麦类作物学报 2026,46(9):1174－1185
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.06

网络出版时间:2026-06-02
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260601.1632.002

70 份燕麦种质资源萌发期耐盐性评价与筛选

勾岩松[1],丁海君[1,2],李星月[1],郭呈宇[1],何茹雪[1],
王 毓[1],杨世平[3],吴玉霞[4],伊风艳[1]

(1. 内蒙古自治区农牧业科学院,内蒙古呼和浩特 010031; 2.青贮饲料微生物资源开发利用内蒙古自治区工程研究中心,内蒙古呼和浩特 010031;3.乌拉特后旗林业和草原局,内蒙古巴彦淖尔 015500; 4.卓资县农牧和科技局,内蒙古乌兰察布 012300)

摘 要:为筛选适宜盐碱地种植的燕麦(*Avena sativa* L.)种质资源,以 70 份燕麦种质为试验对象,采用 NaCl 溶液模拟盐胁迫环境,测定相对发芽势、相对发芽率、相对活力指数等 6 项萌发期及幼苗生长相关指标,并通过主成分分析和聚类分析对燕麦种质的耐盐性进行综合评价。结果表明,盐胁迫对 70 份供试燕麦材料的种子萌发和幼苗生长影响显著,各指标变异系数介于 26.04%～68.66%之间。通过主成分分析将 6 个指标转化为 2 个主成分,其累积贡献率达 86.66%。其中,第 1 主成分在相对发芽势、相对发芽率及相对发芽指数上载荷较高,反映种子在盐胁迫下的萌发潜能;第 2 主成分与相对根长和相对苗长相关,体现幼苗对盐胁迫的生长耐受性。基于加权隶属函数值进行聚类分析,70 份燕麦种质被划分为 5 类,其中 6 份强耐盐(自收资源 3、自收资源 14、乌莜 1 号、自收资源 25、坝燕 4 号和品燕 4 号),23 份耐盐,12 份中等耐盐,21 份和 8 份分别对盐胁迫表现敏感和高度敏感。通过建立的最优回归方程,确定相对发芽率和相对活力指数为鉴定燕麦萌发期耐盐能力的关键指标,且皮燕麦比裸燕麦更具耐盐性。

关键词:燕麦;萌发期;盐胁迫;加权隶属函数;聚类分析;综合评价

中图分类号:S512.6;S330 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1174-12

Screening and Evaluation of Salt Tolerance of 70 Oat Germplasm Resources at Germination Stage

Gou Yansong[1], Ding Haijun[1,2], Li Xingyue[1], Guo Chengyu[1], He Ruxue[1], Wang Yu[1], Yang Shiping[3], Wu Yuxia[4], Yi Fengyan[1]

(1. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 2. Inner Mongolia Engineering Research Center of Development and Utilization of Microbial Resources in Silage, Hohhot, Inner Mongolia 010031, China; 3. Urad Rear Banner Forestry and Grassland Bureau, Bayannur, Inner Mongolia 015500, China; 4. Zhuozi County Agriculture, Animal Husbandry and Science and Technology Bureau, Ulaanqab, Inner Mongolia 012300, China)

Abstract: To screen oat(*Avena sativa* L.) germplasm resources suitable for cultivation in saline-alkali soil and to establish a scientific and efficient salt tolerance evaluation system, 70 oat germplasm resources were used as test materials. NaCl solution was employed to simulate the salt stress environment. Six indices related to germination and seedling growth including relative germination potential, relative germination rate, and relative vigor index were systematically measured. The salt tolerance of the oat germplasms was comprehensively evaluated through principal component analysis and cluster analysis. The results indicated that salt stress significantly affected the seed germination and seeding growth of the 70 tested oat materials, with the coefficient of variation for each index ranging from 26.04% to 68.66%. Principal component analysis(PCA) transformed the six individual indices into two comprehensive factors with a cumulative contribution rate of 86.66%. The first principal component

收稿日期:2026-02-02 修回日期:2026-03-09
基金项目:鄂尔多斯市农牧局揭榜挂帅项目(EEDS-2024-JG-ZZ-03)
第一作者 E-mail:547756853@qq.com(勾岩松)
通讯作者 E-mail:yifengyanonly88@126.com(伊风艳)

showed high loadings on relative germination potential, relative germination rate, and relative germination index, reflecting the germination potential of seeds under salt stress; the second principal component was correlated with relative root length and relative seedling length, reflecting the growth tolerance of seedlings to salt stress. Based on the cluster analysis of weighted membership function values(*D* values), the 70 oat germplasm resources were classified into five categories: 6 with highly salt-tolerance(Zishouziyuan 3, Zishouziyuan 14, Wuyou 1, Zishouziyuan 25, Bayan 4 and Pinyan 4), 23 with salt-tolerance, 12 with moderate salt-tolerance, 21 with salt-sensitivity, and 8 with highly salt-sensitivity. Through the optimal regression equation established, relative germination rate and relative vitality index were identified as the key indicators for evaluating oat salt tolerance at the germination stage. Comparative analysis revealed that hulled oat(*Avena sativa* L.) generally exhibited greater salt tolerance than hulless oat(*Avena nuda* L.).

Keywords: *Avena sativa*; Germination stage; Salt stress; Weighted membership function; Cluster analysis; Comprehensive evaluation

土壤盐渍化是制约全球农业生产与生态环境可持续发展的关键非生物胁迫因素[1]。中国的盐渍土资源分布广泛,与严守耕地红线的现实压力并存,挖掘盐碱地等边际土地的生产潜力,已成为具有国家战略紧迫性的重大课题[2]。传统物理化学改良手段成本高、效果难持久,难以满足大规模推广需求。因此,确立“改种适地”的主动治理策略即通过选育优异耐盐种质,实现盐渍化土地的生物修复与高效利用,已成为当前最具经济性与可持续性的解决方案[3]。

盐胁迫是指土壤中 NaCl、Na_2SO_4 等中性盐所引发的复合性逆境胁迫[4]。高盐浓度会显著降低土壤水势,造成渗透胁迫,阻碍植物根系吸水;同时,Na^+ 与 Cl^- 在植物体内过量积累可引发离子毒害,破坏细胞膜完整性与酶活性中心,并进一步诱导氧化胁迫等次生胁迫,最终导致植株生长受抑甚至死亡[5]。赵绍赓等[6]研究发现,高盐环境抑制玉米(*Zea mays* L.)种子吸水膨胀,破坏细胞膜选择透过性,引发渗透调节失衡,导致生理干旱;张皓炀等[7]对水稻(*Oryza sativa* L.)的研究亦证实,盐胁迫扰乱生理代谢,显著降低株高、分蘖数及灌浆期光合速率,最终造成产量大幅下降。

燕麦(*Avena sativa* L.)为禾本科燕麦属一年生粮饲兼用作物,具有突出的抗寒性、耐瘠薄性及综合抗逆潜力[8]。研究表明,燕麦对盐碱环境具有较强耐受能力,可通过根系选择性吸收离子、积累渗透调节物质(如脯氨酸、可溶性糖)维持细胞渗透平衡,并通过地上部富集 Na^+ 将盐分“带离”土壤,从而发挥显著的生物修复功能[9]。因此,筛选耐盐燕麦种质资源,对缓解中国饲草短缺压力、推动盐渍土生态修复具有重要现实意义。种子萌发期是植物生命周期中对盐胁迫最为敏感的阶段,也是开展耐盐性鉴定与规模化筛选的关键窗口期[10]。李俊伟等[11]采用主成分分析、隶属函数及聚类分析法,对 20 个“白燕”系列燕麦品种进行苗期耐盐性综合评价,筛选出白燕 2 号、白燕 6 号等强耐盐品种,并确定脯氨酸含量、K^+/Na^+ 比值等为关键鉴定指标;李峰等[12]则发现,随盐浓度的升高,燕麦出苗率、幼苗株高及生物量均显著下降,但耐盐品种可通过增强光合效率与抗氧化酶活性缓解盐害损伤。

虽然目前关于燕麦萌发期耐盐性的研究已取得一定进展,但多采用单一 NaCl 溶液进行模拟胁迫[13-14],且不同研究之间在盐胁迫类型、设定浓度及环境条件等方面存在显著差异,导致实验结果间缺乏横向可比,且现有评价体系缺乏皮燕麦与裸燕麦因颖壳结构差异可能导致的耐盐性分化,在一定程度上制约了耐盐育种工作的深入推进[15-16]。本研究聚焦 70 份燕麦种质资源,模拟典型盐渍生境,系统测定其萌发期关键生理与形态指标(如发芽率、芽长、根长、活力指数等),并通过主成分分析、隶属函数与聚类分析相结合的综合评价方法,明确不同燕麦种质的耐盐性,同时构建一套快捷、精准、可推广的萌发期耐盐性鉴定指标体系,以期为燕麦耐盐遗传改良、新品种定向选育及盐渍化地区规模化推广种植提供理论支撑与优质种质资源保障。

1　材料与方法

1.1　供试材料

供试燕麦材料共计 70 份,其中裸燕麦 31 份,皮燕麦 39 份(表 1)。

表 1 70 份燕麦种质资源名称、编号及类型

Table 1 Names, codes and types of the 70 oat germplasm resources

编号 Code	名称 Name	类型 Type	编号 Code	名称 Name	类型 Type
X1	自收资源 1 Zishouziyuan 1	裸燕麦 Hulless oat	X36	自收资源 27 Zishouziyuan 27	裸燕麦 Hulless oat
X2	自收资源 2 Zishouziyuan 2	裸燕麦 Hulless oat	X37	蒙燕 1 号 Mengyan 1	皮燕麦 Hulled oat
X3	自收资源 3 Zishouziyuan 3	裸燕麦 Hulless oat	X38	乌燕 3 号 Wuyan 3	皮燕麦 Hulled oat
X4	自收资源 4 Zishouziyuan 4	裸燕麦 Hulless oat	X39	坝莜 20 Bayou 20	裸燕麦 Hulless oat
X5	自收资源 6 Zishouziyuan 6	裸燕麦 Hulless oat	X40	坝燕 4 号 Bayan 4	皮燕麦 Hulled oat
X6	自收资源 7 Zishouziyuan 7	裸燕麦 Hulless oat	X41	蒙燕 3 号 Mengyan 3	皮燕麦 Hulled oat
X7	自收资源 9 Zishouziyuan 9	裸燕麦 Hulless oat	X42	冀张莜 12 号 Jizhangyou 12	裸燕麦 Hulless oat
X8	自收资源 10 Zishouziyuan 10	裸燕麦 Hulless oat	X43	品燕 4 号 Pinyan 4	裸燕麦 Hulless oat
X9	自收资源 11 Zishouziyuan 11	裸燕麦 Hulless oat	X44	白燕 3 号 Baiyan 3	裸燕麦 Hulless oat
X10	自收资源 13 Zishouziyuan 13	裸燕麦 Hulless oat	X45	加燕 2 号 Jiayan 2	皮燕麦 Hulled oat
X11	自收资源 14 Zishouziyuan 14	裸燕麦 Hulless oat	X46	高莜 308 Gaoyou 308	皮燕麦 Hulled oat
X12	自收资源 15 Zishouziyuan 15	裸燕麦 Hulless oat	X47	青燕 1 号 Qingyan 1	皮燕麦 Hulled oat
X13	自收资源 16 Zishouziyuan 16	裸燕麦 Hulless oat	X48	中田 4 号 Zhongtian 4	皮燕麦 Hulled oat
X14	自收资源 17 Zishouziyuan 17	裸燕麦 Hulless oat	X49	青引 2 号 Qingyin 2	皮燕麦 Hulled oat
X15	自收资源 18 Zishouziyuan 18	裸燕麦 Hulless oat	X50	牧王 Forage King	皮燕麦 Hulled oat
X16	自收资源 19 Zishouziyuan 19	裸燕麦 Hulless oat	X51	燕王 Oat King	皮燕麦 Hulled oat
X17	自收资源 20 Zishouziyuan 20	裸燕麦 Hulless oat	X52	贝勒(巴盟) Baler(Bayannur)	皮燕麦 Hulled oat
X18	自收资源 21 Zishouziyuan 21	裸燕麦 Hulless oat	X53	伽利略 Galileo	皮燕麦 Hulled oat
X19	自收资源 22 Zishouziyuan 22	裸燕麦 Hulless oat	X54	巴燕 3 号 Bayan 3	皮燕麦 Hulled oat
X20	黑玫克 Haymaker	皮燕麦 Hulled oat	X55	林纳 Lena	皮燕麦 Hulled oat
X21	远杂 2 号 Yuanza 2	皮燕麦 Hulled oat	X56	青引 1 号 Qingyin 1	皮燕麦 Hulled oat
X22	紫榆燕麦 1 号 Ziyuyanmai 1	皮燕麦 Hulled oat	X57	高莜 306 Gaoyou 306	皮燕麦 Hulled oat
X23	贝勒(河北) Baler(Hebei)	皮燕麦 Hulled oat	X58	青海 444 Qinghai 444	皮燕麦 Hulled oat
X24	新势力 New Force	皮燕麦 Hulled oat	X59	陇燕 3 号 Longyan 3	皮燕麦 Hulled oat
X25	楷模 Kaime	皮燕麦 Hulled oat	X60	拢手 Lonsdale	皮燕麦 Hulled oat
X26	艾博 Aber	皮燕麦 Hulled oat	X61	领袖 Leader	皮燕麦 Hulled oat
X27	爱沃 Evo	皮燕麦 Hulled oat	X62	青海甜燕麦 Qinghai Sweet	皮燕麦 Hulled oat
X28	格莱德 Glider	皮燕麦 Hulled oat	X63	泰森 Tyson	皮燕麦 Hulled oat
X29	自收资源 23 Zishouziyuan 23	裸燕麦 Hulless oat	X64	燕冠 Crown	皮燕麦 Hulled oat
X30	白燕 20 Baiyan 20	裸燕麦 Hulless oat	X65	荣耀 Glory	皮燕麦 Hulled oat
X31	乌莜 1 号 Wuyou 1	裸燕麦 Hulless oat	X66	贝利 Bailey	皮燕麦 Hulled oat
X32	自收资源 24 Zishouziyuan 24	裸燕麦 Hulless oat	X67	大富翁 Tycoon	皮燕麦 Hulled oat
X33	民莜 1 号 Minyou 1	裸燕麦 Hulless oat	X68	挑战者 Challenger	皮燕麦 Hulled oat
X34	自收资源 25 Zishouziyuan 25	裸燕麦 Hulless oat	X69	天子 Emperor	皮燕麦 Hulled oat
X35	自收资源 26 Zishouziyuan 26	裸燕麦 Hulless oat	X70	超模 Super	皮燕麦 Hulled oat

1.2 试验设计

为确定燕麦萌发期耐盐性评价的适宜盐浓度，本研究首先开展了梯度预试验：选取具有代表性的裸燕麦和皮燕麦种质各两份，NaCl 浓度设置 0、50、100、200 和 300 mmol · L^{-1} 5 个水平。结果显示，100 mmo · L^{-1} 的 NaCl 胁迫能够明显抑制供试燕麦材料萌发，且该浓度下耐盐性差异显著，具有良好的区分度，故选用此浓度对 70 份燕麦种质进行萌发期耐盐性评价。每份种质挑选大小均匀、颗粒饱满的种子若干，种子经 75% 乙

醇消毒 30 s、蒸馏水冲洗 3 次后,5%次氯酸钠消毒 10 min;复以蒸馏水冲净,滤纸吸干,均匀置入铺双层滤纸的培养皿中(每皿 50 粒)。每份种质分别设置对照组和盐胁迫组,对照组加 10 mL 的蒸馏水,盐胁迫组加 10 mL 的盐溶液,每个处理重复 3 次。试验材料放入 25 ℃、湿度 60%、光照/黑暗时间 16 h/8 h 的智能人工气候培养箱中培养。每天定时补充散失的水分和盐溶液,且每 2 d 更换滤纸,观测记录发芽进程直到第 7 天结束发芽试验。

1.3　测定指标

试验结束后,每个培养皿随机取出 10 株幼苗,用精度为 0.01 mm 的游标卡尺分别测量根长和苗长。根据观测得到的结果,计算发芽势、发芽率、发芽指数(GI)、活力指数(VI)、根长、苗长以及各指标的相对值(盐胁迫对照的比值)。发芽势=第 4 天萌发种子数/供试种子总数×100%;发芽率=萌发种子总数/供试种子总数×100%;GI=∑(Gt/Dt),Gt 为每日发芽种子个数,Dt 为对应发芽时间;VI=GI×S,S 为幼苗长度

1.4　数据处理与分析

试验数据采用 Microsoft Excel2021 整理,利用 SPSS 26.0 进行相关性分析及主成分分析,计算各主成分的隶属函数值并通过加权计算得到综合评价值(D 值)。利用 R 语言并采用 Ward.D 法和欧氏距离对 70 份种质进行系统聚类分析并绘制聚类图。

2　结果与分析

2.1　盐胁迫对燕麦种子萌发的影响

在盐胁迫条件下,70 份燕麦种质的各指标变异系数介于 26.043%～68.656%之间,均表现出明显的离散特征(CV＞20%),其中相对活力指数变异系数最大(68.656%),相对发芽率变异系数最小(26.043%)(表 2),说明供试的 70 份燕麦材料遗传背景广泛,对盐胁迫的响应存在丰富的变异。

各指标相对值的最小值均为 0,表明部分种质对高盐胁迫非常敏感,其种子萌发和幼苗生长被盐胁迫完全抑制;最大值分布在 1.236～1.548,说明部分种质在盐胁迫下仍能维持较高的生长水平。从各指标平均值看,相对发芽势(0.864)和相对发芽率(0.819)均明显高于相对活力指数(0.457)、相对苗长(0.567)和相对根长(0.579)。这表明,不同指标对盐胁迫的敏感程度存在差异,盐胁迫对燕麦幼苗生长及种子活力的抑制作用较大。

从表 3 可以看出,就同一指标而言,不同燕麦种质对盐胁迫的反应不同。其中,X3、X11、X34、X40 等种质的相对发芽势和相对发芽率较高,而 X9、X14、X2 等种质的各项相对指标均处于较低水平。此外,不同种质间各指标对盐胁迫的反应也缺乏一致性。因此,根据单一指标难以全面、准确评价燕麦的耐盐性。

2.2　燕麦萌发期耐盐指标的主成分分析

经相关分析,燕麦萌发期不同指标间均呈极显著正相关(P＜0.01),其中相对发芽势、相对发芽率与相对发芽指数相关系数为 0.89～0.95,相对根长与相对苗长的相关系数高达 0.94(图 1),表明不同指标在响应盐胁迫时存在一定的信息重叠。因此,这些燕麦种质耐盐性的综合评价适宜用主成分分析来完成。

经主成分分析并根据特征值大于 1 的原则,共提取出 2 个主成分,其累积方差贡献率达 86.658%(表 4),表明这 2 个主成分涵盖了原始变量的绝大

表 2　盐胁迫下 70 份燕麦材料萌发期各指标的描述性统计结果

Table 2　Descriptive statistics result of relative germination indices of the 70 oat materials under salt stress

指标 Indicator	最小值 Min. value	最大值 Max. value	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
相对发芽势 Relative germination potential	0	1.402	0.864	0.248	28.718
相对发芽率 Relative germination rate	0	1.236	0.819	0.213	26.043
相对发芽指数 Relative germination index	0	1.434	0.799	0.266	33.235
相对活力指数 Relative vitality index	0	1.327	0.457	0.314	68.656
相对根长 Relative root length	0	1.495	0.579	0.297	51.236
相对苗长 Relative seedling length	0	1.548	0.567	0.296	52.159

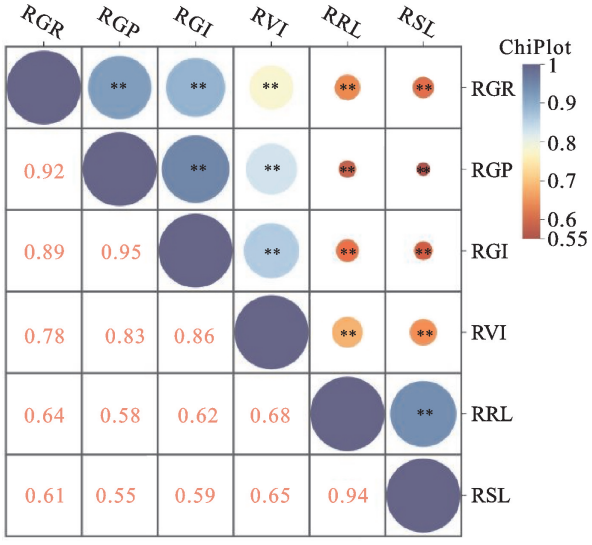
表 3 盐胁迫下 70 份燕麦种质萌发期各指标的相对值

Table 3 Relative values of individual indexs of the 70 oat germplasm resources at germination stage under salt stress

Code	相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vitality index	相对根长 Relative root length	相对苗长 Relative seedling length
X1	0.427	0.741	0.606	0.347	0.481	0.572
X2	0.275	0.347	0.487	0.332	0.687	0.680
X3	1.040	1.000	1.232	0.861	0.883	0.699
X4	0.800	0.444	0.395	0.207	0.500	0.514
X5	0.333	0.320	0.293	0.112	0.334	0.378
X6	0.625	0.604	0.610	0.413	0.828	0.677
X7	0.825	0.785	0.789	0.518	0.601	0.657
X8	0.541	0.612	0.656	0.333	0.392	0.508
X9	0.000	0.211	0.134	0.073	0.078	0.011
X10	0.789	0.891	0.922	0.383	0.336	0.416
X11	0.961	0.821	0.860	0.849	1.361	0.988
X12	0.150	0.333	0.355	0.132	0.355	0.371
X13	0.200	0.741	0.725	0.277	0.301	0.383
X14	0.275	0.327	0.270	0.060	0.192	0.223
X15	0.631	0.739	0.727	0.473	0.629	0.650
X16	0.615	0.684	0.813	0.460	0.510	0.566
X17	0.750	0.879	0.872	0.460	0.623	0.528
X18	0.312	0.709	0.686	0.404	0.472	0.590
X19	0.557	0.810	0.744	0.477	0.597	0.642
X20	0.625	0.655	0.687	0.330	0.434	0.481
X21	0.692	0.761	0.726	0.353	0.449	0.486
X22	0.243	0.500	0.541	0.281	0.493	0.522
X23	0.538	0.859	0.634	0.366	0.534	0.578
X24	0.452	0.931	0.920	0.512	0.470	0.557
X25	0.377	0.938	0.859	0.465	0.435	0.541
X26	0.872	0.681	0.738	0.238	0.256	0.323
X27	0.453	0.485	0.502	0.212	0.291	0.422
X28	1.139	0.872	0.976	0.271	0.188	0.277
X29	0.942	0.950	0.962	0.618	0.683	0.643
X30	0.760	0.636	0.720	0.399	0.485	0.554
X31	0.510	0.538	0.547	0.547	0.955	0.999
X32	0.678	0.657	0.651	0.370	0.646	0.568
X33	0.614	0.545	0.493	0.311	0.581	0.630
X34	0.882	0.957	0.840	0.726	0.918	0.865
X35	0.623	0.700	0.645	0.340	0.394	0.527
X36	0.705	0.755	0.753	0.364	0.370	0.483
X37	0.681	0.750	0.671	0.544	0.752	0.812
X38	0.647	0.879	0.812	0.444	0.404	0.547
X39	0.156	0.304	0.309	0.102	0.241	0.330
X40	0.767	0.816	0.883	0.808	0.997	0.915
X41	0.874	0.990	0.899	0.490	0.413	0.545
X42	0.501	0.645	0.610	0.433	0.623	0.711
X43	0.583	0.746	0.676	0.543	0.794	0.802
X44	0.529	0.563	0.524	0.458	0.825	0.875
X45	0.426	0.689	0.546	0.285	0.478	0.522
X46	0.746	1.088	0.930	0.552	0.480	0.594
X47	0.606	0.799	0.661	0.504	0.842	0.763
X48	0.624	0.797	0.709	0.378	0.425	0.532
X49	0.641	0.985	0.771	0.411	0.649	0.532

（续表 3　Continued table 3）

Code	相对发芽势 Relative germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽指数 Relative germination index	相对活力指数 Relative vitality index	相对根长 Relative root length	相对苗长 Relative seedling length
X50	0.750	0.762	0.659	0.406	0.515	0.616
X51	0.690	0.889	0.748	0.555	0.770	0.742
X52	0.804	0.734	0.754	0.315	0.234	0.417
X53	0.777	0.937	0.837	0.658	0.776	0.786
X54	0.457	0.722	0.664	0.405	0.596	0.603
X55	0.700	0.815	0.705	0.294	0.263	0.418
X56	0.717	0.792	0.756	0.570	0.650	0.754
X57	0.531	0.666	0.526	0.311	0.535	0.592
X58	0.584	0.857	0.670	0.474	0.726	0.707
X59	0.765	0.967	0.977	0.599	0.524	0.614
X60	0.560	0.936	0.910	0.471	0.447	0.517
X61	0.520	0.892	0.711	0.442	0.544	0.622
X62	0.459	0.874	0.810	0.480	0.475	0.593
X63	0.668	0.882	0.800	0.447	0.450	0.559
X64	0.444	0.755	0.648	0.338	0.346	0.522
X65	0.375	0.794	0.642	0.465	0.657	0.723
X66	0.738	1.000	0.748	0.477	0.592	0.638
X67	0.000	0.455	0.380	0.151	0.456	0.395
X68	0.76	0.638	0.601	0.394	0.657	0.655
X69	0.041	0.790	0.777	0.442	0.579	0.569
X70	0.815	0.846	0.689	0.388	0.478	0.564



* *：$P<0.01$.

图 1　盐胁迫下燕麦材料各指标间相关系数

Fig. 1　Correlation coefficients among different indices of oat materials under salt stress

部分信息，可以代替原有指标对燕麦耐盐性进行综合评价。其中，第 1 主成分的特征值为 3.814，方差贡献率为 63.565%，在相对发芽势(0.901)、相对发芽指数(0.892)及相对发芽率(0.885)上具有较高的载荷，说明第 1 主成分主要反映了盐胁迫下燕麦种子的萌发能力；第 2 主成分的特征值为 1.386，方差贡献率为 23.093%，在相对根长(0.834)和相对苗长(0.796)上的载荷较高，说明第 2 主成分主要反映了盐胁迫下燕麦幼苗的生长状况。

2.3　燕麦萌发期耐盐性综合评价

基于主成分分析结果，采用隶属函数法计算 70 份燕麦种质耐盐性的综合评价值（D 值）。结果（表 5）显示，不同燕麦种质 D 值变化范围为 0.067～0.883。其中，排名前 6 位的材料的 D 值分别为 0.883、0.829、0.813、0.737、0.707 和 0.679，表明这 6 份种质在盐胁迫下具有较强的耐盐能力。

表 4　燕麦萌发期耐盐指标的主成分分析

Table 4　Principal component analysis(PCA) of salt tolerance indices of oat at germination stage

指标 Index	主成分 Principal component	
	P1	P2
相对发芽势 Relative germination potential	0.901	0.198
相对发芽率 Relative germination rate	0.885	0.281
相对发芽指数 Relative germination index	0.892	0.234
相对活力指数 Relative vitality index	0.734	0.512
相对根长 Relative root length	0.312	0.834
相对苗长 Relative seedling length	0.398	0.796
特征值 Eigenvalue	3.814	1.386
方差贡献率 Variance contribution/%	63.565	23.093
累计贡献率 Cumulative contribution/%	63.565	86.658

表 5 70 份燕麦种质耐盐性综合评价值(*D* 值)及排名

Table 5 Comprehensive evaluation values(*D* values) and rankings of salt tolerance of the 70 oat germplasm resources

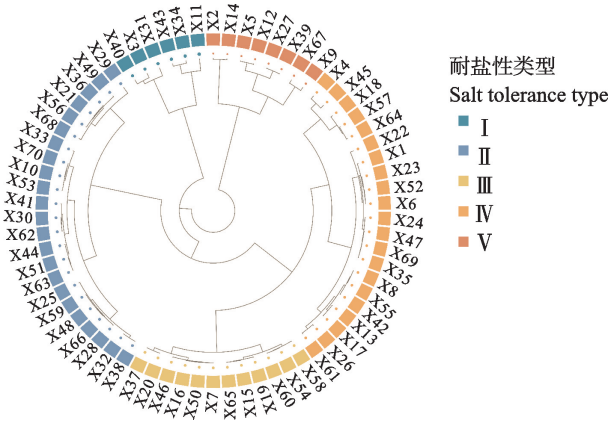
编号 Code	综合指标值 Comprehensive index value		隶属函数值 Membership function value		综合得分(*D* 值) Comprehensive score(*D* value)	排名 Ranking
	X_1	X_2	μ_1	μ_2		
X11	2.456	0.657	1.000	0.622	0.883	1
X34	1.524	1.836	0.832	1.000	0.829	2
X43	2.033	0.365	0.925	0.528	0.813	3
X31	0.647	1.587	0.671	0.920	0.737	4
X3	1.657	0.707	0.858	0.638	0.707	5
X40	0.153	−0.241	0.581	0.335	0.679	6
X29	0.943	0.515	0.726	0.576	0.631	7
X49	1.063	0.381	0.747	0.534	0.603	8
X36	0.709	0.645	0.683	0.618	0.600	9
X21	0.715	0.610	0.684	0.607	0.598	10
X56	0.857	0.336	0.710	0.519	0.596	11
X68	0.810	0.378	0.701	0.533	0.588	12
X33	0.549	0.494	0.653	0.570	0.579	13
X70	0.089	−0.148	0.569	0.364	0.573	14
X10	0.116	−0.186	0.575	0.352	0.573	15
X53	0.074	−0.170	0.563	0.357	0.570	16
X41	0.573	0.381	0.657	0.534	0.562	17
X30	0.085	−0.293	0.568	0.318	0.558	18
X62	0.363	0.330	0.619	0.517	0.558	19
X44	−0.019	−0.282	0.549	0.321	0.555	20
X51	0.231	0.324	0.597	0.515	0.552	21
X63	0.232	−0.294	0.597	0.317	0.552	22
X25	0.209	−0.213	0.588	0.343	0.541	23
X59	0.190	−0.215	0.581	0.343	0.537	24
X48	0.189	−0.264	0.581	0.327	0.537	25
X66	0.165	−0.251	0.574	0.331	0.537	26
X28	0.145	−0.247	0.568	0.333	0.534	27
X32	0.142	−0.266	0.566	0.327	0.528	28
X38	0.133	−0.278	0.563	0.322	0.528	29
X37	0.114	−0.279	0.558	0.322	0.512	30
X20	0.108	−0.312	0.555	0.312	0.512	31
X46	0.082	−0.294	0.567	0.317	0.502	32
X16	0.082	−0.319	0.567	0.309	0.499	33
X50	0.069	−0.319	0.562	0.309	0.499	34
X7	0.056	−0.315	0.556	0.311	0.498	35
X65	0.057	−0.339	0.557	0.303	0.483	36
X15	0.043	−0.331	0.551	0.306	0.482	37
X19	0.036	−0.344	0.548	0.301	0.479	38
X60	0.024	−0.340	0.543	0.303	0.473	39
X54	0.017	−0.344	0.540	0.301	0.473	40
X58	0.005	−0.349	0.536	0.299	0.471	41
X61	0.002	−0.360	0.534	0.295	0.463	42
X26	−0.009	−0.360	0.530	0.295	0.456	43

(续表 5　Continued table 5)

编号 Code	综合指标值 Comprehensive index value		隶属函数值 Membership function value		综合得分(*D* 值) Comprehensive score(*D* value)	排名 Ranking
	X_1	X_2	μ_1	μ_2		
X17	−0.014	−0.368	0.529	0.291	0.451	44
X13	−0.024	−0.375	0.525	0.288	0.449	45
X42	−0.031	−0.382	0.522	0.284	0.443	46
X55	−0.042	−0.385	0.518	0.283	0.440	47
X8	−0.051	−0.393	0.515	0.279	0.440	48
X35	−0.062	−0.398	0.511	0.277	0.435	49
X69	−0.068	−0.404	0.509	0.275	0.434	50
X47	−0.076	−0.411	0.505	0.272	0.433	51
X24	−0.083	−0.417	0.502	0.269	0.431	52
X6	−0.092	−0.423	0.499	0.266	0.428	53
X52	−0.097	−0.430	0.497	0.263	0.428	54
X23	−0.105	−0.436	0.494	0.260	0.426	55
X1	−0.113	−0.443	0.491	0.257	0.422	56
X22	−0.121	−0.449	0.488	0.255	0.414	57
X64	−0.129	−0.456	0.484	0.252	0.396	58
X57	−0.136	−0.462	0.482	0.249	0.389	59
X18	−0.144	−0.468	0.479	0.246	0.382	60
X45	−0.151	−0.475	0.476	0.243	0.357	61
X4	−0.159	−0.481	0.473	0.241	0.334	62
X9	−0.166	−0.488	0.470	0.238	0.274	63
X67	−0.174	−0.494	0.467	0.235	0.250	64
X39	−0.181	−0.501	0.465	0.232	0.193	65
X27	−0.188	−0.507	0.462	0.230	0.191	66
X12	−0.196	−0.514	0.459	0.227	0.156	67
X5	−0.203	−0.520	0.456	0.224	0.153	68
X14	−0.210	−0.527	0.453	0.221	0.072	69
X2	−0.218	−0.533	0.450	0.219	0.067	70

2.4　燕麦种质耐盐性聚类分析

进一步基于 *D* 值进行聚类分析,结果(图 2)表明,供试材料可划分为 5 个耐盐等级。其中,第Ⅰ类为强耐盐型,包括 X11、X34、X43、X40、X31 和 X3 等 6 份材料,占总数的 8.6%,其 *D* 值均大于 0.67。其中,X11 综合得分最高,耐盐潜力最强;第Ⅱ类为耐盐型,包括 X29、X49 等 23 份材料,占总数的 32.9%,*D* 值介于 0.52～0.63;第Ⅲ类为中等耐盐型,包括 X37、X20 等 12 份材料,占总数的 17.1%,*D* 值介于 0.47～0.51;第Ⅳ类盐敏感型,包括 X61、X26 等 21 份材料占总数的 30.0%,*D* 值介于 0.33～0.46;第Ⅴ类高度盐敏感型,包括 X9、X2 等 8 份材料占总数的 11.4%,*D* 值均低于 0.28,其中 X2 耐盐性最差。



Ⅰ:强耐盐;Ⅱ:耐盐;Ⅲ:中等耐盐;Ⅳ:盐敏感;Ⅴ:高度盐敏感。下图同。

Ⅰ: High salt tolerance; Ⅱ: Salt tolerance; Ⅲ: Moderate salt tolerance; Ⅳ: Salt sensitivity; Ⅴ: High salt sensitivity. The same in figure 4.

图 2　70 份燕麦种质耐盐性聚类分析图

Fig. 2　Cluster dendrogram of salt tolerance for the 70 oat germplasm resources

此外，皮燕麦与裸燕麦在耐盐等级分布上呈现出显著的种间表型差异(图 3)。皮燕麦主要表现为耐盐型和中等耐盐型，在这两类耐盐型种质中占比 61.5%，其整体耐盐性强且性状表现稳定；裸燕麦的耐盐等级分布较为离散，其敏感型和高度敏感材料占比达 48.4%，显示出整体耐盐水平偏弱的趋势，说明皮燕麦比裸燕麦更具耐盐性。

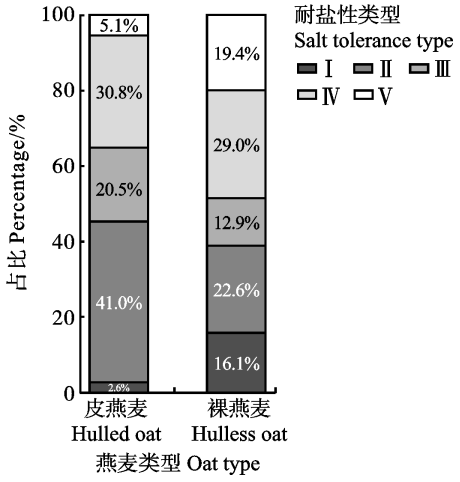


图 3 皮燕麦与裸燕麦耐盐性类型分布比例对比

Fig. 3 Comparison of salt tolerance grade distribution between hulled oat and hulless oat

2.5 燕麦耐盐性评价数学模型构建

为了构建高效、精准的燕麦萌发期耐盐性预测模型，并验证模型的可靠性，采用随机抽样法将 70 份燕麦材料按照 7∶3 的比例划分为回归组(49 份)和检验组(21 份)。

以回归组 49 份材料的 D 值为因变量，以各指标的相对值为自变量，进行多元线性回归分析，构建了最优线性回归方程：$D=0.3533\mathrm{RGR}+0.1764\mathrm{RVI}+0.1652\mathrm{RGP}+0.1506\mathrm{RRL}-0.2081$。

式中，RGR、RVI、RGP 和 RRL 分别为相对发芽率、相对活力指数、相对发芽势和相对根长。该方程决定系数 R^2 高达 0.992($P<0.01$)，表明各单项指标对综合耐盐性具有极高的解释度。

利用检验组的 21 份材料对该方程进行有效性检验。将检验组各指标的实测值代入上述方程获得预测 D 值，并与实测 D 值进行相关性分析，结果表明，二者呈极显著正相关($r=0.996$，$P<0.01$)，且均方根误差仅为 0.021，说明该方程可用于燕麦萌发期耐盐性的快速鉴定。

3 讨论

种子萌发期是植物对盐胁迫最敏感的阶段，也是耐盐性评价的关键窗口期。本研究中在 100 mmol·L^{-1} NaCl 胁迫下，70 份燕麦种质的相对发芽率、发芽势及幼苗生长量均显著下降，种质间变异系数为 26.04%～68.66%，表明耐盐性存在显著遗传差异。刘兴彩等[17]对 40 份燕麦种质研究发现，当盐浓度逐步升高时，盐敏感材料的种子萌发进程会被显著推迟甚至阻滞，这与本研究结果一致。有学者认为，高盐环境主要通过降低基质水势造成“生理干旱”，诱导 Na^+ 在胚细胞内过量积累产生“离子毒害”，从而抑制饲草种子萌发[18]。对水稻和燕麦的研究也证实了盐分对种子萌发启动的物理性和生理性双重阻滞作用[19-20]。

盐胁迫对植物幼苗生长的抑制作用强于种子萌发。在 70 份燕麦种质中，相对发芽率均值为 0.819，而相对根长和相对苗长的均值分别为 0.579 和 0.567，表明随着盐浓度的增加，燕麦种子吸胀后完成“露白”，但胚根伸长和胚芽生长却受到了严重抑制。张晓澎等[21]对饲用燕麦的研究也认为，生物量的耐盐系数显著低于发芽指标，且胚根鲜重和胚根长是评价中最敏感的性状。本研究中，相对根长均值大于相对苗长，表明燕麦幼苗的地上部生长对盐胁迫的反应较地下部敏感。但严青青等[22]对海岛棉的试验结果显示，虽然根系是第一个暴露在盐胁迫下的器官，但芽对盐胁迫反应比根系更敏感。黄丽霞等[23]在碱性盐胁迫下对苦荞的研究结果与本研究一致。因此，在耐盐性燕麦的筛选中，应综合考量根与芽的生长状况。

植物耐盐性是受多基因控制的复杂数量性状，而依据单一指标的评价存在局限性。本研究中综合运用主成分分析和隶属函数法，将 6 个单项指标降维为 2 个独立的综合因子(累计贡献率 86.66%)，构建了科学的评价体系。这种方法的效果在紫花苜蓿、黑麦草等植物资源评价中得到很好的证实[24-27]。为确立快速筛选指标，本研究中通过逐步回归建立了预测模型，发现相对发芽率和相对活力指数是决定综合耐盐性的关键指标。此结论与周超凡等[28]对 15 个燕麦品种研究中得出的“发芽率和发芽势适合耐盐鉴定”的结论较为相近。但有些研究提出其他观点，如将根长和地下部鲜重分别作为评价燕麦和大豆耐盐性的关键指标[29-30]。造成这种关键指标差异的原因可能是胁迫阈值效应即与采用的筛选浓度不同有关。本研究设定的 100 mmol·L^{-1} NaCl 属中度胁迫，主要是观察种子的萌发状况，因此其结果能

很好地反映了萌发速度和整齐度表现。

基于综合评价值(D 值),本研究利用系统聚类分析从 70 份材料中筛选出 X11、X34、X43 等 6 份高耐盐种质(D 值>0.67)。这些种质在盐胁迫下保持了较高的萌发活力,其耐盐性与李珍等[31]筛选出的燕王、蒋昂辰[32]筛选出的耐盐无芒雀麦材料类似,均具有较好的应用潜力。同时,本研究中,皮燕麦的综合耐盐性较好,其在耐盐及中等耐盐类群中占比高达 61.5%,而裸燕麦多集中在敏感类群。这与冯蓝冰等[33]得出的复盐胁迫下皮燕麦的适应性普遍优于裸燕麦的结论一致。其可能原因在于皮燕麦的颖壳在萌发吸胀阶段发挥了物理缓冲作用,减少了高浓度离子对胚部的直接接触;而裸燕麦种皮裸露,吸水虽快,但缺乏保护,导致胚部细胞更早遭受离子毒害。此外,本研究筛选出的敏感材料 X2、X14 的 D 值较低(<0.1),罗天等[34]在苏丹草中也发现类似的现象。刘青等[35]对 124 份小麦材料研究表明,部分品种对盐胁迫和干旱胁迫的反应存在萌发期敏感、但苗期耐受的现象。燕麦耐盐性在全生育期中也具有阶段特异性[36]。因此,对于本研究筛选出的优异种质,后续仍需结合苗期及田间全生育期鉴定,以最终确定其在盐碱地种植的适应性和推广价值。

4　结论

燕麦萌发期不同指标对 100 mmol·L^{-1} NaCl 胁迫响应均显著。利用主成分分析对 70 份种质的 6 项指标进行综合评价,再基于综合评价值进行聚类分析,将供试材料划分为 5 个耐盐等级,其中自收资源 3、自收资源 14、乌莜 1 号、自收资源 25、坝燕 4 号和品燕 4 号等 6 份材料为强耐盐型,且皮燕麦耐盐性整体优于裸燕麦。通过多变量回归分析获得的回归方程(R^2=0.992)可精准快速鉴定燕麦种质的耐盐性,其中相对发芽率和相对活力指数是评价的核心指标。

参考文献:

[1]段海霞,邹恭鲁,杨永鑫,等.两种基因型菊芋幼苗对盐胁迫的生长及生理响应[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):176.
Duan H X,Zou G L,Yang Y X,*et al*. Growth and physiological responses of two genotypes Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) seedlings under salt stress [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2018,36(3):176.

[2]Shrivastava P,Kumar R. Soil salinity:A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*,2015,22(2):123.

[3]刘小京,郭 凯,封晓辉,等.农业高效利用盐碱地资源探讨[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(3):345.
Liu X J,Guo K,Feng X H,*et al*. Discussion on the agricultural efficient utilization of saline-alkali land resources [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2023,31(3):345.

[4]Zhu J K. Plant salt tolerance [J]. *Trends in Plant Science*,2001,6(2):66.

[5]周玉杰,贺治洲,龙开意,等.盐胁迫对热带水稻生长、生理生化特性及产量构成的影响[J].热带作物学报,2023,44(12):2520.
Zhou Y J,He Z Z,Long K Y,*et al*. Effects of salt stress on the growth,physiological and biochemical indices characteristics and yield composition of tropical rice [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*,2023,44(12):2520.

[6]赵绍赓,刘晓强,王玉玺,等.玉米萌发期耐盐性评价及其杂种优势模式分析[J].植物遗传资源学报,2025,26(1):79.
Zhao S G,Liu X Q,Wang Y X,*et al*. Evaluation of salt tolerance and analysis of their heterosis patterns in maize during germination period [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2025,26(1):79.

[7]张皓炀,褚 晶,王 宇,等.耐盐水稻新种质农艺性状鉴定及其耐盐性[J].广东海洋大学学报,2025,45(4):149.
Zhang H Y,Chu J,Wang Y,*et al*. Agronomic traits identification of new germplasm of salt-tolerant rice and its salt-tolerance [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*,2025,45(4):149.

[8]杨海鹏.中国燕麦[M].北京:农业出版社,1989.
Yang H P. China oat [M]. Beijing:Agriculture Press,1989.

[9]海 霞,刘景辉,杨彦明,等.盐胁迫对燕麦幼苗 Na^+、K^+ 吸收和离子积累的影响[J].麦类作物学报,2019,39(5):613.
Hai X,Liu J H,Yang Y M,*et al*. Na^+ and K^+ uptake and ion accumulation in oat seedlings under salt stress [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2019,39(5):613.

[10]张明伟,高欣梅,福 英,等.燕麦种子萌发和幼苗生长盐碱耐性综合鉴定及评价[J].农业与技术,2024,44(4):31.
Zhang M W,Gao X M,Fu Y,*et al*. Comprehensive identification and evaluation of salt-alkali tolerance of oat seed germination and seedling growth [J]. *Agriculture and Technology*,2024,44(4):31.

[11]李俊伟,刘景辉,赵宝平,等.燕麦苗期耐盐性评价及鉴定指标筛选[J].吉林农业大学学报,2025,47(6):987.
Li J W,Liu J H,Zhao B P,*et al*. Evaluation of salt tolerance of oat materials at seedling stage and selection of identification indicators [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*,2025,47(6):987.

[12]李 峰,高宏云,张 翀,等.盐胁迫对燕麦生长及生理指标的影响[J].作物杂志,2024(6):140.
Li F,Gao H Y,Zhang C,*et al*. Effects of salt stress on growth and physiological indexes of oat [J]. *Crops*,2024(6):

140.

[13]陈 新,张宗文,吴 斌. 裸燕麦萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 中国农业科学,2014,47(10):2038.
Chen X,Zhang Z W,Wu B. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of naked oat(*Avena nuda* L.) at germination stage [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2014,47(10):2038.

[14]孙墨可,李俊伟,张 曼,等. 碱胁迫对不同品种燕麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(17):109.
Sun M K,Li J W,Zhang M,*et al*. Influences of alkali stress on seedling growth and physiological characteristics of different oat cultivars [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2022,50(17):109.

[15]田振东,段嘉蕾,张跃华,等. 82 份燕麦种质萌发期耐盐碱评价与筛选[J]. 种子,2025,44(4):143.
Tian Z D,Duan J L,Zhang Y H,*et al*. Evaluation and screening of salt and alkali tolerance of 82 *Avena sativa* germplasms at germination stage [J]. *Seed*,2025,44(4):143.

[16]张夏桐,代红军,麻冬梅,等. 盐碱地不同饲用燕麦品种适应性研究[J]. 宁夏农林科技,2024,65(9):32.
Zhang X T,Dai H J,Ma D M,*et al*. Study on adaptability of different forage oat varieties in saline-alkali soil [J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*,2024,65(9):32.

[17]刘兴彩,杭嘉慧,宋 婷,等. 40 份燕麦种质资源萌发期耐盐性评价与筛选[J]. 草地学报,2025,33(12):4033.
Liu X C,Hang J H,Song T,*et al*. Salt tolerance evaluation and screening of 40 forage oat germplasm resources during seeds germination [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2025,33(12):4033.

[18]曹仕龙,廖暑杰,胡龙兴,等. 4 种饲草种子在不同浓度盐胁迫下的萌发特性和产量[J]. 草业科学,2024,41(10):2355.
Cao S L,Liao S J,Hu L X,*et al*. Effects of salt stress on seed germination and yields of four forage species [J]. *Pratacultural Science*,2024,41(10):2355.

[19]古丽娜尔·巴合提别克,刘文静,麻井彪,等. 盐胁迫下水稻种子萌发特性及其耐盐性评价[J]. 新疆农业科学,2025,62(4):858.
Gulinaer Bahetibieke,Liu W J,Ma J B,*et al*. Germination characteristics and salt tolerance of rice seeds under salt stress [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*,2025,62(4):858.

[20]达布那,刘 琳,王 杨,等. 盐胁迫对 5 个燕麦品种萌发期的影响[J]. 种子,2025,44(8):152.
Da B N,Liu L,Wang Y,*et al*. Effect of salt stress on the germination stage of five *Avena sativa* varieties [J]. *Seed*,2025,44(8):152.

[21]张晓澎,邓焱天,杨 蕊,等. 饲用燕麦种质资源萌发期及苗期耐盐性鉴定评价[J]. 草地学报,2025,33(11):3741.
Zhang X P,Deng Y T,Yang R,*et al*. Evaluation of salt tolerance of forage oat germplasm resources at germination and seedling stages [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2025,33(11):3741.

[22]严青青,张巨松,李星星,等. 盐碱胁迫对海岛棉种子萌发及幼苗根系生长的影响[J]. 作物学报,2019,45(1):100.
Yan Q Q,Zhang J S,Li X X,*et al*. Effects of salinity stress on seed germination and root growth of seedlings in island cotton [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2019,45(1):100.

[23]黄丽霞,张卫卫,甄一越,等. 盐胁迫下苦荞萌发期耐盐碱性评价及种质筛选[J/OL]. 作物学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251117.1611.002.
Huang L X,Zhang W W,Zhen Y Y,*et al*. Evaluation of salinity tolerance and germplasm screening of buckwheat during germination under salt stress [J/OL]. *Acta Agronomica Sinica*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251117.1611.002.

[24]杨金辉,王晓彤,马永龙,等. 不同紫花苜蓿种质材料萌发期耐盐性评价[J/OL]. 草地学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251112.1016.004.
Yang J H,Wang X T,Ma Y L,*et al*. Evaluation of salt tolerance during the germination period in different alfalfa germplasm materials [J/OL]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251112.1016.004.

[25]李 香,邹 丽,杨巽喆,等. 50 份多花黑麦草种质耐盐性评价[J]. 草地学报,2026,34(1):239.
Li X,Zou L,Yang X Z,*et al*. Salt-tolerance evaluation of 50 germplasms of *Lolium multiflorum* [J]. *Acta Agrestia Sinica*,2026,34(1):239.

[26]张发钰,张 雨,张 晨,等. 12 个苜蓿品种萌发期的耐盐性评价[J]. 饲料研究,2025,48(24):139.
Zhang F Y,Zhang Y,Zhang C,*et al*. Evaluation of salt tolerance in 12 alfalfa varieties at germination stage [J]. *Feed Research*,2025,48(24):139.

[27]李兴怡,高 荣,郑凤彦,等. 10 份草地早熟禾品种耐盐性评价[J/OL]. 草原与草坪,2025. https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20250522.1633.002.
Li X Y,Gao R,Zheng F Y,*et al*. Salt tolerance evaluation of ten *Poa pratensis* varieties [J/OL]. *Grassland and Turf*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/62.1156.s.20250522.1633.002.

[28]周超凡,魏玉清,杨崇庆,等. 15 个燕麦品种萌发期耐旱、耐盐及耐碱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究,2025,43(1):32.
Zhou C F,Wei Y Q,Yang C Q,*et al*. Comprehensive evaluation of drought and saline-alkali tolerance of 15 oat varieties during germination period [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2025,43(1):32.

[29]陈佳敏,徐世锐,贾蓓蓓,等. 燕麦萌发期耐盐性综合评价[J/OL]. 草地学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251125.1131.004.
Chen J M,Xu S R,Jia B B,*et al*. Comprehensive evaluation of oat(*Avena sativa* L.) germplasm for salt tolerance at germination stage [J/OL]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251125.1131.004.

[30]王 莉,张丽蓉,曹金龙,等. 西北地区大豆耐盐种质资源的筛选与综合评价[J/OL]. 中国油料作物学报,2025. https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2025103.
Wang L,Zhang L R,Cao J L,*et al*. Screening and comprehensive evaluation of salt-tolerant germplasm resources of soybean in northwest China [J/OL]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2025. https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2025103.

[31]李 珍,云 岚,张玉霞,等. 10 个饲用燕麦品种种子萌发期耐盐碱性的综合评价[J]. 种子,2019,38(11):90.
Li Z,Yun L,Zhang Y X,*et al*. Comprehensive evaluation of saline-alkaline resistance in 10 forage oat varieties during seed germination [J]. *Seed*,2019,38(11):90.

[32]蒋昂辰. 21 份无芒雀麦种子生产性能及苗期耐盐性评价[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2025.
Jiang A C. *Evaluation of seed production performance and salt tolerance of* 21 *Bromus inermis* seedlings [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2025.

[33]冯蓝冰,武俊英,米俊珍,等. 200 份燕麦种质萌发期耐盐碱性的综合评价[J/OL]. 麦类作物学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251212.1313.014.
Feng L B,Wu J Y,Mi J Z,*et al*. Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance of 200 oat germplasms at germination stage [J/OL]. *Journal of Triticeae Crops*,2025. https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251212.1313.014.

[34]罗 天,黄翠碧,牟腾慧,等. 盐碱胁迫对苏丹草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 畜牧与饲料科学,2025,46(3):83.
Luo T,Huang C B,Mu T H,*et al*. Effects of salt and alkali stress on seed germination and seedling growth of sorghum sudanense [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*,2025,46(3):83.

[35]刘 青,姚立蓉,马小乐,等. 124 份小麦种质资源萌发期耐盐和抗旱性综合评价[J/OL]. 甘肃农业大学学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/62.1055.s.20251015.1203.006.
Liu Q,Yao L R,Ma X L,*et al*. Comprehensive evaluation of salt and drought resistance of 124 wheat germplasm resources at germination stage [J/OL]. *Journal of Gansu Agricultural University*,2025. https://link.cnki.net/urlid/62.1055.s.20251015.1203.006.

[36]袁绍燕,刘元坤,蔡世杰,等. 多样性燕麦种质资源苗期耐盐性综合评价[J/OL]. 草业学报,2025. https://link.cnki.net/urlid/62.1105.S.20251024.1131.006.
Yuan S Y,Liu Y K,Cai S J,*et al*. Comprehensive evaluation on salt tolerance of diverse oat germplasm at seedling stage [J/OL]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025. https://link.cnki.net/urlid/62.1105.S.20251024.1131.006.