



GA₃处理对盐胁迫下5种牧草种子萌发及幼苗生长的影响

崔文宁 孟静静 张文香 路培 高培培 王茜 张存在

Effect of gibberellin on seed germination and seedling growth of five species of forage seeds

CUI Wenning, MENG Jingjing, ZHANG Wenxiang, LU Pei, GAO Peipei, WANG Qian, ZHANG Cunzai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0619>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油菜素内酯对盐胁迫下黑麦草种子萌发及幼苗生长的生理调控作用

Physiological regulation of brassinosteroids on seed germination and seedling growth in *Lolium perenne* in response to salt stress

草业科学. 2021, 38(6): 1110 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629..2021-0034>

外源NO对盐胁迫下沙打旺种子萌发和幼苗生长的影响

Effect of nitric oxide on seed germination and seedling growth of *Astragalus adsurgens* under NaCl stress

草业科学. 2017, 11(7): 1459 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0523>

盐胁迫对醉马草和高羊茅种子萌发及幼苗生长的影响

Effects of NaCl stress on seed germination and seedling growth of two cold-season grasses

草业科学. 2021, 38(5): 870 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0391>

赤霉素和生长素浸种对野牛草种子萌发及幼苗生长生理的影响

Seed soaking in exogenous gibberellin and auxin and their impact on seed germination and seedling physiology of *Buchloe dactyloides* (Nutt.) Engelm.

草业科学. 2017, 11(9): 1838 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0036>

重金属Cu、Ni、Pb对盐旱胁迫下盐生草种子萌发特性影响

Effects of heavy metals Cu, Ni, and Pb on seed germination characteristics of *Halogeton glomeratus* under salinity and drought stress

草业科学. 2020, 37(8): 1537 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-314>

香豆素对苏丹草种子萌发和幼苗生长的影响

Effect of coumarin on *Sorghum sudanense* seed germination and seedling growth

草业科学. 2017, 11(11): 2279 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0008>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0619

崔文宁, 孟静静, 张文香, 路培, 高培培, 王茜, 张存在. GA_3 处理对盐胁迫下 5 种牧草种子萌发及幼苗生长的影响. 草业科学, 2024, 41(1): 89-98.

CUI W N, MENG J J, ZHANG W X, LU P, GAO P P, WANG Q, ZHANG C Z. Effect of gibberellin on seed germination and seedling growth of five species of forage seeds. Pratacultural Science, 2024, 41(1): 89-98.



GA_3 处理对盐胁迫下 5 种牧草种子萌发及幼苗生长的影响

崔文宁¹, 孟静静¹, 张文香¹, 路培¹, 高培培¹, 王茜¹, 张存在²

(1. 衡水学院生命科学学院, 河北 衡水 053000; 2. 河北省武邑县自然资源和规划局, 河北 衡水 053400)

摘要: 盐胁迫是限制种子萌发和幼苗生长的关键因子, 适宜浓度的赤霉素 (GA_3) 可有效缓解盐胁迫对种子造成的不利影响。为了解 GA_3 对盐胁迫下牧草种子萌发和生长的缓解效应, 筛选出促进盐胁迫下 5 种牧草种子萌发和幼苗生长的最佳 GA_3 浓度, 本研究以 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液模拟盐胁迫, 以黑麦草 (*Lolium perenne*)、‘朝牧 1 号’稗谷 (*Echinochloa crusgalli* ‘Chaomu1’)、羊草 (*Leymus chinensis*)、紫花苜蓿 (*Medicago sativa*)、白三叶 (*Trifolium repens*) 5 种牧草种子为试材, 选取不同浓度 GA_3 进行浸种处理, 测定其发芽率、发芽指数、根长、苗高、鲜重等指标。结果表明: GA_3 浸种可有效缓解盐胁迫对 5 种牧草种子萌发和幼苗生长造成的抑制作用, 且不同浓度间作用差异显著 ($P < 0.05$)。 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 GA_3 能有效促进黑麦草、羊草、紫花苜蓿和白三叶种子的萌发和幼苗生长; $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 GA_3 能有效促进‘朝牧 1 号’稗谷的种子萌发, $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 GA_3 能显著促进其种苗的生长。本研究结果对盐胁迫逆境下的牧草种植及土壤改良具有参考价值。

关键词: 赤霉素; 盐胁迫; 牧草种子; 萌发; 生长特性

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2024)01-0089-10

Effect of gibberellin on seed germination and seedling growth of five species of forage seeds

CUI Wenning¹, MENG Jingjing¹, ZHANG Wenxiang¹, LU Pei¹, GAO Peipei¹, WANG Qian¹, ZHANG Cunzai²

(1. Department of Biology, Hengshui University, Hengshui 053000, Hebei, China;

2. Natural Resources and Planning Bureau of Wuyi County, Hengshui 053400, Hebei, China)

Abstract: Salt stress is a key factor in limiting seed germination and seedling growth. An appropriate concentration of gibberellin (GA_3) can alleviate the adverse effects of salt stress on forage seeds. This study investigated the alleviating effect of GA_3 on seed germination and growth and determined the best GA_3 concentration to promote seed germination and seedling growth of five species of forage seeds under salt stress. Salt stress was simulated using $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl. The test materials were seeds of *Lolium perenne*, *Echinochloa crusgalli* ‘Chaomu1’, *Leymus chinensis*, *Medicago sativa*, and *Trifolium repens*. Seeds were soaked in different concentrations of GA_3 . The germination rate, germination index, root length, seedling height, fresh weight, and other indices were measured. Soaking seeds in GA_3 could effectively alleviate the inhibitory effects of salt stress on seed germination and seedling growth of the five forage species. The effects significantly

收稿日期: 2022-08-05 接受日期: 2023-03-21

基金项目: 衡水学院协同创新课题 (2023XTCX013); 衡水学院高层次人才科研启动基金项目 (2022GC03); 河北省三三三人才资助项目 (A2021011155); 河北省湿地生态与保护重点实验室 (筹) 自主课题 (hklz201912); 衡水学院基金培育课题“国土空间规划背景下衡水湖片区近自然修复规划策略与实践” (2023XJZX08)

第一作者: 崔文宁 (1985-), 女, 河北武邑人, 讲师, 硕士, 研究方向为植物生理与生物技术。E-mail: cuiwenning86@163.com

通信作者: 张文香 (1984-), 女, 河北武邑人, 副教授, 博士, 研究方向为植物抗逆生理。E-mail: 276037709@qq.com

differed among the different GA₃ concentrations ($P < 0.05$). The GA₃ concentration of 150 mg·L⁻¹ could effectively promote seed germination and seedling growth of *L. perenne*, *L. chinensis*, *M. sativa*, and *T. repens*. The GA₃ concentration of 100 mg·L⁻¹ effectively promoted seed germination of *E. crusgalli*, and 50 mg·L⁻¹ GA₃ significantly promoted seedling growth. The study findings will be valuable reference data for forage planting and soil reclamation under salt stress.

Keywords: GA₃; salt stress; forage; germination; growth characteristic

Corresponding author: ZHANG Wenxiang E-mail: 276037709@qq.com

植物的生长发育受多种因素的制约,当这种制约超过一定的限度时就会影响到植物正常的生长发育甚至会导致植物死亡,这种现象称为胁迫或逆境^[1]。盐胁迫是植物在生长发育过程中普遍遇到的严峻问题,主要由土壤中的中性盐 NaCl 所致^[2],且中、高浓度的单盐离子 Na⁺ 和 Cl⁻ 还会影响植物对 Ca²⁺、K⁺ 等其他有益矿质元素的吸收,产生拮抗效应^[3]。大多数植物受盐胁迫后会出现代谢障碍、水分胁迫、分裂减少甚至细胞膜解体等状况,最终导致植物细胞内外离子和水分失去平衡,代谢紊乱或者停止,植物生长受到抑制^[4]。目前,盐胁迫已经成为导致作物减产的重要制约因素^[5]。

种子的萌发期是植物整个生活史中最脆弱、最易受外界环境因子影响的阶段^[6],所以,在种子萌发期进行耐盐鉴定相对准确,最能体现植物对逆境的耐受性^[7]。盐胁迫下种子幼苗阶段的生理特性与生长状况研究可有效提高优良品种和植株的选育^[8]。目前针对种子的抗盐性研究已有不少报道^[9-11]。植物生长调节剂与植物耐盐性的关系一直是研究植物耐盐机理的重要内容^[12]。赤霉素(GA₃)是一种高效、广谱的植物生长调节物质,在种子的休眠调节中发挥中心作用。外源添加一定浓度的 GA₃ 可提高植物的耐盐性,能提早打破种子的休眠,提高发芽率^[13];也可代替低温春化及长日照处理,诱导植物提前开花及促进生长发育。目前,已有许多相关 GA₃ 处理影响植物种子萌发的研究^[14-17],但相关 GA₃ 激素对盐胁迫下牧草种子萌发及幼苗生长影响的研究鲜有报道。

牧草大多是草本植物,投入成本低,产量高。近年来,由于环境变化和人类破坏,草地盐碱化程度逐年加重,牧草产量和质量受到严重影响^[18-19]。黑麦草(*Lolium perenne*)、‘朝牧 1 号’稗谷(*Echinochloa crusgalli* ‘Chaomu1’)和羊草(*Leymus chinensis*)属于禾本科多年生植物,分布范围广,抗性强,可多次刈

割,是当前畜牧业上常用的优质牧草;紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和白三叶(*Trifolium repens*)是豆科多年生草本植物,品质优良,绿期长,适口性好,固氮能力强,是典型的蜜源牧草,其中紫花苜蓿还有“牧草之王”之称^[20-21]。本试验以 5 种常用优质牧草种子为研究对象,拟对 GA₃ 处理对盐胁迫下的牧草种子萌发特性和生长特性的影响进行系统研究,筛选出促进盐胁迫下 5 种牧草种子萌发和幼苗生长的最佳 GA₃ 浓度,以期了解外源激素 GA₃ 对牧草盐胁迫逆境的缓解效应,从而进一步为改善土壤生态环境、促进畜牧业的发展提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料黑麦草、‘朝牧 1 号’稗谷、羊草、紫花苜蓿、白三叶种子均由河北省武邑县自然资源和规划局提供。5 个品种种子均为 2021 年采收,获取后暂存于 4 ℃ 低温冰箱避光保存。

1.2 试验方法

1.2.1 种子处理

挑取饱满健康、无虫害、无缺刻的 5 种牧草(黑麦草、‘朝牧 1 号’稗谷、羊草、紫花苜蓿、白三叶)种子,试验前先用 0.5% 的 KMnO₄ 溶液浸种消毒 20 min,用无菌水清洗冲洗 3~4 次,再用吸水纸吸干备用。

1.2.2 试验设计

以 100 mmol·L⁻¹ 的 NaCl 盐溶液模拟盐胁迫,经不同浓度的 GA₃ 溶液(0、25、50、100、150、250、500 mg·L⁻¹)浸泡 14 h,相应处理标记为(S₀、S₁、S₂、S₃、S₄、S₅、S₆),设置无菌水处理作对照(CK),每个处理 100 粒种子,3 次重复。浸种完毕后,用 0.1% 的 HgCl₂ 消毒 15 min,再用无菌水冲洗 3~4 次,晾干备用。用垫有 2 层无菌吸水滤纸的直径为 11 cm 的培养皿作发芽床,种子均匀散开,加入 5 mL 100 mmol·L⁻¹

的 NaCl 溶液进行盐胁迫, 每天固定时间称重并添加无菌水以保持一定的湿度和盐胁迫浓度。所有处理进行相同的操作。

1.2.3 相关指标测定

以牧草种子胚根长度 $\geq 1/2$ 种子粒径时视为种子发芽^[20], 第 5 天结束后统计发芽势 (GE), 10 d 结束后停止试验, 测定种子的萌发情况。测定指标: 种子的根长 (root length, RL)、苗高 (shoot length, SL)、发芽率 (germination percentage, GP)、发芽势 (germination energy, GE)、发芽指数 (germination index, GI)、种子活力指数 (vitality index, VI)、平均发芽天数 (mean germination time, MGT) 和鲜重 (fresh weight, FW)。计算公式和方法^[22-23]如下:

发芽势 (GE) = 第 5 天正常发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽率 (GP) = 第 10 天正常发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$;

发芽指数 (GI) = $\sum(Gt/Dt)$;

活力指数 (VI) = $GI \times S$;

平均发芽天数 (MGT) = $\sum(Gt \times Dt) / \sum Gt$;

式中: Gt 为第 t 天的发芽种子数, Dt 为相应发芽天数, S 为第 10 天的平均鲜重 (mg)。

根长 (RL)、苗高 (SL) 的测定: 萌发试验 10 d

后, 将萌发的种子用无菌水反复轻轻冲洗 3~4 次, 冲洗干净后用吸水纸将种苗表面的水分吸干, 再用游标卡尺测定根长度和苗长度, 详细记录试验数据。

鲜重 (FW) 的测定: 种子萌发第 10 天时, 将试验的种子用无菌水轻轻反复冲洗 3 次, 冲洗干净后用吸水纸将种苗表面的水分充分吸干, 称取此时的重量, 即为鲜重。

1.3 培养条件

所有试验均于 2022 年 4 月于衡水学院植物生理学实验室进行, 试验处理均在人工智能气候培养箱 ZXQP-R1350 内培养完成, 设定温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, 光照 12 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$, 光照强度 2 500 lx。

1.4 数据分析

试验测定所有结果数据均用平均值 $\pm$ 标准误差表示, 用 SPSS 20.0 进行统计分析处理, 文中所有图标均采用 Excel 2010 制图。

2 结果与分析

2.1 GA₃ 处理对盐胁迫下 5 种牧草种子发芽特性的影响

相对于 CK, S₀ 处理对 5 种牧草种子的萌发有显著抑制作用 ($P < 0.05$) (表 1 和表 2), GA₃ 溶液处

表 1 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子发芽率的影响
Table 1 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on germination percentage of five forages

草种 Species	处理 Treatment								%
	CK	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	94.91 $\pm$ 0.02a	21.31 $\pm$ 0.62g	41.67 $\pm$ 1.12ef	43.33 $\pm$ 2.46e	50.61 $\pm$ 2.40d	67.34 $\pm$ 3.34b	55.43 $\pm$ 2.16c	40.75 $\pm$ 1.00f	
‘朝牧1号’稗谷 <i>Echinochloa crusgalli</i> ‘Chaomul’	95.00 $\pm$ 0.00a	26.64 $\pm$ 1.12g	43.86 $\pm$ 2.52f	52.37 $\pm$ 3.00e	72.30 $\pm$ 5.42b	65.44 $\pm$ 5.12c	60.35 $\pm$ 4.33d	49.31 $\pm$ 2.27e	
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	93.28 $\pm$ 0.05a	19.79 $\pm$ 0.31g	35.67 $\pm$ 1.42f	46.67 $\pm$ 2.33de	51.34 $\pm$ 3.56c	62.31 $\pm$ 3.72b	49.75 $\pm$ 3.00c	42.76 $\pm$ 1.99e	
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	90.88 $\pm$ 0.12a	17.35 $\pm$ 1.00h	27.34 $\pm$ 2.54g	39.34 $\pm$ 1.66f	46.24 $\pm$ 3.24e	67.05 $\pm$ 5.21b	56.21 $\pm$ 4.12c	50.00 $\pm$ 4.00d	
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	88.23 $\pm$ 0.21a	13.98 $\pm$ 0.14g	20.26 $\pm$ 1.12f	30.25 $\pm$ 2.52e	44.25 $\pm$ 3.33d	59.68 $\pm$ 4.00b	51.22 $\pm$ 3.97c	42.67 $\pm$ 3.00d	

CK: 无菌水对照; S₀~S₆: 100 mmol·L⁻¹ NaCl盐胁迫 + (0、25、50、100、150、250、500 mg·L⁻¹) GA₃处理。不同小写字母表示同种牧草种子不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

CK: treatment without NaCl or GA₃; S₀~S₆: 100 mmol·L⁻¹ NaCl stress with GA₃ 0, 25, 50, 100, 150, 250, 500 mg·L⁻¹ treatment, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences among different concentrations treatment of each forage at the 0.05 level. This is applicable for the following tables and figures as well.

表 2 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子发芽势的影响

Table 2 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on germination energy of five forages

草种 Species	处理 Treatment								%
	CK	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	80.34 ± 0.13a	11.40 ± 0.33f	31.49 ± 2.12e	33.43 ± 2.77e	40.59 ± 3.00d	57.38 ± 3.34b	45.50 ± 2.16c	31.55 ± 1.00e	
‘朝牧1号’稗谷 <i>Echinochloa crusgalli</i> ‘Chaomul’	83.21 ± 1.36a	15.54 ± 1.42g	33.77 ± 2.22f	41.47 ± 3.00e	62.41 ± 5.42b	55.38 ± 5.12c	50.02 ± 4.33d	39.47 ± 2.27e	
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	79.60 ± 0.47a	10.67 ± 0.51h	25.76 ± 1.52g	36.70 ± 2.33e	42.51 ± 3.56cd	55.31 ± 3.72b	39.39 ± 3.00d	32.38 ± 1.27f	
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	76.29 ± 0.11a	10.55 ± 1.10h	17.64 ± 2.45g	29.43 ± 1.44f	36.43 ± 3.24e	54.22 ± 5.21b	46.21 ± 4.32c	40.05 ± 4.00d	
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	74.48 ± 0.28a	9.99 ± 0.34h	13.37 ± 1.36g	22.55 ± 2.12f	34.51 ± 3.33e	49.59 ± 5.00b	41.32 ± 3.97c	34.33 ± 2.33d	

理后均会对遭受盐胁迫后的牧草种子产生促发作用。遭受盐胁迫的牧草种子的发芽率和发芽势均降低,其中白三叶受抑制最严重,发芽率低至 13.98%,相比 CK 降低了 74.25%,‘朝牧 1 号’稗谷抗盐性相对最大,发芽率相比 CK 降低了 68.36%。随着 GA₃ 浓度的不断提高,5 种牧草种子的发芽率和发芽势均呈先上升后下降的趋势,所有处理均显著低于 CK ($P < 0.05$)。各处理组,黑麦草、羊草、紫花苜蓿和白三叶的发芽率均在 S₄ 处理下显著提高,分别为 67.34%、62.31%、67.05% 和 59.68%,而‘朝牧 1 号’稗谷的发芽率和发芽势在浓度较低的 S₃ 处理下最高,分别为 72.30%和 62.41%。

S₀ 处理对 5 种牧草种子的发芽指数和活力指数有显著抑制作用,相比 CK 均差异显著 ($P < 0.05$)。

GA₃ 浸泡处理可有效缓解盐胁迫对 5 种牧草种子发芽和种子活力的抑制 (图 1 和图 2)。随着 GA₃ 浓度的增加,5 种牧草种子的发芽指数和活力指数均呈现先上升后下降的趋势,这与发芽率和发芽势的趋势 (表 1、表 2) 基本一致,5 个牧草种子在相对最佳处理浓度下的发芽指数与 CK 无显著差异 ($P > 0.05$)。各处理下,黑麦草、羊草、紫花苜蓿和白三叶的发芽指数在 S₄ 处理下最大,分别为 27.38、24.22、23.96 和 21.33,活力指数也最大,分别为 720.64、652.19、613.01 和 485.13;而‘朝牧 1 号’稗谷的发芽指数和活力指数均在 S₃ 处理下最大,分别为 28.56 和 756.54,显著高于其他种子。

S₀ 处理对 5 种牧草种子发芽时间抑制效果明显,与 CK 相比均差异显著 ($P < 0.05$)。随着 GA₃ 浓

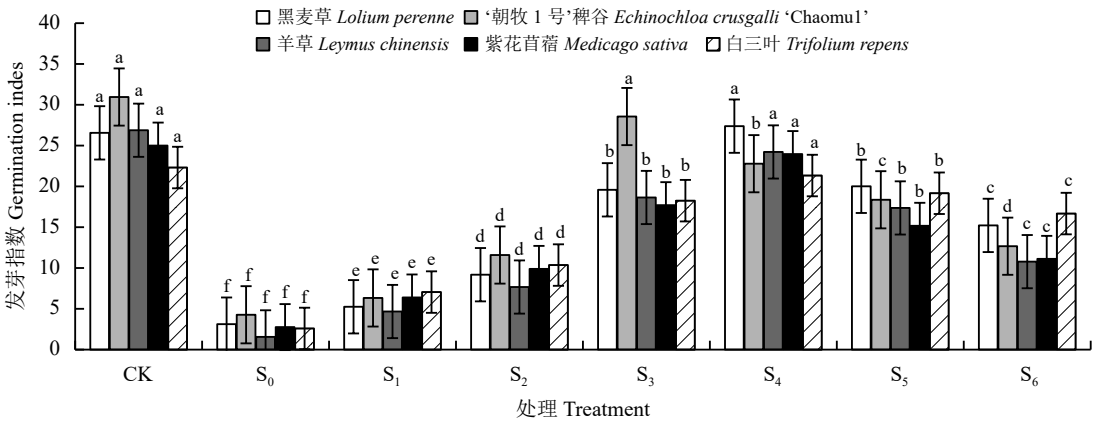
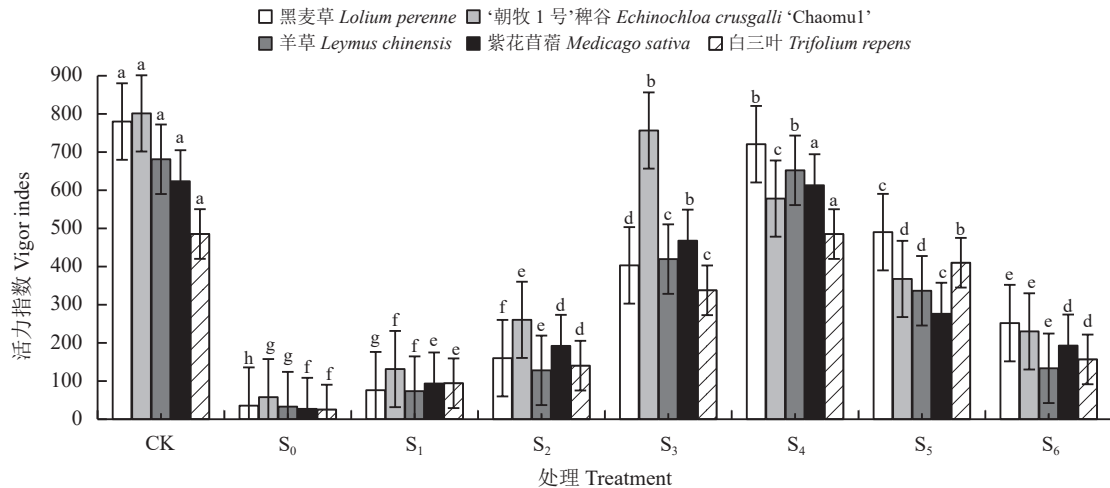


图 1 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子发芽指数的影响

Figure 1 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on the germination index of five forages

图 2 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子活力指数的影响Figure 2 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on the vitality index of five forages

度增加, 5 种牧草种子的平均发芽时间均呈先降低后升高的趋势, 高浓度的 GA₃ 会抑制牧草种子的发芽 (图 3)。其中, ‘朝牧 1 号’ 稗谷种子平均发芽天数在 S₃ 处理时最低, 仅为 1.27 d, 与 CK 差异不显著 ($P > 0.05$); 其他 4 种牧草种子均在 S₄ 处理时平均发芽天数最低, 分别为 1.7、2.07、3.00 和 3.59 d, 其中黑麦草和羊草相与 CK 无显著差异, 低浓度的 S₁ 处理对黑麦草、‘朝牧 1 号’ 稗谷和白三叶发芽时间有明显的促进作用, S₁ 和 S₀ 处理时表现出显著差异。

2.2 GA₃ 处理对盐胁迫下 5 种牧草种子幼苗生长的影响

S₀ 处理对 5 种牧草种子的鲜重有严重的抑制作用, 与 CK 相比差异显著 ($P < 0.05$)。随着 GA₃ 浓度的增加, 5 种牧草种子的鲜重均呈先增后降的趋势

(表 3)。各处理下, 黑麦草种子在 S₄ 处理时种子的鲜重达到最大, 为 26.32 mg, 与 CK 差异显著 ($P < 0.05$), S₆ 处理后鲜重显著下降到 S₁ 低浓度水平; ‘朝牧 1 号’ 稗谷种子在 S₃ 处理时鲜重最大, 为 29.41 mg, 与 CK 无显著差异 ($P > 0.05$), 后随着 GA₃ 浓度增加, 有显著降低趋势, 在 S₆ 处理时已趋近 S₀ 水平, 说明高浓度的 GA₃ 严重抑制 ‘朝牧 1 号’ 稗谷的鲜重; 羊草、紫花苜蓿和白三叶在 S₄ 处理时鲜重最大, 分别为 25.48、27.22、25.41 mg, 与 CK 无显著差异。

S₀ 处理对 5 种牧草种子幼苗的根长有严重的抑制作用, 与 CK 相比差异显著 ($P < 0.05$)。随着 GA₃ 浓度的不断提高, 5 种牧草种子幼苗的根长均呈现先上升后下降的趋势 (表 4)。盐胁迫状态下的 5 种牧草经较低浓度的 GA₃ 浓度处理后, 与 CK 均有显

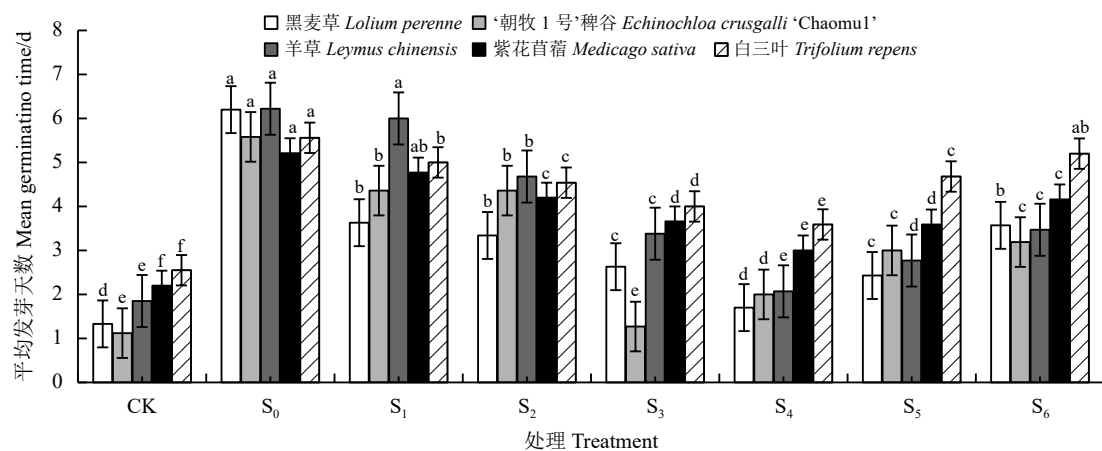
图 3 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子平均发芽天数的影响Figure 3 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on mean germination time of five forages

表 3 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子鲜重的影响

Table 3 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on fresh weight of five forages

草种 Species	处理 Treatment								mg
	CK	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	29.29 ± 0.68a	10.40 ± 0.78g	14.49 ± 2.32f	17.43 ± 2.77e	20.59 ± 3.00d	26.32 ± 3.64b	23.50 ± 2.16c	14.55 ± 1.00e	
‘朝牧1号’稗谷 <i>Echinochloa crusgalli</i> ‘Chaomul’	31.52 ± 0.55a	13.54 ± 2.42f	20.77 ± 2.62d	22.47 ± 3.00c	29.91 ± 5.32a	25.38 ± 4.12b	20.02 ± 4.03d	13.67 ± 2.07e	
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	27.36 ± 1.90a	8.67 ± 1.51g	15.76 ± 1.92e	16.70 ± 2.77de	22.51 ± 3.16b	25.48 ± 2.72a	19.39 ± 3.40c	12.38 ± 1.67f	
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	26.88 ± 1.00a	8.55 ± 1.10f	14.64 ± 3.45e	19.43 ± 4.44c	23.43 ± 3.34b	27.22 ± 5.71a	18.21 ± 4.12cd	17.35 ± 4.20d	
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	24.54 ± 0.84a	6.99 ± 0.54e	13.37 ± 1.33d	13.55 ± 2.12d	18.51 ± 3.13b	25.41 ± 5.10a	15.02 ± 3.67c	13.00 ± 2.63d	

表 4 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子幼苗根长的影响

Table 4 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on root length of five forages

草种 Species	处理 Treatment								cm
	CK	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	7.23 ± 0.00a	2.40 ± 0.33e	3.49 ± 0.12c	4.43 ± 0.77bc	5.19 ± 0.70b	6.48 ± 0.34a	5.50 ± 0.66b	2.97 ± 0.90d	
‘朝牧1号’稗谷 <i>Echinochloa crusgalli</i> ‘Chaomul’	8.66 ± 0.44a	2.54 ± 0.42f	4.77 ± 0.22e	5.47 ± 0.60d	8.41 ± 0.72a	7.33 ± 1.00b	6.02 ± 0.53c	2.67 ± 0.67f	
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	7.98 ± 0.67a	1.97 ± 0.51f	3.76 ± 0.52e	5.70 ± 0.33c	6.61 ± 0.66b	7.51 ± 0.72a	4.39 ± 0.590d	3.38 ± 0.57e	
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	7.28 ± 1.41a	2.55 ± 0.40e	2.64 ± 0.45e	3.43 ± 0.44d	5.13 ± 0.54b	7.22 ± 0.81a	5.21 ± 0.39b	4.05 ± 0.40c	
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	6.87 ± 1.06a	2.11 ± 0.34e	2.27 ± 0.36e	3.55 ± 0.12d	4.51 ± 0.63c	6.59 ± 1.00a	5.32 ± 0.97b	3.33 ± 0.63d	

著差异。其中，黑麦草、‘朝牧 1 号’稗谷和羊草这 3 种禾本科牧草在较低浓度的 S₁ 处理时，根长较 S₀ 处理显著延长增长，而其他两种豆科牧草紫花苜蓿和白三叶在较低浓度的 S₁ 处理时，根长较 S₀ 处理差异不显著 ($P > 0.05$)。黑麦草、羊草、紫花苜蓿、白三叶均在 S₄ 处理时根长达到峰值，分别为 6.48、7.51、7.22、6.59 cm；‘朝牧 1 号’稗谷的根长在 S₃ 处理时达到峰值，为 8.41 cm，虽然‘朝牧 1 号’稗谷的根长最长，但 S₆ 处理时根长与 S₀ 无显著差异，羊草在此高浓度的 GA₃ 处理下，根长也下降到 S₁ 处理水平。另外，高浓度 GA₃ 处理组的牧草种子根长缩短但变粗壮，且根尖部位褐色加深，说明高浓度的

GA₃ 对根的伸长有抑制作用。

S₀ 处理对 5 种牧草种子的苗高有严重的抑制作用，与 CK 相比差异显著 ($P < 0.05$) (表 5)。GA₃ 浸种处理可以缓解盐胁迫对 5 种牧草种苗生长的抑制作用。经 GA₃ 溶液浸种处理后的 5 种牧草种子的苗高随着 GA₃ 溶液浓度的增加均出现峰值，峰值之后高浓度的 GA₃ 溶液会抑制种苗的生长。其中，黑麦草、羊草、紫花苜蓿和白三叶均在 S₄ 处理时苗高达到最高，分别为 2.98、2.64、2.17 和 2.30 cm；而较低浓度的 GA₃ 即可对‘朝牧 1 号’稗谷的幼苗生长产生显著影响，在 S₂ 处理时苗高达到最高，为 3.21 cm，在 5 种牧草种子中对 GA₃ 反应最为敏感。

表 5 不同 GA₃ 浓度处理对 5 种牧草种子苗高的影响
Table 5 Effect of different concentrations of GA₃ treatments on seedling length of five forages

草种 Species	处理 Treatment								cm
	CK	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
黑麦草 <i>Lolium perenne</i>	3.85 ± 0.11a	1.00 ± 0.09e	1.49 ± 0.32d	1.43 ± 0.67d	1.79 ± 0.81c	2.98 ± 0.34b	2.00 ± 0.67c	1.17 ± 0.44e	
‘朝牧1号’稗谷 <i>Echinochloa crusgalli</i> ‘Chaomul’	3.60 ± 0.34a	1.02 ± 0.22e	1.77 ± 0.24c	3.21 ± 0.40a	2.31 ± 0.72b	2.14 ± 1.00b	1.72 ± 0.55c	1.37 ± 0.35de	
羊草 <i>Leymus chinensis</i>	2.85 ± 1.00a	0.87 ± 0.31f	1.16 ± 0.32de	1.40 ± 0.33c	2.01 ± 0.56b	2.64 ± 0.42a	2.09 ± 0.59b	1.08 ± 0.26e	
紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	2.33 ± 0.49a	0.92 ± 0.10e	1.24 ± 0.43cd	1.43 ± 0.34c	1.73 ± 0.50b	2.17 ± 0.71a	1.71 ± 0.34b	1.22 ± 0.40d	
白三叶 <i>Trifolium repens</i>	2.69 ± 0.88a	0.96 ± 0.24f	1.17 ± 0.66ef	1.52 ± 0.52cd	1.52 ± 0.33c	2.30 ± 1.00b	1.32 ± 0.67d	1.33 ± 0.44d	

3 讨论

种子萌发是生命的开始,是植物生长发育的关键阶段,幼苗生长是植物对逆境胁迫的综合体现,盐胁迫会抑制植物种子的萌发和幼苗的正常生长^[24-25],盐浓度越高,盐胁迫越重,种子的发芽情况就会越差^[26]。GA₃能促进细胞的生长和分裂膨大,提高种子内部酶的活性并促进生理代谢^[27],且外源 GA₃对植物的株高、鲜重、叶片数等也有十分重要的影响^[28]。种子发芽势、发芽指数、平均发芽天数和活力指数是研究植物种子抗盐性萌发常采用的关键指标^[29],也是衡量种子发芽能力及种子质量等级的重要指标^[30-31]。本研究发现,100 mmol·L⁻¹的 NaCl 盐溶液对 5 种牧草种子的萌发有明显的抑制作用,此结果与东方山羊豆 (*Galega orientalis*)^[32]和番茄 (*Solanum lycopersicum*)^[7]种子萌发的结果一致。但曾幼玲等^[33]在研究盐爪爪 (*Kalidium foliatum*)和盐穗木 (*Halostachys caspica*)种子萌发中发现一定程度的盐胁迫能够促进部分植物种子的萌发,杨姝等^[34]也同时发现低浓度的盐处理会促进沙打旺 (*Astragalus adsurgens*)种子的萌发及幼苗生长,马琳等^[18]在研究 NaCl 对沙蒿 (*Artemisia desertorum*)、花棒 (*Hedysarum scoparium*)等 4 种牧草种子萌发和幼苗生长的影响时也发现低盐处理能促进幼苗生长,这可能是因为一定浓度的 NaCl 影响了细胞膜的渗透性,从而影响了代谢能力,也可能是 Na⁺或 Cl⁻抑制了呼吸酶的活性。植物种子的耐盐性也与其原生境有关,也会对结果产生一定影响。所以,不同程度的盐胁迫及

抗逆性机制研究将是下一步工作重点。

本研究中,一定浓度的外源激素 GA₃能缓解盐胁迫对 5 种牧草种子萌发造成的不利影响,150 mg·L⁻¹的 GA₃浸泡 14 h 能显著激活黑麦草、羊草、紫花苜蓿、白三叶种子的活性,其发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数及幼苗的根长和苗高、鲜重等指标均相比 S₀处理有显著提高,平均发芽天数显著降低 ($P < 0.05$); ‘朝牧 1 号’稗谷种子各项发芽指标则在 100 mg·L⁻¹处理时即可显著提高,其苗高在 GA₃浓度为较低浓度的 50 mg·L⁻¹处理时即达到峰值,在 5 种牧草种子中对 GA₃激素最敏感。当 GA₃浓度 ≥ 250 mg·L⁻¹时,对种子的各项指标有抑制作用,且随着 GA₃激素浓度的增加,抑制作用越明显。本研究还发现,高浓度的 GA₃处理下,5 种牧草种子的胚根伸长普遍缩短,这说明高浓度盐胁迫下会抑制胚根生长,此结果与王伟杰等^[15]在研究 GA₃对盐胁迫下黄芩 (*Scutellaria baicalensis*)种子萌发的影响结果一致。

本研究发现,相同试验条件下,3 种禾本科牧草种子的发芽情况普遍优于其他两种豆科牧草种子,这说明盐胁迫状态下,禾本科牧草种子对 GA₃的敏感性要优于豆科植物种子,但因影响牧草种子萌发的因素多样,是一个复杂的生理生化过程^[35],所以,具体的原因还有待进一步深入研究。

4 结论

研究表明,100 mmol·L⁻¹的 NaCl 盐胁迫会显

著抑制黑麦草、‘朝牧 1 号’稗谷、羊草、紫花苜蓿和白三叶种子的萌发及幼苗生长,外源激素 GA_3 能有效缓解盐胁迫造成的不利影响。其中, $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 GA_3 能有效促进黑麦草、羊草、紫花苜蓿和白三叶种子的萌发和幼苗生长,此浓度的 GA_3 可有效缓

解以上 4 种牧草的盐胁迫效应;‘朝牧 1 号’稗谷种子对 GA_3 相对比较敏感, $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 GA_3 能有效促进‘朝牧 1 号’稗谷的种子萌发, $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 GA_3 即可显著促进其种苗的生长。本研究结果对盐胁迫逆境下的牧草种植及土壤改良具有参考价值。

参考文献 References:

- [1] 赵福庚, 何龙飞, 罗庆云. 植物逆境生理生态学. 北京: 化学工业出版社, 2004.
ZHAO F G, HE L F, LUO Q Y. Stress Physiology and Ecology of Plants. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] 杨景宁, 王彦荣. NaCl胁迫对四种荒漠植物种子萌发的影响. *草业学报*, 2012, 21(5): 32-38.
YANG J, WANG Y R. Effect of NaCl stress on seed germination of four dessert plant species. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(5): 32-38.
- [3] 刘凤岐, 刘杰淋, 朱瑞芬, 张悦, 郭勇, 韩贵清, 唐凤兰. 4种燕麦对NaCl胁迫的生理相应及耐盐性评价. *草业学报*, 2015, 24(1): 183-189.
LIU F Q, LIU J L, ZHU R F, ZHANG Y, GUO Y, HAN G Q, TANG F L. Physiological responses and tolerance of four oat varieties to salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(1): 183-189.
- [4] 敬雪敏, 孙玉竹, 司雨凡, 李玉满, 沈小义, 杜海霞, 刘香萍. 萌发期不同品种紫花苜蓿对盐胁迫的响应. *草学*, 2018, 39(S1): 43-47.
JING X M, SUN Y Z, SI Y F, LI Y M, SHEN X Y, DU H X, LIU X P. Response of different alfalfa cultivars to salt stress during germination. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2018, 39(S1): 43-47.
- [5] 张菊平, 张会灵, 张焕丽. 外源NO降低辣椒幼苗盐害的生理效应. *北方园艺*, 2020(22): 10-15.
ZHANG J P, ZHANG H L, ZHANG H L. Physiological effect of exogenous nitric oxide on pepper seeding under NaCl stress. *Northern Horticulture*, 2020(22): 10-15.
- [6] OBANOR F O, WALTER M, JASPERS M V, EIRIAN JONES E. Effect of temperature, relative humidity, leaf wetness and leaf age on *Spilocaea oleagina* conidium germination on olive leaves. *European Journal of Plant Pathology*, 2008, 120(3): 211-222.
- [7] 戴陶宇, 王前程, 张迎迎, 朱为民, 张辉, 万延慧. 外源赤霉素对盐胁迫下番茄种子萌发和幼苗生长的影响. *种子*, 2022, 4(3): 74-80.
DAI T Y, WANG Q C, ZHANG Y Y, ZHU W M, ZHANG H, WAN Y H. Effects of exogenous gibberellin on seed germination and seedling growth of tamato under salt stress. *Seed*, 2022, 4(3): 74-80.
- [8] 陈雅琦, 苏楷淇, 李春杰. 盐胁迫对2种冷季型草坪草幼苗生长和生理特性的影响. *草原与草坪*, 2021, 41(3): 32-39.
CHEN Y Q, SU K Q, LI C J. Effects of NaCl stress on seedling growth and physiological responses of *Achnatherum inebrians* and *Festuca arundinacea*. *Grassland and Turf*, 2021, 41(3): 32-39.
- [9] 王婧婧, 余玲, 朱恭, 陈香来, 胡小文. 几种环境因子对黄花矶松种子萌发的影响. *草业科学*, 2018, 35(7): 1661-1669.
WANG J J, YU L, ZHU G, CHEN X L, HU X W. Effect of environmental factors on seed germination of *Limonium aureum*. *Pratacultural Science*, 2018, 35(7): 1661-1669.
- [10] 王彬彬, 李秋果, 于景金, 杨志民. 3种外源物对匍匐剪股颖耐盐性的影响. *草业科学*, 2022, 39(3): 474-484.
WANG B B, LI Q G, YU J J, YANG Z M. Effects of three exogenous substances on the salt tolerance of creeping bentgrass. *Pratacultural Science*, 2022, 39(3): 474-484.
- [11] 宋小丽, 赵祥. 苯甲酸及外源物质对番茄种子发芽的影响. *北方园艺*, 2014(7): 20-23.
SONG X L, ZHAO X. Effect of benzoic acid and exogenous substances on the germination of tomato seeds. *Northern Horticulture*, 2014(7): 20-23.
- [12] 师晨娟, 刘勇, 荆涛. 植物激素抗逆性研究进展. *世界林业研究*, 2006, 19(5): 21-26.

- SHI C J, LIU Y, JING T. Review on stress-resistance of phytohormone. *World Forestry Research*, 2006, 19(5): 21-26.
- [13] GASHI B, ABDULLAI K, MATA V, KONGJIKA E. Effect of gibberellic acid and potassium nitrate on seed germination of the resurrection plants *Ramonda serbica* and *Ramonda nathaliae*. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(20): 4537-4542.
- [14] 何玉娟, 李东琴, 邓波, 杨军, 对山艾力·卡布吐拉, 杨超. 外源赤霉素GA₃施加对紫花苜蓿—根瘤共生体系的影响. *草地学报*, 2022, 30(2): 385-393.
- HE Y J, LI D Q, DENG B, YANG J, Duishanaili-Kabutula, YANG C. The effects of exogenous gibberellin (GA₃) on the symbiotic system of alfalfa rhizobium. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2): 385-393.
- [15] 王伟杰, 管仁伟, 路俊仙, 张翠翠, 徐东川, 林慧彬. GA₃浸种对盐胁迫下黄芩种子萌发抗氧化酶及内源激素的影响. *中药材*, 2022, 45(2): 288-292.
- WANG W J, GUAN R W, LU J X, ZHANG C C, XU D C, LIN H B. Effects of GA₃ immersion on antioxidant enzymes and endogenous hormones of *Scutellaria baicalensis* seed germination under salt stress. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2022, 45(2): 288-292.
- [16] 殷武平, 袁祖华, 彭莹, 童辉, 杨晓, 贾晓玲. 不同浸种和催芽处理对芹菜种子发芽的影响. *中国瓜菜*, 2021, 34(11): 100-103.
- YIN W P, YUAN Z H, PENG Y, TONG H, YANG X, JIA X L. Effects of different seed soaking and germination treatments on the germination of celery seeds. *Chinese Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(11): 100-103.
- [17] 朱秀红, 任方方, 茹广欣, 李哲静, 杨会焕, 张威. 赤霉素对盐胁迫下泡桐种子萌发及幼苗生理特性的影响. *种子*, 2021, 40(6): 31-37.
- ZHU X H, REN F F, RU G X, LI Z J, YANG H H, ZHANG W. Effects of gibberellin on seed germination and physiological characteristics of *Paulownia* seedlings under salt stress. *Seed*, 2021, 40(6): 31-37.
- [18] 马琳, 李红丽, 董智, 丁国栋. 不同浓度NaCl盐处理对4种牧草种子萌发和生长的影响. *内蒙古农业大学学报*, 2009, 30(2): 125-130.
- MA L, LI H L, DONG Z, DING G D. The influence of different NaCl concentration treatment on seed germination and growth of 4 species herbage. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2009, 30(2): 125-130.
- [19] 张芳, 方溪, 张丽静. 草类对重金属胁迫的生理生化响应机制. *草业科学*, 2012, 29(4): 534-541.
- ZHANG F, FANG X, ZHANG L J. Response of physiology and biochemistry of grasses to heavy metal stress. *Pratacultural Science*, 2012, 29(4): 534-541.
- [20] 吴淼, 刘信宝, 丁立人, 李志华. PGE模拟干旱胁迫下硅对紫花苜蓿萌发及生理特性的影响. *草地学报*, 2017, 25(6): 1258-1264.
- WU M, LIU X B, DING L R, LI Z H. Effects of silicon on germination and physiological characteristics of alfalfa under drought stress simulated by PEG. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1258-1264.
- [21] 岳雪娇, 刘英, 向仰州, 黄沛, 姚斌. 模拟酸雨对三叶草种子萌发和幼苗生长的影响. *种子*, 2022, 41(7): 97-101, 118.
- YUE X J, LIU Y, XIANG Y Z, HUANG P, YAO B. The effect of stimulated acid rain on seed germination and seedling growth of clover. *Seed*, 2022, 41(7): 97-101, 118.
- [22] 兰艳, 朱林, 王甜甜, 荆庆芳, 张杨, 赵学琳. 混合盐碱胁迫对3种稗属牧草种子萌发的影响. *种子*, 2022, 41(3): 37-44.
- LAN Y, ZHU L, WANG T T, JING Q F, ZHANG Y, ZHAO X L. Effects of mixed saline-alkali stress on seed germination of three kinds of *Echinochloa* grass. *Seed*, 2022, 41(3): 37-44.
- [23] 卫昭君, 牛冰洁, 王永新, 赵祥, 朱慧森, 郭秀萍, 乔栋. 茉莉酸甲酯对盐胁迫下偏关苜蓿种子萌发和幼苗生长的影响. *草地学报*, 2020, 28(4): 998-1005.
- WEI Z J, NIU B J, WANG Y X, ZHAO X, ZHU H S, GUO X P, QIAO D. Effect of methyl jasmonate on seed germination and seedling growth of *Medicago sativa* 'Pianguan' under salt stress. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(4): 998-1005.
- [24] 火旭堂, 贾昊, 曹兵. NaCl处理对4种牧草植物种子萌发的影响. *草地学报*, 2019, 27(4): 1096-1101.
- HUO X T, JIA H, CAO B. Effect of NaCl treatment on seed germination of four herbage plants. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(4): 1096-1101.

- [25] 高战武, 范春, 方巍, 鄢上钦, 刘金霖. 羊草对盐碱胁迫相应的研究. 畜牧兽医科学, 2021(17): 161-162.
GAO Z W, FAN C, FANG W, YAN S Q, LIU J L. Response of *leymus chinensis* to saline-alkali stress. Graziery Veterinary Sciences, 2021(17): 161-162.
- [26] 马红媛, 梁正伟, 孔祥军, 闫超, 陈渊. 盐分、温度及其互作对羊草发芽率和幼苗生长的影响. 生态学报, 2008, 28(10): 4710-4717.
MA H Y, LIANG Z W, KONG X J, YAN C, CHEN Y. Effects of salinity, temperature and their interaction on the germination percentage and seedling growth of *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. (Poaceae). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4710-4717.
- [27] 李保珠, 赵翔, 安国勇. 赤霉素的研究进展. 中国农学通报, 2011, 27(1): 1-5.
LI B Z, ZHAO X, AN G Y. Recent advances in research of gibberellin. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(1): 1-5.
- [28] 杜晨曦, 王金丽, 周华坤, 殷恒霞. 赤霉素对植物种子萌发及幼苗生长影响的研究进展. 湖北农业科学, 2019, 58(22): 9-14.
DU C X, WANG J L, ZHOU H K, YIN H X. Research progress on the effects of gibberellin on plant seed germination and seedling growth. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(22): 9-14.
- [29] 罗冬, 王明玖, 李元恒, 陈海军, 杨勇. 四种豆科牧草种子萌发和幼苗生长对干旱的响应及抗旱性评价. 生态环境学报, 2015, 24(1): 224-230.
LUO D, WANG M J, LI Y H, CHEN H J, YANG Y. Four legumes response to simulated drought in the stages of seed germination and seedling growth and drought resistance assessment. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(1): 224-230.
- [30] 季波, 时龙, 徐金鹏, 王占军, 蒋齐. 10种禾本科牧草种质资源萌发期抗旱性评价. 种子, 2015, 24(1): 224-230.
JI B, SHI L, XU J P, WANG Z J, JIANG Q. Drought resistance evaluation of forage germplasm resources from 10 *Gramineae* species at germination stage. Seed, 2015, 24(1): 224-230.
- [31] 郭小龙, 赵珮珮, 杨建军. 模拟干旱胁迫下3种牧草种子萌发期抗旱性评价. 种子, 2020, 39(6): 19-23.
GUO X L, ZHAO P P, YANG J J. Drought-resistant evaluation of three kinds of herbage during seed germination in artificial drought conditions. Seed, 2020, 39(6): 19-23.
- [32] 田聪, 张清斌, 顾祥, 韩青, 朱忠艳, 王承军, 穆尼热. 外源植物激素对东方山羊豆响应盐胁迫的调控效应初探. 草业科学, 2012, 29(12): 1910-1914.
TIAN C, ZHANG Q B, GU X, HAN Q, ZHU Z Y, WANG C J, Munire. Effects of NaCl stress and exogenous plant hormones on seed germination and seedling growth of *Galega orientalis*. Pratacultural Science, 2012, 29(12): 1910-1914.
- [33] 曾幼玲, 蔡忠贞, 马纪, 张富春, 王波. 盐分和水分胁迫对两种盐生植物盐爪爪和盐穗木种子萌发的影响. 生态学杂志, 2006, 5(9): 1014-1018.
ZENG Y L, CAI Z Z, MA J, ZHANG F C, WANG B. Effects of salt and water stress on seed germination of *halophytes Kalidium foliatum* and *Halostachys caspica*. Chinese Journal of Ecology, 2006, 5(9): 1014-1018.
- [34] 杨姝, 杜桂娟. 盐胁迫下沙打旺种子的萌发特性. 现代畜牧兽, 2011(1): 50-51.
YANG S, DU G J. Germination characteristics of *Astragalus adsurgens* Pall. seeds under salt stress. Morden Graziery Veterinary, 2011(1): 50-51.
- [35] 刘佳, 徐昌旭, 曹卫东, 谢志坚, 秦文婧. PEG胁迫下15份紫云英种质材料萌发期的抗旱性鉴定. 中国草地学报, 2012, 34(6): 18-25.
LIU J, XU C X, CAO W D, XIE Z J, QIN W J. Study on drought resistance of 15 accessions of *Astragalus sinicus* L. germplasm materials at seed germination stage under PEG stress. China Journal of Grassland, 2012, 34(6): 18-25.

(责任编辑 苟燕妮)