

4 种多年生禾本科牧草种子萌发对 Na_2CO_3 胁迫的响应

马红媛^{1,2}, 梁正伟^{1,2}, 黄立华^{1,2}, 王明明^{1,2}, 关法春^{1,2}

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012; 2.中国大安碱地生态试验站, 吉林 大安 131317)

摘要:采用培养皿室内培养方法,研究了4种多年生根茎型耐旱植物俄罗斯新麦草(*Elymus junceus* Fisch)、苇状羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb)、羊草(*Leymus chinensis* Trin. Tzvel.)和高冰草(*Agropyron elongatum* Host Nevski)种子对不同浓度(0、25、50、75和100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) Na_2CO_3 胁迫及胁迫解除后种子发芽率和幼苗生长的响应。结果表明,4种牧草发芽率均在没有 Na_2CO_3 胁迫时最高,且以苇状羊茅最高达到96.8%,羊草最低73.1%;随着胁迫浓度的增加发芽率呈下降趋势,高冰草在100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 下发芽率仍达到14.9%,而其他3种牧草在此浓度下没有观察到萌发的种子。4种牧草的发芽速率均与 Na_2CO_3 浓度呈显著负相关,相同 Na_2CO_3 浓度下,4种牧草中苇状羊茅最高,羊草最低。 Na_2CO_3 胁迫对根长的抑制明显高于苗长,且对不同物种影响不同;75 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下,除了高冰草根长为3.4 cm之外,其他3个物种根的伸长几乎完全被抑制。解除胁迫后,羊草种子发芽恢复最快,且发芽率与原 Na_2CO_3 浓度成正比;高冰草、俄罗斯新麦草和苇状羊茅几乎均为0。上述结果说明,4种牧草中,种子萌发期以高冰草耐 Na_2CO_3 能力最强,其次是俄罗斯新麦草和苇状羊茅,羊草种子最差;但当胁迫解除后,羊草种子具有较高的萌发恢复率,这也是其适应盐碱环境的一个重要原因。

关键词:俄罗斯新麦草;苇状羊茅;羊草;高冰草;萌发; Na_2CO_3 胁迫

中图分类号:Q945.78 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)04-0766-06

Germination Characteristics of Four Perennial Grasses(Poaceae) Seeds in Responses to Sodium Carbonate Stress

MA Hong-yuan^{1,2}, LIANG Zheng-wei^{1,2}, HUANG Li-hua^{1,2}, WANG Ming-ming¹, GUAN Fa-chun¹

(1.Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2.Da'an Sodic Land Experiment Station of China, Da'an 131317, China)

Abstract: *Elymus junceus*, *Festuca arundinacea*, *Agropyron elongatum*, *Leymus chinensis* are all perennial rhizome drought tolerant grasses (Poaceae) with great economic and ecological significances. Songnen Plain of Northeast China is the largest alkali sodic soil distribution area in the world where the sodium carbonate (Na_2CO_3) is one of the main composition salts. Seed germination and seedling growth of the four grasses in response to different concentrations of 0, 25, 50, 75 and 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 were investigated. Highest germination percentages of the four species were all obtained under non-stress conditions and with the increase of the concentration, germination percentages all decreased. *F. arundinacea* had the highest germination percentage at 0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ concentration reaching 96.8%. *A. elongatum* was more salt-tolerant with germination percentage of 14.9% in 100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 while there was no germinated seed for the other three species at this concentration. The salt stress inhibited the root elongation more severely than that of shoot. Almost no radicle emerged when the $\text{Na}_2\text{CO}_3 \geq 75$ $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ with the exception of *A. elongatum* which was 3.4 cm at 75 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ concentration. When transferred from stressed solutions to distilled water, seeds of *L. chinensis* germinated quickly and showed positive relationship between the germination percentage and the pre-transferred concentration of Na_2CO_3 . However, after being transferred to distilled water, the germination of *A. elongatum* was poor while no germination was found in *E. junceus* and *F. arundinacea*. These results indicated that *E. junceus*, and *F. arundinacea* had comparatively higher germination in low salinity and *A. elongatum* also had higher germination in hyper-salt conditions. Seeds of *L. chinensis* could keep viable with

收稿日期:2008-06-17

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2007CB106800);国家十一五计划重点项目(2006BAC01A08);中国科学院知识创新工程(KZCX3-SW-NA3-05);吉林省与中国科学院科技合作资助项目(2005SYHZ0007)

作者简介:马红媛(1979—),女,山东德州人,博士,主要从事种子生物学与植物逆境生理生态研究。E-mail:mahongyuan@neigae.ac.cn

通讯作者:梁正伟 E-mail:liangzw@neigae.ac.cn

long-time exposure to salty condition which was one of the main reasons for its adaptation to alkali sodic soil condition.

Keywords: *Elymus junceus*; *Festuca arundinacea*; *Leymus chinensis*; *Agropyron elongatum*; Germination; Sodium Carbonate stress

土壤盐碱化是影响世界农业生产最主要的非生物胁迫之一^[1-2],根据 FAO/UNESCO 世界土壤地图,碱化土地面积达到 $4.34 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[3]。中国的松嫩平原是世界苏打盐碱土集中分布区之一,盐碱化土地面积达到 $2.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占该地区面积的 15.2%,且以 1.4% 的速率逐年增加^[4-5]。该类型土壤的有害盐分以 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 为主,占土壤总盐 90%,且 pH 多在 9.0~10.5。除了 Na^+ 毒害,由于 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的水解作用,该区植物生长还受到高 pH 胁迫影响,因此,筛选适合该地区特殊环境的优质牧草成为生物改良盐碱土的关键。种子萌发期是种子生命过程中最重要的时期,其抗逆能力决定了该物种能否在一个地区的定居和分布^[6]。盐分对种子发芽率、幼根和幼芽的长度、干鲜重等都有一定的影响^[7-8],如高盐胁迫能够完全抑制种子的萌发,而低水平条件诱导种子的休眠^[8-10]。

从目前文献看,盐碱胁迫对种子萌发的影响研究,多数以 NaCl 等中性盐胁迫为主,只有少数以 Na_2CO_3 等碱性盐^[11-13]为研究对象,但对不同牧草在 Na_2CO_3 胁迫前后萌发和幼苗生长特性研究更少。俄罗斯新麦草(*Elymus junceus* Fisch)、苇状羊茅(*Festuca arundinacea* Schreb)、羊草(*Leymus chinensis* Trin. Tzvel.)和高冰草(*Agropyron elongatum* Host Nevski)是多年生、根茎型耐旱优质牧草,目前除了对松嫩平原西部优势物种羊草耐盐碱特性研究较多之外^[15,14-15],对其他 3 种牧草研究较少。根据我国松嫩平原盐碱化土壤的特性,本文研究了 4 种多年生耐旱的禾本科牧草对不同浓度(0、25、50、75 和 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Na_2CO_3 胁迫及胁迫解除后的发芽和幼苗生长的响应特征,从而评价其耐盐碱能力,为该区的盐碱化草地改良提供参考。

1 材料和方法

实验所采用的俄罗斯新麦草、苇状羊茅和高冰草种子由中国科学院植物研究所提供的 2004 年种子;羊草为 2004 年 7 月末采自中国大安碱地生态试验站($45^\circ 36' \text{N}$, $123^\circ 53' \text{E}$)自然羊草群落。实验前将上述种子用 0.1% 的 HgCl_2 杀菌 10 min。将上述 4 种牧草种子放在 9 cm 直径的培养皿内,内铺一层滤纸。设 5 个

Na_2CO_3 浓度梯度(0、25、50、75 和 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$),发芽温度 $16^\circ \text{C}/28^\circ \text{C}$, 12 h 黑暗/12 h 光照,每种处理 3 次重复。每 2 d 调查 1 次发芽率,萌发 14 d,将没有萌发的种子转移到铺有新的滤纸的培养皿内,加入 10 mL 蒸馏水浸泡 36 h,然后将浸泡液吸出,再加入 5 mL 蒸馏水放在上述温度条件下萌发 14 d。萌发速率用修正的 Timson 萌发速率指数表示: $\Sigma G/t$, 其中, G 表示 2 d 内的种子发芽率, t 是整个萌发时间^[16]。记录根长和苗长,计算根冠比。实验结束时计算发芽恢复率(新萌发的种子数/转移到非胁迫条件下的未萌发种子总数 $\times 100\%$)。

用 SPSS 13.0 对数据进行统计分析,对发芽率等百分率数据进行反正弦转化后进行方差分析,采用 Duncan 方法多重比较,用最小显著差法确定各个平均值之间的差异显著性;用 Origin 7.5 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 4 种牧草种子在不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下的发芽率

从图 1 可以看出,4 种牧草发芽率均在蒸馏水中最高,且以苇状羊茅为最高达到 96.8%,羊草最低 73.1%;随着 Na_2CO_3 浓度的增加发芽率均呈下降趋势。苇状羊茅在 $0 \sim 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 下发芽率均高于其他 3 种牧草种子,当浓度为 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,发芽率迅速降低,仅有 5.8%,而在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,没有观察到萌发的种子。25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下,俄罗斯新麦草和高冰草种子发芽率均与各自对照没有显

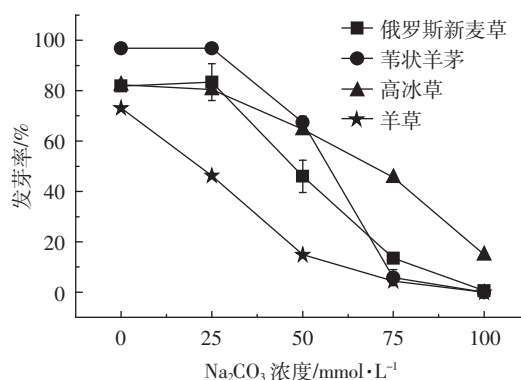


图 1 4 种牧草种子在不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下的发芽率
Figure 1 Effects of different concentration Na_2CO_3 on germination percentages of the four grasses

著差异,但随着浓度的增加,俄罗斯新麦草发芽率迅速下降,100 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时为0,而高冰草种子发芽率下降缓慢,此浓度下高冰草发芽率为14.9%。羊草种子萌发受 Na_2CO_3 影响最大,随着胁迫浓度的增加,发芽率呈迅速下降趋势,25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 条件下,发芽率仅为46.3%,极显著低于对照。4种牧草发芽率与 Na_2CO_3 之间的关系见表1。

表1 4种牧草种子发芽率与 Na_2CO_3 浓度之间的关系

Table 1 Relationship between seed germination of the four species and Na_2CO_3 concentration

牧草种子	Regression equation	R^2	SD	P
俄罗斯新麦草	$y=88.1-0.65x-0.027\ 5x^2$	0.809	17.9	<0.000 1
苇状羊茅	$y=105.5-1.02x-0.001\ 2x^2$	0.859	18.2	<0.000 1
高冰草	$y=82.8+0.01x-0.069\ 7x^2$	0.875	10.6	<0.000 1
羊草	$y=74.7-1.50x+0.007\ 5x^2$	0.943	7.6	<0.000 1

2.2 4种牧草种子在不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下的萌发速率

从图2中可以看出,4种牧草种子的萌发速率随着 Na_2CO_3 浓度的增加均呈下降趋势,两者存在显著

的负相关。相同 Na_2CO_3 胁迫下,苇状羊茅的萌发速率最高,羊草最低。

2.3 4种牧草幼苗生长对不同浓度 Na_2CO_3 的响应

2.3.1 4种牧草苗长和苗干重对不同浓度 Na_2CO_3 的响应

从图3可以看出,4种牧草的苗长均随着 Na_2CO_3 浓度的增加呈逐渐下降趋势。没有胁迫下,俄罗斯新麦草苗长最长为(9.3±1.3)cm,羊草最短为(4.7±0.01)cm。低浓度(25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) Na_2CO_3 显著降低了俄罗斯新麦

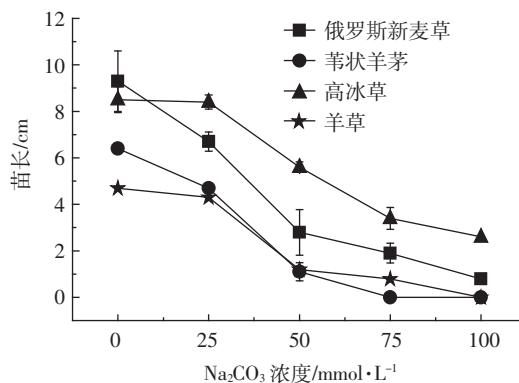


图3 不同浓度 Na_2CO_3 下4种牧草的苗长

Figure 3 Effects of different concentration Na_2CO_3 on the shoot length of the four grasses

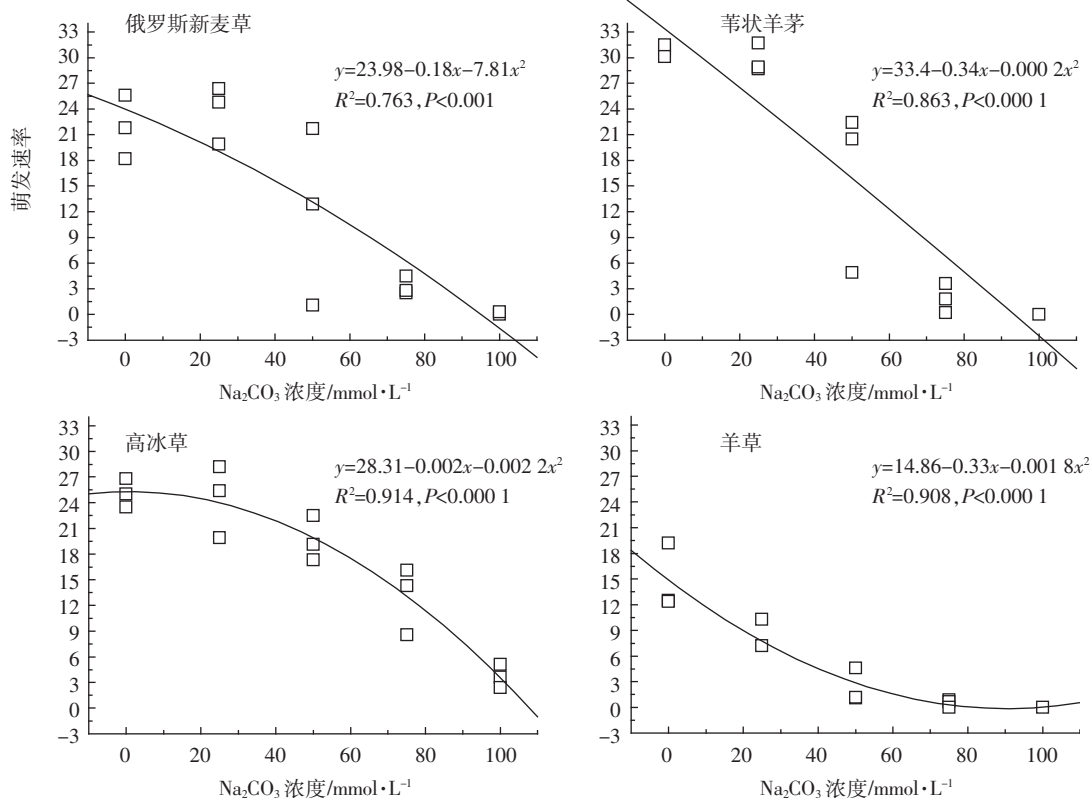


图2 4种牧草的萌发速率与 Na_2CO_3 之间的关系

Figure 2 Regression plots between the germination rates of the four grasses with Na_2CO_3 concentrations

草和苇状羊茅的苗长,但对高冰草和羊草苗长没有显著影响。而当 Na_2CO_3 浓度 $\geq 25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,高冰草苗长均大于相同浓度下的其他3种牧草。

苗干重与苗长变化趋势基本一致。在没有盐碱胁迫下,以高冰草苗干重最高 ($1.79 \pm 0.01 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$), 苇状羊茅和俄罗斯新麦草相似, 约 $0.95 \sim 1.05 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$, 羊草最低, 为 ($0.50 \pm 0.02 \text{ mg} \cdot \text{株}^{-1}$)。低浓度 ($25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) Na_2CO_3 对4种牧草苗干重均没有显著的抑制作用, 而浓度 $\geq 50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 苗干重迅速下降(图4)。

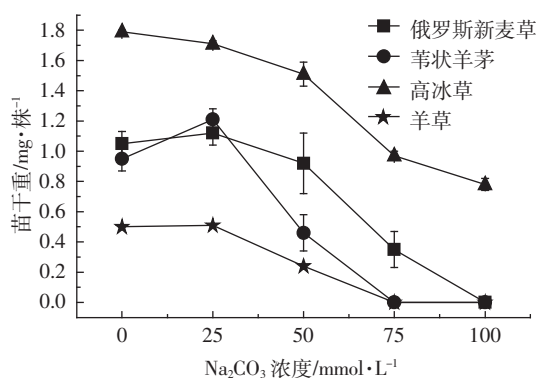


图4 不同浓度 Na_2CO_3 下4种牧草幼苗干重

Figure 4 Effects of different concentration of Na_2CO_3 on the dry weight of the four grasses

2.3.2 4种牧草根长对不同浓度 Na_2CO_3 的响应

从图5可以看出, Na_2CO_3 胁迫显著抑制了4种牧草的根长。随着 Na_2CO_3 浓度的增加, 4种牧草的根长迅速呈直线下降趋势, 当浓度达到 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 高冰草根长为 ($0.41 \pm 0.10 \text{ cm}$), 而其他3种牧草根长均为0, 根系伸长完全被抑制。

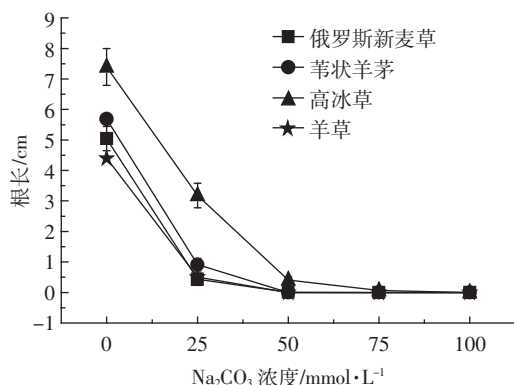


图5 不同浓度 Na_2CO_3 下4种牧草的根长

Figure 5 Effects of different concentration Na_2CO_3 on the length of root of the four grasses

2.4 胁迫解除后4种牧草的萌发恢复率

将上述 Na_2CO_3 胁迫下未萌发的种子转移到无盐碱胁迫的蒸馏水条件下继续萌发, 结果表明, 4种牧草萌发恢复率存在很大差异, 见图6。羊草种子萌发恢复率随原 Na_2CO_3 浓度的增加呈上升趋势, 如原 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 处理的羊草种子发芽率达到了48.7%。俄罗斯新麦草和苇状羊茅种子萌发恢复率在 $0 \sim 100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 处理下均为0。高冰草在原 Na_2CO_3 浓度为 $25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 下萌发恢复率分别为10.4%和14.2%, 而在其他浓度下没有萌发。

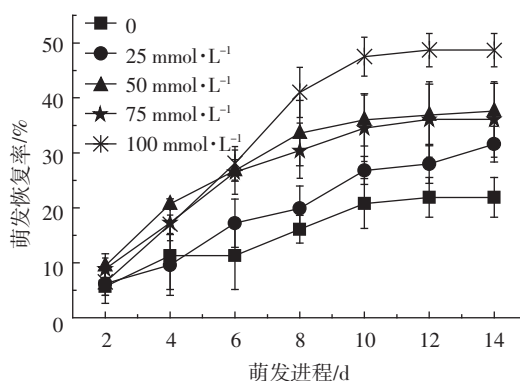


图6 未萌发羊草种子转移到蒸馏水下萌发进程

Figure 6 Germination courses of the ungerminated *L. chinensis* seeds after being transferred to distilled water

3 讨论

种子萌发一般在没有盐碱胁迫条件下发芽率最高。Gulzar 和 Khan^[10]研究表明, *Aeluropus lagopoides* 在浓度 $\leq 500 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下, 在任何温度梯度下发芽率都显著降低。Triglochin maritime 种子萌发也随着 NaCl 浓度的增加而降低^[16]。 Na_2CO_3 对种子萌发的影响除了都具有离子胁迫之外, 还有高 pH 胁迫^[17]。本研究中, 随 Na_2CO_3 增加, 4种牧草种子萌发均受到不同程度的抑制, 而不同牧草物种耐盐阈值存在很大差异。俄罗斯新麦草、苇状羊茅和高冰草种子在低浓度 Na_2CO_3 ($25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 胁迫下萌发没有受到影响, 高冰草种子耐 Na_2CO_3 最强, 在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 中, 仍有14.9%的种子萌发。羊草种子是盐敏感型的, 随着盐浓度的增加发芽率显著下降。种子萌发恢复率也因物种的不同存在较大的差异, 从外观上观察到, 转移后全部的俄罗斯新麦草和苇状羊茅及部分高冰草种子腐烂, 丧失活力; 但羊草种子在胁迫解除后活力没有受到影响, 且发芽恢复率随着原 Na_2CO_3 胁迫浓度的增加而增大。

盐碱胁迫对植物种子萌发有以下几种可能:(1)阻止种子萌发,但不使种子丧失活力;(2)延迟但不阻止种子萌发^[10];(3)当盐浓度高到一定程度或持续一定时间还有可能造成种子永久性失去活力^[6]。Khan 和 Gul^[18]报道,种子一般在雨季将其生境的盐分部分或完全淋失后萌发。本研究中,低浓度的 Na_2CO_3 胁迫没有显著影响俄罗斯新麦草、苇状羊茅和高冰草的萌发,而当浓度过高持续时间过长,造成了种子部分或完全丧失活力,属于第三种作用方式。 Na_2CO_3 对羊草种子萌发的影响主要是第一种方式,导致羊草种子暂时的强迫性休眠,胁迫解除时这种休眠被打破。羊草是松嫩平原盐碱化草地的重要植被,其直播的最佳 pH 为 8.0~8.5^[19],pH 过高会导致羊草种子强迫性休眠,也是羊草长期适应这种特殊苏打盐碱环境的一个重要特性^[20],为其物种的保存和延续提供保障。上述结果表明,当温度等其他生态因子适宜的条件下,俄罗斯新麦草、苇状羊茅、高冰草和羊草在轻度苏打盐碱条件下均能萌发,正常生长,其中高冰草耐盐碱能力最强,而羊草种子能够长期在较重盐碱环境下保存活力,直到雨季后,羊草种子及其周围生境内盐分被淋失,才能萌发。

幼苗生长一般随着盐胁迫增加而降低,一般来说,盐通过以下 3 种途径影响植物生长:(1)渗透胁迫(引起水分亏损);(2)离子毒害;(3)主要营养元素吸收不平衡。这些作用方式可能在细胞水平和更高的组织水平上影响植物代谢的所有方面^[21-24]。Bie 等^[13]报道,由于 HCO_3^- 和高 pH 的作用, NaHCO_3 对莴苣幼苗生长危害比 Na_2SO_4 大。黄立华等^[17]研究也表明,碱性盐 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 比 NaCl 等中性盐对高冰草种子萌发和幼苗生长危害更大,且对胚根的抑制作用大于胚芽。高 pH 的 Na_2CO_3 影响大麦根细胞内酶的活性,特别是在分解代谢过程中^[25]。本研究中发现,当 Na_2CO_3 浓度超过 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,多数胚根在从种皮/果皮出来后就不再伸长,部分胚根未能突破果种皮。且随着 Na_2CO_3 浓度的增加,4 种牧草的苗长、苗干重及根长都受到不同程度的抑制,且以对根系伸长的抑制最显著,表明种子萌发期幼苗根系对 Na_2CO_3 胁迫最敏感。

4 结论

从本研究可以得到以下结论:(1)4 种牧草中高冰草种子耐 Na_2CO_3 最强;(2)俄罗斯新麦草和苇状羊茅种子能够在低 Na_2CO_3 浓度下萌发和生长,但萌发

期间不宜长时间暴露在盐碱环境中;(3)羊草萌发期对 Na_2CO_3 敏感性较强,并可导致其强迫性休眠,但仍能保持较强活力,胁迫解除后,在适宜的条件下仍继续萌发,这是羊草长期适应该地区盐碱环境的一种重要生物学特性。

参考文献:

- [1] Zhu J K. Plant salt tolerance [J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(2): 66-71.
- [2] Wei W, Bilsborrow P E, Hooley P, et al. Salinity induced differences in growth, ion distribution and partitioning in barley between the cultivar maythorpe and its derived mutant golden promise[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250(2): 183-191.
- [3] Jin H, Plaha P, Park J Y, et al. Comparative EST profiles of leaf and root of *Leymus chinensis*, a xerophilous grass adapted to high pH sodic soil[J]. *Plant Science*, 2006, 170(6): 1081-1086.
- [4] 邓伟, 裘善文, 梁正伟. 中国大安碱地生态试验站区域生态环境背景[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
DENG Wei, QIU Shan-wen, LIANG Zheng-wei. Environment background of the Chinese Da'an alkali-saline experiment station [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [5] Liang Z W, Ma H Y, Wang Z C, et al. Use of alkali tolerant plant for the improvement of high saline-alkali soil in Northeast China[C]//Eighth Conference of the East and Southeast Asian Federation of Soil Science, 2007. 20-25.
- [6] 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, 25(9): 2389-2398.
QU Xiao-xia, HUANG Zhen-ying. The adaptive strategies of halophyte seed germination[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(9): 2389-2398.
- [7] Hamdy A, Abdel-Dayem S, Abdu-Zeid M. Soil water management for optimum crop production[J]. *Agri Water Management*, 1993, 24: 189-203.
- [8] Khalid M N, Iqbal H F, Tahir A, et al. Germination potential of chick-peas under saline conditions[J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2001, 4(4): 395-396.
- [9] Khan M A, Ungar I A. Effect of light, salinity and thermoperiod on seed germination of halophytes[J]. *Canadian Journal of Botany*, 1997, 75(5): 835-841.
- [10] Gulzar S, Khan M A. Seed germination of a halophytic grass *Aeluropus lagopoides*[J]. *Annals of Botany*, 2001, 87(3): 319-324.
- [11] Abd El-Samad H M, Shaddad M A K. Comparative effect of sodium carbonate, sodium sulfate and sodium chloride on the growth and related metabolic activities of pea plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1996(19): 717-728.
- [12] 石德成, 李玉明, 杨国会, 等. 盐碱混合生态条件的人工模拟及其对羊草胁迫作用因素分析[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1323-1331.
SHI De-cheng, LI Yu-ming, YANG Guo-hui, et al. A simulation of salt and alkali mixed ecological conditions and analysis of their stress factors in the seedlings of *Aneurolepidium chinense*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1323-1331.

- [13] Bie Z L, Tadashi I, Yutaka S. Effects of sodium sulfate and sodium bicarbonate on the growth, gas exchange and mineral composition of lettuce[J]. *Horticultural Science*, 2004, 99: 215–224.
- [14] 石德成, 盛艳敏, 赵可夫. 不同盐浓度的混合盐对羊草苗的胁迫效应[J]. *植物学报*, 1998, 40(12): 1136–1142.
- SHI De-cheng, SHENG Yan-min, ZHAO Ke-fu. Stress effects of mixed salts with various salinities on the seedling of *Aneurolepidium chinense*[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1998, 40(12): 1136–1142.
- [15] 颜 宏, 赵 伟, 盛艳敏, 等. 盐碱胁迫对羊草和向日葵的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1497–1501.
- YAN Hong, ZHAO Wei, SHENG Yan-min, et al. Effects of alkali stress on *Aneurolepidium chinense* and *Helianthus annuus*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1497–1501.
- [16] Khan M A, Ungar I A. Seed germination of a halophytic grass *Aeluropus lagopoides*[J]. *Annals of Botany*, 2001, 87(3): 319–324.
- [17] 黄立华, 梁正伟. 不同钠盐胁迫对高冰草种子萌发的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2007, 21(6): 173–176.
- HUANG Li-hua, LIANG Zheng-wei. Effect of different sodium salt stress on the seed germination of tall wheatgrass (*Agropyron elongatum*) [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2007, 21 (6): 173–176.
- [18] Khan M A, Gul B. High salt tolerance in the germinating dimorphic seeds of *Athrocneum indicum*[J]. *International Journal of Plant Sciences*, 1998, 159(5): 826–832.
- [19] 马红媛, 梁正伟. 不同 pH 值土壤及其浸提液对羊草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *植物学通报*, 2007, 24(2): 181–188.
- MA Hong-yuan, LIANG Zheng-wei. Effects of soils with different pH and the soil extracts on the germination and seedling growth of *Leymus chinensis*[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(2): 181–188.
- [20] 马红媛, 梁正伟. 不同贮藏条件和发芽方法对羊草种子萌发的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 997–1002.
- MA Hong-yuan, LIANG Zheng-wei. Effects of storage conditions and sowing methods on the germination of *Leymus chinensis*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 997–1002.
- [21] Garg B K, Gupta I C. Saline wasterlands environment and plant growth[M]. Jodhpur, India: Scientific Publishers. 1997.
- [22] Caines A M, Shennan C. Interaction effects of Ca^{2+} and NaCl salinity on the growth of two tomato genotypes differing in Ca^{2+} use efficiency[J]. *Plant Physiol Biochem*, 1999(37): 569–576.
- [23] Ramoliya P J, Patel H M, Pandey A N. Effect of salinisation of soil on growth and macro- and micro-nutrient accumulation in seedlings of *Acacia catechu* (Mimosaceae)[J]. *Annal Appl Biol*, 2004, 144(3): 321–332.
- [24] 刘月敏, 孙贻超, 邵晓龙. NaCl 和温度双重胁迫对黑麦草幼苗叶绿素及相关酶活性的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 111–115.
- LIU Yue-min, SUN Yi-chao, SHAO Xiao-long. Chlorophyll and enzymes in ryegrass (*Lolium perenne* L.) seedling under temperature and NaCl stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 111–115.
- [25] Katsuhara M, Yazaki Y, Sakano K, et al. Intracellular pH and proton-transport in barley root cells under salt stress; in vivo P-NMR study[J]. *Plant Cell Physiology*, 1997, 38(2): 155–160.