

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.014

引用格式:陈佳敏,徐世锐,贾蓓蓓,等.燕麦萌发期耐盐性综合评价[J].草地学报,2026,34(5):1717—1736

CHEN Jia-min, XU Shi-rui, JIA Bei-bei, et al. Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance of Oat (*Avena sativa* L.) Germplasm during the Germination Stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1717—1736

燕麦萌发期耐盐性综合评价

陈佳敏^{1,2}, 徐世锐^{1,4}, 贾蓓蓓², 崔硕祯², 魏广智², 张威^{2,3,4},
张美俊^{2,3,4}, 贾举庆^{2,3,4*}, 刘龙龙^{1,4*}

(1. 山西农业大学农业基因资源研究中心, 山西 太原 030031; 2. 山西农业大学农学院, 山西 太谷 030801;
3. 山西省后稷实验室, 山西 太原 030031; 4. 农业农村部种质创新与分子育种重点实验室(部省共建), 山西 太原 030031)

摘要:本研究旨在建立高效的燕麦(*Avena sativa* L.)萌发期耐盐性鉴定方法,并为耐盐育种筛选优良亲本。采用培养皿纸上发芽法,以0.80%(136.89 mmol·L⁻¹)NaCl溶液对332份燕麦种质进行盐胁迫处理,测定发芽势等8项指标,结合加权隶属函数法与聚类分析综合评价其耐盐性并划分等级。盐胁迫对8项指标均产生抑制;相关性分析显示各指标间存在极显著正相关;332份种质被划分为5个等级,包括34份高耐盐、83份耐盐、116份中等耐盐、51份盐敏感及48份高盐敏感种质;通过回归分析确定根长耐盐指数、芽鲜重耐盐指数为萌发期耐盐性评价的关键指标;根据两年评价结果,6份材料的耐盐性稳定,可作为耐盐育种亲本;比较分析显示,耐盐性皮燕麦的比率高于裸燕麦。34份高耐盐种质为耐盐育种与基因挖掘提供了优异资源。

关键词:燕麦;萌发期;加权隶属函数分析;耐盐指数

中图分类号:S512.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1717-20

Comprehensive Evaluation of Salt Tolerance of Oat (*Avena sativa* L.) Germplasm during the Germination Stage

CHEN Jia-min^{1,2}, XU Shi-rui^{1,4}, JIA Bei-bei², CUI Shuo-zhen², WEI Guang-zhi², ZHANG Wei^{2,3,4},
ZHANG Mei-jun^{2,3,4}, JIA Ju-qing^{2,3,4*}, LIU Long-long^{1,4*}

(1. Center for Agricultural Genetic Resources Research, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi Province 030031, China;
2. College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi Province 030801, China; 3. Houji Laboratory in Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi Province 030031, China; 4. Key Laboratory of Crop Germplasm Innovation and Molecular Breeding (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Taiyuan, Shanxi Province 030031, China)

Abstract: The purpose of this study was to establish an efficient method for identifying the salt tolerance of oats (*Avena sativa* L.) during the germination stage, and to screen our excellent parents for salt-tolerant breeding. Using the petri dish paper germination method, 332 oat germplasms were subjected to a salt stress treatment with 0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) NaCl solution. Eight indicators such as germination potential were measured. The salt tolerance was comprehensively evaluated and classified by combining the weighted membership function method with cluster analysis. Salt stress significantly inhibited all eight measured indicators. Correlation analysis revealed that highly significant positive correlations among these indicators. The 332 germplasms were classified into five salt tolerance grades: 34 highly salt-tolerant, 83 salt-tolerant, 116 moderately salt-tolerant, 51 salt-sensitive, and 48 highly salt-sensitive accessions. Regression analysis identified the salt tolerance index of root length (STI-RL) and the salt tolerance index of bud fresh weight (STI-BFW) as key indicators

收稿日期:2025-06-03;修回日期:2025-08-09

基金项目:国家重点研发计划(2023YFD1202703);财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-07-A);国家自然科学基金(32572378);山西省重点研发计划项目(2022ZDYF110);山西省后稷实验室自主立项课题(202304010930003-11)资助

作者简介:陈佳敏(1999-),女,汉族,山西吕梁人,硕士研究生,主要从事作物遗传育种研究,E-mail:19834542925@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:llong781211@sina.com;jiajuqing@126.com

for evaluating salt tolerance during germination. Based on two-year evaluations, six materials demonstrated stable salt tolerance and can be utilized as parents in salt-tolerant breeding programs. Comparative analysis indicated that a higher proportion of *Avena sativa* L. accessions exhibited stronger salt tolerance compared to *Avena nuda* L. accessions. The 34 highly salt-tolerant germplasms provided excellent resources for salt-tolerant breeding and gene mining.

Key words: Oats; Germination stage; Weighted membership function analysis; Salt tolerance index

地下水或含盐地层中的钠离子、氯离子等可溶性盐类,通过毛管水上升到地表,水分蒸发后在耕作层形成盐分富集的过程称之为“土壤盐渍化”。据FAO统计,全球土壤盐渍化面积达9.54亿 hm^2 ,我国土壤盐渍化总面积为0.99亿 hm^2 ,主要集中在东北、西北、华北等内陆地区^[1]。据估计,全球15%~20%的耕地面积和20%~50%的灌溉面积受到盐渍化的影响^[2]。土壤中累积的大量盐分会抑制有机质的积累,导致土壤肥力降低、结构板结、孔隙度变小,进而削弱其透水透气性,限制微生物活动,最终影响土壤质量^[3]。同时高盐环境导致土壤中 Na^+ 和 Mg^{2+} 浓度升高,使根系吸水困难,造成植物体内缺水,导致植物细胞结构受损,光合能力减弱,叶绿素含量降低,影响植物生长发育^[4]。全球超过10%的种植区受到不同程度的盐渍化影响,植物生长受到限制,产量和生产力下降^[5]。近年来,针对盐渍地的治理和利用,主要形成了“以地适种”和“以种适地”两类措施。“以地适种”是利用物理改良、化学改良、生物改良、综合改良等措施来降低土壤含盐量以适应植物生长,但该措施投入成本高,改良时间长,且需要后期维护。而“以种适地”是通过筛选耐盐植物种质或利用育种等手段培育耐盐植物来适应土壤盐渍化环境,被视为当前更经济有效的治理方案之一。

燕麦(*Avena sativa* L.)为禾本科燕麦属一年生草本植物,兼具粮用与饲用双重价值^[6]。其茎叶营养丰富,适口性好,广泛用于青饲、青贮或调制干草,是缓解冬季饲草短缺的关键作物^[7]。与小麦(*Triticum aestivum* L.)、大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)、棉花(*Gossypium hirsutum* L.)等作物相比,燕麦茎叶中 Na^+ 含量高,适应盐渍地能力强^[5-8],对盐分吸收的特性也有利于降低土壤中盐分的含量。因此,燕麦被认为是适应盐渍地种植及改良盐渍地的重要作物^[9]。但研究发现,高盐浓度会抑制幼苗的生长,使种子发芽延迟、发芽率下降、根长和胚芽长度降低^[10],因此筛选出耐盐性强的燕麦种质资源对培育高耐盐品种和提高土壤质量具有重要意义。

近年来,国内外在小麦^[11-12]、水稻(*Oryza sativa* L.)^[13]、高粱(*Sorghum bicolor* L.)^[14]、玉米(*Zea mays* L.)^[15]、大豆^[16]等作物种质资源耐盐性鉴定及耐盐种质筛选方面已开展了广泛的研究,并取得大量成果。在燕麦种质资源耐盐性评价及筛选方面,前人已对燕麦的萌发期^[17]和苗期^[18]进行了相关鉴定研究,并对少量燕麦种质进行耐盐性分析^[9-19],这些研究为燕麦萌发期耐盐性鉴定提供了重要的方法指导。然而,尽管已有诸多研究对燕麦种质耐盐性进行鉴定,但目前的研究多集中于单一的皮燕麦^[17]或裸燕麦^[20],对二者同时进行耐盐性鉴定的研究相对较少。此外,不同研究者构建的耐盐性鉴定评价体系存在较大差异。部分研究以相对电导率、丙二醛含量、脯氨酸含量等生理指标作为鉴定依据,通过这些指标间接评估燕麦的耐盐能力^[21];其他研究则侧重于株高、根长、鲜重和干重等生长指标,以直观地反映燕麦在盐胁迫下的生长状况^[22];还有部分研究者将生理指标和生长指标相结合,以期更全面地评价燕麦的耐盐性^[23]。

关于燕麦的耐盐性鉴定与筛选虽已有多项研究,但目前尚未形成一个公认且有效的耐盐筛选指标体系,且试验材料数量有限,因此需要在加大试验群体的基础上进一步筛选指标体系和挖掘耐盐燕麦种质。本研究以332份燕麦种质资源为试验材料,对不同基因型燕麦种质进行盐胁迫处理,通过主成分分析、加权隶属函数分析、聚类分析和逐步回归分析方法,建立更加系统的燕麦耐盐评价体系,为燕麦种质萌发期的耐盐性提供了可靠的筛选指标,并为培育具有优质耐盐性的品种提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

332份供试燕麦材料由山西农业大学农学院分子生物学实验室提供,其中裸燕麦81份,皮燕麦251份,均为2023年收获的种子(表1)。

表 1 332 份燕麦种质资源名称、主成分值、隶属函数值、*D* 值及排名

Table 1 Names of 332 oat germplasm and their principal component value, membership function value, *D* value and comprehensive ranking

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值 Principal component value		隶属函数值 Membership function value		<i>D</i> 值 <i>D</i> -value	排名 Ranking
			F1	F2	u1	u2		
1	定莪 2 号	裸 Naked oat	−0.90	−3.11	0.26	0.11	0.23	295
2	改良裸	裸 Naked oat	−1.10	−0.90	0.23	0.32	0.25	293
3	晋 8216-1-16	裸 Naked oat	−1.26	−0.66	0.20	0.34	0.23	297
4	晋 83117-6-1-1	裸 Naked oat	0.32	0.06	0.48	0.41	0.47	127
5	晋 8609-1	裸 Naked oat	−1.96	−0.25	0.08	0.38	0.14	325
6	晋燕三号	裸 Naked oat	−1.27	−1.10	0.20	0.30	0.22	301
7	CN 3451	裸 Naked oat	−0.05	−2.30	0.42	0.19	0.37	219
8	PI605617	裸 Naked oat	−0.40	−2.07	0.35	0.21	0.32	246
9	2011621019	裸 Naked oat	−0.66	0.01	0.31	0.41	0.33	245
10	2011621054	裸 Naked oat	−2.38	−0.70	0.00	0.34	0.07	331
11	2011621134	裸 Naked oat	−0.95	−0.64	0.26	0.35	0.27	279
12	2011621162	裸 Naked oat	−1.53	−0.14	0.15	0.39	0.20	308
13	2011621176	裸 Naked oat	−1.69	−0.08	0.12	0.40	0.18	314
14	2011621188	裸 Naked oat	−0.64	−4.27	0.31	0.00	0.25	289
15	2012621300	裸 Naked oat	−1.42	−0.04	0.17	0.40	0.22	302
16	2012621346	裸 Naked oat	−1.63	0.96	0.13	0.50	0.20	307
17	坝选三号	裸 Naked oat	−0.80	−0.92	0.28	0.32	0.29	267
18	大燕麦	裸 Naked oat	−1.66	−1.93	0.13	0.22	0.15	323
19	定莪 1 号	裸 Naked oat	0.05	−1.73	0.43	0.24	0.40	198
20	红秆莪麦	裸 Naked oat	−2.00	−0.14	0.07	0.39	0.13	326
21	晋 8717-1	裸 Naked oat	−0.72	−2.21	0.30	0.20	0.28	277
22	蒙燕 7716	裸 Naked oat	−2.11	−3.25	0.05	0.10	0.06	332
23	蒙燕 8201	裸 Naked oat	−1.44	−3.52	0.17	0.07	0.15	322
24	宁莪 1 号	裸 Naked oat	−1.43	−2.89	0.17	0.13	0.16	317
25	品 1617	裸 Naked oat	−1.60	0.31	0.14	0.44	0.20	309
26	品 2	裸 Naked oat	−1.33	0.31	0.19	0.44	0.24	294
27	品 7752-8-2	裸 Naked oat	−1.01	−1.55	0.24	0.26	0.25	291
28	品燕 1 号	裸 Naked oat	−0.51	−2.49	0.33	0.17	0.30	257
29	品燕 2 号	裸 Naked oat	−0.18	−0.15	0.39	0.39	0.39	202
30	平 008 号莪麦	裸 Naked oat	−2.18	0.42	0.04	0.45	0.12	329
31	尚义莪麦	裸 Naked oat	−0.87	−0.95	0.27	0.32	0.28	275
32	水晶 22	裸 Naked oat	−0.75	−1.83	0.29	0.23	0.28	274
33	原 123	裸 Naked oat	−1.53	−0.37	0.15	0.37	0.19	310
34	白燕 3 号	裸 Naked oat	−0.97	−0.56	0.25	0.35	0.27	282
35	白燕 5 号	裸 Naked oat	−0.22	−0.29	0.38	0.38	0.38	209
36	坝莪 1 号	裸 Naked oat	−0.62	−0.81	0.31	0.33	0.32	250
37	坝莪 8 号	裸 Naked oat	0.65	−0.87	0.54	0.32	0.50	97
38	坝莪 18 号	裸 Naked oat	−0.16	−1.91	0.40	0.22	0.36	226
39	晋燕 8 号	裸 Naked oat	−0.13	−2.00	0.40	0.22	0.36	221
40	晋燕 12 号	裸 Naked oat	−0.45	−2.09	0.34	0.21	0.32	249
41	晋燕 13 号	裸 Naked oat	0.30	−0.04	0.48	0.40	0.46	134
42	晋燕 17 号	裸 Naked oat	−1.46	−1.28	0.16	0.28	0.19	312
43	晋燕 18 号	裸 Naked oat	−0.82	−0.98	0.28	0.31	0.28	272
44	燕科 1 号	裸 Naked oat	−0.40	−1.41	0.35	0.27	0.34	238
45	ZY001524	裸 Naked oat	−1.73	−0.70	0.12	0.34	0.16	318
46	ZY001628	裸 Naked oat	−1.78	−0.53	0.11	0.36	0.16	320
47	ZY000552	裸 Naked oat	−0.65	−0.16	0.31	0.39	0.32	247
48	ZY000561	裸 Naked oat	−0.96	0.18	0.25	0.42	0.29	271

续表 1

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值 Principal component value		隶属函数值 Membership function value		D 值 D-value	排名 Ranking
			F1	F2	u1	u2		
49	ZY000621	裸 Naked oat	-0.80	-0.39	0.28	0.37	0.30	259
50	ZY000625	裸 Naked oat	-1.97	-0.60	0.07	0.35	0.13	327
51	ZY000639	裸 Naked oat	0.10	-1.42	0.44	0.27	0.41	185
52	ZY000652	裸 Naked oat	-1.46	0.79	0.16	0.48	0.23	299
53	ZY000657	裸 Naked oat	0.00	-1.75	0.42	0.24	0.39	207
54	ZY000660	裸 Naked oat	1.13	-1.35	0.62	0.28	0.56	51
55	ZY000670	裸 Naked oat	0.61	-0.40	0.53	0.37	0.50	96
56	ZY000671	裸 Naked oat	-0.07	0.62	0.41	0.47	0.42	175
57	ZY000674	裸 Naked oat	0.56	-0.57	0.52	0.35	0.49	105
58	ZY000675	裸 Naked oat	-0.95	0.14	0.26	0.42	0.29	270
59	ZY000682	裸 Naked oat	-0.39	0.58	0.35	0.46	0.38	212
60	ZY000691	裸 Naked oat	0.11	-0.60	0.44	0.35	0.42	173
61	ZY000695	裸 Naked oat	0.22	-0.28	0.46	0.38	0.45	153
62	ZY000697	裸 Naked oat	-0.29	-0.79	0.37	0.33	0.36	222
63	ZY000630	裸 Naked oat	-1.92	0.45	0.08	0.45	0.15	321
64	ZY000701	裸 Naked oat	-0.71	0.23	0.30	0.43	0.32	248
65	ZY000702	裸 Naked oat	-1.23	0.20	0.21	0.42	0.25	290
66	ZY000703	裸 Naked oat	-1.33	-0.38	0.19	0.37	0.22	300
67	BY2	裸 Naked oat	-0.37	0.36	0.36	0.44	0.37	216
68	BY3	裸 Naked oat	0.58	-0.81	0.53	0.33	0.49	106
69	BY4	裸 Naked oat	-0.40	-0.22	0.35	0.39	0.36	231
70	BY6	裸 Naked oat	0.96	0.11	0.60	0.42	0.56	50
71	BY13	裸 Naked oat	-0.08	0.41	0.41	0.45	0.42	179
72	BY21	裸 Naked oat	0.12	-0.18	0.45	0.39	0.43	164
73	2011621192	裸 Naked oat	0.55	-2.27	0.52	0.19	0.46	139
74	Jan-06	裸 Naked oat	-0.73	-1.51	0.29	0.26	0.29	269
75	ot, 195	裸 Naked oat	-0.90	-0.11	0.26	0.40	0.29	266
76	白燕 11	裸 Naked oat	-0.29	-0.34	0.37	0.37	0.37	217
77	和丰一号	裸 Naked oat	-0.41	-1.26	0.35	0.29	0.34	237
78	晋 83117-1-1-1	裸 Naked oat	-0.59	-0.46	0.32	0.36	0.33	243
79	BY209	裸 Naked oat	-0.64	-1.85	0.31	0.23	0.29	263
80	BY221	裸 Naked oat	-0.58	0.41	0.32	0.44	0.34	234
81	白燕 2 号	裸 Naked oat	0.80	-1.76	0.57	0.24	0.50	91
82	Clav1245	皮 Hulled oat	0.28	0.68	0.47	0.47	0.47	119
83	Clav1679	皮 Hulled oat	-0.19	1.25	0.39	0.52	0.42	180
84	Clav1681	皮 Hulled oat	0.18	0.96	0.46	0.50	0.46	132
85	Clav1777	皮 Hulled oat	-0.55	0.97	0.33	0.50	0.36	227
86	Clav1778	皮 Hulled oat	-0.67	0.39	0.30	0.44	0.33	241
87	Clav1779	皮 Hulled oat	-1.65	-2.24	0.13	0.19	0.14	324
88	Clav2532	皮 Hulled oat	-1.78	0.70	0.11	0.47	0.18	313
89	Clav2879	皮 Hulled oat	-1.92	1.08	0.08	0.51	0.17	316
90	Clav3486	皮 Hulled oat	-1.02	1.16	0.24	0.52	0.30	261
91	Clav3531	皮 Hulled oat	-0.17	0.63	0.39	0.47	0.41	187
92	CIav357	皮 Hulled oat	-1.55	0.85	0.15	0.49	0.22	304
93	CIav362	皮 Hulled oat	0.67	-0.19	0.54	0.39	0.51	84
94	Clav3835	皮 Hulled oat	-0.37	1.01	0.36	0.50	0.39	208
95	Clav4106	皮 Hulled oat	-1.90	0.40	0.09	0.44	0.16	319
96	Clav4252	皮 Hulled oat	-1.71	0.00	0.12	0.41	0.18	315
97	CIav459	皮 Hulled oat	-1.58	0.71	0.14	0.47	0.21	305
98	Clav4996	皮 Hulled oat	-1.38	0.36	0.18	0.44	0.23	296

续表 1

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值 Principal component value		隶属函数值 Membership function value		<i>D</i> 值 <i>D</i> -value	排名 Ranking
			F1	F2	u1	u2		
99	CIav5085	皮 Hulled oat	−0.96	0.60	0.25	0.46	0.29	262
100	CIav5087	皮 Hulled oat	−0.90	0.51	0.26	0.45	0.30	256
101	CIav511	皮 Hulled oat	0.04	−0.53	0.43	0.36	0.42	181
102	CIav5415	皮 Hulled oat	−1.26	0.28	0.20	0.43	0.25	292
103	CIav5640	皮 Hulled oat	−0.10	0.32	0.41	0.44	0.41	184
104	CIav5650	皮 Hulled oat	0.22	0.19	0.46	0.42	0.46	141
105	CIav5651	皮 Hulled oat	−0.86	0.76	0.27	0.48	0.31	254
106	CIav5662	皮 Hulled oat	−1.03	0.97	0.24	0.50	0.29	264
107	CIav5839	皮 Hulled oat	0.03	−0.47	0.43	0.36	0.42	182
108	CIav6200	皮 Hulled oat	−1.95	−1.03	0.08	0.31	0.12	328
109	CIav6209	皮 Hulled oat	−2.36	0.23	0.00	0.43	0.09	330
110	CIav6390	皮 Hulled oat	−1.02	0.28	0.24	0.43	0.28	273
111	CIav653	皮 Hulled oat	−0.61	1.06	0.31	0.51	0.35	233
112	CIav7800	皮 Hulled oat	−1.16	0.12	0.22	0.42	0.25	285
113	CIav8113	皮 Hulled oat	−1.19	0.83	0.21	0.48	0.27	284
114	CIav9323	皮 Hulled oat	−1.51	0.63	0.16	0.47	0.22	303
115	CIav9389	皮 Hulled oat	−1.71	0.62	0.12	0.46	0.19	311
116	PI184026	皮 Hulled oat	−0.92	0.87	0.26	0.49	0.31	255
117	PI184033	皮 Hulled oat	−1.30	0.77	0.19	0.48	0.25	288
118	PI258616	皮 Hulled oat	0.21	−0.78	0.46	0.33	0.44	162
119	PI266272	皮 Hulled oat	−0.50	0.63	0.33	0.47	0.36	229
120	PI273868	皮 Hulled oat	0.08	0.66	0.44	0.47	0.44	155
121	PI286414	皮 Hulled oat	−1.38	0.20	0.18	0.43	0.23	298
122	PI374408	皮 Hulled oat	−0.67	0.79	0.31	0.48	0.34	236
123	PI476854	皮 Hulled oat	−0.93	0.67	0.26	0.47	0.30	258
124	PI546037	皮 Hulled oat	−1.08	0.52	0.23	0.46	0.28	278
125	PI573724	皮 Hulled oat	−0.03	−0.03	0.42	0.40	0.42	183
126	PI584783	皮 Hulled oat	−0.48	0.69	0.34	0.47	0.36	223
127	PI584830	皮 Hulled oat	−1.08	0.59	0.23	0.46	0.28	276
128	PI605613	皮 Hulled oat	−1.40	1.60	0.17	0.56	0.25	287
129	001 大燕麦	皮 Hulled oat	−0.96	0.27	0.25	0.43	0.29	268
130	003 黄大燕麦	皮 Hulled oat	−0.70	0.68	0.30	0.47	0.33	240
131	006 大燕麦	皮 Hulled oat	−0.42	0.68	0.35	0.47	0.37	215
132	02 野燕麦	皮 Hulled oat	−0.22	0.69	0.39	0.47	0.40	193
133	2011621044	皮 Hulled oat	−0.11	1.02	0.40	0.50	0.42	174
134	2011621045	皮 Hulled oat	0.38	0.68	0.49	0.47	0.49	107
135	2011621104	皮 Hulled oat	−0.70	0.81	0.30	0.48	0.34	239
136	2011621109	皮 Hulled oat	1.52	0.31	0.70	0.44	0.64	20
137	2012621365	皮 Hulled oat	1.63	−0.15	0.71	0.39	0.65	15
138	8 燕麦	皮 Hulled oat	−0.17	0.61	0.39	0.46	0.41	188
139	Bullet	皮 Hulled oat	−1.16	0.98	0.22	0.50	0.27	281
140	Nicolas	皮 Hulled oat	−0.19	−0.14	0.39	0.39	0.39	205
141	OA1576-4	皮 Hulled oat	−1.87	6.25	0.09	1.00	0.27	283
142	p+w 燕麦	皮 Hulled oat	−0.02	−0.90	0.42	0.32	0.40	194
143	Richmond	皮 Hulled oat	0.48	−1.12	0.51	0.30	0.47	125
144	Torrent	皮 Hulled oat	0.43	−0.47	0.50	0.36	0.47	121
145	日本燕麦	皮 Hulled oat	0.06	−2.94	0.44	0.13	0.37	214
146	白燕 1 号	皮 Hulled oat	−0.47	−0.04	0.34	0.40	0.35	232
147	白燕 6 号	皮 Hulled oat	0.81	−0.36	0.57	0.37	0.53	74
148	白燕 7 号	皮 Hulled oat	0.63	−0.70	0.54	0.34	0.50	98

续表 1

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值 Principal component value		隶属函数值 Membership function value		<i>D</i> 值 <i>D</i> -value	排名 Ranking
			F1	F2	u1	u2		
149	冀张燕 1 号	皮 Hulled oat	-0.67	0.12	0.31	0.42	0.33	244
150	冀张燕 2 号	皮 Hulled oat	-0.17	-0.14	0.39	0.39	0.39	201
151	冀张燕 3 号	皮 Hulled oat	0.74	-0.97	0.56	0.31	0.51	87
152	蒙燕 1 号	皮 Hulled oat	1.18	-0.39	0.63	0.37	0.58	37
153	陇燕 2 号	皮 Hulled oat	1.72	-0.60	0.73	0.35	0.66	13
154	OA1576-4	皮 Hulled oat	2.72	2.16	0.91	0.61	0.85	3
155	ZY000950	皮 Hulled oat	-0.27	0.09	0.38	0.41	0.38	210
156	ZY001476	皮 Hulled oat	0.89	0.37	0.58	0.44	0.56	53
157	ZY001728	皮 Hulled oat	-0.46	0.33	0.34	0.44	0.36	230
158	ZY002498	皮 Hulled oat	-0.18	0.41	0.39	0.44	0.40	191
159	ZY000555	皮 Hulled oat	0.30	-0.92	0.48	0.32	0.45	154
160	ZY000699	皮 Hulled oat	-0.98	0.48	0.25	0.45	0.29	265
161	ZY000704	皮 Hulled oat	0.91	-1.35	0.59	0.28	0.53	76
162	BY9	皮 Hulled oat	1.27	0.06	0.65	0.41	0.60	31
163	BY10	皮 Hulled oat	0.88	0.40	0.58	0.44	0.55	54
164	BY11	皮 Hulled oat	0.26	0.35	0.47	0.44	0.46	131
165	BY12	皮 Hulled oat	0.69	0.58	0.55	0.46	0.53	73
166	BY15	皮 Hulled oat	-0.59	1.27	0.32	0.53	0.36	228
167	BY16	皮 Hulled oat	-0.25	0.65	0.38	0.47	0.40	197
168	BY17	皮 Hulled oat	0.33	0.56	0.48	0.46	0.48	116
169	BY18	皮 Hulled oat	0.19	0.37	0.46	0.44	0.45	142
170	BY20	皮 Hulled oat	-0.20	0.54	0.39	0.46	0.40	192
171	BY22	皮 Hulled oat	-0.05	0.81	0.42	0.48	0.43	169
172	BY23	皮 Hulled oat	0.10	0.84	0.44	0.49	0.45	146
173	BY27	皮 Hulled oat	0.87	0.36	0.58	0.44	0.55	58
174	BY32	皮 Hulled oat	1.24	-0.26	0.64	0.38	0.59	33
175	BY33	皮 Hulled oat	1.10	0.78	0.62	0.48	0.59	32
176	BY36	皮 Hulled oat	-0.33	0.98	0.37	0.50	0.39	203
177	BY37	皮 Hulled oat	0.28	0.42	0.47	0.45	0.47	126
178	BY43	皮 Hulled oat	1.36	0.90	0.67	0.49	0.63	23
179	BY44	皮 Hulled oat	1.01	0.71	0.60	0.47	0.58	38
180	BY47	皮 Hulled oat	1.61	0.72	0.71	0.47	0.66	11
181	BY49	皮 Hulled oat	0.64	1.71	0.54	0.57	0.54	62
182	BY50	皮 Hulled oat	0.77	0.87	0.56	0.49	0.55	61
183	BY51	皮 Hulled oat	0.91	0.27	0.59	0.43	0.56	52
184	BY52	皮 Hulled oat	-0.37	1.23	0.36	0.52	0.39	204
185	BY54	皮 Hulled oat	0.95	0.69	0.59	0.47	0.57	44
186	BY55	皮 Hulled oat	1.67	0.80	0.72	0.48	0.67	10
187	BY56	皮 Hulled oat	0.66	0.44	0.54	0.45	0.52	77
188	BY59	皮 Hulled oat	-0.30	0.96	0.37	0.50	0.39	199
189	BY60	皮 Hulled oat	0.90	0.92	0.58	0.49	0.57	47
190	BY61	皮 Hulled oat	0.65	0.43	0.54	0.45	0.52	78
191	BY62	皮 Hulled oat	0.69	-1.35	0.55	0.28	0.49	102
192	BY63	皮 Hulled oat	0.35	0.48	0.49	0.45	0.48	115
193	BY65	皮 Hulled oat	0.32	0.31	0.48	0.44	0.47	123
194	BY66	皮 Hulled oat	0.06	0.53	0.44	0.46	0.44	159
195	BY67	皮 Hulled oat	0.96	0.60	0.59	0.46	0.57	45
196	BY68	皮 Hulled oat	0.72	0.11	0.55	0.42	0.53	75
197	BY70	皮 Hulled oat	1.69	0.00	0.72	0.41	0.66	12
198	BY72	皮 Hulled oat	1.03	0.32	0.61	0.44	0.57	41

续表 1

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值 Principal component value		隶属函数值 Membership function value		<i>D</i> 值 <i>D</i> -value	排名 Ranking
			F1	F2	u1	u2		
199	BY73	皮 Hulled oat	0.42	0.17	0.50	0.42	0.48	111
200	BY75	皮 Hulled oat	0.84	0.42	0.57	0.45	0.55	60
201	BY76	皮 Hulled oat	0.37	0.47	0.49	0.45	0.48	113
202	BY77	皮 Hulled oat	0.84	0.65	0.57	0.47	0.55	56
203	BY79	皮 Hulled oat	0.79	−2.73	0.56	0.15	0.48	114
204	BY82	皮 Hulled oat	0.33	0.80	0.48	0.48	0.48	112
205	BY83	皮 Hulled oat	0.95	0.58	0.59	0.46	0.57	46
206	BY85	皮 Hulled oat	0.42	0.85	0.50	0.49	0.50	99
207	BY87	皮 Hulled oat	1.55	0.47	0.70	0.45	0.65	16
208	BY89	皮 Hulled oat	2.40	−0.03	0.85	0.40	0.76	5
209	BY92	皮 Hulled oat	0.81	0.86	0.57	0.49	0.55	55
210	BY93	皮 Hulled oat	0.03	0.82	0.43	0.48	0.44	157
211	BY94	皮 Hulled oat	−0.34	0.87	0.36	0.49	0.39	206
212	BY96	皮 Hulled oat	−0.38	0.17	0.36	0.42	0.37	220
213	BY99	皮 Hulled oat	1.05	0.16	0.61	0.42	0.57	42
214	BY101	皮 Hulled oat	1.39	0.40	0.67	0.44	0.63	27
215	BY102	皮 Hulled oat	0.73	0.41	0.55	0.44	0.53	71
216	BY103	皮 Hulled oat	1.26	0.54	0.65	0.46	0.61	28
217	BY104	皮 Hulled oat	1.22	−1.04	0.64	0.31	0.58	39
218	BY106	皮 Hulled oat	0.62	0.43	0.54	0.45	0.52	81
219	BY107	皮 Hulled oat	1.57	−0.02	0.70	0.40	0.64	19
220	BY108	皮 Hulled oat	0.95	0.33	0.59	0.44	0.56	49
221	BY110	皮 Hulled oat	0.17	0.19	0.45	0.42	0.45	150
222	BY113	皮 Hulled oat	1.07	0.58	0.62	0.46	0.58	36
223	BY114	皮 Hulled oat	3.24	−0.86	1.00	0.32	0.87	1
224	BY115	皮 Hulled oat	0.56	0.01	0.52	0.41	0.50	94
225	BY117	皮 Hulled oat	1.04	0.29	0.61	0.43	0.57	40
226	BY119	皮 Hulled oat	2.30	−1.06	0.83	0.31	0.73	6
227	BY120	皮 Hulled oat	0.88	−0.42	0.58	0.37	0.54	66
228	BY121	皮 Hulled oat	−0.55	3.07	0.33	0.70	0.40	196
229	BY122	皮 Hulled oat	0.12	0.83	0.45	0.48	0.45	143
230	BY123	皮 Hulled oat	−0.01	0.70	0.42	0.47	0.43	165
231	BY124	皮 Hulled oat	0.73	0.30	0.55	0.43	0.53	72
232	BY125	皮 Hulled oat	0.27	0.83	0.47	0.49	0.47	118
233	BY126	皮 Hulled oat	0.16	0.76	0.45	0.48	0.46	136
234	BY128	皮 Hulled oat	0.24	0.53	0.47	0.46	0.46	130
235	BY129	皮 Hulled oat	0.46	0.40	0.51	0.44	0.49	101
236	BY130	皮 Hulled oat	−0.30	0.88	0.37	0.49	0.39	200
237	BY135	皮 Hulled oat	1.87	−0.54	0.76	0.36	0.68	9
238	BY136	皮 Hulled oat	0.12	1.05	0.45	0.51	0.46	137
239	BY137	皮 Hulled oat	1.73	−1.05	0.73	0.31	0.65	17
240	BY138	皮 Hulled oat	2.05	0.50	0.79	0.45	0.72	7
241	BY141	皮 Hulled oat	0.04	0.11	0.43	0.42	0.43	170
242	BY142	皮 Hulled oat	0.63	0.35	0.54	0.44	0.52	82
243	BY143	皮 Hulled oat	1.63	−1.08	0.71	0.30	0.63	22
244	BY144	皮 Hulled oat	0.20	−1.52	0.46	0.26	0.42	177
245	BY147	皮 Hulled oat	0.06	0.26	0.44	0.43	0.43	163
246	BY154	皮 Hulled oat	2.80	−1.03	0.92	0.31	0.80	4
247	BY155	皮 Hulled oat	1.58	−0.95	0.71	0.32	0.63	25
248	BY156	皮 Hulled oat	1.74	−1.27	0.73	0.29	0.65	18

续表 1

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值		隶属函数值		<i>D</i> 值 <i>D</i> -value	排名 Ranking
			Principal component value		Membership function value			
			F1	F2	u1	u2		
249	BY158	皮 Hulled oat	3.22	−1.58	1.00	0.26	0.85	2
250	BY159	皮 Hulled oat	0.12	0.60	0.45	0.46	0.45	149
251	BY160	皮 Hulled oat	1.05	0.13	0.61	0.42	0.57	43
252	BY161	皮 Hulled oat	0.90	0.13	0.58	0.42	0.55	57
253	BY163	皮 Hulled oat	−0.30	−0.25	0.37	0.38	0.37	218
254	BY164	皮 Hulled oat	−0.76	0.31	0.29	0.44	0.32	251
255	BY165	皮 Hulled oat	0.81	0.17	0.57	0.42	0.54	67
256	BY166	皮 Hulled oat	1.56	−0.40	0.70	0.37	0.64	21
257	BY167	皮 Hulled oat	0.14	0.49	0.45	0.45	0.45	147
258	BY168	皮 Hulled oat	1.14	0.52	0.63	0.46	0.59	34
259	BY169	皮 Hulled oat	0.40	−0.71	0.50	0.34	0.47	129
260	BY170	皮 Hulled oat	0.07	−1.24	0.44	0.29	0.41	189
261	BY172	皮 Hulled oat	−0.04	−0.44	0.42	0.36	0.41	190
262	BY173	皮 Hulled oat	0.04	0.21	0.43	0.43	0.43	167
263	BY176	皮 Hulled oat	0.09	−0.43	0.44	0.36	0.43	172
264	BY177	皮 Hulled oat	−0.75	−0.05	0.29	0.40	0.31	253
265	BY179	皮 Hulled oat	−0.05	0.50	0.42	0.45	0.42	176
266	BY180	皮 Hulled oat	0.50	−0.32	0.51	0.38	0.49	109
267	BY182	皮 Hulled oat	0.51	−1.15	0.52	0.30	0.47	124
268	BY186	皮 Hulled oat	0.52	−0.45	0.52	0.36	0.49	108
269	BY187	皮 Hulled oat	0.29	−0.71	0.48	0.34	0.45	148
270	BY188	皮 Hulled oat	0.35	−0.21	0.49	0.39	0.47	128
271	BY193	皮 Hulled oat	−0.60	−0.25	0.32	0.38	0.33	242
272	BY194	皮 Hulled oat	−1.09	0.47	0.23	0.45	0.27	280
273	BY195	皮 Hulled oat	0.26	−0.56	0.47	0.35	0.45	152
274	BY197	皮 Hulled oat	0.49	0.22	0.51	0.43	0.49	100
275	BY200	皮 Hulled oat	−0.08	0.44	0.41	0.45	0.42	178
276	BY201	皮 Hulled oat	−0.22	1.08	0.38	0.51	0.41	186
277	BY202	皮 Hulled oat	0.58	0.19	0.53	0.42	0.51	88
278	BY203	皮 Hulled oat	0.23	0.57	0.46	0.46	0.46	133
279	BY207	皮 Hulled oat	0.86	−0.22	0.58	0.39	0.54	65
280	BY208	皮 Hulled oat	0.52	−0.08	0.52	0.40	0.49	103
281	BY211	皮 Hulled oat	−0.48	0.57	0.34	0.46	0.36	225
282	BY214	皮 Hulled oat	0.65	−0.16	0.54	0.39	0.51	86
283	BY215	皮 Hulled oat	0.37	0.20	0.49	0.43	0.48	117
284	BY216	皮 Hulled oat	0.94	−0.75	0.59	0.34	0.54	63
285	BY217	皮 Hulled oat	0.08	−0.04	0.44	0.40	0.43	166
286	BY218	皮 Hulled oat	0.42	0.28	0.50	0.43	0.49	110
287	BY219	皮 Hulled oat	−0.18	0.28	0.39	0.43	0.40	195
288	BY223	皮 Hulled oat	0.56	0.10	0.52	0.42	0.50	92
289	BY224	皮 Hulled oat	−0.27	−1.02	0.38	0.31	0.36	224
290	BY226	皮 Hulled oat	−1.33	−1.31	0.19	0.28	0.21	306
291	BY227	皮 Hulled oat	−0.44	−0.78	0.35	0.33	0.34	235
292	BY228	皮 Hulled oat	1.02	−0.02	0.60	0.40	0.57	48
293	BY229	皮 Hulled oat	0.09	0.40	0.44	0.44	0.44	158
294	BY231	皮 Hulled oat	0.84	0.52	0.57	0.46	0.55	59
295	BY233	皮 Hulled oat	−0.36	0.71	0.36	0.47	0.38	211
296	BY236	皮 Hulled oat	0.03	0.10	0.43	0.42	0.43	171
297	BY238	皮 Hulled oat	0.81	−0.01	0.57	0.41	0.54	68
298	BY241	皮 Hulled oat	1.26	0.26	0.65	0.43	0.61	30

续表 1

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	分类 Classify	主成分值 Principal component value		隶属函数值 Membership function value		D 值 D-value	排名 Ranking
			F1	F2	u1	u2		
299	BY243	皮 Hulled oat	0.22	0.48	0.46	0.45	0.46	135
300	BY244	皮 Hulled oat	0.75	0.71	0.56	0.47	0.54	64
301	BY246	皮 Hulled oat	−0.09	1.17	0.41	0.52	0.43	168
302	BY247	皮 Hulled oat	0.49	0.78	0.51	0.48	0.51	89
303	BY248	皮 Hulled oat	0.71	0.65	0.55	0.47	0.53	69
304	BY230	皮 Hulled oat	−0.84	0.74	0.27	0.48	0.31	252
305	BY251	皮 Hulled oat	−0.85	−0.08	0.27	0.40	0.30	260
306	BY259	皮 Hulled oat	0.11	0.61	0.44	0.46	0.45	151
307	BY260	皮 Hulled oat	0.21	0.34	0.46	0.44	0.46	140
308	BY261	皮 Hulled oat	0.71	−0.41	0.55	0.37	0.51	83
309	BY262	皮 Hulled oat	0.20	0.40	0.46	0.44	0.46	138
310	BY263	皮 Hulled oat	1.43	0.14	0.68	0.42	0.63	26
311	BY264	皮 Hulled oat	0.42	0.63	0.50	0.47	0.49	104
312	BY265	皮 Hulled oat	0.60	0.70	0.53	0.47	0.52	80
313	BY266	皮 Hulled oat	1.29	0.23	0.65	0.43	0.61	29
314	BY267	皮 Hulled oat	0.06	0.76	0.44	0.48	0.44	156
315	BY268	皮 Hulled oat	1.87	0.21	0.76	0.43	0.69	8
316	BY269	皮 Hulled oat	−1.38	1.70	0.18	0.57	0.25	286
317	BY270	皮 Hulled oat	0.38	−0.13	0.49	0.39	0.47	122
318	BY272	皮 Hulled oat	1.43	0.26	0.68	0.43	0.63	24
319	BY273	皮 Hulled oat	0.06	0.52	0.43	0.46	0.44	161
320	BY275	皮 Hulled oat	0.72	−0.66	0.55	0.34	0.51	85
321	BY276	皮 Hulled oat	0.48	0.58	0.51	0.46	0.50	95
322	BY277	皮 Hulled oat	0.62	0.55	0.54	0.46	0.52	79
323	BY281	皮 Hulled oat	0.28	0.70	0.47	0.47	0.47	120
324	BY282	皮 Hulled oat	0.15	0.51	0.45	0.45	0.45	144
325	BY285	皮 Hulled oat	0.48	0.78	0.51	0.48	0.50	90
326	BY286	皮 Hulled oat	0.08	0.38	0.44	0.44	0.44	160
327	BY288	皮 Hulled oat	0.17	0.35	0.45	0.44	0.45	145
328	BY289	皮 Hulled oat	0.44	0.92	0.50	0.49	0.50	93
329	BY295	皮 Hulled oat	0.71	0.52	0.55	0.46	0.53	70
330	BY297	皮 Hulled oat	1.10	0.38	0.62	0.44	0.58	35
331	BY298	皮 Hulled oat	−0.39	0.58	0.35	0.46	0.38	213
332	banner	皮 Hulled oat	1.69	−0.47	0.72	0.36	0.65	14

1.2 试验设计

1.2.1 最佳盐胁迫浓度筛选 为确定燕麦耐盐性评价的最佳筛选浓度,本试验从 332 份燕麦种质资源中随机选取 6 份材料,设置 0.40% (68.45 mmol·L^{−1}), 0.60% (102.67 mmol·L^{−1}), 0.80% (136.89 mmol·L^{−1}), 1.00% (171.12 mmol·L^{−1}) 的 NaCl 溶液浓度梯度,以蒸馏水为对照处理。选取籽粒饱满且大小一致的燕麦种子,依次选用 75.00% 的乙醇表面消毒 1 min, 2.00% 的 NaClO 深层灭菌 15 min 以及蒸馏水反复冲洗 5~6 次,置于灭菌滤纸上均匀摊开,自然晾干后备用。将直径 15 cm 含有双层滤纸的培养皿分成 3 等份,分别对应 3 份不同

种质,每份均匀摆放 20 粒燕麦种子,每份种质设处理组 and 对照组,各处理重复 3 次。用移液器将 NaCl 溶液和蒸馏水各 10 mL 加入处理组及对照组的培养皿中,再用灭菌镊子将已晾干的种子均匀放置于培养皿中,置于人工气候培养室内培养,相对湿度为 70.00%,光照/黑暗时间为 16 h/8 h,温度为 (24±2)°C/(22±2)°C。每日添加固定量的蒸馏水来补充水分损失,保证燕麦萌发所需要的水分。试验方法参照张静等^[22]的方法并略有改动。当芽长等于种子长度一半,根长等于种子长度时,认为种子已萌发^[24]。当盐损伤指数降至对照组的 50.00% 时,确定该浓度为 NaCl 的最佳胁迫浓度^[25]。

1.2.2 耐盐性燕麦种质筛选 将直径15 cm含有双层滤纸的培养皿分成3等份,分别对应3份不同种质,每份均匀摆放20粒燕麦种子。分别用10 mL的0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) NaCl溶液和蒸馏水(CK)处理,各处理重复3次,培养条件及测量指标同预备试验。

1.3 测试指标及指标计算方法

根据国家种子质量检验标准(GB/T 3543—1995),在种子萌发后第4天测定燕麦的发芽势(Germination potential, GP),第7天测定发芽率(Germination rate, GR),然后从每个处理中分别随机选取5株幼苗,用直尺测量最长芽长(Bud length, BL)和根长(Root length, RL),将选取的幼苗吸干表面水分后,以胚轴为切割点分成地上和地下两部分,用电子天平分别称量芽鲜重(Bud fresh weight, BFW)和根鲜重(Root fresh weight, RFW),用烘箱烘干至恒重后称量芽干重(Bud dry weight, BDW)和根干重(Root dry weight, RDW)。

发芽势: $G_p = G_4/T$;

发芽率: $G_r = G_7/T$ 。

式中: G_p 为发芽势, G_r 为发芽率, G_4 为第4天正常发芽的种子数, G_7 为第7天正常发芽种子数, T 为供试种子总数。

耐盐指数(Salt tolerance index, STI): $I_{ST} = P_T/P_{CK}$ 。

式中: I_{ST} 为耐盐指数, P_T 为处理组的表型测量值, P_{CK} 为对照组的表型测量值。

盐损伤指数(Salt injury index, SII): $I_{SI} = 1 - I_{ST}$ 。

式中: I_{SI} 为盐损伤指数, I_{ST} 为耐盐指数。

计算332份燕麦种质综合指标的隶属函数值。

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), \\ i = 1, 2, 3, \dots, n。$$

式中: X_i 为第 i 个综合指标的主成分值, $X_{\max}$ 、 $X_{\min}$ 分别为第 i 个主成分的最大值和最小值, $\mu(X_i)$ 为第 i 个综合指标的隶属函数值。

根据主成分百分比的大小,求各个综合指标的权重。

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, i = 1, 2, 3, \dots, n。$$

式中: W_i 为第 i 个综合指标的权重, P_i 为经主成分分析所得到的各燕麦种质第 i 个综合指标的方差

贡献率。

利用不同燕麦种质综合指标的隶属函数值及权重,计算燕麦种质耐盐性加权隶属函数值。

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W_i], i = 1, 2, 3, \dots, n。$$

式中: D 为加权隶属函数值, $\mu(X_i)$ 为第 i 个综合指标的隶属函数值, W_i 为第 i 个综合指标的权重。

1.4 回归模型建立

将332份燕麦种质按照2:1的比例随机分成回归组和检验组,回归组221份燕麦种质,以8项性状指标在0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) NaCl浓度下的耐盐指数为自变量,耐盐性加权隶属函数值(D 值)为因变量进行逐步线性回归分析。将得到的回归方程对检验组111份燕麦种质的耐盐性进行预测,确定回归方程的准确性。

1.5 数据分析

利用Microsoft Excel 2021对数据进行初步整理,后利用SPSS 26.0软件、R 4.4.2和Origin 2024对数据进行主成分分析、加权隶属函数分析、聚类分析、相关性分析和皮、裸燕麦分布分析。

2 结果与分析

2.1 最佳盐胁迫浓度筛选

通过测定6份燕麦种质的发芽势盐损伤指数(Salt injury index of germination potential, SII-GP),发芽率盐损伤指数(Salt injury index of germination rate, SII-GR),芽鲜重盐损伤指数(Salt injury index of bud fresh weight, SII-BFW),根鲜重盐损伤指数(Salt injury index of root fresh weight, SII-RFW),芽干重盐损伤指数(Salt injury index of bud dry weight, SII-BDW),根干重盐损伤指数(Salt injury index of root dry weight, SII-RDW),芽长盐损伤指数(Salt injury index of bud length, SII-BL)和根长盐损伤指数(Salt injury index of root length, SII-RL),发现当SII-GP降至对照组的50.00%时,NaCl浓度为0.79% (135.18 mmol·L⁻¹) (图1A);当SII-GR降至对照组的50.00%时,NaCl浓度为1.10% (188.23 mmol·L⁻¹) (图1B);此外,SII-BFW, SII-RFW, SII-BDW, SII-RDW, SII-BL和SII-RL降至对照组的50.00%时,对应的NaCl浓度分别为0.84% (143.74 mmol·L⁻¹), 0.79% (135.18 mmol·L⁻¹),

0.90% (154.00 mmol·L⁻¹), 0.92% (157.43 mmol·L⁻¹), 0.76% (130.05 mmol·L⁻¹), 0.68% (116.36 mmol·L⁻¹) (图1C, D, E, F, G, H)。8项指标的平均盐损伤指数降至对照组的50.00%时, 盐溶液浓度为0.84% (143.74 mmol·L⁻¹) (图1I)。因此, 选择0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) NaCl作为处理浓度, 同时0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) NaCl浓度下, 6份种质间

的GP和GR差异显著扩大, 晋8609-1和定莜2号的GR下降至60.00%以下, 改良裸、晋83117-6-1-1和晋燕三号的GR降至60.00%~80.00%, 在该浓度下, 6份燕麦种质材料的耐盐性表现出显著差异 ($P < 0.05$), 表明该浓度能有效区分不同基因型的耐盐能力 (图2)。基于此标准, 进一步对332份燕麦种质资源进行系统的耐盐性评价。

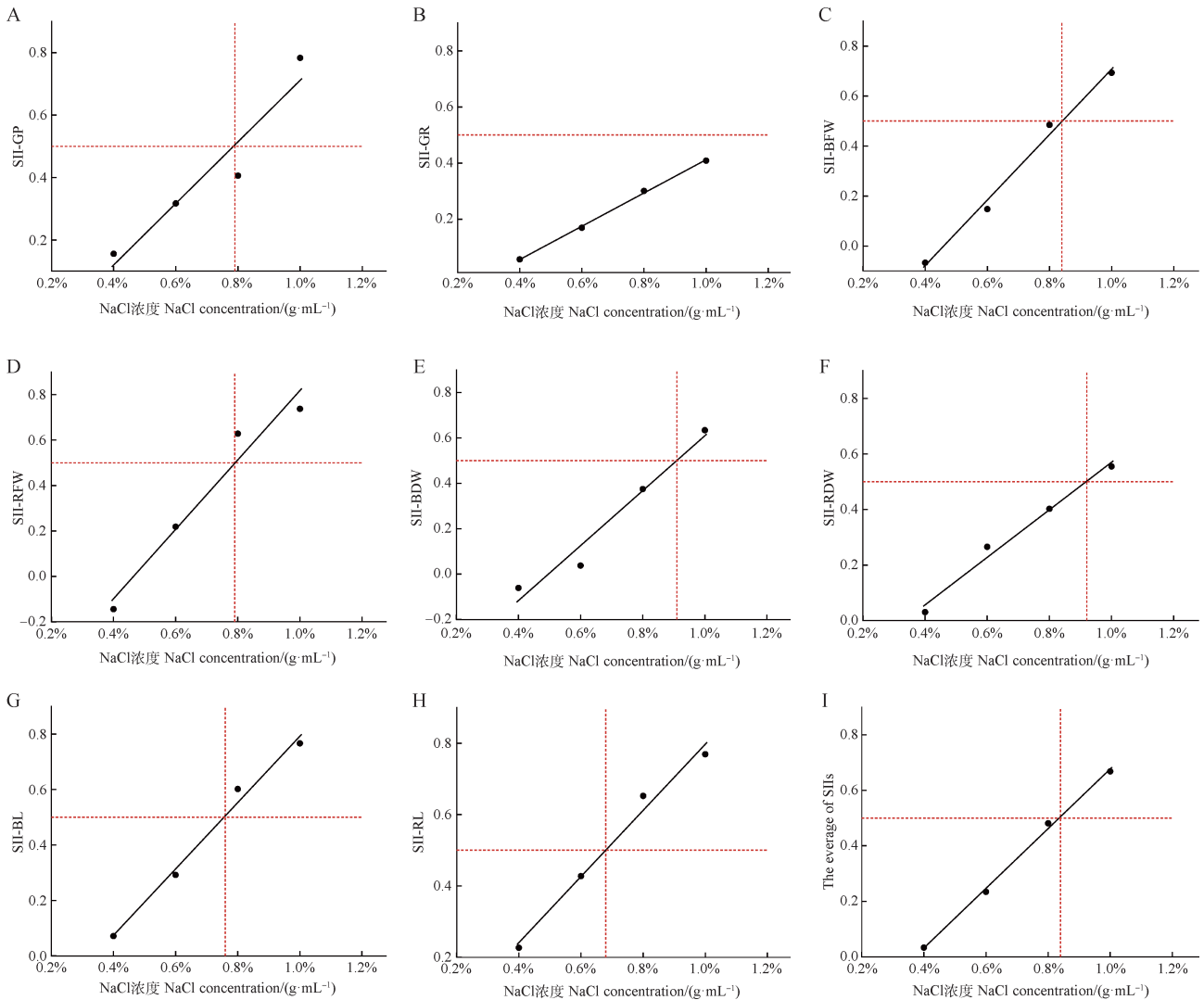


图1 耐盐性最佳NaCl浓度的筛选

Fig. 1 Screening of the optimal NaCl concentration for salt tolerance

注: (A) SII-GP, 发芽势盐损伤指数; (B) SII-GR, 发芽率盐损伤指数; (C) SII-BFW, 芽鲜重盐损伤指数; (D) SII-RFW, 根鲜重盐损伤指数; (E) SII-BDW, 芽干重盐损伤指数; (F) SII-RDW, 根干重盐损伤指数; (G) SII-BL, 芽长盐损伤指数; (H) SII-RL, 根长盐损伤指数; (I) 8项指标的平均盐损伤指数。NaCl浓度为0.40%, 0.60%, 0.80%和1.00% (g·mL⁻¹) 分别对应于68.45, 102.67, 136.89, 171.12 mmol·L⁻¹。(图中数据是盐胁迫下各指标的平均值)

Note: (A) SII-GP, salt injury index of germination potential; (B) SII-GR, salt injury index of germination rate; (C) SII-BFW, salt injury index of bud fresh weight; (D) SII-RFW, salt injury index of root fresh weight; (E) SII-BDW, salt injury index of bud dry weight; (F) SII-RDW, salt injury index of root dry weight; (G) SII-BL, salt injury index of bud length; (H) SII-RL, salt injury index of root length; (I) the average salt injury index of 8 indicators. NaCl concentrations of 0.40%, 0.60%, 0.80% and 1.00% (g·mL⁻¹) correspond to 68.45, 102.67, 136.89 and 171.12 mmol·L⁻¹, respectively. (The data in the figure are the average values of each index under salt stress)

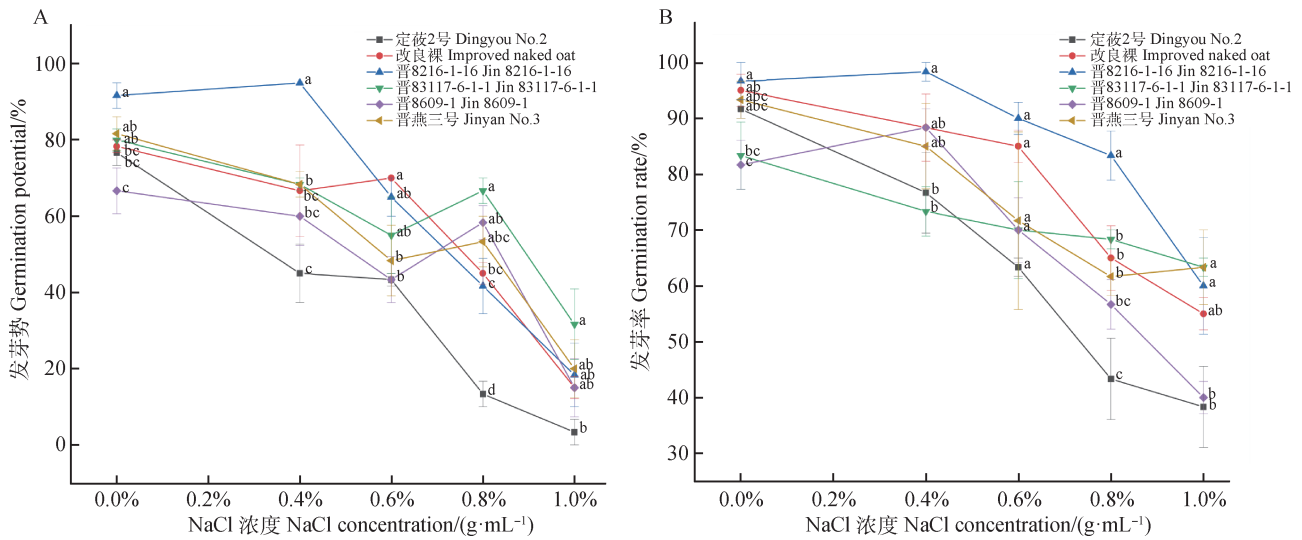


图 2 不同盐浓度下 6 份燕麦种质发芽指标变化

Fig. 2 Changes in germination indexes of 6 oat germplasms under different salt concentrations

注: A 图为 6 份种质发芽势变化趋势; B 图为 6 份种质发芽率变化趋势; 同一浓度的不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: A, the trend of germination potential of 6 germplasms; B, the trend of germination rate of 6 germplasms. Different letters of the same concentration indicate significant difference between treatments at $P < 0.05$

2.2 盐胁迫对燕麦萌发性状的影响

在 0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) 盐胁迫下, 332 份燕麦材料所测得的 8 项指标的平均值均低于对照平均值, 说明盐胁迫在一定程度上抑制种子的萌发和幼苗的生长。盐胁迫处理显著抑制 BL 和 RL 的生长, 处理组均值分别为 5.37 cm 和 4.10 cm, 较对照组分别下降 40.33% 和 47.64%, 表明 BL 和 RL 对盐胁迫响应最敏感; 盐胁迫对种子 GP 和 GR 抑制程度最小, 处理组均值分别为 75.83% 和 88.89%, 较对照组分别下降 16.75% 和 7.72%。8 项指标的盐胁迫处理变异系数在 15.67%~36.21% 之间, 而对照组变异系数在 7.29%~25.96% 之间, 8 项指标的变异系数在盐胁迫处理下均高于对照处理, 说明盐胁迫增大了本研究群体的变异幅度, 这有利于后续的评价 (表 2)。耐盐

指数分析发现, NaCl 处理后大部分燕麦植株生长受到盐胁迫的影响 (图 3)。同时大于 1.00 和小于 0.20 的极端耐盐指数的出现, 说明 0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) 盐浓度利于筛选极端材料。此外, 0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) 盐浓度下 332 份燕麦萌发期耐盐性各指标均呈正态分布, 符合多基因控制的数量性状遗传特性, 说明该浓度可被用于基于群体遗传学的耐盐相关基因的挖掘。综上所述, 在 0.80% (136.89 mmol·L⁻¹) 盐浓度胁迫下, 参试材料的 8 项测定指标均受到影响, 同时各指标均呈正态分布, 该盐浓度可被用于燕麦群体耐盐性鉴定评价。但由于盐胁迫对燕麦各指标的影响程度不同, 因此还需要建立综合多个指标的耐盐性评价体系, 减少单一指标评价信息的重叠, 提高耐盐性评价的准确性。

表 2 332 份燕麦种质生长指标的统计分析

Table 2 Statistical analysis growth indicators of 332 oat germplasms

指标 Indicator	对照组 Control group					盐胁迫处理 Salt stress treatment				
	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%	最大值 Max.	最小值 Min.	均值 Average	标准差 SD	变异系数 CV/%
GP/%	100.00	28.33	91.09	12.29	13.50	100.00	0.00	75.83	21.76	28.70
GR/%	100.00	38.33	96.33	7.02	7.29	100.00	28.33	88.89	13.93	15.67
BFW/g	1.48	0.50	0.96	0.17	17.43	1.23	0.18	0.67	0.20	30.48
RFW/g	0.99	0.13	0.53	0.14	25.96	0.76	0.07	0.37	0.13	36.21
BDW/g	0.15	0.04	0.10	0.02	15.64	0.12	0.02	0.07	0.02	28.10
RDW/g	0.11	0.03	0.06	0.01	19.14	0.08	0.02	0.04	0.01	23.44
BL/cm	12.11	4.43	9.00	1.22	13.58	9.13	1.07	5.37	1.64	30.57
RL/cm	11.51	3.91	7.83	1.31	16.66	7.00	1.63	4.10	0.98	24.00

注: GP, 发芽势; GR, 发芽率; BFW, 芽鲜重; RFW, 根鲜重; BDW, 芽干重; RDW, 根干重; BL, 芽长; RL, 根长。下同

Note: GP, germination potential; GR, germination rate; BFW, bud fresh weight; RFW, root fresh weight; BDW, bud dry weight; RDW, root dry weight; BL, bud length; RL, root length. The same as following

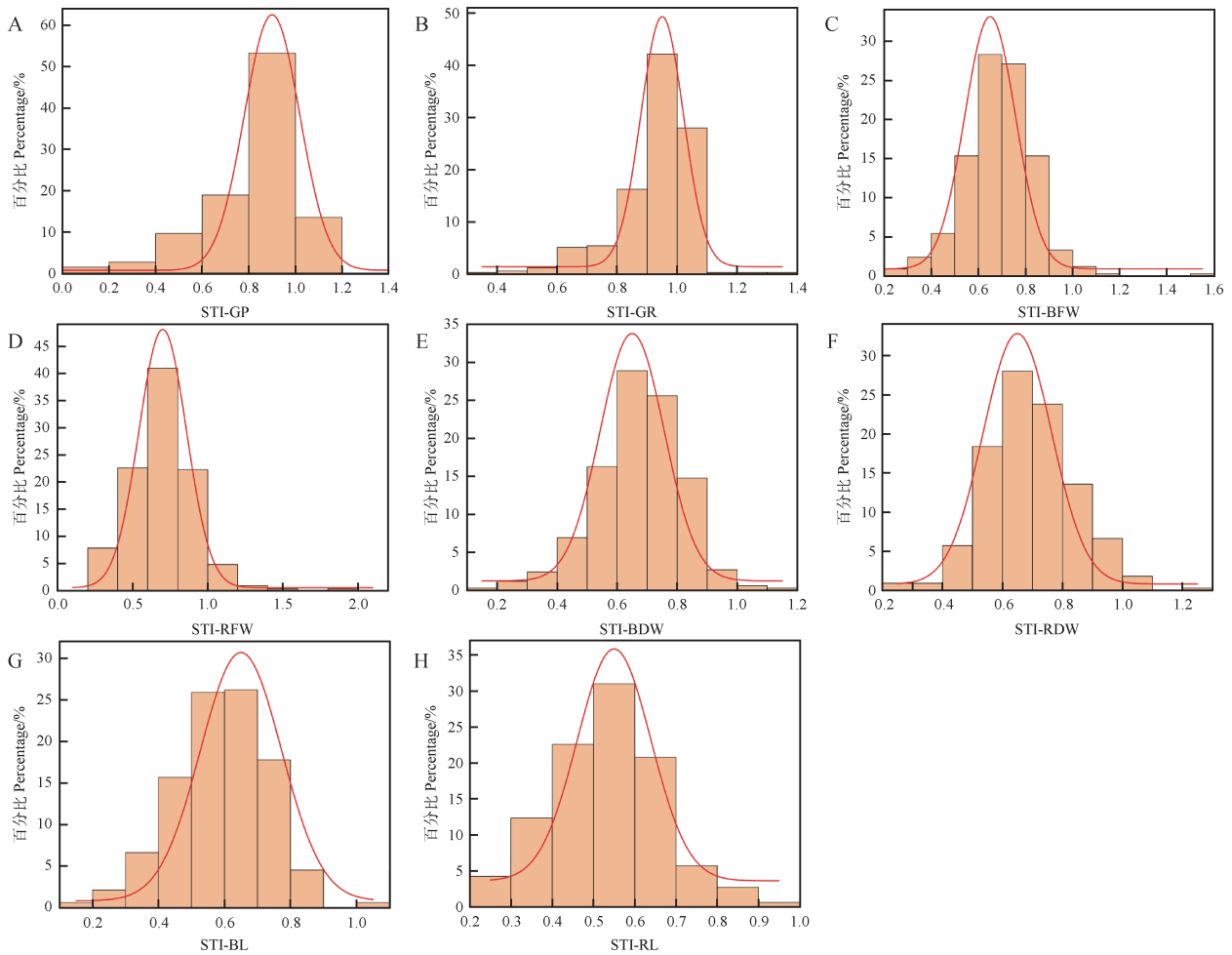


图3 332份燕麦种质8项测定指标的耐盐指数频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of 8 indexes of salt tolerance of 332 oat germplasms

注:(A)STI-GP,发芽势耐盐指数;(B)STI-GR,发芽率耐盐指数;(C)STI-BFW,芽鲜重耐盐指数;(D)STI-RFW,根鲜重耐盐指数;(E)STI-BDW,芽干重耐盐指数;(F)STI-RDW,根干重耐盐指数;(G)STI-BL,芽长耐盐指数;(H)STI-RL,根长耐盐指数。下同

Note: (A) STI-GP, salt tolerance index of germination potential; (B) STI-GR, salt tolerance index of germination rate; (C) STI-BFW, salt tolerance index of bud fresh weight; (D) STI-RFW, salt tolerance index of root fresh weight; (E) STI-BDW, salt tolerance index of bud dry weight; (F) STI-RDW, salt tolerance index of root dry weight; (G) STI-BL, salt tolerance index of bud length; (H) STI-RL, salt tolerance index of root length. The same as following

2.3 燕麦萌发期耐盐性综合评价

2.3.1 相关性分析

根据燕麦种质在对照和盐胁迫条件下的发芽势耐盐指数(Salt tolerance index of germination potential, STI-GP),发芽率耐盐指数(Salt tolerance index of germination rate, STI-GR),芽鲜重耐盐指数(Salt tolerance index of bud fresh weight, STI-BFW),根鲜重耐盐指数(Salt tolerance index of root fresh weight, STI-RFW),芽干重耐盐指数(Salt tolerance index of bud dry weight, STI-BDW),根干重耐盐指数(Salt tolerance index of root dry weight, STI-RDW),芽长耐盐指数(Salt tolerance index of bud length, STI-BL),根长耐盐指数(Salt tolerance index of root length, STI-RL)及加权隶属函数值(Weighted membership function

value, D -value)进行相关性分析。结果显示,任意两个指标之间均呈现出极显著的正相关(表3),且各指标的耐盐指数与 D 值之间也表现出极显著的正相关性。其中STI-BL与STI-BFW之间的相关性最强(相关系数为0.92),而STI-GR与STI-RFW之间的相关性最弱(相关系数为0.22)。 D 值是综合评价燕麦萌发期耐盐性的有效指标,STI-GP, STI-GR与 D 值之间的相关性较弱(相关系数为0.30和0.25),而STI-BFW, STI-BL, STI-RL与 D 值之间存在极强的正相关(相关系数为0.80以上),其决定系数表明,这三个指标能够解释 D 值超过64.00%的变异。因此,STI-BFW, STI-BL和STI-RL可作为鉴定燕麦萌发期耐盐性的关键指标。

表 3 燕麦各指标耐盐指数间的 Pearson 相关性分析

Table 3 Analysis of Pearson correlation between salt tolerance index of oat

	STI-GP	STI-GR	STI-BFW	STI-RFW	STI-BDW	STI-RDW	STI-BL	STI-RL	D-value
STI-GP	1.00								
STI-GR	0.77**	1.00							
STI-BFW	0.52**	0.48**	1.00						
STI-RFW	0.23**	0.22**	0.48**	1.00					
STI-BDW	0.53**	0.47**	0.89**	0.41**	1.00				
STI-RDW	0.38**	0.37**	0.57**	0.51**	0.60**	1.00			
STI-BL	0.58**	0.53**	0.92**	0.47**	0.91**	0.62**	1.00		
STI-RL	0.34**	0.31**	0.58**	0.56**	0.56**	0.57**	0.66**	1.00	
D-value	0.30**	0.25**	0.80**	0.77**	0.78**	0.77**	0.82**	0.83**	1.00

注: D-value 表示加权隶属函数值; **表示显著相关水平为 0.01(双尾)

Note: D-value represents the weighted membership function value; ** indicates a significant correlation level of 0.01 (two-tailed)

2.3.2 主成分分析 对 332 份燕麦种质资源的 8 项指标耐盐指数进行主成分分析, KMO 检验和 Bartlett 球形检验得到 $KMO=0.85$, $P<0.01$, 说明各指标之间关联程度高, 主成分分析可靠。特征值大于 1.00 提取到两个主成分, 累积方差贡献率为 75.46%(表 4), 其中第一主成分贡献特征值 4.85, 解释 60.64% 的表型变异; 第二主成分贡献特征值 1.19, 解释 14.82% 的表型变异, 当主成分的累积方差贡献率超过 75.00% 时, 8 项测定指标的大部分信息被有效反映出来。STI-RFW 和 STI-RL 是第一主成分的主要指标, 载荷系数分别为 0.35, 0.31(表 5), 第二主成分中, STI-GP 和 STI-GR 的载荷系数

较高为 0.49, 0.50, 说明萌发指标在第二主成分发挥主要的正向作用, 可以反映种子的发芽情况。根据各主成分的贡献率, 计算其权重, 2 个综合指标(主成分)的权重分别为 80.36% 和 19.64%(表 4)。在综合评价中, 利用加权隶属函数值对燕麦种质的耐盐性进行评判具有重要价值。D 值越大, 耐盐性越强, 反之亦然。在 332 份燕麦种质中, BY114、BY158 和 OA1576-4 等 34 份种质的 D 值较高(0.59~0.87), 评价为萌发期耐盐能力极强。蒙燕 7716、2011621054 和 CIav6209 等 48 份种质的 D 值较低(0.06~0.26), 评价为萌发期耐盐能力极弱(表 1)。

表 4 燕麦萌发期耐盐相关性状主成分分析

Table 4 Principal component analysis of salt tolerance-related traits at the germination stage of oats

主成分 Principal component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract square sum load		
	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance percentage/%	累积方差贡献率 Cumulative variance percentage/%	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance percentage/%	累积方差贡献率 Cumulative variance percentage/%
1	4.85	60.64	60.64	4.85	60.64	60.64
2	1.19	14.82	75.46	1.19	14.82	75.46
3	0.70	8.77	84.23			
4	0.46	5.76	89.99			
5	0.41	5.06	95.05			
6	0.23	2.85	97.90			
7	0.10	1.30	99.20			
8	0.06	0.80	100.00			

表 5 主成分因子载荷矩阵

Table 5 Principal component factor loading matrix

主成分 Principal component	STI-GP	STI-GR	STI-BFW	STI-RFW	STI-BDW	STI-RDW	STI-BL	STI-RL
1	-0.20	-0.21	0.17	0.35	0.15	0.25	0.16	0.31
2	0.49	0.50	0.09	-0.26	0.11	-0.10	0.11	-0.16

2.3.3 聚类分析 利用系统聚类的方法, 对 332 份燕麦种质的 D 值进行聚类分析。基于欧氏距离,

运用 ward 法进行系统聚类分析, 当设定的欧氏距离阈值为 5 时, 将 332 份燕麦种质资源划分为 5 个不同

的类别(图 4);第 I 类是高耐盐(Highly salt-tolerant, HST)种质有 34 份,占比 10.24%,*D* 值范围为 0.59~0.87;第 II 类是耐盐(Salt-tolerant, ST)种质有 83 份,占比 25.00%,*D* 值范围为 0.48~0.59;第 III 类是中等耐盐(Moderately salt-tolerant, MST)

种质有 116 份,占比 34.94%,*D* 值范围为 0.35~0.48;第 IV 类是盐敏感(Salt-sensitive, SS)种质有 51 份,占比 15.36%,*D* 值范围为 0.26~0.35;第 V 类是高盐敏感(Highly salt-sensitive, HSS)种质有 48 份,占比 14.46%,*D* 值范围为 0.06~0.26。

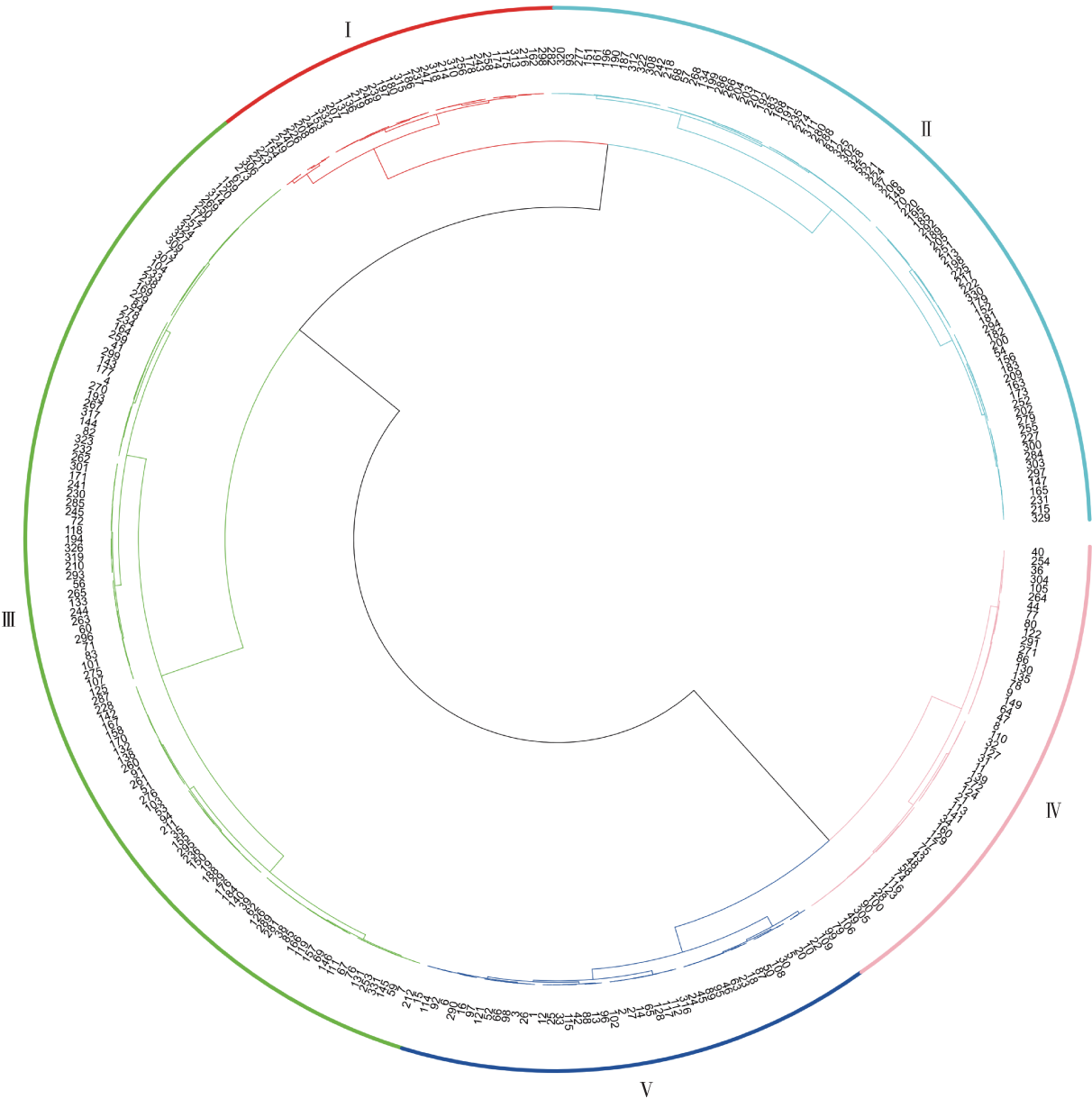


图 4 利用聚类分析评价 332 份燕麦种质的耐盐性

Fig. 4 Evaluation of the salt tolerance of 332 oat germplasms using cluster analysis

注:I为高耐盐型;II为耐盐型;III为中等耐盐型;IV为盐敏感型;V为高盐敏感型。图中每一个罗马数字代表一个燕麦种质
Note: I, highly salt-tolerant type; II, salt-tolerant type; III, moderately salt-tolerant type; IV, salt-sensitive type; V, highly salt-sensitive type. Each Roman numeral in the figure represents a oat variety

2.3.4 回归模型建立及评价指标 将回归组进行逐步线性回归分析,最终得到最优回归方程: $D=0.37\times STI-RL+0.38\times STI-BFW+0.19\times STI-RFW-0.23\times STI-GR+0.27\times STI-RDW-0.16$ ($R^2=0.98$,

$P=0.00$)。将检验组的预测值与对应的*D*值进行相关性分析,结果显示两者之间存在极显著的正相关,相关系数高达 0.99,结果表明所建立的最优回归方程能准确地预测燕麦种质的耐盐性。根据

回归方程得出,STI-BFW和STI-RL与 D 值的显著正相关系数最大,这两个指标最能代表燕麦种质的耐盐性。表明STI-BFW和STI-RL的系数越大, D 值则越大,即该燕麦种质的耐盐性越强。

2.4 评价可靠性验证与应用

2.4.1 耐盐稳定性验证 根据对2023年332份燕麦进行萌发期耐盐性鉴定结果,利用最优回归方程计算6份种质的 D 值,其中高耐盐型种质208,240,246的 D 值为0.67,0.87,0.77;高盐敏感型种质95,108,290的 D 值为0.25,0.20,0.18,确定208,240,246为高耐盐型种质;95,108,290为高盐敏感型种质(图5),结合表型和 D 值说明回归方程的可靠性。将上述6份种质于2024年重新种植、收获和鉴定。对两年环境下的6份种质进行8项指标的测定,并对两年测定指标的耐盐指数进行相关性分析,发现相关系数为0.68, $P<0.01$ (图6)。表明筛选到的极端材料在不同环境下表现稳定、可靠,这些材料可用于后续的研究和应用。

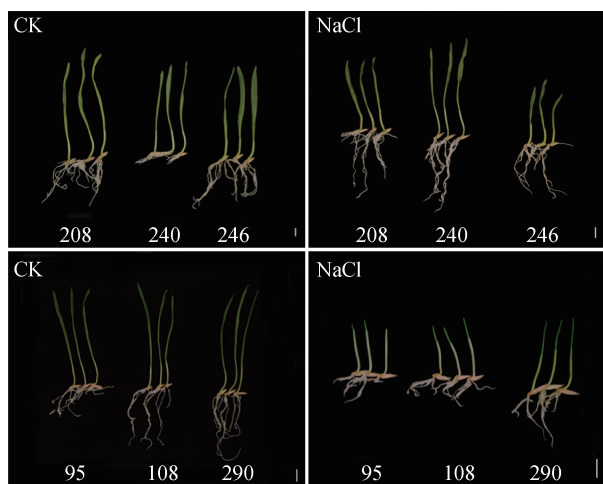


图5 对照和盐处理7天条件下的表型图。Bar=1 cm

Fig. 5 Phenotypic plots under control and treatment conditions for 7 days. Bar=1 cm

2.4.2 皮、裸燕麦耐盐性比较分析 根据对251份皮燕麦和81份裸燕麦的评价结果,在HST,ST种质中,皮燕麦有110份,占比43.83%,裸燕麦有7份,占比8.64%,其中HST种质全是皮燕麦。在SS,HSS种质中,皮燕麦有46份,占比18.33%,裸燕麦有53份,占比65.43%(图7)。说明皮燕麦的耐盐性普遍高于裸燕麦。

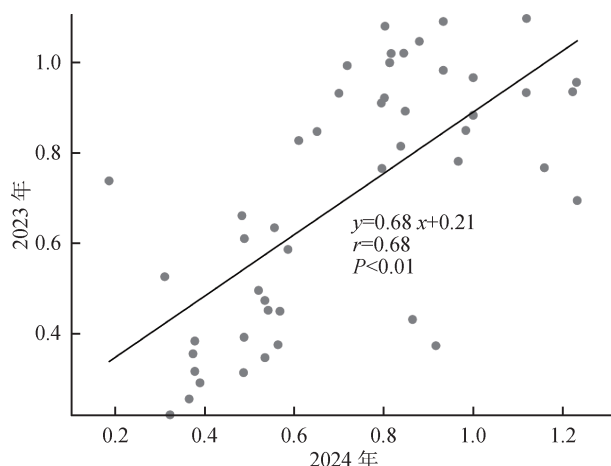


图6 两年环境下6份燕麦种质各指标的耐盐指数相关性图

Fig. 6 Correlation diagram of salt tolerance index of each index of 6 oat germplasms under two years of environment

注:y指2023年6份种质8项指标的耐盐指数,x指2024年6份种质8项指标的耐盐指数

Note: y refers to the salt tolerance index of 8 indicators in 6 germplasms in 2023, x refers to the salt tolerance index of 8 indicators in 6 germplasms in 2024

3 讨论

3.1 种子萌发期耐盐性鉴定

土壤盐渍化会降低植物对水分和微量元素的吸收利用,并使土壤结构和性质发生变化。高浓度的盐分会干扰植物对必需营养离子的平衡吸收,从而影响植物生长^[26],但耐盐植物可以忍受高盐浓度并去除土壤表层积累的盐分^[27]。为了应对土壤盐渍化的挑战,减轻土壤盐渍化对农业生产的不利影响,鉴定、筛选和培育耐盐植物对开发、利用盐渍地尤为重要。

在0.80%(136.89 mmol·L⁻¹)盐胁迫条件下,参试材料的8项指标平均值均低于对照,这表明盐胁迫在一定程度上对种子萌发和幼苗生长产生抑制作用。盐胁迫处理对BL和RL的生长产生显著抑制作用,与对照组相比,BL下降40.33%,RL下降47.64%,表明BL和RL对盐胁迫响应最敏感。这可能源于体外高浓度NaCl溶液大量渗入植物体内,导致Na⁺和Cl⁻的大量积累干扰K⁺、Ca²⁺等营养离子的吸收,进而破坏细胞内的离子平衡,影响细胞的正常生理功能,最终导致根和胚轴的生长受到抑制(表2)。此外,极端耐盐指数的出现,表明0.80%(136.89 mmol·L⁻¹)盐浓度对不同种质的耐盐能力产生显著影响,这8项指标可用于区分不同种质的耐盐性(图3)。

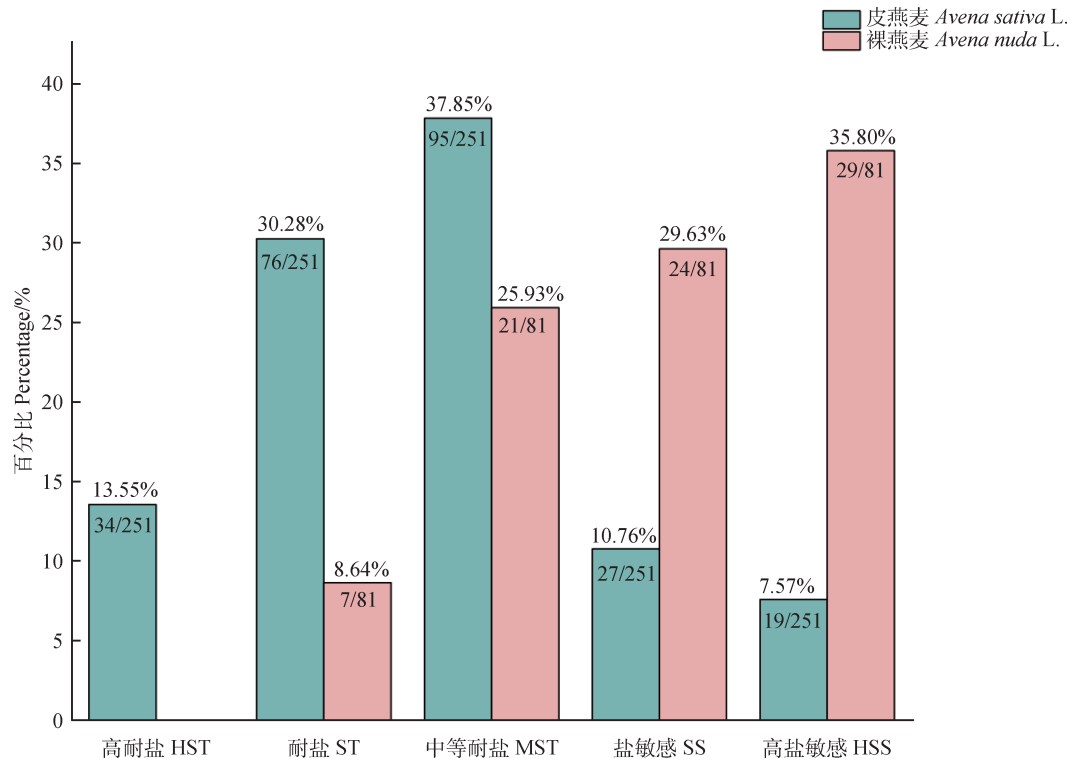


图7 332份燕麦种质资源耐盐性皮、裸燕麦的分布

Fig. 7 Distribution of salt tolerant *Avena sativa* L. and *Avena nuda* L. in 332 oat germplasm resources

种子萌发的成功与否直接影响到植物的生长和发育,因此在农业生产和种子培育中,对种子萌发期的管理尤为重要。萌发期是植物对盐害最为敏感的时期,此时进行耐盐性种质筛选可以更早发现植物的耐盐潜力,且种子萌发所需时间短,在此期间可快速、高效地进行耐盐种质筛选工作^[28]。Wu等^[25]利用549份甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)自交系,筛选出萌发期高耐盐自交系50个;张笛等^[29]对100份谷子(*Setaria italica* L.)品种资源在萌发阶段进行盐胁迫试验,经过筛选确定晋育红谷、公矮6号、红钙谷和晋谷29的综合耐盐能力较强;刘慧杰等^[30]对197份陆地棉种质在萌发期进行盐胁迫,筛选出20N705、C6524等43份耐盐性较强的材料。以上研究表明,在种子萌发阶段进行耐盐性评价,能够精准筛选出具有高耐盐性的优异材料。这对耐盐植物材料的高效筛选和盐渍地改良、利用具有重要的理论与实践意义。

目前在燕麦种质资源的耐盐性研究中,已有相关研究对不同燕麦种质萌发期的耐盐性进行了探索,但选取的材料数量和种类相对较少,难以全面反映燕麦种质资源的耐盐性差异。斯日古楞等^[17]对8个饲用燕麦品种进行种子萌发期耐盐性的综合评价;刘凤歧等^[23]对4种燕麦品种进行萌发期耐盐

性鉴定评价;李珍等^[31]对10个饲用燕麦品种在萌发期进行盐碱胁迫处理;陈新等^[20]对278份裸燕麦种质在萌发期进行盐胁迫研究。本研究通过选取332份皮、裸燕麦种质资源进行盐胁迫处理,扩大了研究群体和类型,能够更全面地反映燕麦种质资源的耐盐多样性。这为构建科学、系统的耐盐性评价体系提供了更丰富的数据支持,也为后续的分选育种和遗传改良提供了更为坚实的基因资源基础。

3.2 萌发期耐盐性综合评价

作物耐盐性是一种非常复杂的性状,由多个数量性状共同决定,单一指标难以对其进行精确的评价^[32],因此需要综合多项评价指标来获得更全面和准确的评价结果^[33]。本研究选择GP,GR,BFW,RFW,BDW,RDW,BL和RL 8项指标进行燕麦种质萌发期耐盐性评价。张静等^[22]也将GP,GR,RL,BL,BFW,RFW,BDW和RDW作为燕麦萌发期耐盐碱的测定指标。研究和确定萌发期的关键耐盐性指标,能够更准确地揭示植物对盐胁迫的响应机制,并为耐盐材料的筛选提供可借鉴的指标。陈新等^[20]在研究中指出,发芽率是评估裸燕麦在萌发期耐盐性的一个重要且关键的鉴定指标;付鸾鸿等^[34]认为萌发势、胚根鲜重和胚根长这3个综合指标可

作为评价燕麦耐盐碱的鉴定指标;李珍等^[31]提出发芽势和发芽率是评价燕麦萌发期的耐盐性的最佳鉴定指标。本研究对 STI-GP, STI-GR, STI-BFW, STI-RFW, STI-BDW, STI-RDW, STI-BL 和 STI-RL 8 项指标进行隶属函数分析,综合评价燕麦在萌发期对盐胁迫的响应。相关性分析结果显示,STI-RL 与 D 值的相关系数最高,其次分别是 STI-BL 和 STI-BFW。根据相关性分析结果,确定 STI-RL, STI-BL 和 STI-BFW 为评价燕麦萌发期耐盐性的关键指标(表 3)。主成分分析结果表明,第一主成分中 STI-RL 和 STI-RFW 的载荷系数最大,第二主成分中 STI-GP 和 STI-GR 的载荷系数最大。根据主成分分析结果,将 STI-RL, STI-RFW, STI-GP 和 STI-GR 作为评价燕麦萌发期耐盐性的关键指标(表 5)。由回归模型分析结果可知,STI-BFW 和 STI-RL 最能代表燕麦种质的耐盐性,因此也可作为评价燕麦萌发期耐盐性的关键指标。目前在评价作物耐逆性研究中,普遍采用综合多个评价对植物抗逆能力进行鉴定,例如玉米的抗旱性^[35]、小麦的抗高温性^[36]、水稻的抗旱性^[37],综合评价方法能够全面考虑多个因素,避免单一评价方法的局限性。综合考虑本研究相关性分析法、主成分分析法和回归模型分析法的分析结果,发现 STI-RL, STI-BFW 两个指标可被推荐为用于燕麦萌发期耐盐能力的鉴定指标,本研究结果也为燕麦种质资源的耐盐性鉴定提供了方法依据。

本研究基于加权隶属函数分析及聚类分析,对 332 份燕麦种质资源进行系统性的耐盐性综合评价,发现 34 份 HST 种质,83 份 ST 种质,116 份 MST 种质,51 份 SS 种质,48 份 HSS 种质,这一结果为燕麦种质的耐盐性鉴定提供了清晰的分类依据(图 4)。陈新等^[20]对 278 份裸燕麦种质进行耐盐性分析发现仅有 17 份 HST 种质,其研究对象均为裸燕麦且种质数量相对较少,这在一定程度上限制了 HST 种质的筛选数量。此外,张静等^[22]对 485 份燕麦种质的耐盐碱性分析发现仅有 2 份高耐盐碱种质,该研究采用混合盐碱溶液进行胁迫处理,多种盐分的相互作用显著增加了研究的复杂性,导致筛选出的高耐盐碱种质数量较少。本研究采用单一盐溶液进行胁迫处理,避免了多种盐分相互作用带来的复杂性,这种方法能够明确区分渗透胁迫和离子毒害对植物生长的具体影响,为耐盐性机制的研究提供了更精准的依据。同时,单一盐胁迫试验的结果更

具可比性,便于不同研究之间的对比和整合。在研究植物耐盐性时,使用单一盐溶液处理可以更直观地评估植物的耐盐能力,为植物耐盐性评价提供更准确的依据。这些耐盐性种质的鉴定结果将为耐盐燕麦种质的利用和培育提供材料,也为耐盐基因挖掘奠定基础。

3.3 皮、裸燕麦耐盐性比较分析

关于皮、裸燕麦耐盐性对比的研究鲜有报道。王波等^[38]发现在盐碱胁迫条件下,裸燕麦的叶片和根系水势下降幅度显著高于皮燕麦,认为裸燕麦对盐碱胁迫的敏感性高于皮燕麦;塔娜等^[39]对 4 份皮燕麦和 5 份裸燕麦进行抗性分析,发现皮燕麦的抗性总体上优于裸燕麦。本研究根据皮、裸燕麦在 5 种类型中的分布,发现在高耐盐和耐盐种质中,皮燕麦占 43.83%,裸燕麦占 8.64%,其中高耐盐种质全是皮燕麦;高盐敏感和盐敏感种质中,皮燕麦占 18.33%,裸燕麦占 65.43%。大部分皮燕麦具有耐盐性,说明皮燕麦的耐盐性普遍高于裸燕麦(图 7)。盐渍地往往因土壤中盐分含量过高,导致许多作物难以适应,进而影响农田的利用效率和产量,而皮燕麦因其较强的耐盐性,能够在盐渍地环境中生长,不仅保障其自身的生长,也为改善盐渍地的利用提供新的思路。

4 结论

本研究认为 0.80% ($136.89 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) NaCl 是燕麦萌发期进行耐盐性筛选的最适盐浓度,并利用相关性分析、主成分分析和回归模型综合分析,结果显示根长耐盐指数和芽鲜重耐盐指数被推荐为用于鉴定燕麦萌发期耐盐能力的关键指标。进一步对盐胁迫下不同燕麦种质的加权隶属函数值进行聚类分析,发现 332 份燕麦种质被划分为 5 类:34 份高耐盐、83 份耐盐、116 份中等耐盐、51 份盐敏感和 48 份高盐敏感种质,同时发现皮燕麦的耐盐性普遍高于裸燕麦。通过建立的最优回归方程: $D = 0.37 \times \text{STI-RL} + 0.38 \times \text{STI-BFW} + 0.19 \times \text{STI-RFW} - 0.23 \times \text{STI-GR} + 0.27 \times \text{STI-RDW} - 0.16$ ($R^2 = 0.98$, $P = 0.00$) 可以快速判断燕麦萌发期的耐盐能力。

参考文献

- [1] 李志杰,孙文彦,马卫萍,等. 盐碱土改良技术回顾与展望[J].

- 山东农业科学,2010(2):73-77
- LI Z J, SUN W Y, MA W P, et al. Review and prospects of improvement technology for saline-alkali soil [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010(2):73-77
- [2] PITMAN M G, LAUCHLI A. Global impact of salinity and agricultural ecosystems [J]. Salinity: Environment-Plants-Molecules, 2002(3):20
- [3] TUTEJA N. Mechanisms of high salinity tolerance in plants [J]. Methods in Enzymology, 2007, 428(7):419-438
- [4] 左照江, 张汝民, 高岩. 盐胁迫下植物细胞离子流变化的研究进展 [J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(5):805-811
- ZUO Z J, ZHANG R M, GAO Y, et al. Advances in plant cell ion flux with salt stress: a review [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2014, 31(5):805-811
- [5] ARSHAD ULLAH M, ALI MAHMOOD I, SARWAR M, et al. Screening of Oat (*Avena sativa*) varieties in saline-sodic soil [J]. American Journal of Biomedical Science & Research, 2019, 4(2):104-106
- [6] 杨海鹏, 孙泽民. 中国燕麦 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1989:3-5
- YANG H P, SUN Z M. Oats in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1989:3-5
- [7] 袁波, 徐丽君, 赵雅茹, 等. 北方农牧交错区复种燕麦品种的筛选与评价 [J]. 草业科学, 2024, 41(3):652-663
- YUAN B, XU L J, ZHAO Y R, et al. Selection and evaluation of multiple cropping oats for suitable varieties in a farming-pastoral ecotone in northern China [J]. Pratacultural Science, 2024, 41(3):652-663
- [8] CHEN X, Xu Z, ZHAO B, et al. Physiological and proteomic analysis responsive mechanisms for salt stress in oat [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:891674
- [9] 罗志娜, 赵桂琴, 刘欢. 24个燕麦品种种子萌发耐盐性综合评价 [J]. 草原与草坪, 2012, 32(1):34-38, 41
- LUO Z N, ZHAO G Q, LIU H. The comprehensive evaluation of salt tolerance for 24 oat cultivars [J]. Grassland and Turf, 2012, 32(1):34-38, 41
- [10] AGNIHOTRI R K, PALNI L M S, PANDEY D K. Screening of landraces of rice under cultivation in Kumaun Himalaya for salinity stress during germination and early seedling growth [J]. Indian Journal of Plant Physiology, 2006, 11(3):266-272
- [11] QUAMRUZZAMAN M, MANIK S M N, LIVERMORE M, et al. Multidimensional screening and evaluation of morpho-physiological indices for salinity stress tolerance in wheat [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2022, 208:454-471
- [12] KINGSBURY R W, EPSTEIN E. Selection for salt-resistant spring wheat [J]. Crop Science, 1984, 24:310-315
- [13] RASEL M, TAHJIB-UL-ARIF M, HOSSAIN M A, et al. Screening of salt-tolerant rice landraces by seedling stage phenotyping and dissecting biochemical determinants of tolerance mechanism [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40:1853-1868
- [14] 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 等. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定 [J]. 中国农业科学, 2012, 45(9):1714-1722
- SUN L, ZHOU Y F, WANG C, et al. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9):1714-1722
- [15] GIAVENO C D, RIBEIRO R V, SOUZA G M, et al. Screening of tropical maize for salt stress tolerance [J]. Crop Breeding and Applied Biotechnology, 2007, 7:304-313
- [16] 李春红, 姚兴东, 鞠宝韬, 等. 不同基因型大豆耐荫性分析及其鉴定指标的筛选 [J]. 中国农业科学, 2014, 47:2927-2939
- LI C H, YAO X D, JU B T, et al. Analysis of shade-tolerance and determination of shade-tolerance evaluation indicators in different soybean genotypes [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47:2927-2939
- [17] 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):118-123
- 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):118-123
- [18] 阳曦, 张新全, 王运琦, 等. 高燕麦草苗期耐盐性鉴定及综合评价 [J]. 安徽农业科学, 2006, 34(23):6105-6108
- YANG X, ZHANG X Q, WANG Y Q, et al. Salt-Tolerance appraisal and comprehensive evaluation of wild *Arrhenatherum elatius* L. seedling [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2006, 34(23):6105-6108
- [19] 武俊英, 刘景辉, 翟利剑, 等. 不同品种燕麦种子萌发和幼苗生长的耐盐性 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(10):1960-1965
- WU J Y, LIU J H, ZHAI L J, et al. Salt tolerance of seed germination and seedling growth of different oat varieties [J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(10):1960-1965
- [20] 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):2038-2046
- 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):2038-2046
- [21] 赖弟利, 范昱, 朱红林, 等. 燕麦耐盐性的生理生化指标网络分析 [J]. 作物杂志, 2020(2):147-155
- LAI D L, FAN Y, ZHU H L, et al. Network analysis of physiological and biochemical indexes of salt tolerance in oats [J]. Crops, 2020(2):147-155
- [22] 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):1551-1561
- 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 Agronomica Sinica, 2023, 49(6):1551-1561
- [23] 刘凤歧, 刘杰淋, 朱瑞芬, 等. 4种燕麦对NaCl胁迫的生理响应及耐盐性评价 [J]. 草业学报, 2015, 24(1):183-189
- LIU F Q, LIU J L, ZHU R F, et al. Physiological responses and tolerance of four oat varieties to salt stress [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(1):183-189
- [24] LU Q, NIU X, ZHANG M, et al. Genome-wide association

- study of seed dormancy and the genomic consequences of improvement footprints in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 8: 2213
- [25] WU H, GUO J, WANG C, et al. An effective screening method and a reliable screening trait for salt tolerance of *Brassica napus* at the germination stage[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 530
- [26] TESTER M, DAVENPORT R. Na^+ tolerance and Na^+ transport in higher plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 91 (5) : 503-527
- [27] SHAABAN M M, EL-FOULY M M. Nutrient contents and salt removal potential of some wild plants grown in salt affected soils[C]//International Symposium on Techniques to Control Salination for Horticultural Productivity, 2000: 377-385
- [28] 张蒙, 周经明, 马玮, 等. 砧用中国南瓜种子萌发期耐盐性鉴定评价[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(1): 26-34
- ZHANG M, ZHOU J M, Ma W, et al. A comprehensive evaluation on salt tolerance of pumpkin (*Cucurbita moschata*) as rootstock in seed germination stage [J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2023, 36(1): 26-34
- [29] 张笛, 苗兴芬, 王雨婷. 100 份谷子品种资源萌发期耐盐性评价及耐盐品种筛选[J]. *作物杂志*, 2019, 35(6): 43-49
- ZHANG D, MIAO X F, WANG Y T. Evaluation and screening of salt tolerance in 100 foxtail millet at germination stage[J]. *Crops*, 2019, 35(6): 43-49
- [30] 刘慧杰, 王俊豪, 龚照龙, 等. 197 份陆地棉品种萌发期耐盐性鉴定[J]. *新疆农业科学*, 2024, 61(7): 1574-1581
- LIU H J, WANG J H, GONG Z L, et al. Identification of salt tolerance of 197 upland cotton varieties at germination stage[J]. *XinJiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(7): 1574-1581
- [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): 90-95
- 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): 90-95
- [32] TRACHSEL S, MESSMER R, STAMP P, et al. QTLs for early vigor of tropical maize[J]. *Molecular Breeding*, 2010, 25 (1): 91-103
- [33] 周桂莲, 杨慧霞. 小麦抗旱性鉴定的生理生化指标及其分析评价[J]. *干旱地区农业研究*, 1996, 14(2): 65-71
- ZHOU G L, YANG H X. An analysis and review of physiological and biochemical indexes about wheat drought resistance identification [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1996, 14(2): 65-71
- [34] 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, 34(6): 27-35, 174
- FU L H, YU S, YU L H, et al. Analysis of salt-alkali tolerance and screening of identification indexes of different oat at germination stage[J]. *Crops*, 2018, 34(6): 27-35, 174
- [35] 李春情, 刘翔宇, 闫鹏, 等. 不同玉米品种抗旱性的生理鉴定与综合评价[J]. *作物杂志*, 2024, 40(4): 253-262
- LI C Q, LIU X Y, YAN P, et al. Physiological identification and comprehensive evaluation of drought resistance of different maize varieties[J]. *Crops*, 2024, 40(4): 253-262
- [36] 常明娟, 楚宗艳, 杜玉倍, 等. 高温胁迫下小麦生理指标的主成分分析及综合评价[J]. *湖南农业大学学报*, 2023, 49(1): 1-11
- CHANG M J, CHU Z Y, DU Y B, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of the physiological indices in wheat under high temperature resistance[J]. *Journal of Hunan Agricultural University*, 2023, 49(1): 1-11
- [37] 杨瑰丽, 杨美娜, 李帅良, 等. 水稻萌芽期抗旱指标筛选与抗旱性综合评价[J]. *华南农业大学学报*, 2015, 36(2): 1-5
- YANG G L, YANG M N, LI S L, et al. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance indices of rice at germination stage [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2015, 36(2): 1-5
- [38] 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): 625-629
- WANG B, SONG F B. Physiological responses and adaptive capacity of oats to saline-alkali stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2006, 15(3): 625-629
- [39] 塔娜, 逯晓萍, 张雅慧, 等. 皮、裸燕麦种质资源的性状表现和遗传差异分析[J]. *内蒙古农业科技*, 2010, 38(2): 33-35, 41
- TA N, LU X P, ZHANG Y H, et al. Character performance and genetic diversity of *Avena sativa* and naked oat [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2010, 38(2): 33-35, 41

(责任编辑 付 宸)