

陶维旭,程生海,冀俊超,等. 水稻品种资源耐盐性综合评价及耐盐指标筛选[J]. 江苏农业科学,2022,50(18):180-187.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.18.028

水稻品种资源耐盐性综合评价及耐盐指标筛选

陶维旭¹, 程生海¹, 冀俊超¹, 艾治勇^{2,3}

(1. 海南大学,海南海口 570208; 2. 三亚市国家耐盐碱水稻技术创新中心,海南三亚 572024;

3. 湖南杂交水稻研究中心,湖南长沙 410125)

摘要:为快速筛选出水稻的耐盐指标并同时建立相对可靠的评价水稻耐盐性的数学模型,采用 51 份水稻品种资源,测定分蘖数、株高、有效穗数、穗长、地上部干质量、穗粒数、收获指数、结实率、理论产量、千粒质量 10 个指标,首先对各个指标间的相关性进行分析,然后对所测定的 0.6% 浓度下的每个指标的耐盐系数先做主成分分析,接着通过主成分分析和模糊函数法得到水稻品种资源耐盐性的综合评价结果(D 值)和相对应的隶属函数值,根据综合评价结果(D 值)开始逐步回归分析,并进一步通过平方欧氏距离进行一次系统聚类分析。结果表明,经过主成分分析、隶属函数分析和逐步回归分析可得本研究中的回归方程: $D = -0.626 + 0.174 \times \text{有效穗数} + 0.180 \times \text{穗长} + 0.069 \times \text{穗粒数} + 0.261 \times \text{分蘖数} + 0.277 \times \text{株高} + 0.283 \times \text{千粒质量} + 0.130 \times \text{理论产量} - 0.051 \times \text{结实率} + 0.118 \times \text{干物质量} + 0.124 \times \text{收获指数}$ 。系统聚类分析的结果显示,在欧氏距离为 8 的地方可以将供试水稻品种资源按耐盐性强弱分为 4 个类群,其中有 4 份水稻品种资源表现出的耐盐性极强,22 份水稻品种资源表现出的耐盐性强,2 份水稻品种资源表现出的耐盐性弱,23 份水稻品种资源表现出的耐盐性中等。研究结果可为水稻耐盐性鉴定评价工作提供相对的参考,并且通过筛选得到的一些耐盐性较强的水稻品种资源,可以为培育耐盐水稻新品种以及合理开发利用盐碱地奠定一定的基础,同时可对挖掘耐盐基因提供一定的帮助。

关键词:水稻;耐盐性;主成分分析;回归分析;聚类分析;综合评价

中图分类号:S511.034 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)18-0180-08

水稻作为全球主要的粮食作物,在全球人口持

续增加的过程中,稻米的需求量也随之日益增大^[1]。然而,土壤盐渍化程度的增加限制了水稻产量的提高^[2]。为了保障盐碱地的粮食产量,要进一步选育新的耐盐水稻品种^[3-4]。耐盐水稻品种资源的创制、遴选与评估,是育成耐盐碱水稻新品种的重要基础。然而,目前仍没有建立对耐盐水稻品种资源鉴定评价的标准体系^[5]。因此,选用正确的水

及其评价[J]. 玉米科学,2019,27(5):5-14.

[12] Namai S, Toriyama K, Fukuta Y. Genetic variations in dry matter production and physiological nitrogen use efficiency in rice (*Oryza sativa* L.) varieties[J]. Breeding Science, 2009, 59(3):269-276.

[13] 王春萍,张世才,雷开荣,等. 辣椒苗期耐低氮指标与评价方法研究[J]. 园艺学报,2017,44(12):2318-2326.

[14] 王春萍,李怡斐,张世才,等. 102 份辣椒种质资源苗期耐低氮性综合评价[J/OL]. 分子植物育种:1-21 [2021-08-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20210401.1721.029.html>.

[15] 李锡香,朱德蔚. 大蒜种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京:中国农业出版社,2006.

[16] 杨光梅,杨恩琼,钱晓刚,等. 玉米耐低氮基因型筛选时期的初

步探讨[J]. 贵州农业科学,2008,36(1):27-30.

[17] 赵化田,王瑞芳,许云峰,等. 小麦苗期耐低氮基因型的筛选与评价[J]. 中国生态农业学报,2011,19(5):1199-1204.

[18] 刘世琦,许莉,齐连东. 大蒜生产关键技术问答[M]. 北京:中国农业出版社,2007:25.

[19] 张楚,张永清,路之娟,等. 低氮胁迫对不同苦养品种苗期生长和根系生理特征的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(7):1331-1339.

[20] 裴雪霞,王姣爱,党建友,等. 耐低氮小麦基因型筛选指标的研究[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(1):93-98.

[21] 黄兴东. 谷子耐低氮胁迫品种资源的筛选与鉴定[D]. 太谷:山西农业大学,2017:8-24.

[22] 王玲敏,叶优良,陈范骏,等. 施氮对不同品种玉米产量、氮效率的影响[J]. 中国生态农业学报,2012,20(5):529-535.

稻耐盐性评价方法与指标是水稻耐盐新品种(品系)大规模筛选和选育的一个关键问题。

目前对耐盐水稻品种资源的筛选和鉴定已有大量研究。王秀萍等分别采用了盐分胁迫下的发芽指标法、形态损害评估法和生长量比较法等方式对水稻的生物耐盐能力做出了评价^[6-9]。张所兵等利用水稻全生育期耐盐性鉴定,对水稻的农业耐盐能力等方面进行了评价^[10-11]。祁栋灵等根据试验场地不同从实验室鉴定、田间鉴定、温室鉴定和图像鉴定方法等4个方面进行了总结^[3,12-14]。同时前人也对水稻耐盐性评价指标做了相关的研究。倪秀红等将种子发芽率、发芽势、发芽指数以及活力指数作为评价水稻耐盐性的指标^[15-16]。王根来等通过苗长、根数、根长、干质量等指标评价水稻耐盐性^[17-18]。周毅等通过测定盐胁迫后水稻材料的脯氨酸含量、根茎部盐碱离子含量、过氧化物酶等一些生理生化指标作为鉴定水稻耐盐性的强弱^[19-20]。然而,对于全生育期不同盐浓度处理下对水稻产量影响的研究相对较少。因此,本研究通过水稻耐盐性和农艺性状之间相互影响的关系,利用相关性分析、主成分分析、逐步回归分析以及聚类分析等方法,提出水稻耐盐性评价指标体系,以期对水稻的耐盐性鉴定和耐盐品种的选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为51份地方品种资源,名称及编号见表1。

1.2 试验设计

试验于2020—2021年在海南省三亚市崖州区国家耐盐碱水稻技术创新中心大旦村耐盐碱试验基地进行,试验采用裂区设计,共设3个盐浓度处理,分别为0、0.3%、0.6%,3次重复。盐浓度处理是在充分返青约10 d后进行。盐水配制是在配水池中抽入不同体积的淡水与海水混合至设计浓度。为确保盐处理强度稳定,利用便携式电导率仪每天测定田间电导率,使电导率上下变动幅度不超过0.5 S/cm,并在整个生育期保持约5 cm的水层深度。如遇强降雨天气则进行排涝,并重新灌溉相应浓度的盐水。该试验于2020年12月24日播种,2021年1月21日移栽,移栽时选取大小一致的苗,每1株移栽为1穴,栽插株行距为20 cm×20 cm,每小区6 m²,长3 m、宽2 m。在合适的时期进行水肥

表1 参试水稻品种资源

编号	名称	编号	名称
1	H8	27	2020X2L134-2
2	汉两优169	28	S12/RA65
3	T477S/粤禾丝苗	29	桂银A1-2/华宝占
4	2020X2L138-5	30	391S/Y76
5	广抗优华宝占	31	2020X2L546
6	391S/Y24	32	欢S/9PR008
7	2020X2L138-7	33	爽1S/F16
8	广湘24S/RA65	34	谷丰优华宝占
9	超优1000	35	2020X2L547
10	菁两优326	36	盛两优358
11	2020X2L541	37	广湘24S/3223-3
12	5A/14WF6-113	38	416S/Y24
13	416S/Y12	39	2020X2L558
14	野香A/3335-1	40	T477S/五山丝苗
15	H13S/P5	41	H50S/M300
16	2020X2L542	42	海优1号
17	H49S/L19	43	126S/Y12
18	盐粳156	44	海优2号
19	T477S/华占	45	野香A/14WF6-113
20	WX-01	46	海优3号
21	旌7A/宝7	47	野香优华宝占
22	正S/9PR008	48	海优4号
23	2020X2L545	49	泰丰优华宝占
24	D3S/北海	50	海优5号
25	H1	51	海优7号
26	爽两优629		

利用、田间管理以及病虫害防治等^[21]。

1.3 测量指标

在水稻分蘖盛期测定分蘖数,成熟期时分别测定水稻株高、地上部干质量、穗长、有效穗数、穗粒数、千粒质量、结实率和理论产量。

分蘖数:在分蘖盛期每个小区选取20穴统计水稻分蘖;株高:在成熟期时每个小区选取6穴测定植株基部至穗顶部的绝对高度;地上部干质量:按常规方法在成熟期各小区选择生长整齐一致的稻株取样6穴,地上部分成穗和茎叶2部分,105℃下杀青30 min以后在80℃下烘干至恒质量后分别称质量;穗长:在成熟期取样过程中每小区选取15个稻穗测定茎穗基部到穗顶部的距离;理论产量及其构成因素:有效穗数是在成熟期每小区连续数20穴水稻的有效穗后取平均值;穗粒数是每小区选取15个稻穗数每个稻穗的总粒数后取其平均值,然后脱粒

得到的全部谷粒用来进行测定结实率;结实率 = 饱粒数/(饱粒数 + 瘪粒数),其中,通过水漂法区分饱粒和瘪粒;千粒质量是每小区在收获的谷粒中选取 1 000 粒饱满水稻种子称质量;理论产量根据有效穗数、穗粒数、千粒质量、结实率计算可得;收获指数:稻谷产量/地上部干质量。

1.4 统计分析

首先通过公式(1)将 0.6% 盐浓度下调查得到的性状指标转换为各个性状的耐盐系数。以各个性状的耐盐系数为指标评价水稻品种资源各性状指标对盐胁迫的响应程度。使用 Excel 2016 软件完成对各综合指数耐盐隶属函数值和耐盐综合评价的计算。

耐盐系数 = 盐处理平均值/对照平均值; (1)

$u(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$; (2)

$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j$; (3)

$D = \sum_{j=1}^n [u(X_j) \times W_j]$ 。 (4)

公式(2)~公式(4)中: j 取 1 到 n 的值;第 j 个综合指标的主成分值和隶属函数值分别用 X_j 和 $u(X_j)$

表示;第 j 个主成分的最大值用 X_{\max} 表示;第 j 个主成分的最小值用 X_{\min} 表示^[22]; W_j 表示权重^[23];第 j 个综合指标在主成分中的贡献率用 P_j 表示^[24]; D 表示各水稻品种资源的耐盐综合评价^[25]。

使用 SPSS 26.0 软件可以进行相关性分析、主成分分析、聚类分析等统计学的相关数据分析。

2 结果与分析

2.1 各指标之间的相关性分析

由表 2 可知,理论产量与株高呈显著正相关,与有效穗数、干物质质量、穗粒数、收获指数、结实率呈极显著正相关,表明水稻品种资源的有效穗数、干物质质量、穗粒数、收获指数、结实率对水稻产量影响较大。理论产量与收获指数的相关系数最大(表 2),为 0.946;结实率与株高呈显著负相关,结实率与收获指数、理论产量呈极显著正相关。同时通过表 2 可以看出,分蘖数和千粒质量与株高、有效穗数、穗长、干物质质量等其他几个指标的相关性不显著。相关性分析结果显示,水稻品种资源大部分单项耐盐指标相对值间都呈出显著相关性。

表 2 水稻耐盐性指标的相关系数

指标	相关系数									
	分蘖数	株高	有效穗数	穗长	干物质质量	穗粒数	收获指数	结实率	理论产量	千粒质量
分蘖数	1.000									
株高	-0.039	1.000								
有效穗数	0.042	0.286 *	1.000							
穗长	0.269	0.277 *	0.348 *	1.000						
干物质质量	0.119	0.321 *	0.626 **	0.546 **	1.000					
穗粒数	0.143	0.342 *	0.299 *	0.359 **	0.740 **	1.000				
收获指数	0.134	0.235	0.665 **	0.147	0.527 **	0.554 **	1.000			
结实率	0.089	-0.333 *	0.070	-0.174	-0.047	-0.103	0.509 **	1.000		
理论产量	0.108	0.295 *	0.693 **	0.272	0.732 **	0.681 **	0.946 **	0.372 **	1.000	
千粒质量	0.193	0.167	0.130	0.187	0.132	-0.05	-0.073	-0.177	-0.020	1.000

注: * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著。

2.2 主成分分析

由表 3 可知,对 0.6% 盐浓度处理下测定的各份水稻品种资源的 10 个农艺性状指标的耐盐系数进行了主成分分析,6 个主成分的贡献率累积达到 92.673%,依照累计贡献率≥85%的提取标准,可将原来的指标降低维度分成 6 个相对独立的主成分。表 3 中第 1 主成分的特征值显示为 4.029,贡献率达到了 40.292%,系数较大的为理论产量 0.465,干物质质量 0.431,收获指数 0.419,系数的值

均 >0.4,表明理论产量、干物质质量、收获指数对主成分 1 的贡献率都较大;第 2 主成分的特征值显示为 1.821,贡献率达到了 18.206%;第 3 主成分的特征值显示为 1.202,贡献率达到了 12.025%,系数最大的为分蘖数 0.743,表明分蘖数在主成分 3 中贡献率最大;第 4 主成分的特征值显示为 0.928,贡献率达到了 9.285%,系数最大的为千粒质量 0.640,表明千粒质量在主成分 4 中贡献率最大;第 5 主成分的特征值显示为 0.697,贡献率达到了 6.967%,

第 6 主成分的特征值显示为 0.590,贡献率达到了 5.898%,主成分 5、主成分 6 中系数最大的都是株高,分别为 0.564、0.474,表明主成分 5、主成分 6 中贡献率最大的是株高。最后可得出 6 个相对独立的综合指标其对应系数为:

主成分 1 = 0.465 × 理论产量 + 0.431 × 干物质质量 + 0.419 × 收获指数 + 0.381 × 有效穗数 + 0.381 × 穗粒数 + 0.256 × 穗长 + 0.078 × 结实率 + 0.219 × 株高 + 0.101 × 分蘖数 + 0.048 × 千粒质量;

主成分 2 = -0.218 × 理论产量 + 0.152 × 干物质质量 - 0.343 × 收获指数 - 0.020 × 有效穗数 + 0.100 × 穗粒数 + 0.366 × 穗长 - 0.631 × 结实率 + 0.368 × 株高 + 0.073 × 分蘖数 + 0.358 × 千粒质量;

主成分 3 = -0.042 × 理论产量 - 0.036 × 干物质质量 - 0.005 × 收获指数 - 0.025 × 有效穗数 -

0.160 × 穗粒数 + 0.238 × 穗长 + 0.265 × 结实率 - 0.323 × 株高 + 0.743 × 分蘖数 + 0.434 × 千粒质量;

主成分 4 = 0.065 × 理论产量 - 0.125 × 干物质质量 + 0.120 × 收获指数 + 0.383 × 有效穗数 - 0.434 × 穗粒数 - 0.240 × 穗长 + 0.111 × 结实率 + 0.213 × 株高 - 0.326 × 分蘖数 + 0.640 × 千粒质量;

主成分 5 = 0.081 × 理论产量 - 0.249 × 干物质质量 + 0.178 × 收获指数 - 0.351 × 有效穗数 + 0.235 × 穗粒数 - 0.498 × 穗长 + 0.001 × 结实率 + 0.564 × 株高 + 0.380 × 分蘖数 + 0.098 × 千粒质量;

主成分 6 = -0.090 × 理论产量 - 0.283 × 干物质质量 + 0.069 × 收获指数 + 0.279 × 有效穗数 - 0.456 × 穗粒数 + 0.355 × 穗长 + 0.090 × 结实率 + 0.474 × 株高 + 0.223 × 分蘖数 - 0.462 × 千粒质量。

表 3 主成分贡献率及特征向量

项目	指标	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6
贡献率(%)		40.292	18.206	12.025	9.285	6.967	5.898
累计贡献率(%)		40.292	58.499	70.523	79.808	86.775	92.673
特征根		4.029	1.821	1.202	0.928	0.697	0.590
权重		0.435	0.196	0.130	0.100	0.075	0.063
特征向量	理论产量	0.465	-0.218	-0.042	0.065	0.081	-0.090
	干物质质量	0.431	0.152	-0.036	-0.125	-0.249	-0.283
	收获指数	0.419	-0.343	-0.005	0.120	0.178	0.069
	有效穗数	0.381	-0.020	-0.025	0.383	-0.351	0.279
	穗粒数	0.381	0.100	-0.160	-0.434	0.235	-0.456
	穗长	0.256	0.366	0.238	-0.240	-0.498	0.355
	结实率	0.078	-0.631	0.265	0.111	0.001	0.090
	株高	0.219	0.368	-0.323	0.213	0.564	0.474
	分蘖数	0.101	0.073	0.743	-0.326	0.380	0.223
	千粒质量	0.048	0.358	0.434	0.640	0.098	-0.462

2.3 隶属函数分析

从表 3 可以看出,6 个主成分相对应的权重分别是 0.435、0.196、0.130、0.100、0.075 和 0.063。通过运用隶属函数值的综合计算就可以得到综合评价,每份水稻品种资源的隶属函数值和 D 值见表 4。依照 D 值大小对每份水稻品种资源耐盐性强弱进行排列,D 值越大,其相对应的水稻品种资源的耐盐性越强,反之,D 值越小,其相对应的水稻品种资源的耐盐性越弱,每份参与试验的水稻品种资源的耐盐性强弱可以通过此方法进行客观的反映。由表 4 可知,海优 5 号的耐盐性最强,海优 4 号、盛两优 358 的耐盐能力较海优 5 号稍弱;广湘 24S/

RA65 的耐盐性在 51 份水稻品种资源中最弱,2020X2L138 - 7 次之。

2.4 回归分析

自变量为每份水稻品种资源指标的耐盐系数,因变量为 D 值进行逐步回归分析,得到了最合理的回归方程: $D = -0.626 + 0.174 \times \text{有效穗数} + 0.180 \times \text{穗长} + 0.069 \times \text{穗粒数} + 0.261 \times \text{分蘖数} + 0.277 \times \text{株高} + 0.283 \times \text{千粒质量} + 0.130 \times \text{理论产量} - 0.051 \times \text{结实率} + 0.118 \times \text{干物质质量} + 0.124 \times \text{收获指数}$ 。由表 5 可见,对得到的回归方程的估算精确程度进行相对的评价,38 份水稻品种资源的耐盐性强弱预测精度达到了 1,13 份水稻品种资源的预测精度在

表 4 水稻品种资源的主成分值、隶属函数值和 *D* 值

编号	主成分						隶属函数						<i>D</i> 值	排序
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 5	主成分 6	$u(X_1)$	$u(X_2)$	$u(X_3)$	$u(X_4)$	$u(X_5)$	$u(X_6)$		
1	1.332	0.458	0.868	0.533	0.398	0.343	0.433	0.237	0.274	0.578	0.664	0.456	0.407	31
2	1.232	0.459	0.970	0.399	0.343	0.426	0.341	0.238	0.455	0.377	0.553	0.586	0.370	36
3	1.231	0.383	1.175	0.528	0.367	0.394	0.340	0.134	0.819	0.571	0.602	0.536	0.417	30
4	0.986	0.539	0.987	0.535	0.310	0.357	0.114	0.348	0.485	0.581	0.487	0.478	0.306	46
5	1.440	0.450	1.277	0.478	0.279	0.515	0.532	0.226	1.000	0.495	0.425	0.726	0.533	13
6	1.018	0.553	0.975	0.424	0.331	0.394	0.144	0.368	0.464	0.414	0.529	0.536	0.310	45
7	0.862	0.689	0.749	0.588	0.253	0.337	0.000	0.555	0.062	0.661	0.372	0.447	0.239	50
8	1.072	0.331	0.720	0.518	0.260	0.391	0.193	0.062	0.011	0.556	0.386	0.531	0.216	51
9	1.609	0.396	0.939	0.505	0.336	0.315	0.688	0.152	0.400	0.536	0.539	0.412	0.501	17
10	1.066	0.474	1.034	0.546	0.304	0.306	0.188	0.259	0.568	0.598	0.475	0.398	0.327	44
11	1.159	0.565	0.875	0.477	0.416	0.404	0.273	0.384	0.286	0.494	0.700	0.552	0.368	37
12	0.956	0.483	1.136	0.449	0.534	0.329	0.087	0.271	0.750	0.452	0.938	0.434	0.331	42
13	1.328	0.286	1.105	0.432	0.375	0.459	0.429	0.000	0.694	0.426	0.618	0.638	0.406	33
14	1.173	0.754	0.948	0.496	0.340	0.420	0.286	0.645	0.416	0.523	0.547	0.577	0.435	29
15	1.211	0.701	1.134	0.452	0.407	0.382	0.321	0.572	0.746	0.456	0.682	0.517	0.478	23
16	1.058	0.752	0.714	0.585	0.355	0.503	0.180	0.642	0.000	0.656	0.577	0.707	0.358	38
17	0.945	0.525	0.997	0.431	0.372	0.431	0.076	0.329	0.503	0.425	0.612	0.594	0.289	48
18	1.533	0.406	0.866	0.515	0.550	0.313	0.618	0.165	0.270	0.551	0.970	0.409	0.490	19
19	1.047	0.470	1.146	0.257	0.114	0.372	0.170	0.253	0.767	0.164	0.093	0.502	0.278	49
20	0.942	0.637	0.923	0.499	0.349	0.338	0.074	0.483	0.371	0.527	0.565	0.448	0.298	47
21	1.162	0.881	0.945	0.380	0.328	0.420	0.276	0.820	0.410	0.348	0.523	0.577	0.444	27
22	1.251	0.553	0.810	0.242	0.491	0.186	0.358	0.368	0.171	0.141	0.851	0.210	0.341	40
23	1.039	0.638	0.954	0.480	0.350	0.293	0.163	0.485	0.426	0.498	0.567	0.378	0.337	41
24	0.900	0.781	1.034	0.351	0.565	0.266	0.035	0.682	0.568	0.305	1.000	0.335	0.349	39
25	1.331	0.375	0.762	0.400	0.277	0.427	0.432	0.123	0.085	0.378	0.421	0.588	0.329	43
26	1.406	0.600	0.926	0.490	0.232	0.519	0.501	0.433	0.377	0.514	0.330	0.732	0.474	24
27	1.085	1.012	0.820	0.167	0.436	0.221	0.205	1.000	0.188	0.029	0.740	0.265	0.385	35
28	1.354	0.514	1.080	0.396	0.232	0.385	0.453	0.314	0.650	0.372	0.330	0.522	0.438	28
29	1.411	0.618	0.986	0.543	0.237	0.434	0.506	0.457	0.483	0.593	0.340	0.599	0.495	18
30	1.237	0.638	0.979	0.374	0.374	0.260	0.345	0.485	0.471	0.339	0.616	0.326	0.407	32
31	1.575	0.674	1.069	0.516	0.344	0.690	0.657	0.534	0.631	0.553	0.555	1.000	0.632	4
32	1.370	0.671	0.979	0.426	0.269	0.475	0.468	0.530	0.471	0.417	0.404	0.663	0.482	20
33	1.071	0.887	0.989	0.148	0.405	0.326	0.192	0.828	0.488	0.000	0.678	0.429	0.387	34
34	1.584	0.698	1.064	0.474	0.176	0.437	0.665	0.567	0.622	0.489	0.217	0.603	0.584	5
35	1.658	0.746	0.767	0.166	0.426	0.052	0.733	0.634	0.094	0.027	0.720	0.000	0.512	16
36	1.714	0.735	1.010	0.480	0.197	0.509	0.785	0.618	0.526	0.498	0.260	0.716	0.645	3
37	1.470	0.474	0.986	0.483	0.322	0.403	0.560	0.259	0.483	0.503	0.511	0.550	0.480	21
38	1.677	0.426	0.892	0.814	0.184	0.551	0.750	0.193	0.316	1.000	0.233	0.782	0.572	6
39	1.373	0.694	1.093	0.422	0.395	0.390	0.471	0.562	0.673	0.411	0.658	0.530	0.526	15
40	1.293	0.865	0.955	0.224	0.316	0.376	0.397	0.798	0.428	0.114	0.499	0.508	0.466	25
41	1.319	0.817	0.957	0.448	0.199	0.381	0.421	0.731	0.432	0.450	0.264	0.516	0.480	22
42	1.420	0.811	0.892	0.676	0.077	0.458	0.514	0.723	0.316	0.793	0.018	0.636	0.527	14
43	1.530	0.765	0.918	0.620	0.074	0.550	0.615	0.660	0.362	0.709	0.012	0.781	0.565	8
44	1.566	0.669	0.945	0.432	0.189	0.425	0.648	0.528	0.410	0.426	0.243	0.585	0.536	12
45	1.361	0.728	0.855	0.500	0.335	0.263	0.459	0.609	0.250	0.529	0.537	0.331	0.466	26
46	1.501	0.714	0.973	0.563	0.291	0.477	0.588	0.590	0.460	0.623	0.449	0.666	0.569	7
47	1.590	0.651	0.980	0.312	0.367	0.450	0.670	0.503	0.472	0.246	0.602	0.624	0.560	10
48	1.948	0.459	0.948	0.381	0.415	0.306	1.000	0.238	0.416	0.350	0.698	0.398	0.648	2
49	1.704	0.601	0.806	0.632	0.125	0.416	0.775	0.434	0.163	0.727	0.115	0.571	0.561	9
50	1.786	0.701	0.948	0.679	0.068	0.489	0.851	0.572	0.416	0.797	0.000	0.685	0.659	1
51	1.461	0.811	0.958	0.349	0.341	0.419	0.552	0.723	0.433	0.302	0.549	0.575	0.546	11

0.997 ~ 0.998 之间, 23 号 (2020X2L545)、27 号 (2020X2L134 - 2) 的预测精度为 0.997, 是所有水稻品种资源中的预测精度较低的值。决定系数 $r^2 = 1.000$, $P = 0.000$, 这些变量可决定 D 的全部变异, 分别是有效穗数、穗长、穗粒数、分蘖数、株高、千粒质量、理论产量、结实率、干物质质量和收获指数。通过此回归方程对 51 份水稻品种资源耐盐性进行预测, 其预测精度都较高 (表 5)。 D 值越大, 与之相对应的水稻品种资源的耐盐性就越强, 判断水稻品种资源的耐盐性强弱可以通过测定这些指标准确且快速地得到结果, 因此对水稻品种资源耐盐性强弱进行合理评价可以通过此数学模型方程实现。

2.5 聚类分析

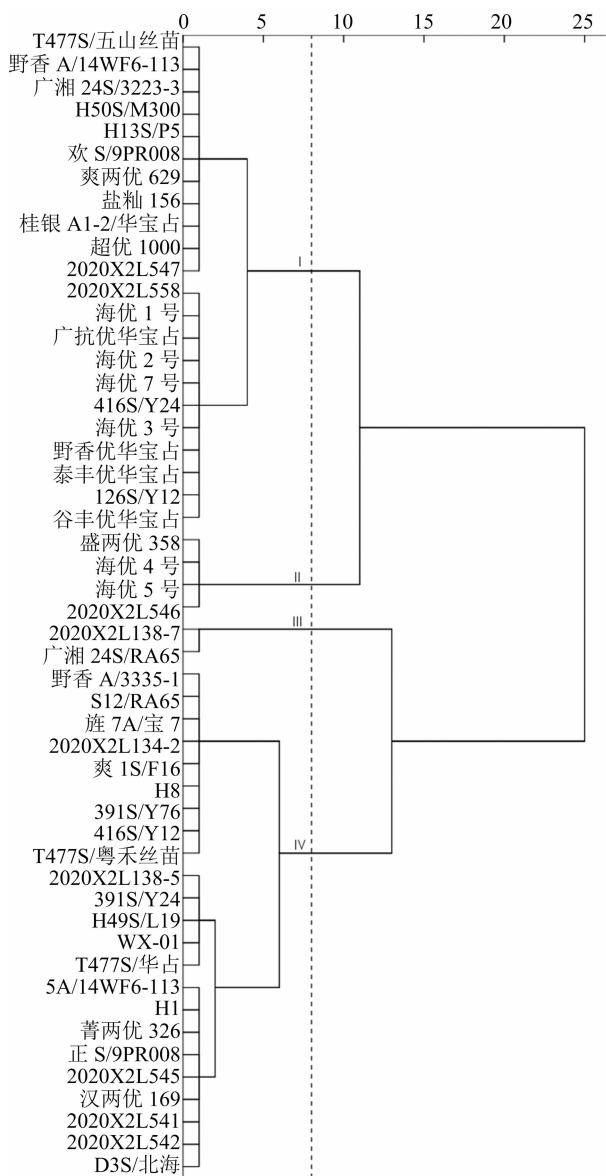
通过 D 值, 依据平方欧氏距离, 采用 ward 法进行了系统聚类分析, 在欧氏距离 8.0 处, 将 51 份水稻品种资源分为 4 个类群 (图 1), 可以将各份水稻品种资源的耐盐性划分为极强、强、中、弱 4 个等级。第 1 类群包括 T477S/五山丝苗、野香 A/14WF6 - 113、广湘 24S/3223 - 3、H50S/M300、H13S/P5、欢 S/9PR008、爽两优 629、盐粳 156、桂银 A1 - 2/华宝占、超优 1000、2020X2L547、2020X2L558、海优 1 号、光抗优华宝占、海优 2 号、海优 7 号、416S/Y12、海优 3 号、野香优华宝占、泰丰优华宝占、126S/Y12、谷丰优华宝占, 这 22 份水稻品种资源耐盐性强。第 2 类群包括盛两优 358、海优 4 号、海优 5 号和 2020X2L546, 共 4 份水稻品种资源, 耐盐性极强。第 3 类群包括 2020X2L138 - 7 和广湘 24s/RA65 等 2 份水稻品种资源, 耐盐性弱。第 4 类群包括野香 A/3335 - 1、S12/RA65、旌 7A/宝 7、2020X2L134 - 2、爽 1S/F16、H8、391S/Y76、416S/Y12、T477S/粤禾丝苗、2020X2L138 - 5、391S/Y24、H49S/L19、WX - 01、T477S/华占、5A/14WF6 - 113、H1、菁两优 326、正 S/9PR008、2020X2L545、汉两优 169、2020X2L541、2020X2L542、D3S/北海, 共 23 份水稻品种资源, 耐盐性中等。

3 讨论与结论

耐盐水稻品种资源的筛选与鉴定, 是培育耐盐水稻品种的直接有效的手段。水稻已经成为改良土壤盐碱化的首选粮食作物, 因此水稻的耐盐性就显得更加关键。以往的大多数研究是在水稻芽期、苗期、幼穗分化期等生育阶段进行, 对发芽率^[26]、发

表 5 回归方程的估计精度分析结果

编号	预测值	原始值	预测差值	预测精度
1	0.407	0.406	0.001	0.998
2	0.370	0.370	0.000	1.000
3	0.417	0.416	0.001	0.998
4	0.306	0.306	0.000	1.000
5	0.533	0.532	0.001	0.998
6	0.310	0.310	0.000	1.000
7	0.239	0.239	0.000	1.000
8	0.216	0.216	0.000	1.000
9	0.501	0.500	0.001	0.998
10	0.327	0.327	0.000	1.000
11	0.368	0.368	0.000	1.000
12	0.331	0.331	0.000	1.000
13	0.406	0.406	0.000	1.000
14	0.435	0.434	0.001	0.998
15	0.478	0.478	0.000	1.000
16	0.358	0.358	0.000	1.000
17	0.289	0.289	0.000	1.000
18	0.490	0.490	0.000	1.000
19	0.278	0.278	0.000	1.000
20	0.298	0.298	0.000	1.000
21	0.444	0.444	0.000	1.000
22	0.341	0.341	0.000	1.000
23	0.337	0.338	-0.001	0.997
24	0.349	0.349	0.000	1.000
25	0.329	0.329	0.000	1.000
26	0.474	0.474	0.000	1.000
27	0.385	0.384	0.001	0.997
28	0.438	0.438	0.000	1.000
29	0.495	0.495	0.000	1.000
30	0.407	0.407	0.000	1.000
31	0.632	0.632	0.000	1.000
32	0.482	0.482	0.000	1.000
33	0.387	0.387	0.000	1.000
34	0.584	0.584	0.000	1.000
35	0.512	0.511	0.001	0.998
36	0.645	0.645	0.000	1.000
37	0.480	0.480	0.000	1.000
38	0.572	0.572	0.000	1.000
39	0.526	0.526	0.000	1.000
40	0.466	0.465	0.001	0.998
41	0.480	0.480	0.000	1.000
42	0.527	0.527	0.000	1.000
43	0.565	0.564	0.001	0.998
44	0.536	0.536	0.000	1.000
45	0.466	0.466	0.000	1.000
46	0.569	0.569	0.000	1.000
47	0.560	0.560	0.000	1.000
48	0.648	0.647	0.001	0.998
49	0.561	0.560	0.001	0.998
50	0.659	0.659	0.000	1.000
51	0.546	0.545	0.001	0.998

图1 基于 D 值的聚类分析结果

芽指数^[27]、根长^[28]、苗高^[29]等指标进行测定以此来评价水稻耐盐性,然而只针对某一时期的某一种单项指标对水稻进行耐盐性的鉴定评价具有一定的局限性^[30],因为水稻耐盐性是不同生育时期由多个农艺性状指标共同决定的,本研究通过测定全生育期 10 个指标包括分蘖数、株高、有效穗数、穗长、干物质质量、穗粒数、收获指数、结实率、理论产量、千粒质量进行综合评价。

主成分分析能够把多个联系密切的单一指标转换为数量较少的综合指标,从而减少了多指标评价时指标间存在着特定相关性和信息交叉的问题。上述分析方法已大量应用于作物抗逆潜力的评价中,包括玉米耐盐性^[31]、大豆耐盐^[32]、小麦氮高效

筛选^[33]和水稻耐盐性^[11,34,35]等研究。在本试验中,可以计算出主成分值及其相应的隶属指数值和权重,这样可以避免因人为主观设定权重而造成计算结果的偏差。接着将各个综合指标对应的特征向量进行下一步的归一化处理,从而得出了水稻耐盐性的综合评价结果(D),在充分考虑到各指标间相互关系的同时也综合考虑了各指标的重要性,这也使得出的综合评价结果更加科学合理。通过多元统计方法的组合,将 10 个耐盐指标数量化后,与水稻品种资源的耐盐性优劣形成了数量关系,根据 D 值对本研究的 51 份水稻品种资源耐盐性进行了排序和评价,结果表明,海优 5 号的耐盐性在选取的 51 份水稻品种资源中最强,在往后的水稻耐盐品种的选择与改良过程中可以加以利用。然后通过逐步回归分析得到最优的回归方程来作为评价水稻品种资源耐盐性强弱的模型,并且通过此模型得到的水稻品种资源耐盐性强弱的预测值与通过 D 值进行水稻品种资源耐盐性综合评价所得的结果几乎一致。有效证明了通过此模型来评价水稻品种资源耐盐性比较可信,因为其评价指标很容易测定并且准确而有效,因此可用来预测目标水稻品种资源耐盐性的强弱。最后聚类分析可以对不同的水稻品种资源根据耐盐性强弱做出正确的划分,能够相对直观地对不同水稻品种资源进行分类处理^[36]。通过 D 值对 51 份水稻品种资源使用系统聚类分析,将 51 份水稻品种资源按耐盐性强弱细分为 4 个类别,本结果与张瑞等的 5 种等级划分^[36]相似。本试验可为今后水稻品种资源耐盐性强弱评价提供相关理论依据。

本研究将全国 51 份水稻品种资源的耐盐性强弱做了相应的评价。通过主成分分析、隶属函数分析和逐步回归分析等多种分析方法,对测定的指标进行系统分析,建立了最优回归方程, $D = -0.626 + 0.174 \times \text{有效穗数} + 0.180 \times \text{穗长} + 0.069 \times \text{穗粒数} + 0.261 \times \text{分蘖数} + 0.277 \times \text{株高} + 0.283 \times \text{千粒质量} + 0.13 \times \text{理论产量} - 0.051 \times \text{结实率} + 0.118 \times \text{干物质质量} + 0.124 \times \text{收获指数}$,可用来快速鉴定评价与预测水稻品种资源的耐盐性强弱。利用系统聚类分析方法,将 51 份水稻品种资源根据耐盐性强弱划分为耐盐性极强、耐盐性强、耐盐性中等和耐盐性弱 4 个类群,其中耐盐性极强的有 4 份,耐盐性强的有 22 份,耐盐性弱的有 2 份,耐盐性中等的有 23 份。本研究中耐盐性最强的水稻品种是海优

5 号,耐盐性最弱的水稻品种资源是广湘 24S/RA65。这种分类方法有助于提高耐盐水稻品种资源的筛选鉴定、耐盐水稻品种资源的选育和推广的效率。

参考文献:

- [1] Qin H, Li Y X, Huang R F. Advances and challenges in the breeding of salt - tolerant rice [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(21): 8385.
- [2] 顾 骁, 吴孚桂, 刘慧芳, 等. 30 份水稻材料的耐盐性鉴定与评价[J]. 热带生物学报, 2020, 11(3): 314 - 323.
- [3] 祁栋灵, 韩龙植, 张三元. 水稻耐盐/碱性鉴定评价方法[J]. 植物遗传资源学报, 2005, 6(2): 226 - 230, 235.
- [4] 郑英杰. 盐胁迫对水稻的影响及水稻耐盐育种研究[J]. 北方水稻, 2013, 43(5): 71 - 74, 80.
- [5] 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[J]. 植物遗传资源学报, 2011, 12(4): 625 - 628, 633.
- [6] 王秀萍, 张晓东, 鲁雪林, 等. 盐胁迫对冀东滨海稻区优良水稻种子发芽率的影响(简报)[J]. 河北科技师范学院学报, 2004, 18(1): 76 - 78.
- [7] 乔永利, 张媛媛, 安永平, 等. 粳稻芽期耐冷性鉴定方法研究[J]. 植物遗传资源学报, 2004, 5(3): 290 - 294.
- [8] 顾兴友, 严小龙, 郑少玲, 等. 盐胁迫对水稻农艺性状遗传变异的影响[J]. 中国农业科学, 1999, 32(1): 1 - 7.
- [9] 阮松林, 薛庆中. 盐胁迫条件下杂交水稻种子发芽特性和幼苗耐盐生理基础[J]. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 281 - 284.
- [10] 张所兵, 张云辉, 林 静, 等. 水稻全生育期耐盐资源的初步筛选[J]. 中国农学通报, 2013, 29(36): 63 - 68.
- [11] 潘晓鹰, 黄善军, 陈 凯, 等. 大田全生育期盐水灌溉胁迫筛选水稻耐盐恢复系[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(1): 49 - 54.
- [12] 付雪蛟, 李 旭, 付立东, 等. 耐盐水稻品种筛选试验报告[J]. 北方水稻, 2017, 47(1): 22 - 24, 28.
- [13] Wang H, Takano T, Liu S K. Screening and evaluation of saline - alkaline tolerant germplasm of rice (*Oryza sativa* L.) in soda saline - alkali soil[J]. Agronomy, 2018, 8(10): 205.
- [14] Golzarian M R, Frick R A, Rajendran K, et al. Accurate inference of shoot biomass from high - throughput images of cereal plants[J]. Plant Methods, 2011, 7: 2.
- [15] 倪秀红, 赵 杰, 顾春军. 不同水稻品种发芽期的耐盐性研究[J]. 上海农业科技, 2011(5): 64 - 65.
- [16] Zhang R, Hussain S, Wang Y, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) germplasm at the germination stage[J]. Agronomy, 2021, 11(8): 1569.
- [17] 王根来, 蒋 荷, 吴竞仑, 等. 水稻种质资源耐盐性鉴定研究[J]. 盐碱地利用, 1991, 21(1): 1 - 5.
- [18] 袁 杰, 王学强, 贾春平, 等. 水稻苗期耐盐性的综合鉴定及评价[J]. 分子植物育种, 2020, 18(19): 6474 - 6482.
- [19] 周 毅, 崔丰磊, 杨 萍, 等. 水稻不同品种幼苗期耐盐性评价[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(5): 781 - 787.
- [20] 王仁雷, 华 春, 周 峰, 等. 盐胁迫下不同耐盐性水稻幼苗叶绿素荧光差异性研究[J]. 江苏农业科学, 2008, 36(4): 34 - 37.
- [21] 董桂春, 王 熠, 于小凤, 等. 不同生育期水稻品种氮素吸收利用的差异[J]. 中国农业科学, 2011, 44(22): 4570 - 4582.
- [22] 刘海卿, 孙万仓, 刘自刚, 等. 北方寒旱区白菜型冬油菜抗寒性与抗旱性评价及其关系[J]. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3743 - 3756.
- [23] 金 明, 刘旭升, 逢洪波, 等. 水稻芽期耐寒性综合评价及耐寒指标筛选[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(7): 25 - 35.
- [24] 李春红, 姚兴东, 鞠宝韬, 等. 不同基因型大豆耐阴性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(15): 2927 - 2939.
- [25] 戴海芳, 武 辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 等. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J]. 中国农业科学, 2014, 47(7): 1290 - 1300.
- [26] 倪秀红, 陈春雷, 顾春军, 等. 盐碱滩涂水稻耐盐品种筛选试验初报[J]. 上海农业科技, 2012(2): 33 - 34.
- [27] 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[J]. 浙江农业科学, 2004, 45(1): 30 - 33.
- [28] 荆瑞勇, 卫佳琪, 王丽艳, 等. 基于主成分分析的不同水稻品种品质综合评价[J]. 食品科学, 2020, 41(24): 179 - 184.
- [29] 韩晓阳, 蒋医蔚, 陈志军, 等. 水稻苗期耐盐种质资源初步筛选[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(增刊2): 110 - 112, 121.
- [30] 刘佳音, 邵晓宇, 邹丹丹, 等. 水稻耐盐碱鉴定方法及评价指标研究进展[J]. 杂交水稻, 2019, 34(6): 1 - 6.
- [31] 邓 杰, 李 婷, 蔡书婷, 等. 24 份玉米品种萌发期耐碱性的综合评价[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2020, 32(5): 1 - 6, 89.
- [32] 肖鑫辉, 李向华, 刘 洋, 等. 野生大豆(*Glycine soja*)耐高盐碱土壤种质的鉴定与评价[J]. 植物遗传资源学报, 2009, 10(3): 392 - 398.
- [33] 宋 晓, 张珂珂, 黄晨晨, 等. 基于主成分分析的氮高效小麦品种的筛选[J]. 河南农业科学, 2020, 49(12): 10 - 16.
- [34] 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[J]. 华北农学报, 2017, 32(增刊1): 102 - 107.
- [35] 潘世驹. 寒地水稻耐盐碱资源筛选及产量品质稳定性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016: 9 - 53.
- [36] 张 瑞, 王 洋, Shahid Hussain, 等. 水培条件下水稻全生育期耐盐筛选鉴定[J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1567 - 1581.