

DOI: 10.11686/cyxb2020008

http://cyxb.magtech.com.cn

何建军, 姚立蓉, 汪军成, 等. 干旱和盐胁迫对盐生植物盐生草种子萌发特性的影响. 草业学报, 2020, 29(11): 129—140.

He J J, Yao L R, Wang J C, et al. Effects of drought and salt stress on seed germination characteristics of *Halogeton glomeratus*. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 129—140.

干旱和盐胁迫对盐生植物盐生 草种子萌发特性的影响

何建军^{1,2}, 姚立蓉^{1,2}, 汪军成^{1,2}, 边秀秀², 司二静^{1,2}, 杨轶^{1,2},
王化俊^{1,2}, 马小乐^{1,2}, 李葆春^{2,3}, 尚勋武¹, 孟亚雄^{1,2*}

(1. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:本研究以盐生植物盐生草为材料,以不同浓度的 PEG-6000 模拟干旱胁迫和以不同浓度的 4 种钠盐(NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃)进行盐胁迫,探讨其对盐生草种子萌发特性的影响。结果表明:随着 PEG-6000 浓度的升高,盐生草种子发芽率、发芽势呈现下降的趋势,幼苗鲜重、干重、株高以及根系活力均呈现先上升后下降的趋势。聚类分析和主成分分析结果显示,以 6% PEG-6000 为结点,将不同浓度 PEG-6000 处理聚为两类,鲜重可被首选为评价盐生草萌发期耐干旱的重要参数;随着 4 种钠盐处理浓度的升高,发芽率、发芽势、幼苗鲜重、干重、株高以及根系活力均呈现不同程度的下降趋势,表明盐胁迫对种子的萌发以及幼苗的生长均有抑制作用,当 Na⁺ 浓度相同时,4 种钠盐对盐生草种子萌发及幼苗生长的抑制作用大小为 Na₂CO₃>NaHCO₃>NaCl>Na₂SO₄,聚类分析和主成分分析结果显示,以 50.00 mmol·L⁻¹ NaHCO₃, 62.50 mmol·L⁻¹ Na₂SO₄, 25.00 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 和 100.00 mmol·L⁻¹ NaCl 为结点,将各钠盐胁迫浓度聚为两类,其中发芽指标可被首选为评价盐生草萌发期耐 NaHCO₃、Na₂SO₄ 的重要参数,根系活力可被首选为评价盐生草萌发期耐 Na₂CO₃ 的重要参数,干重可被首选为评价盐生草萌发期耐 NaCl 的重要参数。

关键词:盐生草;盐胁迫;干旱胁迫;萌发期

Effects of drought and salt stress on seed germination characteristics of *Halogeton glomeratus*

HE Jian-jun^{1,2}, YAO Li-rong^{1,2}, WANG Jun-cheng^{1,2}, BIAN Xiu-xiu², SI Er-jing^{1,2}, YANG Ke^{1,2},
WANG Hua-jun^{1,2}, MA Xiao-le^{1,2}, LI Bao-chun^{2,3}, SHANG Xun-wu¹, MENG Ya-xiong^{1,2*}

1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science, Gansu Provincial Key Lab of Crop Improvement & Germplasm Enhancement, Lanzhou 730070, China; 3. College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

Abstract: To explore the effects of drought and salt stress on germination characteristics of halophytes, this study simulated drought stress with different concentrations of PEG-6000 and four sodium salts (NaCl, Na₂SO₄, NaHCO₃, Na₂CO₃) to evaluate the effects of those treatments on the seed germination characteristics of *Halogeton glomeratus*. It was found the germination percentage and germination energy decreased with in-

收稿日期:2020-01-07;改回日期:2020-02-24

基金项目:学科建设专项基金(GAU-XKJS-2018-082、083),国家大麦青稞产业技术体系(CARS-05-03B-03),甘肃省重大专项(17ZD2NA016)和盛彤笙创新基金(GSAU-STS-2018-33)资助。

作者简介:何建军(1995-),男,甘肃临洮人,在读硕士。E-mail: 3355829261@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yxmeng1@163.com

creasing PEG-6000 concentration, while the seedling fresh weight, dry weight, plant height and root activity initially increased and then decreased at higher PEG-6000 concentration. Cluster analysis and principal component analysis showed that the different PEG-6000 concentrations could be divided into two groups with 6% PEG-6000 as the point of separation. Fresh weight appeared to be an important parameter. In addition, germination percentage germination energy, seedling fresh weight, dry weight, plant height and root activity declined with increase in concentration of the four sodium salts. This indicated that salt stress inhibited seed germination and seedling growth, with the effects of the four tested sodium salts ranked: $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$. Cluster analysis and principal component analysis showed that the sodium salt concentrations were divided into two groups with the separation points falling at $50.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaHCO}_3$, $62.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{SO}_4$, $25.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{Na}_2\text{CO}_3$ and $100.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$. Among the plant traits evaluated as indicators of *H. glomeratus* stress tolerance in the germination stage, the germination index was the key indicator of NaHCO_3 and Na_2SO_4 stress, root activity emerged as the primary indicator of Na_2CO_3 stress and dry weight was the major indicator of NaCl stress in *H. glomeratus*.

Key words: *Halogen glomeratus*; salt stress; drought stress; germination

近年来,水资源匮乏以及土壤盐渍化已成为影响农业发展及生态环境建设的两大全球性问题^[1]。目前,全世界遭受水土流失的耕地面积约 $2.5 \times 10^9 \text{ hm}^2$ ^[2],受到盐渍化威胁的全球耕地面积约为 $9.5 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[3],在影响作物产量的各种非生物因素中,干旱和盐碱造成的作物减产约 40%,严重影响了农作物的生长,制约了农业经济的发展^[4]。干旱胁迫下,植物体内由于水分失衡会发生一系列生理生化响应,进而引起代谢紊乱,影响植物正常生长^[5]。盐胁迫下会导致植物体内发生渗透胁迫、离子毒害作用,扰乱植物体内营养元素平衡,使其出现中毒甚至死亡的现象^[6]。

种子萌发期是植物对环境胁迫响应最敏感的时期,直接影响植株的生长发育^[7]。在干旱及盐分胁迫下,由于植物体内缺水和产生的离子毒害会使植物体内酶的活性发生一系列的变化,进而限制植物生长发育^[8]。种子能否在干旱及盐碱环境下发芽成苗是决定该植株在该环境下完成整个生长发育过程的重要阶段^[9]。因此,研究植物在萌发期的抗旱耐盐性,以及了解植物抗旱耐盐的生理特点有着重要的意义。

目前,利用模拟干旱和盐胁迫的方法对植物种子萌发特性的研究受到广泛应用^[10-12]。盐生草(*Halogeton glomeratus*)属藜科(Chenopodiaceae),一年生草本植物,广泛生长于甘肃、青海、新疆、内蒙古、宁夏等荒漠地区,地上多分枝的肉质化茎、叶组织具有极强的抗旱、耐盐及富集重金属的特性,被称为荒漠地区抗旱、耐盐先锋植物^[13-14],然而关于盐生草种子萌发期的抗旱、耐盐性评价的报道较少。基于此,本研究将盐生草种子分别置于不同浓度 PEG-6000 和 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 溶液中,模拟干旱以及不同盐分胁迫处理,通过测定发芽指标、鲜重、干重、株高以及根系活力来分析盐生草种子对干旱及不同盐分的胁迫的耐受能力,并对各项指标进行综合评价分析,以为盐生草在干旱、盐碱地的种植及生态治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2018年11月在甘肃省会宁县盐碱地采集成熟的盐生草种子,进行清洗、除杂后备用。千粒重为 0.38 g。

1.2 试验方法

1.2.1 浓度设置 根据预试验及参考文献^[15]将 PEG-6000 的浓度梯度设置为 CK(0)、2%、4%、6%、8%、10%、15%、20%。为保证 4 种钠盐处理中 Na^+ 浓度相同,浓度梯度设置如表 1 所示。以上溶液均由蒸馏水配制。

1.2.2 萌发试验 取饱满、大小均一的盐生草种子于离心管中置于超净工作台,首先用无菌水冲洗种子表面杂质,然后用 75% 的酒精灭菌消毒 30 s,再用无菌水清洗种子表面的酒精至干净,后用 10% 的 NaClO 溶液颠倒清洗数次,最后用无菌水冲洗 4~5 次,得到无菌盐生草种子,在直径为 90 mm 的垫有双层滤纸的培养皿中加入

5 mL 不同浓度的处理溶液,每个处理均设置 4 个重复,以蒸馏水作为对照。再将 50 粒盐生草种子整齐置于培养皿中,并用封口膜封口,每天用分析天平称量蒸发散失的水分,并加蒸馏水补充,使渗透势不变。后将培养皿置于培养室中保持温度 22 ℃,8 h 光照/16 h 黑暗,光照强度 4000 Lx,相对湿度 80% 的环境下进行萌发试验^[16]。

1.2.3 发芽指标测定 以种子露白为标准^[16]。对 3 和 7 d 内发芽种子数进行统计。

$$\text{发芽率} = (\text{7 d 内种子发芽数} / \text{总种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = (\text{3 d 内种子发芽数} / \text{总种子数}) \times 100\%$$

1.2.4 株高扫描 将生长 7 d 的盐生草幼苗,以每盘培养皿为单位从中随机选取 4 株幼苗采用 WinRHIZO 图像扫描仪(Epson Long Beach, CA, USA)进行株高扫描,以平均值作为株高指标。

1.2.5 生物量测定 生长 7 d 后,由于盐生草幼苗只有细小幼根和刚展开的 2 片子叶,单株生物量无法测量,故以每盘培养皿为一个单位,测定各不同胁迫浓度对单位幼苗生物量的影响,用蒸馏水冲洗盐生草幼苗数次,待冲洗干净后用滤纸吸干表面水分。用电子分析天平称其鲜重(fresh weight,FW)。然后装入信封袋中放置 30~40 ℃ 烘箱,烘 3~4 d 至恒重,取出用电子分析天平称其干重(dry weight,DW)。

1.2.6 根系活力测定 将生长了 7 d 的盐生草幼苗称取 0.20 g,采用 2,3,5,-三苯基 4 唑氯化物(2,3,5-triphenyl-2H-tetrazolium chloride, TTC)还原测定法测定其根系活力^[17]。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理和图表绘制,运用 SPSS 20.0 软件(SPSS Inc., Chicago, USA)进行单因素方差分析(ANOVA),主成分分析和聚类分析。所有结果由平均值±标准误(means±standard error)表示,4 次生物学重复。

2 结果与分析

2.1 PEG-6000 胁迫对盐生草种子萌发特性的影响

2.1.1 PEG-6000 胁迫对盐生草种子萌发指标的影响 由表 2 可知,随着 PEG-6000 浓度的升高,盐生草种子的发芽率和发芽势均呈下降的趋势,且差异显著($P < 0.05$)。当 PEG-6000 浓度为 6% 时,发芽率和发芽势分别为 62.00%,11.33%,与对照相比下降了 31.30%,86.35%。当 PEG-6000 浓度为 20% 时,发芽率和发芽势分别为 14.50%,2.67%,与对照相比下降了 83.93%,96.78%,且差异显著($P < 0.05$)。表明随着 PEG-6000 浓度的升高,盐生草的种子活力会明显降低。在一定的 PEG-6000 浓度范围下,盐生草种子可以萌发,但其萌发明显受到抑制。

2.1.2 PEG-6000 胁迫对盐生草幼苗鲜重和干重的影响 如图 1 所示,对 PEG-6000 胁迫处理 7 d 的盐

表 1 试验中 4 种不同浓度盐溶液的配制

Table 1 Preparation of four salt solutions with different concentrations in the test (mmol · L⁻¹)

处理 Treatment	Na ⁺	NaCl	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SO ₄
CK	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	25.00	25.00	25.00	12.50	12.50
2	50.00	50.00	50.00	25.00	25.00
3	75.00	75.00	75.00	37.50	37.50
4	100.00	100.00	100.00	50.00	50.00
5	125.00	125.00	125.00	62.50	62.50
6	150.00	150.00	150.00	75.00	75.00
7	175.00	175.00	175.00	87.50	87.50
8	200.00	200.00	200.00	100.00	100.00
9	250.00	250.00	250.00	125.00	125.00
10	300.00	300.00	300.00	150.00	150.00

表 2 盐生草种子发芽率和发芽势在 PEG-6000 处理下的变化

Table 2 Changes of germination percentage and germination energy of *H. glomeratus* seeds treated with PEG-6000 (%)

PEG 浓度 PEG concentration	发芽率 Germination percentage	发芽势 Germination energy
0	90.25±2.02a	83.00±2.74a
2	77.50±3.50b	60.33±3.18b
4	74.50±6.40b	55.67±4.98b
6	62.00±5.10c	11.33±1.33c
8	35.50±6.02d	7.33±2.91cd
10	31.00±2.65de	6.00±0.00cd
15	14.50±3.77e	3.33±0.67cd
20	14.50±5.38e	2.67±0.67d

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

Note: The different lowercase letters in the same column represent significant differences at 0.05 level, the same below.

生草幼苗测定鲜重、干重,发现随着 PEG-6000 浓度的升高,鲜重、干重均呈现先上升后下降的趋势,当 PEG-6000 浓度为 4% 时均达到最大,为 0.17 和 0.012 g,与对照相比差异不显著($P>0.05$)。当 PEG-6000 的浓度为 20% 时,鲜重和干重分别为 0.03 和 0.007 g,与对照相比下降了 75.00%,36.36%,且差异显著($P<0.05$)。因此,在高浓度 PEG-6000 胁迫下,盐生草幼苗的生长明显受到了抑制。

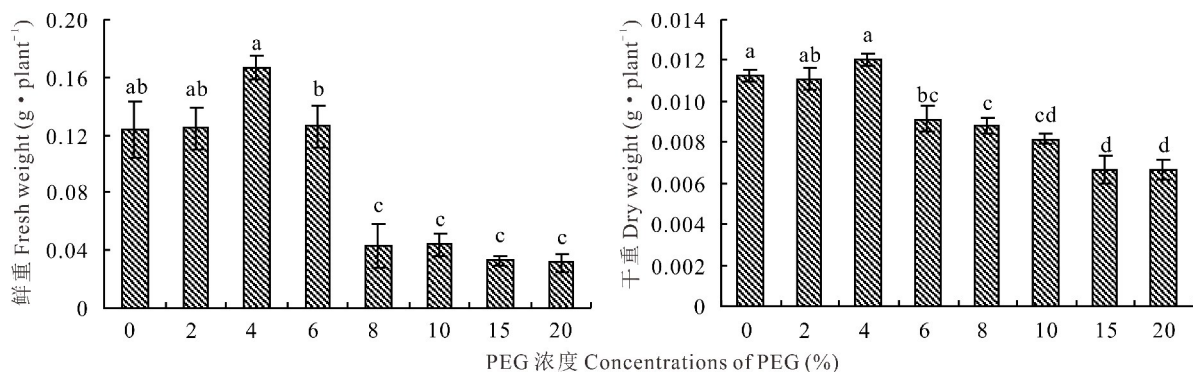


图 1 盐生草幼苗鲜重和干重在 PEG-6000 处理下的变化

Fig. 1 Changes of fresh weight and dry weight of *H. glomeratus* seedlings treated with PEG-6000

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。The different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level, the same below.

2.1.3 PEG-6000 胁迫对盐生草幼苗株高和根系活力的影响 如图 2 所示,株高的变化趋势与根系活力相近,均呈现随着 PEG-6000 浓度的升高而先上升后下降的趋势。PEG-6000 浓度为 4% 时均达到最大,株高为 6.34 cm,与对照相比上升了 1.28%,但差异不显著($P>0.05$),根系活力为 107.51%,与对照相比上升了 7.51%,且差异显著($P<0.05$)。当 PEG 浓度为 20% 时,株高为 3.82 cm,与对照相比下降了 38.98%,根系活力为 75.40%,与对照相比显著下降了 24.60%。

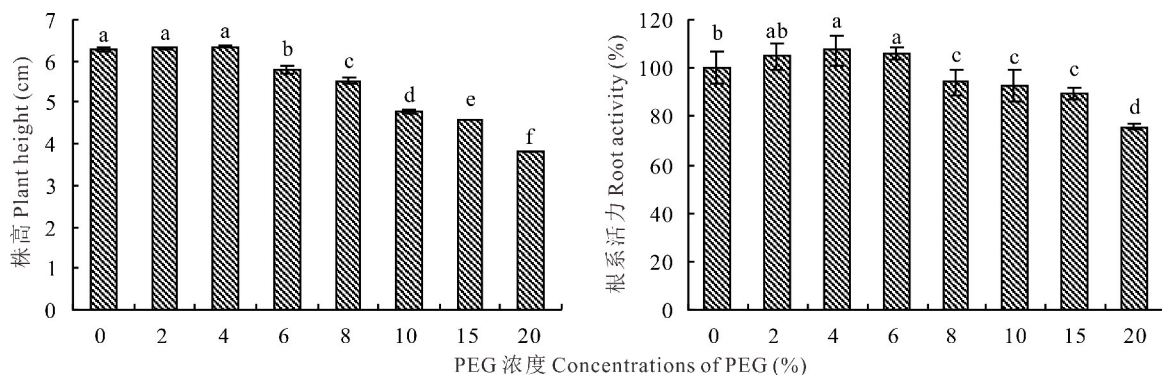


图 2 盐生草幼苗株高和根系活力在 PEG-6000 处理下的变化

Fig. 2 Changes of plant height and root activity of *H. glomeratus* seedlings treated with PEG-6000

2.1.4 综合聚类分析及主成分分析 为进一步研究 PEG-6000 胁迫对盐生草幼苗生长的抑制程度,对 PEG-6000 胁迫处理下的种子萌发和幼苗生长指标进行聚类分析(图 3),以欧式距离 15 为界,将 PEG-6000 处理的 8 个浓度梯度聚为了两类,其中以浓度为 0~6% 为第 I 类,8%~20% 为第 II 类。得出 PEG-6000 胁迫盐生草萌发生长的临界耐受浓度为 6%,对 6% 胁迫处理下 6 个性状指标进行主成分分析(表 3),提取了 2 个主成分,主成分 1 的特征值为 4.27,贡献率为 70.27%,主成分 2 的特征值为 1.78,贡献率 29.73%。累计贡献率达 100.00%,其中主成分 1 在鲜重和干重上具有最高载荷(1.00),主成分 2 在发芽势上具有最高载荷(0.87),主成分 1 的贡献率约为主成分 2 的 2 倍。

2.2 4 种钠盐胁迫对盐生草种子萌发特性的影响

2.2.1 4 种钠盐胁迫对盐生草种子萌发指标的影响

如表 4 可知,4 种钠盐胁迫处理对盐生草种子萌发指标的影响有所不同,随着 Na_2SO_4 浓度的升高,盐生草种子的发芽率和发芽势呈现先升高后下降的趋势。在 Na_2SO_4 浓度为 $25.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 发芽率和发芽势均达到最大值,发芽率为 93.00% ,较对照升高 4.49% 。发芽势为 81.50% ,较对照相比升高 2.52% 。当 Na_2SO_4 达到最大处理浓度 $150.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发芽率为 9.00% ,较对照降低了 89.89% 。发芽势为 4.67% ,较对照降低了 94.13% 。表明低浓度 Na_2SO_4 胁迫对植物生长具有一定的促进作用,但超过一定的浓度后表现为抑制。随着 $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3, \text{NaCl}$ 浓度的升高,盐生草种子的发芽率和发芽势总体呈现下降的趋势。当 NaCl 达到最大处理浓度 $300.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发芽率较对照降低了 96.26% ;发芽势较对照降低了 97.48% 。当 NaHCO_3 达到最大处理浓度 $300.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发芽率较对照降低了 97.75% 。发芽势较对照降低了 97.48% 。当 Na_2CO_3 达到最大处理浓度 $150.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时盐生草种子不发芽。表明高浓度盐处理均对种子的萌发具有严重抑制作用。4 种钠盐溶液相比,除了具有相同的 Na^+ 外, NaHCO_3 和 Na_2CO_3 具有较高的 pH 值。当 4 种盐处理在 Na^+ 相同的情况下, $100.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}, 100.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3, 50.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3, 50.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SO}_4$ 相比,对盐生草种子萌发的毒害作用为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ 。与对照相比差异显著 ($P < 0.05$)。

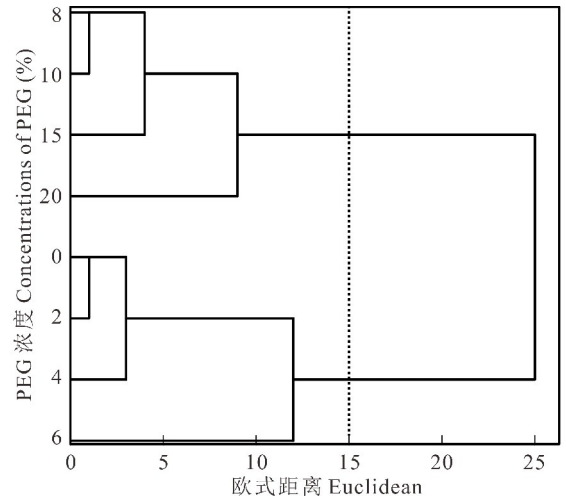


图 3 PEG-6000 处理下不同浓度的聚类分析

Fig. 3 Clustering analysis of PEG-6000 treatments at different concentrations

表 3 盐生草种子萌发特性在 PEG-6000 处理下的主成分分析

Table 3 Principal component analysis of germination characteristics of *H. glomeratus* seeds treated with PEG-6000

成分 Principal component	特征值 Eigen value	累计贡献值 Cumulative contribution rate (%)	发芽势 Germination energy	发芽率 Germination percentage	株高 Plant height	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	根系活力 Root activity
1	4.27	70.27	0.20	0.67	0.88	1.00	1.00	0.87
2	1.78	100.00	0.87	-0.74	-0.48	-0.04	0.10	0.49

2.2.2 4 种钠盐胁迫对盐生草幼苗株高的影响

如图 4 所示,盐生草幼苗株高的变化趋势与发芽势和发芽率相接近,均随着 $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3, \text{NaCl}, \text{Na}_2\text{SO}_4$ 浓度的增加,呈现下降的趋势,且各浓度处理的盐生草幼苗株高均低于对照, Na_2SO_4 处理在浓度低于 $37.50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时与对照差异不显著 ($P > 0.05$), $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3, \text{NaCl}$ 各浓度处理均与对照差异显著 ($P < 0.05$)。且当 $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3, \text{NaCl}, \text{Na}_2\text{SO}_4$ 的浓度分别为 $25.00, 50.00, 200.00, 150.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,盐生草幼苗株高降为 $2.24, 2.18, 2.00, 1.99 \text{ cm}$,与对照相比了均下降到对照的 50.00% 以下。 $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3$ 在浓度为 $75.00 \sim 125.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}, 125.00 \sim 300.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间盐生草幼苗株高趋于稳定。在 Na^+ 浓度相同的处理条件下,即 $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3, \text{NaCl}, \text{Na}_2\text{SO}_4$ 的浓度为 $50.00, 100.00, 100.00, 50.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,4 种盐处理下的盐生草幼苗株高为 $1.06, 1.17, 3.10, 3.66 \text{ cm}$,说明 4 种盐处理对盐生草幼苗株高的抑制作用大小为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ 。

2.2.3 4 种钠盐胁迫对盐生草幼苗根系活力的影响

由图 5 可知,根系活力的变化趋势与株高相近,随着 $\text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3, \text{NaCl}, \text{Na}_2\text{SO}_4$ 浓度的增加,各盐处理中盐生草幼苗根系活力均呈现下降的趋势,且各处理组

表 4 盐生草种子发芽势和发芽率在 4 种盐处理下的变化

Table 4 Changes of germination energy and germination rate of *H. glomeratus* seeds treated with four salts (%)

发芽指标 Germination index	浓度 Concentration (mmol · L ⁻¹)	NaCl		NaHCO ₃		Na ₂ SO ₄		Na ₂ CO ₃	
		浓度 Concentration (mmol · L ⁻¹)	NaCl	NaHCO ₃	浓度 Concentration (mmol · L ⁻¹)	Na ₂ SO ₄	Na ₂ CO ₃		
发芽率 Germination percentage	0.00	89.00±0.75a	89.00±0.75a	0.00	89.00±0.75a	89.00±0.75a			
	25.00	76.50±2.37b	70.25±0.82b	12.50	92.00±0.58a	67.50±2.49b			
	50.00	72.00±5.85b	63.33±0.44c	25.00	93.00±1.44a	54.50±1.43c			
	75.00	61.33±3.58c	29.00±2.16d	37.50	84.00±0.82ab	23.00±1.53d			
	100.00	53.00±2.75d	13.25±1.56e	50.00	80.50±3.07b	11.00±2.69e			
	125.00	39.75±2.06d	8.67±1.09f	62.50	78.00±2.63b	9.00±3.86f			
	150.00	20.75±1.27e	6.50±0.47fg	75.00	62.67±2.37c	6.00±1.73ef			
	175.00	12.00±1.76ef	5.33±0.59fgh	87.50	51.33±5.17cd	4.67±1.18f			
	200.00	11.00±1.44f	4.00±0.82gh	100.00	46.33±1.93de	4.00±0.82f			
	250.00	10.00±2.50f	3.50±0.94gh	125.00	38.67±6.06e	2.75±0.38f			
300.00	3.33±1.09f	2.00±0.00h	150.00	9.00±3.42f	0				
发芽势 Germination energy	0.00	79.50±3.27a	79.50±3.27a	0.00	79.50±3.27a	79.50±3.27a			
	25.00	67.00±0.95ab	54.50±2.25b	12.50	81.33±5.25a	49.00±3.50b			
	50.00	61.50±4.36b	44.00±4.11c	25.00	81.50±1.39a	36.50±5.33b			
	75.00	46.75±4.51c	11.50±1.33d	37.50	72.00±1.72a	6.50±0.90c			
	100.00	32.00±2.73c	8.00±0.94de	50.00	71.00±1.65a	5.50±0.85c			
	125.00	13.00±2.10c	6.50±0.97de	62.50	60.50±0.85b	4.00±1.15c			
	150.00	10.00±1.33c	5.00±1.44e	75.00	21.00±4.96c	3.50±0.83c			
	175.00	8.00±1.63c	4.00±0.00e	87.50	11.00±2.66cd	3.50±0.47c			
	200.00	5.00±0.85c	3.00±0.50e	100.00	8.00±3.30cd	3.00±0.50c			
	250.00	3.33±0.59c	2.67±0.54e	125.00	7.33±0.54cd	2.00±0.00c			
300.00	2.00±0.00c	2.00±0.00e	150.00	4.67±1.74d	0				

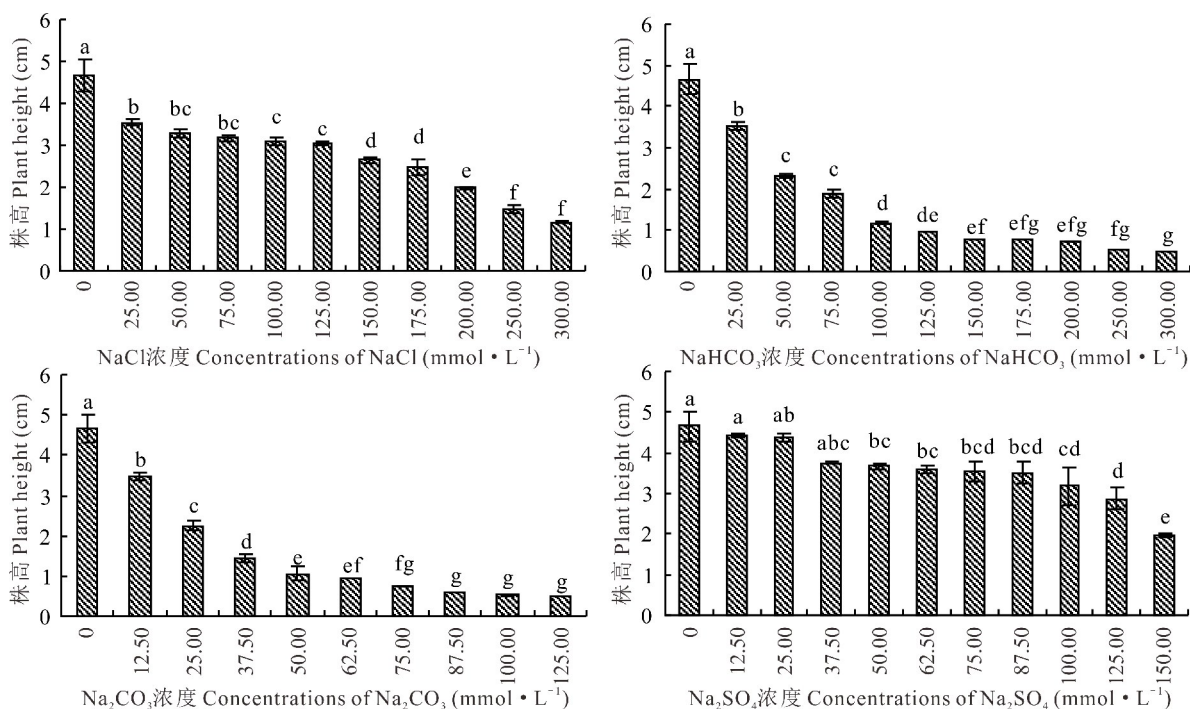


图 4 盐生草幼苗株高在 4 种盐处理下的变化

Fig. 4 Changes of plant height of *H. glomeratus* seedlings treated with four salts

与对照差异显著($P < 0.05$)。NaCl, Na_2SO_4 处理浓度分别达到最大 $300.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $150.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 盐生草幼苗根系活力分别为 50.76% 和 51.70% 。当 Na_2CO_3 , NaHCO_3 浓度分别为 87.50 , $175.00 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 根系活力均低于对照 50.00% 。说明盐胁迫对盐生草幼苗的根系活力有抑制作用。且在 Na^+ 浓度相同的处理条件下, Na_2CO_3 对盐生草幼苗根系活力抑制作用最大, Na_2SO_4 对其抑制作用最小。这说明碱性盐胁迫下对植株幼苗根系的毒害作用大于中性盐胁迫。

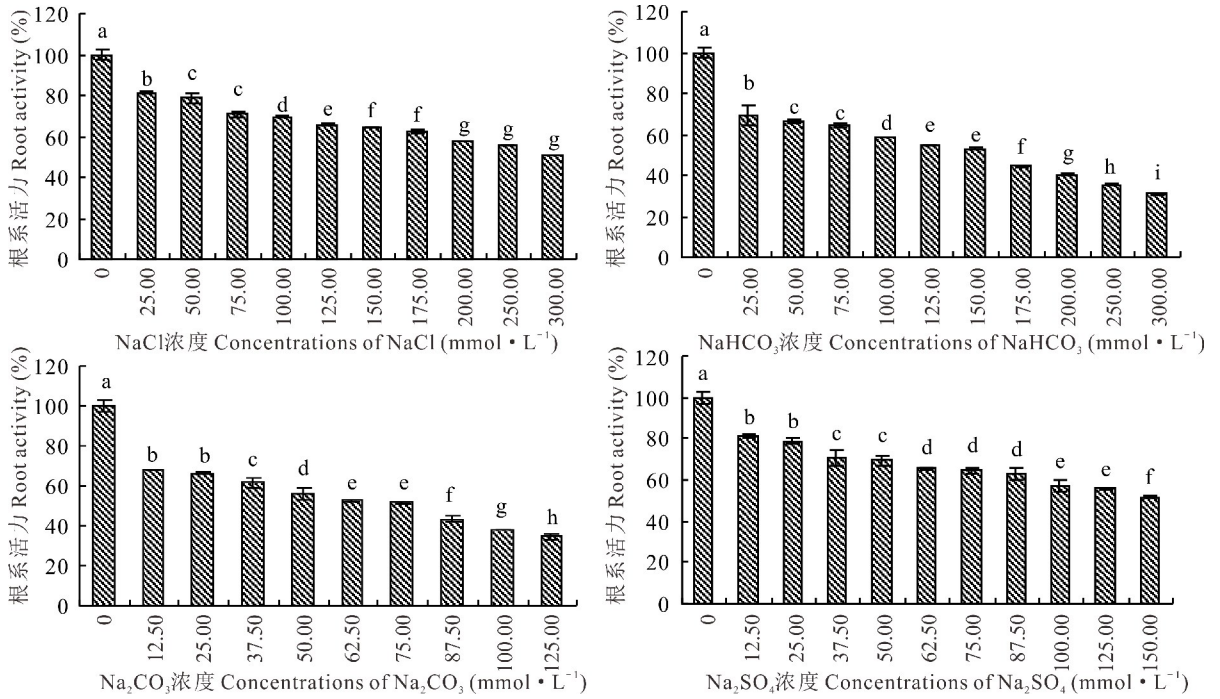


图 5 盐生草幼苗根系活力在 4 种盐处理下的变化

Fig. 5 Changes of root activity of *H. glomeratus* seedlings treated with four salts

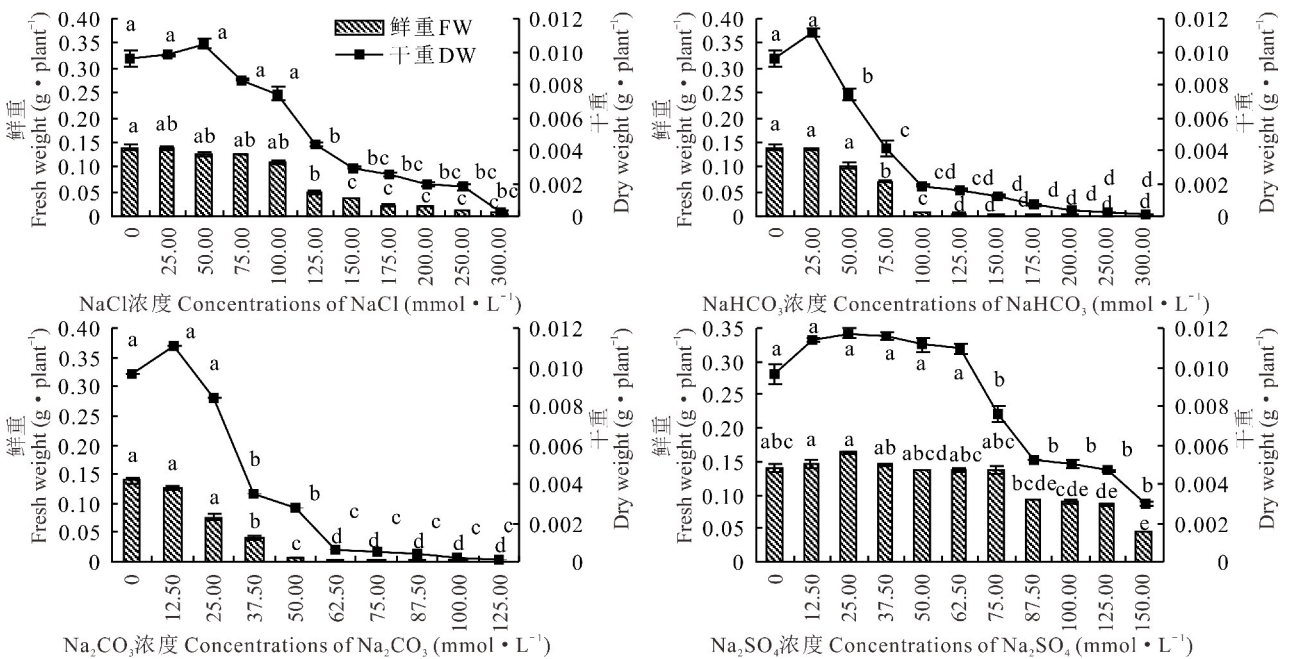


图 6 盐生草幼苗鲜重和干重在 4 种盐处理下的变化

Fig. 6 Changes of fresh weight and dry weights of *H. glomeratus* seedlings treated with four salts

2.2.4 4种钠盐胁迫对盐生草幼苗鲜重及干重的影响 随着 Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl 浓度的升高, 盐生草幼苗鲜重均呈现下降的趋势(图 6)。 Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl 的处理浓度分别在 $0\sim 25.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0\sim 50.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, $0\sim 100.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时与对照相比变化差异不显著($P>0.05$), 后者趋于稳定。随着 Na_2SO_4 浓度的增加, 盐生草幼苗鲜重呈现先缓慢上升后下降的趋势, 且处理与对照差异不显著($P>0.05$)。当 NaHCO_3 , NaCl , Na_2SO_4 处理浓度达到最大时, 与对照相比其鲜重下降了 99.21%, 95.26%, 67.20%。随着 Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl , Na_2SO_4 浓度的升高, 盐生草幼苗的干重均呈现先上升后下降的趋势。当 Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl , Na_2SO_4 浓度为 37.50, 75.00, 125.00, 125.00 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 盐生草幼苗的干重均降为对照的 50.00% 以下。

2.2.5 综合聚类分析及主成分分析 首先运用模糊数学(Fuzzy 数学)中的隶属函数法对单位不同的各项指标测定值进行标准化^[18], 然后对各项测定指标进行聚类分析(图 7), Na_2CO_3 胁迫处理下的不同浓度在欧式距离为 15 时聚为两类, $0\sim 25.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 I 类, $37.50\sim 150.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 II 类。 NaHCO_3 胁迫处理下的不同浓度在欧式距离为 15 时聚为两类, $0\sim 50.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 I 类, $75.00\sim 300.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 II 类。 NaCl 胁迫处理下的不同浓度在欧式距离为 15 时聚为两类, $0\sim 100.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 I 类, $125.00\sim 300.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 II 类。 Na_2SO_4 胁迫处理下的不同浓度在欧式距离为 20 时聚为两类, $0\sim 62.50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 I 类, $75.00\sim 150.00\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 为第 II 类。 Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl , Na_2SO_4 胁迫盐生草幼苗萌发生长的临界耐受浓度分别为: 25.00, 50.00, 100.00, 62.50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。将 Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NaCl , Na_2SO_4 耐受临界浓度下的发芽势, 发芽率, 株高, 根系活力, 鲜重, 干重 6 个测定指标进行主成分分析(表 5 和表 6), 得出不同

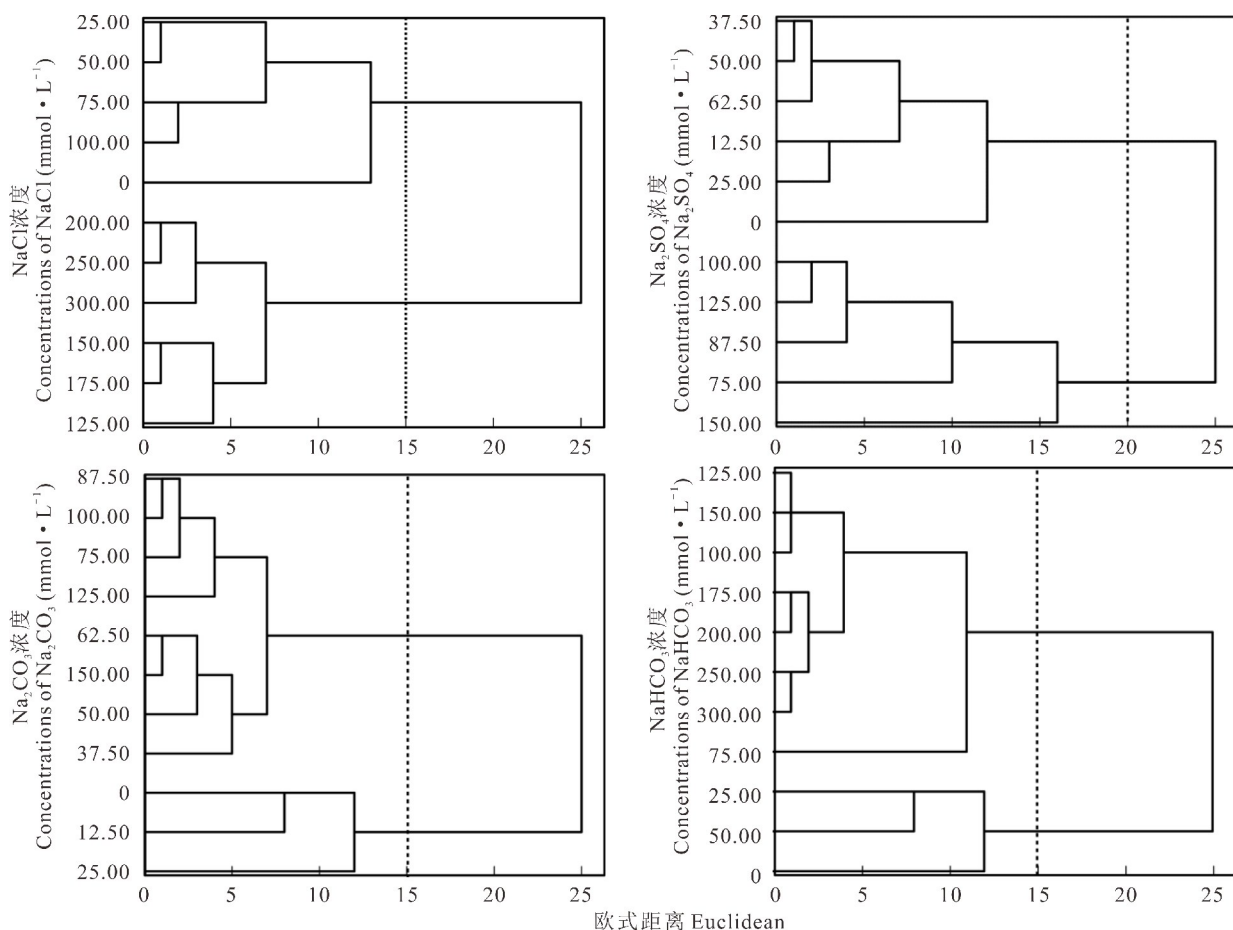


图 7 4种盐处理下不同浓度的聚类分析

Fig. 7 Clustering analysis of four salt treatments at different concentrations

盐胁迫下的 2 个主成分的累计贡献率均达到了 100.00%。第 1 主成分的贡献率大约为第 2 主成分的 2 倍。结合 4 种盐胁迫的 2 个主成分及 6 个性状的相关系数可以发现, Na_2SO_4 的第 1 主成分的特征值为 3.92, 贡献率为 65.41%, 其在鲜重上有最大载荷, 第 2 主成分的特征值为 2.08, 贡献率为 34.59%, 其在干重上有最大载荷。NaCl 的第 1 主成分的特征值为 4.30, 贡献率为 71.71%, 其在干重上有最大载荷, 第 2 主成分的特征值为 1.70, 贡献率为 28.29%, 其在发芽势上有最大载荷。 Na_2CO_3 的第 1 主成分的特征值为 3.85, 贡献率为 64.24%, 其在根系活力上有最大载荷, 第 2 主成分的特征值为 2.15, 贡献率为 35.77%, 其在鲜重上有最大载荷。 NaHCO_3 的第 1 主成分的特征值为 3.88, 贡献率为 64.70%, 其在发芽率上有最大载荷, 第 2 主成分的特征值为 2.12, 贡献率为 35.30%, 其在干重上有最大载荷。

表 5 2 个因子的特征值及贡献率

Table 5 Eigen values of 2 principal components and their contribution and cumulative contribution

参数 Parameter	成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution (%)	累计贡献率 Cumulative contribution (%)
Na_2SO_4	PC1	3.92	65.41	65.41
	PC2	2.08	34.59	100.00
NaCl	PC1	4.30	71.71	71.71
	PC2	1.70	28.29	100.00
Na_2CO_3	PC1	3.85	64.24	64.24
	PC2	2.15	35.77	100.00
NaHCO_3	PC1	3.88	64.70	64.70
	PC2	2.12	35.30	100.00

表 6 各因子成分矩阵

Table 6 Factor matrix of each component

相关系数 Correlation coefficient	Na_2SO_4		NaCl		Na_2CO_3		NaHCO_3	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
鲜重 Fresh weight	0.99	-0.12	-0.95	-0.31	-0.22	0.98	0.91	-0.43
干重 Dry weight	-0.17	0.99	0.97	0.24	0.73	0.69	0.42	0.91
发芽势 Germination energy	0.10	0.04	-0.01	1.00	-0.98	0.20	-0.40	-0.92
发芽率 Germination percentage	0.33	0.95	0.81	-0.58	0.73	0.69	0.98	0.22
株高 Plant height	-0.96	-0.28	0.95	0.30	-0.97	0.23	-0.99	0.11
根系活力 Root activity	0.94	-0.34	0.94	-0.35	0.91	-0.41	-0.82	0.56

3 讨论

种子萌发期是植株生长的一个关键时期, 决定植物群体在逆境条件下能否建植成功。而种子的发芽率和发芽势是衡量种子品质的重要指标^[19-20]。本研究表明: 一方面, 在干旱胁迫下, 盐生草种子的发芽势和发芽率均呈现随 PEG-6000 浓度的升高而下降的趋势, 当 PEG-6000 浓度为 20% 时, 盐生草种子的发芽率为 14.50%, 发芽势为 2.67%, 且与对照相比差异显著 ($P < 0.05$)。说明 PEG-6000 模拟的干旱胁迫对盐生草种子的萌发有抑制作用, 这与徐建欣等^[21]对新疆橡胶草 (*Taraxacum kok-saghyz*) 种子萌发试验的结论相吻合。另一方面, 在 4 种钠盐溶液胁迫下, 盐生草种子的发芽势和发芽率总体呈现随盐溶液浓度的升高而下降的趋势。NaCl, Na_2SO_4 两种盐溶液低浓度时对种子萌发抑制作用没有显著差异, 这与李锦锋等^[22]对白茎盐生草 (*Halogeton arachnoides*) 萌发试验的结论一致。刘克彪等^[23]利用钠盐胁迫处理罗布麻 (*Apocynum venetum*) 种子、阎秀峰等^[24]用碳酸盐处理星星草 (*Puccinellia tenuiflora*) 种子得出低浓度的碳酸盐对种子萌发有增效效应。本试验结果与之有所不同, 可能与 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 设定浓度以及盐生草的耐盐碱性不同有关。NaCl, Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 在具有相同的 Na^+ 浓度的条件下, NaHCO_3 和 Na_2CO_3 溶液呈碱性, pH 值较高。当 4 种盐处理在 Na^+ 相同的情况下, 100.00 mmol · L⁻¹ NaCl, 100.00 mmol · L⁻¹ NaHCO_3 , 50.00 mmol · L⁻¹ Na_2CO_3 , 50.00 mmol · L⁻¹ Na_2SO_4 时的发芽率 53.00%, 13.00%, 11.00%, 80.50%, 说明 4 种盐处理对盐生草种子发芽的毒害

作用为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaHCO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ 。李锦锋等^[22]用钠盐胁迫处理白茎盐生草种子,得到 NaCl 对其萌发及生长的抑制作用强于 Na_2SO_4 。Lin 等^[25]用中性盐和碱性盐模拟土壤盐碱化条件,对羊草(*Leymus chinensis*)幼苗进行胁迫,得出碱性盐对羊草幼苗的危害更加严重。

对处理 7 d 的盐生草幼苗的株高、干重、鲜重以及根系活力进行测定得出,随着 4 种钠盐溶液浓度的升高,盐生草幼苗的株高、鲜重、干重以及根系活力总体呈现下降的趋势。黄高鉴等^[26]研究了钠盐胁迫对柳枝稷(*Panicum virgatum*)生物量的影响,表明盐胁迫能够显著降低其生物量($P < 0.05$),对柳枝稷生长起到明显的抑制作用。本研究中,随着 4 种盐浓度的增加,各钠盐处理下盐生草幼苗株高均呈梯度下降,鲜重、干重均表现为持续降低的趋势,且与对照相比差异均显著($P < 0.05$),说明盐处理对盐生草幼苗生长有明显抑制作用,熊雪等^[27]研究发现紫花苜蓿(*Medicago sativa*)受到盐胁迫后发生渗透使植株生长受到抑制,生物量显著降低。本研究观察 7 d 后幼苗的根系活力,得出随着 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 、 Na_2SO_4 浓度的升高,盐生草幼苗的根系活力均呈现下降的趋势。徐宁等^[28]研究了 NaCl 胁迫对高粱(*Sorghum bicolor*)种子萌发和幼苗生长特性的影响,得到盐胁迫下幼苗根系活力随盐浓度的升高呈下降的趋势。本研究表明盐胁迫下离子毒害作用会降低幼苗根系活力。同时,随着 PEG-6000 的浓度升高,盐生草幼苗的株高、鲜重、干重以及根系活力,总体呈现先上升后下降的变化趋势,在 4% 时达到最大值,但与对照相比差异不显著($P > 0.05$)。在 PEG-6000 浓度为 6%~20% 时,盐生草株高、鲜重、干重以及根系活力显著下降。这与杨智等^[29]研究得出干旱胁迫能使垂穗披碱草(*Elymus nutans*)的生物量和根系活力显著降低($P < 0.05$)的试验结论相一致。表明干旱和盐胁迫都会抑制植物的萌发及幼苗的生长。 Na_2SO_4 处理下,对盐生草幼苗的生长抑制作用最小, Na_2CO_3 处理下,对盐生草幼苗的生长抑制作用最大。

主成分分析是将原来各项指标重新组合成一组新的彼此独立的几个综合指标,用少数的综合指标来反映原来多指标的信息^[30]。李丰先等^[31]运用此方法得出发芽率和干重可作为萌发期高粱耐碱性的主要评价指标。杨帆等^[32]得出根长、芽鲜重、发芽率可作为萌发期高粱耐盐性的主要评价指标。蔺军^[33]得出相对发芽指数、发芽率可作为萌发期燕麦(*Avena sativa*)耐盐性的主要评价指标。本研究通过综合聚类分析得出:盐生草耐 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 、 Na_2SO_4 的临界浓度为 25.00, 50.00, 100.00, 62.50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 耐 PEG-6000 的临界浓度为 6%。以 4 种钠盐胁迫及 PEG-6000 胁迫的临界浓度的各项测定指标进行主成分分析得出, Na_2SO_4 和 NaHCO_3 的发芽指标贡献率较大,NaCl 的干重指标贡献率较大, Na_2CO_3 的根系活力指标贡献率较大,PEG-6000 的鲜重指标贡献率较大。因此生物量和发芽指标可作为评价盐生草萌发期耐盐及耐干旱的主要评价指标。

4 结论

综上所述,随着 PEG-6000 及 4 种钠盐浓度的升高,盐生草种子萌发和幼苗生长指标呈现不同程度的变化趋势,6% PEG-6000 胁迫下鲜重为主要鉴定指标。在 NaHCO_3 、 Na_2SO_4 的胁迫浓度分别为 50.00、62.50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时萌发指标可作为评价盐生草萌发期耐盐胁迫的主要鉴定指标; Na_2CO_3 的胁迫浓度为 25.00 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根系活力可作为评价盐生草萌发期耐盐胁迫的主要鉴定指标;NaCl 胁迫浓度为 100.00 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时干重为主要鉴定指标。本研究表明在 6% PEG-6000 环境下以及 50.00 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 、62.50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2SO_4 、25.00 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 、100.00 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 下,盐生草均可正常萌发生长。本研究初步揭示了盐生草萌发期对干旱胁迫以及盐胁迫的耐性程度,为以后干旱、盐碱地种植盐生草进行生态修复提供了一定的参考依据。

参考文献 References:

- [1] Wang S T, Feng Q, Zhou Y P, *et al.* Dynamic changes in water and salinity in saline-alkali soils after simulated irrigation and leaching. *PLoS One*, 2017, 12(11): 25–28.
- [2] Wang J C. Study on the salt tolerance mechanisms of ion compartmentation in halophyte *Halogeton glomeratus*. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
汪军成. 盐生草盐分区隔化耐盐机制研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [3] Chai Y, Sun Z J, Li P Y, *et al.* Evaluation of the salt resistance of the *Cynodon dactylon* germplasm from Xinjiang during the

- seed germination period. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(8): 154–167.
- 柴艳, 孙宗玖, 李培英, 等. 新疆狗牙根种质芽期耐盐性综合评价. *草业学报*, 2017, 26(8): 154–167.
- [4] Chen D B, Wang Q Q, Sun Z Y, *et al.* Cloning and expression of *ZmXTH23* in maize (*Zea mays*) and its response to salt and drought stress. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2019, 27(9): 1533–1541.
- 陈东滨, 王茜茜, 孙智仪, 等. 玉米 *ZmXTH23* 的克隆、表达及其对盐胁迫和干旱胁迫的响应. *农业生物技术学报*, 2019, 27(9): 1533–1541.
- [5] Dong L, Li J Y. Relationship among drought, hydraulic metabolic, carbon starvation and vegetation mortality. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5477–5483.
- 董蕾, 李吉跃. 植物干旱胁迫下水分代谢、碳饥饿与死亡机理. *生态学报*, 2013, 33(18): 5477–5483.
- [6] Wu D Z, Shen Q F, Cai S G, *et al.* Ionic responses and correlations between elements and metabolites under salt stress in wild and cultivated barley. *Plant & Cell Physiology*, 2013, 54(12): 1976–1988.
- [7] Sun Z J, Li P Y, Ji P F. Evaluation on the salt tolerance of 38 germplasm resources of *Elytrigia repens* at seed germination stage. *Pratacultural Science*, 2012, 29(7): 1105–1113.
- 孙宗玖, 李培英, 吉鹏飞. 种子萌发期 38 份偃麦草种质耐盐性评价. *草业科学*, 2012, 29(7): 1105–1113.
- [8] Ruan Z P, Tang Y J, Zeng M J. Influence of drought stress on photosynthetic characteristics and activity of antioxidant enzymes of four species of palm seedlings. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(10): 1914–1919.
- 阮志平, 唐源江, 曾美涓. 干旱胁迫对 4 种棕榈植物幼苗光合特性及抗氧化酶活性的影响. *热带作物学报*, 2016, 37(10): 1914–1919.
- [9] Lin J X, Li X Y, Tang J H, *et al.* Effects of salt and alkali stresses on seed germination, early seedling growth and the metabolize of Na^+ and K^+ in shoots of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(6): 1148–1152.
- 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^+ 、 K^+ 代谢的影响. *麦类作物学报*, 2011, 31(6): 1148–1152.
- [10] Ma R J, Jiang Z G. Impact of global climate change on wildlife. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 3061–3066.
- 马瑞俊, 蒋志刚. 全球气候变化对野生动物的影响. *生态学报*, 2005, 25(11): 3061–3066.
- [11] Altaisan W A. Comparative effects of drought and salt stress on germination and seedling growth of *Pennisetum divisum* (Gmel.) Henr. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, 7(5): 640–646.
- [12] Zhang X, Lu G, Long W, *et al.* Recent progress in drought and salt tolerance studies in *Brassica* crops. *Breed Science*, 2014, 64(1): 60–73.
- [13] Wang J, Meng Y, Li B, *et al.* Physiological and proteomic analyses of salt stress response in the halophyte *Halogeton glomeratus*. *Plant Cell & Environment*, 2015, 38(4): 655–669.
- [14] Hu N, Li B C, Yao L R, *et al.* Effects of different heavy metals on the seed germination and establishment of *Halogeton glomeratus*. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(6): 66–81.
- 胡娜, 李葆春, 姚立蓉, 等. 不同重金属胁迫对盐生草种子萌发特性的影响. *草业学报*, 2019, 28(6): 66–81.
- [15] Zhang C X, Bai T Q, Xie D H, *et al.* Effects of PEG-6000 simulation drought stress on seed germination of mango (*Mangifera indica* L.). *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(3): 600–606.
- 张翠仙, 柏天琦, 解德宏, 等. PEG-6000 模拟干旱胁迫对芒果种子萌发的影响. *南方农业学报*, 2019, 50(3): 600–606.
- [16] Su M F, Wei X H, Xin X Q, *et al.* Exogenous cGMP regulates seed germination of ryegrass under salt stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(17): 6171–6179.
- 宿梅飞, 魏小红, 辛夏青, 等. 外源 cGMP 调控盐胁迫下黑麦草种子萌发机制. *生态学报*, 2018, 38(17): 6171–6179.
- [17] Liu Y, Jiang H, Zhao Z, *et al.* Abscisic acid is involved in brassinosteroids-induced chilling tolerance in the suspension cultured cells from *Chorispora bungeana*. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(9): 853–862.
- [18] Yu J, Li H Y, Li J, *et al.* Evaluation to salt resistance of two *Lotus corniculatus* strains in germination period. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(2): 414–419.
- 于洁, 李鸿雁, 李俊, 等. 2 个百脉根品系种子萌发期的耐盐性评价. *草地学报*, 2018, 26(2): 414–419.
- [19] Andersson S. Paternal effects on seed germination: A barrier to the genetic assimilation of an endemic plant taxon. *Journal of Evolutionary Biology*, 2010, 21(5): 1408–1417.
- [20] Si D J, Yin S P, Zhao X Y, *et al.* Influences of hormones on seed germination of *Tamarix hispida* under NaCl stress. *Genomics and Applied Biology*, 2017, 36(5): 2068–2075.
- 司冬晶, 尹绍鹏, 赵曦阳, 等. NaCl 胁迫下激素对怪柳种子萌发的影响. *基因组学与应用生物学*, 2017, 36(5): 2068–2075.
- [21] Xu J X, Yang J, Wu J, *et al.* Effects of simulated drought stress by polyethylene glycol (PEG-6000) on seed germination and seedling growth of *Taraxacum kok-saghyz* Rodin (TKS) in Xinjiang. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015,

33(5): 96–100.

徐建欣, 杨洁, 吴景, 等. 聚乙二醇模拟干旱对新疆橡胶草种子萌发与幼苗生长的影响. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 96–100.

- [22] Li J F, Tie Y H, Wang W, *et al.* Effect of different salt stress on the seed germination of *Halogeton arachnoideus*. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(18): 5885–5889.
李锦锋, 铁云华, 王文, 等. 不同盐分胁迫对白茎盐生草种子萌发的影响. 安徽农业科学, 2014, 42(18): 5885–5889.
- [23] Liu K B, Jiang S X. Responses of *Apoocyneum venetum* seed germination to drought and salt stress. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(5): 214–221.
刘克彪, 姜生秀. 干旱和钠盐胁迫对罗布麻种子萌发的影响. 草业学报, 2016, 25(5): 214–221.
- [24] Yan X F, Sun G R. Salt stress on seed germination of *Puccinellia tenuiflora*. Pratacultural Science, 1994, 11(4): 27–31.
阎秀峰, 孙国荣. 盐分对星星草种子萌发的胁迫作用. 草业科学, 1994, 11(4): 27–31.
- [25] Lin J X, Li Z L, Wang Y N, *et al.* Effects of various mixed salt-alkaline stress conditions on seed germination and early seedling growth of *Leymus chinensis* from Songnen grassland of China. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2014, 42(1): 154–159.
- [26] Huang G J, Wang B, Yang Z P, *et al.* Effects of salt stress on biomass and quality of switchgrass. Tianjin Science & Technology, 2019, 46(2): 26–28.
黄高鉴, 王斌, 杨治平, 等. 盐胁迫对柳枝稷生物量及品质的影响. 天津科技, 2019, 46(2): 26–28.
- [27] Xiong X, Luo J C, Wei Y Q, *et al.* Effects of non-uniform salt stress on growth characteristics of alfalfa. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(11): 2072–2083.
熊雪, 罗建川, 魏雨其, 等. 不均匀盐胁迫对紫花苜蓿生长特性的影响. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2072–2083.
- [28] Xu N, Cao N, Wang C, *et al.* Effects of NaCl stress on seed germination and seedling physiological characteristics of wild and cultivated varieties of *Sorghum bicolor*. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(18): 55–57, 67.
徐宁, 曹娜, 王闯, 等. NaCl 胁迫对野生和栽培品种高粱种子萌发和幼苗生理特性的影响. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 55–57, 67.
- [29] Yang Z, Chen S Y, Zhou Q P, *et al.* Effects of exogenous silicon on root morphology of *Elymus nutans* seedlings under simulant drought stress. Pratacultural Science, 2019, 36(5): 1371–1378.
杨智, 陈仕勇, 周青平, 等. 外源硅添加对模拟干旱胁迫下垂穗披碱草苗期根系形态的影响. 草业科学, 2019, 36(5): 1371–1378.
- [30] Tian X X, Mao P C, Li S S, *et al.* Determination of salt-tolerant indexes and comprehensive evaluation of salt-tolerance at the seedlings of *Medicago sativa*. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(3): 545–553.
田小霞, 毛培春, 李杉杉, 等. 紫花苜蓿苗期耐盐指标筛选及耐盐性综合评价. 草地学报, 2017, 25(3): 545–553.
- [31] Li F X, Zhou Y F, Wang Y T, *et al.* Screening and identification of sorghum bicolor cultivars for alkali tolerance during germination. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(9): 1762–1771.
李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 等. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1762–1771.
- [32] Yang F, Wei X C, Zhang S C, *et al.* Comparison on salt and drought resistances of different varieties of *Sorghum dochna* at germination stage. Plant Physiology Journal, 2015, 51(10): 1604–1610.
杨帆, 魏晓岑, 张士超, 等. 不同甜高粱品种萌发期抗盐和抗旱性比较. 植物生理学报, 2015, 51(10): 1604–1610.
- [33] Lin J. Salt tolerance and drought resistance of *Secale cereal* and *Avena sativa* during the seed germination stage. China Herbivore Science, 2016, 36(4): 31–34.
蔺军. 黑麦和燕麦种子萌发期耐盐性、抗旱性比较. 中国草食动物科学, 2016, 36(4): 31–34.