

小麦芽期和苗期耐盐性综合评价

彭智¹, 李龙², 柳玉平², 刘惠民¹, 景蕊莲²

(¹山西大学生物工程学院, 太原 030000; ²中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要:土壤盐渍化严重影响小麦生产, 提高小麦耐盐性是应对土壤盐渍化的主要途径之一, 耐盐种质资源是耐盐性遗传改良的材料基础。本研究以小麦为材料, 筛选芽期和苗期耐盐性鉴定评价的适宜 NaCl 浓度, 明确了小麦芽期耐盐性鉴定的最适 NaCl 溶液浓度为 1.2%, 苗期耐盐性鉴定的最适土壤 NaCl 浓度为 0.8%。用该盐浓度胁迫处理 321 份小麦材料, 获得芽期高耐盐材料 21 份, 占供试材料的 6.5%; 苗期高耐盐材料 18 份, 占供试材料的 5.6%; 芽期和苗期均为高耐盐的材料 2 份, 分别是中作 60115 和冀麦一号。

关键词:小麦; 耐盐鉴定; 主成分分析; 聚类分析

Evaluation of Salinity Tolerance in Wheat (*Triticum aestivum*) Genotypes at Germination and Seedling Stages

PENG Zhi¹, LI Long², LIU Yu-ping², LIU Hui-min¹, JING Rui-lian²

(¹College of Bioengineering, University of Shanxi, Taiyuan 030006;

²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Soil salinization seriously impacts wheat (*Triticum aestivum* L.) production. Improving salinity tolerance is one of the main approaches responding to the problem. Salinity-tolerant germplasm resources provide a plant material basis for the improvement of salinity tolerance in crops. The present research firstly selected the appropriate salinity stress conditions for evaluating salinity tolerance at germination and seedling stages by screening a series of NaCl concentrations. The results showed that 1.2% NaCl solution and 0.8% NaCl in soil were the optimal concentrations for germination and seedling stages separately. Under the selected NaCl stress conditions, some morphological and physiological traits of 321 wheat genotypes were tested at the two stages. The salinity tolerance of the genotypes were evaluated and classified by principal component analysis and cluster analysis. Total of 21 and 18 genotypes with high salinity tolerance at germination and seedling stages were identified, which accounted for 6.5% and 5.6% of the tested genotypes, respectively. Two genotypes, Zhongzuo 60115 and Jimaiyihao, were determined as the high salinity tolerance at both germination and seedling stages.

Key words: wheat; salinity-tolerance evaluation; principal component analysis; cluster analysis

土壤盐渍化是农业生产中主要的非生物胁迫之一, 严重影响作物的生长发育, 导致减产^[1-2]。全球盐渍土分布广泛, 约 33% 的可耕地受盐渍化侵蚀, 我国盐渍土约占总耕地面积的 10%, 且因不良灌

溉、工业污染、气候变化等因素, 盐渍化程度仍将持续加重^[3-6]。小麦是人类的主要粮食作物之一, 提供人们日常所需热量和蛋白的 20%^[7-9], 然而小麦是中度耐盐作物, 受土壤盐渍化危害严重, 因此提高

收稿日期: 2017-03-03 修回日期: 2017-03-09 网络出版日期: 2017-06-13

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20170613.0926.038.html>

基金项目: 国家转基因重大专项(2016ZX08010005); 中国农业科学院创新工程项目

第一作者研究方向为小麦耐盐性评价及基因挖掘。E-mail: 15735172510@163.com

通信作者: 景蕊莲, 研究方向为作物抗逆生物学。E-mail: jingruilian@caas.cn

小麦耐盐性是育种的主要目标之一。作物耐盐性是一个复杂指标且对环境敏感,前人研究认为作物生长早期是整个发育过程的基础,极易受到逆境胁迫伤害,最终影响产量,因而芽期和苗期是研究作物耐盐性的重要时期^[10-12]。

小麦种质资源丰富,不同种质耐盐性存在差异,耐盐种质资源是培育耐盐品种的重要材料基础。刘旭等^[4]对 400 份材料进行芽期、苗期耐盐性鉴定,获得 3 份耐性较强的材料;红蚂蚱、科遗 26、希望;王萌萌等^[13]从 882 份材料中获得 43 份芽期和苗期耐盐性稳定的材料;M. A. Khan 等^[14]用 NaCl 溶液胁迫处理 24 份小麦,获得 7 份在芽期和苗期均耐盐的材料;A. R. Gurmani 等^[8]鉴定获得 Kharchia-65 等 4 份在生理和生物量指标方面耐盐性良好的材料。然而,能高效用于耐盐品种培育的小麦资源材料仍十分有限,需要加快种质资源耐盐性的鉴定评价工作。

目前小麦耐盐性评价方法多样,主要分为单指标分析和多指标综合分析两大类。单指标分析主要用相对盐害率^[4,13]或盐害指数^[4,13]评价耐盐性,该类方法快速便捷,但忽略了株高、渗透势等形态生理指标对于盐胁迫的反应差异,适用于对大量材料耐盐性的初级筛选。多指标综合分析包括打分法^[8]、模糊隶属函数法^[15-16]、指标排序法^[14]、主成分分析综合评价^[17]等方法,该类方法同时运用多个指标,能全面反映耐盐性,但其中前三者忽略了指标间的相互作用,对于评价耐盐性具有一定局限性,主成分分析综合评价可弥补以上缺点^[18],已经在高粱^[12]、番茄^[18-19]、棉花^[20]等作物中广泛应用。

本研究以 321 份小麦种质为材料,利用不同浓度 NaCl 处理小麦种子和幼苗,优选芽期与苗期耐盐性鉴定的最适 NaCl 浓度,并运用主成分分析综合评价小麦芽期和苗期的耐盐性,筛选耐盐种质,为小麦耐盐性研究及耐盐育种提供评价方法和基础材料。

1 材料与方法

1.1 材料

321 份小麦试验材料由中国农业科学院作物科学研究所提供,来源于山东、山西、北京、河南、河北、福建等地区,其中的茶淀红和早选 12 两份材料由该所的姜奇彦老师提供。

1.2 试验设计

1.2.1 小麦芽期 NaCl 胁迫浓度筛选及耐盐性鉴定 小麦芽期耐盐性试验以种子发芽盒(12 cm × 12 cm × 6 cm)作为发芽床。基于前人研究,选择具

有多样性的 7 份小麦材料用于芽期耐盐浓度筛选,7 份材料分别是鲁麦 14(骨干亲本、高产)、早选 10 号(抗旱)、晋麦 47(抗旱、多地区试对照品种)、早选 12(抗旱)、中麦 175(北部冬麦区高产品种)、茶淀红(耐盐)以及中国春(盐、早敏感)。挑选发育正常的小麦种子,均匀地放入铺有一层滤纸的发芽盒中,每盒 30 粒,分别加入 20 mL 浓度为 0.6%、0.8%、1.0%、1.2%、1.4% 的 NaCl 溶液进行盐胁迫处理,以无离子水培养作为对照,设 3 次重复。将种子发芽盒置于 25 °C 培养箱中,前 3 d 暗培养,第 4 天开始 12 h 光照/12 h 暗培养。第 8 天统计发芽数,以芽长超过种子长度的 1/2,且根长等于种子长度为发芽标准。

依照上述方法,将 321 份小麦种子分别置于 20 mL 无离子水(对照)和 1.2% NaCl 溶液中培养,统计发芽数,并随机挑选 10 株幼苗调查芽长(SL, shoot length)、根长(RL, root length)、根数(RN, root number)、芽鲜重(SFW, shoot fresh weight)及根鲜重(RFW, root fresh weight),计算发芽率(GR, germination rate)、相对盐害率(RSIR, relative salt-injury rate)、相对发芽率(RGR, relative germination rate)、相对根长(RRL, relative root length)、相对芽长(RSL, relative shoot length)、根冠比(RSR, root-shoot ratio)、相对根冠比(RRSR, relative root-shoot ratio)、相对芽鲜重(RSFW, relative shoot fresh weight)、相对根鲜重(RRFW, relative root fresh weight)和相对根数(RRN, relative root number)。发芽率(%) = 发芽种子数/种子总数 × 100%;相对盐害率(%) = (对照发芽率 - NaCl 处理发芽率)/对照发芽率 × 100%。各指标的相对值(%) = NaCl 处理指标值/对照指标值 × 100%。

1.2.2 小麦苗期 NaCl 胁迫浓度筛选及耐盐性鉴定 小麦苗期耐盐性试验采用土培法,3 次重复,随机区组设计。取耕层土过 1 cm × 1 cm 筛,人工翻动 3 ~ 4 次,使土壤充分混匀,称重后装入 55 cm × 40 cm × 10 cm 塑料盒中,加入适量底水,用水平尺调平,每盒播种 21 份材料,每份材料 20 粒种子,覆土 2 cm,在活动遮雨棚下培养;2 叶期间苗至 15 株,3 叶期时浇水(对照),用 0.6%、0.8%、1.0%、1.2% 的土壤 NaCl 浓度胁迫处理 10 d,调查株高、茎叶鲜重、茎叶干重,筛选小麦苗期盐胁迫的适宜浓度。

依照上述培养方法,分别将 321 份小麦材料在对照条件和 0.8% 土壤 NaCl 浓度条件下培养,调查株高

(PH, plant high)、叶片渗透势(OP, osmotic potential)、茎叶干重(SDW, shoot dry weight)、茎叶 K^+ 和 Na^+ 含量(SKC, shoot K^+ content; SNC, shoot Na^+ content), 并计算茎叶 K^+/Na^+ (SKN, shoot K^+/Na^+)、相对株高(RPH, relative plant high)、相对渗透势(ROP, relative osmotic potential)、相对茎叶干重(RSDW, relative shoot dry weight)、相对茎叶 K^+ 和 Na^+ 含量(RSKC, relative shoot K^+ content; RSNC, relative shoot Na^+ content), 以及相对茎叶 K^+/Na^+ (RSKN, relative shoot K^+/Na^+)。各指标相对值计算方法同 1.2.1。

采用 M. C. Bolarin 等^[21]的方法提取叶片汁液, 用 Fisk Model 210 冰点渗透压仪检测叶片摩尔渗透压浓度 n , 根据公式 $\psi_s = -nRT$ ^[21] 转换为渗透势, 式中 $R = 0.0083143$, $T = t + 273$ (t 为测定时室内温度); 参照《食品中钾、钠的测定》方法^[22] 用原子吸收分光光度计(AA-6800G/F 型号, Shimadzu 公司)检测茎叶 K^+ 、 Na^+ 含量。

1.3 综合评价耐盐性

依文献所述^[18-20], 计算综合指标的隶属函数值、权重值和耐盐综合评价 D 值, 计算公式如下。

$$\text{隶属函数值 } U(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{jmin}}{X_{jmax} - X_{jmin}} \quad (1)$$

式中, $U(X_{ij})$ 为第 i 个材料第 j 个综合指标的隶属函数值, X_{ij} 为第 i 个材料第 j 个综合指标值, X_{jmax} 为该综合指标的最大值, X_{jmin} 为该综合指标的最小值。

$$\text{权重值 } W_j = \frac{P_j}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (2)$$

式中, W_j 值表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度; P_j 表示第 j 个综合指标的贡献率; 综合指标和贡献率由主成分分析法获得。

$$\text{综合评价值 } D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \cdot W_j] \quad (3)$$

表 1 不同 NaCl 浓度下 7 份小麦材料发芽率的多重比较

Table 1 Multiple comparison of germination rates of seven wheat genotypes under different NaCl concentrations

NaCl (%)	鲁麦 14 Lumai14	晋麦 47 Jinmai47	中麦 175 Zhongmail75	旱选 10 号 Hanxuan10	茶淀红 Chadianhong	中国春 Zhongguochun	旱选 12 Hanxuan12
CK	93.3 ± 6.7a	91.1 ± 3.9a	96.7 ± 0.0a	91.1 ± 5.1a	97.8 ± 8.0a	88.9 ± 1.9a	97.8 ± 1.9a
0.6	96.7 ± 3.3a	94.4 ± 3.9a	90.0 ± 0.0a	84.4 ± 5.1ab	93.3 ± 5.8a	55.6 ± 5.1b	91.1 ± 1.9a
0.8	87.8 ± 5.1a	77.8 ± 1.9b	90.0 ± 3.3a	82.2 ± 5.1ab	92.2 ± 7.7a	56.7 ± 10.0b	95.6 ± 3.9a
1.0	52.2 ± 2.2b	63.3 ± 3.3c	80.0 ± 3.3b	76.7 ± 5.8b	51.1 ± 1.9b	51.1 ± 8.4b	74.4 ± 6.9b
1.2	47.8 ± 2.0b	40.0 ± 3.3d	64.4 ± 2.0c	36.7 ± 3.3c	32.2 ± 5.1c	27.8 ± 5.1c	46.7 ± 6.0c
1.4	13.3 ± 6.7c	5.0 ± 3.0e	47.8 ± 1.0d	7.7 ± 5.1d	5.3 ± 3.3d	13.3 ± 3.3d	21.1 ± 1.9d

多重比较采用 Duncan 法, 不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平下差异显著

Multiple comparison using Duncan test, different lowercase letters mean significant difference at $P < 0.05$ level

式中, D 为各材料在盐胁迫条件下用综合指标评价的耐盐度量值, X_{ij} 为第 i 个材料第 j 个综合指标值, W_j 值表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度。 D 是纯数值, 其范围为 $[0, 1]$, 使材料之间的耐盐性具有可比性^[23], D 值越大, 耐盐性越强。

采用 K-均值聚类法对 D 值聚类, 设置聚类数目为 5, 即 D 值被分为 5 类, 从大到小依次对应高耐 (HT)、耐盐 (T)、中耐 (MT)、敏感 (S)、高感 (HS) 5 个耐盐类别。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2007 和 IBM SPSS Statistics 20 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 小麦耐盐性鉴定的 NaCl 浓度筛选

2.1.1 芽期 以 7 份小麦为材料, 分析不同盐浓度处理下的发芽率 (表 1), 明确小麦芽期耐盐性鉴定的最适盐浓度。结果表明, 当 NaCl 溶液浓度 $\leq 0.8\%$ 时, 只有晋麦 47 和中国春的发芽率与对照相比差异显著, 不能区分材料的耐盐性; 当 NaCl 溶液浓度为 1.4% 时, 各个材料的发芽率均很低, 说明该浓度高度抑制种子萌发, 不适合用于芽期耐盐性鉴定; 在 1.2% NaCl 溶液处理时各材料的发芽率与对照相比, 差异显著, 但与 1.0% 相比, 仍有部分材料差异不显著。为了进一步明确芽期鉴定最适浓度, 试验选取包括以上 7 份材料在内的 20 份多样性材料在对照、 1.0% 、 1.2% NaCl 浓度下分析相对盐害率, 根据刘旭等^[4]芽期耐盐性分类方法进行分类 (图 1)。结果表明在 1.2% NaCl 浓度处理下, 20 份材料分为 5 个耐盐级别, 较 1.0% NaCl 处理能更好地反映材料间耐盐性的多样性。因此, 1.2% 的 NaCl 浓度适宜用作小麦芽期耐盐性鉴定分类。

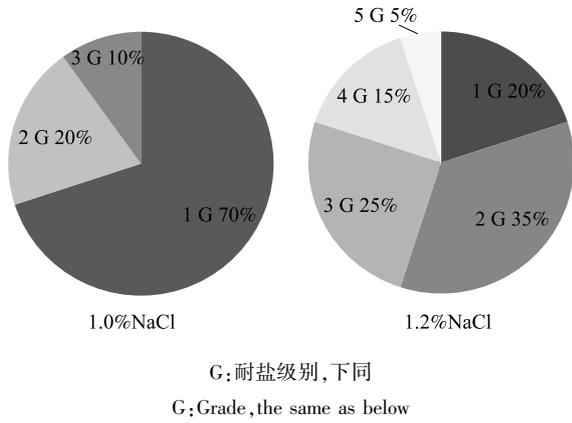


图 1 20 份小麦材料芽期耐盐性分级鉴定

Fig. 1 Salinity-tolerance identification of 20 wheat genotypes at germination stage

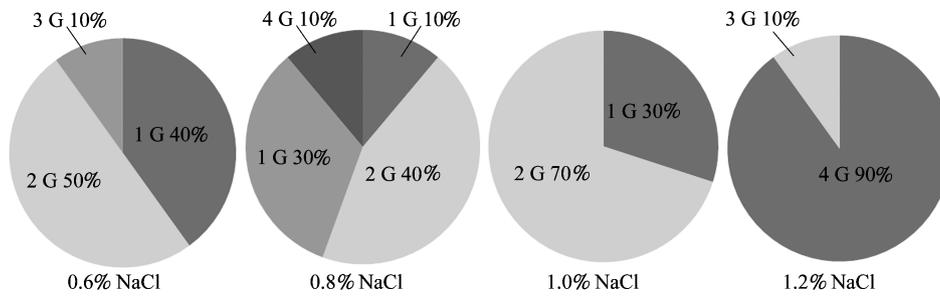


图 2 10 份小麦材料苗期耐盐性分级

Fig. 2 Salinity-tolerance identification of 10 wheat genotypes at seedling stage

2.2 小麦耐盐性指标分析

在盐胁迫条件下,小麦芽期和苗期指标变化情况见表 2 和表 3。与对照相比,在盐胁迫条件下小麦芽期根数和苗期茎叶 Na⁺ 含量增加,其余指标均降低,说明盐胁迫显著影响了种子萌发和幼苗的生理及生长。其中芽期根长和苗期 K⁺/Na⁺ 比率受抑

2.1.2 苗期

从芽期试验的 20 份材料中挑选 10 份多样性材料,如轮抗 7 号(耐盐)、中国春(盐、旱敏感)、温麦 6 号(黄淮麦区大规模种植)等,这些材料芽期耐盐性具有一定差异。盐胁迫处理 10 份材料,调查相关指标并计算平均隶属函数值,根据张彦威等^[24]的平均隶属函数 4 级分类方法对 10 份材料进行分级。从图 2 可知,当土壤 NaCl 浓度为 0.8% 时,与其他 3 个处理浓度相比,较好地反映了供试材料耐盐性的多样性。因此,0.8% 的土壤 NaCl 浓度适宜用作小麦苗期耐盐性鉴定分类。

制作用较大,下降幅度分别达到 84.2% 和 98.6%,发芽率和苗期株高受抑制作用较小,下降幅度为 31.8% 和 10.0%。表明不同指标对盐胁迫敏感性存在差异,单一指标仅能反映部分耐盐性,多指标综合能够更全面地评价小麦耐盐性。

表 2 1.2% NaCl 胁迫下小麦芽期指标的比较

Table 2 Indices comparison of wheat genotypes treated with 1.2% NaCl solution at germination stage

处理 Treatment	指标 Index	发芽率(%) GR	芽长(cm) SL	根长(cm) RL	根数 RN	芽鲜重(mg) SFW	根鲜重(mg) RFW
对照 CK	最大值 Max	100.0	17.8	18.3	5.2	145.3	112.4
	最小值 Min	49.3	11.1	8.8	3.0	76.4	14.3
	均值 Average	90.0	14.3	13.9	3.9	102.8	30.6
	变异系数(%) CV	8.7	8.0	11.9	15.6	11.1	24.9
1.2% NaCl	最大值 Max	94.2	7.7	5.0	6.4	46.5	44.0
	最小值 Min	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	均值 Average	61.4	3.6	2.2	4.7	29.8	16.6
	变异系数(%) CV	31.1	39.1	32.5	16.6	23.9	29.9
处理与对照差值 T-CK	均值 Average	28.6 ↓	10.7 ↓	11.7 ↓	0.8 ↑	73.0 ↓	14.0 ↓

T:代表盐胁迫处理。T: Represents salinity stress, the same as below

表3 0.8%NaCl胁迫下小麦苗期指标的比较

Table 3 Indices comparison of wheat genotypes treated with 0.8%NaCl at seedling stage

处理 Treatment	指标 Index	株高 (cm)PH	茎叶干重(mg) SDW	渗透势 (MPa)OP	茎叶 K ⁺ 含量(%)SKC	茎叶 Na ⁺ 含量(%)SNC	茎叶 K ⁺ / Na ⁺ SKN
对照 CK	最大值 Max	26.5	155.9	-1.5	5.2	2.17	131.5
	最小值 Min	16.4	78.3	-2.1	2.3	0.03	19.3
	均值 Average	20.9	112.3	-1.7	3.6	0.08	51.2
	变异系数(%)CV	8.8	11.7	5.6	30.9	32.00	32.9
0.8% NaCl	最大值 Max	24.7	123.5	-3.1	4.2	8.66	2.1
	最小值 Min	13.3	67.1	-5.4	1.8	1.56	0.2
	均值 Average	18.8	92.0	-4.7	2.9	4.75	0.7
	变异系数(%)CV	9.2	11.1	10.7	12.4	35.90	30.0
处理与对照差值 T-CK	均值 Average	2.1 ↓	20.3 ↓	3.0 ↓	0.7 ↓	4.67 ↑	50.5 ↓

对小麦芽期和苗期耐盐性指标进行相关分析,结果表明,芽期的相对发芽率与相对盐害率、相对根冠比呈极显著负相关;相对盐害率仅与相对根冠比呈极显著正相关;相对芽长与相对根冠比呈极显著负相关;相对芽鲜重与相对盐害率呈极显著负相关,与其他指标呈极显著正相关(表4)。苗期的相对株高与相对茎叶 K⁺/Na⁺ 相关性不显著,与其余指标呈显著或极显著正相关;相对茎叶干重与相对 Na⁺

含量无显著相关性,与其余指标呈显著或极显著正相关;相对渗透势与相对株高、相对茎叶干重和相对茎叶 K⁺ 含量呈极显著正相关(表5)。表明除个别指标间无相关性外,多数指标间均存在一定程度上的相关性,说明多个指标提供的耐盐信息交叉重叠,不能直接评价小麦耐盐性。因此本研究进一步用主成分分析法,把多个指标转换成少量独立的综合指标,以准确评价小麦耐盐性。

表4 1.2% NaCl胁迫下小麦芽期耐盐指标的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between salinity-tolerance indices at germination stage with 1.2%NaCl solution

指标 Index	相对发芽率 RGR	相对盐害率 RSIR	相对芽长 RSL	相对根长 RRL	相对根冠比 RRSR	相对根数 RRN	相对芽鲜重 RSFW
相对盐害率 RSIR	-0.826 **						
相对芽长 RSL	0.671 **	-0.513 **					
相对根长 RRL	0.469 **	-0.214 **	0.506 **				
相对根冠比 RRSR	-0.271 **	0.494 **	-0.531 **	0.333 **			
相对根数 RRN	0.524 **	-0.157 **	0.474 **	0.357 **	0.005		
相对芽鲜重 RSFW	0.433 **	-0.212 **	0.381 **	0.513 **	0.084	0.454 **	
相对根鲜重 RRFW	0.697 **	-0.481 **	0.892 **	0.530 **	-0.428 **	0.549 **	0.484 **

** 表示极显著 ($P < 0.01$)

** Represent significance level at $P < 0.01$, the same as below

表5 0.8%NaCl胁迫下小麦苗期耐盐指标的相关系数

Table 5 Correlation coefficients between salinity-tolerance indices at seedling stage treated with 0.8%NaCl

指标 Index	相对株高 RPH	相对茎叶干重 RSDW	相对渗透势 ROP	相对茎叶 K ⁺ 含量 RKC	相对茎叶 Na ⁺ 含量 RNC
相对茎叶干重 RSDW	0.531 **				
相对渗透势 ROP	0.205 **	0.145 **			
相对茎叶 K ⁺ 含量 RSKC	0.324 **	0.295 **	0.241 **		
相对茎叶 Na ⁺ 含量 RSNC	0.117 *	0.061	0.080	-0.017	
相对茎叶 K ⁺ /Na ⁺ RSKN	0.049	0.116 *	0.013	0.323 **	-0.628 **

* 表示显著 ($P < 0.05$)

* Represent significance level at $P < 0.05$

2.3 小麦耐盐指标主成分分析

对 321 份普通小麦材料的芽期和苗期耐盐指标分别进行主成分分析,以累计贡献率大于 85% 为原

则选择主成分。芽期和苗期都选择了 4 个独立的主成分作为耐盐鉴定综合指标(表 6)。

表 6 各主成分的特征值和贡献率

Table 6 The eigenvalue and contribution rate of different principal components

项目 Item	主成分 Principal component							
	芽期 Germination stage				苗期 Seedling stage			
	1	2	3	4	1	2	3	4
特征值 Eigenvalue	4.49	1.54	0.66	0.63	1.98	1.70	0.92	0.69
贡献率(%) Contribution rate	56.08	19.20	8.24	7.93	33.00	28.32	15.37	11.43
累计贡献率(%) Cumulative contribution rate	56.08	75.29	83.53	91.50	33.00	61.33	76.70	88.12

单指标的特征向量绝对值越大,在主成分中的作用就越大,各单指标的特征向量见表 7。各主成分中起主要作用的单指标是:芽期第 1 主成分相对发芽率、相对芽长和相对芽鲜重,第 2 主成分相对根冠比,第 3 主成分相对盐害率,第 4

主成分是相对根数和相对根长;苗期第 1 主成分相对株高、相对茎叶干重、相对茎叶 K⁺ 含量,第 2 主成分相对茎叶 Na⁺ 含量和相对茎叶 K⁺/Na⁺,第 3 主成分相对渗透势,第 4 主成分相对茎叶 K⁺ 含量。

表 7 小麦芽期和苗期耐盐指标的特征向量

Table 7 The feature vector of salinity-tolerance indices at germination and seedling stages of wheat genotypes

时期 Stage	指标 Index	特征向量 Feature vector			
		1	2	3	4
芽期 Germination stage	相对发芽率 RGR	0.884	-0.078	-0.321	-0.237
	相对盐害率 RSIR	-0.680	0.439	0.528	0.174
	相对芽长 RSL	0.889	-0.161	0.221	0.294
	相对根长 RRL	0.605	0.614	-0.236	0.389
	相对根冠比 RRSR	-0.379	0.855	-0.262	-0.064
	相对根数 RRN	0.630	0.342	0.418	-0.486
	相对芽鲜重 RSFW	0.910	-0.041	0.236	0.204
	相对根鲜重 RRFW	0.597	0.485	0.029	-0.119
苗期 Seedling stage	相对株高 RPH	0.710	0.375	-0.282	-0.166
	相对茎叶干重 RSDW	0.709	0.280	-0.404	-0.217
	相对渗透势 ROP	0.420	0.252	0.795	-0.355
	相对茎叶 K ⁺ 含量 RSKC	0.717	-0.008	0.216	0.647
	相对茎叶 Na ⁺ 含量 RSNC	-0.193	0.888	0.029	0.257
	相对茎叶 K ⁺ /Na ⁺ RSKN	0.496	-0.792	0.007	0.013

2.4 小麦耐盐性综合评价

用主成分分析获得的主成分作为鉴定小麦芽期、苗期耐盐性的综合指标。由公式 1 获得各综合指标的隶属函数值;通过公式 2 用综合指标的贡献率计算权重值,芽期 4 个主成分的权重值依次是 0.572、0.233、0.109 和 0.086,苗期的权重值依次是 0.375、0.321、0.174 和 0.130;利用公式 3 计算得到综合评价值 D。采用 K-均值聚类法将供试材料的耐盐性分为高耐、耐盐、中耐、敏感、高感 5 个级别。芽期 5 个耐盐级别材料的份数依次是 21、85、109、

74、32,占供试材料的 6.5%、26.5%、34.0%、23.1% 和 9.9%,属于高耐的材料是中早 110、京双 2 号、早穗 21、冀麦 2 号、中优 9507、石 4185、早穗 66、鲁德 1 号、冀麦一号、太原 633、北京 8694、蚂蚱麦、鲁麦 23、双丰收、京选 25、农大 20074、西农 688、农大 183、中作 60115、铭贤 169 和农大 36;苗期 5 个耐盐级别材料的份数分别是 18、51、111、104、37,占供试材料的 5.6%、15.9%、34.6%、32.4%、11.5%,属于高耐级别的材料是邯 6172、冀审 5099、四棱红葫芦头、中苏 68、西峰 20、陇鉴 294、冀麦一号、丰产

3号、晋太182、白糙麦、小白麦、豫麦38、漯麦9号、晋麦63、碧蚂1号、科遗26、运早805和中作60115。在供试的321份材料中,芽期和苗期均属于高耐盐类型的材料是冀麦一号、中作60115。

2.5 芽期与苗期耐盐性比较

本试验进一步拟合芽期和苗期耐盐性综合评价D值关系,结果表明2个时期的耐盐性之间无显著相关,即2个时期耐盐性结果差异较大(图3)。例如冀麦2号、京选25等芽期表现高耐盐特性,而在苗期属于盐敏感材料;冀麦4号、金光等芽期属于高敏材料,而苗期属于耐盐材料。同时也发现了芽期和苗期耐盐类型相同的材料(表8),例如2个时期均为高耐盐性的材料有2份,耐盐材料有12份。

表8 芽期和苗期耐盐级别相同的小麦材料

Table 8 Wheat genotypes with same salinity tolerance at germination and seedling stages

耐盐类型	材料数	材料名称
Salinity tolerance	Number	Varieties
高耐 HT	2	冀麦一号、中作60115
耐盐 T	12	宝临9号、北农2号、丰产1号、早选10号、衡观35、冀麦26、晋麦44、晋麦72、鲁麦5号、石麦13、泰山23、中大86-鉴2
中耐 MT	44	Drysdale、北京837、沧麦6001、大荔1号、单R8043、邯05-5092、早选11、衡136、花培6号、冀麦30、冀麦32、冀麦9号、晋麦47、晋麦50、晋麦54、晋农207、京冬8号、京农80鉴107、京农84-6786、京品11、京选20、京延85鉴28、临早5089、临早917、鲁麦19、鲁麦8号、洛阳8628、农大81146、平凉35、胜利麦、石特14、石优17、石优20、原冬3号、温麦6号、鑫麦296、烟农19、豫麦18、豫农416、原冬834、运早20410、运早618、长治620、中麦9号
敏感 S	27	北京8686、邯4589、邯郸6050、早选12、黑芒麦、衡216、红和尚、淮麦25、济南13、济南2号、晋太114、临丰3号、临早5367、临早6105、洛早8号、漯麦8号、农大3159、农大33、青麦7号、西安8号、西峰9号、西农1018、新冬22号、运早22-33、长4738、长6359、中7902
高感 HS	1	晋2148-7

3 讨论

3.1 适于小麦耐盐性鉴定的NaCl胁迫浓度

盐胁迫对作物的伤害主要是离子毒害和渗透胁迫^[25]。在盐胁迫条件下,由于盐分过多而使作物种子水势降低,吸水困难,使细胞缺水;另外盐分过高会破坏细胞膜的稳定性和完整性,导致胞膜选择透性降低或丧失,引起细胞内生理生化反应紊乱,最终影响种子萌发和幼苗的生长^[26]。因此,芽期和苗期的耐盐性是植物全生育期耐盐的基础环节。盐害是由过量盐分引起的,且通常是由高浓度的Na⁺、Cl⁻造成的^[27-28],因此前人的耐盐性鉴定大多采用NaCl溶液模拟胁迫。如张巧凤等^[16]认为小麦芽期和苗期耐盐鉴定的适宜浓度分别为1.5%和1.0%NaCl;王萌萌等^[13]用2.0%和1.7%NaCl对小麦芽

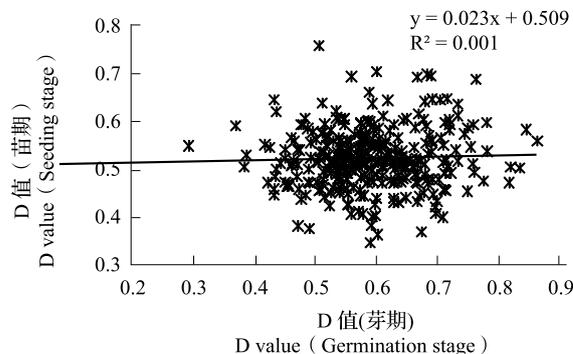


图3 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价D值的相关性
Fig. 3 Correlation of D values of salinity tolerance between germination and seedling stages in wheat genotypes

期和苗期进行耐盐性鉴定。本研究在前人研究的基础上设计了一系列的NaCl浓度,分析不同浓度盐胁迫对小麦材料的影响,明确了适宜进行芽期鉴定的NaCl溶液浓度为1.2%,苗期鉴定的土壤NaCl浓度为0.8%。本研究中,小麦品种茶淀红在1.2%NaCl浓度时发芽率较低,即耐盐性差,与朱志华等^[29]评定茶淀红具有较好的耐盐性不一致,可能是由于鉴定方法标准不同所致。

3.2 小麦耐盐性综合评价

作物通过多种代谢途径应答盐胁迫,因而表现为复杂的耐性机理,正因如此单一指标不能全面反映作物的耐盐性,应综合考虑多种指标对耐盐性的作用,即选用多个指标共同评价作物耐盐性,以合理有效地区分不同基因型间的耐盐性^[23,30]。由于作物不同性状指标间存在相关性,使得不同指标对作

物耐盐性提供的信息发生重叠,根据这些指标直接评价耐盐性将在一定程度上导致偏差^[18,31]。本研究测定芽期发芽率、盐害系数、芽长、根长等 8 个指标,苗期的株高、渗透势、茎叶 Na⁺ 含量等 6 个指标,运用主成分分析把多个指标转换成少量独立的综合指标,以克服指标间的相关性和信息重叠;同时通过主成分分析得到综合指标的贡献率,可确定权重,避免了人为主观确定综合指标的重要性;最后计算获得耐盐性综合评价 D 值,并通过聚类分析对供试材料进行耐盐性分级。

3.3 小麦芽期与苗期耐盐性的相关分析

前人研究表明,芽期耐盐性体现在种子的吸水膨胀能力,其机理是抵御渗透胁迫;苗期的主要耐盐机理是拒 Na⁺^[25,32]。这可能导致小麦在不同发育阶段耐盐能力的差异,即芽期表现耐盐性的材料,苗期不一定具有耐盐性^[33]。本研究也得到了类似的结果,例如冀麦 38、冀 92-5230 等芽期耐盐的材料,在苗期属于盐敏感或高感材料。本研究表明芽期与苗期的耐盐综合评价 D 值无显著相关,可能原因是两个时期的耐盐机理不完全相同,与前人^[13,32-33]的研究结果相似。因此,为全面揭示小麦的耐盐机制,全生育期的耐盐性鉴定是必不可少的。应同时结合生理生化指标,提高耐盐鉴定的准确性,以获得高效耐盐种质,为耐盐基因挖掘、品种选育提供材料基础。

参考文献

- [1] Jafar M Z, Farooq M, Cheema M A, et al. Improving the performance of wheat by seed priming under saline conditions [J]. *J Agron Crop Sci*, 2012, 198(1): 38-45
- [2] Wakeel A, Farooq M, Qadir M, et al. Potassium substitution by sodium in plants [J]. *Crit Rev Plant Sci*, 2011, 30(4): 401-413
- [3] Diaz De León J L, Escoppinichi R, Geraldo N, et al. Quantitative trait loci associated with salinity tolerance in field grown bread wheat [J]. *Euphytica*, 2011, 181(3): 371-383
- [4] 刘旭, 史娟, 张学勇, 等. 小麦耐盐种质的筛选鉴定和耐盐基因的标记 [J]. *植物学报*, 2001, 43(9): 975-948
- [5] 裴自友, 温辉芹, 任永康, 等. 小麦的耐盐性及其改良研究进展 [J]. *作物研究*, 2012, 6(1): 93-98
- [6] Amin A, Eslam M H, Seyed A M, et al. Screening of recombinant inbred lines for salinity tolerance in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Afr J Biotechnol*, 2011, 10(60): 12875-12881
- [7] Gill B S, Appels R, Oberholster A M B, et al. A workshop report on wheat genome sequencing: international genome research on wheat consortium [J]. *Genetics*, 2004, 168(2): 1087-1096
- [8] Gurmani A R, Khan S U, Mabood F, et al. Screening and selection of synthetic hexaploid wheat germplasm for salinity tolerance based on physiological and biochemical Characters [J]. *Int J Agric Biol*, 2014, 16: 684-690
- [9] Gupta P K, Mir R R, Mohan A, et al. Wheat genomics: present status and future prospects [J]. *Int J Plant Genom*, 2008, 2008: 1-36
- [10] Wang H L, Chen G L, Zhang H W, et al. Identification of QTLs for salt tolerance at germination and seedling stage of *Sorghum bicolor* L. Moench [J]. *Euphytica*, 2013, 196(1): 117-127
- [11] Mano Y, Takeda K. Mapping quantitative trait loci for salt tolerance at germination stage and the seedling stage in barely [J]. *Euphytica*, 1997, 94(3): 263-272
- [12] 何晓兰, 徐照龙, 张大勇, 等. 65 个高粱种质萌芽期的耐盐指标比较及其耐盐性综合评价 [J]. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(4): 52-60
- [13] 王萌萌, 姜奇彦, 胡正, 等. 小麦品种资源耐盐性鉴定 [J]. *植物遗传资源学报*, 2012, 13(2): 189-194
- [14] Khan M A, Yasmin S, Ansari R, et al. Screening for salt tolerance in wheat genotypes at an early seedling stage [J]. *Pak J Bot*, 2007, 39(7): 2501-2509
- [15] 孙永媛. 小麦耐盐生理及耐盐相关基因 *TaNHX3* 功能的初步研究. [D]. 保定: 河北农业大学, 2011
- [16] 张巧凤, 陈宗金, 吴纪中, 等. 小麦种质芽期和苗期的耐盐性鉴定评价 [J]. *植物遗传资源学报*, 2013, 14(4): 620-626
- [17] 吕萌荔. 野生二粒小麦耐盐性鉴定及 *TiHKT1-5* 基因克隆与生物信息学分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- [18] 吴平, 陈晓梅, 丁宁. 4 种湿生植物苗期耐盐性综合评价 [J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(9): 148-150
- [19] 彭玉梅, 石国亮, 崔辉梅. 加工番茄幼苗期耐盐生理指标筛选及耐盐性综合评价 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(5): 61-65
- [20] 刘雅辉, 王秀萍, 张国新, 等. 棉花苗期耐盐生理指标的筛选及综合评价 [J]. *中国农学通报*, 2012, 28(6): 73-78
- [21] Bolarin M C, Estan M T, Caro M, et al. Relationship between tomato fruit growth and fruit osmotic potential under salinity [J]. *Plant Sci*, 2001, 160(6): 1153-1159
- [22] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5009. 91-2003, 食品中钾、钠的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003
- [23] 郭超, 胡思远, 郑青煊, 等. 部分美国小麦种质资源的耐盐性鉴定 [J]. *麦类作物学报*, 2015, 35(8): 1-9
- [24] 张彦威, 张礼凤, 李伟, 等. 大豆发芽期和苗期耐盐性的隶属函数分析 [J]. *山东农业科学*, 2016, 48(1): 21-25
- [25] Flowers T J, Troke P F, Yeo A R. The mechanism of salt tolerance in halophytes [J]. *Plant Physiol*, 1977, 28: 89-121
- [26] 景欣, 张旸, 李玉花. 植物耐盐研究进展 [J]. *生物技术通讯*, 2010, 21(2): 290-294
- [27] Parida A K, Das A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. *Ecotox Environ Safe*, 2005, 60(3): 324-349
- [28] Zheng H L, Zhao H L, Liu H L, et al. QTL analysis of Na⁺ and K⁺ concentrations in shoots and roots under NaCl stress based on linkage and association analysis in japonica rice [J]. *Euphytica*, 2014, 201(1): 109-121
- [29] 朱志华, 吕小平, 宋景芝, 等. 耐盐性鉴定及其研究 [M] // 庄巧生, 杜振华. 中国小麦育种研究进展. 北京: 中国农业出版社, 1996
- [30] 钮福祥, 华希新, 郭小丁, 等. 甘薯品种抗旱性生理指标及其综合评价初探 [J]. *作物学报*, 1996, 22(4): 392-398
- [31] 周广生, 梅方竹, 周竹青, 等. 小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测 [J]. *中国农业科学*, 2003, 36(11): 1378-1382
- [32] 张婷婷, 于崧, 于立河, 等. 松嫩平原春小麦耐盐碱性鉴定及品种(系)筛选 [J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(8): 1008-1019
- [33] 马雅琴, 翁跃进. 引进春小麦种质耐盐性的鉴定评价 [J]. *作物学报*, 2005, 31(1): 58-64