

小麦及远缘杂交后代苗期耐盐性综合评价

彭 泽¹, 杨春苗¹, 耿广东¹, 杨 锐¹, 冯 周¹, 张 军¹, 张庆勤¹, 张素勤^{1,2}

(¹ 贵州大学农学院, 贵阳 550025; ² 国家小麦改良中心贵州分中心, 贵阳 550025)

摘要: 对 121 份小麦等材料的耐盐性进行综合评价, 以为小麦耐盐生理、遗传育种等研究提供参考。结果表明, 根据耐盐性将供试材料分为 5 类: 高耐盐材料 (P13、C1009、1710、1713 和 082-1, D 值 0.5877~0.6616); 耐盐材料 (1706、081、0819-1、PSR3628 和 TB1 等 9 份种质, D 值 0.4222~0.5331); 中耐盐材料 (1707、1805、TPF8、1704 和 1712 等 41 份种质, D 值 0.2684~0.3940); 盐敏感材料 (45 份种质, D 值 0.1922~0.2640); 高盐敏感材料 (21 份种质, D 值 0.0504~0.1848)。偏凸山羊草 × 硬粒小麦衍生系中 P13、082-1、081、082-2 材料的 D 值分布在 0.4231~0.6616 之间, 表现为高耐或耐盐。一粒小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系, 提莫菲维小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系的 D 值均值分别为 0.4145 和 0.4106, 显著大于普通小麦群体, 它们总体上表现耐盐。8 个小麦远缘杂交后代群体 D 值均值大于普通小麦群体, 筛选出 P13、1713、082-1、1706 和 081 等耐盐新种质。

关键词: 小麦; 远缘杂种; 苗期; 耐盐; 综合评价

Comprehensive Evaluation of Salt-tolerance at the Seedling Stage in Progeny of Wheat and the Wild Relatives

PENG Ze¹, YANG Chun-miao¹, GENG Guang-dong¹, YANG Rui¹, FENG Zhou¹, ZHANG Jun¹,
ZHANG Qing-qin¹, ZHANG Su-qin^{1,2}

(¹College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025; ²Guizhou Subcenter of
National Wheat Improvement Center, Guiyang 550025)

Abstract: One-hundred twenty-one wheat germplasm accessions derived from distant hybridization were tested for salt-tolerance, in order to provide insight for salt-tolerant physiology, genetics and breeding in wheat. Based on D value, these materials were classified into five categories: highly salt-tolerant (five genotypes including P13, C1009, 1710, 1713 and 082-1, D value from 0.5877 to 0.6616); salt-tolerant (nine genotypes such as 1706, 081, 0819-1, PSR3628, TB1, D value ranged from 0.4222 to 0.5331); moderate salt-tolerant (41 genotypes such as 1707, 1805, TPF8, 1704, 1712, with a D value of 0.2684 to 0.3940); salt-sensitive (45 genotypes, with a D value of 0.1922 to 0.2640), highly salt-sensitive (21 genotypes, with a D value of 0.0504-0.1848). Especially, the D values of P13, 082-1, 081 and 082-2 lines derived from the cross *Aegilops ventricosa* Tausch × durum wheat ranged from 0.4231 to 0.6616, which showed high salt-tolerance or salt-tolerance. The average D values of the derivatives from einkorn wheat × *Avena fatua* L. var. Portugal, and *T. timopheevii* × *Avena fatua* L. var. Portugal were 0.4145 and 0.4106, which were significantly higher than that of common wheat accessions. The average D values of 8 progeny populations from wheat distant crosses were higher than that of common wheat. Finally, a few of new salt-tolerant germplasm accessions (i.e. P13, 1713, 082-1, 1706, 081) were identified.

Key words: *Triticum* L.; wide hybrids; seedling stage; salt tolerance; comprehensive evaluation

收稿日期: 2019-08-29 修回日期: 2019-12-19 网络出版日期: 2020-02-04

URL: <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190829001>

第一作者研究方向为麦类作物遗传育种, E-mail: pz201819@163.com; 杨春苗为共同第一作者

通信作者: 张素勤, 主要从事麦类作物遗传育种工作, E-mail: zsqin2002@163.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31860380); 贵州省科技计划项目 (20185781); 贵州省科学技术基金 (20191110)

Foundation project: The National Natural Science Foundation of China (31860380), The Science and Technology Project of Guizhou Province (20185781), The Science and Technology Foundation of Guizhou Province (20191110)

土壤盐碱化是制约农作物产量的主要因素之一,盐胁迫影响养分运输和分布,造成植物营养失衡,导致作物发育迟缓,植株矮小,严重威胁着我国的粮食生产^[1]。我国各类盐渍土面积约为 $9\,913 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 约占国土面积的 1.03%, 耕地中盐渍化面积为 $920.94 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 占全国耕地面积的 6.62%^[2]。盐渍土作为我国最主要的中低产土壤类型之一,是我国重要的后备土地资源,但是盐渍土理化性质不良,对生长于其上的作物产生不同程度的抑制作用,甚至导致作物死亡,严重影响产量^[3]。通过培育耐盐碱的植物,提高植物的耐盐碱能力是缓解盐碱地对植物影响的一个有效生物措施,具有较好的生态和经济效益,可促进农业的可持续发展^[4-5]。

普通小麦 (*Triticum aestivum* L.) 生长在从热带到温带的广泛环境中,其生产力受到盐渍非生物胁迫的限制^[6]。栽培小麦的野生近缘种存在大量的遗传变异,引进外来物种基因是提高小麦遗传多样性的一种有价值的方法^[7]。McGuire 等^[8]通过耐盐筛选,发现偃麦草属是小麦较好的耐盐基因源。偃麦草属的十倍体长穗偃麦草 (*Elytrigia elongata* (Host) Nevski)^[9]、双倍体长穗偃麦草 (*Elytrigia elongata* (Host) Nevski)^[10]、冰草属的长穗冰草 (*Agropyron elongatum* (Host) P. Beauv.)^[11]、山羊草属^[12]的方穗山羊草 (*Aegilops squarrosa* L.)、柱穗山羊草 (*Ae. cylindrica* Host)、卵穗山羊草 (*Ae. ovata* L.) 等都具有较强耐盐性。含有小片段偃麦草染色体的重组小麦系可以在不影响产量或籽粒品质的情况下提高耐盐性^[13-14],一些小麦-长穗偃麦草双倍体^[15]、硬粒小麦-百萨偃麦草双倍体^[16]表现出较好的耐盐性。Dvořák 等^[17]将“Langdon”二体代换系 DS4D(4B)与圆锥小麦隐性突变体 *phc1phc1* 进行杂交和多次回交,获得了 4D 与 4B 染色体重组的四倍体材料,该新材料的 K^+/Na^+ 比值高于圆锥小麦亲本^[18]。Schachtman 等^[19]、Pritchard 等^[20]将圆锥小麦与粗山羊草杂交合成的六倍体小麦,可以提高面包小麦的耐盐性。引入野生近缘植物的耐盐基因,对小麦耐盐育种具有重要意义。

小麦是我国三大粮食作物之一,也是盐碱地主要栽培作物之一,小麦不同品种(系)间耐盐性存在明显差异,选择耐盐作物品种(系),应用耐盐种

质改良、利用盐渍土具有广阔的应用前景和研究价值^[21-22]。我国大多数麦区小麦出苗后正是土壤返盐时期,对小麦生长具有明显影响,在实际生产中苗期的耐盐性显得更加重要,苗期耐盐性是保证苗全、苗齐的基础,因此苗期的盐胁迫对小麦生长有明显的影响^[23]。本试验采用基质培养对小麦及远缘杂交后代等材料进行苗期耐盐性鉴定,筛选耐盐性强的小麦种质,为小麦耐盐遗传育种及分子机理等深入研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验选取代表不同小麦及远缘杂交后代基因型的 121 份典型材料(详见 <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190829001>, 附表 1)进行耐盐性鉴定。供试材料包括普通小麦 61 份,四倍体(AABB)小麦 7 份,黑麦 2 份,小黑麦 3 份,提莫非维小麦及其衍生系 3 份,一粒小麦 × 葡萄牙野燕麦稳定株系 3 份,提莫非维小麦 × 二倍体野燕麦稳定株系 3 份,提莫非维小麦 × 葡萄牙野燕麦稳定株系 2 份,提莫非维小麦 × 光稃野燕麦稳定株系 4 份,野生二粒小麦 × 二倍体野燕麦稳定株系 3 份,以色列野生二粒小麦 × 光稃野燕麦稳定株系 6 份,小黑麦衍生系 2 份,偏凸山羊草 × 硬粒小麦稳定株系 17 份,小麦 × 偃麦草稳定株系 5 份。试验材料保存于国家小麦改良中心贵州分中心实验室。

1.2 盐胁迫处理

挑选饱满且大小均匀一致的小麦种子,用 70% 酒精消毒 10 min 后用蒸馏水反复清洗干净。将种子转入铺两层湿润滤纸的培养皿中,发芽后挑选长势一致幼苗种植于 24 孔穴盘的草炭基质中,每穴种 5 棵,每份材料播种 3 穴。发芽后第 7 天用 180 mmol/L NaCl 溶液进行盐胁迫处理,以蒸馏水培养对照,置于 20 °C /16 h 光照、15 °C /8 h 黑暗人工气候箱中培养,每天定时用蒸馏水补充蒸发水量。试验 3 次重复。

1.3 测量指标

试验第 21 天小麦 2 叶 1 心期时,选取长势整齐一致的植株,测量根长(RL, root length)、苗鲜重(SFW, shoot fresh weight)及苗干重(SDW, shoot dry weight)。试验每重复测量 10 棵苗,3 次重复。

根据耐盐系数公式^[24]计算相对根长(RRL, relative root length)、相对苗鲜重(RSFW, relative shoot fresh weight)和相对苗干重(RSDW, relative shoot dry weight),根冠比(RSR, root-shoot ratio)、相对根冠比(RRSR, relative root-shoot ratio)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行耐盐隶属函数值的计算,并计算耐盐隶属函数综合值^[25-27]。

$\mu(X_{ik}) = (X_{ik} - X_{ik \min}) / (X_{ik \max} - X_{ik \min}), k=1, 2, 3, \dots, n;$

$W_k = CV_k / \sum_{k=1}^n CV_k;$

$D_i = \sum [\mu(X_{ik}) \cdot W_k]$ 。

式中 X_{ik} 为种质 i 在性状 k 的观测值; $X_{ik \max}$ 、 $X_{ik \min}$ 分别为性状 k 观测值中的最大值和最小值; $\mu(X_{ik})$ 为各观测值 X_{ik} 的隶属函数值。 CV_k 为性状 k 的变异系数。 W_k 为 CV_k 在总变异中所占比率,表示性状 k 在所有性状中的权重。 D_i 表示种质 i 包含所有性状的加权隶属函数值。

采用 SPSS 19.0 软件进行组内连接聚类法(Within-group linkage)、平方欧氏距离(Squared Euclidean Distance)聚类分析^[21]。

2 结果与分析

2.1 基于单一指标的耐盐性评价

运用隶属函数公式计算 RRL、RSFW、RSDW、RRSR 4 个耐盐系数的隶属函数值(详见 <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190829001>, 附表 2), 从单个耐盐系数隶属函数值分析, 根长隶属函数值排名前 5 位(耐盐)的材料为 1710、CT、YXH27、1712、0868, 其中 1710 表现最耐盐, 且与其他 4 份材料差距较大; 排名末 5 位(盐敏感)的材料为 XHM、

PY/2wo、Spelta、WG1-4、W2, 其中 W2 最小。苗鲜重隶属函数值前 5 位的材料为 1713、C1009、1710、1706、1720, 其中 1713 表现最耐盐; 末 5 位的材料为 Y1901-1、Spelta、W2、YXH27、WG1-4, 其中 WG1-4 最小。苗干重隶属函数值前 5 位的材料为 1713、PSR3628、TB1、C1009、1805, 其中 1713 表现最耐盐; 末 5 位材料为 1007、W2、Spelta、YXH27、1719, 其中 1719 最低。根冠比隶属函数值前 5 位材料为 P13、082-1、C1009、Spelta、081, 其中 P13 表现最耐盐; 末 5 位材料为 8-2、C1016、3-4、1721、W2, 其中 W2 表现最盐敏感。通过比较不同指标的隶属函数, 不同指标的隶属函数最大值、最小值不尽相同, 因此须综合考虑不同指标权重, 进一步通过加权隶属函数综合值进行耐盐性评价。

2.2 耐盐性综合评价

通过变异系数、权重值(表 1)计算 RRL、RSFW、RSDW、RRSR 4 个耐盐系数的加权隶属函数值(D 值)进行耐盐性综合评价(表 2)。供试材料的 D 值广泛分布在 0.0504~0.6616 之间, 说明材料间存在广泛的耐盐性差异。RRL、RSFW、RSDW、RRSR 的隶属函数值之间都呈现极显著正相关(表 3), 说明这几个耐盐系数之间存在密切相关性, 可以作为小麦耐盐性的评价指标。D 值与 RRL、RSFW、RSDW、RRSR 都呈极显著正相关性, D 值越大, 各指标隶属函数值越大, 耐盐性越强, 因此可以通过加权隶属函数值进行耐盐性综合评价。D 值排名前 5 位(耐盐)的材料为 P13、C1009、1710、1713、082-1。D 值排名最后 5 位(盐敏感)的材料为 W2、WG1-4、1719、1721 和 8-2。

表 1 供试材料的隶属函数值统计分析

Table 1 Statistics of subordinate function values of the tested materials

参数 Parameter	$\mu(RRL)$	$\mu(RSFW)$	$\mu(RSDW)$	$\mu(RRSR)$
均值 Average value	0.3531	0.3398	0.4266	0.1496
标准差 Standard deviation	0.1616	0.1721	0.1605	0.1310
变异系数 Variation coefficient	0.4578	0.5065	0.3761	0.8753
权重 Weight	0.2066	0.2286	0.1698	0.3950

表 2 供试材料的加权隶属函数 (D) 值
Table 2 Weighted subordinate function (D) values of the tested materials

材料 Materials	D 值 D values	材料 Materials	D 值 D value	材料 Materials	D 值 D value	材料 Materials	D 值 D value
P13	0.6616	084	0.3296	0878-7	0.2524	C081	0.2103
C1009	0.6502	C1012	0.3254	3-3	0.2510	GX2	0.2099
1710	0.6348	1003	0.3208	C091	0.2491	087	0.2071
1713	0.6173	1708	0.3164	C0810	0.2476	1722-2	0.2045
082-1	0.5877	0868	0.3126	1703	0.2471	1714	0.2023
1706	0.5331	GX3	0.3093	TGF3	0.2462	C0812	0.2005
081	0.4743	1716	0.3044	Spelta	0.2458	086-3	0.1984
0819-1	0.4652	C7	0.3030	1702	0.2455	TG-1	0.1964
PSR3628	0.4619	0923p	0.2987	TG-3	0.2428	XHM	0.1922
TB1	0.4610	1005	0.2978	0834	0.2408	C0811	0.1848
CT	0.4590	0813	0.2977	TG-2	0.2396	Blosky	0.1835
TPBC1	0.4338	C1011	0.2951	C083	0.2392	C0822-1	0.1834
082-2	0.4231	1711	0.2936	0878-8	0.2380	RT4	0.1819
GN21	0.4222	PY	0.2881	0878	0.2362	Sa20X	0.1818
1707	0.3940	0929	0.2879	YXH27	0.2347	1722-1	0.1784
1805	0.3933	C1004	0.2865	C084	0.2310	9-2	0.1740
TPF8	0.3876	C0814	0.2844	086-14	0.2298	1718	0.1736
1704	0.3835	086-2	0.2836	0837	0.2297	C0823-1	0.1698
1712	0.3765	CS	0.2781	TBA	0.2295	C0815	0.1662
0841	0.3755	1002	0.2779	0885-1	0.2281	088	0.1627
P7-5	0.3754	0923DY	0.2758	0885	0.2257	1007	0.1620
C1003	0.3639	1715	0.2751	C085	0.2254	PY/2wo	0.1567
1720	0.3589	C082	0.2741	C0820	0.2233	C087	0.1557
T1-2	0.3532	C1013	0.2684	C1016	0.2222	C0827	0.1538
0837-1	0.3524	C1002	0.2640	Y1901-1	0.2204	3-4	0.1536
C1008	0.3474	P1-1	0.2602	S20	0.2204	8-2	0.1420
C1007	0.3471	C0813	0.2592	C0819	0.2181	1721	0.1360
C1010	0.3410	1705	0.2586	C0826	0.2164	1719	0.1039
C1004-F	0.3399	083	0.2564	C086	0.2147	WG1-4	0.0840
P7-2	0.3322	0837-2	0.2556	C0821	0.2145	W2	0.0504
0923	0.3317						

表 3 隶属函数值与 D 值的相关性分析
Table 3 Correlation analysis between subordinate function value and D value

相关系数 Correlation coefficient	μ (RRL)	μ (RSFW)	μ (RSDW)	μ (RRSR)	D 值 D value
μ (RRL)	1				
μ (RSFW)	0.448**	1			
μ (RSDW)	0.397**	0.771**	1		
μ (RRSR)	0.338**	0.299**	0.254**	1	
D 值	0.699**	0.816**	0.750**	0.714**	1

** 表示在 0.01 水平上显著相关
** showed significant correlation at 0.01 level

2.3 不同类群种质的耐盐性评价

普通小麦 C1009、1710 的 D 值分别为 0.6502、0.6348，表现出较强的耐盐性，与 D 值处于 0.2005~0.3254 范围的大多数普通小麦的差异较

大；盐敏感普通小麦 8-2、3-4、C0827 的 D 值分别为 0.1420、0.1536、0.1538，其中 8-2 小麦最低。偏凸山羊草 × 硬粒小麦衍生系的 D 值在 0.1567~0.6616 之间，表现较好的 3 份材料是 P13、082-1、081，其 D 值分别为 0.6616、0.5877、0.4743。一粒小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系中 1706 耐盐，D 值为 0.5331。小麦与偃麦草杂交后代中 PSR3628 与 1805 较耐盐，其 D 值分别为 0.4619、0.3933。提莫菲维小麦及其衍生系中 TB1 品系较耐盐，其 D 值为 0.4610。提莫菲维小麦与不同野燕麦远缘杂交后代中，提莫菲维小麦 × 葡萄牙野燕麦后代中 TPBC1、TPF8 材料的耐盐性好，D 值分别为 0.4338、0.3876。在黑麦、小黑麦以及黑麦与燕麦杂交后代中，D 值最高的是小黑麦材料 CT，D 值为 0.4590。在以色列野生二粒小麦与光稃野燕麦、二倍体野燕麦杂交后代中，

1713、1704、084 品系表现耐盐, D 值分别为 0.6173、0.3835、0.3296。7 份四倍体(AABB)小麦的 D 值为 0.0504~0.2233, 均表现盐敏感。

2.4 供试材料的耐盐性分级评价

基于 D 值(表 2)进行聚类分析, 结果发现在欧氏距离为 3.5 时可将供试材料分为 5 个类群(图 1),

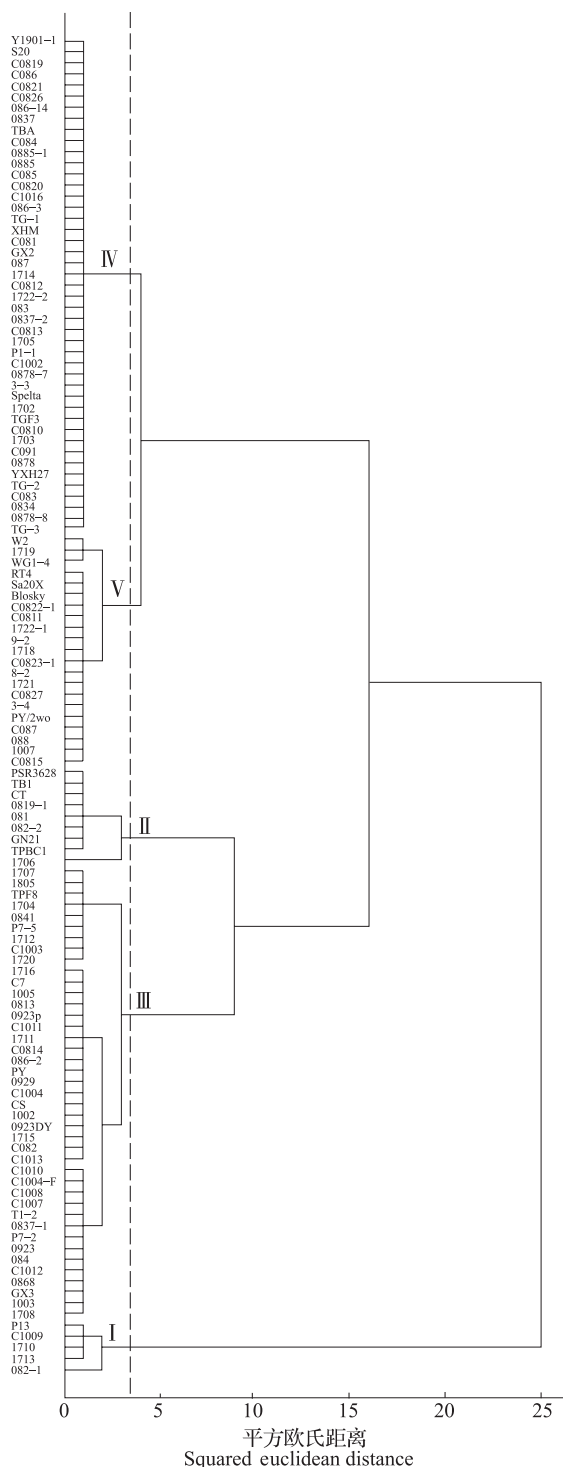


图 1 基于 D 值聚类分析法的耐盐性评价

Fig. 1 Evaluation of salt-resistance of the tested materials based on D-value clustering analysis

将其进行耐盐分级(表 4)。第 I 类群为高耐盐材料, 包括 P13、C1009、1710、1713、082-1 共 5 份材料; 第 II 类群为耐盐材料, 包括 1706、081、0819-1、PSR3628、TB1 等 9 份材料; 第 III 类群为中度耐盐材料, 包括 1707、1805、TPF8、1704 和 1712 等 41 份材料; 第 IV 类群为盐敏感材料, 包括 C1002、P1-1、C0813、1705 和 083 等 45 份材料; 第 V 类群为高度盐敏感材料, 包括 8-2、1721、1719、WG1-4 和 W2 等 21 份材料。本试验 D 值最高的小麦材料是 P13, 来源于偏凸山羊草与硬粒小麦远缘杂交。普通小麦 D 值最高的材料是 C1009, 是山东聊城主栽小麦品种。

3 讨论

小麦苗期根系对盐胁迫最为敏感。研究发现盐胁迫对根部的抑制程度大于对地上部的影响^[28-30]。本试验采用根长、根冠比等耐盐指标对 121 份供试材料进行苗期耐盐性评价。陈新等^[31]以 4 种指标为依据进行裸燕麦耐盐评价, 发现单个指标的耐盐性排序并不一致, 认为单一指标并不能对作物的耐盐性进行全面有效地评价, 进行耐盐性综合评价十分必要。本试验对单个耐盐系数隶属函数值进行耐盐性排序, 获得与陈新等^[31]相似的结果, 因此需进行耐盐性综合评价。聚类分析法、平均隶属函数法、灰色关联度分析法、总级别值法、五级评分法等是综合分析的常用方法, 不过很多评价方法中不同指标占比一致, 没有侧重重要指标。加权隶属函数法通过不同权重来确定各指标在隶属函数中的占比, 最后通过 D 值可以更有效、合理地评价作物的耐盐性^[31-32]。本试验采取加权隶属函数法, 并进行聚类分析, 对 121 份供试材料进行了耐盐性综合评价, 并把它分为高度耐盐、耐盐、中度耐盐、敏感以及高度敏感 5 种类型。

普通小麦(*Triticum aestivum* L., AABBDD)比圆锥小麦(AABB)具有更强的耐盐性^[33-34]。小麦 D 基因组中存在着许多耐盐相关的基因, Gorham 等^[35]认为控制小麦植物叶片中 K^+/Na^+ 比值的基因位于 4D 染色体的长臂上, 并得到 Dubcovsky 等^[36]、Luo 等^[37]的进一步验证。本试验发现四倍体小麦(AABB)的 D 值(0.2012)与普通小麦(0.2671)相差较大, 耐盐性远低于普通小麦(详见 <http://doi.org.10.13430/j.cnki.jprg.20190829001>, 附图 1), 这与前人的研究结果一致^[33-34, 38]。Gorham^[39]通过对黑麦、小黑麦材料进行耐盐性评价, 表明在高盐浓度下, 小黑麦比黑麦材料的耐盐性强, 其中 2 个

表 4 供试材料的耐盐性分级
Table 4 Classification of salt-tolerance in the tested materials

级别 Grade	D 值范围 Range of D value	耐盐性 Salt tolerance	材料数量 No. of material	材料名称 Material name
1	0.5877~0.6616	高耐	5	P13 C1009 1710 1713 082-1
2	0.4222~0.5331	耐盐	9	1706 081 0819-1 PSR3628 TB1 CT TPBC1 082-2 GN21
3	0.2684~0.3940	中耐	41	1707 1805 TPF8 1704 1712 0841 P7-5 C1003 1720 T1-2 0837-1 C1008 C1007 C1010 C1004-F P7-2 0923 084 C1012 1003 1708 0868 GX3 1716 C7 0923p 1005 0813 C1011 1711 PY 0929 C1004 C0814 086-2 CS 1002 0923DY 1715 C082 C1013
4	0.1922~0.2640	敏感	45	C1002 P1-1 C0813 1705 083 0837-2 0878-7 3-3 C091 C0810 1703 TGF3 Spelta 1702 TG-3 0834 TG-2 C083 0878-8 0878 YXH27 C084 086-14 0837 TBA 0885-1 0885 C085 C0820 C1016 Y1901-1 S20 C0819 C0826 C086 C0821 C081 GX2 087 1722-2 1714 C0812 086-3 TG-1 XHM
5	0.0504~0.1848	高敏感	21	C0811 Blosky C0822-1 R74 Sa20X 1722-1 9-2 1718 C0823-1 C0815 088 1007 PY/2wo C087 C0827 3-4 8-2 1721 1719 WG1-4 W2

小黑麦品系的耐盐性接近大麦。本试验小黑麦也表现出比黑麦更强的耐盐性。

小麦及其近缘种的野生亲缘关系是抗逆性的重要来源^[40],如耐逆、抗病虫、抗倒伏以及高蛋白等基因,通过远缘杂交可以打破种属间自然存在的生殖隔离,把两个物种经过长期进化积累的有益性状重新组合,以形成新的产量、品质和对环境胁迫的抗(耐)等优良性状^[41-42]。栽培小麦经过多年种植驯化,遗传背景变窄,需要利用近缘属种等拓宽遗传基础,提高盐胁迫的耐受性,而黑麦属、山羊草属、偃麦草属等都含有宝贵的耐盐基因。山羊草属中拟斯卑尔脱山羊草^[43]、粗山羊草^[44],偃麦草属中长穗偃麦草^[45]、百萨偃麦草^[46]等是小麦耐盐育种中耐盐基因的潜在提供者。本试验的 8 个远缘杂交后代群体的 D 值均值大于普通小麦群体,表明采用远缘杂交技术将小麦近缘种属中的耐盐基因转入小麦,从而提高了小麦的耐盐性。通过对各供试群体 D 值的对比分析(详见 <http://doi.org/10.13430/j.cnki.jpgr.20190829001>, 附图 1),发现它们的耐盐性依次表现为:一粒小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系 > 提莫非维小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系 > 提莫非维小麦及其衍生系 > 小黑麦 > 偏凸山羊草 × 硬粒小麦衍生系 > 野生二粒小麦 × 二

倍体野燕麦衍生系 > 以色列野生二粒小麦 × 光稃野燕麦衍生系 > 小麦 × 偃麦草衍生系 > 普通小麦 > 黑麦 > 提莫非维小麦 × 二倍体野燕麦衍生系 > 提莫非维小麦 × 光稃野燕麦衍生系 > 四倍体小麦 > 小黑麦衍生系。一粒小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系的 D 值均值最高,提莫非维小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系次之,它们的 D 值分别为 0.4145 和 0.4106,都在 0.40 以上。提莫非维小麦及其衍生系、小黑麦、偏凸山羊草 × 硬粒小麦衍生系的 D 值均值分别为 0.3478、0.3425、0.3367,而普通小麦的 D 值均值为 0.2671。P13、1713 和 082-1 材料表现为高度耐盐,其中 P13 和 082-1 是偏凸山羊草 × 硬粒小麦后代株系,表现出了亲本偏凸山羊草耐盐的特性^[47]。小麦与偃麦草杂交后代 PSR3628 与 1805 品系,提莫非维小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系 TPBC1 等材料都表现出较好的耐盐性。D 值前 25 位材料中,17 份(68%)材料属于远缘杂交后代,其中表现最好的是偏凸山羊草 × 硬粒小麦衍生系(P13、082-1、082-2、081、0841、P7-5 和 0837-1),以及小麦 × 偃麦草衍生系(PSR3628、1805)。本试验对小麦及其众多远缘杂交后代材料进行了耐盐性综合评价和筛选,筛选出多份包括偏凸山羊草 × 硬粒小麦衍生系 P13、082-1、081,以色列野生二粒小

麦 × 光稃野燕麦衍生系 1713, 一粒小麦 × 葡萄牙野燕麦衍生系 1706 等耐盐新种质, 可为小麦远缘杂交后代的开发利用及耐盐遗传育种等提供参考。

参考文献

- [1] 刘梅, 郑青松, 刘兆普, 郭世伟. 盐胁迫下氮素形态对油菜和水稻幼苗离子运输和分布的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 181-189
Liu M, Zheng Q S, Liu Z P, Guo S W. Effects of nitrogen forms on transport and accumulation of ions in canola (*B. napus* L.) and rice (*Oryza sativa* L.) under saline stress. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(1): 181-189
- [2] 王遵亲. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993: 400-515
Wang Z Q. Saline soil in China. Beijing: Science Press, 1993: 400-515
- [3] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125-130
Yang Z, Wang B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125-130
- [4] 王俭珍, 刘倩, 高妮妮, 柳旭. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577
Wang Q Z, Liu Q, Gao Y N, Liu X. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5565-5577
- [5] Munns R, James R A. Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat. Plant and Soil, 2003, 253: 201-218
- [6] Umezawa T, Shimizu K, Kato M, Ueda T. Enhancement of salt tolerance in soybean with NaCl pretreatment. Physiologia Plantarum, 2000, 110: 59-63
- [7] Jiang J, Friebe B, Gill B S. Recent advances in alien gene transfer in wheat. Euphytica, 1994, 73(3): 199-212
- [8] McGuire P E, Dvořák J. High salt-tolerance potential in wheatgrasses. Crop Science, 1981, 21(5): 702-705
- [9] Guo Q, Meng L, Mao P C, Tian X X. Salt tolerance in two tall wheatgrass species is associated with selective capacity for K^+ over Na^+ . Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(1): 1708-1716
- [10] Hussein Z, Dryanova A, Maret D, Gulick P J. Gene expression analysis in the roots of salt-stressed wheat and the cytogenetic derivatives of wheat combined with the salt-tolerant wheatgrass, *Lophopyrum elongatum*. Plant Cell Reports, 2014, 33(1): 189-201
- [11] Moxley M G, Berg W A, Barrau E M. Salt tolerance of five varieties of wheatgrass during seedling growth. Journal of Range Management, 1978, 31(1): 54-55
- [12] Farooq S, Niaz M L K, Iqbal N, Shan T M. Salt tolerance potential of wild resources of the tribe Triticeae. Plant and Soil, 1989, 119(2): 255-260
- [13] Pienaar R D V. Wheat × *Thinopyrum* Hybrids//Biotechnology in agriculture and forestry, Vol. 13. Berlin: Springer-Verlag, 1990: 167-217
- [14] Fedak G. Molecular aids for integration of alien chromatin through wide crosses. Genome, 1999, 42(4): 584-591
- [15] Omielan J A, Epstein E, Dvořák J. Salt tolerance and ionic relations of wheat as affected by individual chromosomes of salt-tolerant *Lophopyrum elongatum*. Genome, 1991, 34: 961-974
- [16] King I P, Forster B P, Law C C, Cant K A, Orford S E, Gorham J, Reader S, Miller T E. Introgression of salt-tolerance genes from *Thinopyrum bessarabicum* into wheat. New Phytologist, 1997, 137: 75-81
- [17] Dvořák J, Gorham J. Methodology of gene transfer by homoeologous recombination in *Triticum turgidum*: transfer of K^+/Na^+ discrimination from *Triticum aestivum*. Genome, 1992, 35: 639-646
- [18] Dvořák J, Noaman M M, Goyal S, Gorham J. Enhancement of the salt tolerance of *Triticum turgidum* L. by the *Kna1* locus transferred from the *Triticum aestivum* L. chromosome 4D by homoeologous recombination. Theoretical and Applied Genetics, 1994, 87: 872-877
- [19] Schachtman D P, Lagudah E S, Munns R. The expression of salt tolerance from *Triticum tauschii* in hexaploid wheat. Theoretical and Applied Genetics, 1992, 84: 714-719
- [20] Pritchard D J, Hollington P A, Davies W P, Gorham J, Diaz de Leon J L, Mujeeb-Kazi A. K^+/Na^+ discrimination in synthetic hexaploid wheat lines: transfer of the trait for K^+/Na^+ discrimination from *Aegilops tauschii* into a *Triticum turgidum* background. Cereal Research Communications, 2002, 30: 261-267
- [21] 阮建, 李娜娜, 崔海燕, 张斌, 宫永超, 丁汉凤, 彭振英. 50 个小麦品种的苗期耐盐性比较. 山东农业科学, 2017, 49(4): 5-9, 20
Ruan J, Li N N, Cui H Y, Zhang B, Gong Y C, Ding H F, Peng Z Y. Salt-tolerance comparison of fifty wheat varieties at seedling stage. Shandong Agricultural Sciences, 2017, 49(4): 5-9, 20
- [22] 王善仙, 刘宛, 李培军, 吴海燕. 盐碱土植物改良研究进展. 中国农学通报, 2011, 27(24): 1-7
Wang S X, Liu W, Li P J, Wu H Y. Advances of researches in plant-improvement of saline-alkaline soil. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 1-7
- [23] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价. 作物学报, 2005, 31(1): 58-64
Ma Y Q, Weng Y J. Evaluation for salt tolerance in spring wheat cultivars introduced from abroad. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(1): 58-64
- [24] 胡思远. 小麦-滨麦异代换系芽期与苗期抗旱、耐盐性鉴定评价. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015
Hu S Y. Appraisal of drought and salt resistance of *Triticum-Leymus* substitution alien at germination and seedling stages. Yangling: Northwest A&F University, 2015
- [25] 何雪银, 文仁来, 吴翠荣, 周锦国. 模糊隶属函数法对玉米苗期抗旱性的分析. 西南农业学报, 2008, 21(1): 52-56
He X Y, Wen R L, Wu C R, Zhou J G. Analysis of maize drought resistance at seeding stage by fuzzy subordination method. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(1): 52-56
- [26] 苏国兴, 洪法水. 桑品种耐盐性的隶属函数法之评价. 江苏农业学报, 2002, 18(1): 42-47

- Su G X, Hong F S. Evaluation of salt tolerance for partial mulberry varieties with subordinate function. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2002, 18(1): 42-47
- [27] 陈新, 吴斌, 张宗文. 燕麦种质资源重要农艺性状适应性和稳定性评价. *植物遗传资源学报*, 2016, 17(4): 577-585
- Chen X, Wu B, Zhang Z W. Evaluation of adaptability and stability for important agronomic traits of oat (*Avena* spp.) germplasm resources. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2016, 17(4): 577-585
- [28] 蔺吉祥, 李晓宇, 唐佳红, 张召军, 李卓琳, 高战武, 穆春生. 盐碱胁迫对小麦种子萌发、早期幼苗生长及 Na^+ 、 K^+ 代谢的影响. *麦类作物学报*, 2011, 31(6): 1148-1152
- Lin J X, Li X Y, Tang J H, Zhang Z J, Li Z L, Gao Z W, Mu C S. Effects of salt and alkali stresses on seed germination, early seedling growth and the metabolize of Na^+ and K^+ in shoots of wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(6): 1148-1152
- [29] 张巧凤, 陈宗金, 吴纪中, 蒋彦婕, 杨继书, 蔡士宾. 小麦种质芽期和苗期的耐盐性鉴定评价. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(4): 620-626
- Zhang Q F, Chen Z J, Wu J Z, Jiang Y J, Yang J S, Cai S B. Screening for salinity tolerance at germination and seedling stages in wheat germplasm. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14(4): 620-626
- [30] 李剑峰, 樊哲儒, 张跃强, 王重, 张宏芝. 春小麦种质芽期和苗期耐盐性鉴定. *新疆农业科学*, 2014, 51(9): 1583-1590
- Li J F, Fan Z R, Zhang Y Q, Wang Z, Zhang H Z. Screening for salt-resistance at germination and seeding stages of spring wheat germplasm. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(9): 1583-1590
- [31] 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. *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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10): 2038-2046
- [32] 彭智, 李龙, 柳玉平, 刘惠民, 景蕊莲. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价. *植物遗传资源学报*, 2017, 18(4): 638-645
- Peng Z, Li L, Liu Y P, Liu H M, Jing R L. Evaluation of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(4): 638-645
- [33] Yang C W, Zhao L, Zhang H K, Yang Z Z, Wang H, Wen S S, Zhang C Y, Rustgi S, Von Wettstein D, Liu B. Evolution of physiological responses to salt stress in hexaploid wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(32): 11882-11887
- [34] Weimberg R. Modification of foliar solute concentrations by calcium in two species of wheat stressed with sodium chloride and/or potassium chloride. *Physiologia Plantarum*, 1988, 73: 418-425
- [35] Gorham J, Hardy C, Wyn Jones R G, Joppa L R, Law C N. Chromosomal location of a K/Na discrimination character in the D genome of wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 1987, 74: 584-588
- [36] Dubcovsky J, Santa María G, Epstein E, Luo M C, Dvořák J. Mapping of the K^+/Na^+ discrimination locus *Kna1* in wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 1996, 92: 448-454
- [37] Luo M C, Dubcovsky J, Goyal S, Dvořák J. Engineering of interstitial foreign chromosome segments containing the K^+/Na^+ selectivity gene *Kna1* by sequential homoeologous recombination in durum wheat. *Theoretical and Applied Genetics*, 1996, 93: 1180-1184
- [38] Rawson H M, Richards R A, Munns R. An examination of selection criteria for salt tolerance in wheat, barley and *Triticale* genotypes. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1988, 39: 759-772
- [39] Gorham J. Salt tolerance in the *Triticeae*: Ion discrimination in rye and *Triticale*. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41: 609-614
- [40] Friebe B, Jiang J M, Raupp W J, McIntosh R A, Gill B S. Characterization of wheat-alien translocations containing resistance to disease and pests: Current status. *Euphytica*, 1996, 91: 59-87
- [41] 董玉琛, 郑殿升. 中国小麦遗传资源. 北京: 中国农业出版社, 2000: 149-206
- Dong Y C, Zheng D S. Wheat genetic resources in China. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 149-206
- [42] 邓衍明, 叶晓青, 余建明, 汤日圣. 植物远缘杂交育种研究进展. *华北农学报*, 2011, 26(S): 52-55
- Deng Y M, Ye X Q, She J M, Tang R S. The research progress on distant hybridization of plant breeding. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S): 52-55
- [43] Sadat Noori S A. Assessment for salinity tolerance through intergeneric hybridisation: *Triticum durum* × *Aegilops speltoides*. *Euphytica*, 2005, 146: 149-155
- [44] Gurmani A R, Khan S U, Mabood F, Ahmed Z, Butt S J, Din J, Mujeeb-Kazi A, Smith D. Screening and selection of synthetic hexaploid wheat germplasm for salinity tolerance based on physiological and biochemical characters. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2014, 16: 681-690
- [45] Chen S Y, Xia G M, Quan T Y, Xiang F N, Jin Y, Chen H M. Introgression of salt-tolerance from somatic hybrids between common wheat and *Thinopyrum ponticum*. *Plant Science*, 2004, 167: 773-779
- [46] 庄丽芳, 亓增军, 英加, 陈佩度, 刘大钧. 普通小麦-百萨偃麦草 (*Thinopyrum bessarabicum*) 二体异附加系的选育与鉴定. *遗传学报*, 2003, 30(10): 919-925
- Zhuang L F, Qi Z J, Ying J, Chen P D, Liu D J. Development and identification of a set of *Triticum aestivum*-*Thinopyrum bessarabicum* disomic alien addition lines. *Journal of Genetics and Genomics*, 2003, 30(10): 919-925
- [47] Garcia P M, Parra-Quijano M, Iriondo J M. Identification of ecogeographical gaps in the Spanish *Aegilops* collections with potential tolerance to drought and salinity. *PeerJ Life & Environment*, 2017, 5(5): e3494