盐胁迫对蒙古黄芪种子萌发与幼苗生长的影响

马彦军，倪 强，杨永义，卢 瑜，马 瑞
（甘肃农业大学 林学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：[目的] 分析蒙古黄芪种子在不同浓度 NaCl，Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 处理下的种子萌发和幼苗生长情况，为蒙古黄芪在盐碱地的引种、驯化和种植提供理论依据。[方法] 通过发芽盒进行种子萌发出苗试验，测定分析蒙古黄芪种子在不同浓度 NaCl，Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 处理下的萌发率、发芽势、相对盐害率及其苗根长、苗高及根茎比。[结果] ①蒙古黄芪种子在 NaCl＜0.2%，Na_2SO_4＜0.6%和 $NaHCO_3$＜0.3%的盐胁迫下能够正常发芽，萌发率和发芽势均高于对照，在大于此浓度的盐胁迫下萌发率和发芽势均开始下降。②蒙古黄芪种子在 NaCl＜0.6%，Na_2SO_4＜0.8%和 $NaHCO_3$＜0.3%时的相对盐害率为负值，促进种子萌发，大于此浓度时，相对盐害率为正值，抑制种子萌发。③蒙古黄芪幼苗的茎长、根长及根茎比随着盐浓度的增大而增大，当 NaCl 和 Na_2SO_4 浓度分别在 0.4%和 0.6%时，黄芪幼苗的茎长和根长达最大，$NaHCO_3$ 浓度分别在 0.6%和 0.3%时，黄芪幼苗的茎长和根长达最大，超过此浓度黄芪幼苗的茎长和根长开始减小；当 NaCl，Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 浓度分别为 0.6%，0.8%和 0.3%时根茎比达最大，分别为 1.658，1.709，1.291，超过此浓度，根茎比开始下降，但均大于 1。[结论] 蒙古黄芪在 NaCl＜0.6%，Na_2SO_4＜0.8%和 $NaHCO_3$＜0.3%的盐胁迫下种子和幼苗能够正常萌发和生长。

关键词：黄芪；种子萌发；盐胁迫；幼苗生长
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)03-0106-06 **中图分类号**：Q945.78

文献参数：马彦军，倪强，杨永义，等.盐胁迫对蒙古黄芪种子萌发与幼苗生长的影响[J].水土保持通报，2018，38(3)：106-111. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.017. Ma Yanjun, Ni Qiang, Yang Yongyi, et al. Effect of salt stress on seed germination and seedling growth of *Astragalus mongholicus*[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 106-111.

Effect of Salt Stress on Seed Germination and Seedling Growth of *Astragalus Mongholicus*

MA Yanjun, NI Qiang, YANG Yongyi, LU Yu, MA Rui
(*College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: [Objetive] In order to provide the theoretical basis for *Astragalus mongholicus* introduction, domestication and planting in saline land, the seed germination and seedling growth of *A. mongholicus* were investigated in different concentrations of NaCl, Na_2SO_4 and $NaHCO_3$ treatment to understand the effect salt stress on *A. mongholicus*. [Methods] Seed germination test were conducted in germination box, and the germination rate, germination potential, relative salt injury rate, root length, seedling height and ratio of root and stem of *A. mongholicus* were measured in different concentrations of NaCl, Na_2SO_4 and $NaHCO_3$ treatments. [Results] ① *A. mongholicus* seed germinated normally under the salt stress with the concentration of NaCl＜0.2%, Na_2SO_4＜0.6% and $NaHCO_3$＜0.3%, and the germination rate and germination potential were all greater than that of control treatment, vice versa. ② The relative salt damage rate of *A. mongholicus* seed was negative at low concentration (NaCl 0.6%, Na_2SO_4 0.8%, $NaHCO_3$ 0.3%) as it promoted the seed germination, while it inhibited the germination of *A. mongholicus* when the concentration was higher.

收稿日期：2017-12-14 **修回日期**：2018-01-01
资助项目：甘肃省科技支撑项目“甘肃省黑果枸杞种质资源调查、收集及评价”(144NKCA045)；甘肃农业大学青年研究生指导教师扶持资助项目(GAU-QNDS-201712)
第一作者：马彦军(1975—)，男(回族)，甘肃省平凉市人，博士，副教授，主要从事植物种质资源调查收集、保存与研究。E-mail：lxysys01@126.com。
通讯作者：马瑞(1977—)，女(回族)，甘肃省平凉市人，博士，副教授，主要从事荒漠化防治研究。E-mail：307941593@qq.com。

③ The stem length, root length and ratio of root and stem of *A. mongholicus* seedling increased with the increase of salt concentration. When the concentration of NaCl and Na_2SO_4 were 0.4%, 0.6% and 0.6%, 0.3%, respectively, the stem length and root length of *A. mongholicus* seedling were the maximum. While the stem length and root length of *A. mongholicus* seedling started to decrease as the concentration of NaCl and Na_2SO_4 increased. The maximum ratio of root and stem was 1.658, 1.709 and 1.291, respectively, when the concentrations of NaCl, Na_2SO_4 and $NaHCO_3$ was 0.6%, 0.8% and 0.3% respectively, while it decreased when the concentrations increased. [Conclusion] The seed and seedling of *A. mongholicus* could germinate and grow normally under salt stress with the concentrations of NaCl<0.6%, Na_2SO_4<0.8% and $NaHCO_3$<0.3%.

Keywords: ***Astragalus mongholicus***; **seed germination**; **salt stress**; **seeding growth**

盐碱地是一种广泛分布的低产土壤,随着全球环境的不断恶化,日益严重的土壤盐碱化威胁着人类赖以生存的土地资源[1-2]。甘肃省盐碱地总面积为1.41×10^6 hm^2,其中盐碱耕地面积 32.25 hm^2,盐碱荒地面积为1.09×10^6 hm^2[3]。如何有效利用这些盐碱化土地已成为一个重要课题和研究方向。盐碱地改良可以通过合理水土管理和化学改良,但成本高,效果很难持久,不易推广[4-5]。国内外许多研究证明,筛选耐盐性品种,利用生物治盐、改盐是盐碱地改良和提高盐碱化土地利用率的一条有效途径[6-7]。种子萌发期是植物生活史中对盐胁迫十分敏感的时期,植物能否在盐碱环境中生存,首先取决于它能否发芽、发芽率的高低以及发芽速度的快慢[8-9]。盐生环境中,种子萌发是植物生存和延续至关重要的阶段[10],是植物适应环境变化并成功建殖于盐生环境中的关键前提[11]。残酷的生存条件导致植物出现不同的成长过程,而种子萌发和幼苗生长对盐胁迫的响应是反映其适应环境的重要生态机制[12]。

蒙古黄芪(*Astragalus mongholicus*)为豆科黄芪属多年生草本植物,又名绵芪、箭黄芪、箭芪,因其根长,形似箭杆,故有箭芪和箭黄芪之称,产于甘肃定西、山西绵山等地。其干燥根为重要的中药材[13]。随着生活和医疗水平的提高,对黄芪的需求量逐步增加,导致人们对野生资源的过度采挖,野生黄芪资源已濒临灭绝,不能满足人们的需求[14-15]。本试验拟以甘肃省陇西地区栽培的蒙古黄芪种子为材料,研究不同种类和浓度的盐胁迫对其种子萌发和幼苗生长的影响,探索蒙古黄芪在种子萌发和幼苗阶段对不同种类盐胁迫的耐受阈值,以期为蒙古黄芪在甘肃盐碱土地上的引种、驯化和大面积种植提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

于 2017 年 8 月在甘肃省陇西县首阳中药材科技示范园采集黄芪成熟种子。种子千粒重 6.38 g。选取健壮饱满、无损伤和无虫害的种子进行试验。将供试种子用 0.1%高锰酸钾消毒 1 h,用无菌水冲洗干净,浸泡在 75 ℃水中,自然冷却,放置 24 h 后进行不同盐胁迫处理。

1.2　试验方法

2017 年 10 月 14 日利用发芽盒进行种子萌发出苗试验。将蛭石清洗干净,用高压灭菌锅灭菌,然后在干燥箱烘干,平铺在发芽盒内,厚 3 cm。用等量的不同种类和浓度的盐溶液将蛭石浇透作为苗床,以蒸馏水处理的蛭石苗床为对照(CK)。将种子均匀的条播在发芽盒里,覆蛭石 0.5 cm 左右。每个处理 50 粒种子,重复 3 次。在培养室进行发芽观测。以肉眼看到种子出土为判断标准,每 24 h 记录一次种子萌发数,10 月 21 日种子连续 3 d 没有新的萌发时结束试验。种子萌发试验结束后从每个处理中取前 3 d 萌发的幼苗测定其根长以及苗长。

本试验用于测试的盐为 NaCl,Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$,根据预试验,设置 NaCl 和 Na_2SO_4 的浓度为 0.2%,0.4%,0.6%,0.8%,1.0%,1.2%,1.4%,1.6%共 8 个梯度;$NaHCO_3$ 浓度为 0.1%,0.3%,0.6%,0.9%,1.2%共 5 个梯度。

1.3　数据处理

利用 Excel 2010 和 SPSS 17.0 统计软件对数据进行计算,差异显著性分析及绘图。相关指标的计算公式如下:

萌发率[16-17](G_P)=$G_N/S_N\times100\%$　　(1)

式中:G_N——种子萌发总数;S_N——种子总数。

发芽势(%):$V=\frac{n_1}{N}\times100\%$　　(2)

式中:n_1——前 3 d 内正常发芽种子粒数;N——供试种子数。

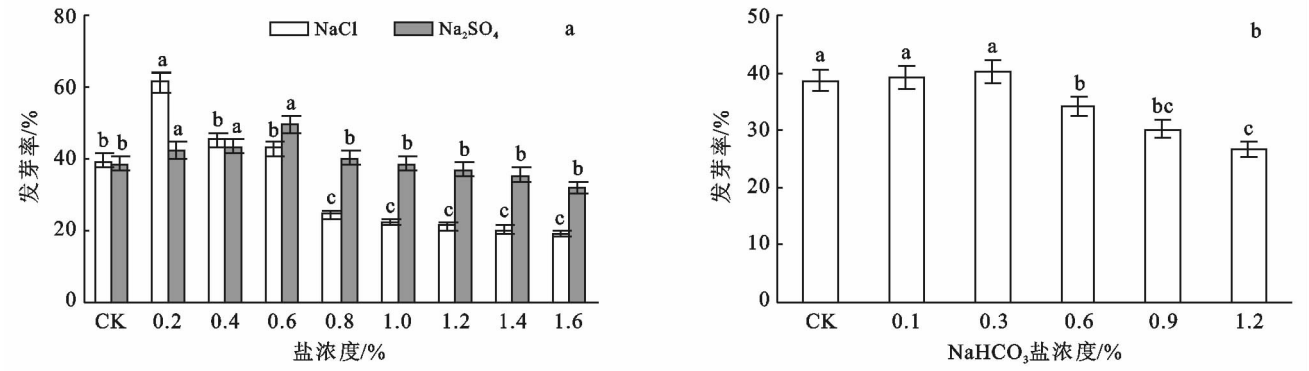
根冠比[16-17](RSR)=根长/苗长　　(3)

相对盐害率=(对照发芽率—处理发芽率)/对照发芽率×100%　　(4)

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对黄芪种子萌发的影响

由图 1 可知，蒙古黄芪种子在不同浓度的 3 种盐胁迫下均能萌发。当 NaCl，Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 盐浓度分别为 0.2%，0.6%和 0.3%时，蒙古黄芪种子萌发率达最大，分别为 61.23%，49.33%和 40.13%，比对照（对照萌发率为 39.33%）分别高出 21.9%，10.0%和 0.8%，超过此浓度后，萌发率开始下降，当 NaCl 浓度为 0.6%，Na_2SO_4 浓度为 0.8%时，蒙古黄芪种子萌发率仍高于对照（对照萌发率为39.33%），但差异不显著（$p<0.05$），这表明适当浓度的盐溶液处理蒙古黄芪种子，能促进其萌发。蒙古黄芪种子在 NaCl 胁迫下的萌发率低于 Na_2SO_4 而高于 $NaHCO_3$。蒙古黄芪种子对不同类型盐的耐受性各异，不同盐分对蒙古黄芪种子萌发的抑制程度为 Na_2SO_4＜NaCl＜$NaHCO_3$。



注：不同小写字母表示不同浓度下在 $p<0.05$ 水平上差异显著。下同。

图 1 盐胁迫对蒙古黄芪种子发芽率影响

由图 2 可看出，不同种类和浓度的盐胁迫对蒙古黄芪种子的发芽势均有影响，在 NaCl 浓度为 0.2%，Na_2SO_4 浓度为 0.2%和 $NaHCO_3$ 浓度为 0.3%下，发芽势分别为55.33%，48.66%和 41.67%，分别是对照（28.67%）的 1.98，1.70 和 1.49 倍，其余盐浓度胁迫下，黄芪种子发芽势比对照低，但没有明显的变化规律。这表明黄芪种子在低浓度的盐土中能够正常发芽，出苗也相对整齐，在高浓度的盐土中蒙古黄芪种子虽能萌发，但出苗不整齐。从发芽势来看，蒙古黄芪种子在 $NaHCO_3$ 胁迫下，发芽势低，出苗不整齐，蒙古黄芪种子在 NaCl，Na_2SO_4 胁迫下发芽势较高，出苗较整齐。

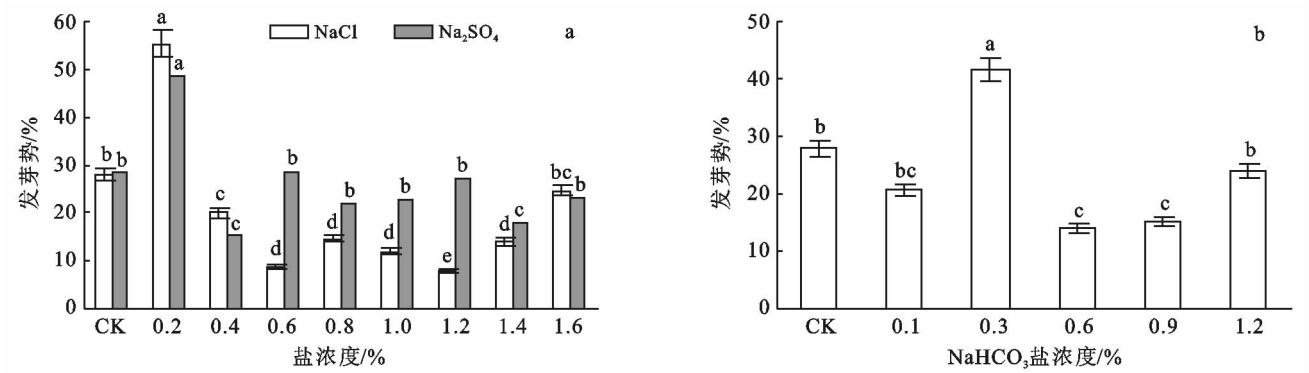


图 2 盐胁迫对蒙古黄芪种子发芽势的影响

2.2 盐胁迫对黄芪种子相对盐害率的影响

相对盐害率用来反映种子萌发期盐胁迫对种子的伤害程度。由图 3 可知，蒙古黄芪种子的相对盐害率随着 NaCl，$NaHCO_3$ 浓度的增加呈先下降后上升的趋势，随着 Na_2SO_4 浓度的增加先增大，浓度达到 0.8%之后趋于稳定。由图 3 可知，在低浓度下（NaCl＜0.6%，Na_2SO_4＜0.8%，$NaHCO_3$＜0.3%），蒙古黄芪种子相对盐害率均为负值，这说明 3 种盐在低浓度时均可促进种子萌发，而高浓度时（相对盐害率均为正值）则抑制黄芪种子的萌发。结果分析表明在 3 种盐胁迫下，$NaHCO_3$ 胁迫对蒙古黄芪种子的伤害作用最大，严重抑制了种子的萌发，Na_2SO_4 胁迫对蒙古黄芪种子的伤害作用最小，NaCl 胁迫对蒙古黄芪种子的伤害作用介于二者之间。

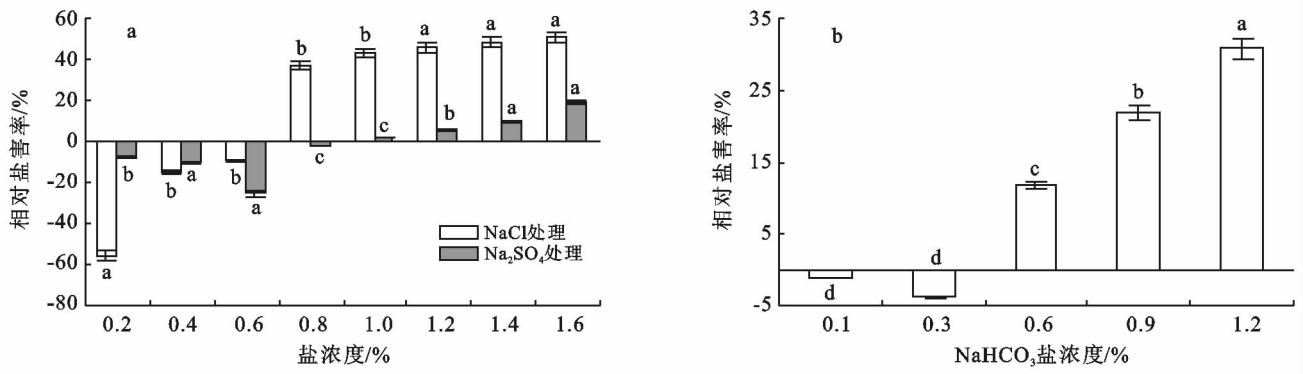


图 3　盐胁迫对蒙古黄芪种子相对盐害率的影响

2.3　盐胁迫对黄芪幼苗的影响

由图 4(a,b,c,d)可看出,黄芪幼苗的苗长和根长随着 NaCl 和 Na_2SO_4 浓度的增大而增大,当 NaCl 和 Na_2SO_4 浓度分别在 0.4%和 0.6%时,黄芪幼苗的苗长(47.40,41.14 mm)和根长(64.54,60.71 mm)达最大,且与对照(苗长 37.06 mm、根长 40.45 mm)相比差异显著($p<0.05$),超过此浓度黄芪幼苗的苗长和根长开始减小。但当 NaCl 和 Na_2SO_4 浓度分别在 0.6%和 1.0%时,黄芪幼苗的苗长、根长仍大于对照,但与对照相比差异不显著($p<0.05$)。

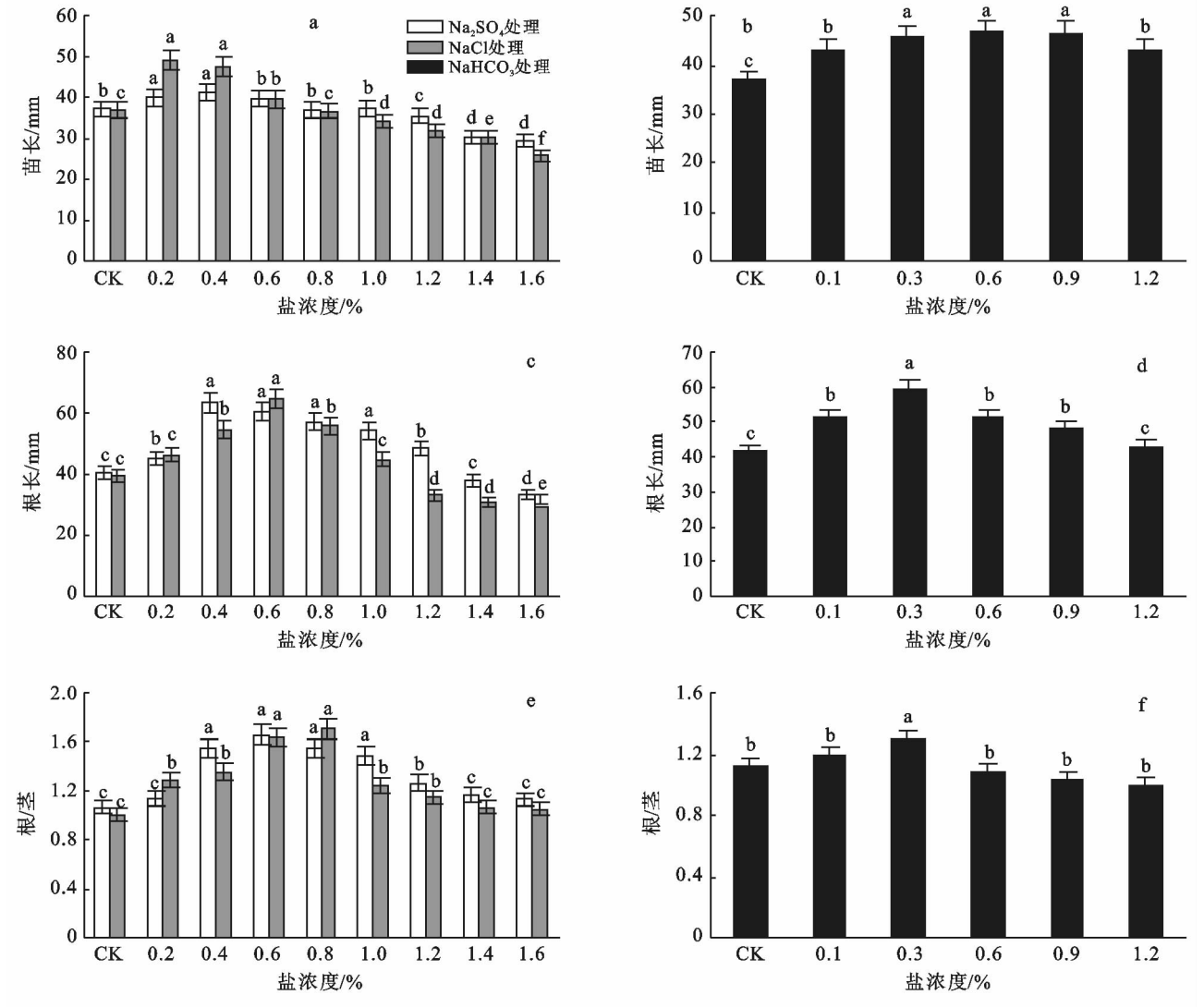


图 4　盐胁迫对蒙古黄芪幼苗的影响

黄芪幼苗的苗长和根长随着 $NaHCO_3$ 浓度的增大而增大，当 $NaHCO_3$ 浓度分别在 0.6%和 0.3%时，黄芪幼苗的苗长(47.00 mm)和根长(59.15 mm)达最大，且与对照(苗长 37.06 mm，根长 40.45 mm)相比差异显著($p<0.05$)，超过此浓度黄芪幼苗的苗长和根长开始减小，虽然黄芪幼苗的根长、苗长仍大于对照，但与对照间差异不显著($p<0.05$)。这表明不同类型的盐和不同浓度的盐对黄芪幼苗的影响不同，总的来讲，在低浓度时盐胁迫能促进黄芪幼苗的生长，当盐溶液浓度过高则抑制黄芪幼苗的生长。

图 4(e,f)可看出在 NaCl，Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 不同浓度处理下，黄芪根茎比随着盐浓度的增大而增大，当盐浓度分别达到 0.6%，0.8%和 0.3%时，根茎比达到最大值，分别为 1.658，1.709，1.291，且与对照(1.07)相比差异显著($p<0.05$)，超过此浓度，根长开始下降，但均大于 1，这说明不同浓度盐胁迫对黄芪幼苗的影响茎大于根。结果分析表明在 3 种盐胁迫下，蒙古黄芪幼苗生长都受到抑制，$NaHCO_3$ 抑制作用最强，Na_2SO_4 在抑制作用最弱，NaCl 抑制作用介于二者之间。

3 讨论与结论

种子阶段是植物生命周期中最能忍受不利环境因素的阶段，幼苗期是其最脆弱的时期[18]。植物种子在萌发期对逆境的适应能力是决定该种群分布及延续的关键因素[19]。本研究中，黄芪种子对 NaCl，Na_2SO_4 和 $NaHCO_3$ 共 3 种单盐胁迫的响应基本一致，表现为高盐浓度下，种子的萌发率、相对盐害率、发芽势、根长、苗高均受到抑制，但在较低盐浓度下，有促进萌发的作用，这与膜荚黄芪种子萌发特性[20]一致。从种子萌发率、相对盐害率、发芽势、根长、苗高等指标来看，蒙古黄芪种子萌发时对 Na_2SO_4(浓度为0.8%)耐受性最强，对 $NaHCO_3$(浓度为 0.3%)耐受性最小，对 NaCl(浓度为 0.6%)耐受性介于二者之间。这表明高浓度的 Na^+ 对种子萌发和幼苗的生长具有抑制作用外，碱性盐的高 pH 值也会对种子萌发和幼苗生长造成危害，碱性盐对蒙古黄芪种子萌发和幼苗的生长危害大于中性盐，这与其他植物研究结果一致[21-23]。

苗高是植物地上生长性状的外在表现，根长是植物地下生长性状的外在表现[24]，这些指标能够从不同的角度反映出蒙古黄芪幼苗在不同盐处理下的生长状况。本研究表明，低浓度盐胁迫条件下能促进蒙古黄芪种子的萌发和幼苗的生长，表现为萌发率、根长及茎长均大于对照，且差异显著($p<0.05$)。但高浓度盐胁迫则抑制蒙古黄芪种子的萌发和幼苗生长，其萌发率、根长、茎长值均降低。

由于植物种类的不同，不同器官对盐胁迫的反应及盐胁迫对植物不同部位的影响差异较大[25]。相关研究表明，盐分对植物地上部的抑制作用较地下部明显[26]。但也有研究得出相反的结论，认为在根系相对比较幼嫩时地下部分对盐分更敏感[27]。本研究得出的结果与前者更相近。在不同浓度盐胁迫下黄芪的根冠比均大于 1，可以看出盐胁迫对地上部分的影响更明显，这表明黄芪幼苗在不良环境条件下生长时将更多的能量分配到根部，促进根的生长，这有利于其在恶劣环境中定植生存。这可能是由于盐浓度增大，根系周围水势降低，根系对水分的吸收受到抑制无法很好吸收水分，蒙古黄芪通过增加相对根长(根长/茎长)来吸收水分。

综合盐胁迫对蒙古黄芪种子的萌发率、发芽势、相对盐害率以及幼苗根长、茎长以及根茎比可知，蒙古黄芪在 NaCl<0.6%，Na_2SO_4<0.8%和 $NaHCO_3$<0.3%的盐胁迫下种子和幼苗能够正常萌发和生长；3 种盐对蒙古黄芪种子萌发和幼苗生长影响程度为：Na_2SO_4<NaCl<$NaHCO_3$。本研究初步证明蒙古黄芪种子能够在含盐量低的土壤中正常萌发和幼苗生长生长，但仍需继续观察黄芪在盐碱地后期生长情况和黄芪质量好坏。

[参 考 文 献]

[1] 王佩羽，李长慧，李淑娟，等. 4 种牧草苗期耐盐性比较[J]. 草业科学，2013，30(4)：590-595.

[2] Ayarpadikannan S, Chung E S, So H A, et al. Overexpression of SaRBPl enhances tolerance of Arabidopsis to salt stress[J]. Plant Cell, Tiss Organ Cult(PCTOC). 2014，118(2)：327-338.

[3] 郭世乾，崔增团，傅亲民. 甘肃省盐碱地现状及治理思路与建议[J]. 中国农业资源与区划，2013，34(4)：75-79.

[4] 刘玉艳，于凤鸣，曹慧颖，等. 盐胁迫对紫花地丁植株生长及生理特性的影响[J]. 西北林学院学报，2011，26(3)：36-40.

[5] 赵振勇，张科，王雷，等. 盐生植物对重盐渍土脱盐效果[J]. 中国沙漠，2013，33(5)：420-1425.

[6] Zhao Kefu, Song Jie, Feng Gu, et al. Species, types, distribution and economic potential of halophytes in China [J]. Plant Soil, 2011，342 (1/2)：511-526.

[7] 李景欣，高春宇，毕晓秀. NaCl 胁迫对黄茂种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 内蒙古林业科学，2005(3)：11-14.

[8] 郑慧莹，李建东. 松嫩平原盐生植物与盐碱化草地的恢复[M]. 北京：科学出版社，1999：22-26.

[9] Al-Karaki C N. Germination, sodium, and potassium

concentrations of Barley seeds as influenced by salinity [J]. Journal of Plant Nutrition, 2001,24(3):511-522.

[10] Huang Zhenying, Zhang Xinshi, Gutterman Y, et al. Influence of light, temperature, salinity and storage on seed germination of *Haloxylon ammodendron* [J]. Journal of Arid Environments, 2003,55(3):4563-464.

[11] 孙丽坤,刘万秋,陈拓,等.柽柳属(*Tamrix*)植物生境适应机制与资源价值研究进展[J].中国沙漠,2016,36(2):349-356.

[12] 罗君,彭飞,王涛,等.黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)种子萌发及幼苗生长对盐胁迫的响应[J].中国沙漠,2017,37(2):261-267.

[13] 段琦梅,梁宗锁,慕小倩,等.黄芪种子萌发特性研究[J].西北植物学报,2005,25(6):1246-1249.

[14] 隆雪明,刘湘新,文利新.黄芪多糖及其应用[J].中兽医医药杂志,2007,26(2):24-27.

[15] 张博,赵庆芳,郭鹏辉,等.甘肃省重要中草药的化感作用初探[J].安徽农业科学,2008,36(2):601-605.

[16] 张肖,王旭,焦培培,等.胡杨(*Populus euphratica*)种子萌发及胚生长对盐旱胁迫的响应[J].中国沙漠,2016,36(6):1597-1605.

[17] 巴图,赵萌莉,李倩,等.不同苜蓿品种种子发芽对盐胁迫的响应[J].水土保持通报,2017,37(2):96-101.

[18] 朱毅,范希峰,刘吉利,等.盐胁迫对柳枝稷种子萌发的影响[J].中国草地学报,2014,36(4):38-43.

[19] 何芳兰,赵明,王继和,等.几种荒漠植物种子萌发对干旱胁迫的响应及其抗旱性评价研究[J].干旱区地理,2011,34(1):100-106.

[20] 韩多红,晋玲,张勇. NaCl 胁迫对膜荚黄芪种子萌发和幼苗生理特性的影响[J].中草药,2012,43(10):2045-2049.

[21] 黄立华,梁正伟,马红媛.不同盐分对羊草种子萌发和根芽生长的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(5):1974-1979.

[22] 刘爱荣,张远兵,黄守程,等. NaCl 与 Na_2CO_3 对高羊茅种子萌发及幼苗生长胁迫效应比较[J].热带作物学报,2011,32(6):1064-1068.

[23] 卢艳敏,苏长青,李会芬.不同盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J].草业学报,2013,22(4):123-129.

[24] 曾华.辽宁省水稻品种苗期耐盐能力评价[J].北方水稻,2011,41(2):10-13.

[25] Bayuelo-Jimenez J S, Craig R, Lynch J P, et al. Salinity tolerance of Phaseolus species during germination and early seedling growth [J]. Crop Science, 2002,42(5):1584-1594.

[26] Croser C, Renault S, Franklin J, et al. The effect of salinity on the emergence and seedling growth of Picea mariane, Piceaglauca, and Pinusbanksiana[J]. Environmental Pollution, 2001,115(1):9-16.

[27] 刘杰,张建坤,张学政. NaCl 胁迫下虎尾草种子萌发特性的研究[J].北方园艺,2013(21):92-94.

(上接第 105 页)

[13] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林 22 a 后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.

[14] 王清华.梯田文化论—哈尼族生态农业[M].昆明:云南人民出版社:2010:16-18.

[15] 朱良君,张光辉,任宗萍. 4 种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):163-167.

[16] 胡顺军,田长彦,宋郁东,等.土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J].农业工程学报,2011,27(5):68-72.

[17] Kinner D A, Moody J A. Spatial variability of steady-state infiltration into a two-layer soil system on burned hillslopes[J]. Journal of Hydrology, 2010,381(3/4):322-332.

[18] 王伟,张洪江,徐丽君,等.四面山不同人工林枯落物储量及其持水特性研究[J].水土保持学报,2008,22(4):90-99.

[19] 李天阳,何丙辉,田家乐,等.重庆璧山 5 种典型农林混合模式土壤理化性质及水分入渗特性[J].水土保持学报,2013,27(4):103-108.

[20] 陈家林,孔玉华,裴丙,等.太行山低山丘陵区不同植被类型土壤渗透特性及影响因素[J].水土保持研究,2016,23(4):60-65.

[21] 崔高仰,容丽,李晓东,等.喀斯特高原峡谷石漠化治理过程中土壤理化性质的变化[J].生态学杂志,2017,36(5):1188-1197.