

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.02.010

魏倩倩, 孙文轩, 李腾升, 等. 山梨醇螯合钙对 NaCl 胁迫下油菜种子萌发的影响. 土壤, 2022, 54(2): 285–290.

## 山梨醇螯合钙对 NaCl 胁迫下油菜种子萌发的影响<sup>①</sup>

魏倩倩, 孙文轩, 李腾升, 张欢洋, 韩传浩, 曾凡鹤, 颜冬云\*

(青岛大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266071)

**摘要:** 本文通过控制钙源种类 (螯合态钙和游离态钙)、两种形态钙配比 (不同螯合率) 及螯合态钙浓度等 3 组试验探究山梨醇螯合钙对 NaCl 胁迫下油菜种子萌发的影响。结果表明: 当培养液中 NaCl 浓度为 150 或 170 mmol/L 时严重影响油菜种子的萌发和胚根生长, 添加两种形态钙后均能显著提高 NaCl 胁迫下种子活力和发芽率, 促进胚根的生长与伸长。NaCl 胁迫下 (浓度为 170 mmol/L), 添加不同螯合率的山梨醇螯合钙均可显著提高油菜种子的发芽势、发芽率, 其促进顺序表现为 70% > 40% > 10% > 100%, 其中当螯合态钙占比为 70% 时对促进种子萌发效果优于单一硝酸钙或全螯合态钙。NaCl 胁迫下 (浓度为 170 mmol/L), 添加不同浓度的螯合态钙均可降低盐害作用, Ca<sup>2+</sup> 浓度为 0.897 g/L 的山梨醇螯合钙处理种子发芽势最大; 发芽结束时, 添加 Ca<sup>2+</sup> 浓度为 0.577 g/L 的山梨醇螯合钙处理幼苗胚根最长, 当 Ca<sup>2+</sup> 浓度进一步提高会降低促进效果。综上, 盐胁迫条件下, 山梨醇螯合钙浸种能够降低盐害作用, 其中螯合态钙与游离态钙按 7:3 比例共存对盐胁迫下油菜种子萌发促进效果最好, 低浓度螯合态钙对盐胁迫下油菜种子萌发促进效果较好。

**关键词:** 山梨醇螯合钙; 盐胁迫; 油菜; 种子萌发

**中图分类号:** S314 ; S145.2      **文献标志码:** A

### Effect of Sorbitol Chelated Calcium on Seed Germination of Rapeseed Under NaCl Stress

WEI Qianqian, SUN Wenxuan, LI Tengsheng, ZHANG Huanyang, HAN Chuanhao, ZENG Fanhe, YAN Dongyun\*  
(College of Environmental Science and Technology, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract:** In this paper, the effects of sorbitol chelated calcium on rape seed germination under NaCl stress were studied by controlling calcium sources (chelated and free calcium), the mixture ratio of two forms of calcium (different chelation rates) and the concentration of chelated calcium. The results showed that when the concentration of NaCl in the culture medium was 150 or 170 mmol/L, it seriously affected the germination and radicle growth of rape seeds. The addition of two forms of calcium significantly improved seed vigor and germination rate under NaCl stress, promoted the growth and elongation of radicle. Under NaCl concentration of 170 mmol/L, the addition of sorbitol chelated calcium with different chelation rates significantly increased the germination potential and germination rate of rape seeds, and the promotion order was 70% > 40% > 10% > 100%. When the proportion of chelated calcium was 70%, the effect of promoting seed germination was better than single calcium nitrate or entire chelated calcium. Under NaCl concentration of 170 mmol/L, the addition of different concentrations of chelated calcium reduced salt damage, and seed germination potential of sorbitol chelated calcium was the largest with Ca<sup>2+</sup> concentration of 0.897 g/L; at the end of germination, the radicle length of seedlings treated with sorbitol chelated calcium was the longest with Ca<sup>2+</sup> concentration of 0.577 g/L. When Ca<sup>2+</sup> concentration was further increased, the promotion effect would be reduced. In conclusion, soaking seeds with sorbitol chelated calcium under salt stress can reduce salt damage. The coexistence of chelated and free calcium in the ratio of 7:3 has the best effect on promoting rape seed germination under salt stress, and low concentration of chelated calcium has a better effect on promoting rape seed germination under salt stress.

**Key words:** Sorbitol chelated calcium; Salt stress; Rape; Seed germination

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31972516)和山东省重点研发项目(2017GNC11116)资助。

\* 通讯作者(yandongyun666@hotmail.com)

作者简介: 魏倩倩(1997—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态与肥料应用研究。E-mail: weiqian\_1103@163.com

盐胁迫能够抑制植物种子的萌发<sup>[1]</sup>,还会改变植株的生理代谢过程,引起植株体内相关酶活性及激素含量改变,最终阻碍作物正常生长发育<sup>[2-3]</sup>,已成为制约世界各地农业经济发展的重要环境问题<sup>[4]</sup>,而外源物质的调控作用是提高植物耐盐性和盐渍土利用率的一项重要手段。钙素作为植株体内许多生理生化反应的调控者,外源施钙能够增强植物的耐盐性<sup>[5-7]</sup>,且不同钙源种类对植物的影响存在差异<sup>[8]</sup>。种子立苗阶段对盐胁迫最为敏感,因此通过外源物质的调控提高种子萌发耐盐性具有重要意义<sup>[9]</sup>。目前,部分学者也对枸杞<sup>[10]</sup>、生菜<sup>[11]</sup>等作物种子萌发的耐盐性进行了研究,结果表明适宜浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  能够提高盐胁迫下植物种子的发芽率。但以往研究采用的供试肥料均为无机盐钙,当钙形态改变后以糖醇螯合形态存在时对种子萌发耐盐性的作用效果是否发生变化值得探讨。

与无机钙相比,作为能够同时补充钙素和碳源的山梨醇螯合钙,其在提高产量和品质方面已在多种作物中如马铃薯<sup>[12]</sup>、花生<sup>[13]</sup>等得以验证,加之山梨醇本身具有提高植物抗逆性、提高功能菌作用发挥等的作用<sup>[14-15]</sup>,为糖醇螯合钙提高作物耐盐性,促进种子萌发等提供了依据。目前关于山梨醇螯合钙的研究比较模糊,存在螯合态与非螯合态并存,两者之间无法定量等问题。因此,本研究选择自主研发的山梨醇螯合钙,以分离纯化后的全螯合态钙与两种形态(螯合态钙和游离态钙)按一定比例混合态钙(不同螯合率)

为研究对象,通过油菜水培试验,探究盐胁迫下不同钙源种类、两种形态钙不同配比以及螯合态钙浓度等对油菜种子萌发的影响,为探明山梨醇螯合钙提高作物耐盐性的作用机制提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

山梨醇螯合钙为本实验室自行制备(山梨醇、四水硝酸钙( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )依次溶于水中,在  $65^\circ\text{C}$ 、35 min 的实验条件下制得),其合成、分离提纯及螯合率测定过程均参照发明专利<sup>[16-17]</sup>提供的方法进行。试验所用试剂均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。供试油菜品种:金宇盛辉。

### 1.2 试验设计

$\text{NaCl}$  胁迫下外源钙对种子萌发试验流程如图 1 所示,挑选饱满一致的油菜种子(*Brassica napus* L.),用 75% 乙醇进行浸泡消毒 2 min 后,用蒸馏水反复冲洗。在培养皿中放入滤纸并加入 15 ml 的处理液,将装有处理液与种子的培养皿置于室温自然环境下进行培养,为维持处理液的相应浓度,每天补充蒸馏水(称重法),每个处理均设 3 个平行。研究显示<sup>[18-21]</sup>,当模拟盐分浓度超过 135 mmol/L 时会对油菜种子的萌发和幼苗的生长造成影响,当盐分浓度大于 300 mmol/L 时,油菜幼苗生长异常。因此,本研究设置 150 和 170 mmol/L  $\text{NaCl}$  两种浓度水平,分别从

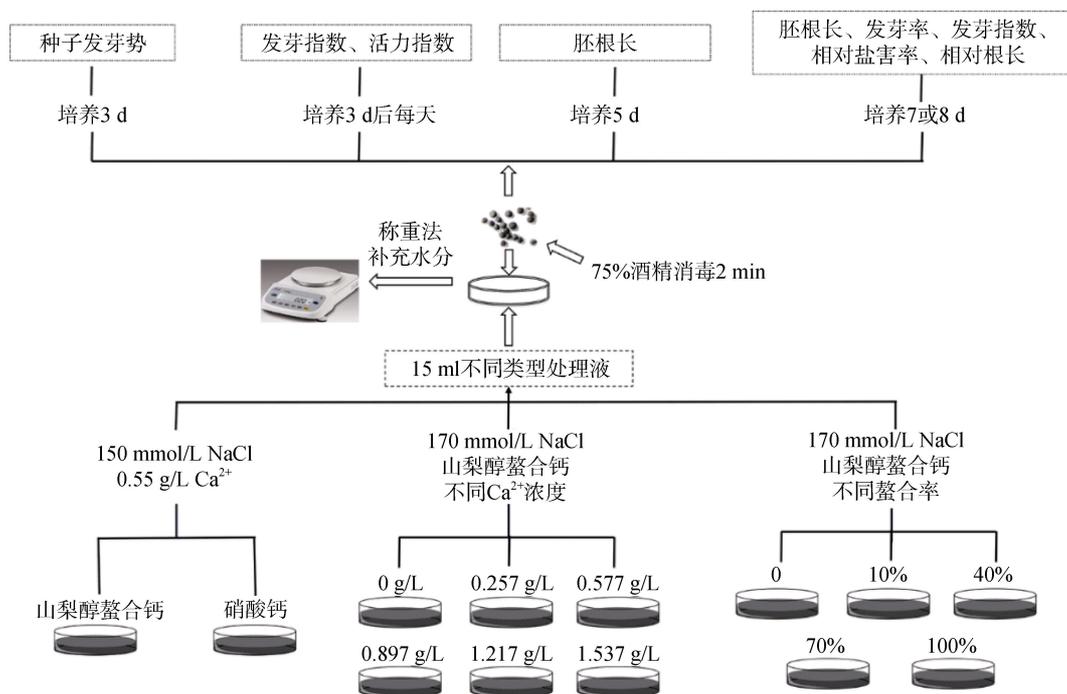


图 1 外源钙对  $\text{NaCl}$  胁迫下种子萌发影响的试验流程

Fig. 1 Experimental process of effect of exogenous calcium on rape seed germination under  $\text{NaCl}$  stress

不同钙源种类、螯合率及螯合钙浓度等方面探究盐胁迫下外源钙对油菜种子萌发的影响。具体试验处理分别为:

1) 试验 I. 不同类型钙源的影响。盐胁迫浓度设置为 150 mmol/L NaCl, 施钙处理的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0.55 g/L。试验设置 4 种处理液, 分别为: ①NaCl 胁迫下添加山梨醇螯合钙(100% 螯合态  $\text{Ca}^{2+}$ ), 记作 SC; ②NaCl 胁迫下添加硝酸钙( $\text{NO}_3^-$  浓度为 0.57 g/L), 记作 SN; ③单施 NaCl 胁迫处理, 记作 ST; ④蒸馏水对照, 记作 CK。每个平行 50 粒种子。

2) 试验 II. 两种形态钙不同配比(不同螯合率)的影响。盐胁迫浓度设置为 170 mmol/L NaCl, 山梨醇螯合钙保持钙浓度不变(以  $\text{Ca}^{2+}$  计, 浓度为 0.55 g/L), 设置 4 种螯合率, 试验共设置 6 种处理液, 在 NaCl 浓度为 170 mmol/L 的条件下, 分别添加螯合率为 0(硝酸钙)、10%、40%、70%、100% 的山梨醇螯合钙, 以及不添加钙的蒸馏水(CK)和单施 NaCl 胁迫处理(ST), 每个平行 30 粒种子。

3) 试验 III. 不同浓度的山梨醇螯合钙(螯合率为 100%)的影响。盐胁迫浓度设置为 170 mmol/L NaCl, 山梨醇螯合钙设置 6 个浓度梯度, 以  $\text{Ca}^{2+}$  浓度计, 试验共设置 7 种处理液, 在 NaCl 浓度为 170 mmol/L 的条件下分别添加  $\text{Ca}^{2+}$  浓度为 0(ST)、0.257、0.577、0.897、1.217、1.537 g/L, 以及不添加钙的蒸馏水(CK), 每个平行 30 粒种子。

### 1.3 测定指标

试验 I 于培养 7 d 后记录种子的发芽数和根长。试验 II、III 于培养 3 d 后开始每隔 1 d 记录种子的发芽数, 培养 5 d 和 8 d 后测定胚根长。

发芽率(GP, %)=每组发芽数/每组种子总数 $\times$ 100

发芽势(Ge, %)=培养 3 d 的发芽总数/每组种子总数 $\times$ 100

发芽指数(GI)= $\sum$ (在  $n$  天的发芽数/种子发芽的天数)

相对盐害率(%)=(对照组发芽率-胁迫组种子发芽率) $\times$ 100/对照组种子发芽率

相对根长(%)=胁迫组胚根长/对照组胚根长 $\times$ 100

活力指数(VI)=种子发芽指数(GI) $\times$ 种子生长势(种子胚根长度)

平均发芽天数(MLIT)=( $G_1 \times t_1 + G_2 \times t_2 + \dots + G_n \times t_n$ ) / ( $G_1 + G_2 + \dots + G_n$ ) (其中,  $G_n$  为逐日发芽数,  $t_n$  为  $G$  相对应的天数)

### 1.4 数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010、SPSS 19.0

进行统计分析。散点图、柱形图的绘制采用 Origin 9.0 进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同钙源种类对油菜种子萌发和胚根长的影响

NaCl 胁迫下影响油菜种子的萌发, 表现在发芽率、发芽指数、胚根长和活力指数与 CK(清水对照)处理相比分别降低 19.5%、19.6%、76.4% 和 80.7%, 差异显著, 具体结果参见表 1。类似的抑制效果在其他许多植物种子的盐胁迫研究中也得以证实, 例如芦苇<sup>[22]</sup>、沙棘<sup>[23]</sup>、盐肤木<sup>[24]</sup>等。

表 1 不同钙源种类对 NaCl 胁迫下油菜种子发芽指标的影响

Table 1 Effects of different sources of exogenous calcium fertilizers on rape seed germination index under NaCl stress

处理	发芽率 (%)	发芽指数	相对盐害 (%)	胚根 (cm)	相对根长 (%)	活力指数
ST	66.0 b	4.71 b	19.5 a	1.16 c	23.7 c	5.57 c
SN	77.3 a	5.52 a	5.69 b	2.44 b	50.2 b	13.6 b
SC	76.7 a	5.48 a	6.50 b	2.31 b	47.6 b	12.8 b
CK	82.0 a	5.86 a	0 c	4.91 a	100.0 a	28.9 a

注: 表中同列小写字母不同表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 下同。

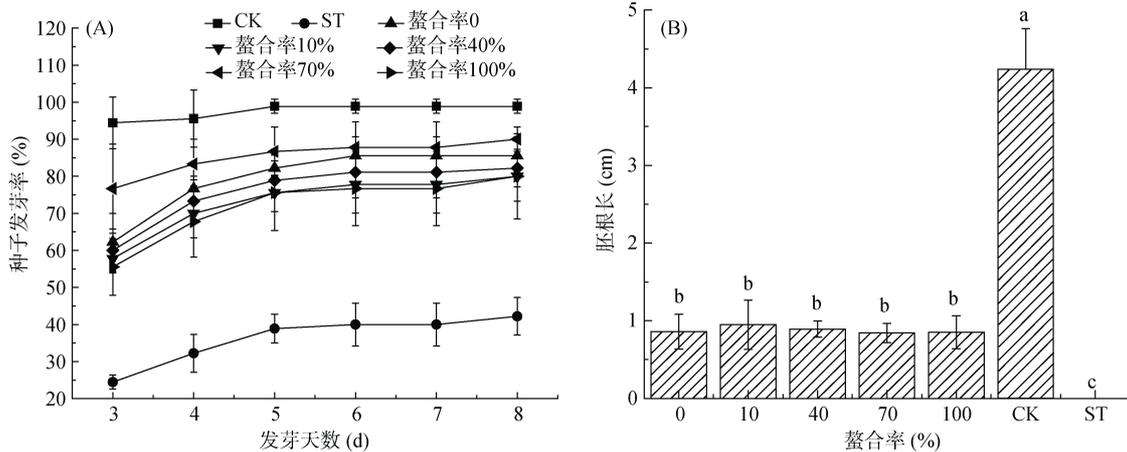
NaCl 胁迫下, 钙对种子的盐害具有缓解效应, 与 ST 处理(NaCl 胁迫)相比, SN(硝酸钙)和 SC(山梨醇螯合钙)处理对种子的相对盐害率分别降低 70.8% 和 66.7%, 促进种子的发芽率分别提高 17.1% 和 16.2%, 此外, SN 和 SC 处理的油菜种子的其他发芽指标也显著提高。综上所述, NaCl 胁迫会严重阻碍油菜种子的萌发, 而  $\text{Ca}^{2+}$  能够提高 NaCl 胁迫下种子的活力和发芽率, 但不同的钙源处理之间没有显著性的差异, 原因推测为完全螯合态钙在促进种子萌发影响方面效果不及螯合态钙与游离态钙混合液, 而螯合态钙与游离态钙混合液促进油菜种子萌发的最佳配比(螯合率)未知。因此, 两种形态钙的组合方式值得探究。

### 2.2 不同螯合率的山梨醇螯合钙对油菜种子萌发和胚根长的影响

目前, 关于不同类型的钙源对 NaCl 胁迫下种子萌发影响的研究主要关注的是阴离子的不同, 如  $\text{CaCl}_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  等<sup>[25]</sup>, 却鲜有不同钙形态的研究, 亦没有发现不同钙形态共存的研究, 因此为了阐释钙的形态对植株生长的影响, 试验设置了游离态  $\text{Ca}^{2+}$ 、螯合态  $\text{Ca}^{2+}$ 、两种形态  $\text{Ca}^{2+}$  共存对油菜种子萌发影响的差异。如图 2A 和表 2 所示, 不同螯合

率的山梨醇螯合钙的施用均可显著提高油菜种子的发芽势和发芽率,螯合率对种子发芽的促进顺序表现为 70%>0>40%>10%>100%,其中添加螯合率为 70%(即螯合态钙与游离态钙按 7:3 比例共存)的山梨醇螯合钙处理的种子发芽势和发芽结束时发芽率最大,与 NaCl 处理相比分别增加 213% 和 113%,同时种子的发芽指数和活力指数最大,平均发芽时间最长,相对盐害率最低,与 NaCl 处理相比降低了 84.3%。而螯合率为 0(硝酸钙)的山梨醇螯合钙处理的种子发芽势和最终发芽率则相对较低,与 NaCl 处理相比分别增加 155% 和 103%。螯合率为 100% 的山梨醇螯合钙处理的种子发芽势和最终发芽率相对最低,与

NaCl 处理相比分别增加 127% 和 89.5%,其他发芽指标同为最低。结合 2.1 节结果说明两种形态钙共存相比较完全螯合态钙和单一硝酸钙更能促进油菜种子萌发。此外,NaCl 胁迫下不同螯合率的山梨醇螯合钙促进了幼苗胚根的生长,各处理之间无显著性差异,但相比较而言,螯合率为 10% 的山梨醇螯合钙处理的胚根长更长,相对根长更大,比螯合率为 100% 的山梨醇螯合钙处理提高 11.8% 和 9.09%,而螯合率为 40% 的处理次之(图 2B 和表 2)。结果说明,螯合率与油菜种子发芽率、胚根长之间不存在线性关系,种子的发芽率并不随螯合率的增加而增加,相反,螯合率为 0 的处理发芽率甚至高于螯合率为 100% 的处理。



(图中小写字母不同表示处理间差异显著( $P < 0.05$ ),下同)

图 2 NaCl 胁迫下不同螯合率山梨醇螯合钙对种子萌发(A)和胚根长(B)的影响

Fig. 2 Effects of sorbitol chelated calcium of different chelating rates on rape seed germination (A) and radicle length (B) under NaCl stress

表 2 NaCl 胁迫下不同螯合率山梨醇螯合钙对油菜种子发芽指标的影响

处理	螯合率 (%)	发芽指数	平均发芽时间(d)	相对盐害率 (%)	活力指数	相对根长 (%)
CK	-	9.73 a	2.91 a	0 d	41.20 a	100.00 a
ST	-	3.57 d	2.17 c	57.4 a	0 c	0 c
SN	0	7.81 bc	2.46 bc	15.8 bc	6.72 b	20.47 b
SC	10	7.22 c	2.46 bc	19.2 b	6.75 b	22.08 b
	40	7.49 bc	2.46 bc	16.9 bc	6.68 b	21.21 b
	70	8.51 b	2.70 ab	9.0 cd	7.12 b	20.18 b
	100	7.12 c	2.39 bc	19.2 b	5.98 b	20.24 b

注:“-”表示未螯合,下同。

### 2.3 不同浓度的山梨醇螯合钙对油菜种子萌发和胚根长的影响

如图 3A 所示,发芽 3 d 时,CK 处理的油菜种子发芽势 94.4%,而单加 NaCl 处理的油菜种子发芽势仅 24.4%。同时可以看出,所有处理的种子在 3 ~

5 d 内发芽率增长快,而 5 d 后,发芽率缓慢上升或基本不变。在 NaCl 胁迫(170 mmol/L)下,所有添加  $\text{Ca}^{2+}$  的处理均可促进种子萌发,随着  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的增加种子发芽势表现为低浓度  $\text{Ca}^{2+}$  处理发芽效果优于高浓度  $\text{Ca}^{2+}$  处理,其中 0.897 g/L  $\text{Ca}^{2+}$  处理的种子发芽势最大,与单加 NaCl 处理相比增加 90.9%。发芽结束时,钙的添加能够明显提高种子的发芽率,可达 75% 以上;其中 0.257、0.577 和 0.897 g/L  $\text{Ca}^{2+}$  处理相对更高,达 80% 以上;而过高的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度下种子的发芽率降低,但仍大于单加 NaCl 胁迫。此外,研究表明,10 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  浸种后对 170 mmol/L NaCl 胁迫下提高生菜种子发芽率的效果最好<sup>[11]</sup>;在 85 mmol/L NaCl 胁迫下添加 25 和 20 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  海滨锦葵种子的发芽率更高<sup>[26]</sup>;而在 170 mmol/L NaCl 胁迫下添加 50 和 75 mmol/L  $\text{CaCl}_2$  处理的两种耐盐小麦品种发芽率最高<sup>[27]</sup>;由此可以看出,不同的盐胁迫浓度、不同作物,甚至相同作物的不同品种对提高种子发芽率的最适  $\text{Ca}^{2+}$  浓度均存在差异性。

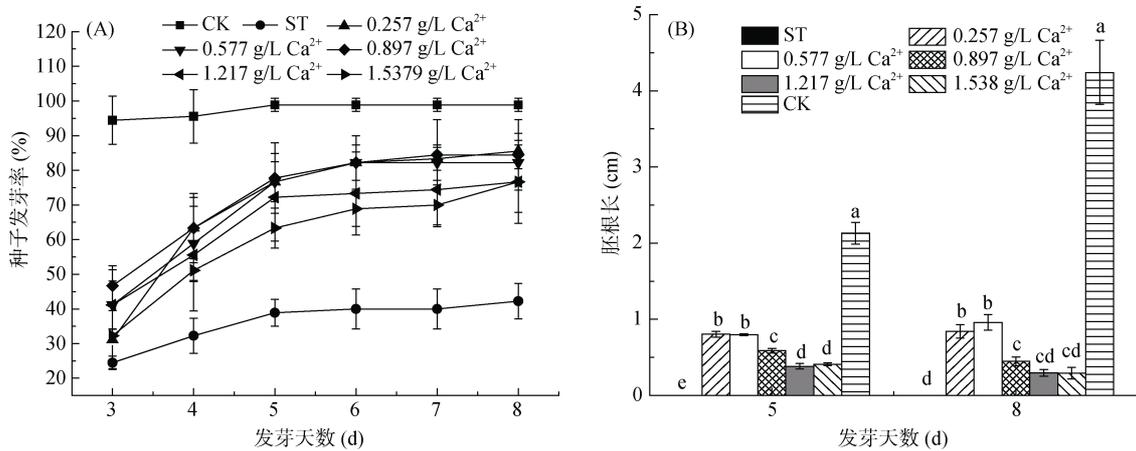


图 3 NaCl 胁迫下不同 Ca<sup>2+</sup> 浓度山梨醇螯合钙对种子萌发(A)和胚根长(B)的影响

Fig. 3 Effects of sorbitol chelated calcium of different Ca<sup>2+</sup> concentrations on rape seed germination (A) and radicle length (B) under NaCl stress

如图 3B 显示，单加 NaCl 胁迫下油菜萌发后的胚根长为 0，说明 NaCl 胁迫显著抑制了油菜幼苗的生长。NaCl 胁迫下，适宜浓度 Ca<sup>2+</sup> 的添加显著改善了幼苗的生长环境，促进了胚根的生长。发芽期结束时，0.577 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理的胚根长最长，而 1.538 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理最短，两者相差 69.4%。此外，如表 3 所示，NaCl 胁迫下，0.897 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理下的种子发芽指数最大，其次是 0.577 g/L，相比 0 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理(ST)分别提高 98.9% 和 90.20%；0.257 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理相对盐害率最低，与 ST 处理相比降低 76.48%；0.577 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理下的相对胚根最长，而在 NaCl 胁迫下所有施钙处理中种子发芽状况最差的是 1.538 g/L Ca<sup>2+</sup> 处理，且显著低于其他施钙处理。因此，结果表明：低浓度 Ca<sup>2+</sup> 在提高油菜种子活力、促进种子萌发和幼苗生长方面的效果优于高浓度 Ca<sup>2+</sup> 处理。

### 3 讨论

种子萌发和幼苗早期是公认的对盐胁迫最敏感的植物生长阶段，本试验条件下，盐胁迫在很大程度上抑制种子萌发，大多数研究认为，盐胁迫抑制种子萌发的主要原因是渗透胁迫效应和 Na<sup>+</sup> 毒害效应。高

盐分浓度的种子萌发环境引起种子吸水困难，导致种子萌发最重要的条件丧失，而高浓度的 Na<sup>+</sup> 会降低种子水解酶的活性，抑制淀粉和蛋白质向可溶性物质的转化，导致胚轴营养物质不足，进而影响胚生长<sup>[24]</sup>。许多研究表明，通过添加一定的外源物质缓解盐胁迫对种子萌发的抑制作用对提高盐渍化土壤上植物的品质和产量具有一定的意义，有研究表明添加低浓度的 Ca<sup>2+</sup> 对盐胁迫下白菜种子萌发缓解作用较大<sup>[28]</sup>，也有研究发现添加低浓度的 CaCl<sub>2</sub> 对盐胁迫下生菜种子发芽势和发芽率等具有明显的缓解作用<sup>[11]</sup>。本研究表明，盐胁迫下添加不同形态的外源钙均可一定程度地缓解盐胁迫对油菜种子萌发的抑制作用，这可能是因为 Ca<sup>2+</sup> 能够增强种子 α-淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶的活性<sup>[25-28]</sup>，促进淀粉、蛋白质的转化，提高种子中可溶性糖、氨基酸的含量，此外还能促进 K<sup>+</sup> 的积累<sup>[29]</sup>。但完全螯合态的山梨醇螯合钙与硝酸钙的促进作用无显著差异，推测不同螯合率山梨醇螯合钙对油菜种子萌发促进作用不同，后续试验则证实螯合率为 70% 的山梨醇螯合钙与硝酸钙相比对种子萌发促进效果更好，因此推断螯合态钙与无机钙共同作用的效果优于螯合钙或无机钙单施，推测原因为植物成熟

表 3 NaCl 胁迫下不同 Ca<sup>2+</sup> 浓度山梨醇螯合钙对油菜种子发芽指标的影响

Table 3 Effects of sorbitol chelated calcium of different Ca<sup>2+</sup> concentrations on rape seed germination index under NaCl stress

处理	Ca <sup>2+</sup> 浓度(g/L)	发芽指数	平均发芽时间(d)	相对盐害率(%)	活力指数	相对根长(%)	
						5 d	8 d
CK	—	9.73 a	2.91 a	0 c	41.20 a	100.0 a	100.0 a
ST	0	3.57 d	2.17 b	57.4 a	0 e	0 e	0 f
SC	0.257	6.74 bc	1.74 c	13.5 b	5.67 bc	37.8 b	19.8 c
	0.577	6.79 bc	2.01 bc	16.9 b	6.54 b	37.5 b	22.7 b
	0.897	7.10 b	2.12 b	14.7 b	3.20 cd	27.6 c	10.5 d
	1.217	6.38 bc	2.07 bc	22.5 b	1.89 de	18.1 d	7.0 e
	1.538	5.95 c	1.86 bc	22.6 b	1.74 de	19.3 d	6.8 e

种子内有多种形态钙,因此需要多种形态外源钙的共同补充作用,才能更好地促进种子萌发。另外,本研究同时表明低浓度  $\text{Ca}^{2+}$  提高盐胁迫下油菜种子发芽率和胚根长的效果优于高浓度  $\text{Ca}^{2+}$ , 可能是因为高浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  在促进种子萌发的同时也带来了一定的毒害作用,适宜浓度的外源  $\text{Ca}^{2+}$  浸种可促进种子内源游离  $\text{Ca}^{2+}$  含量的增加而种子胞内游离  $\text{Ca}^{2+}$  通过与钙素结合调节或直接调节细胞内有关酶活性和细胞功能使种子在一定程度上减缓逆境伤害<sup>[30]</sup>, 并促进了胚中营养物质的积累,提高种子的萌发和活力,高浓度  $\text{Ca}^{2+}$  对植物种子萌发促进效果降低的作用机理有待进一步研究。

#### 4 结论

1)盐胁迫显著降低了油菜种子的发芽率、发芽指数、胚根长及活力指数,抑制种子的正常萌发,添加两种类型钙源后均能显著提高 NaCl 胁迫下种子活力和发芽率,促进胚根的生长与伸长,表明钙肥浸种能够在一定程度上缓解盐胁迫对油菜种子萌发的抑制作用。

2)山梨醇螯合钙的螯合率与提高油菜种子耐盐性之间无相关关系,不同螯合率对种子萌发的促进顺序表现为  $70\% > 40\% > 10\% > 100\%$ , 表明螯合态钙与游离态钙以 7:3 的比例共存对提高油菜种子耐盐性方面优于单一硝酸钙和完全螯合态钙。

3)NaCl 胁迫下(浓度为 170 mmol/L),不同浓度山梨醇螯合钙均可显著提高油菜种子的发芽指数、活力指数及相对根长,降低相对盐害率,但随  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的升高,作用效果表现为低浓度钙作用效果优于高浓度钙处理。

#### 参考文献:

[1] 张利霞,常青山,侯小改,等.不同钠盐胁迫对夏枯草种子萌发特性的影响[J].草业学报,2015(3):177-186.  
 [2] 胡涛,张鸽香,郑福超,等.植物盐胁迫响应的研究进展[J].分子植物育种,2018,16(9):3006-3015.  
 [3] 郭新送,苏秀荣,范仲卿,等.盐分胁迫下控释尿素配施腐植酸对棉花幼苗生长和抗氧化系统的影响[J].土壤,2021,53(1):112-117.  
 [4] Qadir M, Quill rou E, Nangia V, et al. Economics of salt-induced land degradation and restoration[J]. Natural Resources Forum, 2014, 38(4): 282-295.  
 [5] Tuna A L, Kaya C, Ashraf M, et al. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 173-178.  
 [6] D'Onofrio C, Lindberg S. Sodium induces simultaneous changes in cytosolic calcium and pH in salt-tolerant quince protoplasts[J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(16): 1755-1763.

[7] Akladios S A, Mohamed H I. Ameliorative effects of calcium nitrate and humic acid on the growth, yield component and biochemical attribute of pepper (*Capsicum annuum*) plants grown under salt stress[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 236: 244-250.  
 [8] 蒋晶.盐胁迫对巴西蕉幼苗生长和生理影响及其钙的缓解效应研究[D].海南大学,2011.  
 [9] 陈军,关欣,范翠枝,等.盐胁迫对番茄种子萌发中多胺形态变化和抗氧化的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1598-1609.  
 [10] 韩多红,李善家,王恩军,等.外源钙对盐胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].中国中药杂志,2014,39(1):34-39.  
 [11] 王晓理.外源钙对盐胁迫下生菜种子萌发的影响[J].安徽农业科学,2010,38(31):17408-17409,17422.  
 [12] 李飞.糖醇螯合钙对马铃薯产量、品质及钙素迁移利用的影响[D].青岛:青岛大学,2019.  
 [13] 李玉鹏.山梨醇螯合钙对花生、马铃薯产量及品质效应的影响[D].青岛:青岛大学,2020.  
 [14] 李腾升,魏倩倩,黄明丽,等.糖醇螯合钙在农业上的应用研究进展[J].土壤学报,2021,58(6):1393-1403.  
 [15] 方丹,朱明珠,魏梦玉,等.含山梨醇的新型生物有机肥促生效应与机理研究[J].土壤学报,2022. DOI: 10.11766/trxb202012040672.  
 [16] 颜冬云,白利勇,孙文轩,等.基于电导率法测定糖醇螯合钙肥螯合率的方法[P].CN109142450B.2019-01-04.  
 [17] 颜冬云,孙文轩,白利勇,等.采用分光光度法测定糖醇螯合钙肥螯合率的方法[P].CN109100312B.2019-10-11.  
 [18] 丛丽丽,张蕴薇,陈新,等.盐胁迫对藜草种子萌发与幼苗生理生化的影响[J].草业科学,2011,28(12):2136-2142.  
 [19] 周璐璐,伏兵哲,许冬梅,等.盐胁迫对沙芦草萌发特性影响及耐盐性评价[J].草业科学,2015,32(8):1252-1259.  
 [20] 胡生荣,高永,武飞,等.盐胁迫对两种无芒雀麦种子萌发的影响[J].植物生态学报,2007,31(3):513-520.  
 [21] 王静.盐分胁迫对油菜种子萌发及幼苗生长的影响[J].天津农业科学,2019,25(11):17-21.  
 [22] 李永涛,陈苗苗,王振猛,等.NaCl胁迫下外源钙对芦苇种子萌发的影响[J].华北农学报,2016(s1):270-275.  
 [23] 姜兆博.外源钙对盐胁迫下沙棘种子萌发的影响[J].浙江农业科学,2015,56(2):239-240.  
 [24] 王占军,王静,焦小雨,等.盐胁迫及外源钙处理对盐肤木种子萌发的影响[J].基因组学与应用生物学,2016,35(3):706-714.  
 [25] 冯文新,张宝红.钙处理对盐胁迫下大豆种子萌发及其生理生化指标的影响[J].大豆科学,1997(1):49-54.  
 [26] 尹增芳,何祯祥,陈梦阳,等.外源钙对 NaCl 胁迫下海滨锦葵种子萌发和幼苗生长的缓解效应[J].西北植物学报,2006,26(3):462-466.  
 [27] 刘丽云,侯传本,王明友,等.外源钙离子对盐胁迫下小麦萌发的影响[J].山东农业科学,2007(5):60-62.  
 [28] 许斌,牛娜,赵文瑜,等.天然型藜麦品种抗盐碱生理特性比较研究[J].土壤,2020,52(1):81-89.  
 [29] 李文杨.外源钙对盐胁迫下白菜种子萌发的影响[J].南方园艺,2018,29(1):9-12.  
 [30] 陈士林,赵新亮,卫秀英,等.钙和赤霉素对玉米种子活力的影响[J].中国农学通报,2003,19(4):64-67.