

粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选

田蕾 陈亚萍 刘俊 马晓刚 王娜 杨兵 李莹 郭海东 李娟 胡慧 张银霞
李培富*

(宁夏大学 农学院, 银川 750021; *通讯联系人, E-mail: peifuli@163.com)

Comprehensive Evaluation and Selection of Rice (*Oryza sativa japonica*) Germplasm for Saline Tolerance at Germination Stage

TIAN Lei, CHEN Yaping, LIU Jun, MA Xiaogang, WANG Na, YANG Bing, LI Ying, GUO Haidong, LI Juan, HU Hui, ZHANG Yinxia, LI Peifu*

(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; *Corresponding author, E-mail: peifuli@163.com)

Abstract: 【Objective】 Soil salinity is one of the major abiotic stresses affecting rice growth and production. Salt resistance identification at germination stage, indices screening, and cultivar breeding of rice germplasm resources are important for rice production. 【Method】 Seeds of sixty-four *japonica* rice germplasm accessions germinated in the 125 mmol L⁻¹ NaCl solution. On the third day after salt stress, germination number of the seeds was measured. After salt stress for five and ten days, germination number, shoot length and root length were measured and then the relative shoot length, relative root length, relative germination potential, relative germination rate, relative salt damage rate, germination index and vigor index were calculated. Multiple statistical methods were used to comprehensively evaluate the salt tolerance of 64 rice *japonica* germplasm and the germination characteristics of typical salt-tolerant and salt-sensitive rice germplasm under salt stress were analyzed. 【Result】 The relative salt damage rate was significantly negatively correlated with relative root length, relative germination potential, relative germination rate, germination index and vigor index. Except for relative shoot length, these six indexes were significantly correlated with each other. Through cluster analysis, 64 *japonica* rice germplasm were divided into four groups. The group I and IV were typical salt-sensitive and salt-tolerant germplasm, respectively. The group II was mainly composed of low salt-resistant rice and the group III was moderately salt-tolerant. With the principal component analysis these seven single indexes could be converted to three principal components. An objective comprehensive evaluation value (*D* value) of salt tolerance was obtained using membership function with index weight method. The five highest and lowest *D* value germplasm resources were selected to carry on significance analysis. The results showed that except for relative shoot length, all of these seven indexes measured after stress for five and ten days were significantly different from the two types. 【Conclusion】 Rice was sensitive to salt stress at germination stage and there were significant differences between different germplasm. Using stepwise regression and principal component analysis, germination index, relative root length and relative salt damage rate were selected as the key indexes for the rapid identification of salt tolerance of rice germplasm. If multivariate statistical method was used, the reliability will be improved.

Key words: rice; germplasm resource; salt tolerance at germination stage; principal component analysis; comprehensive evaluation

摘要: 【目的】土壤盐渍化是危害水稻生产的重要非生物胁迫之一。鉴定水稻种质资源发芽期耐盐性, 筛选耐盐指标, 培育耐盐品种, 对水稻生产的发展具有重要意义。【方法】利用 125 mmol/L NaCl 溶液对 64 份粳稻种质资源进行盐胁迫, 于胁迫后 3 d 测定发芽数; 胁迫 5 d、10 d 后, 测定发芽数、芽长和根长, 并计算相对芽长、根长、发芽势、发芽率、盐害率, 发芽指数和活力指数。运用多种统计学方法对各种质资源的芽期耐盐性进行综合评价, 分析典型耐盐和盐敏感种质盐胁迫条件下的发芽特征。【结果】相对盐害率与相对根长、相对发芽势、相对发芽率、发芽指数和活力指数均极显著负相关; 除相对芽长外各指标间的相关性均达到极显著水平。通过聚类

收稿日期: 2016-12-20; 修改稿收到日期: 2017-04-29。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31401361); 宁夏农业育种专项(2013NYYZ0302)。

分析将 64 份粳稻种质资源划分成 4 个类群。第 I、IV 类群分别为典型的盐敏感和耐盐类群, 第 II 类群为弱耐盐种质为主的混合类群, 第 III 类群主要由耐盐种质组成。通过主成分分析将 7 个评价指标转换为 3 个主成分, 应用隶属函数和权重, 获得了客观评价粳稻种质资源耐盐性的综合评价值 D 。分别选取 D 值最高和最低的 5 份种质资源进行芽期耐盐指标的差异显著性分析, 结果表明, 两组种质资源盐胁迫 5 d 的各评价指标差异均达到极显著水平, 10 d 的评价指标除相对芽长外, 均达到了显著差异水平。【结论】水稻芽期对盐胁迫较为敏感, 且耐盐性不同的种质间差异显著。利用逐步回归和主成分分析获得发芽指数、相对根长和相对盐害率 3 个指标, 可作为快速鉴定粳稻种质资源芽期耐盐性的重要指标, 若采用多元统计方法评价可靠性更高。

关键词: 水稻; 种质资源; 芽期耐盐性; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: Q945.78; S511.2⁺²

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)06-0631-12

盐碱土在世界范围内分布广泛, 遍及 6 大洲的 100 多个国家, 总面积已达 10 亿 hm^2 ^[1-3]。近年来随着气候变暖、化肥的大量施用以及不合理灌溉等农业措施的影响, 世界约 20% 的农业用地盐碱化程度表现出不断加剧的趋势^[4-5]。中国盐碱土面积庞大, 种类丰富, 总面积约为 9913.3 万 hm^2 ^[6]。土壤盐渍化已成为全球性的资源与生态问题, 对作物的生长、发育造成严重影响, 制约了我国农业生产的发展。

水稻(*Oryza sativa* L.)为一年生禾本科植物, 是全世界一半以上人口的主要食物来源^[7], 是一种盐敏感作物^[8], 其芽期耐盐性是盐渍土条件下水稻稳产的重要影响因素^[9]。我国东北、西北和华北的内陆干旱和半干旱地区以及长江以北的滨海盐碱稻作区, 水稻秧田和直播田在种子萌发阶段易受到盐碱的危害, 导致发芽势降低、发芽不齐、芽尖枯黄和弯曲, 甚至死亡, 严重影响了水稻生产。为确保盐碱地内水稻的安全生产, 创制耐盐新种质、对其发芽期耐盐性的研究显得尤为重要。

盐胁迫对水稻发芽期的影响主要表现在对发芽速度、整齐度及生长状态的抑制^[10]。郭望模等^[11]研究发现, 不同浓度的 NaCl、品种特性以及 NaCl 浓度和品种间的互作对发芽都有极显著的影响。贾宝艳等^[12]研究发现随着 NaCl 浓度的上升, 水稻种子发芽率降低, 发芽时间明显推迟, 且材料间差异很大。Wang 等在对 1 个水稻重组自交系群体的芽期耐盐性评价中发现, 水稻种子萌发初期(0~5d)可能对盐胁迫更加敏感^[13], 各家系的耐盐相关指标差异较后期更大。Chen 等^[14]研究发现, 盐胁迫会明显降低水稻种子的发芽率, 使芽长和根长与空白对照相比显著缩短。Hasthanasombut 等^[15]的研究结果也类似。近年来, 国内外学者在水稻发芽期耐盐性鉴定方面开展了大量工作^[9-16], 提出了发芽指数法, 筛选出一些耐盐性强的优异种质, 并应用于育种实践。但前人的研究多是对几个水稻芽期耐盐指标的简单分析, 在利用统计学方法评价水稻芽期耐盐性方面, 多采用聚类^[12]、隶属函数^[16]等方法进行简单

分析, 利用多元统计方法综合评价水稻芽期耐盐性的报道较少。本研究以国内外具有广泛代表性的 64 份粳稻种质资源为试验材料, 采用发芽指数法, 应用主成分、隶属函数和逐步回归等方法进行各种种质资源芽期耐盐性的综合评价, 以期筛选芽期耐盐水稻种质, 初步阐明水稻发芽期的耐盐机制, 为水稻耐盐育种提供优异资源和理论支持。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

64 份粳稻种质资源由宁夏大学农学院遗传育种实验室李培富教授提供, 其中, 源自亚洲 38 个、欧洲 19 个、大洋洲 4 个、美洲 2 个、非洲 1 个(表 1)。

1.2 试验方法

试验于 2015 年在宁夏大学农学院遗传育种实验室进行。将各种种质资源种子置于 42℃ 恒温培养箱内处理 2 d, 以充分打破种子休眠。每份种子分别选取成熟度好、整齐、饱满的种子 50 粒, 均匀地置于底部铺有 2 层无菌滤纸的黑色育苗盘(28 cm×56 cm)中, 每份种质 1 穴, 每盘 32 穴, 每穴直径 6 cm。用 5% 次氯酸钠溶液浸泡 30 min 对种子进行消毒, 蒸馏水冲洗 3~5 次。设置对照组(蒸馏水)和盐胁迫组(NaCl 溶液)两个处理, 每处理 3 个重复。黑色育苗盘用塑料盘垫底, 每盘加入 800 mL 处理液后用塑料保鲜膜密封, 放入智能人工气候箱(HP1500GS 型, 武汉瑞华仪器设备有限公司)中进行发芽培养, 培养条件为 28℃ 下光照 12 h, 26℃ 下暗培养 12 h。每天进行溶液更换以保证胁迫浓度的稳定, 胁迫处理 10d。

为了选择最佳的盐胁迫浓度, 根据各种种质资源在宁夏石嘴山市平罗县西大滩盐碱地改良示范基地盐碱直播田中的出苗率, 选择了 3 份出苗率较高的种质 OB22(漾濞光壳陆稻)、OB23(Bertone)和 OB28(Galhardo), 出苗率分别为 88.9%、83.3% 和 81.9%, 作为芽期耐盐种质; 3 份出苗率较低的种质

表1 64份粳稻种质资源名称、来源、综合评价价值及排名

Table 1. Origin and names of 64 japonica rice germplasm and their D values, comprehensive ranking.

编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	原产地或来源 Origin	D 值 D value	排名 Ranking	编号 ID.	种质资源名称 Name of germplasm	原产地或来源 Origin	D 值 D value	排名 Ranking
OB1	合江 21 Hejiang 21	黑龙江 Heilongjiang	0.235	63	OB33	罗平懒汉谷 Luopinglanhangu	云南 Yunnan	0.819	6
OB2	吉粳 44 Jijing 44	吉林 Jilin	0.540	50	OB34	Daniela	巴西 Brazil	0.961	1
OB3	Hungarian No.1	澳大利亚 Australia	0.594	45	OB35	Arborio	意大利 Italy	0.843	4
OB4	Banat 725	澳大利亚 Australia	0.709	16	OB36	湟罗 Huangluo	苏联 The Soviet Union	0.810	8
OB5	东北小粒种 Dongbeixiaolizhong	黑龙江 Heilongjiang	0.491	56	OB37	Gostima	阿尔巴尼亚 Aerbaerya	0.868	2
OB6	罗萨马启蒂 Rosa Marchetti	意大利 Italy	0.715	15	OB38	Rocca	意大利 Italy	0.722	12
OB7	意大利 3 号 Italy 3	意大利 Italy	0.769	10	OB39	越光 Koshihikari	日本 Japan	0.670	27
OB8	Roma	意大利 Italy	0.548	47	OB40	水原 1 号 Suwon 1	韩国 Korea	0.719	13
OB9	Banat2951	澳大利亚 Australia	0.638	35	OB41	Rossi	意大利 Italy	0.823	5
OB10	Cigalon	法国 France	0.666	29	OB42	京香 2 号 Jingxiang 2	北京 Peking	0.535	51
OB11	Agostono	意大利 Italy	0.645	33	OB43	幸实 Sachiminori	日本 Japan	0.542	49
OB12	Rizzotto	意大利 Italy	0.521	54	OB44	咸南 22 Xiannan 22	朝鲜 North Korea	0.698	22
OB13	水原 55 Suwon 55	韩国 Korea	0.642	34	OB45	Hrborio Cyauco	南斯拉夫 Yugoslavia	0.851	3
OB14	秋铃 Qiuling	安徽 Anhui	0.546	48	OB46	新竹 8 号 Xinzhu 8	台湾 Taiwan	0.684	24
OB15	宁粳 16 Ningjing 16	宁夏 Ningxia	0.211	64	OB47	镇稻 2 号 Zhendao 2	江苏 Jiangsu	0.701	21
OB16	嘉南 8 号 Jianan 8	台湾 Taiwan	0.607	43	OB48	嘉农 485 Jianong 485	上海 Shanghai	0.299	62
OB17	Balilla	意大利 Italy	0.610	42	OB49	YR251	澳大利亚 Australia	0.795	9
OB18	荒木 Araki	日本 Japan	0.502	55	OB50	Calrose	美国 America	0.675	26
OB19	加合 1 号 Jiahe 1	浙江 Zhejiang	0.428	58	OB51	山福利亚 Shanfuliya	西非几内亚 Guinea	0.705	19
OB20	嘉湖 3 号 Jiahu 3	浙江 Zhejiang	0.636	37	OB52	日本晴 Nipponbare	日本 Japan	0.651	31
OB21	Cristal	法国 France	0.633	38	OB53	中花 17 Zhonghua 17	北京 Peking	0.623	40
OB22	漾濞光壳陆稻 Yangbiguangkeludao	云南 Yunnan	0.814	7	OB54	旱生光头 Zaoshengguangtuo	东北 Northeast of China	0.603	44
OB23	Bertone	葡萄牙 Portugal	0.716	14	OB55	小白芒 Xiaobaimang	浙江 Zhejiang	0.709	17
OB24	Farry	法国 France	0.528	52	OB56	法国稻 Faguodao	法国 France	0.637	36
OB25	中花 9 号 Zhonghua 9	北京 Beijing	0.525	53	OB57	陆羽 132 Luyu 132	日本 Japan	0.681	25
OB26	Amepukahmib	意大利 Italy	0.669	28	OB58	芦苇稻 Luweidao	东北 Northeast of China	0.745	11
OB27	Kele (34978)	孟加拉 Bengal	0.484	57	OB59	红尖 Hongjian	浙江 Zhejiang	0.648	32
OB28	Galhardo	葡萄牙 Portugal	0.706	18	OB60	早糯稻 Zaonuodao	山东 Shandong	0.702	20
OB29	Kele (34979)	孟加拉 Bengal	0.629	39	OB61	露水稻 Lushuidao	河南 Henan	0.570	46
OB30	辽丰 8 号 Liaofeng 8	辽宁 Liaoning	0.361	60	OB62	永德 3 号 Yongde 3	韩国 Korea	0.611	41
OB31	千重浪 Qianchonglang	日本 Japan	0.394	59	OB63	新竹 4 号 Xinzhu 4	台湾 Taiwan	0.685	23
OB32	圭陆 1 号 Guilu 1	云南 Yunnan	0.660	30	OB64	ARC7042	印度 India	0.313	61

OB1(合江 21)、OB12(Rizzotto)和 OB18(荒木), 出苗率分别为 19.4%、25.0%和 29.2%, 作为芽期盐敏感种质。设置 NaCl 浓度梯度为 0、50、100、125、150、175、200 mmol/L 进行预实验, 筛选最佳 NaCl 浓度用于 64 份种质资源芽期耐盐性评价。

1.3 测定指标

以种子胚根达到 1 mm 长为发芽标准^[17], 在 NaCl 胁迫 3、5、10 d 时调查各处理的发芽数, 胁迫 5、10 d 时调查各处理的芽长和根长。以相对芽长、相对根长、相对发芽势、相对发芽率、相对盐害率、发芽指数和活力指数作为发芽期耐盐性的评价指标, 对各种质资源的芽期耐盐性进行评价, 其中发芽指数用盐胁迫 3、5、10 d 的发芽数进行计算。

发芽势(%)=(培养 5 d 种子发芽数/供试种子粒数)×100

相对发芽势(%)=(NaCl 处理种子发芽势/空白对照种子发芽势)×100;

发芽率(%)=(培养 10 d 种子发芽数/供试种子粒数)×100;

相对发芽率(%)=(NaCl 处理种子发芽率/空白对照种子发芽率)×100;

相对芽长(%)=(NaCl 处理种子芽长/空白对照种子芽长)×100;

相对根长(%)=(NaCl 处理种子根长/空白对照种子根长)×100;

相对盐害率(%)=[(对照发芽率-处理发芽率)/

对照发芽率]×100;

发芽指数 $GI = \sum(G_t/D_t)$, (G_t 指第 t 天种子发芽数, D_t 指相应发芽天数);^[17,18]

活力指数 $VI = GI \times S$, (S 指种苗生长量, 为胁迫10 d的根长)^[19]。

1.4 数据统计分析

使用 Excel 2013 整理试验数据, 利用 SPSS 19.0 和 SAS 9.2 软件对 7 个水稻芽期耐盐相关性指标进行独立样本 t 检验、相关性、差异显著性、聚类、主成分和逐步线性回归分析, 利用隶属函数和标准差系数赋予权重法进行耐盐性的综合评价, 相关指标计算公式及方法参考文献[20-21]。

1.4.1 粳稻种质资源各综合指标的隶属函数值

隶属函数值计算公式:

$$u(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

$$j=1, 2, \dots, n; \quad 1)$$

式中 X_j 表示第 j 个综合指标, X_{\min} 、 X_{\max} 为所有参试材料某一指标的最小值和最大值。

1.4.2 各综合指标的权重

$$w_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad j=1, 2, \dots, n; \quad 2)$$

式中, W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重; P_j 代表经主成分分析所得各粳稻种质资源第 j 个综合指标的贡献率。

1.4.3 粳稻种质资源综合耐盐能力

$$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times w_j] \quad j=1, 2, \dots, n; \quad 3)$$

式中, D 值表示各粳稻种质资源在盐胁迫下由综合指标评价所得到的发芽期耐盐性综合评价值。

2 结果与分析

2.1 粳稻种质资源芽期耐盐性评价盐胁迫最适浓度筛选

对3个芽期耐盐和3个芽期盐敏感种质资源进行不同浓度NaCl溶液胁迫后发现, 随着NaCl浓度的提高, 各种质资源的7个芽期耐盐相关指标均显著降低。除100 mmol/L NaCl溶液胁迫10 d的相对根长和活力指数外, 两类种质资源各芽期耐盐相关指标在较低的NaCl浓度(0、50、100 mmol/L)和较高的浓度(175、200 mmol/L)下, 差异均未达到极显著水平; 而125 mmol/L NaCl浓度下, 二者之间各芽期耐盐相关指标差异均达到极显著水平(表2), 故选择该

浓度对64份粳稻种质资源的芽期耐盐性进行评价。

2.2 粳稻种质资源盐胁迫条件下芽期各评价指标表现

t 检验结果表明, 各种质资源的7个芽期耐盐相关性指标在盐处理条件下与空白对照相比, 均表现出极显著的差异(表3)。 t 值均为正值, 表明与空白条件下相比, 盐胁迫严重影响了水稻种子的萌发, 各指标的表型值均明显下降。除盐胁迫10 d的相对根长外, 各指标均表现出较大的分布范围, 表明这些指标在各种质资源间存在着较大的变异。其中, 盐胁迫5 d相对发芽势和相对盐害率的分布范围最广, 分别为0.8%~100.0%和0.0%~99.2%。

2.3 粳稻种质资源盐胁迫条件下芽期各评价指标与苗期耐盐级别的相关分析

与正常培养条件相比, 盐胁迫下水稻种子萌发的形态学特征有不同程度的变化, 通过形态生理指标间的相关性分析可揭示指标间是否存在依存关系及相关关系的方向与强度^[22]。本研究前期已完成64份粳稻种质资源苗期耐盐性评价^[23,24], 利用苗期耐盐级别(STS)与芽期各评价指标进行相关性分析。由表4可以看出, 相对盐害率与相对根长、相对发芽势、相对发芽率、发芽指数和活力指数均呈极显著负相关, 其中相对盐害率与发芽指数的相关系数最大, 为-0.860; 相对芽长与其他指标间的相关性未达到显著水平。苗期耐盐级别与相对芽长、相对根长、相对发芽势、发芽指数均呈显著正相关, 与活力指数呈极显著正相关。

根据芽期各指标间相关分析, 我们发现多个评价指标间存在极显著相关性, 会使其提供的信息发生重叠, 各指标变化幅度参差不齐, 且发挥作用的大小也不相同。水稻耐盐性是一个复杂的综合性状, 直接利用单项指标不能准确、直观地进行耐盐性评价, 可利用主成分分析对供试粳稻种质资源芽期耐盐性进行深入的综合评价。

2.4 粳稻种质资源盐胁迫条件下芽期耐盐性的综合评价

2.4.1 主成分分析

对7个水稻芽期耐盐单项指标进行主成分分析(表5), CI_1 、 CI_2 两个主成分的特征值分别为4.37和1.20, 均大于1, 其贡献率分别为62.5%和17.1%, 表明第一主成分能够提供原变量综合信息的一半以上。第一、二、三主成分的累计贡献率为91.6%, 已对大多数指标作了充分的概括, 因此, 提取了3个主成分, 将原有的7个芽期评价指标转换为3个新的相互独立的综合指标, 来代表原始指标携带的

表2 典型耐盐和盐敏感粳稻种质资源在不同浓度NaCl胁迫条件下芽期各评价指标表现

Table 2. Phenotypic values of typical salt-tolerant and sensitive rice germplasm accessions under different NaCl concentrations at seed germination stage.

NaCl 浓度 NaCl Concentration (mmol·L ⁻¹)	芽期耐盐性 Salt tolerance	相对发芽势 Relative germination potential/%		相对盐害率 Relative salt damage rate /%		相对芽长 Relative shoot length/%		相对根长 Relative root length/%		发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
										10 d	10 d
		5 d	10 d	5 d	10 d	5 d	10 d	5 d	10 d		
0	耐盐 ST	—	—	—	—	—	—	—	—	14.5±0.1 A	423.9±8.9 A
	盐敏感 SS	—	—	—	—	—	—	—	—	14.8±0.3 A	396.8±39.2 A
50	耐盐 ST	96.6±2.7 A	97.8±2.3 A	3.4±2.7 A	2.2±2.3 A	63.7±2.4 A	68.5±3.6 A	69.1±1.1 A	38.0±2.9 A	14.4±0.4 A	160.2±19.6 A
	盐敏感 SS	97.7±2.4 A	98.2±1.9 A	2.3±2.4 A	1.8±1.9 A	61.3±6.8 A	62.6±7.8 A	53.4±11.0 A	35.5±3.3 A	14.5±0.5 A	137.9±11.5 A
100	耐盐 ST	89.7±3.3 A	94.8±2.8 A	10.3±3.3 A	5.2±2.8 A	46.9±7.7 A	24.5±1.1 A	20.2±1.4 A	13.0±3.1 A	13.5±0.2 A	51.5±12.2 A
	盐敏感 SS	85.6±5.6 A	96.4±3.3 A	14.4±5.6 A	3.6±3.3 A	38.4±2.7 A	23.6±4.3 A	16.1±2.7 A	7.8±1.7 B	13.2±0.4 A	27.4±4.6 B
125	耐盐 ST	84.6±4.9 A	89.3±3.8 A	15.4±4.9 A	10.7±3.8 A	48.5±2.5 A	27.8±0.4 A	25.8±1.8 A	9.9±1.6 A	13.1±0.4 A	38.1±6.6 A
	盐敏感 SS	46.4±10.2 B	64.2±4.9 B	53.6±10.2 B	35.8±5.0 B	37.3±1.2 B	20.7±0.6 B	13.5±1.5 B	6.4±0.3 B	8.4±0.8 B	14.2±0.7 B
150	耐盐 ST	62.3±4.9 A	73.4±5.5 A	37.7±4.9 A	26.6±5.5 A	41.3±2.0 A	27.4±3.3 A	16.2±1.8 A	11.0±0.9 A	9.2±0.1 A	29.5±1.6 A
	盐敏感 SS	48.5±9.4 B	62.0±4.8 B	51.5±9.4 B	38.0±4.8 B	38.0±1.8 A	22.0±1.9 A	12.3±0.8 B	7.2±0.7 B	7.9±0.5 B	15.1±1.4 B
175	耐盐 ST	34.2±4.9 A	59.6±3.8 A	65.8±4.9 A	40.4±3.8 A	28.7±2.2 A	21.0±1.8 A	7.6±2.3 A	5.3±1.7 A	6.3±0.7 A	9.7±2.2 A
	盐敏感 SS	29.5±4.6 A	51.4±9.9 A	70.5±4.6 A	48.6±9.9 A	28.4±0.7 A	18.5±1.7 A	7.5±1.6 A	4.7±0.7 A	5.5±0.6 A	7.0±2.5 A
200	耐盐 ST	12.2±2.6 A	47.4±4.5 A	87.8±2.6 A	52.6±4.5 A	27.2±0.9 A	20.4±0.6 A	6.6±1.7 A	5.2±0.7 A	3.3±0.1 A	5.1±0.5 A
	盐敏感 SS	9.2±3.9 A	43.8±4.2 A	90.8±3.9 A	56.2±4.2 A	28.1±0.5 A	17.1±1.4 A	6.4±0.2 A	4.5±0.6 A	3.1±0.2 A	3.2±1.0 A

ST—芽期耐盐, SS—芽期盐敏感;同一列中不同大写字母表示差异极显著($P \leq 0.01$, LSD)

ST, Salt tolerance at germination stage; SS, Salt sensitivity at germination stage. Different values within a column followed by different letters are significantly different at $P \leq 0.01$ (capital letter) by LSD test.

表3 粳稻种质资源盐胁迫条件下芽期各评价指标均值及分布范围

Table 3. Performance of salt tolerance-related traits of 64 rice germplasm accessions at seed germination stage

发芽时间 Germination time/d	性状 Trait	分布范围 Range	均值±标准差 Mean±SD	F 值 F-value	t 值 t-value
5	相对芽长 Relative shoot length/%	0.0~76.1	31.4±13.1	38.867	11.874**
	相对根长 Relative root length/%	0.0~23.1	4.6±4.1	134.862	18.869**
	相对发芽势 Relative germination potential/%	0.8~100.0	81.0±25.8	49.951	5.225**
	相对盐害率 Relative salt damage rate/%	0.0~99.2	19.0±9.4	—	—
10	相对芽长 Relative shoot length/%	7.3~40.7	18.1±5.6	48.184	22.891**
	相对根长 Relative root length/%	0.6~13.4	4.7±2.5	77.975	30.868**
	相对发芽率 Relative germination rate/%	58.9~100.0	94.9±7.4	21.272	4.238**
	发芽指数 Germination index	2.1~14.9	12.7±3.0	39.713	5.096**
	活力指数 Vigor index	1.7~67.7	27.5±15.4	73.327	30.660**
	相对盐害率 Relative salt damage rate/%	0.0~41.1	5.1±7.4	—	—

**表示该指标在盐胁迫条件下与空白对照差异极显著($P < 0.01$)。

**Indicates significant difference at 0.01 level.

绝大部分信息。

由表 6 可知,在第一主成分中,相对发芽势(X_3)、相对发芽率(X_4)、发芽指数(X_5)和相对盐害率(X_7)的载荷绝对值较高,均在 0.4 以上,是第一主成分中的主要作用因子;第二主成分中,相对芽长(X_1)、相对根长(X_2)的载荷绝对值较高,分别为 0.707 和 0.490;相对芽长(X_1)、相对根长(X_2)和活力指数(X_6)为第三主成分的主要作用因子。综合 3 个主成分所携带的信息,可用相对发芽势、相对发芽率、发芽

指数及相对盐害率 4 个指标来概括 7 个指标中的大部分信息。

2.4.2 隶属函数及粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价

利用综合指标值(CI_1 - CI_3)和公式(1)分别计算 64 个粳稻种质资源的隶属函数值 $u(X_j)$ 。对于同一综合指标如 CI_1 而言,盐胁迫处理下,OB34(Daniela)的 $u(X_1)$ 最大,其值为 1,表明此种质在主成分一表现为耐盐性最强,而 OB15(宁粳 16)的 $u(X_1)$ 最小,

表4 盐胁迫处理下水稻芽期各单项指标与苗期耐盐级别的相关系数矩阵

Table 4. Correlation matrix of each single index of rice seed germination and salt tolerance score under salt stress.

指标 Index	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_1	1.000							
X_2	0.180	1.000						
X_3	0.010	0.524**	1.000					
X_4	-0.125	0.394**	0.734**	1.000				
X_5	-0.011	0.510**	0.978**	0.816**	1.000			
X_6	0.071	0.877**	0.654**	0.537**	0.658**	1.000		
X_7	-0.035	-0.404**	-0.767**	-0.780**	-0.860**	-0.510**	1.000	
X_8	0.289*	0.269*	0.300*	0.143	0.282*	0.424**	-0.143	1.000

**表示极显著相关($P \leq 0.01$), *表示显著相关($P \leq 0.05$)。 X_1 ~ X_8 分别表示相对芽长、相对根长、相对发芽势、相对发芽率、发芽指数、活力指数、相对盐害率和苗期耐盐级别。

** refers to extreme significance according to Pearson's test ($P \leq 0.01$). * refers to significance according to Pearson's test ($P \leq 0.05$). X_1 - X_8 represents relative shoot length, relative root length, relative germination potential, relative germination rate, germination index, vigor index, relative salt damage rate and salt tolerance score, respectively.

表5 各综合指标的特征值及贡献率

Table 5. Eigen values and proportion of comprehensive indexes [CI_i].

主成分 Principal component	特征值 Eigen value	贡献率 Contribution/%	累计贡献率 Cumulative contribution/%
CI_1	4.37	62.45	62.45
CI_2	1.20	17.14	79.60
CI_3	0.84	11.95	91.55
CI_4	0.29	4.13	95.68
CI_5	0.20	2.82	98.50
CI_6	0.10	1.42	99.92
CI_7	0.01	0.08	100.00

表6 各因子载荷矩阵

Table 6. Loading matrix of each component.

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
CI_1	0.015	0.337	0.442	0.403	0.457	0.389	-0.410
CI_2	0.707	0.490	-0.009	-0.288	-0.152	0.331	0.185
CI_3	-0.685	0.442	-0.125	-0.109	-0.161	0.425	0.318

X_1 ~ X_7 分别表示相对芽长、相对根长、相对发芽势、相对发芽率、发芽指数、活力指数和相对盐害率。

X_1 ~ X_7 represents relative shoot length, relative root length, relative germination potential, relative germination rate, germination index, vigor index and relative salt damage rate, respectively.

其值为 0, 表明该种质在这一综合指标上表现为耐盐性最差。依据芽期各综合指标贡献率的大小利用公式(2)求出芽期 3 个综合指标的权重, 分别为 0.682、0.187 和 0.131。利用公式(3)以隶属函数 $u(X_1)$ 、 $u(X_2)$ 和 $u(X_3)$ 结合权重处理并累加得到综合评价 D 值(表 1), 并依此进行芽期耐盐性的排名。

综合评价 D 的大小客观反应了各粳稻种质资源芽期耐盐能力的大小, 数值越大说明耐盐能力越强。分别选取综合排名前 5 名和最后 5 名作为高 D 值种质资源和低 D 值种质资源, 即 OB34(Daniela)、OB37(Gostima)、OB45(Hrborio Cyauco)、OB35(Arborio)和 OB41(Rossi), 其 D 值均在 0.820 以上,

排名第一的 Daniela 芽期综合耐盐能力最强; 低 D 值种质资源为 OB30(辽丰 8 号)、OB64(ARC7042)、OB48(嘉农 485)、OB1(合江 21)和 OB15(宁粳 16), D 值均在 0.370 以下, 耐盐性相对较弱。其中, 宁粳 16 号芽期综合耐盐能力最弱。

2.5 粳稻种质资源芽期耐盐性形态指标聚类分析

以 D 值为依据将 64 份粳稻种质资源进行类群划分: D 值范围在 0.211~0.510 之间有 10 份种质, 为盐敏感种质; D 值范围在 0.511~0.650 之间有 23 份种质, 为弱耐盐种质; D 值范围在 0.651~0.750 之间有 21 份种质, 为耐盐种质; D 值范围在 0.751~0.961 之间有 10 份种质, 为高度耐盐种质。

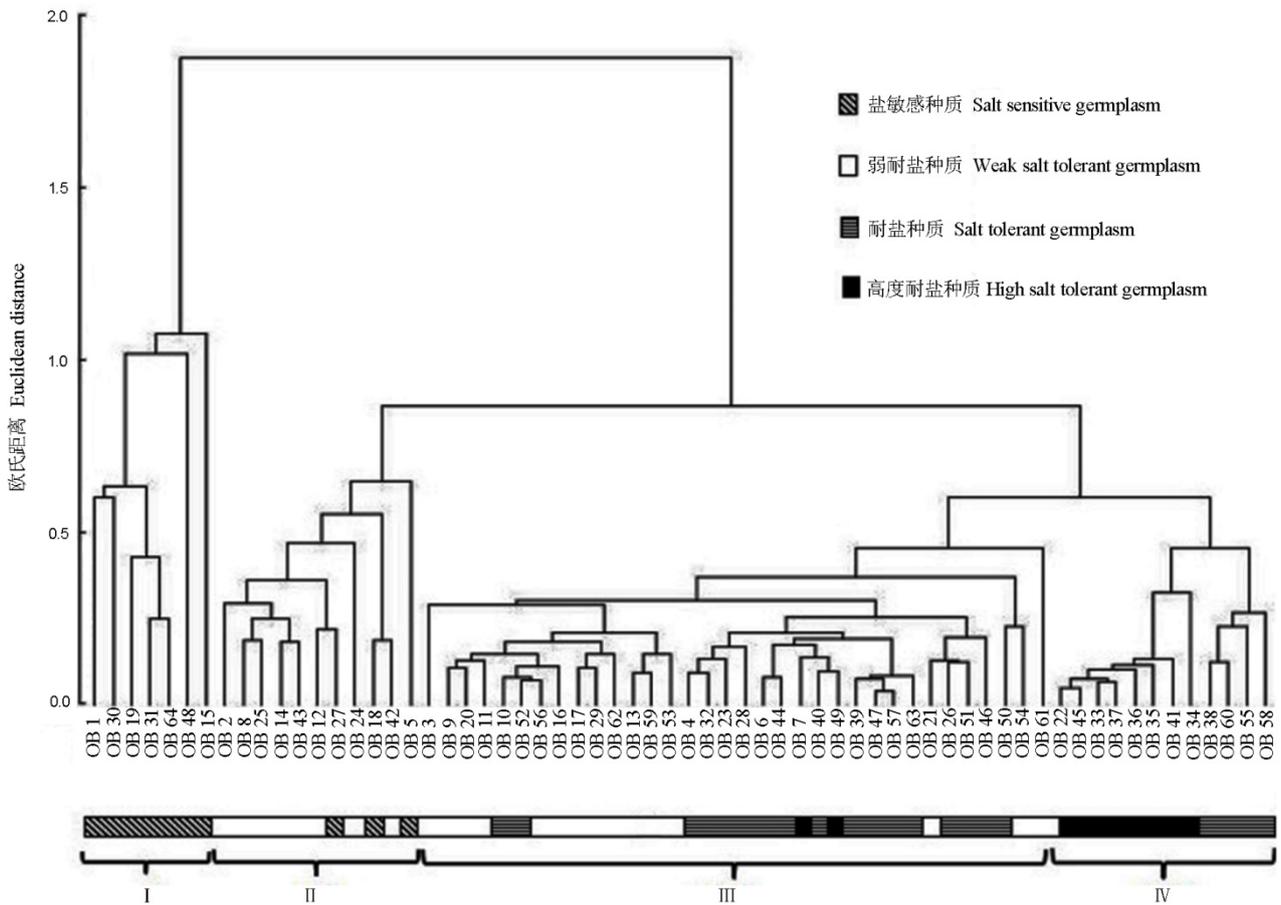


图1 基于6个芽期耐盐指标的64份粳稻种质资源聚类分析结果

Fig. 1. Cluster analysis of 64 rice germplasm based on the six salt response indexes.

为验证用 D 值评价水稻芽期耐盐性的效果,用除相对芽长以外的6个形态指标数据,参照戴海芳等^[20]的方法进行系统聚类分析,发现在欧氏距离1.08处可划分为两大类群,分别为第I类群和由II、III、IV组成的混合类群;在欧氏距离0.87时可将混合类群细划为II、III、IV 3个类群(图1)。

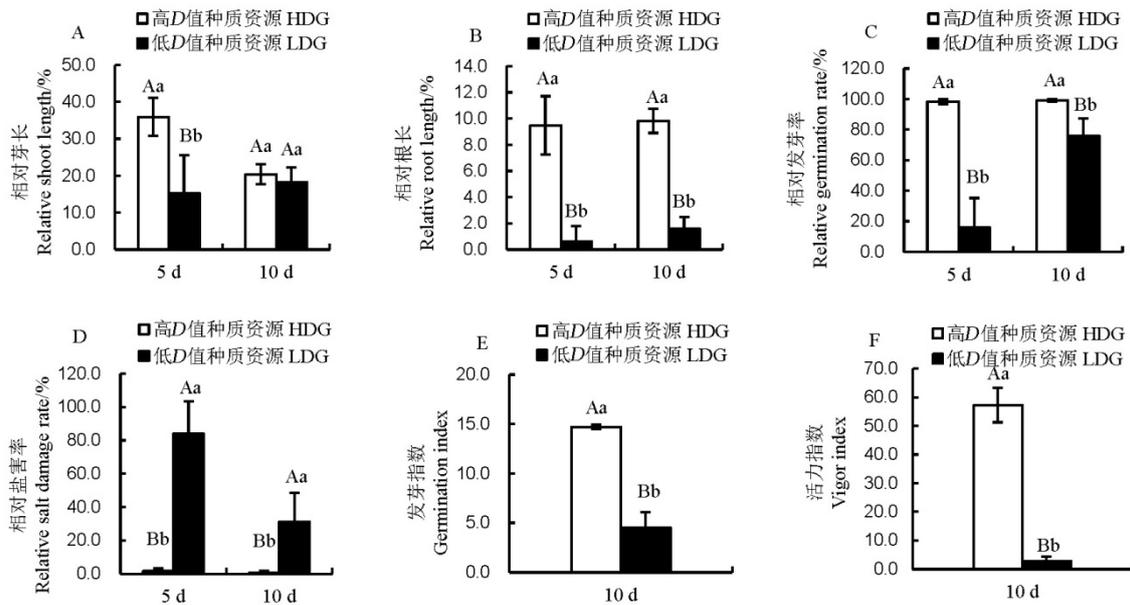
第I类群为盐敏感类群,包括OB1、OB30、OB19、OB31、OB64、OB48和OB15,这7份种质资源的 D 值均小于0.50,皆为盐敏感种质,原产地均在亚洲,在盐胁迫条件下,该类群种质受到抑制最为明显。

第II类群为弱耐盐种质为主的混合类群,包括8份弱耐盐种质和3份盐敏感种质,除OB27、OB18和OB5以外,均为弱耐盐种质,其 D 值分布范围为0.484~0.548。第III类群为中度耐盐类群,由34份种质组成,包括2个高度耐盐种质,17个耐盐种质和15个弱耐盐种质, D 值分布范围在0.570~0.795之间,是耐盐种质相对集中的1个类群。第IV类群为高度耐盐类群,包括8个高度耐盐种质和4个耐

盐种质, D 值分布范围为0.702~0.961,具有较强的耐盐性。除盐敏感类群均来自亚洲外,未发现芽期耐盐性与种质来源、地理分布有明显的相关性。

2.6 低 D 值种质资源与高 D 值种质资源各指标的差异显著性分析

由于发芽率与发芽势都可表示为一定条件下第 n 天的发芽种子数占供试种子数的百分率,因此在对高(低) D 值种质资源各指标差异显著性分析时统一记为相对发芽率。对5份高 D 值种质资源、5份低 D 值种质资源的7个芽期耐盐相关指标分别进行方差分析, F 值的分布范围为3.35~674.90;除盐胁迫10 d的相对芽长 P 值为0.078之外,其他各指标 P 值均小于0.001。利用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,结果表明,盐胁迫5 d后,低 D 值种质资源和高 D 值种质资源的各指标均表现出极显著差异(图2),尤其是相对盐害率二者差异最为明显。盐处理10 d后,相对芽长的差异未达到显著水平,其他各指标均表现为极显著差异。表明两类种质在盐胁迫5 d时已有显著差异,主要表现在发芽速度的快慢,芽



柱上不同小写和大写字母分别表示差异显著和极显著(LSD, $n=30$)。

HDG, High D value germplasm; LDG, Low D value germplasm different lowercase and uppercase letters above the bars indicate significant difference at $P \leq 0.01$ and $P \leq 0.05$, respectively by the LSD test($n=30$).

图2 125 mmol/L NaCl 胁迫下典型耐(敏)盐粳稻种质资源芽期形态指标表现

Fig. 2. Morphology indexes of typical salt tolerant and sensitive japonica rice germplasm at germination stage under salt stress.

和根系伸长的程度等方面,随着发芽时间的延长,发芽率和芽长的差异逐渐减小,主要表现为根系伸长的差异(图2-A~B)。

2.7 水稻芽期和苗期高度耐盐种质资源筛选

芽期耐盐性综合排名7、8的漾濞光壳陆稻和涅罗表现出很强的芽期耐盐性(图3-A、表1),其盐胁迫10 d 的相对根长分别为7.8%和8.1%,发芽指数分别为14.6和14.5,相对盐害率分别为1.0%和2.0%;它们的苗期耐盐性也很出色,耐盐级别分别为6.3和6.6。此外,综合排名14的Bertone也是一个苗期高度耐盐种质,耐盐级别7.5^[24],125 mmol/L NaCl胁迫6 d,仅第1、2叶萎蔫,有3~4片完整的绿叶(图3-B),可作为水稻耐盐育种的优良供体亲本。

2.8 回归模型的建立及芽期耐盐主要评价指标筛选

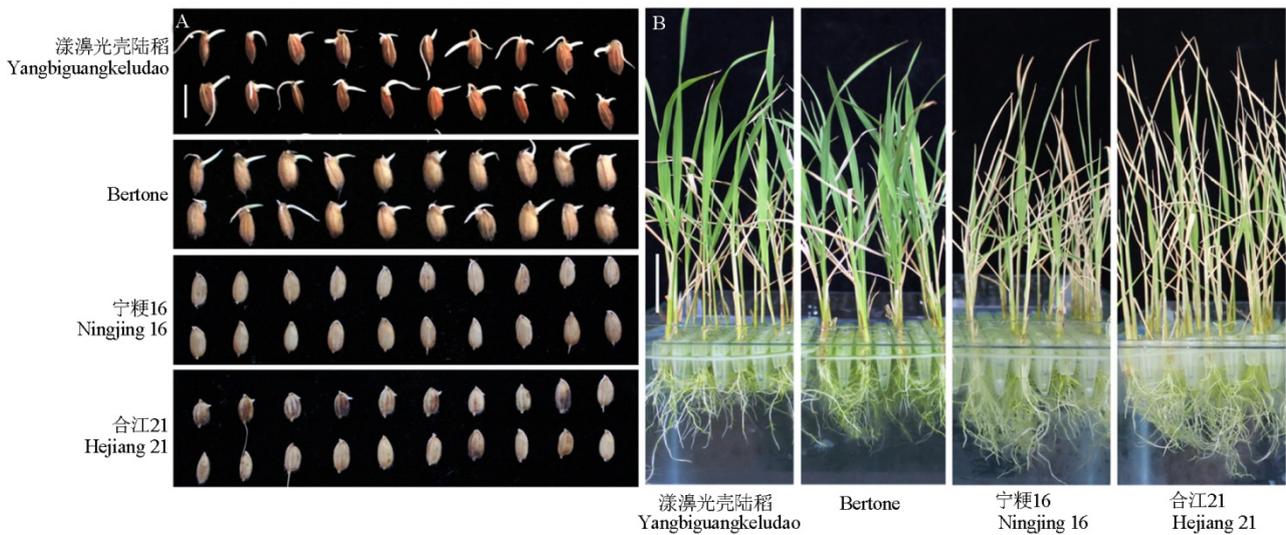
利用已获得芽期耐盐综合评价 D 值和7个芽期耐盐相关指标,建立可用于水稻芽期耐盐性评价的数学模型,把 D 值作为因变量,把各单项指标作为自变量进行逐步回归分析,建立最优回归方程: $D = -0.083 + 0.025X_5 + 0.033X_2 + 0.002X_4 + 0.001X_1$ 。方程相关系数 $R=0.993$,决定系数 $R^2=0.985$, F 值为978.606。由方程可知,7个指标中有4个指标对水稻芽期耐盐性有显著影响,分别是 X_5 (发芽指数)、 X_2 (相对根长)、

X_4 (相对发芽率)和 X_1 (相对芽长),它们与 D 值均呈极显著相关, P 值除相对芽长为0.007外均小于0.001。结合这4个指标的偏回归系数,发芽指数和相对根长可作为水稻芽期耐盐性评价的关键指标。

3 讨论

3.1 盐胁迫对不同耐盐性水稻种子萌发的影响

植物种子在萌发期受到盐胁迫时,发芽时间会延迟,发芽率降低,生育进程受到抑制^[11,25]。肖文斐等^[10]在对31个籼稻品种的芽期耐盐性评价中发现,各品种在9 g/L NaCl溶液处理下发芽起始时间明显延迟,发芽变缓,发芽指数和活力指数均显著降低。本研究在对64份粳稻种质资源的芽期盐胁迫中发现,与空白对照相比,各种质的发芽起始时间普遍延迟了0.5~1.5 d,发芽时间均比空白对照的3~4 d延长了1 d以上,该现象在盐敏感种质中更为明显。如OB48(嘉农485)在盐胁迫10 d时相对发芽率仅为58.9%,其种子萌发受到了很大程度的抑制。崔江慧等在对10份高粱材料的盐处理时发现,侧根盐害率的变化最大,表明侧根的发生和伸长对盐胁迫最敏感^[26],水稻中也有类似的报道^[13]。本研究中,各种质资源10 d的相对根长分布范围为0.6%~13.4%



A—125 mmol/L NaCl 胁迫下发芽 5 d； B—125 mmol/L NaCl 胁迫 6 d 的秧苗；标尺=0.8 cm (A)、2.5 cm (B)。

A, Seeds of four japonica rice germplasm accessions germinated in the 125 mmol/L NaCl solution for five days; B, Seedlings of four japonica rice germplasm accessions treated with 125 mmol/L NaCl for six days; Scale bar, 0.8 cm (A) and 2.5 cm (B).

图 3 125 mmol/L NaCl 胁迫条件下典型耐盐和盐敏感水稻种质资源的表现型

Fig. 3. Phenotypes of two salt tolerant rice germplasm accessions and two salt sensitive rice germplasm accessions under 125 mmol/L NaCl for five and six days, respectively in germination and seedling stages.

(表3), 根的伸长受到了很严重的影响, 典型耐盐种质的相对根长极显著大于盐敏感种质(图2-B); 而10 d的相对芽长分布范围为7.3 %~40.7 %, 表明水稻种子萌发时根的伸长对盐胁迫最为敏感, 芽次之, 这与前人的研究结果一致。

3.2 水稻芽期耐盐性评价关键指标的选择

作物种子萌发期进行耐盐评价时, 发芽势、发芽率、芽长、根长、发芽指数、活力指数等是常用的耐盐评价指标^[27]。众多学者利用上述指标及其相对值对水稻^[9-16]、高粱^[26,28]、偃麦草^[27]、小麦^[29]和苜蓿^[18]等作物的芽期耐盐性开展了大量研究, 但对芽期耐盐评价的关键指标未达成统一的结论。贾宝艳等^[12]认为, 发芽指数、发芽率和相对受害率是衡量水稻芽期耐盐能力的主要指标。冯钟慧等^[16]认为相对芽长和相对根长有望成为水稻早期耐盐性快速鉴定的主要指标。本研究通过对综合评价D值与7个单项指标的逐步线性回归分析, 获得了1个最优回归方程, 结合方程中4个自变量指标的偏回归系数, 筛选到了发芽指数和相对根长两个关键指标。同时, 结合主成分分析中第一主成分的贡献率及其各载荷因子的系数, 以及典型耐(敏)盐种质各指标的差异显著性分析, 认为相对盐害率也是一个很重要的水稻芽期耐盐相关指标。利用上述3个指标结合相近的NaCl浓度, 不同学者进行了粳稻^[11,12,16]、籼稻^[9-11,13]、爪哇稻^[11]的芽期耐盐性评价, 均取得

了较好地鉴定结果, 表明本研究所建立的粳稻种质资源芽期耐盐性评价方法和重要指标也可用于籼稻等其他类型水稻的芽期耐盐性评价。

3.3 水稻芽期耐盐性的多元统计学分析

作物耐盐性是受诸多因素影响的复杂性状, 是外界环境与其自身基因型互作的结果, 简单地使用某些单项指标很难全面的反映其耐盐本质^[20]。本研究选用7个水稻芽期耐盐指标进行测定, 并在此基础上利用多元统计分析对粳稻种质资源芽期耐盐能力进行了综合评价。利用主成分分析, 将7个指标转化为3个彼此独立的新指标; 结合隶属函数及权重获得了可以客观反映各种质耐盐性的综合评价D值, 利用该指标将64份粳稻种质资源划分为高度耐盐、耐盐、弱耐盐和盐敏感4种类型。利用逐步回归构建了1个较为可靠的水稻芽期耐盐性评价模型, 利用该模型, 可在相同的胁迫条件下预测目标种质耐盐性的强弱, 为水稻耐盐育种及资源的鉴定提供一定的依据。

3.4 水稻种质资源芽期与苗期耐盐的相关性分析及耐盐种质在育种中的应用策略

吴家富等^[30]的研究表明, 水稻耐盐性有明显的阶段发育特异性, 不同发育阶段的耐盐性之间无明显相关性。本研究通过相关分析发现, 苗期耐盐级别与包括D值在内的多个芽期耐盐相关指标表现为极显著或显著正相关(表4), 与D值的相关系数为

0.334, 呈极显著正相关, 与前人的研究结果存在一定的差异, 这可能与选用的种质资源材料特性不同有关。

水稻直播对实现稻米生产的专业化、轻型化、规模化有重要意义。近年来我国水稻直播面积不断扩大^[31], 因此较强的芽期耐盐性是盐渍地区水稻直播品种必须优先具备的特性。这就要求我们在育种实践中要综合考虑种质资源的特性并合理利用。

“设计育种”最早由Peleman等提出, 是通过有目的地聚合有利基因, 培育和创造优良品种或资源的育种方法。根据Li等^[32]提出的分子设计育种策略, 可选择生产中大面积推广的品种(如富源4号)作为轮回亲本, 以耐盐水稻种质资源(如本研究筛选到的3个芽期和苗期都耐盐的种质)为供体, 培育高代回交群体, 结合分子标记辅助选择和客观准确的耐盐筛选和鉴定, 获得可直接用于生产的优良耐盐渗入系。同时通过基因组学、转录组学和代谢组学等手段可进行目标基因的克隆及功能标记开发, 进一步改良水稻品种的耐盐性。宁粳16和合江21是芽期和苗期高度盐敏感的种质(图3), 可用于水稻芽期、苗期盐敏感基因的分离和克隆。

4 结论

在人工气候箱中利用 125 mmol/L NaCl 溶液对 64 份粳稻种质资源芽期耐盐性进行鉴定评价。利用逐步回归和主成分分析等统计学方法, 从测定的 7 个单项指标中筛选出发芽指数、相对根长、相对盐害率 3 个关键指标, 建立了回归方程, 可用于水稻种质资源芽期耐盐性的快速鉴定与预测。利用综合评价 *D* 值获得了 5 份芽期高度耐盐种质, 为水稻种质资源筛选与鉴定, 耐盐品种的选育、推广提供了材料和依据。

参考文献:

- [1] 张翼夫, 李洪文, 胡红, 陈婉芝, 王宪良, 牛琪. 盐碱地后悬挂随动式打开通气机的设计与试验. *农业工程学报*, 2016, 32(18): 42-49.
Zhang Y F, Li H W, Hu H, Chen W Z, Wang X L, Niu Q. Design and experiment on rear suspended passive aerator in saline-alkali land. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, 32(18): 42-49. (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang X, Wang J G, Liu H L, Zou D T, Zhao H W. Influence of natural saline-alkali stress on chlorophyll content and chloroplast ultrastructure of two contrasting rice (*Oryza sativa* L. japonica) cultivars. *Aust J Crop Sci*, 2013, 7(2): 289-292.
- [3] 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. *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27(24): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [4] Yu J B, Wang Z C, Meixner F X, Yang F, Wu H F, Chen X B. Biogeochemical characterizations and reclamation strategies of saline sodic soil in northeastern China. *Clean-Soil, Air, Water*, 2010, 38(11): 1010-1016.
- [5] Tian L, Tan L B, Liu F X, Cai H W, Sun C Q. Identification of quantitative trait loci associated with salt tolerance at seedling stage from *Oryza rufipogon*. *J Genet Genom*, 2011, 38(12): 593-601.
- [6] 曾玲玲, 季生栋, 王俊强, 张成亮, 赵刚. 植物耐盐机理的研究进展. *黑龙江农业科学*, 2009(3): 156-159.
Zeng L L, Ji S D, Wang J Q, Zhang C L, Zhao G. Advances on the mechanism of plant salt tolerance. *Heilongjiang Agric Sci*, 2009(3): 156-159. (in Chinese with English abstract)
- [7] Wang Z F, Cheng J P, Chen Z W, Huang J, Bao Y M, Wang J F, Zhang H S. Identification of QTLs with main, epistatic and QTL×environment interaction effects for salt tolerance in rice seedlings under different salinity conditions. *Theor Appl Genet*, 2012, 125(4): 807-815.
- [8] Ghaffaria A, Gharechahib J, Nakhodaa B, Salekdeh G H. Physiology and proteome responses of two contrasting rice mutants and their wild type parent under salt stress conditions at the vegetative stage. *J Plant Physiol*, 2014, 171(1): 31-44.
- [9] Wang Z F, Wang J F, Bao Y M, Wu Y Y, Zhang H S. Quantitative trait loci controlling rice seed germination under salt stress. *Euphytica*, 2011, 178 (3): 297-307.
- [10] 肖文斐, 马华升, 陈文岳, 裘劭人, 童建新, 郑桂珍, 忻雅, 王淑珍, 方献平, 阮松林. 籼稻耐盐性与稻米品质性状的关联分析. *核农学报*, 2013, 27(12): 1938-1947.
Xiao W F, Ma H S, Chen W Y, Qiu J R, Tong J X, Zheng G Z, Xin Y, Wang S Z, Fang X P, Ruan S L. Correlation analysis of salt tolerance and grain quality traits in *Indica* rice (*Oryza sativa* L.). *Acta Agric Nucl Sin*, 2013, 27(12): 1938-1947. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郭望模, 傅亚萍, 孙宗修, 郑镇一. 盐胁迫下不同水稻种质形态指标与耐盐性的相关分析. *植物遗传资源学报*, 2003, 4(3): 245-251.
Guo W M, Fu Y P, Sun Z X, Zheng Z Y. The Correlation analysis between the morphological indices and salt tolerance in different rice germplasm under the salt stress. *J Plant Genet Resour*, 2003, 4(3): 245-251. (in Chinese with English abstract)

- [12] 贾宝艳, 周婵婵, 孙晓雪, 董立强, 黄元财, 王岩, 王术. 辽宁省水稻种质资源的耐盐性鉴定评价. 作物杂志, 2013, 4: 57-62.
Jia B Y, Zhou C C, Sun X X, Dong L Q, Hang Y C, Wang Y, Wang S. The evaluation of salt tolerance ability of rice varieties in Liaoning Province. *Crops*, 2013, 4: 57-62. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wang Z F, Wang J F, Bao Y M, Wu Y Y, Su X, Zang H S. Inheritance of rice seed germination ability under salt stress. *Rice Sci*, 2010, 17(2): 105-110.
- [14] Chen D F, Li Y L, Fang T, Shi X L, Chen X W. Specific roles of tocopherols and tocotrienols in seed longevity and germination tolerance to abiotic stress in transgenic rice. *Plant Sci*, 2016, 244: 31-39.
- [15] Hasthanasombut S, Supaibulwatana K, Mii M, Nakamura I. Genetic manipulation of japonica rice using the *OsBADH1* gene from Indica rice to improve salinity tolerance. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 2011, 104(1): 79-89.
- [16] 冯钟慧, 刘晓龙, 姜昌杰, 梁正伟. 吉林省粳稻种质萌发期耐碱性和耐盐性综合评价. 土壤与作物, 2016, 5(2): 120-127.
Feng Z H, Liu X L, Jiang C J, Liang Z W. Comprehensive evaluation of rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for alkaline /saline tolerance at germination stage from Jilin province, China. *Soil Crop*, 2016, 5(2): 120-127. (in Chinese with English abstract)
- [17] 朱丽伟, 曹栋栋, 付玉营, 胡琦娟, 利站, 关亚静, 胡伟民, 胡晋. 可溶性寡糖和小分子的热激蛋白与杂交水稻种子成熟过程中发芽能力及种子活力相关. 作物学报, 2016, 42(5): 714-724.
Zhu L W, Cao D D, Fu Y Y, Hu Q J, Li Z, Guan Y J, Hu W M, Hu J. Soluble oligosaccharide and small heat shock protein correlated with seed germination and vigor during hybrid rice seed maturation. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(5): 714-724. (in Chinese with English abstract)
- [18] 鱼小军, 肖红, 徐长林, 景媛媛, 柴成燕. 扁蓊豆和苜蓿种子萌发期抗旱性和耐盐性比较. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 405-410.
Yu X J, Xiao H, Xu C L, Jing Y Y, Chai C Y. Comparative study on drought resistance and salt tolerance of *Medicago ruthenica* and *Medicago varia* at seed germination period. *J Plant Genet Resour*, 2015, 16(2): 405-410. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李振, 廖同庆, 冯青春, 张东彦, 王强, 王晓楠, 张琳洁, 王秀. 基于图像处理技术的黄瓜种子活力指数检测系统设计. 种子, 2015, 34(6): 111-115.
Li Z, Liao T Q, Feng Q C, Zhang D Y, Wang Q, Wang X N, Zhang L J, Wang X. A system design on cucumber seed vigor index detection on based on image processing. *Seed*, 2015, 34(6): 111-115. (in Chinese with English abstract)
- [20] 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽. 买买提阿力, 王立红, 麦麦提. 阿皮孜, 张巨松. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1290-1300.
Dai H F, Wu H, Amanguli M A, Wang L H, Maimaiti A, Zhang J S. Analysis of salt-tolerance and determination of salt-tolerant evaluation indicators in cotton seedlings of different genotypes. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(7): 1290-1300. (in Chinese with English abstract)
- [21] 齐国昌, 余春磊, 张鹏飞, 罗小娇, 冯宗云. 青稞苗期耐盐性鉴定及评价. 麦类作物学报, 2014, 37(7): 950-956.
Qi G C, Yu C L, Zhang K F, Luo X J, Feng Z Y. Identification and assessment on salt resistance of hulless barley at seedling stage. *J Triticeae Crops*, 2014, 37(7): 950-956. (in Chinese with English abstract)
- [22] 管志勇, 陈发棣, 滕年军, 陈素梅, 刘浦生. 5种菊花近缘种属植物的耐盐性比较. 中国农业科学, 2010, 43(4): 784-787.
Guan Z Y, Chen F D, Teng N J, Chen S M, Liu P S. Study on the NaCl tolerance in five plant species from *Dendranthema* and its relatives. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(4): 784-787. (in Chinese with English abstract)
- [23] 田蕾, 王娜, 张雪艳, 杨斌林, 孙佳莹, 李敏, 李培富. 盐胁迫下不同粳稻品种的形态和生理特性. 广东农业科学, 2014, 41(23): 1-6.
Tian L, Wang N, Zhang X Y, Yang B L, Sun J Y, Li M, Li P F. Morphological and physiological characteristics of different japonica rice varieties under salt stress. *Guangdong Agric Sci*, 2014, 41(23): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王娜, 陈亚萍, 田蕾, 张得雯, 王瑞智, 杨苗, 李培富. 粳稻种质资源苗期根系形态特征与耐盐性相关分析. 广东农业科学, 2015, 42(10): 1-10.
Wang N, Chen Y P, Tian L, Zhang D W, Wang R Z, Yang M, Li P F. Correlation between root morphological characteristics of japonica rice germplasm and salt tolerance at seedling stage. *Guangdong Agric Sci*, 2015, 42(10): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [25] Averina N G, Gritskevicha E R, Vershilovskayaa I V, Usatov A V, Yaronskaya E B. Mechanisms of salt stress tolerance development in barley plants under the Influence of 5-aminolevulinic acid. *Russ J Plant Physiol-Engl Tr*, 2010, 57(6): 792-798.
- [26] 崔江慧, 谢登磊, 常金华. 高粱材料耐盐性综合评价方法的初步建立与验证. 植物遗传资源学报, 2012, 13(1): 35-41.
Cui J H, Xie D L, Chang J H. Establishment and verification of comprehensive evaluation method for salt tolerance of sorghum materials. *J Plant Genet Resour*, 2012, 13(1): 35-41. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李培英, 孙宗玖. 33份偃麦草种质芽期耐盐性评价.

- 草业科学, 2015, 32(4): 593-600.
- Li P Y, Sun Z J. Evaluation on the salt resistance of germplasm resources of 33 *Elytrigia repens* during seed germination period. *Pratac Sci*, 2015, 32(4): 593-600. (in Chinese with English abstract)
- [28] 何晓兰, 徐照龙, 张大勇, 黄益洪, 彭陈, 邵宏波, 王为, 郭士伟. 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. *植物资源与环境学报*, 2015, 24(4): 52-60.
- He X L, Xu Z L, Zhang D Y, Huang Y H, Peng C, Shao H B, Wang W, Guo S W. Comparison on salt tolerance indexes of 65 germplasms of *Sorghum bicolor* at germination stage and comprehensive evaluation on their salt tolerance. *J Plant Resour Environ*, 2015, 24(4): 52-60. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王萌萌, 姜奇彦, 胡正, 张辉, 樊守金, 冯沥, 张海玲. 小麦品种资源耐盐性鉴定. *植物遗传资源学报*, 2012, 13(2): 189-194.
- Wang M M, Jiang Q Y, Hu Z, Zhang H, Fan S J, Feng L, Zhang H L. Evaluation for salt tolerance of wheat cultivars. *J Plant Genet Resour*, 2012, 13(2): 189-194. (in Chinese with English abstract)
- [30] 吴家富, 杨博文, 向珣朝, 许亮, 颜李梅. 不同水稻种质在不同生育期耐盐鉴定的差异. *植物学报*, 2017, 52(1): 77-88.
- Wu J F, Yang B W, Xiang X C, Xu L, Yan L M. Identification of salt tolerance in different rice germplasm at different growth stages. *Chin Bull Bot*, 2017, 52(1): 77-88. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张银平, 杜瑞成, 刁培松, 杨善东. 山东省水稻免耕旱直播试验及可行性分析. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 24-30.
- Zhang Y P, Du R C, Diao P S, Yang S D. Experiment of no-tillage and drought direct sowing rice and feasibility analysis in Shandong Province. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, 32(12): 24-30. (in Chinese with English abstract)
- [32] Li Z K, Fu B Y, Gao Y M, Xu J L, Ali J, Lafitte H R, Jiang Y Z, Rey J D, Vijayakumar C H M, Maghirang R, Zheng T Q, Zhu L H. Genome-wide introgression lines and their use in genetic and molecular dissection of complex phenotypes in rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Mol Biol*, 2005, 59(1): 33-52.