of maize seedling germ and radicle showed a continuous upward trend, and the malondialdehyde content showed the characteristics of low concentration promotion and high concentration inhibition. In summary, soaking seeds with 5 mmol/L manganese sulfate solution could improve the content of key substances and enzyme activity in AsA-GSH cycle of maize plants under saline-alkali stress, enhance the activity of enzymes related to scavenging active oxygen substances, effectively promote the operation of antioxidant system in maize germination period, weaken the membrane lipid peroxidation, maintain the permeability of plant cell membrane, and effectively improve the germination ability and saline-alkali tolerance of maize seeds.

**Key words:** saline-alkali stress; maize; manganese sulfate; seed germination; antioxidant enzymes; AsA-GSH cycle

外源物(硝普钠、亚精胺、油菜素内酯、硝酸钙、水杨酸和赤霉素等)浸种可以在一定程度上增强植物幼苗耐盐碱和重金属的能力,提高种子的发芽率和幼苗的生理活性<sup>[1-8]</sup>。锰是植物生长所必需的微量元素之一。作为辅助因子,锰能够激活 35 种以上的酶,并作为清除超氧阴离子自由基重要活性酶的重要组分<sup>[9]</sup>,在植物抗氧化系统中扮演着重要角色。利用锰进行浸种处理,促进作物种子萌发、幼苗发育已有一些研究。马威等<sup>[10]</sup>、刘鹏等<sup>[11]</sup>研究结果表明适宜浓度的锰浸种能有效提高大豆叶片中包括超氧化物歧化酶在内的多种酶的活性。邹原东等<sup>[12]</sup>研究结果表明适量锰的补充能显著提高玉米种子抗氧化酶的活性,促进种子活力的增强。刘建凤等<sup>[13]</sup>研究结果表明用 0.50~1.00 g/L 硫酸锰溶液浸种 12 h 能增强玉米种子新陈代谢,促进萌发,有效提高种子的发芽指数和发芽率,是一项玉米增产的有效措施。

土壤盐碱化在全世界已产生深远影响。据不完全统计,全世界盐碱地面积达  $9.54 \times 10^8 \text{ hm}^2$ , 中国各类盐碱地面积总计  $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ <sup>[14]</sup>。东北松嫩平原拥有全国最大的盐碱地,面积达到  $3.78 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[15]</sup>,其中最具代表性土壤类型为苏打盐碱土,其不仅具有盐胁迫的特点而且还伴随着高 pH 胁迫。盐碱土对植物的影响主要表现为显著抑制植物根系伸长<sup>[16]</sup>,影响植物体的细胞膜结构及功能,使植物难以吸收离子并扰乱植物的离子平衡<sup>[17]</sup>,对植物造成复杂的混合盐碱胁迫,严重制约着当地农作物生产和生态环境建设。另外,前人的研究结果还表明,在中国及其他国家的碱性土壤中还存在锰供给不足的问题<sup>[18-20]</sup>。因此,研究通过外源补充适量锰的方式来促进盐碱化土壤上作物的生长发育,对提升盐碱土地区作物种植效益有重要的现实意义。

目前利用锰浸种提高玉米及其他作物对非生物胁迫的抗性已有一些研究<sup>[11,21-23]</sup>,但在锰浸种对玉米混合盐碱胁迫下的生理影响方面的研究较少。在植物生长中,种子萌发和幼苗生长期是受逆境胁迫最敏感的阶段<sup>[24]</sup>。本研究通过分析不同浓度硫酸锰溶液浸种对盐碱胁迫和无盐碱胁迫下玉米种子萌发期生理指标的影响,旨在揭示混合盐碱胁迫对玉米生长的损害机制,明确增强玉米种子萌发期抗盐碱能力的适宜硫酸锰溶液浸种浓度,为提高盐碱胁迫地区作物生产能力提供科学依据。

1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试玉米品种为郑单 958,供试药品为  $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。

### 1.2 试验设计

选择饱满、大小均匀的玉米种子,用 2% 次氯酸钠消毒 10 min,并用去离子水冲洗 5~10 次。晾干后将种子完全浸入 5 mmol/L、10 mmol/L、20 mmol/L 硫酸锰溶液中,以去离子水为对照进行玉米浸种 8 h,共 4 个浸种浓度处理。研究中的混合盐碱溶液,定义为一种将  $\text{NaCl}$ 、 $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaHCO}_3$  按照 1:9:1:9 的比例<sup>[25]</sup>混合成 pH 等于 9.04 的碱性盐溶液,其中钠离子浓度为 100 mmol/L。试验设置混合盐碱溶液和去离子水(无盐碱胁迫)2 个种子萌发环境。将浸种处理后的种子清洗干净后,吸干表

面水分,分别置于垫有2层混合盐碱溶液和去离子水浸湿滤纸的培养皿(直径9 cm)中,每皿50粒,每处理重复4次。于25℃培养箱中暗室培养,每天早上10:00更换处理液,保持处理液浓度一致。每24 h统计一次发芽数,种子处理后第7 d取玉米胚芽及胚根进行形态及生理指标测定。

### 1.3 测定项目及方法

**1.3.1 生长指标的测定** 在玉米种子萌发过程中,以根长大于种子长度,芽长为种子长度一半作为萌发标准<sup>[26]</sup>,统计各处理每天的累计发芽种子数。大部分处理4 d后,种子发芽数趋于稳定,7 d后各处理发芽数基本不再增加,因此统计各处理第1 d至第4 d的发芽数和第1 d至第7 d的发芽数,进行比较分析;第7 d发芽数统计后,每个处理取15粒已发芽的种子,将胚芽与胚根分离,吸干表面水分后称鲜质量,然后测量具有代表性的5粒已发芽种子的芽长、根长。胚芽与胚根分别放置于105℃烘箱中杀青15 min,80℃烘干至恒质量,称干质量,计算活力指数。算法如下:

发芽率( $GP$ )= 萌发种子数/试验用种子总数×100%

发芽势( $GE$ )= 第1 d至第4 d发芽数/试验用种子总数×100%

$$\text{发芽指数}(GI) = \sum_{i=1}^7 \frac{G_i}{i} \quad (1)$$

式中, $i$ 为发芽日数, $G_i$ 为第*i*日的累计发芽总数。

$$\text{活力指数}(VI) = GI \times S \quad (2)$$

式中, $GI$ 为发芽指数, $S$ 为已发芽种子的胚芽和胚根干质量( $g$ )。

**1.3.2 生理指标测定** 超氧化物歧化酶( $SOD$ )、过氧化物酶( $POD$ )、过氧化氢酶( $CAT$ )、谷胱甘肽过氧化物酶( $GPX$ )等抗氧化酶活性参考Li等<sup>[27]</sup>的方法测定,谷胱甘肽还原酶( $GR$ )与抗坏血酸过氧化物酶( $APX$ )活性以及可溶性蛋白含量、谷胱甘肽( $GSH$ )含量参照高芳<sup>[28]</sup>的方法测定,抗超氧阴离子自由基活力参照张智猛等<sup>[29]</sup>的方法测定。

丙二醛、可溶性糖含量测定采用硫代巴比妥酸比色法<sup>[30]</sup>,脯氨酸含量测定采用茚三酮染色法<sup>[30]</sup>,还原型抗坏血酸( $AsA$ )含量测定参考邹琦<sup>[31]</sup>的方法。

### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2019和DPS 9.01对数据进行处理和统计分析,利用Origin Pro 2022进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 硫酸锰溶液浸种对玉米种子活力及胚芽、胚根生长的影响

玉米萌发期在遭受盐碱胁迫后,种子的发芽率、发芽势、发芽指数及活力指数等指标均明显下降(表1)。在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加,上述指标均表现出低浓度促进高浓度抑制的态势。其中,无盐碱胁迫下,5 mmol/L硫酸锰溶液浸种与0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照( $CK1$ )相比,上述指标提升效果不明显;但在盐碱胁迫时,5 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理后的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数分别比0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照( $CK2$ )提高了8.91%、8.14%、8.36%、43.00%,但高浓度的硫酸锰溶液浸种处理(20 mmol/L)会显著抑制玉米种子的萌发。

表1 硫酸锰溶液浸种对玉米种子活力的影响

Table 1 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on seed vitality of maize

处理		发芽率 (%)	发芽势 (%)	发芽指数	活力指数
种子萌发环境	硫酸锰溶液浸种浓度 (mmol/L)				
无盐碱胁迫	0( $CK1$ )	96.00a	94.00a	50.75a	2.13b
	5	98.00a	94.67a	53.78a	3.93a
	10	93.00b	87.33b	51.02a	4.03a
	20	92.00b	89.33b	46.42b	2.04b
盐碱胁迫	0( $CK2$ )	67.33b	57.33b	32.18ab	1.00b
	5	73.33a	62.00a	34.87a	1.43a
	10	59.33c	56.67b	30.18b	0.74c
	20	53.33d	45.33c	23.49c	0.55c

同一列相同种子萌发环境不同小写字母表示差异达到0.05水平显著。 $CK1$ 、 $CK2$ 分别为去离子水和混合盐碱溶液浸种对照。

混合盐碱胁迫下会对玉米胚芽和胚根的生长造成不利影响,但经过适量的硫酸锰溶液浸种处理,能够明显缓解盐碱胁迫所造成的危害(表 2)。无盐碱胁迫时,5 mmol/L 和 10 mmol/L 的硫酸锰溶液浸种处理对玉米胚芽、胚根的生长及干物质积累有显著促进

作用;盐碱胁迫下,5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种处理对玉米胚芽胚根的生长有明显促进作用,胚芽长、胚根长、胚芽干质量、胚根干质量分别比对照(CK2)增加了 66.49%、11.03%、39.15%、22.94%;而 20 mmol/L 硫酸锰溶液浸种处理则会抑制玉米种子的萌发。

表 2 硫酸锰溶液浸种对玉米胚芽、胚根生长的影响

Table 2 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on the growth of maize germ and radicle

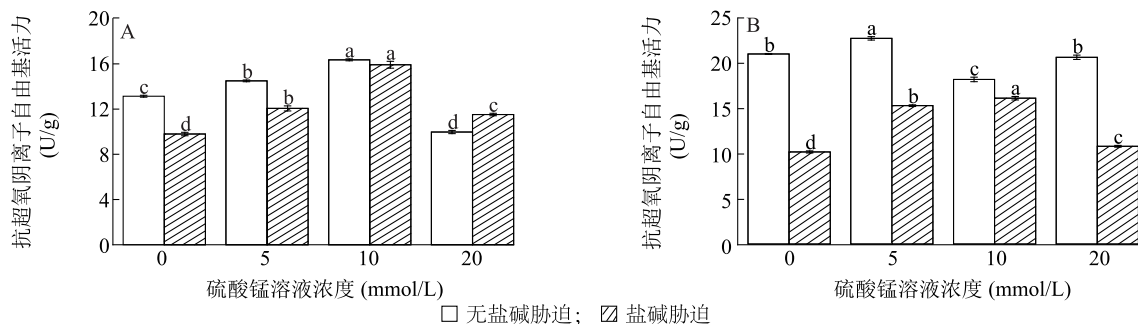
种子萌发环境	硫酸锰溶液浸种浓度 (mmol/L)	胚芽长 (cm)	胚根长 (cm)	胚芽干质量 (g)	胚根干质量 (g)
无盐碱胁迫	0(CK1)	6.22c	8.78c	0.026 3c	0.015 8c
	5	8.18a	14.56a	0.028 6a	0.024 0a
	10	6.66b	12.38b	0.027 0b	0.021 7b
	20	6.16c	8.40c	0.026 4c	0.014 4d
盐碱胁迫	0(CK2)	3.82c	5.26b	0.018 9c	0.010 9c
	5	6.36a	5.84a	0.026 3a	0.013 4a
	10	4.62b	4.50c	0.021 8b	0.011 5b
	20	3.50d	3.22d	0.016 7d	0.007 1d

同一列相同种子萌发环境不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。CK1、CK2 分别为去离子水和混合盐碱溶液浸种对照。

## 2.2 硫酸锰溶液浸种对玉米抗超氧阴离子自由基活力、抗氧化物质活性的影响

混合盐碱胁迫下,玉米萌发期胚芽及胚根的抗超氧阴离子活力整体呈现下降趋势(图 1)。在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,随着  $\text{MnSO}_4$  溶液浸种浓度的增加,抗超氧阴离子自由基活力均呈现先上升后下降的趋势。盐碱胁迫下,硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时,胚芽及胚根的抗超氧阴离子自由基活力

提升效果最好,分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照(CK2)提升了 62.57% 和 58.34%;无盐碱胁迫时,玉米胚芽抗超氧阴离子自由基活力在硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时提高最为显著,比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照(CK1)提高了 24.52%;而胚根抗超氧阴离子自由基活力则以 5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种增加最为显著,提高了 8.20%。



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 1 硫酸锰溶液浸种对玉米抗超氧阴离子自由基活力的影响

Fig.1 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on anti-superoxide anion free radical activity of maize

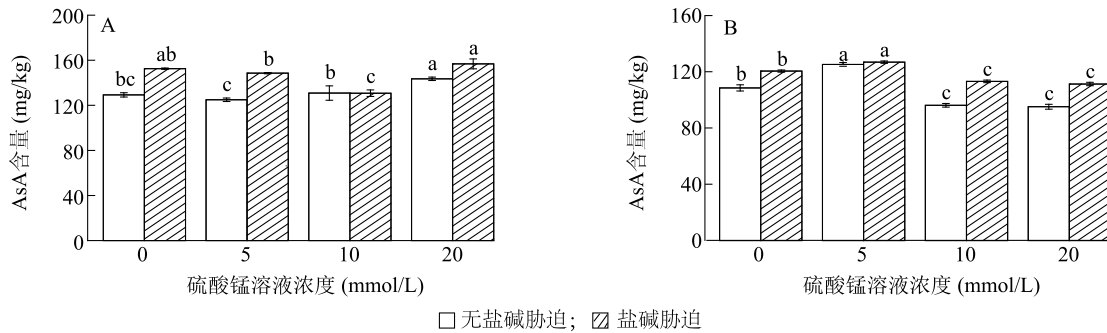
受到混合盐碱胁迫后,玉米胚芽及胚根抗氧化物质(AsA)含量均较无盐碱胁迫有所增加,说明盐碱胁迫一定程度上促进了植物体内 AsA 的合成(图 2)。

在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加,玉米幼苗胚芽 AsA 含量均呈现先下降后上升的趋势;而胚根 AsA 含量却呈现先上升后下降



的趋势。无盐碱胁迫时,20 mmol/L硫酸锰溶液浸种浓度的胚芽 AsA 含量提升最为显著,比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照(CK1)提高了 11.00%;胚根 AsA 含量则以 5 mmol/L硫酸锰溶液浸种提升最为明显,增幅达 15.38%,而 10 mmol/L、20 mmol/L硫酸锰溶液浸种胚根 AsA 含量分别降低了 11.40%、12.33%。盐

碱胁迫下,10 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理的胚芽 AsA 含量比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照(CK2)下降了 14.26%;胚根 AsA 含量在 5 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理下增加 5.25%,而在 10 mmol/L、20 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理下分别下降了 6.08%和 7.64%,差异显著。



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 2 硫酸锰溶液浸种对玉米抗氧化物质(AsA)含量的影响

Fig.2 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on the content of antioxidant substances (AsA) in maize

### 2.3 硫酸锰溶液浸种对玉米抗氧化酶活性的影响

玉米幼苗在萌发期受到混合盐碱胁迫时,启动抗氧化酶系统抵抗胁迫带来的不利影响。0~20 mmol/L硫酸锰溶液处理下,盐碱胁迫时玉米胚芽超氧化物歧化酶(SOD)活性下降,而胚根的 SOD 活性上升(图 3)。随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加,胚芽和胚根的 SOD 活性都表现为先上升后下降的趋势。硫酸锰溶液浸种浓度 5 mmol/L时,胚芽 SOD 活性在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下分别比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照增加了 10.96%、5.61%,而胚根 SOD 活性则分别增加了 9.02%、5.09%,差异都达到了显著水平。

盐碱胁迫下,玉米胚芽和胚根的过氧化物酶(POD)活性均明显上升(图 3)。随着硫酸锰溶液浸种浓度的提升,在盐碱胁迫下,胚芽和胚根的 POD 活性都表现为先上升后下降。总体来说,5~20 mmol/L硫酸锰溶液处理,胚芽和胚根的 POD 活性都比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照要高。硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L时,胚芽 POD 活性增加最为显著,比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照提高了 10.15%;胚根的 POD 活性则是在 5 mmol/L硫酸锰溶液浸种浓度时,增加最为明显,比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照提高了 8.92%。无盐碱胁迫时,20 mmol/L硫酸锰溶液浸种浓度处理后,胚芽的 POD 活性比 0 mmol/L硫酸

锰溶液浸种对照提高最为明显,达 8.49%;而胚根的 POD 活性在 5 mmol/L和 10 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理后比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照分别提高了 8.63%和 7.58%,差异显著。

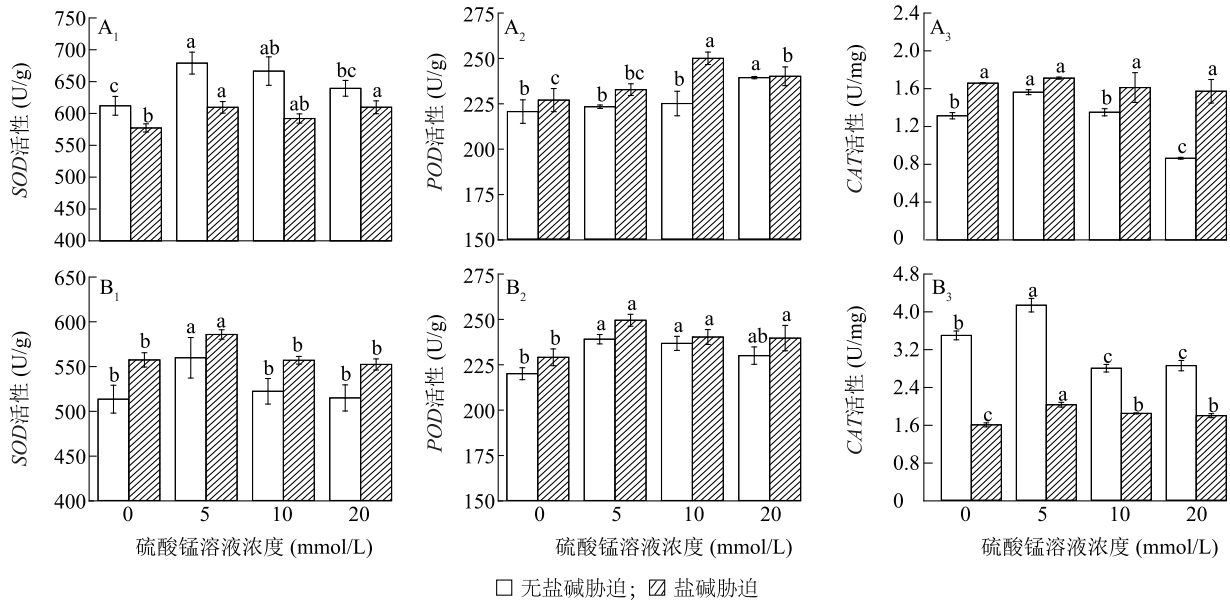
玉米幼苗在受到混合盐碱胁迫后,胚芽与胚根的过氧化氢酶(CAT)活性表现出与 SOD 相反的趋势,即胚芽的 CAT 活性明显上升,而胚根 CAT 活性明显下降(图 3)。随着硫酸锰溶液浸种浓度的提高,在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,玉米胚芽和胚根的 CAT 活性都呈现为先增后降的趋势,而且都是在 5 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理时 CAT 活性表现最高。盐碱胁迫时,胚芽和胚根的 CAT 活性比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照分别提高 3.20%和 26.64%;无盐碱胁迫时,胚芽和胚根的 CAT 活性比 0 mmol/L硫酸锰溶液浸种对照分别提高了 18.89%和 18.34%,均达到显著差异水平。

### 2.4 硫酸锰溶液浸种对玉米谷胱甘肽还原酶活性、丙二醛含量的影响

在受到混合盐碱胁迫时玉米胚芽及胚根的谷胱甘肽还原酶(GR)活性整体呈现下降趋势(图 4)。在硫酸锰溶液浸种浓度 0~20 mmol/L,盐碱胁迫和无盐碱胁迫下,玉米胚芽和胚根的 GR 活性均表现为先增加后减少的趋势。盐碱胁迫时,5 mmol/L和 10 mmol/L硫酸锰溶液浸种处理下,胚芽的 GR 活性

分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照提高了 57.20% 和 41.39%, 胚根的 GR 活性分别提高了 88.19% 和 111.92%。无盐碱胁迫时, 胚芽的 GR 活性在 5 mmol/L 和 10 mmol/L 硫酸锰溶液浸种处理

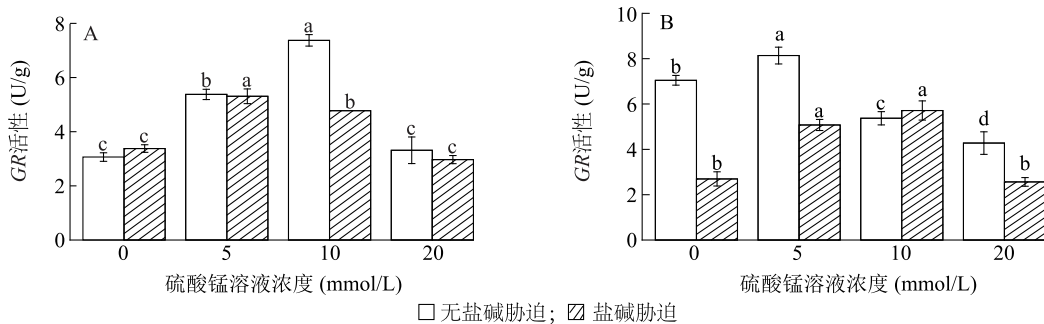
下, 分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照提高了 75.46% 和 140.57%, 胚根的 GR 活性在 5 mmol/L 硫酸锰浸种处理下, 比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照提高了 15.49%。



A<sub>1</sub>~A<sub>3</sub>: 胚芽; B<sub>1</sub>~B<sub>3</sub>: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 3 硫酸锰溶液浸种对玉米抗氧化酶活性的影响

Fig.3 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on antioxidant enzymes activities of maize



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 4 硫酸锰溶液浸种对玉米谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性的影响

Fig.4 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on glutathione reductase (GR) activity of maize

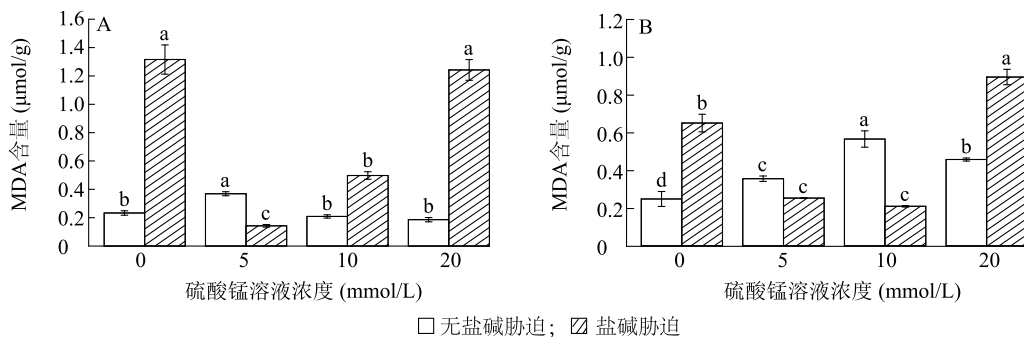
植物在受到衰老或其他非生物胁迫时体内会产生大量的活性氧物质, 增强细胞膜脂的氧化作用, 对细胞膜造成损伤, 使丙二醛 (MDA) 含量升高, 因此可以通过植物体内 MDA 含量的变化表示受胁迫后的损伤程度<sup>[32]</sup>。在盐碱胁迫下, 随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加, 玉米胚芽和胚根的 MDA 含量都呈现先减少后增加的趋势 (图 5), 硫酸锰溶液浸种浓度 5 mmol/L 时, 胚芽的 MDA 含量比 0 mmol/L 硫酸锰溶液

浸种对照降低了 89.16%; 而胚根的 MDA 含量则是在 10 mmol/L 硫酸锰溶液浸种时, 下降了 67.85%, 最为明显。无盐碱胁迫时, 随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加, 胚芽和胚根的 MDA 含量都呈现先增加后减少的趋势, 浸种浓度 5 mmol/L 时, 胚芽的 MDA 含量提高了 58.15%, 与 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照差异显著; 胚根的 MDA 含量在浸种浓度 10 mmol/L 时, 显著提高了 128.19%。

## 2.5 硫酸锰溶液浸种对玉米抗坏血酸过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化物酶活性及谷胱甘肽含量的影响

受到混合盐碱胁迫后,玉米幼苗胚芽及胚根的抗坏血酸过氧化物酶(*APX*)活性明显增加(图6)。随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加,在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,胚根的*APX*活性都呈现出先减少后增加的趋势。硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时,胚根*APX*活性最低,无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,胚根的*APX*活

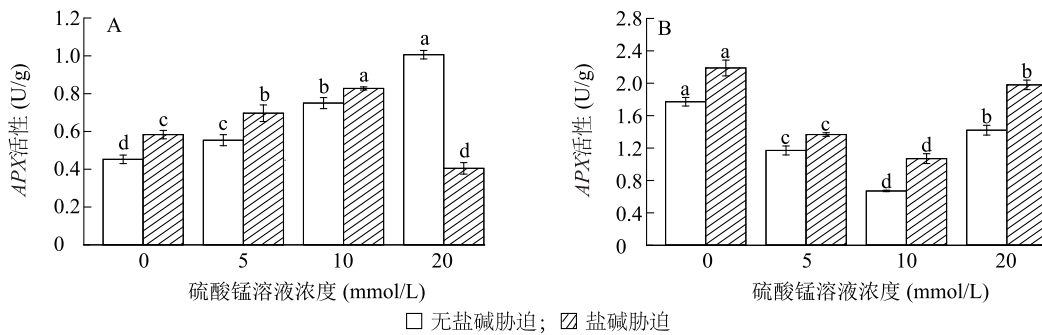
性分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照显著降低 62.29%、51.23%。随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加,在无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,胚芽的*APX*活性呈现两个不同的变化趋势。无盐碱胁迫时,胚芽*APX*活性逐渐增强;而在盐碱胁迫下,胚芽的*APX*活性呈现先增加后降低的趋势。硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时,胚芽*APX*活性比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照提高了 41.84%。



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图5 硫酸锰溶液浸种对玉米丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.5 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on malondialdehyde (MDA) content of maize



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图6 硫酸锰溶液浸种对玉米抗坏血酸过氧化物酶(*APX*)活性的影响

Fig.6 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on ascorbate peroxidase (*APX*) activity of maize

硫酸锰溶液浸种浓度 0~20 mmol/L 时,受到混合盐碱胁迫后的玉米胚芽及胚根的谷胱甘肽过氧化物酶(*GPX*)活性总体下降(图7)。在无盐碱胁迫和盐碱胁迫时,随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加,胚芽和胚根的*GPX*活性均表现为先上升后下降。无盐碱胁迫时,硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 的处理,胚芽的*GPX*活性提升显著,提高了 43.32%;盐碱胁迫下,5~10 mmol/L 硫酸锰溶液浸种后胚芽和胚根的*GPX*活性高于 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照;其中,硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时,胚芽和胚根的*GPX*活性提高了 160.25%、91.40%。

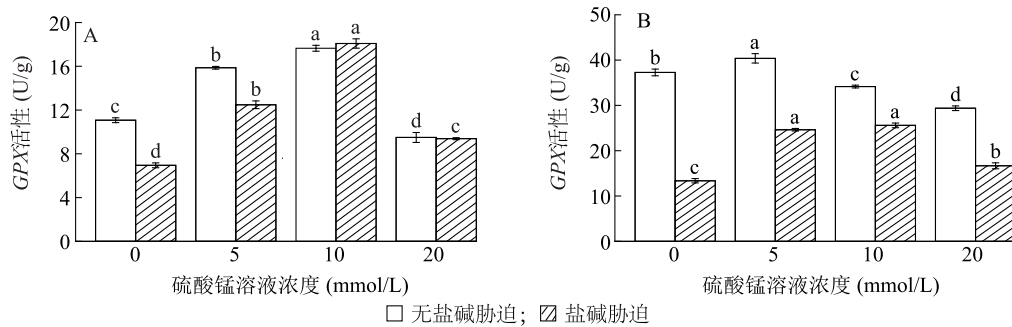
玉米幼苗在萌发期遭受混合盐碱胁迫后,胚芽谷胱甘肽(*GSH*)含量明显上升,而胚根的*GSH*含量总体呈下降特征(图8)。在无盐碱胁迫及盐碱胁迫下,随着硫酸锰溶液浓度的增加,胚芽和胚根*GSH*含量均表现为先增加后减少的趋势。其中,硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时,无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,胚芽的*GSH*含量提升最为显著,分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照提升 34.80%、8.09%;而无盐碱胁迫和盐碱胁迫下,胚根的*GSH*含量在硫酸锰溶液浸种浓度 5 mmol/L 时分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照提升了 61.71%、27.65%,最为显

著。

## 2.6 硫酸锰溶液浸种对玉米可溶性蛋白质、可溶性糖、脯氨酸含量的影响

硫酸锰溶液浸种浓度 0~20 mmol/L 时,受到混合盐碱胁迫后,玉米萌发期胚芽和胚根可溶性蛋白质含量总体表现为上升(图 9)。在无盐碱胁迫和盐碱胁迫处理下,胚芽和胚根的可溶性蛋白质含量均表现为先下降后上升的趋势。其中,在盐碱胁迫下,

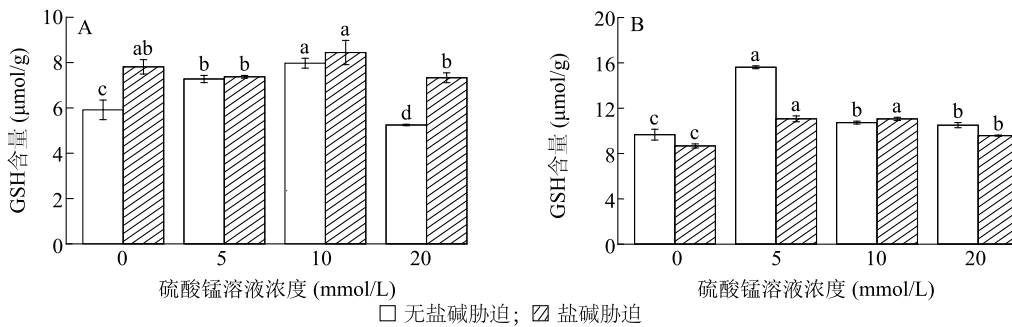
硫酸锰溶液浸种浓度 10 mmol/L 时,胚芽和胚根可溶性蛋白质含量比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照分别降低了 31.35%、25.85%,差异显著;无盐碱胁迫时,5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种的胚根可溶性蛋白质含量与 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照无显著差异;但在盐碱胁迫下,胚根的可溶性蛋白质含量比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照显著降低了 24.09%。



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 7 硫酸锰溶液浸种对玉米谷胱甘肽过氧化物酶 (GPX) 活性的影响

Fig.7 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on glutathione peroxidase (GPX) activity of maize



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 8 硫酸锰溶液浸种对玉米谷胱甘肽 (GSH) 含量的影响

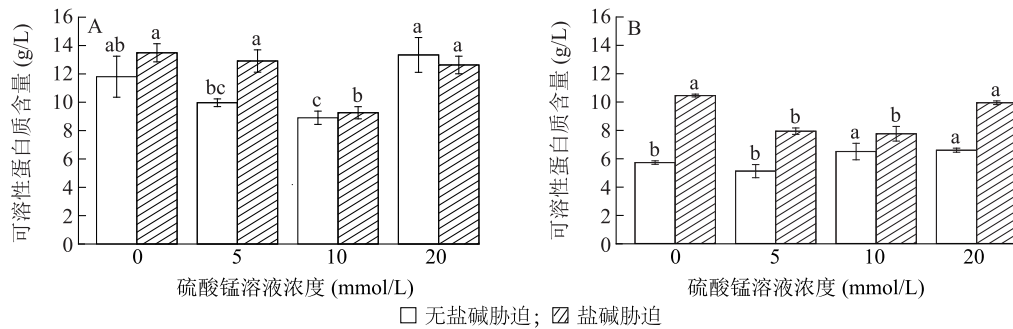
Fig.8 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on glutathione (GSH) content of maize

玉米胚芽和胚根在遭受到混合盐碱胁迫后体内可溶性糖含量总体增加(图 10)。在盐碱胁迫下,玉米胚芽和胚根可溶性糖含量随着硫酸锰溶液浸种浓度的增加呈现先下降后上升的趋势。无盐碱胁迫时,玉米胚芽和胚根可溶性糖含量随浸种硫酸锰溶液浓度的增加呈现连续上升的趋势,其中 20 mmol/L 浸种浓度下,胚芽和胚根可溶性糖含量均显著高于 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照,分别增加了 42.37% 和 23.24%。

玉米胚芽和胚根在遭受到混合盐碱胁迫后体内脯氨酸(Pro)含量总体增加(图 11)。在盐碱胁迫

下,随  $\text{MnSO}_4$  溶液浓度的增加,玉米胚芽和胚根的 Pro 含量呈现先显著减少后显著增加的趋势,20 mmol/L 硫酸锰溶液浸种时脯氨酸含量增加明显。这说明 5 mmol/L、10 mmol/L 的硫酸锰溶液浸种玉米抵抗盐碱胁迫的能力显著提高,反映出植株所遭受到的胁迫程度下降。没有盐碱胁迫时,随  $\text{MnSO}_4$  浓度的增加,玉米胚芽和胚根的 Pro 含量呈现持续增加的趋势,其中 20 mmol/L 硫酸锰溶液浸种浓度下,胚芽和胚根 Pro 含量分别比 0 mmol/L 硫酸锰溶液浸种对照增加了 405.08% 和 123.76%,差异达显著水平。

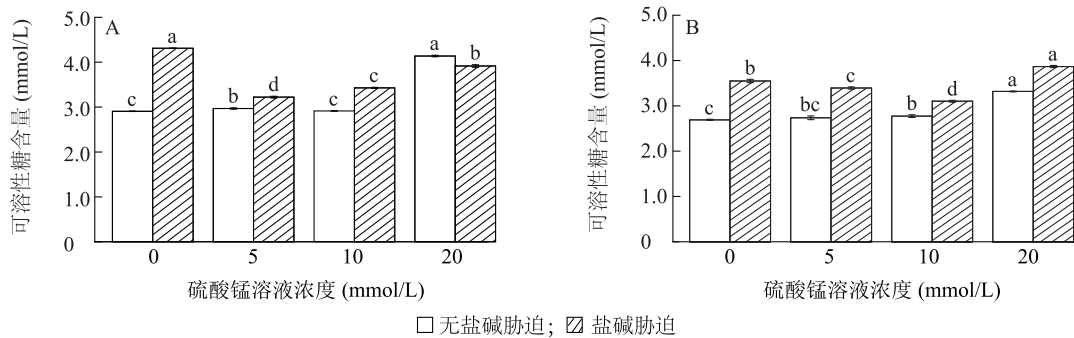




A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 9 硫酸锰溶液浸种对玉米可溶性蛋白质含量的影响

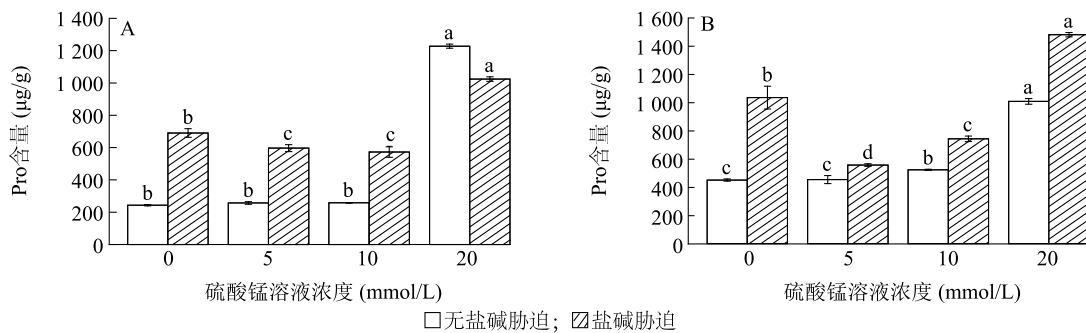
Fig.9 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on soluble protein content of maize



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 10 硫酸锰溶液浸种对玉米可溶性糖含量的影响

Fig.10 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on soluble sugar content of maize



A: 胚芽; B: 胚根。相同种子萌发环境处理间不同小写字母表示差异达到 0.05 水平显著。

图 11 硫酸锰溶液浸种对玉米脯氨酸 (Pro) 含量的影响

Fig.11 Effects of soaking seeds with manganese sulfate solution on proline (Pro) content of maize

### 3 讨论

锰是植物生长代谢所必需的一种微量元素,尽管需求量很小,但对植物体有着难以取代的功能。土壤锰含量过低或过高都会对植物的正常生长发育造成抑制<sup>[33]</sup>。盐碱环境下土壤锰的有效性下降,影响植物对锰的吸收,因此,如何合理施加锰源提升作

物耐盐碱胁迫的能力是一个广受关注的问题。

#### 3.1 硫酸锰溶液浸种对玉米种子萌发的影响

发芽是植物生命周期中最关键的时期之一,盐碱胁迫引起植株体内低水势是抑制种子发芽的一个决定性因素<sup>[34]</sup>。本研究结果表明在 100 mmol/L 的  $\text{Na}^+$  和 pH 9.04 的混合盐碱胁迫下玉米种子的发芽率和活力指数等指标均显著降低,与前人研究结

果<sup>[35-37]</sup>类似。种子萌发后胚芽和胚根的生长程度是种子由萌发期向苗期转变的一个重要参考,直接关系到出苗后的生长发育及其对环境的耐受性<sup>[38-41]</sup>,同时植物根系也是受盐碱胁迫的主要部位<sup>[42-43]</sup>。本试验研究发现硫酸锰溶液浸种必须控制在一定浓度下,其中 5 mmol/L 的硫酸锰溶液浸种可以显著提高玉米种子发芽率,促进胚芽及胚根的生长;当浓度增加到 10 mmol/L 时,发芽率下降但是胚芽及胚根生长仍有改善;但当浸种浓度达到 20 mmol/L 后,玉米种子萌发及胚芽、胚根的生长均受到抑制。

### 3.2 硫酸锰溶液浸种对玉米种子抗氧化系统的影响

植物的抗氧化系统包括以超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等为代表的酶系统和以抗坏血酸-谷胱甘肽循环(AsA-GSH cycle)为主的非酶系统<sup>[44]</sup>。盐碱胁迫导致植物体内活性氧(ROS)的大量产生和自由基积累,引起膜脂过氧化,酶的失活等一系列问题,从而致使细胞损伤甚至死亡,直接影响到植株生长发育<sup>[45]</sup>。为适应盐碱逆境植物体抗氧化酶活性上升以清除过多 ROS,这与本试验结果相符。本研究结果显示 5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种处理,有效提高了玉米胚芽、胚根的 SOD、POD、CAT 等抗氧化酶活性,3 种酶相互协同作用,增强玉米胚芽、胚根自由基清除能力,整体提升抗超氧阴离子活性;但高浓度(20 mmol/L)的硫酸锰溶液浸种会显著抑制抗氧化酶的活性,对玉米胚芽、胚根造成二次胁迫,进而引起更大危害,这与前人研究结果一致<sup>[21]</sup>。

AsA-GSH 循环主要包括抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)等抗氧化物质以及抗坏血酸过氧化物酶(APX)和谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)、谷胱甘肽还原酶(GR)等抗氧化酶<sup>[46-47]</sup>。植物体可以通过 AsA-GSH 循环的快速反应减少植物体内活性氧自由基含量,保持 ROS 平衡,缓解植物体的受损状况<sup>[48]</sup>。本研究发现在受到盐碱胁迫后,玉米胚芽 AsA 和 GSH 等抗氧化物质含量及 APX 活性上升,GPX 与 GR 活性下降,说明植株对盐碱的氧化应激反应首先在玉米胚芽中发挥作用,通过产生抗氧化物质和提高抗氧化酶活性保护胚芽能够正常进行生长发育。硫酸锰溶液浸种处理后,玉米胚根 GSH 和 AsA 的含量相比对照呈现一个低浓度促进,高浓度抑制的现象,这表明适量的硫酸锰溶液浸种可以通

过提升关键抗氧化物质含量,促进受胁迫植物根部的 AsA-GSH 循环运转,清除体内多余的活性氧副产物,增强整个抗氧化系统的效率,保证胚芽、胚根生长。5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种处理还显著抑制了盐碱混合胁迫下玉米胚芽和胚根 MDA 的积累,使得细胞膜受损程度降低,这说明适宜浓度的硫酸锰溶液浸种可以调节植株活性氧代谢水平,减轻脂质过氧化作用,是促进盐碱胁迫下玉米生产的有效措施之一。

### 3.3 硫酸锰溶液浸种对玉米渗透调节能力的影响

渗透调节能力在植物适应盐、碱胁迫中起到十分重要的作用,植物体内可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸等被认为是植物体应对胁迫时主要的渗透调节物质<sup>[49-52]</sup>,主要起到调节细胞内的渗透势,维持植物体内水分运转,保证正常生长代谢的作用<sup>[53-56]</sup>。低 Na<sup>+</sup>浓度(50~150 mmol/L)条件下,盐胁迫比碱胁迫积累更多的可溶性蛋白质维持渗透平衡,而碱胁迫时植株比盐胁迫积累更多的可溶性糖进行渗透调节<sup>[49]</sup>。本研究结果表明,玉米在萌发期受到混合盐碱胁迫后,可溶性蛋白、可溶性糖、脯氨酸含量均升高,而在 5 mmol/L 硫酸锰溶液浸种时,胚芽、胚根体内的渗透调节物质含量均有所下降,说明适量浓度的硫酸锰溶液浸种处理后,玉米萌发种子抗性增强,胚芽、胚根所受胁迫降低。

## 4 结 论

混合盐碱胁迫会使玉米萌发期的各项生长指标受到明显抑制,降低玉米的发芽率和种子活力,而植株自身在应对混合盐碱胁迫时主要通过体内的抗氧化酶以及 AsA-GSH 循环进行调节因盐碱胁迫产生的大量活性氧物质,还会通过增加体内相容性物质的合成,增强渗透调节能力,维持玉米幼苗在应对盐碱胁迫时的正常生长代谢。通过本试验结果表明 5 mmol/L 的硫酸锰溶液浸种处理能显著提高盐碱胁迫下玉米胚芽、胚根的抗氧化系统运转效率,进一步增加抗氧化酶的活性以及抗氧化物质如 AsA 和 GSH 的含量,促进植物整体 AsA-GSH 循环的运转,减少胁迫造成的脂质过氧化作用,从而提高玉米的抗盐碱能力,有效促进植株的正常生长发育。

### 参考文献:

- [1] 周万海,师尚礼,寇江涛. 一氧化氮对 NaCl 胁迫下苜蓿种子萌

- 发的影响[J].核农学报,2012,26(4):710-716.
- [2] 李堆淑,朱广敏.外源水杨酸对桔梗幼苗铅胁迫的缓解效应[J].山西农业科学,2016,44(8):1165-1168.
- [3] 肖小君,黄作喜,陈文年,等.外源NO对铅胁迫下水果黄瓜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].华北农学报,2015,30(3):123-128.
- [4] 徐臣善.钙对盐胁迫下小金海棠幼苗生物量及抗氧化系统的影响[J].植物生理学报,2014,50(6):817-822.
- [5] JIANG X Y, SONG J, FAN H, et al. Regulations of exogenous calcium and spermidine on ion balance and polyamine levels in maize seedlings under NaCl stress[J]. Acta Phytobiologica Sinica, 2000, 26(6): 539-544.
- [6] ZHANG H, SHEN W B, XU L L. Effects of nitric oxide on the germination of wheat seeds and its reactive oxygen species metabolisms under osmotic stress[J]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(8): 901-905.
- [7] KHAN M N, SIDDIQUI M H, MOHAMMAD F, et al. Calcium chloride and gibberellic acid protect linseed (*Linum usitatissimum* L.) from NaCl stress by inducing antioxidative defence system and osmoprotectant accumulation[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2010, 32(1): 121-132.
- [8] AGAMI, RAMADAN A. Alleviating the adverse effects of NaCl stress in maize seedlings by pretreating seeds with salicylic acid and 24-epibrassinolide[J]. South African Journal of Botany, 2013, 88: 171-177.
- [9] MILLALEO R, REYES-DIAZ M, IVANOV A G, et al. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms[J]. Journal of Soil Science & Plant Nutrition, 2010, 10(4): 476-494.
- [10] 马威,郝茂钢,刘丽梅.锰浸种对大豆氮素代谢关键酶活性的影响[J].现代化农业,2014(2):16-18.
- [11] 刘鹏,徐根娣,倪建英,等.锰浸种对大豆种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].中国油料作物学报,2002(4):26-30.
- [12] 邹东原,韩振芹,张海娇,等.不同浓度硫酸锰溶液处理对玉米种子抗氧化酶活性的影响[J].现代农业科技,2021(7):11-12.
- [13] 刘建凤,崔彦宏,王荣焕.锰对玉米种子萌发及幼苗生理活性的影响[J].植物营养与肥料学报,2005(2):279-281.
- [14] 赵可夫,范海,王宝增,等.改良和利用盐渍化土壤的研究进展[J].园林科技信息,2004(1):32-35.
- [15] 胡娟,周道玮,王晓禹,等.不同覆沙厚度下松嫩平原盐碱裸地上的种植效果[J].草业科学,2021,38(3):410-418.
- [16] 马秀杰,王鸿斌,杨杨.本然土壤调理剂对盐碱土的改良效果试验[J].吉林农业,2019(8):46-47.
- [17] CHUAMNAKTHONG S, MAMPEI M, UEDA A. Characterization of Na<sup>+</sup> exclusion mechanism in rice under saline-alkaline stress conditions[J]. Plant Science, 2019, 287:110171.
- [18] SCHMIDT S B, JENSEN P E, HUSTED S. Manganese deficiency in plants: The impact on photosystem II[J]. Trends in Plant Science, 2016, 21(7): 622-632.
- [19] BRENNAN R F, BOLLAND M D A. Application of fertilizer manganese doubled yields of lentil grown on alkaline soils[J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26(6): 1263-1276.
- [20] 刘铮,朱其清,唐丽华,等.我国缺乏微量元素的土壤及其区域分布[J].山西农业科学,1983(1):44.
- [21] 张永升,杨国航,崔彦宏.硫酸锰浸种处理对玉米种子萌发的生理效应[J].河北农业大学学报,2011,34(4):5-9.
- [22] 石艳华,张永清,罗海婧.化学调节物质浸种对不同水分条件下苦荞生长及其生理特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(1):123-131.
- [23] 刘京萍,葛兴,李京霞,等.聚天冬氨酸锰(II)对于旱胁迫下菠菜抗氧化酶活性和MDA含量的影响[J].北京联合大学学报(自然科学版),2012,26(2):39-43,50.
- [24] 蔺吉祥,李晓宇,唐佳红,等.盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>代谢的影响[J].麦类作物学报,2011,31(6):1148-1152.
- [25] 赵颖,魏小红,赫亚龙,等.混合盐碱胁迫对藜麦种子萌发和幼苗抗氧化特性的影响[J].草业学报,2019,28(2):156-167.
- [26] 龙艳.浅谈玉米种子发芽试验的操作技术要领[J].种子科技,2020,38(5):24-27.
- [27] LI H X, XIAO Y, CAO L L, et al. Cerebroside C increases tolerance to chilling injury and alters lipid composition in wheat roots[J]. PLoS One, 2013, 8(9): e73380.
- [28] 高芳.谷胱甘肽对红松胚性愈伤组织增殖的氧化还原调控机理[D].哈尔滨:东北林业大学,2021.
- [29] 张智猛,宫清轩,李尚霞,等.花生品种不同籽仁部位抗氧化能力研究[J].花生学报,2007(2):6-10.
- [30] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [31] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2003.
- [32] 王爱国,邵从本,罗广华.丙二醛作为植物脂质过氧化指标的探讨[J].植物生理学通讯,1986(2):55-57.
- [33] 吕思琪,张迪,张婉婷,等.锰胁迫对不同基因型玉米幼苗氮素转化的影响[J].玉米科学,2020,28(2):84-89,95.
- [34] DEBEZ A, HAMED K B, GRIGNON C, et al. Salinity effects on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritima*[J]. Plant and Soil, 2004, 262(1): 179-189.
- [35] 戴凌燕,张立军,张成才.苏打盐碱胁迫对甜高粱种子萌发的影响及品种耐性综合评价[J].种子,2011,30(10):28-32.
- [36] 陈忠林,张学勇,张绵,等.碱胁迫对结缕草、高羊茅种子萌发及其胚生长的影响[J].种子,2010,29(12):27-30.
- [37] 时丽冉.混合盐碱胁迫对玉米种子萌发的影响[J].衡水学院学报,2007(1):13-15.
- [38] 邹成林,翟瑞宁,钦洁,等.不同浓度PEG模拟干旱胁迫对玉米种子萌发特性的影响[J].玉米科学,2021,29(6):68-75.
- [39] 王妮妮.混合盐碱胁迫对皂荚种子萌发的影响[J].东北林业大学学报,2017,45(4):14-18,27.
- [40] 陈金元,陈学林,满吉琳,等.混合盐碱胁迫对红砂种子萌发的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44

- (5):113-119.
- [41] 徐曼,王茜,王奕骁,等.不同盐胁迫对长穗偃麦草种子萌发及幼苗生长的影响[J].中国草地学报,2020,42(1):15-20.
- [42] 赵楠,芦艳,左进城,等.碱胁迫对碱蓬种子萌发的影响[J].北方园艺,2012(1):45-47.
- [43] GE Y, LI Y, ZHU Y M, et al. Global transcriptome profiling of wild soybean (*Glycine soja*) roots under  $\text{NaHCO}_3$  treatment[J]. BMC Plant Biology, 2010, 10: 153.
- [44] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiol Biochem, 2010, 48(12): 909-930.
- [45] 张小冰,邢勇,郭乐,等.腐植酸钾浸种对干旱胁迫下玉米幼苗保护酶活性及MDA含量的影响[J].中国农学通报,2011,27(7):69-72.
- [46] GILL S S, ANJUM N A, HASANUZZAMAN M, et al. Glutathione and glutathione reductase: A boon in disguise for plant abiotic stress defense operations[J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2013, 70(1): 204-212.
- [47] 刘赵月,李蕊彤,李晶,等.盐碱胁迫下京尼平苷对玉米种子萌发及根系AsA-GSH循环的影响[J].江苏农业学报,2020,36(4):842-850.
- [48] 孙军利,赵宝龙,郁松林. SA对高温胁迫下葡萄幼苗AsA-GSH循环的影响[J].核农学报,2015,29(4):799-804.
- [49] 刘建新,王金成,贾海燕.燕麦幼苗对盐胁迫和碱胁迫的生理响应差异[J].水土保持学报,2015,29(5):331-336.
- [50] 邓平,赵英,王霞,等.水杨酸对 $\text{NaHCO}_3$ 胁迫下桂西北喀斯特地区青冈栎种子萌发的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(4):114-122.
- [51] 陈亚辉,张文韬,宋志忠,等. NaCl胁迫下施加外源钾对多枝桉柳生理的影响[J].江苏农业科学,2021,49(15):142-146.
- [52] 付丽,刘加珍,陶宝先,等.盐生植物对盐渍土壤环境的适应机制研究综述[J].江苏农业科学,2021,49(15):32-39.
- [53] 单立山,李毅,石万里,等.土壤水分胁迫对红砂幼苗生长和渗透调节物质的影响[J].水土保持通报,2015,35(6):106-109.
- [54] 马崇坚,陈小娟,黎华寿.碱胁迫条件下皇竹草和玉米的适应性研究[J].广东农业科学,2018,45(1):57-63.
- [55] 王海珍,徐雅丽,张翠丽,等.干旱胁迫对胡杨和灰胡杨幼苗渗透调节物质及抗氧化酶活性的影响[J].干旱区资源与环境,2015,29(12):125-130.
- [56] 陈璐祺,温生娟,张军杰,等. EBR对盐胁迫下玉米幼苗生理指标及抗氧化酶和水孔蛋白基因表达量的影响[J].玉米科学,2022,30(1):100-107.

(责任编辑:石春林)