

水稻全生育期耐盐性鉴定评价方法研究

耿雷跃^{1,2}, 马小定¹, 崔迪¹, 张启星², 韩冰¹, 韩龙植¹

(¹ 中国农业科学院作物科学研究所 / 农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程 / 农业部作物种质资源与生物技术重点开放实验室, 北京 100081; ² 河北省农林科学院滨海农业研究所, 唐山 063299)

摘要: 土壤盐渍化是危害水稻生产的重要非生物胁迫因素, 而遗传改良是提高水稻耐盐性的有效途径之一。全生育期耐盐性是对水稻各生育时期耐盐性的综合反映。科学、准确、高效的水稻全生育期耐盐性鉴定评价方法是水稻耐盐遗传改良必要条件, 也是正确判别水稻种质耐盐真实性的关键所在。本研究挑选 19 份不同耐盐性水稻种质作为研究材料, 在正常环境和 0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7% 盐处理浓度下, 调查 11 个农艺性状并计算其耐盐系数, 运用品种间四分位差法分析, 明确水稻全生育期耐盐性鉴定最适浓度。品种间四分位差最大的盐浓度被认为是盐处理最佳浓度; 综合多种多元统计分析方法, 包括主成分分析、隶属函数分析、回归分析、聚类分析, 对水稻全生育期耐盐性鉴定合理评价方法进行探索。结果表明, 0.3% 盐胁迫浓度下多数性状耐盐系数品种间四分位差最大, 0.3% 盐胁迫浓度是水稻全生育期耐盐性鉴定最适浓度。主成分分析结果表明, 11 个农艺性状的耐盐系数可简化为 3 个主成分。利用主成分贡献率和隶属函数分析, 可进一步将 3 个主成分简化为水稻耐盐性综合评价指标 D 值。D 值能够简便、准确的评价水稻种质的耐盐性。本研究还利用逐步回归分析, 建立 D 值与 11 个农艺性状耐盐系数最优线性回归方程: $D = -0.365 + 0.647PL + 0.152GP + 0.274TW$ 。从该方程可知穗长、穗粒数和总干物重耐盐系数是影响 D 值的关键指标。利用回归分析建立的模型, 可准确完成对 D 值预测。本研究利用聚类分析, 将 19 份水稻种质耐盐性划分为 5 个等级, 对应于水稻 5 个耐盐等级划分, 即极强、强、中、弱、极弱, 可作为其他水稻种质耐盐性评价重要参考。

关键词: 水稻; 全生育期; 耐盐性; 鉴定方法; 综合评价

Identification and Evaluation Method for Saline Tolerance in Rice During the Whole Growth Stage

GENG Lei-yue^{1,2}, MA Xiao-ding¹, CUI Di¹, ZHANG Qi-xing², HAN Bing¹, HAN Long-zhi¹

(¹ Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/The National Key Facility for Crop Gene Resources and Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Germplasm Resources and Biotechnology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081; ² Coastal Agriculture Institute, Hebei Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Tangshan 063299)

Abstract: Soil salinization is one of the important abiotic stresses on rice production, and the genetic improvement is an effective way to improve the salinity tolerance of rice. Saline tolerance of rice during the whole growth stage is a comprehensive reflection of saline tolerance for several growth stages of rice. The scientific, accurate and efficient identification and evaluation system for saline tolerance of rice during the whole growth period

收稿日期: 2018-08-15 修回日期: 2018-09-16 网络出版日期: 2018-11-22

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20181121.0846.001.html>

第一作者研究方向为水稻耐盐性鉴定评价与新基因发掘, E-mail: lowrygeng@163.com

通信作者: 韩龙植, 研究方向为水稻种质资源创新与利用, E-mail: hanlongzhi@caas.cn

基金项目: 国家科技支撑计划课题 (2015BAD01B01-1); 国家重点研发计划课题 (2016YFD0100101); 中国农业科学院科技创新工程项目; 国家农作物种质资源保护项目 (2017NWB036-01, 2017NWB036-12-2); 国家农作物种质资源平台 (NICGR2017-001); 河北省农林科学院基本科研业务费项目 (2018010201)

Foundation project: National Key Technology Support Program of China (2015BAD01B01-1), National Key Research and Development Plan of China (2016YFD0100101), Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS, National Crop Germplasm Conservation Project (2017NWB036-01, 2017NWB036-12-2), National Crop Germplasm Resources Platform Project (NICGR2017-001), Foundational Research Program of HAFSS (2018010201)

is the necessary condition for the genetic improvement of the saline tolerance of rice. It is also the key to correctly distinguish the saline tolerance of rice germplasm. In this study, 19 rice germplasm with levels of saline tolerance were tested under normal condition and 0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7% saline treatment concentrations. 11 agronomic traits were investigated and the saline tolerance coefficient was calculated. Furthermore, the optimum concentration of saline tolerance was determined by using interquartile range method between varieties. The salinity with maximum interquartile range between varieties was supposed to be the optimum stress environment. A series of comprehensive multivariate statistical analysis method, included principal component analysis, membership function analysis, stepwise regression analysis and cluster analysis, was used to explore the rational evaluation method of saline tolerance of rice during the whole growth stage. The results showed that under 0.3% salinity, the saline tolerance coefficient of most traits shown the highest interquartile range among varieties. Therefore, it is considered that the 0.3% salinity is the optimum concentration for identification saline tolerance in rice. The results of principal component analysis showed that the saline tolerance coefficient of 11 agronomic traits can be reduced to 3 principal components. By using the principal component contribution rate and membership function analysis, the three principal component values can be further simplified into the comprehensive evaluation index of rice saline tolerance: D value. D value can be used to evaluate the saline tolerance of rice germplasm simply and accurately. In this study, we also used stepwise regression analysis to establish the optimal linear regression equation for the saline tolerance coefficient of 11 agronomic traits and D value: $D = -0.365 + 0.647PL + 0.152GP + 0.274TW$. Through stepwise regression analysis, the saline tolerance coefficient of panicle length, grains per panicle and total weight was the key indicator of D value. This equation can accurately predict the D value. The saline tolerance of 19 rice germplasm can be divided into 5 grades by cluster analysis, corresponding to 5 saline tolerance grades of rice, i.e. very strong, strong, medium, weak and very weak. It can be regarded as an important reference for salt tolerance evaluation of other rice germplasm.

Key words: rice; whole growth stage; saline tolerance; identification method; comprehensive evaluation

水稻是世界上最重要的粮食作物之一,全球半数以上的人口以稻米为主食^[1]。土壤盐渍化是在世界范围内制约水稻生产发展的主要因素之一。一方面,有较大面积的盐碱土无法用于水稻种植;另一方面,不合理的水资源管理引起的土壤次生盐渍化现象在水稻生产地区日益严重^[2]。水稻种质资源中蕴含着丰富的耐盐遗传变异类型^[3-4]。通过遗传改良来提高水稻耐盐能力是扩大盐渍化土壤水稻种植面积和提高水稻产量的有效途径^[5-6]。

快速准确的表型鉴定是作物遗传改良研究必要条件^[7]。而至今在水稻种质资源耐盐性鉴定、耐盐生理生化和耐盐遗传改良研究中,不同研究者所采用的试验方法缺乏统一标准^[8-9]。这不仅会影响试验结果的准确性,而且对同类试验鉴定结果的相互比较带来困难。因此,一个科学、准确、高效的水稻耐盐性鉴定评价技术方法的建立对水稻耐盐遗传改

良研究至关重要。

前人对水稻耐盐性鉴定评价方法已有较多研究,但多集中于芽期、苗期等早期发育阶段^[10-13]。而对于包括生殖生长阶段的水稻全生育期耐盐性鉴定方法研究,由于其试验周期长、条件要求严格、分析复杂等原因报道较少。植物耐盐性是一个复杂的遗传和生理现象,水稻种质耐盐性因生育阶段不同而存在较大差异。水稻幼苗期和生殖生长期是对盐敏感的关键时期^[14-15]。水稻全生育期耐盐性是水稻各生育时期耐盐性的综合反映,更贴近生产实践,而更有实际意义。

本研究通过设置不同盐分浓度,调查水稻全生育期耐盐相关指标,并应用多元统计分析方法,明确了水稻全生育期耐盐性鉴定最适盐胁迫浓度、调查指标,提出了水稻全生育期耐盐性评价方法,期望为水稻耐盐种质筛选和遗传改良研究提供参考依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料与amp;设计

试验于 2016 年在河北省农林科学院滨海农业研究所试验基地进行。试验材料共 19 份,是来源于中国黑龙江、中国吉林、中国辽宁、中国河北、日本和韩国的具有不同耐盐性的粳稻品种(表 1)。共设 6 个盐处理浓度(0.2%、0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%)和 1 个正常生长环境对照(淡水灌溉),3 次重复。

表 1 水稻参试种质

Table 1 The rice germplasms tested in this study

编号 No.	种质名称 Genotypes	来源 Source	编号 No.	种质名称 Genotypes	来源 Source
1	垦育 88	中国河北	11	山形 86	日本
2	垦优 0702	中国河北	12	日本晴	日本
3	垦育 2 号	中国河北	13	梦结	日本
4	龙稻 5 号	中国黑龙江	14	秋田小町	日本
5	九稻 72	中国吉林	15	里歌	日本
6	吉粳 83	中国吉林	16	一目惚	日本
7	吉粳 88	中国吉林	17	花东稻	韩国
8	吉粳 95	中国吉林	18	大珍稻	韩国
9	辽盐 16	中国辽宁	19	珍珠稻	韩国
10	辽粳 912	中国辽宁			

1.2 田间管理及amp;调查

当水稻秧苗 2 叶 1 心期时移栽到鉴定池。插秧规格 25 cm × 13 cm,每个重复每个品种插 10 穴,单本,一行区。秧苗充分缓苗(移栽后 7 d)后,开始用 NaCl 盐水灌溉,利用淡水或盐水调节水层盐分至设计浓度,并利用便携式电导率仪实时监测灌溉水层盐浓度,水层深度保持 3~5 cm。待所有品种成熟后,参照水稻种质资源描述规范和数据标准^[16],调查成活植株的株高,单株有效穗数、穗长、每穗粒数、结实率、着粒密度、千粒重。籽粒和茎秆风干后以小区为单位分别测定粒重、茎秆重、总干物重、收获指数。

1.3 统计分析

首先用公式 1 将各盐浓度下调查指标转换为耐盐系数。以各性状的耐盐胁迫指数为指标评价各性状对盐胁迫的响应。利用中位数评估数据总体情

况,四分位差评估数据变异程度,峰度和偏度评估数据是否正态分布。利用 SPSS 23.0 软件,进行主成分分析、隶属函数分析、聚类分析及逐步回归等多元分析。相关指标计算参照文献^[17-18]。

1.3.1 耐盐系数计算 耐盐系数(STI, saline tolerance index)=处理值/正常值。(公式 1)

1.3.2 主成分分析 采用最大方差法提取主成分,提取标准按照主成分特征值大于 1,累积贡献率 ≥ 85%。根据各主成分与调查性状耐盐系数建立回归方程,评估各品种的主成分得分。

1.3.3 隶属函数分析 $R(X_{j,i})=(X_{j,i}-X_{j,\min})/(X_{j,\max}-X_{j,\min})$ $j=1,2,\dots,n$ (公式 2)

可将参试品种若干主成分值转化为隶属函数值。 $X_{j,i}$ 表示第 i 个品种第 j 个主成分值, $X_{j,\min}$ 表示第 j 个主成分的最小值, $X_{j,\max}$ 表示第 j 个主成分的最大值。

1.3.4 权重 $w_j=p_j/\sum_{j=1}^n p_j$ $j=1,2,\dots,n$ (公式 3)

w_j 表示第 j 个主成分在所有主成分中的重要程度即权重, P_j 代表经主成分分析所得第 j 个主成分的贡献率。

1.3.5 综合评价 $D=\sum_{j=1}^n [R(X_{j,i}) \times W_j]$ (公式 4)

$j=1,2,\dots,n$ 式中, D 值为第 i 个水稻品种在盐胁迫条件下由综合指标评价所得的耐盐性综合评价价值。

1.3.6 聚类与回归分析 根据 D 值,采用欧式距离,组间平均连接法对 19 份种质分类。回归模型的构建过程中,把耐盐性综合评价价值 D 值作因变量,把各单项指标的耐盐系数作自变量进行逐步回归分析,以显著性水平 0.05 作为各性状耐盐系数移入标准。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

耐盐性田间鉴定表现如图 1 所示。11 个农艺性状的耐盐系数描述性统计分析和变化趋势如图 2、表 2 所示。根据偏度和峰度判断数据的正态性,结果表明,随着盐处理浓度的提高,各个性状的耐盐系数多呈现偏态分布。本研究用中位数描述数据的平均表现,四分位差描述数据的离散程度。随着盐处理浓度的增加,所有性状耐盐系数的中位数均

逐渐降低,而四分位差则呈现先升高后降低的趋势。在0.3%盐处理浓度下,单株有效穗数、粒重、茎秆重、总干物重和收获指数5个性状品种间耐盐系数的四分位差达到最大。

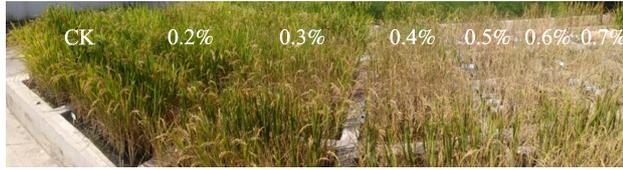


图1 不同盐浓度下水稻种质耐盐性

Fig.1 Visualization of rice varieties under treatments with different salt concentrations

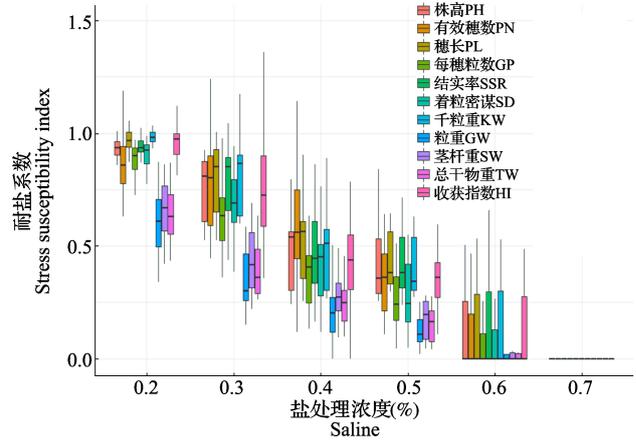


图2 不同盐浓度下11个农艺性状耐盐系数

Fig.2 The saline tolerance index of eleven agronomic characters under different salinity conditions

表2 不同盐浓度下11个农艺性状耐盐系数描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of the saline tolerance index of eleven agronomic characters under different salinity

统计量 Statistics	盐浓度 (%) Salinity	株高 PH	有效穗数 PN	穗长 PL	穗粒数 GP	结实率 SSR	着粒密度 SD	千粒重 KW	粒重 GW	茎秆重 SW	总干物重 TW	收获指数 HI
中位数 Median	0.2	0.93	0.85	0.96	0.90	0.92	0.93	0.98	0.60	0.67	0.61	0.97
	0.3	0.81	0.81	0.85	0.63	0.85	0.71	0.87	0.30	0.42	0.36	0.72
	0.4	0.54	0.65	0.56	0.41	0.46	0.45	0.51	0.22	0.27	0.25	0.48
	0.5	0.36	0.36	0.38	0.24	0.38	0.27	0.34	0.11	0.20	0.17	0.36
	0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	0.7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	四分位差 Interquartile range	0.2	0.06	0.16	0.07	0.11	0.05	0.09	0.04	0.20	0.21	0.18
0.3		0.27	0.34	0.28	0.20	0.24	0.21	0.28	0.21	0.24	0.20	0.31
0.4		0.28	0.32	0.25	0.22	0.30	0.26	0.29	0.17	0.13	0.15	0.28
0.5		0.25	0.27	0.24	0.22	0.23	0.27	0.25	0.10	0.17	0.14	0.15
0.6		0.25	0.30	0.29	0.11	0.31	0.13	0.30	0.02	0.03	0.02	0.28
0.7		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
偏度 Skewness		0.2	0.00	0.70	0.98	3.33	1.50	3.38	-0.23	0.05	-0.14	0.01
	0.3	-0.62	0.16	-0.58	1.92	-0.67	2.00	0.02	0.84	0.44	0.82	0.57
	0.4	0.16	0.00	0.45	2.19	0.84	2.09	0.62	1.05	0.76	0.95	0.32
	0.5	0.84	0.81	1.04	3.05	1.56	2.94	1.13	0.78	1.33	1.22	0.64
	0.6	1.06	1.19	1.02	1.50	1.10	1.57	0.89	1.95	1.94	1.92	0.94
	0.7	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	2.86	3.26	4.35
	峰度 Kurtosis	0.2	-0.88	-0.26	1.48	12.22	3.49	12.79	2.83	-0.66	-0.89	-0.99
0.3		-1.26	-0.70	-1.13	5.38	-0.47	6.38	-0.64	0.07	-0.99	-0.16	0.52
0.4		-0.66	-0.59	-0.16	6.29	-0.03	6.19	-0.37	1.47	-0.32	0.27	0.08
0.5		0.57	0.56	1.11	11.31	2.93	10.70	1.36	0.40	2.97	2.35	-0.02
0.6		-0.43	-0.13	-0.53	0.69	-0.09	1.00	-0.94	2.74	2.49	2.50	-0.74
0.7		19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00	18.98	7.03	10.54	18.98

PH: Plant height, PN: Panicle number per plant, PL: Panicle length, GP: Grains per panicle, SSR: Seed setting rate, SD: Spikelet density, KW: 1000-grain weight, GW: Grain weight, SW: Straw weight, TW: Total weight, HI: Harvest index. The same as below

2.2 主成分分析

主成分分析能以较少的主因子替代原始指标。对 0.3% 盐浓度下 11 个农艺性状的耐盐系数进行主成分分析。根据特征值大于 1 和累计贡献率大于 85% 标准,共提取到 3 个主成分,剔除贡献率小的指标。各主成分贡献率分别为 36.68%、31.36% 和 18.71%,累积贡献率 86.75% 的表型变异。各主成分特征值、对原始性状载荷及对表型的贡献率如表 3 所示。

2.3 品种综合评价

对参试 19 份种质对应的特征向量,利用隶属度函数进行归一化处理,各主成分的隶属函数值如表 4 所示。经计算,3 个主成分的权重分别为 42.28%、36.14%、21.57% (表 3)。根据综合耐盐指数 D 值大小对其耐盐能力进行强弱排序 (表 4)。

由表可见,垦优 0702 和垦育 88 综合耐盐指数 (D 值) 较高 (0.66、0.64),评价为耐盐能力极强。一目惚和辽粳 912 综合耐盐指数 (D 值) 较低 (0.13, 0.11),评价为综合耐盐能力极弱。

表 3 主成分特征向量及贡献率

Table 3 Eigenvector of comprehensive indexes [Fx] and proportion

性状 Trait	主成分 Comprehensive indexes		
	F1	F2	F3
株高 PH	0.81	0.37	0.38
有效穗数 PN	0.90	0.24	0.06
穗长 PL	0.85	0.34	0.36
穗粒数 GP	0.44	0.66	0.27
千粒重 KW	0.87	0.27	0.14
结实率 SSR	0.66	0.42	0.48
着粒密度 SD	0.45	0.61	0.26
粒重 GW	0.15	0.66	0.67
茎秆重 SW	0.29	0.91	-0.06
总干物重 TW	0.28	0.90	0.20
收获指数 HI	0.28	0.05	0.95
特征值 Eigen values	4.04	3.45	2.06
贡献率 (%)	36.86	31.36	18.71
Contributive ratio			
权重 (%) Weight	42.28	36.14	21.57
累计贡献率 (%)	32.86	68.04	86.75
Cumulative contributive ratio			

表 4 各品种的主成分值、隶属函数值、综合评价 (D 值)

Table 4 The comprehensive index, membership function and D in varieties

品种 Varieties	主成分 Comprehensive index			隶属函数 Membership function			D 值 D-value	综合评价 Comprehensive valuation
	F1	F2	F3	F1*	F2*	F3*		
垦优 0702	0.56	2.00	0.22	0.56	0.91	0.43	0.66	极强
垦育 88	-0.23	2.34	1.01	0.34	1.00	0.63	0.64	极强
龙稻 5 号	0.34	0.99	0.85	0.50	0.64	0.59	0.57	强
吉粳 95	2.12	-0.84	-0.80	1.00	0.15	0.17	0.51	强
吉粳 83	0.29	0.93	-0.27	0.49	0.62	0.30	0.49	强
九稻 72	0.59	-0.18	0.88	0.57	0.32	0.60	0.49	强
花东稻	0.51	0.18	-0.18	0.55	0.42	0.33	0.45	中
山形 86	1.23	-1.14	0.20	0.75	0.07	0.42	0.43	中
梦结	0.62	-0.04	-0.66	0.58	0.36	0.20	0.42	中
日本晴	0.41	0.31	-0.88	0.52	0.45	0.15	0.42	中
里歌	0.76	-0.83	0.04	0.62	0.15	0.38	0.40	中
秋田小町	0.46	-0.45	-0.33	0.53	0.25	0.29	0.38	中
辽盐 16	-0.26	-1.39	2.43	0.33	0.00	1.00	0.36	中
吉粳 88	-1.32	-0.75	1.74	0.03	0.17	0.82	0.25	弱
垦育 2 号	-0.97	0.39	-1.11	0.13	0.48	0.09	0.25	弱
大珍稻	-1.42	-0.05	-0.38	0.00	0.36	0.28	0.19	弱
珍珠稻	-1.44	-0.07	-0.48	0.00	0.35	0.25	0.18	弱
一目惚	-0.95	-0.63	-1.45	0.14	0.20	0.00	0.13	极弱
辽粳 912	-1.30	-0.77	-0.83	0.04	0.17	0.16	0.11	极弱

2.4 回归分析

为筛选可靠的耐盐性鉴定指标,建立可用于水稻全生育期耐盐性评价的数学模型,本研究将耐盐性综合评价值(D值)作为因变量,将0.3%盐浓度下11个农艺性状的耐盐系数作为自变量进行逐步回归分析,建立了最优回归方程: $D = -0.365 + 0.647PL + 0.152GP + 0.274TW$,方程决定系数 $R^2 = 0.991$, $P = 0.0001$ 。对回归方程的估计精度进行评价表明(表5),各品种估计精度均在90%以上,证明方程中穗长、每穗粒数和总干物重的耐盐系数对水稻综合耐盐性的影响明显,该方程可用于水稻耐盐性评价。该方程可应用于其他品种的耐盐性评价,即在相同条件下测定其他品种的上述3个指标并求得耐盐系数,进而利用该方程预测其他品种的耐盐性。

2.5 聚类分析

利用D值,根据最短距离法进行聚类分析,在欧式距离2.0处,可以很好的将19份品种分为5个类群(图3),正好对应于水稻耐盐性划分的极强、强、中、弱、极弱5个等级。第I类群包括日本晴、梦结、山形86、花东稻、秋田小町、里歌和辽盐16等7个品种,耐盐性中等;第II类群包括九稻72、吉粳83、吉粳95、龙稻5号等4个品种,耐盐性强;第III类群包括垦育88和垦优0702等2个品种,耐盐性极强;第IV类群包括辽粳912、一目惚等2个品种,耐盐性极弱;第V类群包括垦育2号、吉粳88、大珍珠、珍味稻等4个品种,耐盐性弱。

表5 回归方程的估计精度分析

Table 5 Analysis of evaluation accuracy of equation

品种 Varieties	原始值 Primary value	预测值 Predicted value	预测差值 Difference	预测精度(%) Evaluation accuracy
垦优0702	0.658	0.646	0.012	97.82
垦育88	0.642	0.650	-0.008	98.23
龙稻5号	0.569	0.607	-0.038	98.97
吉粳95	0.512	0.506	0.006	98.47
吉粳83	0.495	0.468	0.027	98.74
九稻72	0.488	0.493	-0.006	98.80
花东稻	0.454	0.444	0.010	99.00
山形86	0.433	0.434	-0.001	98.27
梦结	0.419	0.398	0.021	98.63
日本晴	0.415	0.417	-0.002	98.98
里歌	0.398	0.404	-0.006	98.57
秋田小町	0.379	0.383	-0.004	98.67
辽盐16	0.355	0.352	0.004	97.90
吉粳88	0.253	0.238	0.015	97.71
垦育2号	0.247	0.247	0.000	97.33
大珍珠	0.192	0.200	-0.008	96.70
珍味稻	0.182	0.189	-0.007	96.60
一目惚	0.132	0.150	-0.018	95.59
辽粳912	0.111	0.109	0.002	93.07

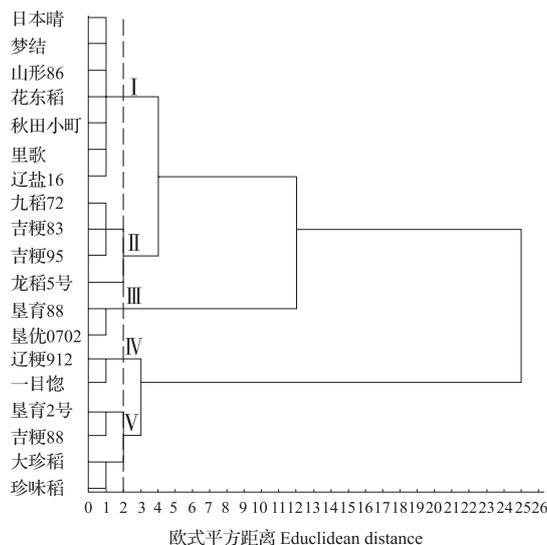


图3 基于D值聚类分析结果

Fig.3 Cluster dendrogram using D-value

3 讨论

在以往的水稻全生育期耐盐性鉴定研究中^[19-23], 试验多在田间自然环境下开展, 很难设置多盐浓度梯度试验, 盐浓度难以精确控制且盐胁迫浓度确定多以田间观察经验为主。本研究利用具有盐水调控功能的耐盐鉴定池, 通过设置不同盐分胁迫梯度, 首次明确了水稻全生育耐盐性鉴定的最佳盐胁迫浓度, 为今后水稻全生育期耐盐性鉴定提供参考依据。

3.1 水稻全生育期耐盐鉴定适宜浓度

盐胁迫浓度是影响水稻耐盐鉴定成功与否的关键因素。水稻耐盐性是由多基因控制的复杂性状^[24-25], 要使种质的耐盐性差异充分表现, 理论上应该有一个适中的能够兼顾多种基因型表达需要的盐胁迫压力。盐胁迫浓度过低, 会使种质胁迫症状不明显, 种质间难以展现遗传差异。而盐胁迫浓度过高, 又会使大部分种质死亡, 也导致遗传差异降低。

标准差、四分位差是描述数据离散差异程度的常用统计量。标准差多用于描述正态分布数据离散差异程度, 四分位差多用于描述非正态分布数据离散差异程度^[26]。本研究在 6 种盐处理浓度下, 11 个农艺性状的耐盐系数均呈偏态分布。因而, 通过比较不同盐浓度下 11 个农艺性状耐盐系数的品种间四分位差来确定水稻全生育耐盐鉴定最适盐胁迫浓度。综合水稻 11 个农艺性状在不同盐浓度下的耐盐系数, 品种间四分位差均呈现先升高后又逐渐降低的趋势, 有 5 个性状品种间四分位差在 0.3% 浓度下达到最大。据此推断, 0.3% 盐浓度是水稻全生育期耐盐性鉴定的最佳浓度。这与其他研究者在水稻全生育期耐盐鉴定研究所使用的盐胁迫浓度一致^[27-28]。

3.2 水稻全生育期耐盐性评价方法

本研究选用较为简易、直观、便捷的 11 个农艺性状进行测定和计算, 并在此基础上将各指标测定值转化成具有可比性的相对值即耐盐系数后进行统计分析, 这样消除了种质间固有差异, 更能体现种质耐盐性的内涵。目前, 该转换方法在水稻耐盐碱性评价中应用较多^[29-30]。本研究亦采用性状耐盐系数分析评价水稻耐盐性。

通过耐盐鉴定试验, 虽然可以明确水稻种质基于单个指标的耐盐性强弱, 但各单项指标评价结果可能会不一致, 且各指标间存在一定程度的相关性,

任何单项指标的研究都难以全面有效地评价水稻耐盐性。本研究采用主成分分析法与隶属函数分析法相结合, 将 11 个农艺性状耐盐系数简化为综合评价指标 D 值, 力求全面、客观、准确地评价水稻种质耐盐性。

主成分分析是多元统计分析中的常用降低变量维度的方法, 可以将多个相互关联的复杂指标转换为几个相互独立且能反映样本变异的少数指标^[17]。本研究通过主成分分析, 将水稻全生育期 11 个农艺性状耐盐系数转换成 3 个彼此独立的综合指标, 其代表了原始指标携带的绝大部分信息。隶属函数分析是利用模糊集合理论, 对多种因素影响下的事物做出全面评价的多因素决策方法^[17]。本研究采用隶属函数分析将 3 个综合指标的特征向量归一化处理, 结合主成分分析所得到的综合指标权重, 归纳出水稻种质全生育期耐盐性综合评价值 (D 值)。依据 D 值可以对参试种质的耐盐性进行排序或分类。排序结果表明, 垦育 88 和垦优 0702 为综合耐盐性较强水稻种质, 可以在今后的水稻耐盐遗传改良中加以利用。

本研究通过逐步回归分析, 得到与 D 值密切相关的指标, 即穗长、每穗粒数和总干物重的耐盐系数。在水稻全生育期耐盐性鉴定中, 0.3% 盐胁迫浓度和正常环境条件下, 选择性测定与 D 值密切相关的这 3 个农艺性状, 利用该评价模型来预测目标种质耐盐性的强弱, 能有效鉴定水稻种质资源的耐盐性, 使鉴定工作适当简化。

聚类分析可将不同的种质进行分类, 能直观地分析不同种质间的类群关系^[17]。本研究中, 利用 D 值进行聚类分析, 将 19 个水稻种质划分为 5 种类型, 正好对应极强、强、中、弱、极弱 5 个耐盐等级划分。本等级划分结果, 验证了利用 D 值评价水稻耐盐性的可靠性, 为水稻种质全生育期耐盐性鉴定提供参考。

综合上述分析得出以下结论: 水稻种质全生育期耐盐性鉴定的最佳浓度为 0.3% 盐浓度。利用主成分分析结合隶属函数分析, 利用 D 值可完成水稻种质耐盐性综合评价。从 11 个农艺性状中筛选出穗长、每穗粒数和总干物重 3 个指标, 建立回归方程, 可用于水稻种质全生育期耐盐性的快速鉴定与预测。利用聚类分析方法, 将水稻种质划分为 5 个等级。该等级划分方法可为水稻种质资源筛选与鉴定, 耐盐品种的选育、推广提供依据。

参考文献

- [1] Surridge C. Rice cultivation: feast or famine? *Nature*, 2004, 428 (6981): 360-361
- [2] Yamaguchi T, Blumwald E. Developing saline-tolerant crop plants: challenges and opportunities. *Trends in Plant Science*, 2005, 10 (12): 615-620
- [3] Khan M S, Hamid A, Karim M A. Effect of sodium chloride on germination and seedling characters of different types of rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 1997, 179 (3): 163-169
- [4] 付华, 张启星, 曹桂兰, 王兴盛, 韩龙植. 盐胁迫下不同来源粳稻选育品种的主要农艺性状鉴定分析. *植物遗传资源学报*, 2013, 14 (1): 42-51
Fu H, Zhang Q X, Cao G L, Wang X S, Han L Z. Main agronomic traits for improved japonica rice varieties under salt stress. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2013, 14 (1): 42-51
- [5] Gregorio G B, Senadhira D, Mendoza R D, Manigbas N L, Roxas J P, Guerta C Q. Progress in breeding for salinity tolerance and associated abiotic stresses in rice. *Field Crops Research*, 2002, 76 (23): 91-101
- [6] 胡婷婷, 刘超, 王健康, 丁成伟, 郭荣良, 吴玉玲, 徐家安, 王友霜. 水稻耐盐基因遗传及耐盐育种研究. *分子植物育种*, 2009, 7 (1): 110-116
Hu T T, Liu C, Wang J K, Ding C W, Guo R L, Wu Y L, Xu J A, Wang Y S. Progress of genetic and breeding on salt tolerance in rice. *Molecular Plant Breeding*, 2009, 7 (1): 110-116
- [7] Furbank R T, Mark T. Phenomics-technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*, 2011, 16 (12): 635-644
- [8] 祁栋灵, 韩龙植, 张三元. 水稻耐盐/碱性鉴定评价方法. *植物遗传资源学报*, 2005, 6 (2): 226-231
Qi D L, Han L Z, Zhang S Y. Methods of characterization and evaluation of salt or alkaline tolerance in rice. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2005, 6 (2): 226-231
- [9] 杨福, 梁正伟, 王志春. 水稻耐盐碱鉴定标准评价及建议与展望. *植物遗传资源学报*, 2011, 12 (4): 625-628, 633
Yang F, Liang Z W, Wang Z C. Evaluation, suggestion and prospect on identification standards of saline-alkali tolerance in rice. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2011, 12 (4): 625-628, 633
- [10] 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. *Soils and Crops*, 2016, 5 (2): 120-127
- [11] 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. 粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选. *中国水稻科学*, 2017, 31 (6): 631-642
Tian L, Chen Y P, Liu J, Ma X G, Wang N, Yang B, Li Y, Guo H D, Li J, Hu H, Zhang Y X, Li P F. Comprehensive evaluation and selection of rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for saline tolerance at germination stage. *China Journal of Rice Science*, 2017, 31 (6): 631-642
- [12] 郭望模, 傅亚萍, 孙宗修. 水稻芽期和苗期耐盐指标的选择研究. *浙江农业科学*, 2004, 1 (14): 30-33
Guo W M, Fu Y P, Sun Z X. Study on the selection of salt tolerance indexes in rice seedling stage and seedling stage. *Journal of Zhejiang Agriculture Science*, 2004, 1 (14): 30-33
- [13] 王建飞, 陈宏友, 杨庆利, 姚明哲, 周国安, 张红生. 盐胁迫浓度和胁迫时的温度对水稻耐盐性的影响. *中国水稻科学*, 2004, 18 (5): 449-454
Wang J F, Chen H Y, Yang Q L, Yao M Z, Zhou G A, Zhang H S. Effects of salt concentration and temperature on the screening of salt tolerance in rice. *China Journal of Rice Science*, 2004, 18 (5): 449-454
- [14] 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. *Chinese Bulletin of Botany*, 2017, 52 (1): 77-88
- [15] 潘晓鹰, 谢留杰, 黄善军, 段敏, 陈剑, 徐建龙. 杂交水稻不同生育阶段的耐盐性及育种策略. *江苏农业科学*, 2017, 45 (6): 56-60
Pan X B, Xie L J, Huang S J, Duan M, Chen J, Xu J L. Salt-tolerance and breeding strategy of hybrid rice at different stages. *Journal of Jiangsu Agriculture Science*, 2017, 45 (6): 56-60
- [16] 韩龙植, 魏兴华. 水稻种质资源描述规范和数据标准. 北京: 中国农业出版社, 2006: 15-18
Han L Z, Wei X H. Descriptors and data standard for rice (*Oryza sativa* L.). Beijing: China Agriculture Press, 2006: 15-18
- [17] 何晓群. 多元统计分析, 第四版. 北京: 中国人民大学出版社, 2015: 152-174
He X Q. Multivariate statistical analysis, 4th edition. Beijing: China Renmin University Press, 2015: 152-174
- [18] 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, 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. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47 (7): 1290-1300
- [19] 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. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2003, 4 (3): 245-251
- [20] 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, 23 (1): 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 Agricultural Sciences*, 2014, 23(1): 1-6
- [21] 潘晓飏, 黄善军, 陈凯, 孟丽君, 徐建龙. 大田全生育期盐水灌溉胁迫筛选水稻耐盐恢复系. *中国水稻科学*, 2012, 26(1): 49-54
- Pan X B, Huang S J, Chen K, Meng L J, Xu J L. Selection of rice restorer lines with salinity tolerance through salt solution irrigation over whole growth stage under field conditions. *China Journal of Rice Science*, 2012, 26(1): 49-54
- [22] 荆培培, 崔敏, 秦涛, 周在中, 戴其根. 土壤条件下不同盐分梯度对水稻产量及其生理特性的影响. *中国稻米*, 2017, 23(4): 26-33
- Jing P P, Cui M, Qin T, Zhou Z Z, Dai Q G. Effects of different saline stress on yield and physiological properties of rice in soil culture. *China Rice*, 2017, 23(4): 26-33
- [23] 张瑞珍, 邵玺文, 童淑媛, 汪恒武, 齐春燕, 孙长占. 盐碱胁迫对水稻源库与产量的影响. *中国水稻科学*, 2006, 20(1): 116-118
- Zhang R Z, Shao X W, Tong S Y, Wang H W, Qi C Y, Sun C Z. Effect of saline-alkali stress on source-sink and yield of rice. *China Journal of Rice Science*, 2006, 20(1): 116-118
- [24] Gimhani I M D R, Gregorio G B, Kottearachchi N S, Samarasinghe W L G. SNP based discovery of salinity-tolerant QTLs in a bi parental population of rice (*Oryza sativa*). *Molecular Genetic Genomics*, 2016, 291(9): 2081-2099
- [25] Krishnamurthy S L, Sharma P C, Sharma D K, Ravikiran K T, Singh Y P, Mishra V K, Burman D, Maji B, Mandal S, Sarangi S K, Gautam R K, Singh P K, Manohara K K, Marandi B C, Padmavathi G, Vanve P B, Patil K D, Thirumeni S, Verma O P, Khan A H, Tiwari S, Geetha S, Shakila M, Gill R, Yadav V K, Roy S K B, Prakash M, Bonifacio J, Ismail A, Gregorio G B, Singh R K. Identification of mega environments and rice genotypes for general and specific adaptation to saline and alkaline stresses in India. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-14
- [26] 贾俊平. 统计学, 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2006: 100
- Jia J P. *Statistics*, second edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 100
- [27] 周根友, 汪娟, 赵祥强. 大田评价水稻耐盐碱性的农艺性状指标研究. *华北农学报*, 2017, 32(S): 102-107
- Zhou G Y, Wang J, Zhao X Q. Field Indexes of Agronomic Traits for Salinity Tolerance Evaluation in Rice. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(S): 102-107
- [28] 余为仆. 秸秆还田条件下盐胁迫对水稻产量和品质形成影响. 扬州: 扬州大学, 2014
- Yu W P. Effect of Salt Stress associated with Straw Returning on Yield and Quality of Rice. Yangzhou: University of Yangzhou, 2014
- [29] Mohammadi R, Mendioro M S, Diaz G Q, Gregorio G B, Singh R K. Genetic analysis of saline tolerance at seedling and reproductive stages in rice (*Oryza sativa*). *Plant Breeding*, 2015, 133(5): 548-559
- [30] Krishnamurthy S L, Gautam R K, Sharma P C, Sharma D K. Effect of different saline stresses on agro-morphological traits and utilisation of saline stress indices for reproductive stage saline tolerance in rice. *Field Crops Research*, 2016, 190(1): 26-33