

网络出版时间:2025-12-15
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20251212.1313.014

200 份燕麦种质萌发期耐盐碱性的综合评价

冯蓝冰, 武俊英, 米俊珍, 张俊珍, 赵文舒, 张翼

(内蒙古农业大学, 内蒙古呼和浩特 010018)

摘要:为筛选耐盐燕麦碱种质,对 200 份燕麦种质资源进行复盐胁迫($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4:\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3=1:9:9:1,75\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理,测定其种子活力指数、芽长、根长等 6 个萌发指标,利用主成分分析和系统聚类分析对其耐盐碱能力进行综合评价。结果表明,复盐胁迫显著抑制燕麦种质的种子萌发与早期生长,发芽率、发芽势、根长、芽长及种子活力指数均不同程度下降,其中活力指数降幅最大,而盐害率明显升高。通过主成分分析提取到 2 个主成分,累积方差贡献率 81.57%,主成分 1 在种子活力指数、芽长、根长和发芽率上的载荷较高,反映燕麦萌发潜力相关性状;主成分 2 主要与盐害率和根长相关,体现种子对盐碱胁迫的耐受表现。基于综合评价值(D 值)聚类分析,将种质分为 5 类:高耐盐碱型($D\geq 0.850$, 2 份)、耐盐碱型($0.850>D\geq 0.720$, 2 份)、中等耐盐碱型($0.720>D\geq 0.460$, 15 份)、盐碱敏感型($0.460>D\geq 0.305$, 58 份)及盐碱极敏感型($D<0.305$, 123 份);筛选出 2 份高耐盐碱性(163、21)和 2 份耐盐碱性(B106、B60)燕麦种质品系。

关键词: 燕麦;复盐胁迫;萌发期;种质评价

中图分类号:S512.6;S330

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2026)06-0776-09

Comprehensive Evaluation of Saline-Alkali Tolerance of 200 Oat Germplasms at the Germination Stage

FENG Lanbing, WU Junying, MI Junzhen, ZHANG Junzhen, ZHAO Wenshu, ZHANG Yi

(Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: In order to screen salt-tolerant germplasm of oat, 200 oat germplasm resources were subjected to complexed salt stress($\text{NaCl}:\text{Na}_2\text{SO}_4:\text{NaHCO}_3:\text{Na}_2\text{CO}_3=1:9:9:1$). Six germination indices such as seed vigor index, shoot length and root length were measured. The salt-tolerant ability of oat was comprehensively evaluated by principal component analysis(PCA) and cluster analysis. The results showed that the combined saline-alkali stress significantly inhibited the germination and early growth of oat germplasm. The germination rate, germination energy, root length, shoot length, and seed vigor index all decreased to varying degrees, among which the vigor index decreased the most, while the salt damage rate increased significantly. Two principal components were extracted by PCA, and the cumulative variance contribution rate was 81.57%. Principal component 1 exhibited a higher loading on seed vigor index, shoot length, root length, and germination rate, reflecting traits related to the germination potential of oats. Principal component 2 was mainly associated with salt injury rate and root length, reflecting the tolerance performance of seeds under salt-alkali stress. Based on the comprehensive evaluation value(D value) in clustering analysis, the germplasms were classified into five groups: highly salt-alkali tolerant group($D\geq 0.850$, 2 germplasms), salt-alkali tolerant group($0.850>D\geq 0.720$, 2 germplasms), moderately salt-alkali tolerant group($0.720>D\geq 0.460$, 15

收稿日期:2025-08-23

修回日期:2025-09-28

基金项目:饲用燕麦新品种选育与良种繁育示范应用项目(CCPTZX2023B05);国家现代农业燕麦荞麦产业技术体系项目(CARS-07);内蒙古自治区燕麦工程实验室能力建设项目(BR221023)

第一作者 E-mail:3495095426@qq.com(冯蓝冰)

通讯作者 E-mail:nmbtwjy@163.com(武俊英)

germplasms), salt-alkali sensitive group($0.460 > D \geq 0.305$, 58 germplasms), and extremely salt-alkali sensitive group($D < 0.305$, 123 germplasms). Two oat germplasm lines with high tolerance(163 and 21) and two oat germplasm lines with tolerance(B106 and B60) to salt-alkali stress were screened.

Keywords: Oat; Complexed salt stress; Germination period; Germplasm evaluation

土壤盐碱化是全球农业面临的重大挑战^[1]。据统计,中国盐碱地面积约 1 亿 hm^2 , 占全球盐碱地总量 7.2%, 其中 0.37 亿 hm^2 具备农业开发利用潜力^[2-5]。因此,加强盐碱地研究及开发利用对促进中国农业发展具有重要意义^[6-7]。内蒙古自治区是中国典型的盐碱地集中分布区,河套灌区、土默川平原等区域普遍存在土壤盐分积累和碱化问题,表现为 pH 值偏高, Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 含量丰富,土壤结构疏松且易返盐,严重制约当地农业可持续发展^[8-9]。

燕麦具有抗旱、抗寒、耐盐碱等优良性状,在中国西北、华北、东北等地区被广泛栽培,其与中国盐碱地的分布情况大致吻合^[8]。燕麦对盐碱环境的耐受性在作物中相对较强,根系可分泌有机酸调节离子平衡,胚乳结构有助于提高种子萌发阶段的生理稳定性^[3,10]。然而,燕麦对盐碱胁迫的响应在种内存在遗传差异。对燕麦种质资源进行耐盐碱性鉴定可为燕麦耐盐碱育种提供重要的遗传资源,进而促进盐碱地的开发利用和燕麦耐盐碱种植。通过室内和田间试验,根据萌发期指标^[11-12](发芽率、发芽势、发芽指数、胚根长)、生理生化指标^[13](丙二醛含量、脯氨酸积累量、 K^+ / Na^+ 比、抗氧化酶活性)及生物量变化(地上部鲜重、根系干重)进行系统评价,结果表明,不同燕麦基因型的耐盐碱差异较大。种子发芽率、发芽势、活力指数、芽长、根长与盐害率常被广泛应用于多种作物耐盐碱性评价的研究。这些指标能够从萌发速度、生理活性、根系发育、胁迫损伤等方面反映作物在胁迫下的表现,具有稳定性强、操作性好、响应敏感等优点^[14-16]。其中,发芽势和活力指数常用于反映作物生育早期生长潜能,根长与芽长代表形态建成能力,而盐害率则可作为筛选敏感种质的负向指示变量。

盐碱胁迫对植物造成的主要影响包括渗透压增加、离子毒害和高 pH 值引起的代谢障碍^[17],这些作用在植物生育早期尤为显著,因此种子的萌发阶段常被作为作物耐盐碱性快速鉴定的关键期。本研究采用的复盐溶液由 NaCl 、 Na_2SO_4 、 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 按物质的量比 1:9:

9:1 配制,总浓度 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值维持在 8.2~8.9。该配比主要依据内蒙古河套灌区、土默川平原等典型盐碱地的离子组成特征设计,当地土壤中 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 含量较高,且普遍存在碱性条件($\text{pH} > 8$),表现为盐分与碱性共同作用的复合胁迫^[9]。相比单盐胁迫,复盐处理更能真实模拟田间盐碱环境,可同时体现离子毒害与碱毒性效应,已被多项研究用于作物耐盐碱性鉴定^[18-19]。在模拟条件设计中, Na^+ 主导的高碱型盐体系更能突出土壤碱毒性,其适度胁迫浓度($75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)已被证实具有良好的鉴定效果,能够揭示种质间的耐性差异而不完全抑制萌发^[20-21]。本研究采用复盐胁迫对引进的 200 份燕麦种质进行萌发期耐盐碱性鉴定和综合评价,以期对燕麦耐盐碱育种提供侯选种质材料和理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试燕麦种质 200 份,由内蒙古农业大学燕麦全产业链科技创新团队引进,种质材料编号及来源见表 1。试验于 2024 年 3—11 月在内蒙古自治区呼和浩特市内蒙古农业大学人工气候室进行。

根据前人研究,盐碱溶液按照物质当量比 1:9:9:1 ($\text{NaCl} : \text{Na}_2\text{SO}_4 : \text{NaHCO}_3 : \text{Na}_2\text{CO}_3$) 配制^[8,18],总浓度 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值 8.23~8.94。

1.2 试验方法

试验采用纸上发芽法,设置盐碱胁迫处理 and 对照(蒸馏水),重复 3 次。选择籽粒饱满,大小均匀一致的燕麦种子,用 5% 的次氯酸钠溶液浸泡 15 min 进行种子消毒,后流水冲洗 3~5 min。每份燕麦种子 25 粒,均匀摆放于直径 90 mm 培养皿中。每皿定量加入 5 mL 盐碱胁迫溶液,对照中加入蒸馏水 5 mL,确保滤纸充分浸润但液面不淹没种子。将培养皿置于人工气候箱中,设置光照/黑暗时间 16 h/8 h,温度 $25 \text{ }^\circ\text{C}/20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。每天加蒸馏水以补充水分损失,保持滤纸湿润度一致。在试验第 5 天和第 7 天测定各项指标。

表 1 供试材料编号及来源
Table 1 Accession number and source of the test materials

材料 Materials	来源 Source	材料 Materials	来源 Source	材料 Materials	来源 Source	材料 Materials	来源 Source
ZNY044	CI	WL179	CI	240-2009-84-11-2-1	CH	185	CB
ZNY001	CI	WL173	CI	ZNY034	CB	23	CB
ZNY050	CI	Ca179	CJ	ZNY047	CB	41	CB
ZNY040	CI	B104	CJ	ZNY213	CB	69	CB
ZNY158	CI	Ca162	CJ	ZNY208	CB	163	CB
ZNY003	CI	B63	CJ	ZNY180	CB	171	CB
WL304	CI	B27	CJ	ZNY179	CB	L50P	CB
ZNY039	CI	B48	CJ	ZNY241	CB	122	CB
67	CI	Ca2	CJ	ZNY191	CB	87	CB
ZNY057	CI	B19	CJ	ZNY184	CB	64	CB
WL313	CI	B11	CJ	ZNY163	CB	44	CB
WL226	CI	B3	CJ	ZNY222	CB	190	CB
ZNY134	CI	B42	CJ	ZNY162	CB	167	CB
ZNY058	CI	B57	CJ	ZNY161	CB	121	CB
ZNY064	CI	B56	CJ	ZNY190	CB	182	CB
WL053	CI	B128	CJ	ZNY182	CB	L34 皮	CB
WL253	CI	B23	CJ	ZNY183	CB	L60 优质裸大 L60 Youzhiluoda	CB
ZNY075	CI	B8	CJ	ZNY229	CB	123	CB
WL121	CI	B116	CJ	ZNY117	CB	156	CB
WL251	CI	Ca171	CJ	ZNY176	CB	82	CB
WL187	CI	B52	CJ	ZNY178	CB	9	CB
WL309	CI	B106	CJ	ZNY171	CB	35	CB
ZNY076	CI	B60	CJ	ZNY199	CB	Malellows	CB
134	CI	Ca92	CJ	ZNY240	CB	104	CB
WL116	CI	B40	CJ	ZNY237	CB	161	CB
ZNY004	CI	B105	CJ	ZNY236	CB	6	CB
WL005	CI	B45	CJ	ZNY232	CB	27	CB
WL114	CI	B58	CJ	ZNY170	CB	8	CB
ZNY005	CI	B121	CJ	ZNY169	CB	68	CB
WL207	CI	B59	CJ	ZNY166	CB	43	CB
WL008	CI	B109	CJ	ZNY167	CB	L41 皮 141 Pi	CB
103	CI	B26	CJ	ZNY173	CB	152	CB
102	CI	B122	CJ	ZNY220	CB	13	CB
WL085	CI	108	CJ	ZNY201	CB	143	CB
22	CI	B61	CJ	ZNY202	CB	162	CB
85	CI	B125	CJ	ZNY204	CB	150	CB
Ca95	CI	Ca300	CJ	ZNY203	CB	12	CB
WL217	CI	B115	CJ	26	CB	164	CB
88	CI	Ca175	CJ	130	CB	33	CB
106	CI	B24	CJ	141	CB	WL103	CB
132	CI	24	CX	15	CB	28	CB
WL028	CI	142	CX	L41 裸 141 Luo	CB	L4	CB
WL050	CI	128	CX	63	CB	l61 皮 161 Pi	CB
WL044	CI	146	CX	4	CB	Ca146	CA
WL295	CI	65	CX	174	CB	Ca161	CA
WL049	CI	181	CX	54	CB	Ca299	CA
WL047	CI	21	CX	92	CB	Ca164	CA
WL046	CI	2	CX	3	CB	Ca147	CA
WL176	CI	66	CX	L15 皮 L15 Pi	CB	Ca154	CA
WL291	CI	5	CX	B55	CB	Ca170	CA

CI: 中国内蒙古; CJ: 中国吉林; CX: 中国新疆; CH: 中国河北; CB: 中国北京; CA: 加拿大。
CI: Inner Mongolia, China; CJ: Jilin, China; CX: Xinjiang, China; CH: Hebei, China; CB: Beijing, China; CA: Canada.

1.3 测定指标

培养第7天随机挑取10株幼苗,直尺测定燕麦种子萌发期的芽长和根长^[21];发芽率、发芽势、盐害率(SR)的计算参照陈新等^[16]方法;活力指标计算参考付鸾鸿等^[12]方法。各指标均取平均值。

$$\text{发芽势} = \frac{\text{培养第 4 天发芽数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\% ;$$
$$\text{发芽率} = (\text{培养第 7 天发芽数} / \text{供试种子总数}) \times 100\% ;$$
$$SR = (\text{对照组发芽种子数} - \text{胁迫组发芽总种子数}) / \text{对照供试种子总数} \times 100\% ;$$

种子活力指数 = 发芽率 $\times$ (平均根长 + 平均芽长);

$$\text{耐盐碱系数} = \text{盐碱胁迫处理测定值} / \text{对照测定值} \times 100\%$$

1.4 数据分析

利用 Microsoft Excel 2024 进行数据统计, 计算各性状的标准差、平均值和变异系数。采用

Origin 2024、R 4.1.3 和 SPSS 26.0 进行主成分分析和聚类分析。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫对燕麦材料种子萌发及生长的影响

盐碱胁迫显著抑制了燕麦种子的萌发与早期生长,燕麦萌发期的种子发芽势、发芽率、根长、芽长、种子活力指数较对照均显著降低(经 t 测验, $P<0.05$)(表 2)。其中,种子活力指数受影响最大,降幅 86.43%;发芽率受影响最小,降幅 48.90%。盐碱胁迫和对照下,不同指标的标准差和变异系数均有所差异;盐碱胁迫后 5 个指标的变异系数均较对照不同程度提高,表明不同材料及同一材料的不同生理指标对胁迫的响应程度存在差异。其中,种子活力指数变异系数增幅达到 126.51 个百分点,说明该指标对胁迫反应最为敏感,可作为鉴定燕麦萌发期耐盐碱性的关键性状。

表 2 指标耐盐碱系数描述统计结果

Table 2 Description and statistics results of saline-alkali resistance coefficients of each index

指标 Indicator	对照 Control			盐碱胁迫 Saline-alkali stress			胁迫后下降幅度 Decrease rate after stress/%
	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%	
GR/%	86.066	19.771	22.972	43.982	30.310	68.914	48.897
GE/%	66.318	21.627	32.611	26.846	21.813	81.251	59.519
SL/cm	10.225	3.023	29.568	3.506	3.548	101.202	65.716
RL/cm	8.981	2.934	32.671	2.143	2.862	133.559	76.142
VI	6.567	2.921	44.488	0.889	1.524	171.002	86.428

GR:发芽率;GE:发芽势;SL:芽长;RL:根长;VI:种子活力指数。

GR; Germination rate; GE; Germination energy; SL; Shoot length; RL; Root length; VI; Seed vigor index.

2.2 主成分分析结果

对燕麦不同性状的耐盐碱系数(GR、GE、BL、RL、VI 及 SR)进行相关性分析,结果(图 1)显示,大多数指标间存在极显著相关性($P<0.01$),表明这些性状对盐碱胁迫的响应具有一致性,且不同性状间存在明显信息重叠。因此,对这些材料的耐盐碱性有必要采用主成分分析进行综合评价。

对供试燕麦各指标的耐盐碱系数进行主成分分析(PCA),根据特征值大于1的提取原则,共提取到2个主成分,它们的特征值分别为3.521和1.373,方差贡献率分别为58.68%和22.89%,且2个主成分的累积方差贡献率达81.57%,可反映发芽率、发芽势、芽长、根长、种子活力指数和盐害率等6个指标的大部分信息(表3)。

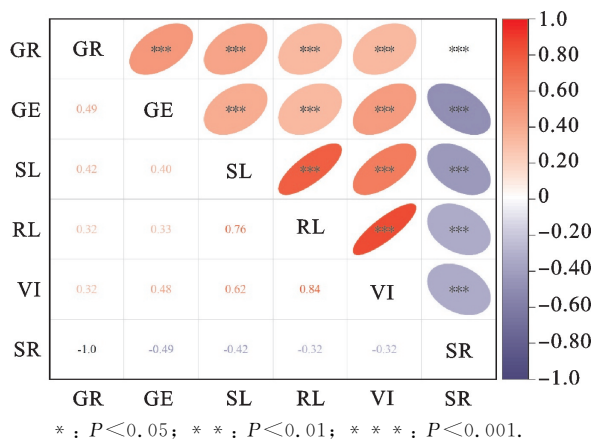


图 1 燕麦萌发期指标间耐盐碱系数的相关性

Fig. 1 Correlation of saline-alkali tolerance coefficients among different indexes at germination stage of oat

主成分载荷矩阵能反映各指标与主成分之间的关系。主成分 1 中种子活力指数(0.797)、根长(0.787)、芽长(0.785)、发芽率(0.772)的载荷因子较大(表 3),说明主成分 1 主要与种子萌发潜力有关。主成分 2 中盐害率(0.606)、根长(0.532)的载荷因子较大,说明主成分 2 主要与燕麦种子的盐碱耐受力相关。

表 3 主成分载荷矩阵
Table 3 Principal component loading matrix

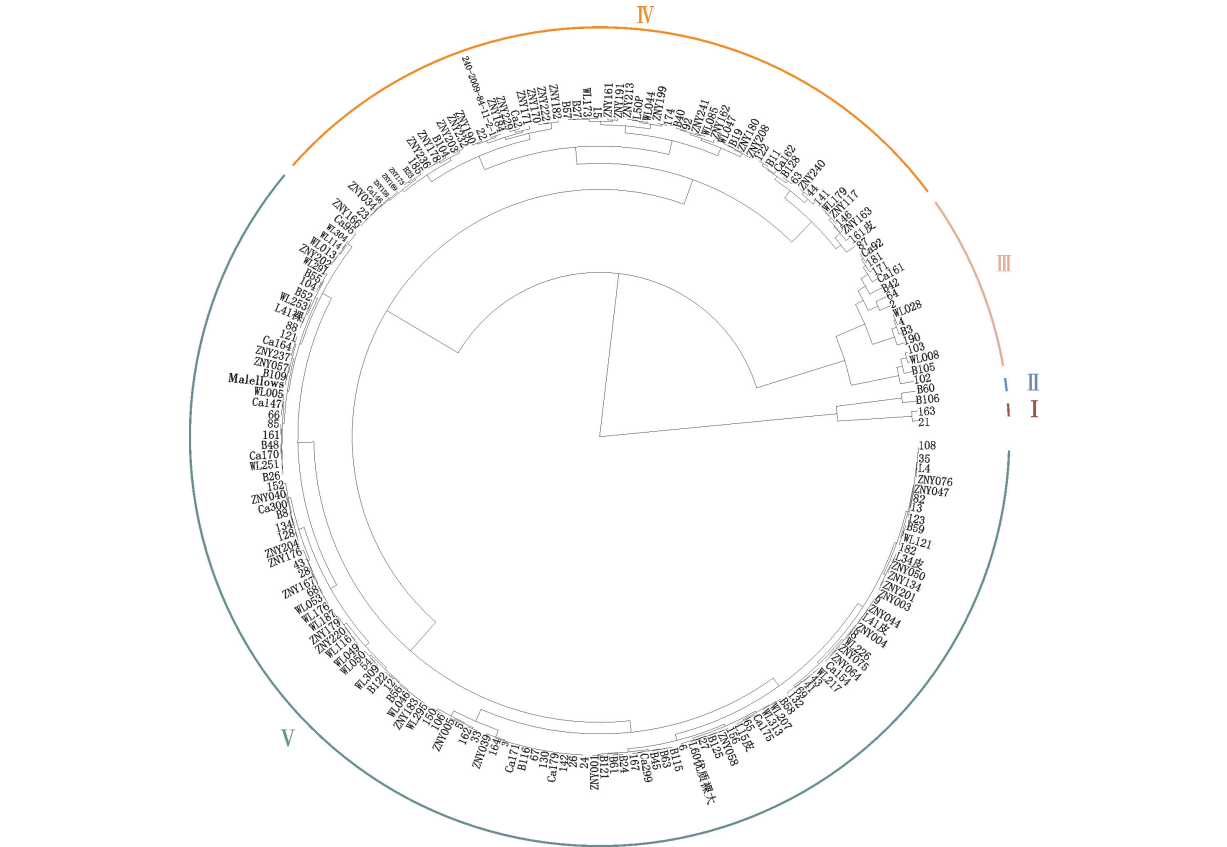
性状 Trait	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
GR	0.772	-0.606
GE	0.676	-0.166
RL	0.787	0.532
VI	0.797	0.323
SL	0.785	0.473
SI	-0.772	0.606
方差贡献率 Variance contribution rate/%	58.68	22.89
累积方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	58.68	81.57

2.3 聚类分析结果

根据主成分分析结果计算出权重及 200 份燕麦种质的综合评价(D 值)。利用系统聚类法对这些材料的 D 值进行聚类分析,将 200 份燕麦种质划分为 5 大类(图 2)。第 I 类为高耐盐碱型($D \geq 0.850$),包括 163 和 21 两份材料,占供试材料总数的 1%;第 II 类为耐盐碱型($0.850 > D \geq 0.720$),包括 B106 和 B60 两份材料,占供试材料总数的 1%。第 III 类为中等耐盐碱型,共有 B3、B42 等 15 份材料,占供试材料总数的 7.5%($0.720 > D \geq 0.460$)。第 IV 类为盐碱敏感型($0.460 > D \geq 0.305$),共有 WL043、WL137 等 58 份材料,占供试材料总数的 29%。第 V 类为盐碱极敏感型($D < 0.305$),共有 ZNY008、ZNY024 等 123 份材料,占供试材料总数的 61.5%。

2.4 不同耐盐碱类型燕麦种质的特性分析

根据聚类分析结果,将高耐盐碱型、耐盐碱型、中等耐盐碱型、盐碱敏感型和盐碱极敏感型五类材料在盐碱胁迫下的各项指标进行统计,结果(表 4)表明,发芽势、芽长、根长、种子活力等 4 项



I : 高耐盐碱型; II : 耐盐碱型; III : 中等耐盐碱型; IV : 盐碱敏感型; V : 盐碱极敏感型。
I : High salt-alkali resistant type; II : Salt-alkali resistant type; III : Moderately salt-alkali resistant type; IV : Salt-alkali sensitive type; V : Extremely salt-alkali sensitive type.

图 2 供试燕麦材料耐盐碱性的系统聚类分析
Fig. 2 Cluster analysis of salt-alkali tolerance of the tested oat materials

表 4 不同类型燕麦的各指标均值、标准差和变异系数

Table 4 Average, standard deviation, and coefficient of variation of the six germination indicators of oat with different types								
类型 Type	样本数 Samples	项目 Item	GR/%	GE/%	SL/cm	RL/cm	VI	SR
I	2	均值 Average	89.000	174.183	1.096	1.892	3.120	0.110
		标准差 SD	11.000	53.595	0.189	0.327	0.444	0.110
		变异系数 CV/%	12.360	30.769	0.172	0.173	0.142	1.000
II	2	均值 Average	102.310	80.348	1.102	1.343	1.123	0.027
		标准差 SD	2.310	8.348	0.360	0.531	0.539	0.073
		变异系数 CV/%	2.257	10.390	0.326	0.395	0.480	2.717
III	15	均值 Average	90.329	92.445	0.854	1.007	0.757	0.097
		标准差 SD	28.211	67.804	0.273	0.343	0.311	0.282
		变异系数 CV/%	31.232	73.344	0.320	0.340	0.411	2.917
IV	58	均值 Average	77.449	67.188	0.494	0.323	0.179	0.226
		标准差 SD	23.413	40.817	0.222	0.256	0.103	0.234
		变异系数 CV/%	30.231	60.750	0.448	0.792	0.578	1.038
V	123	均值 Average	30.153	22.661	0.166	0.094	0.023	0.698
		标准差 SD	23.773	19.894	0.135	0.104	0.031	0.238
		变异系数 CV/%	78.840	87.787	0.816	1.108	1.373	0.340

指标由高耐盐碱型到盐碱极敏感型均呈现降低的趋势,盐害率(SI)呈现反向变化趋势,显示这些指标可有效区分不同耐盐碱类型。在盐碱胁迫条件下 I、II 类材料表现出较高的发芽活性和根系生长能力,IV、V 类材料的根、芽生长显著受抑,活力指数与发芽势急剧下降,盐害率显著上升,说明其对盐碱胁迫极为敏感。

3 讨论

种子萌发期作为植物对盐碱胁迫最敏感的阶段^[22],成为作物耐盐碱性早期鉴定和种质筛选的最佳时期。盐胁迫主要通过渗透胁迫与离子毒害机制抑制种子萌发率与根系伸展^[20]。在裸燕麦中,根长与发芽势对盐碱胁迫响应显著,可用于识别耐盐碱性差异^[16]。在混合碱胁迫下,燕麦的种子活力指数和胚根鲜重对耐盐性判别力最高^[12];复合盐碱胁迫导致裸燕麦种子发芽势、发芽率、芽长、胚根长等指标均显著下降,说明萌发指标对耐盐碱性区分的敏感性^[23]。这些结果与本研究活力指数、芽长、根长等指标在耐盐碱性区分时的显著性高度一致。

一些研究认为复合盐碱胁迫比单盐胁迫更能真实反映田间环境。内蒙古河套灌区的盐碱土富含 Na⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻^[24-25]。转录组学分析发现,NaCl-NaHCO₃ 复配胁迫可同时激活燕麦的渗透调节通路和 pH 响应通路^[26-29];田

间试验结果显示,复合盐碱环境下燕麦通过增强 K⁺ 选择性吸收和有机酸积累缓解离子毒性^[30],印证了转录组学分析结果。杨科等^[31]以 NaCl、Na₂SO₄、Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 复配胁迫处理,结果表明,复配盐碱胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生长的抑制作用符合田间实际。综合上述研究结果,本研究设置的复合盐碱条件具有合理性。

评价作物耐盐碱性的方法有多种,如聚类分析、主成分分析、平均隶属函数法等^[16],变异系数可作为种质资源性状评价的辅助筛选^[32]。斯日古楞等^[33]运用主成分分析、加权隶属函数法等综合评价了 8 份燕麦种质资源的萌发期耐盐性强弱;田振东等^[34]通过相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、聚类分析方法对 40 份燕麦种质材料进行耐盐碱综合鉴定评价,并成功筛选出 5 份耐盐碱性强的燕麦种质资源;张静等^[35]在对 485 份燕麦材料研究中通过主成分分析与隶属函数法构建 D 值,并基于 D 值范围将供试材料聚类形成 5 个耐性等级,与本研究结果趋势一致,说明该方法具备较强的通用性与解释力。此外,五级分型结构(高耐-耐-中-敏感-极敏)已在水稻^[36]、高粱^[37]、谷子^[38]、大豆^[39]等多作物的逆境筛选中得到应用,支持其在燕麦耐盐碱研究中的适用性。

pH 值也是碱性胁迫的重要参数。多数研究将 pH>8 作为“碱胁迫”的有效起点^[40],本试验所设盐碱溶液 pH 值处于该范围。研究表明,pH

值升高不仅会改变种子膜电位,还可能抑制关键水解酶活性,降低胚根生长速率^[24]。因此,萌发能力的下降可能是离子毒害与碱毒害共同作用的结果,通过抑制细胞伸展、阻碍水分吸收等方式加重萌发障碍^[41]。张碧茹等^[8]对河套地区燕麦耐碱胁迫研究认为,高 pH 值是影响萌发最关键的非离子因素之一。

不同来源燕麦种质在耐盐碱性上表现出显著差异。一方面,这与其遗传背景差异密切相关。例如,部分来自内蒙古作物所和吉林的品系在复盐胁迫下表现出更强的萌发活性,而部分内蒙古地方材料耐性相对较弱。这可能与长期的生态环境选择压力、遗传多样性以及种质适应性有关^[34,35]。另一方面,来自不同地理区域的种质在离子调控与渗透调节能力上存在差异,提示通过整合多来源种质有助于拓展耐盐碱育种材料的多样性。

本研究中,盐碱胁迫条件下燕麦种子活力指数下降幅度最大,表明种子活力指数对复盐胁迫尤为敏感。这一结果可能与以下生理机制相关:复盐胁迫下高浓度的 Na^+ 、 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 离子可抑制 α -淀粉酶等关键水解酶活性,阻碍胚乳储藏物质的分解与转运,直接影响能量供给,导致萌发代谢受阻^[20];离子毒害与渗透胁迫作用会引起细胞膜脂过氧化和结构损伤,降低细胞活性和代谢效率,从而使种子活力指数急剧下降^[9];高 pH 值条件下碱毒性可能改变细胞膜电位,进一步加剧离子失衡和渗透调节障碍,阻碍根尖和胚芽的正常伸展^[31]。因此,种子活力指数比发芽率和芽长等指标更敏感,能够作为区分燕麦种质耐盐碱性的关键鉴定指标。

5 结论

在 $75 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 复合盐碱胁迫下,燕麦种子萌发期 6 项指标均显著响应,其中种子活力指数、根长、芽长和发芽势对胁迫最敏感。主成分分析提取出 2 个主成分因子(累计解释 81.57% 的总方差),结合相关性分析验证综合评价价值可作为综合耐性指数。聚类分析显示 200 份燕麦种质中,123 份(61.5%)为盐碱极敏感型,仅 2 份(1.0%)为高耐盐碱型,表明多数材料耐性较弱。基于萌发期关键指标构建的综合评价体系可有效区分种质差异,筛选出 2 份高耐型(163、21)和 2 份耐型(B106、B60)核心材料。

参考文献:

- [1]联合国粮农组织(FAO). 全球盐渍化土壤地图集[R]. 罗马:联合国粮农组织,2021.
FAO. Global atlas of salinized soils [R]. Rome:FAO,2021.
- [2]农业农村部耕地质量监测保护中心. 我国盐碱地资源现状与潜力分析[J]. 中国农垦,2024(12):12.
Monitoring and Protection Center of Cultivated Land Quality, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Analysis of the current situation and potential of saline-alkali land resources in China [J]. *China's State Farms*,2024(12):12.
- [3]SHELKE D B, NIKALJE G C, CHAMBHARE M R, *et al.* Na^+ and Cl^- induce differential physiological, biochemical responses and metabolite modulations *in vitro* in contrasting salt-tolerant soybean genotypes [J]. *3 Biotech*,2019,9(3):91.
- [4]赵娜,缪亚梅,陈满峰,等. 蚕豆耐盐性的研究进展[J]. 安徽农业科学,2015,43(18):20.
ZHAO N, MIAO Y M, CHEN M F, *et al.* Research progress on salt tolerance of faba bean [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*,2015,43(18):20.
- [5]段国康,刘森,梁正伟. 盐碱胁迫水稻根系研究[J]. 土壤与作物,2024,13(1):119.
DUAN G K, LIU M, LIANG Z W. Rice roots under saline-alkali stress [J]. *Soil and Crop*,2024,13(1):119.
- [6]马帅国,田蓉蓉,胡慧,等. 粳稻种质资源苗期耐盐性综合评价与筛选[J]. 植物遗传资源学报,2020,21(5):1089.
MA S G, TIAN R R, HU H, *et al.* Comprehensive evaluation and selection of rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for saline tolerance at seedling stage [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*,2020,21(5):1089.
- [7]李月婷. 水稻苗期耐盐种质资源的筛选与鉴定[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2020.
LI Y T. Screening and identification of salt-tolerant rice germplasm resources at seedling stage [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University,2020.
- [8]张碧茹,米俊珍,赵宝平,等. 盐碱胁迫下燕麦幼苗生长生理差异及耐盐碱阈值[J]. 西北农业学报,2024,33(10):1849.
ZHANG B R, MI J Z, ZHAO B P, *et al.* Physiological difference and saline-alkali tolerance threshold of oat seedlings under saline-alkali stress [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*,2024,33(10):1849.
- [9]周利颖,李瑞平,苗庆丰,等. 河套灌区不同掺沙量对重度盐碱土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(10):116.
ZHOU L Y, LI R P, MIAO Q F, *et al.* Effects of different sand ratios on infiltration and water-salt movement of heavy saline-alkali soil in Hetao irrigation area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2020,36(10):116.
- [10]高彩婷,刘景辉,张玉芹,等. 短期盐胁迫下燕麦幼苗的生理响应[J]. 草地学报,2017,25(2):337.
GAO C T, LIU J H, ZHANG Y Q, *et al.* Physiological re-

- sponses of oats seedlings to short-term salt stress [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(2): 337.
- [11] 毛明艳. 不同燕麦基因型耐盐碱能力比较研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
- MAO M Y. Study on tolerance of different oat genotypes to saline-alkali stress [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009.
- [12] 付鸾鸿, 于 崧, 于立河, 等. 不同基因型燕麦萌发期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 作物杂志, 2018(6): 27.
- FU L H, YU S, YU L H, *et al.* Analysis of saline-alkaline tolerance and screening of identification indexes of different oat genotypes at the germination stage [J]. *Crops*, 2018(6): 27.
- [13] AHMED S, PRIYADARSHINI P, INDU I, *et al.* Effect of salinity stress on growth, physio-biochemical and ion homeostasis and activation of antioxidant defense responses in *Avena* spp [J/OL]. *Cereal Research Communications*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s42976-025-00648-1>.
- [14] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 等. 花生萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(6): 1079.
- SUN D L, BIAN N F, CHEN Z D, *et al.* Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of peanut (*Arachis hypogaea* L.) at germination stage [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(6): 1079.
- [15] 李建设, 沈国伟, 任长忠, 等. 燕麦种子萌发和幼苗生长对不同盐胁迫的反应[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(6): 1043.
- LI J S, SHEN G W, REN C Z, *et al.* Response of oat cultivars to stress of different salts during seed germination and seedling growth [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(6): 1043.
- [16] 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.
- [17] AHMED S, PATEL R, SINGHAL R K, *et al.* Salinity, alkalinity and their combined stress effects on germination and seedling growth attributes in oats (*Avena sativa*) [J]. *Crop & Pasture Science*, 2023, 74(11): 1094.
- [18] 金梦野, 李小华, 李昉泽, 等. 盐碱复合胁迫对水稻种子发芽的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(4): 566.
- JIN M Y, LI X H, LI F Z, *et al.* Effects of mixed saline-alkali stress on germination of rice [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, 28(4): 566.
- [19] 杨永义, 倪 强, 马 瑞, 等. 混合盐($\text{NaCl} + \text{NaHCO}_3$)和 NaCl 对黑果枸杞种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(7): 168.
- YANG Y Y, NI Q, MA R, *et al.* Effects of mixed salt ($\text{NaCl} + \text{NaHCO}_3$) and NaCl on seed germination and seedling growth of *Lycium ruthenium* Murr. [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(7): 168.
- [20] ASHRAF M, MCNEILLY T. Salinity tolerance in *Brassica* Oilseeds [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(2): 157.
- [21] 张 静, 高文博, 晏 林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选[J]. 作物学报, 2023, 49(6): 1551.
- ZHANG J, GAO W B, YAN L, *et al.* Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Acta Agonomica Sinica*, 2023, 49(6): 1551.
- [22] 王宝山, 赵可夫, 邹 琦. 作物耐盐机理研究进展及提高作物抗盐性的对策[J]. 植物学通报, 1997(S1): 26.
- WANG B S, ZHAO K F, ZOU Q. Research progress of crop salt tolerance mechanism and countermeasures to improve crop salt tolerance [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1997(S1): 26.
- [23] 李 峰, 殷丛培, 殷 冉, 等. 燕麦根际土壤细菌多样性对盐胁迫的响应[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(1): 153.
- LI F, YIN C P, YIN R, *et al.* Response of rhizosphere soil bacterial community diversity to salt stress in oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, 25(1): 153.
- [24] 任根增, 高志远, 张 瑜, 等. 混合盐碱胁迫对高粱农艺性状及生理指标的影响[J]. 作物杂志, 2017(1): 100.
- REN G Z, GAO Z Y, ZHANG Y, *et al.* The influence of mixed salt and alkali stress on physiological and agronomic traits of sorghum [J]. *Crops*, 2017(1): 100.
- [25] 王 波, 宋凤斌. 燕麦对盐碱胁迫的反应和适应性[J]. 生态环境, 2006, 15(3): 625.
- WANG B, SONG F B. Physiological responses and adaptive capacity of oats to saline-alkali stress [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(3): 625.
- [26] 海 霞. 亚精胺缓解燕麦盐胁迫的生理机制研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- HAI X. A study on the physiological mechanism of salt stress alleviation by spermidine in oat [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [27] 李俊伟. 燕麦对盐胁迫和碱胁迫的响应机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- LI J W. The mechanism of oat response to salt stress and alkali stress [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [28] XU Z S, CHEN X J, LU X P, *et al.* Integrative analysis of transcriptome and metabolome reveal mechanism of tolerance to salt stress in oat (*Avena sativa* L.) [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 160: 315.
- [29] ZHAO Z, LIU J H, JIA R Z, *et al.* Physiological and TMT-based proteomic analysis of oat early seedlings in response to alkali stress [J]. *Journal of Proteomics*, 2019, 193: 10.
- [30] 卢艳丽. 燕麦与不同作物混作抗盐碱生理特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.

- LU Y L. Study on resistance saline-alkali physiological characteristics mixed sowing different crops and oats [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.
- [31] 杨科, 张保军, 胡银岗, 等. 混合盐碱胁迫对燕麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 188.
- YANG K, ZHANG B J, HU Y G, *et al.* Effects of complex saline-alkaline stress on seeds germination and physiological and biochemical parameters of oats seedlings [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 188.
- [32] 陈文晋, 孔庆全, 赵存虎, 等. 鹰嘴豆种质资源主要农艺性状遗传多样性分析[J]. 北方农业学报, 2018, 46(5): 9.
- CHEN W J, KONG Q Q, ZHAO C H, *et al.* Analysis of genetic diversity of the main agronomic traits of chickpea germplasm resources [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2018, 46(5): 9.
- [33] 斯日古楞, 张玉霞, 马群, 等. 8个饲用燕麦品种萌发期耐盐性综合评价[J]. 草原与草坪, 2020, 40(6): 118.
- SIRIGULENG, ZHANG Y X, MA Q, *et al.* Comprehensive evaluation of salt tolerance of 8 forage oat varieties [J]. *Grassland and Turf*, 2020, 40(6): 118.
- [34] 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.
- [35] 张静. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及相关基因功能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2023.
- ZHANG J. Identification and evaluation of salt-alkali tolerance in oat germplasm resources and related gene function research [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023.
- [36] 宋欣阳. 水稻耐盐种质筛选及BR缓解盐胁迫的效应研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- SONG X Y. Screening of salt tolerance germplasm and study on the effect of brassinolide on alleviating salt stress in rice [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.
- [37] 周伟, 金广洋, 余忠浩, 等. 176份糯高粱品系主要农艺性状综合评价[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(14): 128.
- ZHOU W, JIN G Y, YU Z H, *et al.* Comprehensive evaluation of main agronomic characters of 176 glutinous sorghum strains [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(14): 128.
- [38] 周璐璐, 平文超, 刘艳丽, 等. 谷子苗期性状对低氮胁迫的响应及耐低氮品种的筛选与评价[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(1): 164.
- ZHOU L L, PING W C, LIU Y L, *et al.* Response of millet seedling traits to low nitrogen stress and screening and evaluation of low nitrogen tolerant varieties [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(1): 164.
- [39] 杜若楠, 张睿, 唐晓东, 等. 盐胁迫下国内外333份大豆种质资源的种子萌发特性及耐盐性评价[J]. 大豆科学, 2025, 44(4): 59.
- DU R N, ZHANG R, TANG X D, *et al.* Seed germination characteristics and salt tolerance evaluation of 333 domestic and foreign soybean germplasm resources under salt stress [J]. *Soybean Science*, 2025, 44(4): 59.
- [40] YANG C W, XU H H, WANG L L, *et al.* Comparative effects of salt-stress and alkali-stress on the growth, photosynthesis, solute accumulation, and ion balance of barley plants [J]. *Photosynthetica*, 2009, 47(1): 79.
- [41] LI R L, SHI F C, FUKUDA K, *et al.* Effects of salt and alkali stresses on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(5): 725.