

大麦发芽期耐盐性种质鉴定及其 生理响应特征分析

孙建^{1,2}, 徐晓芸², 马增科^{1,2}, 何建军^{1,2}, 汪军成^{1,2}, 姚立蓉^{1,2},
李葆春^{1,3}, 马小乐^{1,2}, 司二静^{1,2}, 杨轲^{1,2}, 王化俊^{1,2}, 孟亚雄^{1,2}

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃省作物遗传改良与种质创新重点实验室, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃农业大学农学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学生命科学技术学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要:为了解大麦发芽期耐盐性差异和生理响应特征,对 126 份大麦材料进行 200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫下的种子发芽及生长实验,并对极端耐盐性材料和盐敏感性材料进行盐胁迫处理水培实验。结果表明:盐胁迫下大麦发芽期各指标测量值较对照相比均下降,且处理与对照相比变异系数增大,发芽势、发芽率、株高、根长和根数的变异系数值分别为 73.81%、58.00%、47.22%、39.39% 和 31.79%,说明不同材料盐胁迫处理具有较大差异;并且除株高和发芽率、根长之间无相关性之外,其它各指标之间均存在显著或极显著正相关。采用聚类分析将材料分为 4 个耐盐等级,其中 ZDM655 等 33 个品种为高度耐盐性,MAVRIIP 等 28 个品种为中度耐盐性,GN241 等 16 个品种为中度盐敏感性,莆田 17 号等 49 个品种为盐敏感性。在盐胁迫水培条件下,大麦主要通过调节根表面积和根体积表型特征来适应盐胁迫,高度耐盐性材料 ZDM655 地上部和根系中 Na⁺ 含量分别为对照的 3.63 倍和 2.55 倍,而盐敏感性材料 ZDM222 地上部和根系中 Na⁺ 含量分别为对照的 8.95 倍和 2.92 倍;同时,ZDM655 较对照相比地上部 K⁺ 含量显著提高,地下部 K⁺ 含量显著下降,而 ZDM222 地上部 K⁺ 含量显著下降,地下部较对照无显著差异,表明高度耐盐性材料具有更好适应盐胁迫的表型特征和生理响应功能。种子发芽期耐盐性强弱是在盐渍地生长的关键,发芽势、发芽率、株高、根长、根数可以作为大麦发芽期耐盐性评价的合理指标。

关键词:大麦;发芽期;耐盐性;生理响应;鉴定评价

中图分类号:S512.3;S503.3 **文献标志码:**A

Identification of salt-tolerant germplasm and analysis of its physiological response during barley germination

SUN Jian^{1,2}, XU Xiaoyun², MA Zengke^{1,2}, HE Jianjun^{1,2}, WANG Juncheng^{1,2}, YAO Lirong^{1,2},
LI Baochun^{1,3}, MA Xiaole^{1,2}, SI Erjing^{1,2}, YANG Ke^{1,2}, WANG Huajun^{1,2}, MENG Yaxiong^{1,2}

(1. Gansu Provincial Key Lab of Aridland Crop Science/Gansu Provincial Key Lab of Crop Improvement &
Germplasm Enhancement, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

3. College of Life Sciences and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to understand the salt tolerance and physiological response characteristics of barley germination, 126 barley subjects were treated with 200 mmol · L⁻¹ of NaCl to evaluate its effect on seed germination and seedlings growth in hydroponic experiments on extreme salt tolerant materials and salt sensitive materials. The results showed that the measured values of barley germination during salt stress decreased and the coefficient of variation increased compared with the control. The coefficient of variation of germination potential, germination rate, plant height, root length and root number were 73.81%, 58.00%, 47.22%, 39.39% and 31.79%, respectively,

收稿日期:2019-01-11

修回日期:2019-10-10

基金项目:甘肃省现代农业产业技术体系特色作物岗位(GARS-TSZ-2);国家大麦青稞产业技术体系(CARS-05-03B-03);甘肃省重大专项(17ZD2NA016);国家自然科学基金(31460347);甘肃农业大学学科建设专项基金(GAU-XKJS-2018-082、083)

作者简介:孙建(1994-),男,甘肃通渭人,硕士,研究方向为作物遗传育种。E-mail: 18193434389@163.com

通信作者:孟亚雄(1977-),男,副教授,硕士生导师,主要从事植物分子育种研究。E-mail: yxmengl@163.com

indicating that the salt stress treatment of different materials was quite different; and there was no correlation between plant height and germination rate or root length. However, among other indicators, there was significant or extremely significant positive correlation. Clustering analysis was used to classify the materials into four salt tolerance categories, among which 33 varieties including ZDM655 were highly salt tolerant, 28 varieties including MAVRIIP were moderately salt tolerant; 16 varieties including GN241 were moderately salt sensitive, and 49 varieties including Putian 17 were salt sensitive. Under salt stress hydroponic conditions, barley mainly adapted to salt stress by adjusting root surface area and root volume phenotypic characteristics. Highly salt-tolerant materials, ZDM655, had Na^+ content in the shoots and roots of 3.63 and 2.55 times of the control, respectively, while the Na^+ content in the shoots and roots of the salt-sensitive material ZDM222 was 8.95 and 2.92 times of the control, respectively. Meanwhile, K^+ content in aboveground parts of ZDM655 was higher than that of the control and K^+ content in underground parts decreased, while K^+ content in ZDM222 shoot significantly decreased while that in underground portion was not significantly different compared with the control, indicating that highly salt tolerant material had phenotypic characteristics and physiological response function of better adaptation to salt stress. The salt tolerance during seed germination is the key to growth in saline soil. Germination potential, germination rate, plant height, root length, and root number can be used as reasonable indicators for salt tolerance evaluation of barley germination, and excellent for salted land excavation.

Keywords: barley; germination stage; salt tolerance; physiological response; identification evaluation

土壤盐渍化是抑制作物生长、造成作物减产的主要非生物胁迫之一^[1]。我国耕地盐渍化面积达到 0.05 亿 hm^2 , 占全国耕地面积的 6.1%, 且土壤盐渍化危害面积和程度均有逐年提高的趋势^[2]。国内外研究证明, 筛选耐盐性品种, 利用生物治盐、改盐是改善生态环境、提高盐渍化土地利用率的一条有效途径, 选育高耐盐性作物显得尤为重要。

盐胁迫对植物种子的萌发、生长发育和基因表达均造成不同程度的影响。高盐浓度抑制小麦种子的萌发和幼苗的生长, 随着盐浓度的增加, 幼苗长度和主根长度逐渐降低^[3]。苗期种子在发芽阶段的耐盐性是耐盐作物筛选与早期鉴定的重要依据, 也是决定植株能否在盐渍化土壤中生存的关键^[4]。彭智等^[5]通过对小麦种质材料的筛选和鉴定, 得到了小麦芽期耐盐性鉴定的最适 NaCl 溶液浓度和苗期耐盐性鉴定的最适土壤 NaCl 浓度。同时, 植物主要通过根系限制盐分的进入和调整根的分布来适应盐胁迫^[6], 小麦、水稻则通过调节根系 K^+ 吸收系统而维持叶片具有较高的 K^+/Na^+ 值^[7-8], 以进行渗透调节来建立植物体内离子稳态也是重要的耐盐性机制之一。关于盐胁迫对大麦苗期的种质筛选和鉴定^[9-11]大多侧重于对数量性状和生物量的研究, 而对大麦种质材料的生理特征响应的研究较少。

大麦 (*Hordeum vulgare* L.) 是世界上栽培历史最悠久的作物之一, 主要用作饲料、粮食、啤酒工业、医药工业和保健食品开发的原料, 也是禾本科植物

中较为耐盐的作物。获得优异的耐盐种质, 培育耐盐作物新品种是解决土壤盐渍化问题的有效措施之一^[12]。因此, 耐盐种质的筛选、鉴定和评价就显得尤为重要。本实验在 2017 年对不同大麦材料大田耐盐性鉴定的基础上筛选采集的不同耐盐材料, 于 2018 年进一步对大麦发芽期耐盐特性进行评价, 分析筛选出的高耐盐性、盐敏感性两种极端类型材料盐胁迫响应的生理学特征, 以期为耐盐大麦新品种的培育提供种质资源和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2018 年 7—9 月在甘肃农业大学智能温室进行, 供试 126 份大麦材料由甘肃省干旱生境作物学重点实验室麦类育种课题组提供, 详见表 1。

1.2 试验设计

1.2.1 种子发芽期耐盐材料筛选 将灭菌后的种子均匀摆放于铺有 2 层滤纸的培养皿中, 每皿 50 粒, 然后每皿添加 10 mL $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的培养液, 3 次重复, 以不添加 NaCl 的培养液处理为对照, 最后置于昼/夜温度 $23^\circ\text{C}/18^\circ\text{C}$, 湿度 50% ~ 60%, 光周期 14 h, 光强为 $400 \sim 500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的人工气候室中培养, 每天更换培养液, 观察种子发芽情况并记录。以生根长芽, 且芽长等于种子长度的 1/2 作为发芽标准。在开始萌发后第 3 天统计种子发芽势, 第 7 天统计种子发芽率, 并在发芽第 7 天测量幼苗株高、根长和统计总根数(表 2)。

表 1 种质材料
Table 1 Germplasm materials

编号 Code	材料 Material	编号 Code	材料 Material	编号 Code	材料 Material	编号 Code	材料 Material
7	ZDM01-5	87	甘啤 2 号 Ganpi No.2	142	MAV-97	189	ZDM6172
8	ZDM01-6	94	GN241	143	丹青 4 号 Danqing No.4	191	苏啤 6 号 Supi No.6
11	ZDM01-3	97	DM-13-00822	144	黑龙 22291 Heilong 22291	194	Z036Q029P
16	AF-05-19	98	08 亲 369 08 qin 369	146	Tanana 匈 2 Tanana xiong 2	196	MAVRIIP
17	00316-14	99	ZYM2306	147	12-D112	197	ZDM2297
18	P13-3	100	ZZNN62660	151	茁麦 4 号 Zhuomai No.4	198	苏啤 4 号 Supi No.4
23	P106	103	ZDM5512	152	IL46	200	ZDM5702
24	0333-21	105	12-7347	154	ZDM6470	201	ZDM5189
25	ZDM-01-4	107	PASADEMA	155	12-S223 北 88 12-S223 bei 88	202	ZDM5512
26	ZDM-01-8	109	甘啤 7 号 Ganpi No.7	157	08 京 293 08 jing 293	205	站盖红毛大麦 Zhangai red barley
28	ZDM5199	113	甘啤 1 号 Ganpi No.1	158	美 121I Mei 121I	206	ZDM6931
29	ZDM5209	114	甘啤 3 号 Ganpi No.3	161	ZDM5196	208	ZDM6113
31	E02730887	115	2008 亲 1183 2008 qin 1183	162	08 京 222 08 jing 222	211	ZDH50407
33	ZDM222	116	红-11-18 Red-11-18	163	ZDM5187	212	Z204-0021LW
35	美 431I Mei 431I	117	甘啤 5 号 Ganpi No.5	164	ZDM5133	215	Z693W
36	ZDM5175	118	0416-1	165	BYYMRA17	216	ZDM5740
39	ZI45V085W	120	ZDM101-1	166	美 102 Mei 102	217	关东黄金爪大麦 Guangdong golden claw barley
40	蒙皮麦 1 号 Mengpimai No.1	121	甘垦 0520 Ganken 0520	167	ZP-2006	218	闽麦 02 Minmai 02
41	八平匍短白大麦 Baping short white barley	122	陇 1116-1143 Long 1116-1143	169	ZYM2268	219	ZD390404
43	甘啤 4 号 Ganpi No.4	123	117-089	170	ZYM2198	220	08 京 315 08 jing 315
45	黑大麦诱变 Black barley mutagenesis	124	2008 亲 326 2008 qin 326	171	DM-13-0085	223	西-2915 Xi-2915
46	Z192U005V	126	ZDM01-2	172	阿恩特 21 Arndt 21	224	08 京 334 08 jing 334
47	P002-2	128	垦啤 6 号 Kenpi No.6	173	美引 D-7 Meiyin D-7	228	ZDM5732
50	DM-13-0085	133	DZ 亲 0148 DZ qin 0148	175	08 京 269 08 jing 269	229	ZL-56
51	美 34I Mei 34I	134	ZDM6110	177	ZDM5142	231	12-P222
53	GN86	135	青啤 19 Qingpi 19	180	ZDM5174	232	美 141I Mei 141I
55	ZDM5169	136	GN88	181	ZDM5145	234	DM-13-0071
58	中小匈长黑大麦 Medium and small Xiong long black barley	137	ZDM8744	183	ZDM369	235	ZDM5172
60	GN236	138	美 301I Mei 301I	184	ZDM5166	237	Z145V00622
64	08 亲 134 08 qin 134	139	莆田 17 号 Putian No.17	185	ZDM655	238	ZDM5189
65	甘啤 6 号 Ganpi No.6	141	黑大麦诱变 Black barley mutagenesis	186	MZRIIP2	240	鄂大麦 9 号 Hubei barley No.9
70	GN63			188	DM-1300		

通过统计分析不同大麦材料在盐胁迫下种子发芽势、发芽率、株高、根长、根数变化,比较不同大麦材料间在发芽期性状的差异,综合评价大麦材料在发芽期的耐盐性,并筛选出高度耐盐性、盐敏感性这两种极端种质类型。

1.2.2 不同耐盐性大麦发芽期生理响应特征比较

以 1.2.1 节所述的方法筛选出的高度耐盐性和盐敏感性两类极端大麦种质为材料,采用常规方法萌发,待种子萌发 5 d 后,选择长势一致的幼苗转移到盛有 10 L 添加 200 mmol · L⁻¹ NaCl 1/2 Hoagland 营养液(pH 6.5~6.8)塑料盆中进行盐胁迫处理培养,每 2 d 更换一次培养液,以不添加 NaCl 1/2

Hoagland 营养液处理为对照,连续培养 10 d。待培养结束后,每个处理选择 15 株,以 5 株为一个重复,测定株高、鲜重、干重,并分离地上部和根系,用根系扫描仪测定根长、根数、根表面积等形态学参数。随后将根系和地上部 105℃ 杀青,80℃ 烘干至恒重,研磨成粉末状,用日本日立 U-5100 比例光束分光光度计测定 Na⁺、K⁺含量。

以高度耐盐性和盐敏感性这两种材料在盐胁迫水培环境下幼苗株高、鲜重、干重、根系形态参数(根长、根数、根表面积)和地上部、根系 Na⁺、K⁺含量等指标为依据,探究不同耐盐性大麦幼苗对盐胁迫响应的生理特性^[13]。

1.3 数据处理

运用 SPSS 19.0 进行数据处理和统计分析,用 Duncan’s 法对各数据指标进行显著性检测,检测水平为 $P<0.05$,采用隶属函数法全面地评价大麦品种(系)的耐盐性差异。

2 结果与分析

2.1 种子发芽期耐盐性鉴定

2.1.1 盐胁迫对大麦发芽及生长特性的影响 盐胁迫环境下,大麦发芽期各个性状指标的变化在不同程度反映了该材料耐盐能力的强弱^[14]。由表 2 可知,200 mmol · L⁻¹ NaCl 胁迫下,大麦发芽势、发芽率、株高、根长和根数这些指标与对照相比均有不同程度的下降,且 NaCl 胁迫下变异系数较对照相比均增高,说明盐胁迫对不同材料的影响较大,各材料间差异明显。盐处理下的发芽势变化范围在 0~0.97%,发芽率在 0~0.90%,株高在 0.24~5.67 cm,根长在 0.15~3.62 cm,根数在 1.07~2.89 个。由此可见,本实

验中各材料发芽期耐盐性存在广泛的遗传变异。

2.1.2 各材料发芽期性状方差分析 由表 3 和表 4 统计结果表明,盐胁迫处理对发芽期各性状影响显著,与对照相比,盐胁迫处理后的各材料间种子发芽势、发芽率、株高、根长和根数均达到了极显著差异($P<0.01$),基于此,可以确定各材料发芽期对盐胁迫响应差异明显,可进一步用于耐盐材料的筛选和鉴定。

2.1.3 各指标之间相关性分析 进一步对盐胁迫下以上各发芽期指标进行分析,针对每个材料,计算在盐胁迫处理和对照之间的种子发芽势、发芽率、株高、根长和根数的下降幅度,确定盐胁迫后的种子相对发芽势、相对发芽率、相对株高、相对根长和根数,并统计指标之间的相关性。由表 5 可以看出,各指标之间存在不同程度的相关性,相对发芽势与相对发芽率、相对株高、相对根长和根数均存在极显著正相关($P<0.01$);相对发芽率与相对根长、根数分别呈显著正相关($P<0.05$)和极显著正相

表 2 盐胁迫各品种发芽期各指标变化

特征值 Eigenvalue	发芽势/%		发芽率/%		株高/cm		根长/cm		根数/个	
	Germination potential		Germination rate		Plant height		Root length		Root number	
	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK	NaCl	CK
平均数 Average	0.42	0.79	0.50	0.95	3.96	12.09	1.98	4.49	3.68	8.28
标准差 SD	0.31	0.26	0.29	0.22	1.87	1.62	0.78	0.95	1.17	2.34
最大值 Max.	0.97	1.00	0.90	1.00	8.95	20.88	3.62	8.07	6.35	10.71
最小值 Min.	0.00	0.39	0.00	0.69	0.24	5.67	0.15	1.45	1.07	2.89
变异系数 CV/%	73.81	32.91	58.00	23.16	47.22	13.40	39.39	21.16	31.79	28.26

Table 2 Changes of different indexes in germination period for different varieties under salt stress

表 3 大麦材料发芽期发芽势、发芽率、株高性状方差分析

Table 3 Variance analysis of germination energy, germination rate and plant height of barley materials during germination period								
变异来源 Variation source	自由度 df	发芽势		发芽率		株高		
		Germination potential		Germination rate		Plant height		
		均方 MS	F-值 F-value	均方 MS	F-值 F-value	均方 MS	F-值 F-value	
品种间 Varieties	125	0.113	2.329 **	0.088	2.316 **	20.883	1.946 **	
处理间 Treatments	1	14.424	297.817 **	8.130	214.180 **	6550.318	610.427 **	
误差 Error	125	0.048		0.038		10.731		

注: * 表示相关性达到显著($P<0.05$); * * 表示相关性达到极显著($P<0.01$),下同。
Note: * and * * indicate significance at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively, the same below.

表 4 大麦材料萌发期根长、根数方差分析

Table 4 Variance analysis of root length and root number in germinating period of barley					
变异来源 Variation source	自由度 df	根长 Root length		根数 Root number	
		均方 MS	F-值 F-value	均方 MS	F-值 F-value
品种间 Varieties	125	6.011	1.385 **	9.564	2.840 **
处理间 Treatments	1	796.231	183.446 **	2026.437	601.814 **
误差 Error	125	4.340		3.367	

关($P<0.01$);相对株高和根数、相对根长和根数分别存在极显著正相关($P<0.01$)。鉴于此,可以确定这些指标均可用作材料耐盐性鉴定的标准^[15]。

2.1.4 大麦材料发芽期耐盐性综合评价 在对以上大麦发芽期盐胁迫处理单一性状分析和不同指标之间相关性分析的基础上,进一步利用隶属函数分析法,将相对发芽势、相对发芽率、相对株高、相对根长和根数 5 个指标扩展到 [0,1] 闭区间上,将数据标准化处理,并分别计算各耐盐指标的隶属函

表 5 不同指标间相关性分析
Table 5 Correlation analysis of different indexes

指标 Index	相对发 芽势 Relative germination potential	相对 发芽率 Relative germination rate	相对 株高 Relative plant height	相对 根长 Relative root length	相对 根数 Relative root number
相对发芽势 Relative germination energy	1	0.646 **	0.233 **	0.305 **	0.632 **
相对发芽率 Relative germination percentage		1	0.107	0.216 *	0.798 **
相对株高 Relative plant height			1	0.008	0.243 **
相对根长 Relative root length				1	0.231 **
相对根数 Relative root number					1

数值,进行综合聚类分析^[16]。结果如图 1 所示,运用 Pearson 相关性,以平均距离 20 为界,将不同大麦材料划分为 4 个耐盐级别类型,其中类别 I 中包含高度耐盐材料 33 份,类别 II 中包含中度耐盐材料 28 份,类别 III 中包含中度盐敏感材料 16 份,类别 IV 中包含盐敏感材料 49 份。

2.2 不同耐盐性大麦发芽期生理响应特征比较

以上述耐盐性筛选结果为依据,在高度耐盐材料 33 份中选择 1 份 ZDM655 (Num185),在盐敏感材料 49 份中选择 1 份 ZDM222 (Num33),继续进行水培法盐胁迫处理,具体方法如 1.2.2 所述。

2.2.1 盐胁迫对不同耐盐性大麦生物量和含水量的影响 NaCl 胁迫下,对不同耐盐性大麦鲜重、干重、含水量和根冠比进行分析比较,从表 6 可以看出,无论是高耐盐性材料,还是盐敏感性材料,其苗期生物量的分配均不同程度受到盐胁迫的影响^[17]。就幼苗鲜重而言,盐敏感型材料在盐胁迫下的降低幅度远大于高耐盐性材料,与对照相比,分别下降了 11.49% 和 55.48%;高耐盐性材料在盐胁迫下干重与对照无显著差异,且要略高于对照,而盐敏感性材料则显著下降 ($P<0.05$);高耐盐性材料植株含水量在盐胁迫下略低于对照,但差异不显著,而盐敏感性材料则差异显著 ($P<0.05$);盐胁迫下高耐盐性材料的根冠比显著提高 ($P<0.05$),而盐敏感性材料则与对照差异不显著。

2.2.2 盐胁迫对不同耐盐性大麦形态特征的影响

由图 2 可知,不同耐盐大麦幼苗株高、根长、根表面积和根体积均受到盐胁迫的影响,盐敏感性材料

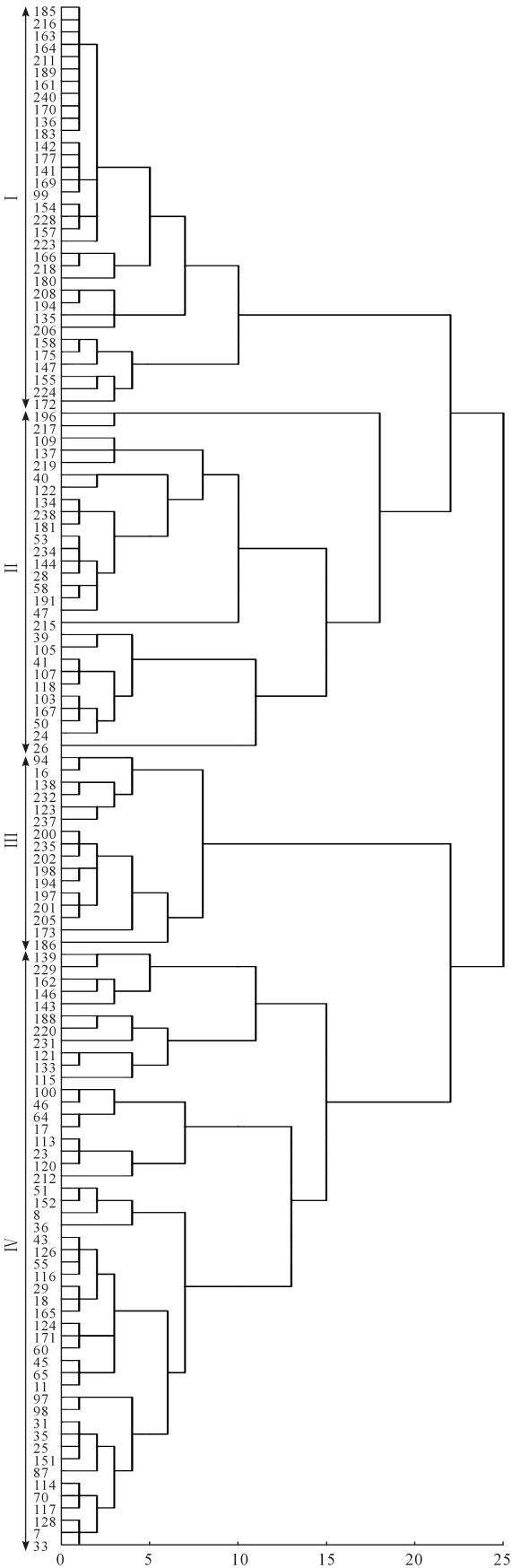


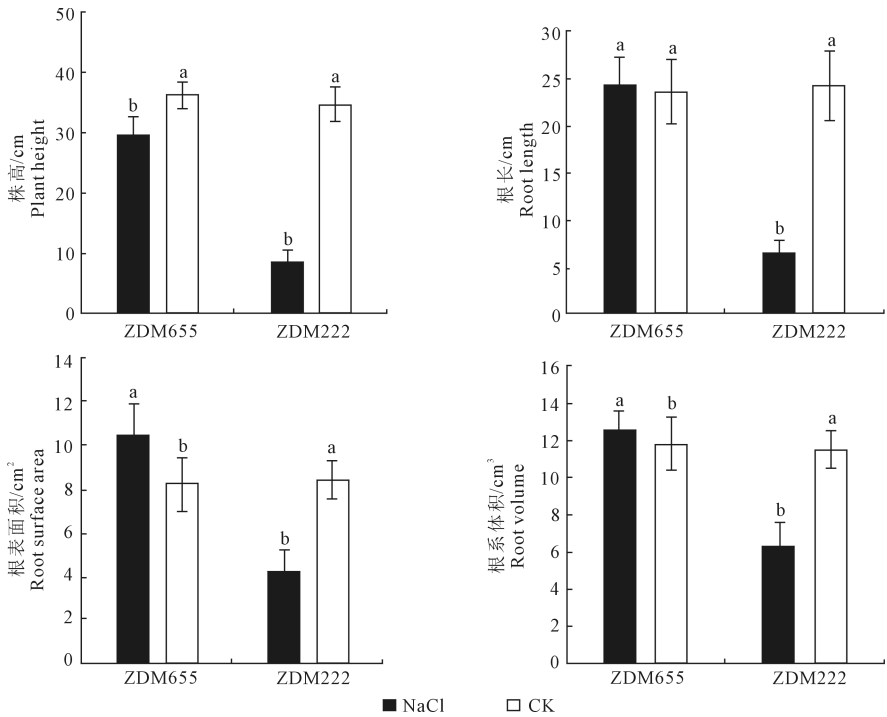
图 1 不同大麦材料耐盐性评价综合聚类

Fig.1 Comprehensive cluster analysis of salt tolerance of different barley varieties

表 6 NaCl 处理下不同耐盐性大麦鲜重、干重、含水量和根冠比的比较

Table 6 Comparison of fresh weight, dry weight, water content and root-shoot ratio of different salt tolerant barley under the NaCl treatment					
材料类型 Material type	处理 Treatment	鲜重/(mg·株 ⁻¹) Fresh weight /(mg·strain ⁻¹)	干重/(mg·株 ⁻¹) Dry weight /(mg·strain ⁻¹)	含水量/% Water content	根冠比/% Root-shoot ratio
高耐盐型 High salt-tolerant type	NaCl	2.85±0.29b	0.45±0.065a	84.23±4.32a	72.33±4.86a
	CK	3.22±0.14a	0.43±0.032a	86.45±5.67a	56.82±3.21b
盐敏感型 Salt sensitive type	NaCl	1.42±0.17b	0.30±0.051b	78.69±5.20b	60.39±4.12a
	CK	3.19±0.22a	0.46±0.644a	85.44±3.91a	57.47±2.84a

注:同列不同小写字母表示不同盐分处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among salt treatments ($P<0.05$).



注:各指标均由平均值±标准误(SE)表示,每组数据3次重复($n=3$),用 Duncan's 法统计各指标差异显著性,同一指标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。
Note: The values are presented as means ± standard error (SE); $n=3$ for all groups. The bars represent the SE. Bars with the same letter are not significantly different at $P<0.05$ according to Duncan's multiple range test, the same below.

图 2 盐胁迫下高耐盐性(ZDM655)、盐敏感性(ZDM222)大麦形态学指标比较

Fig.2 Comparison of morphological indexes of highly salt tolerant barley (ZDM655) and salt sensitive barley (ZDM222) under salt stress

ZDM222 在 NaCl 处理下,幼苗株高、根长、根表面积和根体积与对照相比急剧下降,受盐胁迫抑制作用明显,而高耐盐性材料 ZDM655 的株高与对照相比显著下降($P<0.05$),根长则略有提高,而根表面积和根体积显著增大($P<0.05$),分别增加了 26.97% 和 6.34%,表现出对盐胁迫更具适应性的表型特征^[18]。

2.2.3 盐胁迫对不同耐盐性大麦 Na^+ 、 K^+ 积累的影响 在盐胁迫处理和对照植株中的 Na^+ 、 K^+ 含量测定结果如图 3 所示,与对照相比,200 mmol · L⁻¹ NaCl 培养显著提高了大麦植株中的 Na^+ 含量,但在

高耐盐性材料 ZDM655 中 Na^+ 含量要低于盐敏感性材料 ZDM222,ZDM655 盐胁迫后地上部 Na^+ 含量是对照的 3.64 倍,而 ZDM222 地上部 Na^+ 含量是对照的 8.95 倍,上升幅度远高于 ZDM655;ZDM655 的根系中 Na^+ 含量是对照的 2.55 倍,而 ZDM222 地上部 Na^+ 含量是对照的 2.92 倍,增加幅度同样高于 ZDM655。盐胁迫后高耐盐材料 ZDM655 对 Na^+ 的吸收量较少,从而保持了植株地上部较低的 Na^+ 水平^[19]。

盐胁迫后高耐盐性材料 ZDM655 地上部 K^+ 含量与对照相比呈现出显著提高的趋势($P<0.05$),而

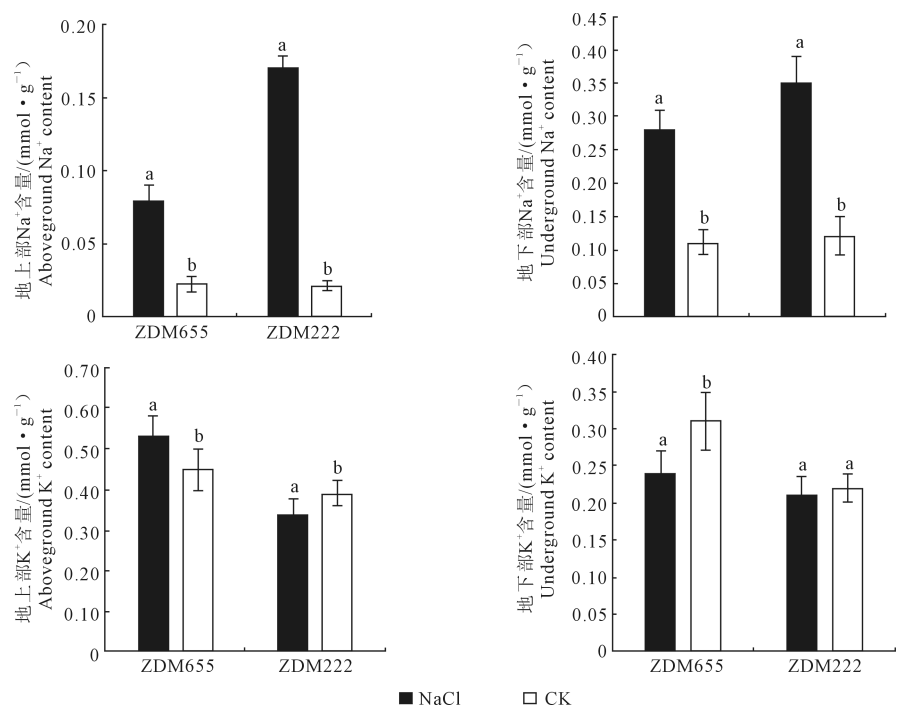


图 3 盐胁迫下高耐盐性(ZDM655)、盐敏感性(ZDM222)大麦 Na⁺、K⁺分配特征比较

Fig.3 Comparison of Na⁺ and K⁺ distribution between high salt tolerant ZDM655 and salt sensitive ZDM222 under salt stress in barley

根系 K⁺含量呈现显著下降趋势 ($P<0.05$) ;与对照相比,盐敏感性材料 ZDM222 在盐胁迫处理后地上部 K⁺含量显著下降 ($P<0.05$),根系 K⁺含量与对照无显著差异^[20]。由此可见,盐胁迫下高耐盐性材料根系吸收培养液 K⁺,进一步运输到地上部,K⁺有效分配的能力要明显强于盐敏感性材料,进而促进了植株在盐胁迫下的正常生长。

3 讨论与结论

3.1 盐胁迫对大麦材料发芽期的影响

盐胁迫是大麦发芽期的重要影响因素,其结果通过许多数量性状指标来反映。Oyiga^[21]、陈新^[22]等研究发现 NaCl 胁迫下对植物的根长和苗长有抑制作用,发芽势和发芽率与萌发期耐盐性关系密切;本实验中,大麦材料发芽期耐盐性存在明显差异,盐胁迫处理后各材料间种子发芽势、发芽率、株高、根长和根数较对比均下降并均达到了极显著差异水平。李先婷等^[23]研究发现大麦耐盐机制存在很大差异,与对照相比,随着盐浓度的增高,地上生物量和株高受到抑制,根系生物量和根冠比增加。同时,高浓度盐分胁迫对根系的伸长和侧根的发育产生抑制作用^[24];苗期盐胁迫处理后,水稻在生长过程中叶片平均死亡率变幅增加,不同的生育期表现出特异性^[25]。本研究发现,盐胁迫下,除株高和

根长、发芽率无相关性以外,其它各指标之间均存在显著或极显著正相关。

3.2 大麦材料发芽期耐盐性综合评价

大麦群体材料发芽期耐盐性差异的多样性是耐盐种质材料筛选的重要基础。范娜等^[26]研究高粱种质资源耐盐性,同样通过综合评价划分不同耐盐等级。本实验采用模糊隶属函数法对材料耐盐性进行综合分析,可将不同大麦材料划分为 4 个耐盐级别类型,其中类别 I 中包含高度耐盐性材料 33 份,类别 II 中包含中度耐盐性材料 28 份,类别 III 中包含中度盐敏感性材料 16 份,类别 IV 中包含盐敏感性材料 49 份。依据发芽势、发芽率、株高、根长和根数等指标综合评价大麦发芽期耐盐性,可以较为准确地对不同大麦材料的耐盐性程度划分等级,为大田生产提供一个参考选择。

3.3 大麦材料发芽期耐盐性生理响应特征

植物根系形态变化是决定根系水分、养分吸收范围和强度变化的重要参数。前人研究表明,发芽期耐盐性体现了种子吸水膨胀能力,其机理是苗期通过拒 Na⁺来抵御渗透胁迫^[27-28],小麦部分通过调节根系 K⁺吸收系统而维持叶片较高的 K⁺/Na⁺比,从而提高其耐盐性^[29]。在本实验中,耐盐性与盐敏感材料相比植株体内含有更少的 Na⁺,说明耐盐性材料拒绝吸收 Na⁺的作用更强;且耐盐材料在盐胁迫

迫下地上部及根系中 Na^+ 积累较少,地上部 K^+ 积累水平较高,有效维持了植株体内离子的平衡,而盐敏感性材料调节植株体内离子平衡的能力较弱。岳小红^[30]研究表明,不同类型盐分胁迫促进了啤酒大麦根表面积和根体积的增加,根冠比也增加。本实验研究发现,高耐盐性材料根表面积和根体积显著增大,表现出对盐胁迫的适应性更强;高耐盐性材料呈现出对盐胁迫更具适应性的表型特征,能够更有效提高根冠比,向根系分配更多的生物量,保持组织含水量。本实验不足之处就是未能测定盐胁迫下幼苗脯氨酸、叶片 SOD、叶绿素等生理指标。

在盐渍化土地生产中,作物发芽期耐盐性强弱是生长的关键,大麦作为耐盐性较强的作物,遗传基础存在很大差异,盐分胁迫对大麦发芽期的生态指标均起抑制作用。而在苗期,由于不同种质耐盐性能力的不同,表现出不同的生理特征,高耐盐性材料通过减少对 Na^+ 吸收,增大根表面积和根体积等来提高耐盐性,具有更好的调节体内离子浓度平衡的能力;盐敏感性材料则相反。同时,采取综合评价可划分不同的耐盐等级和筛选高耐盐种质,为盐渍化土地利用开辟更多途径。

参 考 文 献:

[1] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms [J]. Trends in Plant Science, 2014, 19(6):371-379.

[2] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7):8-14.

[3] 戴伟民, 蔡润. 盐胁迫对番茄幼苗生长发育的影响[J]. 上海农业学报, 2002, 18(1): 58-62.

[4] 吴德志. 西藏野生大麦耐盐种质的发掘及其耐盐机制研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[5] 彭智, 李龙, 柳玉平, 等. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 638-645.

[6] Hanin M, Ebel C, Ngom M, et al. New insights on plant salt tolerance mechanisms and their potential use for breeding [J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7:1787.

[7] 丁同楼, 贾玉辉, 鲍敬, 等. 不同耐盐性小麦根 Na^+ 和 K^+ 的吸收特性[J]. 植物生理学报, 2013, 49(1): 34-40.

[8] 王旭明, 赵夏夏, 黄露莎, 等. 盐胁迫下 4 个不同耐盐基因型水稻 Na^+ , K^+ 积累效应[J]. 热带作物学报, 2018, 39(11): 2140-2146.

[9] 乔海龙, 沈会权, 陈健, 等. 大麦种质耐盐性鉴定及评价[J]. 核农学报, 2015 (1): 153-160.

[10] 柳小宁, 包奇军, 张华瑜, 等. 三种基因型啤酒大麦种子萌发期耐盐性的研究[J]. 作物杂志, 2013 (6): 137-140.

[11] 解松峰, 杜向红, 聂小军, 等. 30 份引进大麦品种(系)苗期耐盐性综合分析[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 127-133.

[12] 陈莎莎, 兰海燕. 植物对盐胁迫响应的信号转导途径[J]. 植物生

理学报, 2011, 47(2): 119-128.

[13] Tavakkoli E, Fatehi F, Rengasamy P, et al. A comparison of hydroponic and soil-based screening methods to identify salt tolerance in the field in barley [J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63 (10):3853-3867.

[14] Abdallah S B, Aung B, Amyot L, et al. Salt stress (NaCl) affects plant growth and branch pathways of carotenoid and flavonoid biosyntheses in *Solanum nigrum* [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(3):72.

[15] 赵海燕, 王建设, 刘林强, 等. 海岛棉苗期盐胁迫下形态学和生理学指标变化[J]. 中国农业科学, 2017, 50(18):3494-3505.

[16] 于崧, 梁海芸, 郭潇潇, 等. 不同基因型绿豆苗期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 223-232.

[17] 张晓晓, 殷小琳, 李红丽, 等. NaCl 胁迫对不同白榆品系生物量及光合作用的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7258-7265.

[18] 王宁, 冯克云, 南宏宇, 等. 甘肃河西走廊棉区棉花萌发期和苗期耐盐性鉴定与评价[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 148-155.

[19] Kiani D, Soltanloo H, Ramezanzpour S S, et al. A barley mutant with improved salt tolerance through ion homeostasis and ROS scavenging under salt stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(3):90.

[20] Assaha D V M, Ueda A, Saneoka H, et al. The role of Na^+ and K^+ transporters in salt stress adaptation in glycophytes [J]. Frontiers in Physiology, 2017, 8:509.

[21] Oyiga B C, Sharma R C, Shen J, et al. Identification and characterization of salt tolerance of wheat germplasm using a multivariable screening approach [J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2016, 202(6):472-485.

[22] 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.

[23] 李先婷, 曹靖, 魏晓娟, 等. NaCl 渐进胁迫对啤酒大麦幼苗生长, 离子分配和光合特性的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(6): 108-116.

[24] West G, Inzé D, Beemster G T S. Cell cycle modulation in the response of the primary root of *Arabidopsis* to salt stress [J]. Plant Physiology, 2004, 135(2):1050-1058.

[25] 吴家富, 杨博文, 向珣朝, 等. 不同水稻种质在不同生育期耐盐鉴定的差异[J]. 植物学报, 2017, 52(1): 77-88.

[26] 范娜, 白文斌, 彭之东, 等. 高粱耐盐种质资源的鉴定与综合评价[J]. 中国农学通报, 2018, 34(10): 82-87.

[27] 彭智, 李龙, 柳玉平, 等. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 638-645.

[28] Galvan-Ampudia C S, Testerink C. Salt stress signals shape the plant root [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2011, 14(3):296-302.

[29] 张华宁, 刘子会, 李国良, 等. 盐胁迫下钾吸收途径的抑制对小麦叶片 K^+ , Na^+ 含量的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1428-1433.

[30] 岳小红, 曹靖, 耿杰, 等. 盐分胁迫对啤酒大麦幼苗生长, 离子平衡和根际 pH 变化的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7373-7380.