

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.01.022

引用格式:皮冬鸽,李海燕,杨允菲,等.不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子萌发的影响[J].草地学报,2026,34(1):231–238

PI Dong-ge, LI Hai-yan, YANG Yun-fei, et al. Effects of Saline-alkali Stress on Seed Germination of *Artemisia sieversiana* and *A. lavandulifolia* under Different Temperatures[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(1):231–238

## 不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子萌发的影响

皮冬鸽<sup>1</sup>, 李海燕<sup>1\*</sup>, 杨允菲<sup>1</sup>, 郭健<sup>2</sup>, 岳秀泉<sup>1</sup>, 李亚楠<sup>1</sup>

(1. 东北师范大学草地科学研究所/植被生态科学教育部重点实验室/吉林松嫩草地生态系统国家野外科学观测研究站, 吉林 长春 130024; 2. 徐州工程学院环境工程学院, 江苏 徐州 221018)

**摘要:**本研究选取松嫩草地中两种常见蒿属植物大籽蒿(*Artemisia sieversiana* Ehrh. ex Willd.)和野艾蒿(*Artemisia lavandulifolia* DC.)种子为研究对象,在3组不同昼/夜变温条件(5/15℃, 15/25℃和25/35℃)下,通过模拟4种不同浓度(0, 12.5, 25, 50 mmol·L<sup>-1</sup>)的中性盐(NaCl)、碱性盐(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)以及复合盐碱(NaCl+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)胁迫,探究不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子发芽率、发芽速率、发芽势的影响。结果表明,大籽蒿和野艾蒿种子萌发均受到温度、盐碱胁迫、物种及其绝大部分互作效应的显著影响( $P<0.05$ )。大籽蒿种子发芽率、发芽速率、发芽势均随温度升高先上升后下降,最适萌发温度为15/25℃;野艾蒿种子发芽率、发芽速率、发芽势则随温度升高而下降,最适温度为5/15℃。大籽蒿种子萌发能力在各温度处理下均随3种盐碱溶液浓度增加而下降,且在中高浓度下显著低于CK( $P<0.05$ );野艾蒿种子萌发特征则在低温下随3种盐碱溶液浓度的增加先上升后下降,且在25.0 mmol·L<sup>-1</sup>单一盐溶液以及12.5 mmol·L<sup>-1</sup>单一碱溶液和混合溶液处理下均会显著促进野艾蒿种子萌发( $P<0.05$ )。在3种不同溶液中,两物种低浓度时萌发情况无显著差异,但整体上高浓度胁迫下混合溶液处理下发芽率明显低于单一盐、碱溶液,且盐碱胁迫和温度的交互作用产生双重抑制影响。

**关键词:**耐盐碱植物;种子萌发;盐碱化;温度

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)01-0231-08

## Effects of Saline-alkali Stress on Seed Germination of *Artemisia sieversiana* and *A. lavandulifolia* under Different Temperatures

PI Dong-ge<sup>1</sup>, LI Hai-yan<sup>1\*</sup>, YANG Yun-fei<sup>1</sup>, GUO Jian<sup>2</sup>, YUE Xiu-quan<sup>1</sup>, LI Ya-nan<sup>1</sup>

(1. Institute of Grassland Science, Ministry of Education Key Laboratory of Vegetation Ecology, Jilin Songnen Grassland Ecosystem National Observation and Research Station, Northeast Normal University, Changchun, Jilin Province 130024, China; 2. Xuzhou University of Technology, School of Environmental Engineering, Xuzhou, Jiangsu Province 221018, China)

**Abstract:** In this study, the effects of saline-alkali stress on seed germination characteristics of two common *Artemisia* species from the Songnen grassland-*Artemisia sieversiana* Ehrhart ex Willd. and *A. lavandulifolia* DC. were investigated under three groups of different day/night temperature conditions (5/15℃, 15/25℃, and 25/35℃). Four concentrations (0, 12.5, 25, and 50 mmol·L<sup>-1</sup>) of neutral salt (NaCl), alkaline salt (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), and composite saline-alkali solutions (NaCl+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) were simulated to assess germination percentage, germination rate, and germination potential. The results indicated that seed germination in both *A. sieversiana* and *A. lavandulaefolia* was significantly influenced by temperature, saline-alkali stress, species, and the most interactive effects ( $P<0.05$ ). The germination percentage rate, and potential of *A. sieversiana* seeds first

收稿日期:2025-01-10;修回日期:2025-06-09

基金项目:科技基础资源调查专项(2024FY100300);国家自然科学基金(32171682,32201477);“111”引智基地资助

作者简介:皮冬鸽(2002-),女,汉族,吉林四平人,硕士研究生,主要从事植物种群生态学研究,E-mail:3214979998@qq.com;\*通信作者  
Author for correspondence, E-mail:lihy697@nenu.edu.cn

decreased and then declined with the increase of temperature, and the optimal germination temperature condition was 15/25°C. *A. lavandulifolia* exhibited declining germination indicators with the increase of temperature, showing optimal performance at 5/15°C. The germination capacity of *A. sieversiana* seeds decreased with increase of the concentration of the three saline-alkali solutions under all the tested temperature treatments, and was significantly lower than CK at medium-high concentrations ( $P < 0.05$ ). The germination characteristics of *A. lavandulifolia* seeds increased first and then decreased with the increase of the concentration of three saline alkali solutions at low temperature. Treatment with 25.0 mmol·L<sup>-1</sup> single salt solution (NaCl), 12.5 mmol·L<sup>-1</sup> single alkali solution (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), and mixed saline-alkali solutions (NaCl + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) significantly promoted seed germination compared to the control ( $P < 0.05$ ). At low concentrations across the three solution types, both species showed no significant differences in germination performance. However, under stress with high-concentration of mixed saline-alkali solutions resulted in markedly lower germination rates compared to individual salt or alkali treatments. Additionally, the interactive effects of saline-alkali stress and temperature exerted dual inhibitory impacts on seed germination.

**Key words:** Salt tolerant plants; Seed germination; Salinization and alkalization; Temperature

种子萌发是植物种群延续和遗传信息传递的关键环节,决定植物个体生存与繁衍<sup>[1]</sup>。在适宜的环境条件下,种子能迅速萌发,有效地占据生态空间和养分资源,进而确保种群的持续与发展<sup>[2]</sup>。研究表明,植物种子萌发期对环境因素的敏感性远超植物的其他生长阶段,尤其是土壤盐碱化和温度波动等环境变化,对植物种子萌发的影响尤为深远<sup>[3]</sup>。土壤中的盐碱胁迫,主要是高盐和高pH值所引发的溶液渗透压增加及离子毒性作用,对种子萌发产生抑制作用,甚至导致种子失活<sup>[4]</sup>。多年生草本植物牛至(*Origanum vulgare* L.)在混合中性盐(NaCl、Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)和碱性盐胁迫(NaHCO<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)中,其种子萌发特性均随着浓度增加呈显著抑制趋势<sup>[5]</sup>。温度变化也会通过调控种子内部水解酶活性、影响膜结合蛋白功能及改变水分吸收速率等方式来影响种子萌发进程;此外,温度升高还可能进一步加剧盐碱化胁迫<sup>[6]</sup>。研究发现,低温和高温胁迫下,禾本科植物老芒麦(*Elymus sibiricus* L.)种子的发芽率和发芽指数均受到显著抑制<sup>[7]</sup>。

在干旱、半干旱地区,温度时常与盐碱环境共同作用,对植物种子萌发产生综合影响。作为全球三大苏打盐碱土地集中区域之一,松嫩草地正面临草地面积缩减、退化、沙化以及盐碱化等问题,其中盐碱化问题尤为严重<sup>[8]</sup>。通过培育耐盐碱植物来改善松嫩草地土壤盐碱化是最有效的生物措施之一,植物的抗盐碱性使其能够通过根系优化土壤结构,同时在其生长过程中释放的物质也有助于减轻土壤的盐碱度,从而为其他植物创造一个适宜的生长环境<sup>[9]</sup>。同时种子萌发是耐盐碱植物适应盐碱环境的关键阶段,直接关系到植物种群更新和群落稳定<sup>[10]</sup>。因此,了解不同植物种子对盐碱化和温度的

耐受范围,对分析种子萌发的影响因素以及促进草地生态恢复具有重要意义。

大籽蒿(*Artemisia sieversiana* Ehrh. ex Willd.)和野艾蒿(*Artemisia lavandulifolia* DC.)均为菊科(Asteraceae)蒿属(*Artemisia*)的植物,在松嫩平原盐碱土壤中广泛分布,均具有一定的抗盐碱能力<sup>[11]</sup>。大籽蒿为一年生或多年生草本植物,通常为群落恢复演替的先锋种<sup>[12]</sup>,广泛分布于全国各地,常见于路旁、荒地、河漫滩等,为良好的药用植物<sup>[13]</sup>;野艾蒿为多年生草本植物,具有发达的根系和较快的生长速率以及高的生物量等优良特点,分布广泛,对环境的适应性较强<sup>[14]</sup>。研究发现蒿属植物对多种生物和非生物胁迫均能展现出较好的抗性<sup>[15]</sup>。目前关于大籽蒿和野艾蒿种子萌发特性的研究主要集中在种子大小、重量性状等内在生物学特性方面对其萌发过程的影响<sup>[16-17]</sup>。但是,关于复合盐碱胁迫、温度及其交互作用对两物种种子萌发特性的影响尚无相关报道。本研究通过不同温度、盐碱类型和浓度对松嫩草地常见耐盐碱蒿属植物大籽蒿和野艾蒿种子萌发特征影响的研究,以深入理解两种植物在盐碱环境中的生存策略,并为盐碱地的生态修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试的大籽蒿和野艾蒿种子均采自东北师范大学吉林松嫩草地生态系统国家野外科学观测研究站。地理位置为44°40′~44°44′ N, 123°45′~123°47′ E,属于半湿润、半干旱的温带大陆性季风气候,年均温在4.6°C~6.4°C之间,年均降水量为300~450 mm<sup>[18]</sup>。

### 1.2 实验方法

采用 NaCl 溶液、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液以及混合溶液(摩尔质量比为 NaCl:Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>=1:1)分别模拟盐胁迫、碱胁迫和盐碱复合胁迫环境,每个溶液中设置 3 个不同浓度

梯度(详见表 1)。同时设置 3 组昼/夜变温处理,分别为 5/15℃、15/25℃和 25/35℃,每组温度条件均为 10 h 高温光照(光照强度:9600 lx;相对湿度:40%)与 14 h 低温黑暗(相对湿度:40%)交替进行<sup>[19]</sup>。

表 1 不同盐碱溶液浓度及溶液 pH 值

Table 1 Concentration and pH of different saline-alkali solutions

| 溶液<br>Solution | 浓度<br>Concentration/<br>(mmol·L <sup>-1</sup> ) | pH 值 | 溶液<br>Solution                  | 浓度<br>Concentration/<br>(mmol·L <sup>-1</sup> ) | pH 值 | 溶液<br>Solution                       | 浓度<br>Concentration/<br>(mmol·L <sup>-1</sup> ) | pH 值<br>pH value |
|----------------|-------------------------------------------------|------|---------------------------------|-------------------------------------------------|------|--------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------|
| NaCl           | 12.5                                            | 6.7  | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 12.5                                            | 10.4 | NaCl+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 12.5                                            | 10.9             |
|                | 25.0                                            | 6.8  |                                 | 25.0                                            | 10.8 |                                      | 25.0                                            | 11.2             |
|                | 50.0                                            | 7.0  |                                 | 50.0                                            | 11.0 |                                      | 50.0                                            | 11.4             |

采用纸培法进行种子萌发实验,选择饱满、大小均匀一致的大籽蒿和野艾蒿种子,经 0.5% 高锰酸钾溶液浸泡消毒 10 min,用蒸馏水彻底冲洗干净。消毒完成后,将种子放入置有 13 cm 双层滤纸的培养皿中,每个培养皿 50 粒种子,并分别加入 10 mL 不同浓度的盐、碱处理溶液,确保滤纸充分湿润无滴液,同时以等量的蒸馏水作为对照组(CK),每组 3 次重复。实验过程中,每天定时用称重法补充蒸发失去的水分,以保持溶液浓度恒定。每天观察并记录种子发芽数,实验共持续 15 d。

### 1.3 测定指标

发芽率=最终发芽种子数/种子总数×100%。

发芽速率=每日发芽率之和/实验天数(15 d)<sup>[19]</sup>。

发芽势=指定天数的积累发芽种子数/种子总数×100%。

其中,由于大籽蒿种子和野艾蒿种子的萌发状况存在差异,大籽蒿种子的发芽势采用前 3 天累积的发芽种子数,而野艾蒿种子的发芽势采用前 5 天累积的发芽种子数。

### 1.4 数据统计及分析

数据分析均采用 SPSS 26.0 软件进行处理。通过一般线性模型中三因素方差分析(显著性水平  $\alpha=0.05$ )分析温度、盐碱胁迫、物种及其交互作用对两物种种子萌发的影响。采用 LSD 法进行多重比较,分析同一盐碱类型下不同浓度和温度间的差异,以及同一温度条件下不同溶液类型间的差异。文中图表绘制均使用 Origin 2021 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子发芽率的影响

温度、盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子的发芽率均产生了显著影响,且两物种间差异显著( $P<0.05$ )(表 2)。在 3 种盐碱溶液处理下,大籽蒿种子的发芽率随温度升高呈现先上升后下降的趋势,其最适萌发温度为 15/25℃,除 25/35℃且 12.5 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl 和混合溶液处理外,其余同一浓度溶液在低温和高温处理下的发芽率均显著低于 15/25℃处理时( $P<0.05$ )(图 1A)。在 3 组温度条件下,大籽蒿种子的发芽率均随溶液浓度的增加而呈现下降趋势,在 15/25℃条件下,各浓度中 NaCl 溶液处理组的发芽率与 CK 相比均无显著差异;Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液和混合溶液处理组在中、高浓度下较 CK 显著下降( $P<0.05$ );在高温和低温条件下,除 12.5 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液处理外,其余浓度处理下的发芽率均显著低于 CK( $P<0.05$ )(图 1A)。野艾蒿种子的发芽率随温度升高整体呈下降趋势,最适萌发温度为 5/15℃,在此温度条件下,随着溶液浓度的增加,发芽率呈现先升高后降低的趋势,NaCl 溶液处理在 25 mmol·L<sup>-1</sup> 时发芽率最高,为 30.67%;Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和混合溶液处理则在 12.5 mmol·L<sup>-1</sup> 浓度下发芽率最高,分别为 23.33% 和 42.67%(图 1B)。两物种在各温度下的中高浓度处理时,混合盐碱溶液下的发芽率均低于 NaCl 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液处理中( $P<0.05$ ),中高温下 50 mmol L<sup>-1</sup> 混合溶液胁迫时,野艾蒿种子发芽率均为 0%(图 1)。

表 2 温度(T)、盐碱(SA)及其物种(P)对种子发芽率、发芽速率和发芽势影响的三因素方差分析

Table 2 Three-way ANOVA of the effects of temperature (T), salt-alkali concentration (SA), and plant species (P) on seed germination percentage, germination rate and germination potential

| 胁迫类型 Stress                          | 变异来源 Source | 发芽率 Germination percentage | 发芽速率 Germination rate | 发芽势 Germination potential |
|--------------------------------------|-------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| NaCl                                 | SA          | 24.051**                   | 29.274**              | 70.541**                  |
|                                      | T           | 25.171**                   | 40.403**              | 16.519**                  |
|                                      | P           | 1910.655**                 | 2392.147**            | 1308.794**                |
|                                      | SA×T        | 3.800**                    | 4.952*                | 2.679*                    |
|                                      | T×P         | 77.659**                   | 70.367**              | 77.395                    |
|                                      | SA×P        | 37.748**                   | 45.674**              | 14.249**                  |
|                                      | SA×T×P      | 10.133**                   | 8.127**               | 2.611*                    |
| Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>      | SA          | 61.212**                   | 62.630**              | 56.464**                  |
|                                      | T           | 140.319**                  | 176.884**             | 54.983**                  |
|                                      | P           | 427.001**                  | 491.401**             | 878.027**                 |
|                                      | SA×T        | 17.652**                   | 19.548**              | 3.746*                    |
|                                      | T×P         | 1.175                      | 2.371                 | 42.173**                  |
|                                      | SA×P        | 2.069                      | 0.861                 | 40.625**                  |
|                                      | SA×T×P      | 61.212**                   | 62.630**              | 5.886**                   |
| NaCl+Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | SA          | 20.653**                   | 20.507**              | 34.746**                  |
|                                      | T           | 189.260**                  | 215.361**             | 77.919**                  |
|                                      | P           | 1974.438**                 | 2223.004**            | 515.633**                 |
|                                      | SA×T        | 7.883**                    | 5.474**               | 1.143                     |
|                                      | T×P         | 74.826**                   | 60.674**              | 37.275**                  |
|                                      | SA×P        | 114.781**                  | 152.614**             | 54.446**                  |
|                                      | SA×T×P      | 11.070**                   | 7.809**               | 2.460                     |

注:表中数据为三因素方差分析中的F值,\*和\*\*分别表示差异显著性水平为 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 

Note: Data in the table are F values by three-way ANOVA, \* and \*\* indicate significant difference at the 0.05 and 0.01 level

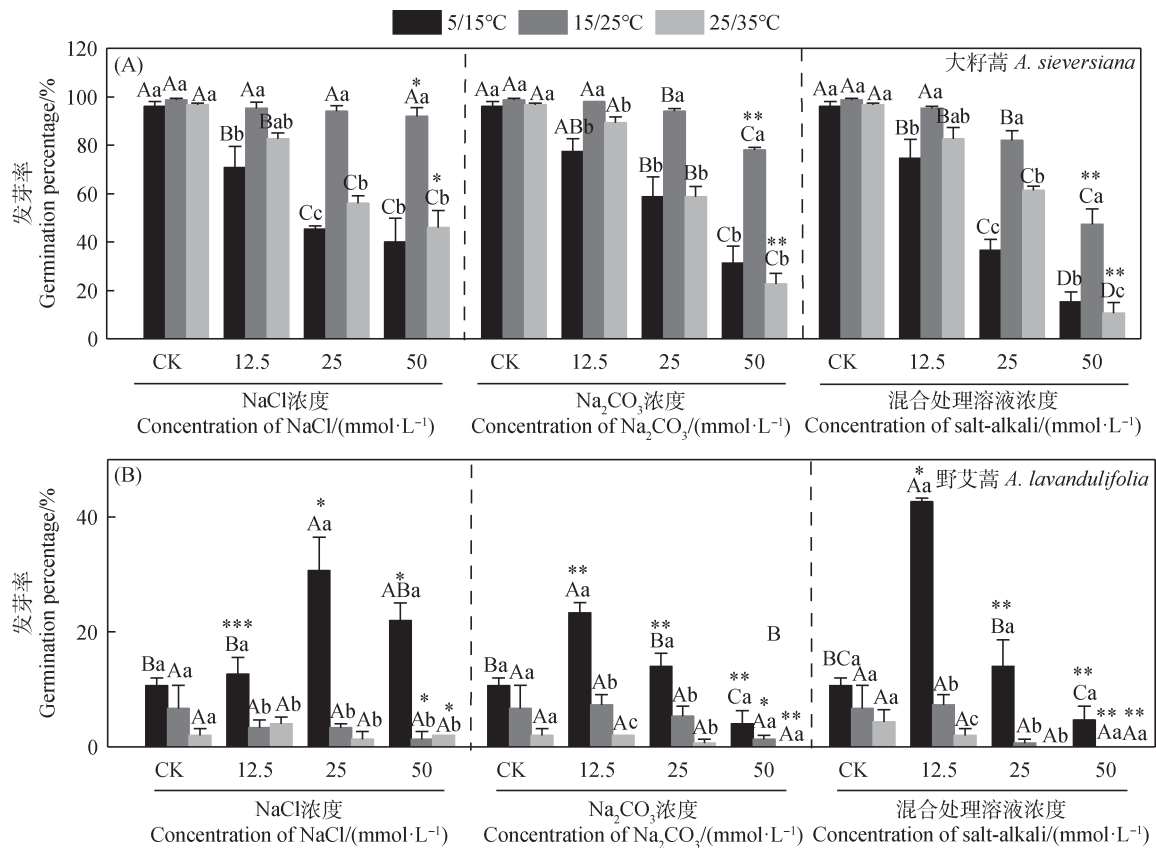


图 1 温度与盐碱处理(类型/浓度)对大籽蒿、野艾蒿发芽率的影响

Fig. 1 Effects of temperature and saline-alkali treatment (type/concentration) on the germination percentage of *A. sieversiana* and *A. lavandulifolia*

注:不同大写字母表示同一温度下各胁迫类型不同浓度间差异显著;不同小写字母表示同一浓度处理下不同温度间差异显著;\*,\*\*,\*\*\*分别表示同一温度下不同盐碱溶液类型间在0.05,0.01,0.001水平上差异显著。下同

Note: Different capital letters indicate significant differences between different concentrations of stress types at the same temperature at the 0.05 level; different lowercase letters indicate significant differences between different temperatures under the same concentration treatment at the 0.05 level; \*, \*\*, \*\*\* indicates that the difference between different types of saline alkali solutions at the same temperature is significant at the 0.05, 0.01, 0.001 level, respectively. The same as below

## 2.2 不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子发芽速率的影响

温度、盐碱胁迫以及物种对大籽蒿和野艾蒿种子的发芽速率均产生了显著影响( $P<0.05$ )(表2)。在3种溶液处理中,除CK外,大籽蒿发芽速率随温度升高先上升后下降,15/25℃时的发芽速率(除25/35℃且12.5 mmol·L<sup>-1</sup>外)均显著高于同浓度其他温度处理( $P<0.05$ );随溶液浓度增加,其发芽速率呈下降趋势;各温度处理下,中低浓度盐碱溶液间发芽速率无显著差异,高浓度处理中NaCl溶液和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液中发芽速率均高于混合

溶液,其中15/25℃条件下,混合溶液发芽速率较单一NaCl和Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液显著下降43.18%和31.04%( $P<0.05$ )(图2A)。野艾蒿发芽速率整体表现为随温度升高而降低;随浓度增加,除15/25℃时NaCl溶液处理外,其余均呈先上升后下降趋势,在5/15℃时,25.0 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl溶液和12.5 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>以及混合溶液中发芽速率均显著高于CK( $P<0.05$ ),3组变温条件中,50 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl溶液处理中野艾蒿发芽速率均高于Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>和混合溶液,且在5/15℃和25/35℃下差异显著( $P<0.05$ )(图2B)。

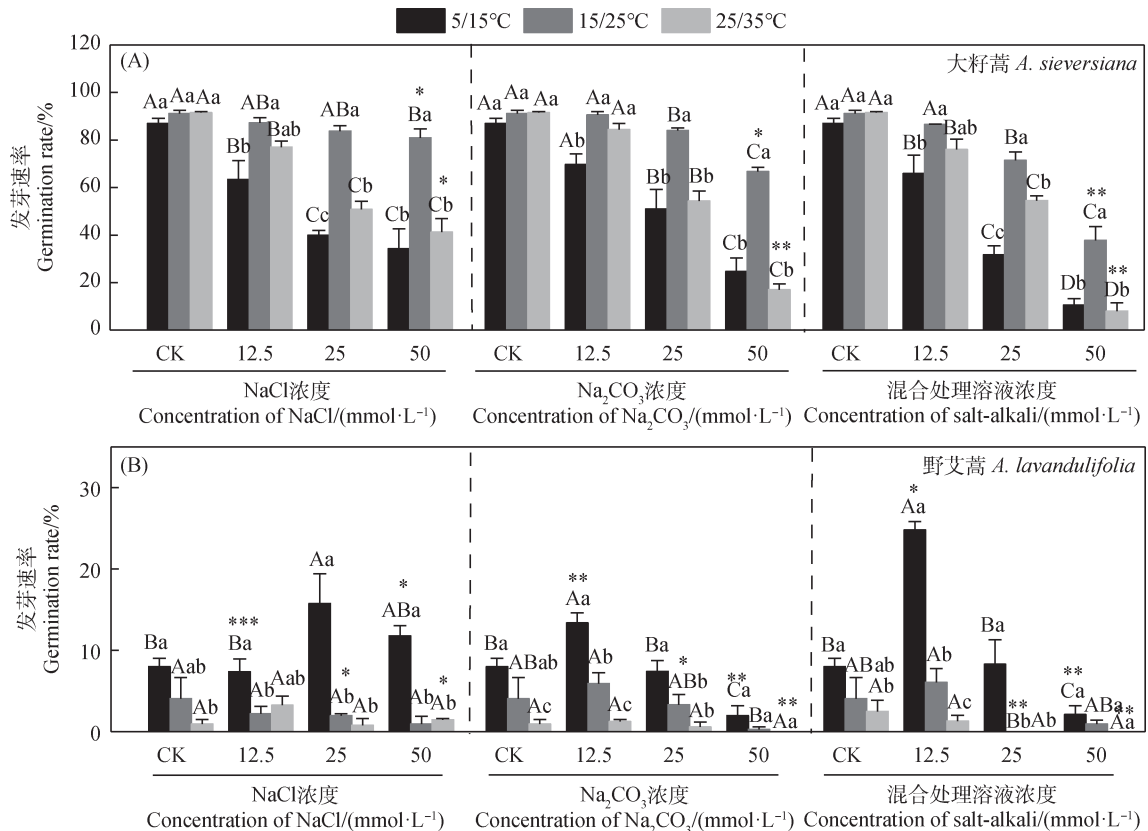


图2 温度与盐碱处理(类型/浓度)对大籽蒿、野艾蒿发芽速率的影响

Fig. 2 Effects of temperature and saline-alkali treatment (type/concentration) on the germination rate of *A. sieversiana* and *A. lavandulifolia*

## 2.3 不同温度下盐碱胁迫对大籽蒿和野艾蒿种子发芽势的影响

大籽蒿和野艾蒿种子的发芽势均受到温度、盐碱胁迫的显著影响,且两个物种间存在显著差异( $P<0.05$ )(表2)。在3种盐碱溶液处理中,大籽蒿种子发芽势均随温度升高先上升后下降;随溶液浓度增加而降低,除CK外,低温(5/15℃)下大籽蒿种子发芽

势显著低于15/25℃( $P<0.05$ ),且低温条件下3种溶液均随溶液浓度增加较CK显著降低( $P<0.05$ )(图3A)。野艾蒿种子除12.5 mmol·L<sup>-1</sup> NaCl和12.5,25 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液处理外,发芽势均随温度升高逐渐下降,在3种溶液中、高浓度胁迫下,种子发芽势均较CK有所下降,50 mmol·L<sup>-1</sup> Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液处理时,在3组变温处理下均为0%(图3B)。

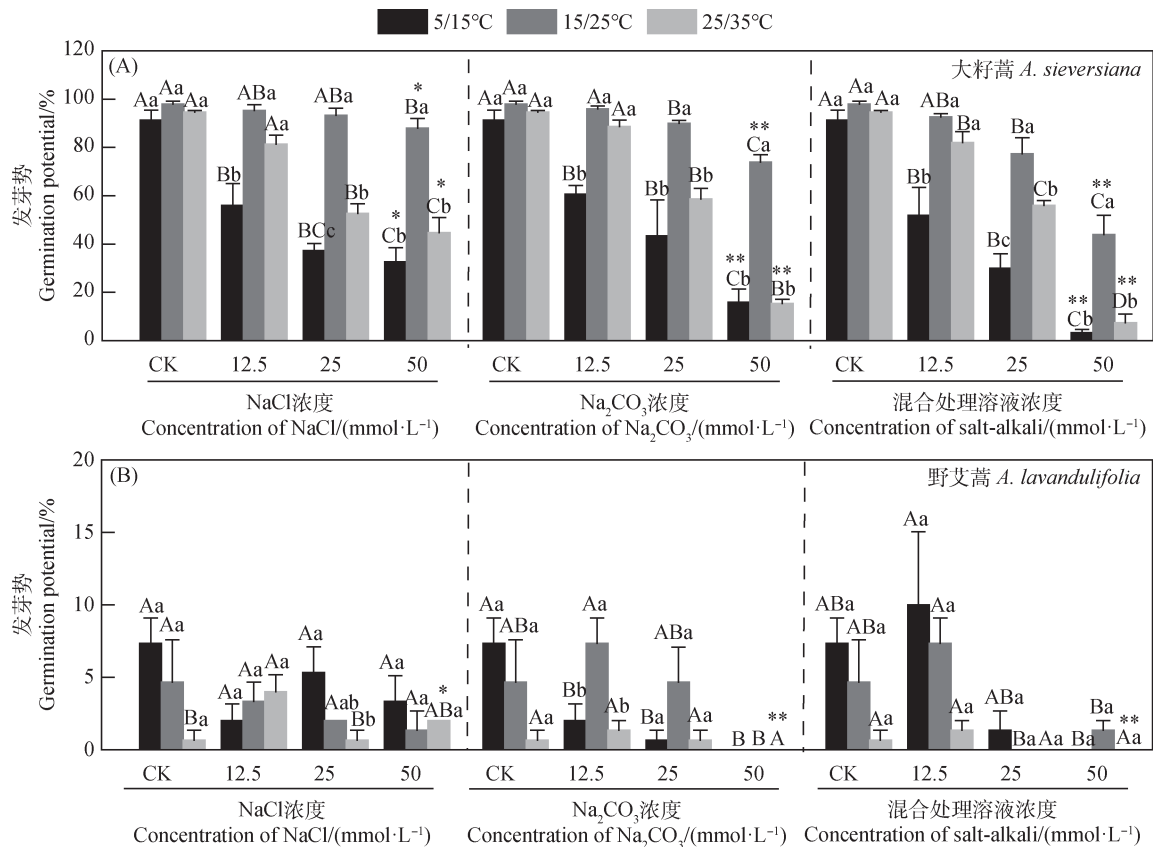


图3 温度与盐碱处理(类型/浓度)对大籽蒿、野艾蒿发芽势的影响

Fig. 3 Effects of temperature and saline-alkali treatment (type/concentration) on the germination potential of *A. sieversiana* and *A. lavandulifolia*

### 3 讨论

种子的顺利萌发是植物个体存活与种群繁衍的基础,也对物种适应环境变化的能力起着决定性作用<sup>[20]</sup>。在盐渍化地区,盐碱胁迫与温度是影响植物种子萌发的关键因素<sup>[21]</sup>。盐分胁迫通过渗透作用,限制种子的水分吸收能力,同时高浓度盐分环境中Na<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>离子也会对植物产生毒害作用,最终对种子萌发产生抑制作用<sup>[22]</sup>。碱胁迫则因高pH值导致植物种子离子失衡,从而产生更严重的危害<sup>[23]</sup>。研究发现,碱胁迫对野苜蓿(*Medicago falcata* L.)种子萌发的抑制作用强于盐胁迫下<sup>[24]</sup>。本研究中,高浓度(50 mmol·L<sup>-1</sup>)胁迫下大籽蒿和野艾蒿种子发芽率均显示出在NaCl溶液中高于Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液(图1),均表明了碱性盐对植物种子的抑制作用大于中性盐。

在自然生态系统中,土壤盐碱化是一个复杂的生态过程,其胁迫效应往往表现为多种盐碱成分的复合作用<sup>[8]</sup>。当植物种子面临复合盐碱胁迫时,中性盐和碱性盐的复合效应及其离子间的相互拮抗

作用会对种子萌发产生显著的综合影响<sup>[25]</sup>。研究发现,相较于单一的盐胁迫或碱胁迫,复合盐碱胁迫对苜蓿(*M. sativa* L.)种子萌发的抑制作用更为强烈,体现了盐胁迫和碱胁迫之间的协同效应加剧了对植物种子萌发的抑制<sup>[26]</sup>。本研究中,大籽蒿和野艾蒿整体在3组不同的变温处理下,其种子萌发情况均在混合盐碱溶液处理中表现最弱(图1),进一步验证了盐碱复合胁迫对植物种子萌发所造成的负面效应是逐渐叠加累积的。

植物在种子萌发阶段对温度变化表现出高度敏感性。植物种子萌发均存在一个最适温度范围,不同物种间种子萌发的最适温度存在差异<sup>[27]</sup>。研究发现,多年生植物无芒隐子草[*Cleistogenes songorica* (Roshev.) Ohwi]在较高的温度范围内会促进其萌发;一年生草本小车前(*Plantago minuta* Pall.)则是在较低的温度下萌发更好<sup>[28]</sup>。本研究中,大籽蒿的最适萌发温度为15/25°C,而野艾蒿的最适萌发温度为5/15°C(图1),这种差异可能源于不同物种在酶活性等生理特性以及环境适应策略上的分化,导致其萌发温度需求存在显著差异<sup>[29]</sup>。此外,

温度对植物耐盐碱能力具有重要调节作用,研究发现,多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)在其最适萌发温度时的耐盐性最高<sup>[30]</sup>。本研究中,大籽蒿在最适温度(15/25℃)条件下,随溶液浓度的增加,其发芽率在Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>溶液和混合溶液中,仅中、高浓度(25, 50 mmol·L<sup>-1</sup>)时较CK显著下降( $P < 0.05$ ),甚至在单一盐胁迫时较CK无显著下降(图1A);野艾蒿在最适温度时,单一盐胁迫下发芽率均较CK有所升高,单一碱溶液和混合溶液时低、中浓度(12.5, 25 mmol·L<sup>-1</sup>)胁迫时会促进其种子萌发,但随浓度增加则会出现抑制效果(图1B),这可能是由于高浓度盐碱环境会诱导种子内部产生大量的活性氧,进而损伤细胞膜、破坏细胞结构,对植物造成永久性的萌发抑制<sup>[31]</sup>。

不同物种在面对温度和盐碱胁迫时通常会表现出不同的适应策略。本研究中,大籽蒿和野艾蒿的萌发情况存在很大差别,整体上大籽蒿的萌发率较高且萌发较早,但萌发能力随着胁迫浓度升高降低,且在高浓度胁迫下显著下降(图1A, 3A)。然而,野艾蒿整体发芽率偏低且萌发较晚,但其在5/15℃低温下发芽率最高,同时对盐碱胁迫的耐受性较好,甚至促进了种子萌发(图1B)。这可能是由于大籽蒿通常分布在路边、河边或湿润的河漫滩等干扰生境中,为保持种群的持续,一旦遇到适宜的环境条件,便会大量萌发,是一种典型的机会主义者,但在逆境中会导致其萌发能力下<sup>[17]</sup>。然而,野艾蒿种子则展现出了风险分摊的生存策略,通过延长种子萌发时间和延缓萌发速率来确保种群的长期生存和延续,这也能合理解释为何在低盐碱胁迫和低温下,野艾蒿种子的发芽率没有受到抑制,甚至会对其产生促进作用<sup>[16]</sup>。

## 4 结论

温度、盐碱胁迫及其交互作用显著影响大籽蒿和野艾蒿种子萌发,且两种植物在萌发特性上呈现明显差异。大籽蒿种子的最佳萌发温度为15/25℃,不同浓度的盐碱胁迫均抑制其种子的萌发;野艾蒿种子的最佳萌发温度为5/15℃,且较低浓度的盐碱能够促进其种子萌发,野艾蒿萌发期的耐低温和抗盐碱能力更强,但整体发芽率较大籽蒿低。混合盐碱胁迫与温度的交互作用进一步加剧了对大籽蒿和野艾蒿种子萌发的抑制效应。

## 参考文献

- [1] PENFIELD S. Seed dormancy and germination[J]. *Current Biology*, 2017, 27(17): R874-R878
- [2] GEHO E M, CAMPBELL D, KEDDY P A. Quantifying ecological filters: the relative impact of herbivory, neighbours, and sediment on an oligohaline marsh[J]. *Oikos*, 2007, 116(6): 1006-1016
- [3] 张婷婷, 刘宇乐, 陈红, 等. 不同外源物质对盐、碱及干旱胁迫下草木樨种子萌发、幼苗生长及生理的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(8): 122-132  
ZHANG T T, LIU Y L, CHEN H, et al. Effects of different exogenous substances on the seed germination, seedling growth, and physiology of *Melilotus suaveolens* under salt, alkali, and drought stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(8): 122-132
- [4] 肖雯丽, 王含瑞, 王梦亮, 等. 盐碱胁迫下植物响应机制的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2024, 40(33): 78-85  
XIAO W L, WANG H R, WANG M L, et al. Mechanisms of plant response to saline-alkali stress: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(33): 78-85
- [5] 于婵, 张依琳, 李秋莹, 等. 盐碱胁迫对牛至种子萌发和幼苗生理生化特性的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(6): 1882-1892  
YU C, ZHANG Y L, LI Q Y, et al. Effects of saline-alkali stresses on seed germination and seedling physiological and biochemical characteristics of *Origanum vulgare*[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 32(6): 1882-1892
- [6] 杜丽思, 李铷, 董玉梅, 等. 胜红蓟种子萌发/出苗对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5662-5669  
DU L S, LI R, DONG Y M, et al. Seed germination and seedling emergence of *Ageratum conyzoides* in response to different environmental factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5662-5669
- [7] 石金玉, 孙守江, 马骏, 等. 不同温度条件下老芒麦种子萌发特性和抗氧化生理研究[J]. *草地学报*, 2024, 32(10): 3151-3158  
SHI J Y, SUN S J, MA W, et al. Study on germination characteristics and antioxidant physiology of *Siberian wildrye* seeds under different temperature conditions[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(10): 3151-3158
- [8] 马红媛, 吕丙盛, 杨昊谕, 等. 松嫩平原退化草地羊草种子萌发对环境因子的响应[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(8): 812-818  
MA H Y, LYU B S, YANG H Y, et al. Responses of seed germination of *Leymus chinensis* to environmental factors in degraded grassland on Songnen Plain in China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(8): 812-818
- [9] 王佳珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5565-5577  
WANG Q Z, LIU Q, GAO Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(16): 5565-5577
- [10] GUL B, WEBER D J. Effect of salinity, light, and temperature on germination in *Allenrolfea occidentalis*[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1999, 77(2): 240-246
- [11] 雷威肖, 陈巧玲, 陈康丽, 等. 黄土高原常见蒿属植物对4种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 21-30

- LEI W X, CHEN Q L, CHEN K L, et al. Allelopathy of common *Artemisia* plants on seed germination and seedling growth of four excellent Legumes in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(1): 21-30
- [12] 李洪玲, 张爱东, 青格乐, 等. 大籽蒿研究利用现状及展望[J]. 畜牧与饲料科学, 2014(1): 46-48  
LI H L, ZHANG A D, QING G L, et al. Research and utilization of *Artemisia sieversiana*: current status and prospects[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2014(1): 46-48
- [13] 陈宏阳, 李洪明, 海雪雪, 等. 大籽蒿挥发油的化学成分及其植物毒性[J]. 林业科技通讯, 2023, (7): 11-14  
CHEN H Y, LI H M, HAI X X, et al. Chemical constituents and phytotoxic activity of volatile oil from *Artemisia sieversiana*[J]. Forest Science and Technology, 2023, (7): 11-14
- [14] 甄泉, 严密, 杨红飞, 等. 铜污染对野艾蒿生长发育的胁迫和影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(8): 1505-1510  
ZHEN Q, YAN M, YANG H F, et al. Coercion and damage of Cu pollution on *Artemisia lavandulaefolia* growth[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, (8): 1505-1510
- [15] 李文杰, 陈晓阳, 张飞, 等. 黄蒿和大籽蒿与两个园林小菊砧穗组合对生长和开花的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(1): 210-218  
LI W J, CHEN X Y, ZHANG F, et al. Effect of rootstock and scion combinations of *Artemisia annua* and *Artemisia sieversiana* with two garden chrysanthemums on growth and flowering[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(1): 210-218
- [16] 马君玲, 吴世杰, 张晓妮, 等. 铁路沿线4种蒿属植物植冠储藏种子的重量形状及萌发特性[J]. 农学学报, 2019, 9(6): 28-33  
MA J L, WU S J, ZHANG X N, et al. Canopy-stored seeds of 4 *Artemisia* species along the railway: weight, shape and germination characteristics[J]. Journal of Agriculture, 2019, 9(6): 28-33
- [17] 李雪华, 刘志民, 蒋德明, 等. 七种蒿属植物种子重量形状及萌发特性的比较研究[J]. 生态学杂志, 2004(5): 57-60  
LI X H, LIU Z M, JIANG D M, et al. A comparative study on seed weight, shape and germination characteristics of 7 *Artemisia* species[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004(5): 57-60
- [18] 刘莉莉, 王月霖, 李海燕, 等. 东北退化草原恢复演替系列羊草和寸草无性系种群构件营养繁殖特征比较[J]. 草业学报, 2024, 33(7): 15-24  
LIU L L, WANG Y L, LI H Y, et al. Comparison of vegetative propagation characteristics of modules between *Leymus chinensis* and *Carex duriuscula* clonal populations in a restoration succession series in northeast degraded grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(7): 15-24
- [19] 张通颖, 盛军, 王柔懿, 等. 盐碱胁迫和温度对猪毛蒿种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 581-588  
ZHANG T Y, SHEN J, WANG R Y, et al. Effects of salt-alkali stress and temperature on seed germination of *Artemisia scoparia*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(3): 581-588
- [20] CHENG J Y, HUANG H, LIU W W, et al. Unraveling the effects of cold stratification and temperature on the seed germination of invasive *Spartina alterniflora*[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 911804
- [21] LIN N, TANG J. Study on the environment evolution and the analysis of causes to land salinization and desertification in Songnen plain[J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(4): 474-483
- [22] 陈雪梅, 刘骅峻, 杨墨, 等. 盐碱胁迫对苜蓿种子萌发性状的影响及耐盐碱性评价[J]. 黑龙江农业科学, 2024, (3): 64-70  
CHEN X M, LIU H J, YANG Z, et al. Effects of salt-alkali stress on seed germination traits of Alfalfa and its salt tolerance evaluation[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024, (3): 64-70
- [23] 麻莹, 王晓苹, 姜海波, 等. 盐碱胁迫下碱地肤体内的有机酸积累及其草酸代谢特点[J]. 草业学报, 2017, 26(7): 158-165  
MA Y, WANG X P, JIANG H B, et al. Characteristics of organic acids accumulation and oxalate metabolism in *Kochia sieversiana* under salt and alkali stresses [J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 26(7): 158-165
- [24] 武伟, 田雨, 张红香, 等. 盐、碱胁迫与温度对黄花苜蓿种子发芽的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(11): 1847-1853  
WU Y, TIAN Y, ZHANG H X, et al. Effects of salinity, alkalinity, temperature and their interactions on seed germination of *Medicago falcata* [J]. Pratacultural Science, 2015, 32 (11): 1847-1853
- [25] 蔺吉祥, 李晓宇, 张兆军, 等. 温度与盐碱胁迫交互作用对羊草种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(6): 1005-1009  
LIN J X, LI X Y, ZHANG Y J, et al. Effects of temperature, salinity, alkalinity and their interactions on seed germination and seedling growth of *Leymus chinensis* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(6): 1005-1009
- [26] 蔺吉祥, 高战武, 王颖, 等. 盐碱胁迫对紫花苜蓿种子发芽的协同影响[J]. 草地学报, 2014, 22(2): 312-318  
LIN J X, GAO Z W, WANG Y, et al. Synergistic effects of salt and alkaline stresses on the seed germination of *Medicago sativa* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(2): 312-318
- [27] 渠晓霞, 黄振英. 盐生植物种子萌发对环境的适应对策[J]. 生态学报, 2005(9): 2389-2398  
QU X X, HUANG Z Y. The adaptive strategies of halophyte seed germination[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, (9): 2389-2398
- [28] 鱼小军, 王彦荣, 曾彦军, 等. 温度和水分对无芒隐子草和条叶车前种子萌发的影响[J]. 生态学报, 2004(5): 883-887  
YU X J, WANG Y R, ZENG Y J, et al. Effects of temperature and osmotic potential on seed germination of *Cleistogenes songorica* and *shengtai* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004 (5): 883-887
- [29] 宫珂, 靳瑰丽, 刘文昊. 无芒雀麦幼苗对温度变化的适应性策略[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 543-552  
GONG K, LEI G L, LIU W H. Adaptive strategies to temperature changes in *Bromus inermis* seedlings [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 543-552
- [30] LIN J X, HUA X Y, PENG X Y, et al. Germination responses of ryegrass (annual vs. perennial) seed to the interactive effects of temperature and salt-alkali stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: 1458
- [31] 闫玉邦, 白小明, 朱雅楠, 等. 3种野生苔草种子萌发特性对不同盐分胁迫的响应[J]. 草地学报, 2024, 23(9): 2919-2933  
YAN Y B, BAI X M, ZHU Y N, et al. Responses of seed germination characteristics of three wild *Carex* species to different salt stresses[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 23(9): 2919-2933

(责任编辑 付 宸)