

硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响

吴召林¹, 祁娟¹, 刘文辉², 金鑫¹, 杨航¹, 宿敬龙¹, 李明¹

(1. 甘肃农业大学 草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 青海省畜牧兽医科学院/青海省青藏高原优良牧草种质资源利用重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要:以采自高寒草甸的野生垂穗披碱草(*Elymus nutans*)种子为材料,采用培养皿发芽法研究了不同浓度 NaCl(0、40、60、80 mmol/L)胁迫下,添加不同浓度硅元素(0、1.5、2.0、2.5 mmol/L)对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明:单独 NaCl 胁迫明显抑制垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长,而添加硅元素可显著缓解 NaCl 胁迫对种子萌发和幼苗生长的抑制作用,其中 NaCl 浓度为 40 和 60 mmol/L 时,随添加 Si 浓度升高种子发芽率呈逐渐升高趋势,Si 浓度为 2.5 mmol/L 时发芽率均达最高,较单一 NaCl 胁迫分别提高了 17.68%和 6.49%,Si 浓度为 2.0 mmol/L 时两种 NaCl 浓度下幼苗株高达最高,分别较单一 NaCl 胁迫增长了 26.55%和 18.47%。NaCl 胁迫下垂穗披碱草脯氨酸含量高于清水对照,添加 Si 时脯氨酸含量均显著降低,说明硅添加可以有效缓解 NaCl 胁迫对垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的抑制作用,但这种缓解作用随胁迫程度和 Si 添加浓度而异。

关键词:硅添加;垂穗披碱草;种子萌发;NaCl 胁迫

中图分类号:S543 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2021)01-0026-08

DOI: 10.13817/j.cnki.cyyep.2021.01.004

近年来,日益加重的土壤沙化和盐渍化问题对世界范围内的植物生长造成了巨大的影响,全球盐渍化土地面积约 10 亿 hm^2 ,而中国盐渍化土地面积占比高达 10%^[1]。盐胁迫导致植物种子萌发率下降,生长发育缓慢等一系列问题,严重时会导致天然草地大面积退化。因此,盐渍化已经成为限制我国农牧业发展的重要因素^[3]。垂穗披碱草(*Elymus nutans*)作为一种优质多年生禾本科牧草,具有丰富的营养价值和较高的经济利用价值,同时也是高寒草甸的优势种之一^[4]。由于该牧草具有较强的种子繁殖能力及能充分利用临

时生境的特性,已成为高寒地区草地恢复、生态治理以及人工草地建植的首选草种^[5]。

目前,大多数垂穗披碱草的研究工作局限于逆境胁迫对其种子萌发及幼苗生理生化的影响等方面,而 Si 添加对逆境胁迫条件下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响鲜见报道。硅作为一种环境友好型元素,在一定程度上能够有效缓解逆境胁迫对植物生长和发育的抑制作用^[7-9]。研究发现,外源硅能促进 NaCl 胁迫下种子吸水和 α -淀粉酶活性来促进种子萌发,通过提高 NaCl 胁迫下幼苗叶绿素含量,维持较高的光合能力促进幼苗生长,进而缓解盐胁迫对种子和幼苗的伤害^[10]。余群等^[11]在硅对草地早熟禾种子萌发及幼苗生长影响研究中发现,硅可以在一定程度上促进草地早熟禾胚根生长,提高根系总长、根系总表面积及根系平均直径等,从而提高植物根系对土壤水分及养分的吸收能力。

尽管上述诸多研究表明 Si 添加可以有效缓解逆

收稿日期:2020-03-30; **修回日期:**2020-04-28

基金项目:国家自然科学基金(31660684);青海省科技厅重点实验室发展专项(2020-ZJ-Y03);国家牧草产业技术体系(CARS-34)

作者简介:吴召林(1995-),男,甘肃永靖人,在读硕士。

E-mail:wuzhaolin1995@163.com

祁娟为通讯作者。E-mail:qijuan@gsau.edu.cn

境胁迫对植物造成的伤害,促进其生长发育,但此作用因物种、胁迫程度及 Si 添加水平而异^[12-13]。鉴于此,本研究以垂穗披碱草为试验材料,研究不同水平 Si 添加对盐胁迫下垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的影响,同时也为垂穗披碱草在盐渍化土壤改良及环境治理中的运用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试材料为天然草地野生垂穗披碱草种子。种质采集地为天祝藏族自治县抓喜秀龙乡代乾村,海拔 3 300 m,年均温-0.1℃,≥0℃的年积温为 1 380℃,水热同期,全年无绝对无霜期。采集的种子在室温下晾干后保存于 4℃冰箱中。

1.2 试验方法

挑选大小均一且无霉变的种子,用 20% 的双氧水溶液消毒 15 min,然后用去离子水反复冲洗,将残余过氧化氢冲洗干净,最后用滤纸将种子表面水分吸干备用。

分别取 50 粒消毒处理的种子均匀放置于铺有双层滤纸的培养皿内,按照表 1 向各皿中添加相应浓度配比的盐溶液。为平衡由 K₂SiO₃添加导致的 K⁺浓度差异,加入相应量的 K₂SO₄以保持各处理间离子浓度一致,防止因 K⁺浓度差异导致种子渗透压出现差异,使滤纸浸透并完全浸润种子,以去离子水培养为对照,每个处理 6 次重复。将培养皿置于恒温培养箱内进行发芽试验,试验条件为光照/黑暗(12 h/12 h,25℃/15℃),每天称重补充蒸发散失的水分以保持盐溶液浓度,并定时观察记录每日发芽数,以芽长达到种子长度 1/2 为发芽标准,连续记录 12 d。试验第 5 d 计算发芽势,第 12 d 计算发芽指标以及幼苗根长,苗高,并且测定种苗丙二醛(MDA)和脯氨酸含量。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 发芽指标测定

发芽势(GV)=(发芽试验 5 d 内供试种子的发芽数/供试种子数)×100%

发芽率(GR)=(发芽试验 12 d 内供试种子的发芽数/供试种子数)×100%

发芽指数(GI)= ∑(Gt/Dt)

式中,Dt,发芽日数,Gt,与 Dt 相对应的每天发芽种子数^[14]。

表 1 试验中各处理的离子浓度
Table 1 The ion concentration of each treatment in the experiment

处理	K ₂ SiO ₃ / (mmol · L ⁻¹)	NaCl / (mmol · L ⁻¹)	K ₂ SO ₄ / (mmol · L ⁻¹)
CK	0	0	2.5
1	1.5	0	1.0
2	2.0	0	0.5
3	2.5	0	0
4	0	40	2.5
5	0	60	2.5
6	0	80	2.5
7	1.5	40	1.0
8	1.5	60	1.0
9	1.5	80	1.0
10	2.0	40	0.5
11	2.0	60	0.5
12	2.0	80	0.5
13	2.5	40	0
14	2.5	60	0
15	2.5	80	0

1.3.2 形态、生理指标 萌发实验结束后在各处理培养皿中随机选取 5 株幼苗用直尺测量幼苗株高,游标卡尺测量根长。

丙二醛含量测定(硫代巴比妥酸比色法):称取 0.25 g 新鲜种苗置于预冷的研钵加入 4 mL 10% TCA 溶液冰浴研磨,然后将匀浆在 8 000 g 下 4℃离心 10 min,之后取 2 mL 上清液与 2 mL 0.6% 的 TBA 混合沸水浴反应 15 min,冷却后 3 000 g 离心 10 min。取上清液分别在 532,600 和 450 nm 下测吸光值并计算丙二醛含量^[15]。

脯氨酸含量测定(酸性茚三酮比色法):称取 0.5 g 幼苗加入 4 mL 3% 的磺基水杨酸溶液冰浴研磨,匀浆转移至离心管中沸水浴中提取 10 min,冷却后 4℃5 000 r/min 离心 10 min。取上清液加入水合茚三酮和冰醋酸及蒸馏水后沸水浴显色 30 min。冷却后加甲苯萃取,取上层有机相测定 520 nm 吸光值计算脯氨酸含量^[15]。

1.4 数据处理

试验数据用 SPSS 19.0 软件进行统计分析,对各

处理进行单因素方差分析,并用 Duncan 法对各测定数据进行多重比较用,利用 Microsoft Excel 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子萌发的影响

2.1.1 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子发芽势的影响 仅 NaCl 胁迫处理时,随着 NaCl 胁迫浓度升高,垂穗披碱草发芽势呈不同程度下降趋势,其中 NaCl 浓度为 40 mmol/L 时发芽势最低,较清水对照降低了 62.31%(图 1)。除 15 mmol/L 处理发芽势高于清水对照,其余处理均低于对照,但各处理间差异不显著。NaCl 胁迫浓度为 40 mmol/L 时,随着 Si 添加浓度的升高各处理发芽势呈先升高后下降趋势,3 个 Si 浓度添加处理均可显著提高种子发芽势,其中添加 Si 浓度为 1.5 mmol/L 时发芽势最高,为 37.67%,较单一 40 mmol/L NaCl 胁迫处理提高了 114.20%。60、80 mmol/L NaCl 胁迫条件下,随着 Si 添加浓度的升高各处理发芽势均呈先升高后下降趋势,2 种 NaCl 胁迫水平下添加 1.5 mmol/L Si 时均可有效提高垂穗披碱草种子发芽势,60、80 mmol/L NaCl 胁迫条件下发芽势分别提高了 34.43%和55.23%。

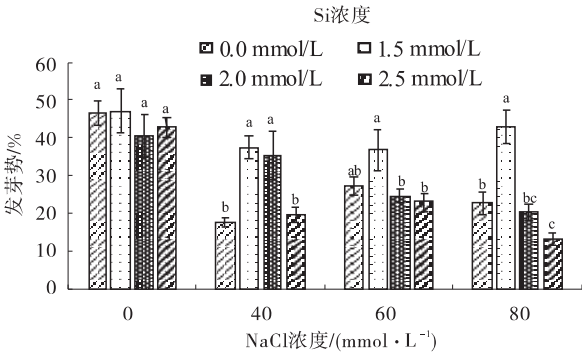


图 1 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子发芽势的影响
Fig. 1 Effect of Si on germination energy of *Elymus nutans* seeds under NaCl stress

注:不同小写字母表示同一 NaCl 浓度条件下不同 Si 浓度处理间差异显著($P<0.05$),下同

2.1.2 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子发芽率的影响 仅进行 NaCl 胁迫处理时,随着 NaCl 浓度升高,垂穗披碱草种子发芽率呈不同程度降低趋势,NaCl 浓度为 40 mmol/L 时发芽率最低,为 72.80%,较清水对照降低了 22.55%(图 2)。单独 Si 元素添加时,垂穗披碱草发芽率随 Si 浓度升高呈逐渐下降趋

势,且在硅浓度为 60、80mmol/L 时发芽率分别为 85.67%和 80.67%,分别较清水对照降低 8.86%和 14.18%($P<0.05$)。NaCl 胁迫浓度为 40mmol/L 时添加 Si 后对垂穗披碱草发芽率均表现出不同程度促进作用,其中以 2.5 mmol/L Si 添加促进作用最强,1.5、2.0 mmol/L 次之,三者分别较单一 40 mmol/L NaCl 处理增长了 17.68%、14.93%和 12.18%($P<0.05$)。60 mmol/L NaCl 胁迫条件下添加 Si 浓度为 2.5 mmol/L 时对种子发芽率促进作用最强,该处理发芽率较单一 60 mmol/L NaCl 胁迫处理提高 6.49%。NaCl 胁迫浓度为 80 mmol/L 时随 Si 浓度升高垂穗披碱草发芽率呈先升高后降低趋势。其中添加 1.5 mmol/L Si 时垂穗披碱草发芽率最高,为 87.33%,较单一 80 mmol/L NaCl 胁迫下发芽率提高 7.38%。

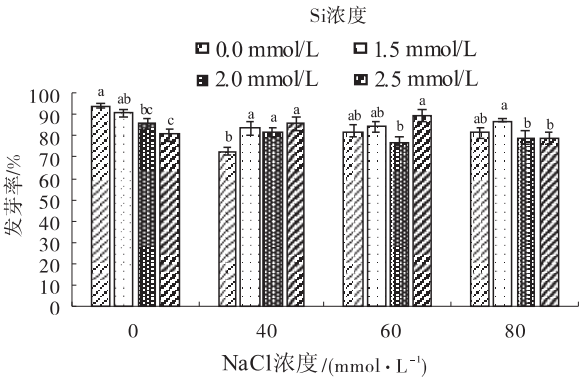


图 2 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子发芽率的影响
Fig. 2 Effect of Si on germination percentage of *Elymus nutans* seeds under NaCl stress

2.1.3 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子发芽指数的影响 仅 NaCl 胁迫处理下垂穗披碱草发芽势随 NaCl 浓度升高呈不同程度降低趋势,其中以 NaCl 胁迫浓度为 40 mmol/L 时最低,为 29.80%,较清水对照降低 36.89%(图 3)。仅添加 Si 处理时发芽指数呈逐渐降低趋势,其中以 80 mmol/L Si 处理时最低,为 39.13%,较清水对照降低 17.15%。40、60 和 80 mmol/L NaCl 胁迫条件下添加 1.5 mmol/L Si 均可有效提高垂穗披碱草在相应 NaCl 胁迫水平下的发芽指数。3 个水平 NaCl 胁迫下添加 1.5 mmol/L Si 时发芽指数分别为 39.75%、39.60%和 40.83%,较相应单一 NaCl 胁迫处理分别提高33.38%、11.17%和20.57%。

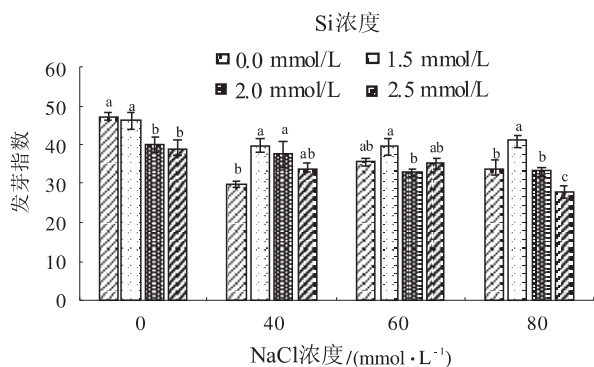


图 3 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子发芽指数的影响

Fig. 3 Effect of Si on germination index of *Elymus nutans* seeds under NaCl stress

2.2 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗形态和生理的影响

2.2.1 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子根长的影响 仅 NaCl 胁迫处理下随 NaCl 浓度升高垂穗披碱草幼苗根长呈逐渐降低趋势,以 80 mmol/L NaCl 胁迫为最小,根长为 1.9 cm,较清水对照减小 42.63% (图 4)。仅硅处理下根长呈显著降低趋势,其中以单一添加 1.5 mmol/L Si 处理的根长最小,为 1.79 cm,较清水对照减少 54.24%。NaCl 胁迫条件下随 Si 元素添加浓度升高垂穗披碱草根长均呈先升高后下降趋势。40 mmol/L NaCl 胁迫处理下添加 1.5 mmol/L 和 2 mmol/L Si 均可促进根系伸长,但与单一 40 mmol/L NaCl 胁迫处理差异不显著。60 mmol/L NaCl 胁迫下 Si 添加浓度为 1.5 mmol/L 时对根系伸长有一定促进作用,该处理下根长为 2.42 cm,较相应单一 NaCl 胁迫下根长增加了 14.86%。80 mmol/L NaCl 胁迫下 Si 添加浓度为 1.5 mmol/L 和 2.0 mmol/L 时均可显著促进垂穗披碱草根系伸长生长,

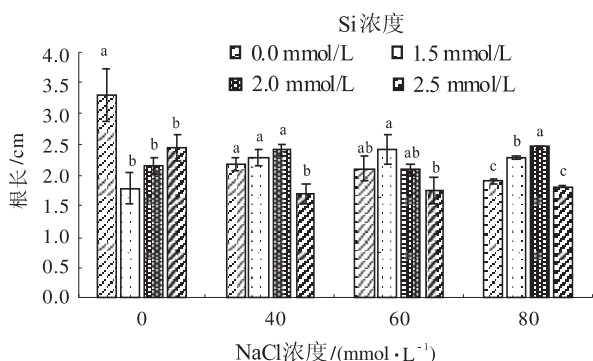


图 4 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗根长的影响

Fig. 4 Effect of Si on root length of *Elymus nutans* seedlings under NaCl stress

其中 Si 浓度为 2.0 mmol/L 时促进作用最强,1.5 mmol/L 次之,2 种处理下根长分别较相应单一 NaCl 胁迫处理显著增长 29.63% 和 20.63% ($P < 0.05$)。

2.2.2 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗株高的影响 NaCl 胁迫对垂穗披碱草的株高表现出抑制作用 (图 5)。单独 Si 处理下垂穗披碱草幼苗株高随 Si 浓度升高呈逐渐增高趋势,其中以 2.5 mmol/L Si 处理时最高,为 16.35 cm,较清水对照 CK 增长 10.77%。NaCl 胁迫条件下添加 Si 时,垂穗披碱草株高随 Si 浓度升高呈先升高后降低趋势。40 mmol/L NaCl 胁迫下添加 Si 均可显著促进垂穗披碱草幼苗生长,其中以 Si 添加浓度为 2.0 mmol/L 处理下株高最高,为 15.97 cm,较相应单一 NaCl 胁迫增长 26.55%。60 mmol/L NaCl 胁迫下添加 Si 浓度为 2.0 mmol/L 和 2.5 mmol/L 时可显著提高垂穗披碱草幼苗株高,2.0 mmol/L Si 添加处理下株高最高,为 15.59 cm,2.0 mmol/L 次之,为 14.65 cm,二者分别较 60 mmol/L NaCl 胁迫处理株高增长 18.47% 和 13.12%。80 mmol/L NaCl 胁迫下添加 Si 均可显著提高垂穗披碱草幼苗株高,其中 Si 添加浓度为 1.5 mmol/L 时株高最高,为 15.38 cm,较相应单一 NaCl 胁迫增长 29.57%。

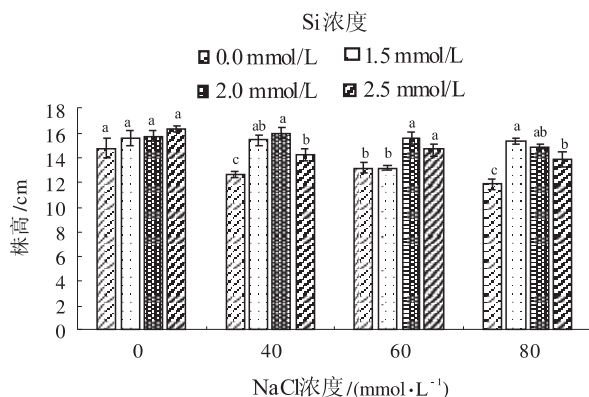


图 5 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗株高的影响

Fig. 5 Effect of Si on plant height of *Elymus nutans* seedlings under NaCl stress

2.2.3 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗脯氨酸含量的影响 NaCl 胁迫条件下垂穗披碱草幼苗体内游离脯氨酸含量均高于清水对照,且随着 NaCl 浓度升高脯氨酸含量呈先升高后下降趋势 (图 6)。单独添加 Si 时幼苗体内脯氨酸含量随 Si 浓度升高呈先降低后上升趋势,其中以 1.5 mmol/L Si 处理最低,2.0 mmol/L 处理次之,二者分别为 90.70 $\mu\text{mol/g}$ 和

129.07 $\mu\text{mol/g}$, 分别较清水对照降低 46.20% 和 23.44%。2.5 mmol/L Si 添加处理下脯氨酸含量较清水对照升高 42.87%。NaCl 胁迫条件下添加 Si 时垂穗披碱草幼苗脯氨酸含量显著低于相应单一 NaCl 胁迫处理。40 mmol/L NaCl 胁迫下 Si 添加浓度为 1.5、2.0 和 2.5 mmol/L 时脯氨酸相对含量分别较 NaCl 胁迫对照降低 81.80%、60.68% 和 63.79%, 60 mmol/L NaCl 胁迫处理下分别降低 53.94%、83.36% 和 57.25% ($P<0.05$), 80 mmol/L NaCl 胁迫处理下分别降低 72.55%、45.05% 和 60.22% ($P<0.05$)。

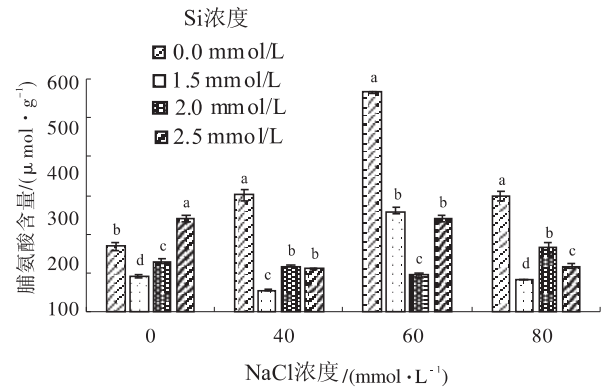


图 6 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗脯氨酸含量的影响
Fig. 6 Effect of Si on proline content in *Elymus nutans* seedlings under NaCl stress

2.2.4 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗丙二醛含量的影响 NaCl 胁迫条件下幼苗丙二醛含量随 NaCl 浓度升高呈先升高后降低趋势。仅添加 Si 时幼苗体内丙二醛含量随 Si 浓度升高呈先降低后上升趋势,其中以 1.5 mmol/L Si 处理最低,2.0 mmol/L 处理次之,分别为 2.13、2.89 $\mu\text{mol/g}$,较清水对照分别降低 36.5% 和 13.66%。2.5 mmol/L Si 处理下脯氨酸含量较清水对照升高 42.87%,说明添加一定浓度的 Si 可以显著降低幼苗丙二醛含量。40 mmol/L NaCl 胁迫下幼苗丙二醛含量随 Si 添加浓度升高呈先升高后降低趋势, Si 添加浓度为 2.5 mmol/L 时丙二醛含量为 3.40 $\mu\text{mol/g}$,较相应对照 NaCl 处理降低 50.36% ($P<0.05$)。60 mmol/L NaCl 胁迫下硅添加处理均可降低幼苗体内丙二醛含量,其中以 2.0 mmol/L Si 添加处理最低,2.5 mmol/L 次之,丙二醛含量分别为 2.25、4.22 $\mu\text{mol/g}$,较相应 NaCl 对照分别降低 68.73% 和 41.49% ($P<0.05$)。80 mmol/L NaCl 胁迫下丙二醛含量随 NaCl 浓度升高呈先降低后升高趋势,其中以 1.5 mmol/L Si 添加处理最低,但各处理间

差异不显著。

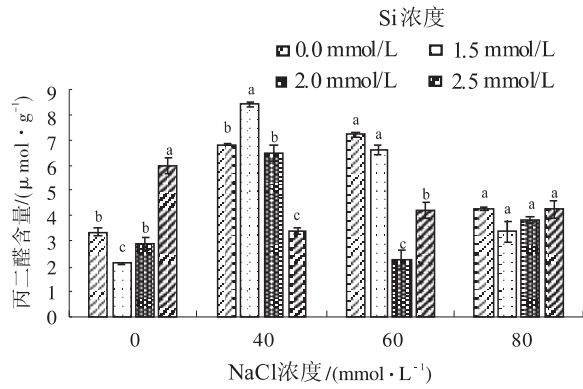


图 7 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗丙二醛含量的影响
Fig. 7 Effect of Si on MDA content in *Elymus nutans* seedlings under NaCl stress

3 讨论

3.1 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草种子萌发的影响

种子萌发是植物生活史中的重要阶段。NaCl 胁迫会打破种子萌发过程中的代谢平衡,最终造成种子发芽率和发芽势降低^[16]。适量 Si 能促使种子内部因贮藏而损伤的膜系统得到恢复和活化,透性增强,α-淀粉酶、蛋白酶、脂肪酶活性增大,各种生理生化适应机制得以启动,促进种子呼吸代谢从而提高了种子的活力,缓解 NaCl 胁迫对种子萌发的抑制作用从而提高种子萌发率^[17]。本研究结果表明,单独 NaCl 胁迫及 Si 添加降低了垂穗披碱草种子的发芽率、发芽势和发芽指数,而 NaCl 胁迫下添加一定量的 Si 可有效提高上述萌发指标,说明 Si 添加在一定程度上可以缓解 NaCl 胁迫对垂穗披碱草种子萌发的抑制作用,但随着 NaCl 胁迫程度加深,硅对盐胁迫的缓解作用减弱。种子在吸胀萌发的过程中,NaCl 胁迫会对细胞膜系统修复和重建形成抑制,进而导致细胞膜的选择吸收能力遭到破坏,引起大量离子涌入,对细胞造成伤害,但是硅能保护种子胶体结构和内部一些酶的活性,阻止 NaCl 胁迫对膜的损伤,使种子在一定 NaCl 浓度下能够萌发生长^[18]。张新慧等的研究发现,硅添加对 NaCl 胁迫下甘草种子萌发和幼苗生长的影响效应因 NaCl 胁迫程度和植物物种而异^[19]。本研究发现,NaCl 浓度为 40、60 mmol/L 时,随添加 Si 浓度升高,种子发芽率呈逐渐升高趋势, Si 添加浓度为 2.5 mmol/L 时发芽率均达到最高,而 80 mmol/L NaCl 胁迫条件下仅在 Si 浓度为 1.5 mmol/L 时表现出促进作

用。这可能是由于高浓度盐溶液产生渗透胁迫和离子胁迫,抑制种子内部生理生化反应的重建以及膜透性增加等而抑制种子萌发^[20]。发芽率,发芽势和种子发芽指数常作为评价种子发芽的指标,可以反映种子的发芽速度,种子发芽的整齐度和幼苗健壮的程度。本研究中,3 种 NaCl 胁迫水平下添加 Si 浓度为 1.5 mmol/L 时对垂穗披碱草发芽率、发芽势和发芽指数均有促进作用。

3.2 硅对 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗形态和生理的影响

株高和根长是研究植物生长常用的指标,可以反映植物生长的好坏和幼苗健壮的潜能^[21]。牛菊兰等^[22]人在早熟禾品种特性与耐 NaCl 性关系的研究中发现 NaCl 胁迫会显著减小早熟禾幼苗的根长,并且这种抑制作用因胁迫程度而异。崔佳佳等^[23]在外源 Si 对 NaCl 胁迫下甘草幼苗生长的影响研究中发现,外源 Si 添加可以促进 NaCl 胁迫下甘草幼苗的生长发育,这种促进作用也因胁迫程度和 Si 添加水平而异。本研究结果表明,40~80 mmol/L NaCl 胁迫会明显抑制幼苗株高和根长的增长,添加 1.5~2.5 mmol/L Si 时对 NaCl 胁迫下幼苗的株高表现出促进作用,对根长则为显著抑制作用,这种抑制作用随 Si 浓度升高逐渐减弱,说明添加 Si 在一定程度上可以促进垂穗披碱草地上部分生长而抑制其根系生长,这与牛菊兰等的结果相似。添加 Si 可有效促进 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗的生长,说明 Si 在一定程度上可以有效缓解 NaCl 胁迫对垂穗披碱草幼苗生长的抑制作用并促进其生长发育。

脯氨酸可以在水分胁迫时降低植物自身渗透势以从外界吸收水分保持相对稳定的膨压。但关于脯氨酸的合成和积累在植物抵御逆境胁迫时的功能目前尚未明确。一些学者认为,脯氨酸的积累是植物受到逆境胁迫的表现特征,不能作为植物耐 NaCl 性的评价指标^[24]。然而另一些观点认为,脯氨酸的合成和积累可以提高细胞的渗透调节能力,进而提高植物的抗逆性^[25-28]。本研究结果表明,NaCl 胁迫处理下垂穗披碱草脯氨酸含量高于清水对照,NaCl 胁迫下添加 Si 时脯氨酸含量均显著降低,说明本研究中脯氨酸积累是垂穗披碱草在遇到 NaCl 胁迫后应对胁迫的反应,添加 Si 可以降低 NaCl 胁迫下垂穗披碱草幼苗的脯氨酸含量,进而说明添加 Si 可以有效缓解 NaCl 对垂穗

披碱草造成的胁迫效应,这与王耀晶,刘大林等的研究结果一致^[28-29]。丙二醛是植物膜脂过氧化的最终产物,是检测植物膜伤害的一个重要指标,其含量可以用来表示植物膜过氧化的程度^[30]。本研究结果显示,NaCl 胁迫下垂穗披碱草体内 MDA 含量明显高于清水对照,添加 Si 在一定程度上可以显著降低垂穗披碱草体内 MDA 含量,说明 Si 添加可以有效提高垂穗披碱草活性氧清除系统的活性,降低 NaCl 胁迫产生的活性氧对植物膜系统造成的伤害。

4 结论

1) NaCl 胁迫明显抑制垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长,外源 Si 添加可显著缓解 NaCl 胁迫对种子萌发和幼苗生长的抑制作用,其中 NaCl 浓度为 40 mmol/L 和 60 mmol/L 时,随添加 Si 浓度升高种子发芽率呈逐渐升高趋势, Si 浓度为 2.5 mmol/L 时发芽率均达到最高, Si 浓度为 2.0 mmol/L 时幼苗株高达到最高。

2) NaCl 胁迫处理下垂穗披碱草体内脯氨酸含量高于清水对照,添加 Si 时脯氨酸含量均显著降低,说明 Si 添加可以有效缓解 NaCl 对垂穗披碱草造成的胁迫效应。

3) 综合各处理对垂穗披碱草种子和幼苗的影响发现,硅添加可以有效缓解 NaCl 胁迫对垂穗披碱草种子萌发及幼苗生长的抑制作用,但这种缓解作用因胁迫程度和 Si 添加浓度而异。

参考文献:

- [1] 申忠宝,潘多锋,王建丽,等.混合盐碱胁迫对 5 种禾草种子萌发及幼苗生长的影响[J].草地学报,2012,20(5):914-920.
- [2] 张金林,李惠茹,郭姝媛,等.高等植物适应盐逆境研究进展[J].草业学报,2015,24(12):220-236.
- [3] 郭瑞.松嫩平原四种禾本科植物耐盐碱生理生态机制研究[D].长春:东北师范大学,2010.
- [4] 陆光平,聂斌.垂穗披碱草利用价值评价[J].草业科学,2002,19(9):13-15.
- [5] 王启基,张松林.天然垂穗披碱草种群生长节律及生态适应性的研究[J].中国草地,1990(1):18-25.
- [6] 乔安海.青藏高原东部地区垂穗披碱草种子生产技术研究[D].北京:中国农业大学,2005.
- [7] Nadeem Sarwar, Saifullah, Sukhdev S Malhi, *et al.* Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by

- plants[J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(6): 925—937.
- [8] Xuefeng Shen, Yuyi Zhou, Liusheng Duan, *et al.* Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167(15): 1240—1252.
- [9] Flore Guntzer, Catherine Keller, Jean—Dominique Meunier. Benefits of plant silicon for crops: a review[J]. Agron Sustain Dev, 2012, 32: 201—213.
- [10] 张文强, 黄益宗, 招礼军, 等. 盐胁迫下外源硅对硅突变体与野生型水稻种子萌发的影响[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(6): 867—873.
- [11] 余群, 张建全, 柴琦, 等. 硅肥对草地早熟禾种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 94—100.
- [12] 李清芳, 马成仓, 尚启亮. 干旱胁迫下硅对玉米光合作用和保护酶的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 531—536.
- [13] 王惠珍, 杜弢, 陆国弟, 等. 硅提高干旱胁迫下党参种子萌发潜力研究[J]. 甘肃中医学院学报, 2015, 32(1): 30—33.
- [14] 王玉萍, 王映霞, 白向利, 等. 硅对 NaCl 胁迫下甜瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(5): 108—116.
- [15] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 宋娅丽, 王克勤, 张倩, 等. NaCl 胁迫对 3 种冷季型草坪草种子萌发和幼生长的影响[J]. 草原与草坪, 2018, 38(1): 10—17.
- [17] 韩芸, 杜锦, 向春阳. 硫酸锌、氯化钙溶液浸种对玉米种子萌发的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2008, 20(4): 31—34.
- [18] 杨光. 盐碱胁迫对豆科牧草种子萌发及其生理的影响[D]. 长春: 东北师范大学, 2009.
- [19] 张新慧, 郎多勇, 白长财, 等. 外源硅对不同程度盐胁迫下甘草种子萌发和幼苗生长发育的影响[J]. 中草药, 2014, 45(14): 2075—2079.
- [20] 戚乐磊, 陈阳, 贾恢先. 盐胁迫下有机及无机硅对水稻种子萌发的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2002, 37(3): 272—278.
- [21] 何学青, 梁卫卫, 常乐钦, 等. 硝酸镧浸种对 NaCl 胁迫下柳枝稷种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(3): 543—549.
- [22] 牛菊兰. 早熟禾品种特性与耐盐性关系的研究[J]. 草业科学, 1998, 15(1): 39—42.
- [23] 崔佳佳, 张新慧, 李月彤, 等. 外源 Si 对盐胁迫下甘草幼苗形态及生理指标的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(10): 214—220.
- [24] 陆一鸣, 李彦筋, 曹明富, 等. 短芒大麦耐盐碱新品系的生理生化及分子生物学分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(3): 282—286.
- [25] 肖泽华, 李欣航, 潘高, 等. 锰胁迫对黄花草种子萌发及幼苗生理生化特征的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 75—84.
- [26] Claudivan Feitosa de Lacerda, José Cambraia, Marco Antonio Oliva, *et al.* Solute accumulation and distribution during shoot and leaf development in two sorghum genotypes under salt stress[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(2): 107—120.
- [27] Lutts, S., Majerus, V. and Kinet, J. M. NaCl effects on proline metabolism in rice (*Oryza sativa*) seedlings. Physiologia Plantarum, 1999, 105: 450—458.
- [28] 王耀晶, 郭修武, 王英. 盐胁迫下硅对草莓生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2008(1): 22—24.
- [29] 刘大要, 张华, 曹喜春, 等. 硅对盐胁迫下不同狼尾草属牧草生理代谢的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(6): 1119—1123.
- [30] Liu Airong, Zhang Yuanbing, Chen Dengke. Effects of salt stress on the growth and the antioxidant enzyme activity of (*Thellungiella halophila*) [J]. Bulletin of Botanical Research, 2006; 26(2): 216—221.

(下转 40 页)