

单盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发和幼苗生长的影响

王 进^{1,3}, 罗光宏^{2,3*}, 颜 霞³, 谢全刚¹, 张成国¹, 李 刚⁴

1. 河西学院农业与生物技术学院, 甘肃 张掖 734000

2. 河西学院 凯源生物技术开发中心, 甘肃 张掖 734000

3. 甘肃省高校河西走廊特色资源利用省级重点实验室, 甘肃 张掖 734000

4. 张掖市甘州区东大山自然保护区管理站, 甘肃 张掖 734000

摘 要: **目的** 研究单盐胁迫对蒙古扁桃 *Amygdalus mongolica* 种子萌发和幼苗生长的影响。**方法** 以天然生长于祁连山自然保护区的濒危植物蒙古扁桃去内果皮的种子为研究材料, 以不同浓度 NaCl、Na₂SO₄、CaCl₂ 溶液模拟单盐胁迫条件, 采用纸卷发芽的方法, 测定发芽指标和幼苗生长指标。**结果** 3 种盐在 0.02~0.04 mol/L, 蒙古扁桃种子发芽率、幼苗鲜质量、幼苗干质量呈增大趋势, 在 0.06~0.18 mol/L 呈降低趋势; 种子发芽指数、活力指数、饱和含水量、苗高、初生根长度、根长、次生根个数、幼苗根干质量随盐胁迫的加剧呈现显著下降趋势 ($P < 0.05$)。**结论** 蒙古扁桃种子萌发和幼苗生长对盐碱的变化很敏感, NaCl、CaCl₂ 溶液处理下, 种子萌发的半致死浓度 (P_{50}) 均为 0.12 mol/L, 幼苗成长的 P_{50} 也均为 0.10 mol/L, Na₂SO₄ 溶液处理下, 种子萌发的 P_{50} 为 0.10 mol/L, 幼苗成长的 P_{50} 为 0.06 mol/L, 在高浓度单盐胁迫后, 致使部分种子休眠而保持生活力, 未能萌发的种子复水后萌发率高达 82%~89%。

关键词: 蒙古扁桃种子; 萌发; 幼苗; 单盐胁迫; 发芽指数; 活力指数

中图分类号: R282.21

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2017)12-2509-07

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2017.12.023

Effects of single salt stress on seeds germination and seedlings growth of *Amygdalus mongolica*

WANG Jin^{1,3}, LUO Guang-hong^{2,3}, YAN Xia³, XIE Quan-gang¹, ZHANG Cheng-guo¹, LI Gang⁴

1. College of Agriculture and Biotechnology, Hexi University, Zhangye 734000, China

2. Kaiyuan Bio-tech Development Center, Hexi University, Zhangye 734000, China

3. Key Laboratory of Hexi Corridor Resources Utilization of Gansu Universities, Zhangye 734000, China

4. Management Station of Dongdashan Nature Reserve of Zhangye, Zhangye 734000, China

Abstract: **Objective** To investigate the effects of single salt stress on seeds germination and seedlings growth of *Amygdalus mongolica*. **Methods** The single salt stress condition was simulated with various concentration of NaCl, Na₂SO₄, and CaCl₂ solutions; And the indexes of seeds germination and seedlings growth was tested under this condition according to the requirements of paper bed germination test. The study material used in this study was the seeds (without endocarp) of *Amygdalus mongolica* which was an endangered plant species from the Nature Reserve of Qilian Mountain. **Results** The germination rate of seeds, the fresh weight, and dry weight of the seedlings increased with the increase of the solution concentration when the concentration is in the range of 0.02—0.04 mol/L; The three indexes mentioned above decreased with the increase of the solution concentration when the concentration was in the range of 0.06—0.18 mol/L; And this correlation was consistent among all the three salts used in this study. Seeds germination index, seeds vigor index, saturated moisture content of the seeds, seedlings height, length of primary roots, root length, total number of the secondary roots, saturated moisture content of the roots, and the root dry weight of the seedling decreased significantly when the condition of the salt stress was intensified ($P < 0.05$). **Conclusion** The seeds of *A. mongolica* is very sensitive to the changes of the salt concentration and the results shows that when NaCl and CaCl₂ solution is used, P_{50} concentration for seeds germination is 0.12 mol/L, and for seedling growth is 0.10 mol/L; When Na₂SO₄ solution is used, the P_{50} concentration for seed germination and for seedling growth is 0.10 mol/L and 0.06 mol/L respectively. Stress of high concentration of signal salt could

收稿日期: 2016-12-29

基金项目: 甘肃省农牧厅农业生物技术研究与应用开发项目 (GNSW-2016-11); 张掖市沙产业技术模式 (144JTCG254-08) 资助

作者简介: 王 进 (1974—), 男, 甘肃张掖人, 教授, 主要从事种子生物学教学和种子生理方面的研究。E-mail: wangjin0810@163.com

*通信作者 罗光宏 Tel: (0936) 8280003 E-mail: luoguanghong@hxy.edu.cn

make some seeds to be dormant, thus the viability of those seeds could be remained and the germination rate of the seeds which failed to germinate under the condition of single salt stress was up to 82%—89% after rewatering.

Key words: *Prunus monogolica* seeds; germination; seedling; single salt stress; germination index; vigor index

从种子萌发到幼苗定植是植物生活周期中极其脆弱而又非常关键的阶段,是植物适应环境变化、保持自身繁衍的重要时期,也是植物生活史中最敏感的时期,极易受外界环境因子的影响^[1-2]。盐胁迫是影响种子萌发和幼苗生长的重要环境因子之一^[3-4],种子萌发和幼苗期对盐分的响应反映了植物适应逆境的生态机制。国内外许多学者开展了盐胁迫对干旱或盐渍地带植物^[5-6]、荒漠草原种群^[7]及北方滨海盐碱地植物^[8]种子萌发的影响,揭示了特殊生境植物的种子萌发特性和生活史特征及种群更新机制^[9-10],对培育和保护抗盐植物资源、盐碱地带植被恢复和开发具有重要意义。

蒙古扁桃 *Amygdalus mongolica* (Maxim.) Ricker 是蔷薇科 (Rosaceae) 桃属 *Amygdalus* L. 的落叶灌木,可作干旱地区的景观植物和水土保持植物,有极大的生态价值^[11-12]。种仁含油率约为 40%,其油可供食用,种仁可代“郁李仁”入药,能润燥肠、利尿,主治大便燥结、水肿、脚气等症^[13-14],具有极大的食用价值和药用价值。长期以来被人们采集果实和当作燃料,牲畜亦喜啃食其果实,植株数量锐减,被中国植物红皮书收录为濒危植物,并被确定为国家二级保护植物^[15]。以往,国内外学者曾对蒙古扁桃从形态特征、生理特性、细胞学、生殖生物学、生态习性、生态经济价值、引种繁殖及造林技术等方面开展了大量的研究工作^[16-19],但不同种类单盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发特性以及幼苗生长影响的系统研究还鲜见报道。

本实验研究了不同种类单盐胁迫对河西走廊中部旱生植物蒙古扁桃种子萌发特性及种苗生长特性的影响,旨在探索生境地盐溶液的渗透胁迫对蒙古扁桃种子萌发和幼苗生长的影响,为培育和保护抗盐植物资源提供基础信息,为盐碱地带蒙古扁桃种群的重建和栽培利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 种子采集及生境状况

样品经河西学院张勇教授鉴定为蒙古扁桃 *Amygdalus mongolica* (Maxim.) Ricker 的成熟种子,于 2012 年 9 月初采集于甘肃省河西走廊中部祁连山自然保护区隆畅河自然保护区 (38°50'N,

99°38'E),该地区海拔高度 2 361 m,年均降水 458.2 mm,年潜在蒸发量 1 000 mm 左右,年平均气温 3.6 °C,无霜期 93 d,土壤类型为森林灰褐土,该区域植被以适应于高寒半湿润气候的草本和灌木占居优势地位。其种子收集后剔除果肉并阴干,获净种子 30 kg。种子在 4 °C 冷柜中储存待用。

1.2 方法

1.2.1 种子处理 收集的蒙古扁桃种子在 35 °C 恒温箱中处理 72 h,使种子完成后熟,然后机械破除内果皮,取出种子。

1.2.2 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发的影响 分别取 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16、0.18 mol/L NaCl、Na₂SO₄、CaCl₂ 对蒙古扁桃种子胁迫,考察其发芽率、发芽指数和活力指数。

将不同单盐不同浓度梯度处理的蒙古扁桃种子分别在自封袋中进行纸卷 (BP) 发芽试验。单盐胁迫条件以 30 mL 的 NaCl、Na₂SO₄、CaCl₂ 溶液湿润发芽床,以蒸馏水湿润发芽床作对照 (CK),每处理设 4 个重复,每重复 50 粒种子,共 28 个处理。发芽试验采用完成后熟并机械破除内果皮的完整种子在人工气候箱内进行,采用 20 °C 全光照条件培养 15 d。

发芽试验期间每日统计种子发芽个数,每 2 天更换 1 次单盐溶液处理的发芽床,以保持发芽床水势恒定。记录种子起始萌发的天数,第 15 天统计种子发芽率,计算发芽指数和活力指数。发芽率以正常幼苗占测试种子的百分率表示;发芽指数和活力指数按公式计算^[20-22]。

发芽指数 = $\sum$ 逐日发芽数 / 发芽天数

活力指数 = 发芽指数 × 幼苗鲜质量

1.2.3 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃幼苗生长、物质分配的影响 在发芽试验进行到第 15 天时,于每一发芽床中随机取 30 株正常幼苗测量幼苗高度、初生根长度、幼苗鲜质量、次生根个数、苗干质量、根干质量和幼苗组织相对含水量。幼苗组织相对含水量采用饱和称量法测定。

饱和含水量 = (幼苗鲜质量 - 幼苗干质量) / 幼苗鲜质量

1.2.4 数据处理方法 测试数据采用 DPS 7.05 软

件进行统计分析。不同单盐、不同浓度各项指标测定平均值间的差异显著性,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差法(LSD)检验。

2 结果与分析

2.1 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发的影响

发芽试验结果显示(表 1),在对照条件下发芽率达到了 95%以上,与对照相比,NaCl 溶液处理,0.14、0.16、0.18 mol/L 处理均极显著降低($P<0.01$),

其他各处理无显著差异($P>0.05$);Na₂SO₄ 溶液处理,0.12~0.18 mol/L 处理均极显著降低($P<0.01$),其他各处理无显著差异($P>0.05$);CaCl₂ 溶液处理,0.06 mol/L 处理无显著差异($P>0.05$),0.02、0.04、0.08、0.10 mol/L 处理有显著差异($P<0.05$),其他各处理均极显著降低($P<0.01$)。

从发芽指数来分析,在对照条件下发芽指数达到 40 以上,而单盐 0.18 mol/L 处理下,NaCl 溶液

表 1 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发的影响

Table 1 Effect of different single salt stress on germination of seeds of *Amygdalus mongolica*

处理/(mol·L ⁻¹)		起始萌发天数	发芽率/%	发芽指数	活力指数
NaCl	CK	2	95.00±2.06 Aa	42.47±1.45 Aa	22.26±1.11 Aa
	0.02	2	98.00±3.50 Aa	38.80±1.05 Bb	20.09±0.59 ABc
	0.04	2	99.00±2.00 Aa	37.42±0.74 Bc	19.96±2.53 BCb
	0.06	2	99.00±2.00 Aa	33.46±0.75 Cd	15.88±2.20 Cd
	0.08	2	96.00±4.12 Aa	30.24±1.15 De	13.16±0.74 De
	0.10	2	96.00±4.12 Aa	30.14±1.10 De	12.13±0.20 De
	0.12	3	96.00±1.29 Aa	17.77±0.20 Ef	6.61±0.15 Ef
	0.14	4	88.00±1.26 Bb	16.64±0.22 EFf	5.83±0.17 Efg
	0.16	4	82.00±3.69 Cc	15.34±0.56 Fg	5.32±0.17 Efg
	0.18	4	73.00±3.46 Dd	13.21±0.82 Gh	4.28±0.50 Fg
Na ₂ SO ₄	CK	2	95.00±2.06 Aa	42.47±1.45 Aa	22.26±1.11 Aa
	0.02	2	98.00±3.19 Aa	39.96±1.10 Bb	22.03±0.99 Ab
	0.04	2	98.00±1.92 Aa	37.97±1.16 Bc	19.41±1.75 Bc
	0.06	3	96.00±0.85 Aa	25.20±0.36 Cd	10.32±0.23 Cd
	0.08	3	94.00±5.69 Aa	24.90±1.86 Cd	7.63±3.74 CDe
	0.10	3	93.00±2.72 Aa	19.60±1.39 De	5.73±0.45 DEe
	0.12	4	82.00±5.78 Bb	19.60±1.39 De	3.35±1.41 EFf
	0.14	4	73.00±2.23 Cc	11.45±0.20 Ef	1.86±0.02 FGfg
	0.16	5	53.00±2.58 Dd	8.38±0.34 Fg	0.80±0.04 FGg
	0.18	5	20.00±3.85 Ee	2.87±0.46 Gh	0.20±0.04 Gg
CaCl ₂	CK	2	95.00±2.06 ABb	42.47±1.45 Aa	22.26±1.11 Aa
	0.02	2	98.00±1.92 Aa	40.98±0.64 Aa	21.49±1.05 ABa
	0.04	2	99.00±1.55 Aa	37.57±0.70 Bb	19.98±1.59 Bb
	0.06	2	98.00±1.67 Aa	30.67±1.11 Cc	14.90±1.27 Cc
	0.08	2	91.00±3.19 Bc	27.46±1.45 Dd	10.56±0.87 Dd
	0.10	3	89.00±1.68 Bc	23.30±2.01 Ee	7.94±0.91 Ee
	0.12	4	86.00±3.10 Cd	15.60±0.77 Ff	4.92±0.26 Ff
	0.14	4	76.00±2.22 De	13.13±0.36 Gg	3.72±0.17 Ffg
	0.16	4	68.00±1.33 Ef	11.25±0.22 GHh	3.14±0.26 FGgh
	0.18	4	59.00±2.45 Fg	9.52±0.28 Hi	1.83±0.06 Gh

同列中不同大写字母表示在 0.01 水平差异显著,不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著,下同

Capital letters indicate significant differences at the 0.01 level in the same type of column, lower case letters indicate the type of significant difference at the 0.05 level, same as below

处理发芽指数为 13.21, CaCl_2 溶液处理降为 9.52, 而 Na_2SO_4 溶液处理仅为 2.87。与对照相比, NaCl 、 Na_2SO_4 溶液处理, 各处理均极显著降低 ($P<0.01$); CaCl_2 溶液处理, 0.02 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。

从活力指数来分析, 在对照条件下种子活力指数为 22.26, 与对照相比, NaCl 溶液处理, 0.04 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 0.04 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 除 0.02 mol/L 处理无显著差异外 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$); CaCl_2 溶液处理, 0.02 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。

综上所述, 蒙古扁桃种子萌发在 NaCl 和 CaCl_2 胁迫下, 半致死浓度 (P_{50}) 为 0.12 mol/L, Na_2SO_4 胁迫下 P_{50} 为 0.10 mol/L。

2.2 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃幼苗生长的影响

分析结果 (表 2) 表明, 在对照条件下幼苗初生芽长度为 5.66 cm, 与对照相比, NaCl 溶液处理, 0.02 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 除 0.02 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$) 外, 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$); CaCl_2 溶液处理, 0.02、0.04 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。

从根长来分析, 在对照条件下幼苗根长为 12.02 cm, 而单盐 0.18 mol/L 处理下, NaCl 溶液处理为

表 2 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃幼苗生长的影响

Table 2 Effect of different single salt stress on growth of *Amygdalus mongolica* seedlings

处理/(mol·L ⁻¹)		初生芽长度/cm	根长/cm	每 5 株幼苗鲜质量/g	次生根个数
NaCl	CK	5.66±0.08 Aa	12.02±0.33 Aa	2.63±0.21 Aa	15.00±0.96 Aa
	0.02	5.23±0.35 ABa	7.77±0.22 Bb	2.33±0.06 ABb	12.00±0.82 Bb
	0.04	4.75±0.47 Bc	7.25±0.11 Bbc	2.66±0.30 Aa	8.00±0.50 Dd
	0.06	3.63±0.28 Cd	6.41±0.34 Bc	2.37±0.28 ABb	6.00±0.96 Ee
	0.08	3.45±0.12 Cd	5.45±0.12 Cd	2.18±0.19 BCbc	3.00±0.50 Bc
	0.10	2.81±0.23 De	5.12±0.41 De	2.01±0.13 BCDcd	1.00±0.50 Ff
	0.12	1.88±0.11 Ef	4.75±0.32 DEef	1.86±0.05 CDEde	1.00±0.50 Ffg
	0.14	1.74±0.99 Ef	4.36±0.24 EFfg	1.75±0.04 DEde	0.00±0.00 Fg
	0.16	1.69±0.39 Ef	4.16±0.37 FGg	1.74±0.07 DEde	0.00±0.00 Fg
	0.18	1.56±0.05 Ef	3.74±0.10 Gh	1.62±0.18 De	0.00±0.00 Fg
Na ₂ SO ₄	CK	5.66±0.08 Aa	12.02±0.33 Aa	2.63±0.21 Bb	15.00±0.96 Aa
	0.02	5.33±0.22 Aa	7.09±0.59 Bb	5.76±0.09 Aa	11.00±0.50 Bb
	0.04	4.13±0.44 Bb	6.24±0.64 BCc	2.56±0.23 BCb	7.00±0.50 Dd
	0.06	2.41±0.11 Cc	6.14±0.49 Cc	2.05±0.07 Cc	4.00±0.50 Ee
	0.08	2.13±0.39 Cc	5.28±0.56 Dd	1.50±0.70 Dd	2.00±0.50 Bc
	0.10	1.35±0.42 Dd	4.17±0.70 Ee	1.46±0.05 Dd	1.00±0.00 Ff
	0.12	0.60±0.34 Eef	2.81±0.16 Ff	0.85±0.34 Ee	0.00±0.50 FGg
	0.14	0.32±0.17 Eef	2.58±0.02 Ff	0.81±0.01 Ee	0.00±0.00 Gg
	0.16	0.25±0.53 DEe	2.25±0.17 Ff	0.47±0.02 Eef	0.00±0.00 Gg
	0.18	0.19±0.03 Ef	2.13±0.10 Ff	0.34±0.02 Ef	0.00±0.00 Gg
CaCl ₂	CK	5.66±0.08 Aa	12.02±0.33 Aa	2.63±0.21 Aab	15.00±0.96 Aa
	0.02	5.76±0.29 Aa	4.10±0.12 BCcd	4.10±0.12 Aab	12.00±0.50 Bb
	0.04	5.45±0.32 Aa	4.53±0.31 Bb	2.62±0.10 Aa	10.00±0.50 Dd
	0.06	3.68±0.37 Bb	4.46±0.45 Bbc	2.66±0.21 Abc	8.00±0.50 Ee
	0.08	3.13±0.12 Cc	3.71±0.26 Cd	1.92±0.12 Bd	5.00±0.00 Bc
	0.10	2.45±0.48 Dd	2.16±0.32 De	1.70±0.10 BCe	3.00±0.00 Ff
	0.12	1.46±0.03 Ee	1.76±0.09 De	1.58±0.02 CDef	1.00±0.50 Gg
	0.14	1.32±0.04 Eef	1.16±0.28 Ef	1.41±0.05 Df	0.00±0.00 Gg
	0.16	1.27±0.21 Eef	1.02±0.23 Ef	1.39±0.11 Df	0.00±0.00 Gg
	0.18	1.05±0.05 Ef	0.83±0.14 Ef	0.96±0.06 Eg	0.00±0.00 Gg

3.74 cm, Na_2SO_4 溶液处理降为 2.13 cm, 而 CaCl_2 溶液处理仅为 0.83 cm。与对照相比, 3 种单盐各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。从幼苗鲜质量来分析, 在对照条件下幼苗每 5 株幼苗鲜质量为 2.63 g, 与对照相比, NaCl 溶液处理, 0.04 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 0.02、0.06 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 其他处理均极显著降低 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 0.14、0.16 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 0.18 mol/L 处理极显著降低 ($P<0.01$),

其他各处理无显著差异 ($P>0.05$); CaCl_2 溶液各处理极显著降低 ($P<0.01$)。

从次生根个数来分析, 在对照条件下次生根数为 15 个, 而当 NaCl 、 CaCl_2 溶液浓度的增大至 0.14 mol/L 时, 幼苗不再生出次生根, Na_2SO_4 溶液 0.12 mol/L 处理下幼苗无次生根。与对照相比, 3 种单盐各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。

分析结果 (表 3) 表明, 在对照条件下幼苗每 5 株苗干质量为 0.51 g, 与对照相比, NaCl 溶液处理,

表 3 不同单盐胁迫对蒙古扁桃幼苗生长、物质分配的影响

Table 3 Different effects of salt stress on growth, dry matter distribution *Amygdalus mongolica* seedlings

处理/(mol·L ⁻¹)		每 5 株苗干质量/g	每 5 株根干质量/g	饱和含水量/%	萌发恢复率/%
NaCl	CK	0.51±0.02 ABab	0.07±0.04 Aa	80.47±1.05 Aa	0.00±0.00 Ee
	0.02	0.55±0.04 Aa	0.06±0.02 Bb	79.25±2.75 Aab	0.00±0.00 Ee
	0.04	0.55±0.03 Aa	0.06±0.05 Bc	78.66±0.87 Aab	0.00±0.00 Ee
	0.06	0.52±0.02 ABab	0.05±0.01 Cd	77.85±1.93 ABab	0.00±0.00 Ee
	0.08	0.51±0.06 ABab	0.05±0.03 Ce	76.48±0.96 ABbc	0.00±0.00 Ee
	0.10	0.46±0.09 BCbc	0.04±0.02 Df	73.87±1.32 Bc	0.00±0.00 Ee
	0.12	0.42±0.00 CDcd	0.04±0.03 Eg	69.50±1.25 Cd	25.00±1.59 Dd
	0.14	0.41±0.01 CDcde	0.04±0.02 Fh	66.25±2.06 CDe	51.00±2.22 Cc
	0.16	0.40±0.01 CDde	0.03±0.03 Gi	62.50±1.73 Df	67.00±1.83 Bb
	0.18	0.35±0.00 De	0.03±0.01 Hj	55.25±1.34 Eg	82.00±1.71 Aa
Na ₂ SO ₄	CK	0.51±0.02 ABb	0.07±0.04 Aa	80.47±1.05 Aa	0.00±0.00 Hh
	0.02	0.99±0.79 ABb	0.06±0.04 ABab	79.17±1.71 ABa	0.00±0.00 Hh
	0.04	0.57±0.07 ABa	0.06±0.04 ABCb	77.83±1.02 ABab	0.00±0.00 Hh
	0.06	0.52±0.03 Aa	0.05±0.02 CDcd	74.71±0.66 ABb	14.00±0.96 Gg
	0.08	0.48±0.03 Bbc	0.04±0.03 DEde	73.72±2.08 Bb	22.00±0.58 Ff
	0.10	0.38±0.44 Bbc	0.03±0.00 DEef	73.69±1.06 Bb	33.00±0.48 Ee
	0.12	0.36±0.02 Bbc	0.03±0.02 EFef	63.64±0.75 Cc	46.00±1.63 Dd
	0.14	0.35±0.01 Bbc	0.03±0.02 EFfg	57.52±1.91 Dd	56.00±1.15 Cc
	0.16	0.24±0.01 Bbc	0.02±0.01 FGgh	50.34±2.09 Ee	72.00±1.91 Bb
	0.18	0.18±0.01 Bbc	0.01±0.01 Gh	46.25±1.39 Ef	85.00±1.26 Aa
CaCl ₂	CK	0.51±0.02 ABb	0.07±0.04 Aa	80.47±1.05 Aa	0.00±0.00 Ff
	0.02	0.55±0.05 ABab	0.05±0.03 Bb	79.11±1.51 ABa	0.00±0.00 Ff
	0.04	0.57±0.07 ABb	0.05±0.04 Bb	78.48±1.43 ABab	0.00±0.00 Ff
	0.06	0.58±0.01 ABc	0.04±0.03 Bb	75.97±1.56 Bb	0.00±0.00 Ff
	0.08	0.55±0.00 ABab	0.03±0.02 Cc	71.41±1.68 Cc	0.00±0.00 Ff
	0.10	0.51±0.04 Bb	0.02±0.01 Dd	70.22±1.28 Cc	33.00±1.71 Ff
	0.12	0.42±0.08 Cc	0.02±0.01 De	64.50±1.29 Dd	63.00±2.16 Ee
	0.14	0.39±0.00 CDcd	0.01±0.00 Ef	61.25±1.50 De	73.00±3.56 Cc
	0.16	0.37±0.00 CDc	0.01±0.00 EFf	53.75±2.22 Ef	83.00±1.15 Bb
	0.18	0.35±0.00 Dd	0.01±0.00 Fg	48.25±3.10 Fg	89.00±0.58 Aa

0.02~0.10 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他处理均极显著降低 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 0.04、0.06、0.08 mol/L 处理均显著降低 ($P<0.05$) 其他各处理均无显著差异 ($P>0.05$), 0.02 mol/L 处理极显著降低 ($P<0.01$); CaCl_2 溶液处理, 0.02、0.08、0.10 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 0.04 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。

从幼苗根干质量来分析, 在对照条件下幼苗每 5 株根干质量为 0.07 g, 与对照相比, NaCl 、 CaCl_2 溶液各处理均极显著降低 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 0.02 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 0.04 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。综合幼苗生长情况, 蒙古扁桃幼苗生长在 NaCl 和 CaCl_2 胁迫下, P_{50} 为 0.10 mol/L, Na_2SO_4 胁迫下 P_{50} 为 0.06 mol/L。

从饱和含水量来分析, 在对照条件下幼苗饱和含水量为 80.47%, 与对照相比, NaCl 溶液处理, 0.02~0.06 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 0.08 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 其他各处理均呈极显著降低 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 0.02、0.04 mol/L 处理显著降低 ($P<0.05$), 0.06 mol/L 处理极显著降低 ($P<0.01$), 其他各处理无显著差异 ($P>0.05$); CaCl_2 溶液处理, 0.02、0.04 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著降低 ($P<0.01$)。

从萌发恢复率来分析, 在 0.18 mol/L 处理下, NaCl 溶液为 82%, Na_2SO_4 溶液为 85%, CaCl_2 溶液为 89%。与对照相比, NaCl 溶液处理, 0.02~0.10 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著升高 ($P<0.01$); Na_2SO_4 溶液处理, 0.02、0.04 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理极显著升高 ($P>0.05$); CaCl_2 溶液处理, 0.02~0.10 mol/L 处理无显著差异 ($P>0.05$), 其他各处理均极显著升高 ($P<0.01$)。

3 结论与讨论

3.1 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃种子萌发的影响

种子萌发和幼苗生长是盐生植物一生中关键及敏感阶段, 其萌发能力和耐盐能力影响着植物种群的分布范围^[23]。本实验结果表明, 低浓度的单盐胁迫能够促进种子的萌发, 而随着浓度升高, 又会抑制种子的萌发, 具体表现为 0.02、0.04、0.06 mol/L NaCl 盐的种子发芽率分别为 98%、99%、99%, 高

于对照 (发芽率为 95%) 3%~4% ($P>0.05$), 0.02、0.04 mol/L Na_2SO_4 盐的种子发芽率均为 98%, 显著高于对照 3% ($P>0.05$), 而 0.02、0.04 mol/L CaCl_2 盐的种子萌发率分别为 98%、99%, 显著高于对照 (95%) 3%~4% ($P<0.05$), 说明蒙古扁桃种子萌发对 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 盐有一定的适应范围。而各种高浓度单盐对种子的萌发起到抑制作用, 其抑制程度随单盐浓度的增大而显著提高 ($P<0.05$), 不同种类单盐的抑制程度不同, NaCl 盐的抑制作用最弱, 在 0.18 mol/L 浓度下, 种子发芽率高达 73%, Na_2SO_4 盐抑制作用最强, 在 0.18 mol/L 浓度下种子发芽率仅为 20%。分析认为 NaCl 盐与 CaCl_2 盐处理对种子萌发的促进作用均强于 Na_2SO_4 盐, 而胁迫效应程度依次为 $\text{Na}_2\text{SO}_4>\text{CaCl}_2>\text{NaCl}$ 。因此, 在各种盐碱地人工直播栽培蒙古扁桃时, 应注意土壤盐分管理, 对含盐量高的田块, 通过排盐洗盐或增施盐碱改良剂, 确保种子萌发, 才是种群建植的关键。

经高浓度单盐胁迫后, 致使部分种子休眠而保持生活力, 该类蒙古扁桃种子复水后, 随着 NaCl 、 Na_2SO_4 、 CaCl_2 浓度的继续增大种子萌发恢复率极显著升高 ($P<0.01$), 当浓度为 0.18 mol/L 时种子的萌发恢复率分别为 82%、85%、89%, 经分析, 高浓度单盐胁迫下种子一次发芽率和复水后发芽率累计和与种子在低盐胁迫下发芽率无差异 ($P>0.05$)。这表明盐胁迫解除或减轻, 种子能恢复萌发, 这是蒙古扁桃在盐胁迫恶劣环境下维持种群的生存策略。

3.2 不同浓度单盐胁迫对蒙古扁桃幼苗生长的影响

逆境胁迫下植物形态、生理指标的变化是作为植物抗性研究的重要依据之一^[23]。蒙古扁桃种子的发芽指数、活力指数、初生根长度、根长、次生根个数、饱和含水量、苗根干质量单盐溶液浓度显著下降 ($P<0.05$), 下降趋势由慢变快, 说明低浓度的单盐溶液对蒙古扁桃幼苗生长无显著抑制作用 ($P>0.05$), 随浓度不断升高抑制效应显著增强 ($P<0.05$), 分析认为蒙古扁桃幼苗生长能耐受低浓度的盐溶液的胁迫。

逆境对植物产生各种不利的影响, 同时植物也对逆境产生一些适应性变化, 而这些变化会通过植物一定的生理生化过程反映出来^[23]。实验结果显示, 未经盐胁迫的蒙古扁桃幼苗的饱和含水量为 80.47%, 随着 3 种单盐溶液浓度的不断升高, 幼苗饱和含水量极显著降低 ($P<0.01$), 在 0.18 mol/L

浓度下, NaCl、Na₂SO₄、CaCl₂ 盐的幼苗饱和含水量分别为 55.25%、46.25%、48.25%, 分析认为, 3 种单盐的胁迫程度依次是 Na₂SO₄>CaCl₂>NaCl。这表明在盐生环境中, 蒙古扁桃幼苗通过降低含水量, 维持高渗透势来保持水分平衡而存活。

本实验结果显示, 3 种不同单盐在 0.02~0.06 mol/L 内, 其初生芽干质量均高于对照处理, 且呈增加趋势 ($P>0.05$), 而胚根干质量均低于对照处理, 呈显著下降趋势 ($P<0.05$)。而 3 种不同的单盐在 0.12~0.18 mol/L, 初生芽干质量、胚根质量均低于对照处理, 且呈极显著下降趋势 ($P<0.01$)。因此, 分析认为在一定浓度范围内的单盐胁迫下, 随着单盐溶液浓度的增加, 初生芽干质量增加, 胚根干质量降低, 根冠比随着单盐胁迫的加剧呈极显著降低趋势 ($P<0.01$), 分析认为蒙古扁桃幼苗对于外界不良环境(盐碱胁迫)的影响, 采取降低生长量的方式来进行适应生长, 当单盐浓度超出一定范围或继续升高时, 通过降低生长量的方式不能够进行适应生长, 则蒙古扁桃幼苗发育受到极显著抑制 ($P<0.01$), 不能成苗甚至死亡。因此, 在蒙古扁桃幼苗期, 更应注意土壤盐分管理, 防止土壤泛盐对幼苗生长的抑制, 确保幼苗健壮生长。

参考文献

- [1] Miller T. Effects of emergence time on survival and growth in an early old-field plant community [J]. *Oecologia*, 1987, 72(2): 272-278.
- [2] Gutterman Y. *Survival Strategies of Annual Desert Plants* [M]. New York: Springer, 2002.
- [3] Maun M A. Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes [J]. *Canad J Bot*, 1998, 76(5): 713-738.
- [4] Omami E N, Haigh A M, Medd R W, et al. Changes in germinability, dormancy and viability of *Amaranthus retroflexus* as affected by depth and duration of burial [J]. *Weed Res*, 1999, 39(5): 345-354.
- [5] Schmidhalter U, Oertli J J. Germination and seedling growth of carrots under salinity and moisture stress [J]. *Plant Soil*, 1991, 132(2): 243-251.
- [6] 李存桢, 刘小京, 杨艳敏, 等. 盐胁迫对盐地碱蓬种子萌发及幼苗生长的影响 [J]. *中国农学通报*, 2005, 21(5): 209-212.
- [7] 鱼小军, 师尚礼, 龙瑞军, 等. 生态条件对种子萌发影响研究进展 [J]. *草业科学*, 2006, 23(10): 44-49.
- [8] 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.
- [9] 王桔红. 河西走廊干旱区和青藏高原东缘植物种子萌发对策的研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [10] 王桔红, 陈 文, 马瑞君. 不同盐胁迫对唐古特白刺种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *西北师范大学学报: 自然科学版*, 2013, 50(1): 92-97.
- [11] 陆玲娣. *中国植物志* [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [12] 赵一之. 蒙古扁桃的植物区系地理分布研究 [J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 1995, 26(6): 713-715.
- [13] 方海涛, 李俊兰, 王黎元. 珍稀濒危植物蒙古扁桃研究进展 [J]. *阴山学刊*, 2004, 18(2): 16-18.
- [14] 方海涛, 安瑞丽, 张惠芳, 等. 濒危植物蒙古扁桃种子特性及萌发生理研究 [J]. *阴山学刊*, 2007, 21(3): 28-31.
- [15] 戚康标, 常 弘, 缪汝槐. *中国珍稀濒危动物植物辞典* [M]. 广州: 广东人民出版社, 2001.
- [16] 严子柱, 李爱德, 李得禄, 等. 珍稀濒危保护植物蒙古扁桃的生长特性研究 [J]. *西北植物学报*, 2007, 27(3): 625-628.
- [17] 红 雨, 邹林林, 朱清芳. 珍稀濒危植物蒙古扁桃群落结构特征 [J]. *生态学杂志*, 2010, 29(10): 1907-1911.
- [18] 红 雨, 邹林林, 朱清芳. 濒危植物蒙古扁桃种子雨和土壤种子库特征 [J]. *林业科学*, 2012, 48(10): 145-149.
- [19] 斯琴巴特尔, 满 良. 蒙古扁桃种子萌发生理研究 [J]. *广西植物*, 2002, 22(6): 564-566.
- [20] 韩建国. *实用牧草种子学* [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 1997.
- [21] 尹燕桦, 董学会, 孙庆泉, 等. *种子学实验技术* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [22] 颜启传. *种子检验原理与技术* [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2001.
- [23] 王桔红, 陈 文. 黑果枸杞种子萌发及幼苗成长对盐胁迫的响应 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(4): 804-810.