

# 寒地粳稻品种芽期耐碱性研究

于涵<sup>1,2</sup> 胡博<sup>1,2</sup> 曹正男<sup>1,2</sup> 赵振东<sup>1,2</sup> 赵泽强<sup>1,2</sup>  
宁晓海<sup>1,2</sup> 陈德权<sup>3</sup> 郭玉柱<sup>3</sup> 曹立勇<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup>中国水稻研究所, 310006, 浙江杭州; <sup>2</sup>宝清北方水稻研究中心, 155600, 黑龙江宝清;  
<sup>3</sup>黑龙江北大荒农业股份有限公司八五三分公司, 155600, 黑龙江宝清)

**摘要** 为筛选出适合在盐碱土种植的寒地粳稻品种, 选用 40 mmol/L 混合碱 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$ ) 对收集的 61 份寒地粳稻种质进行处理, 观察发芽势、发芽率、芽长等生理指标, 将各单项指标耐碱系数作为筛选依据, 利用主成分分析法计算各品种的综合得分, 通过聚类分析对供试品种进行分类。结果表明, 碱胁迫对所有品种的根长和芽长均表现出抑制作用; 而在发芽率方面, 部分品种经碱胁迫处理后反而呈现出促进效应。主成分分析结果表明, 将各生理指标降维为 4 个主成分, 其累计贡献率达 85.973%, 可有效涵盖耐碱性相关指标的核心信息。聚类分析结果表明, 61 份材料被分为 5 类, 第 1 类为强耐碱材料 (5 份), 第 2 类为耐碱材料 (38 份), 第 3 类为中度耐碱材料 (13 份), 第 4 类为敏感材料 (4 份), 第 5 类为极敏感材料 (1 份)。

**关键词** 碱胁迫; 粳稻; 芽期; 主成分分析

盐碱胁迫是制约作物生长的主要非生物胁迫之一, 对粮食安全构成显著负面影响<sup>[1]</sup>。我国作为全球第三大盐碱土分布国家, 盐碱土呈现面积大、范围广的特点<sup>[2]</sup>, 伴随着我国工业污染加剧、农业灌溉和施肥方法不当等因素叠加的影响, 我国土壤盐碱化逐渐加剧, 严重威胁农业可持续发展<sup>[3]</sup>。盐碱胁迫根据土壤阴离子的不同可分为盐胁迫 (以  $\text{NaCl}$  等中性盐为主) 和碱胁迫 (以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  为主), 二者均会对作物造成渗透胁迫和离子毒害, 影响作物的正常发育。对比而言, 碱胁迫因其具有高 pH, 使作物受到双重损伤, 伤害作用比盐胁迫更为严重与复杂<sup>[4-6]</sup>。种植水稻可以改良盐碱地, 一方面在种植过程中通过灌水使土壤表层的盐分逐渐下沉, 改良土壤结构<sup>[7-8]</sup>; 另一方面水稻根系具有分泌有机酸和吸收盐分的作用, 可改善土壤板结, 提高土壤蓄水能力, 避免次生盐碱化, 与其他作物相比具有独特的优越性<sup>[9]</sup>, 是改良盐碱地的优选作物。但不同水稻品种对碱胁迫的耐受能力存在显著差异, 我国在耐盐碱水稻种质创新与品种选育方面起步较晚, 仍有大量水稻种质资源尚未完成耐碱性鉴定。

主成分分析和聚类分析是常用的分析方式, 可以通过对数据降维的方式, 将各样本间的遗传差异

和性状特点体现出来, 并对不同样本进行归类, 简化评价结果<sup>[10]</sup>。多位学者利用主成分分析和聚类分析对水稻农艺性状进行了品种综合评价方面的研究<sup>[11-13]</sup>。这种分析方式可以从众多影响因素中解析出主要因素, 简化评价过程。

目前, 实验室对水稻品种耐碱性的鉴定, 主要通过测定相关生理生化指标并结合后续分析来判断。相关研究<sup>[14-16]</sup>表明, 水稻芽期是最易受碱害的生长时期。本文对 61 份水稻品种进行芽期胁迫试验, 通过主成分分析进行综合评价, 以期后续水稻耐碱种质资源鉴定与选育奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

挑选中国水稻研究所北方水稻研究中心现有的 61 份粳稻品种作为供试材料, 名称及编号详见表 1。

### 1.2 试验设计

选取发育饱满、整齐、健康的种子置于 45 °C 恒温箱处理 48 h 打破休眠, 用 1%  $\text{NaClO}$  溶液消毒 20 min, 然后用无菌水反复冲洗 4 次。设置 1 个空白对照和混合碱 ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  摩尔比为 1:1, 浓度为 40 mmol/L) 处理, 每个处理 3 次重复

作者简介: 于涵, 主要从事水稻逆境机理研究, E-mail: yuhan01@caas.cn

曹立勇为通信作者, 研究方向为水稻遗传育种, E-mail: caoliyong@caas.cn

基金项目: 寒地多抗优质水稻新种质创制及新品种选育 (2023DXZD0001)

收稿日期: 2025-12-19; 修回日期: 2026-01-25; 网络出版日期: 2026-04-10

表 1 61 份粳稻品种信息  
Table 1 Information of 61 japonica rice varieties

编号 Number	品种 Variety	编号 Number	品种 Variety	编号 Number	品种 Variety	编号 Number	品种 Variety	编号 Number	品种 Variety
Y01	垦稻 26	Y14	农丰 32	Y27	兴育 1 号	Y40	品 37	Y53	中宝 7
Y02	莲汇 6730	Y15	龙粳 46 号	Y28	兴育 GA10 号	Y41	品 44	Y54	中宝 8
Y03	龙粳 3010	Y16	闵农 1 号	Y29	兴育早优	Y42	品 45	Y55	龙粳 31
Y04	龙粳 3013	Y17	新疆香 1	Y30	科稻 1805	Y43	品 47	Y56	中宝 15
Y05	中科发 5 号	Y18	新疆香 2	Y31	品 10	Y44	品 71	Y57	中宝 16
Y06	中科发 6 号	Y19	新疆香 3	Y32	品 11	Y45	中宝 11 号	Y58	莲稻 17
Y07	垦粳 1 号	Y20	新疆香 4	Y33	品 15	Y46	品 84	Y59	莲稻 28
Y08	龙庆稻 3 号	Y21	新疆香 5	Y34	中宝 10 号	Y47	品 9	Y60	稻香 4
Y09	齐粳 10 号	Y22	新疆香 6	Y35	中宝 14 号	Y48	品 93	Y61	佳香 7
Y10	龙垦 2021	Y23	新疆香 7	Y36	品 3	Y49	中宝 12		
Y11	绥粳 27	Y24	新疆香 8	Y37	品 30	Y50	中宝 4		
Y12	三江 6 号	Y25	新疆香 9	Y38	品 34	Y51	中宝 5		
Y13	绥粳 18	Y26	新疆香 10	Y39	中宝 13 号	Y52	中宝 6		

(每次重复 50 粒)。将种子均匀铺在铺有无菌滤纸的 9 cm 培养皿中,加入 5 mL 处理液(空白对照加入等量蒸馏水)置于植物培养箱内,培养条件为 16 h/8 h (光照/黑暗),温度 30 °C/25 °C (白天/夜间)。每 24 h 更换一次处理液。

### 1.3 测定项目与方法

种子胚根长度达到种子长度,胚芽达到种子长度一半为发芽标准,胁迫第 4 天调查各水稻品种的发芽势,第 7 天调查发芽率。第 7 天在处理中抽取 10 粒长势一致的种子调查胚芽长和根长,然后用剪刀取下胚芽部分,用蒸馏水洗净,用吸水纸吸去多余水分后测量鲜重;测量鲜重后,胚芽经高温(105 °C) 20 min 杀青后,75 °C 烘至恒重后测量干重。以相对发芽势、相对芽长、相对芽鲜重、相对组织总含水量和根长抑制率作为耐碱性的综合评价指标。

发芽势 (%) = (4 d 内发芽种子粒数/供试种子数) × 100; 发芽率 (%) = (7 d 内发芽种子数/供试种子数) × 100; 相对发芽势 (%) = (处理发芽势/对照发芽势) × 100; 相对发芽率 (%) = (处理发芽率/对照发芽率) × 100; 相对芽长 (%) = (处理芽长/对照芽长) × 100; 相对芽鲜重 (%) = (处理芽鲜重/对照芽鲜重) × 100; 芽总含水量 (%) = (芽鲜重 - 芽干重) / 芽鲜重 × 100; 相对组织总含水量 (%) = (处理芽总含水量/对照芽总含水量) × 100; 根长抑制率 (%) = (对照根长 - 处理根长) / 对照根长 × 100。

隶属函数值【 $X(m)$ ,  $X(n)$ 】计算方程:

$$X(m) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$X(n) = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中,  $X$  为某一指标的测定值;  $X_{\max}$  为某一指标测定值的最大值;  $X_{\min}$  为某一指标测定值的最小值。若某一指标与抗碱性指标呈正相关,则用  $X(m)$  计算,反之用  $X(n)$  计算。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理与计算,采用数据分析软件 SPSS 27 进行主成分分析及系统聚类分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水稻品种耐碱性指标的描述性分析

由表 2 可知,不同供试材料的耐碱性指标存在差异,变异系数排列顺序为相对芽鲜重 > 相对芽长 > 相对发芽势 > 相对发芽率 > 根长抑制率 > 相对组织总含水量。其中相对芽鲜重变异系数最大,为 37.51%,变幅为 20.29%~158.33%,相对芽长的变异系数次之,为 33.18%,变幅为 19.39%~94.75%,根长抑制率的变异系数较小,变幅为 64.72%~100.00%;相对组织含水量的变异系数最低,变幅为 63.88%~105.85%。从分布区间能看出,碱处理对水稻根长和芽长的抑制较强,其余测试品种中,少数对生长表现出了促进作用。

### 2.2 不同水稻品种耐碱指标的相关性分析

由表 3 可知,碱处理下,相对发芽势与相对发芽率、相对芽鲜重分别呈显著和极显著正相关,与相对芽长呈负相关;相对芽鲜重与相对组织总含水量呈显著正相关;根长抑制率与相对芽长呈极显著负相关。耐碱指标间存在不同程度的相关性,为消

表 2 耐碱性指标描述性分析  
Table 2 Descriptive analysis of alkali tolerance indicators

指标 Index	均值 Mean (%)	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)	分布区间 Distribution interval (%)
相对发芽势 Relative germination vigor	89.54	18.38	20.52	36.92~125.76
相对发芽率 Relative germination rate	86.12	13.72	15.93	53.85~110.48
相对芽长 Relative bud length	57.05	18.93	33.18	19.39~94.75
相对芽鲜重 Relative bud fresh weight	69.82	26.19	37.51	20.29~158.33
相对组织总含水量 Relative total tissue water content	96.61	6.37	6.59	63.88~105.85
根长抑制率 Root length inhibition rate	93.06	8.95	9.62	64.72~100.00

表 3 耐碱性指标相关性分析  
Table 3 Correlation analysis of alkali tolerance indicators

指标 Index	相对发芽势 Relative germination vigor	相对发芽率 Relative germination rate	相对芽长 Relative bud length	相对芽鲜重 Relative bud fresh weight	相对组织总含水量 Relative total tissue water content
相对发芽率 Relative germination rate	0.572**				
相对芽长 Relative bud length	-0.074	-0.130			
相对芽鲜重 Relative bud fresh weight	0.226*	0.104	0.171		
相对组织总含水量 Relative total tissue water content	0.196	0.174	-0.101	0.276*	
根长抑制率 Root length inhibition rate	0.038	0.198	-0.554**	-0.139	-0.096

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

除不同指标间信息交叉与重叠，采用主成分分析法来综合评定各品种的耐碱性。

### 2.3 不同水稻品种耐碱指标的主成分分析

通过隶属函数计算公式，对各耐碱生理指标进行数据标准化后，对数据进行了抽样适合性检验（KMO）与 Bartlett 球度检验，KMO 值为 0.519，并且 Bartlett 球度检验的显著性水平  $P < 0.001$ ，所以拒绝 Bartlett 球度检验的零假设，表明各指标间存在较强相关性。验证结果表明本研究数据适合进行主成分分析。结合图 1 和表 4 可知，将数据分成 4 个主成分，累计贡献率达 85.973%，可以反映耐碱指标的大部分信息。

由表 4 可知，PC1 的特征值是 1.874，方差贡

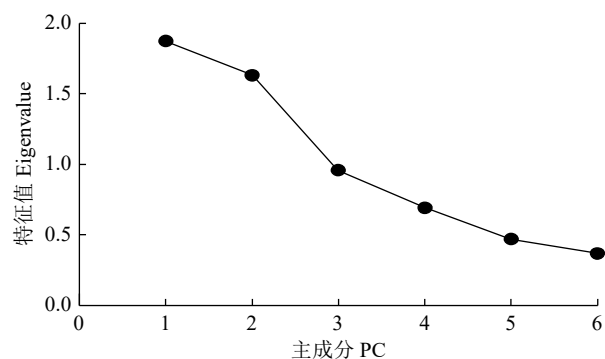


图 1 供试水稻品种主成分特征值碎石图  
Fig.1 Gravel map of principal component eigenvalue of tested rice varieties

献率为 31.237%，其中相对发芽势和相对发芽率具有较大载荷且为正值，表明二者存在正相关，符合

表 4 主成分在各性状上的特征向量、因子载荷和累计贡献率  
Table 4 Eigenvector, factor loading and cumulative contribution rate of principal components in each trait

耐碱指标 Alkali resistance index	PC1		PC2		PC3		PC4	
	特征向量 Eigenvector	载荷 Loading	特征向量 Eigenvector	载荷 Loading	特征向量 Eigenvector	载荷 Loading	特征向量 Eigenvector	载荷 Loading
相对发芽势 Relative germination vigor	0.768	0.564	0.269	0.210	0.355	0.361	-0.045	-0.053
相对发芽率 Relative germination rate	0.798	0.586	0.069	0.054	0.389	0.396	-0.107	-0.126
相对芽长 Relative bud length	-0.437	-0.321	0.697	0.545	0.361	0.367	0.035	0.041
相对芽鲜重 Relative bud fresh weight	0.290	0.213	0.617	0.482	-0.318	-0.323	0.333	0.391
相对组织总含水量 Relative total tissue water content	0.439	0.322	0.371	0.290	-0.670	-0.681	-0.423	-0.497
根长抑制率 Root length inhibition rate	0.400	0.294	-0.746	-0.583	-0.096	-0.098	0.648	0.761
特征值 Eigenvalue	1.874		1.632		0.960		0.692	
贡献率 Contribution rate (%)	31.237		27.197		16.002		11.537	
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	31.237		58.434		74.436		85.973	

相关性分析结果, PC1 主要反映发芽率的情况; PC2 的特征值为 1.632, 方差贡献率为 27.197%, 其中相对芽长、相对芽鲜重和相对组织总含水量具有较大载荷且为正值, 表明三者存在正相关, PC2 主要反映胚芽长度和水分等指标情况; PC3 的特征值为 0.960, 方差贡献率为 16.002%, 其中相对发芽率仍有最大载荷; PC4 的特征值为 0.692, 方差贡献率为 11.537%, 其中根长抑制率具有最大载荷, 主要反映根长情况。

#### 2.4 不同水稻品种主要耐碱指标的综合评价

由表 5 可知, 利用各主成分中方差贡献率的占比, 计算出耐碱性状综合得分 ( $D$  值) 并进行排序, 61 份水稻品种耐碱指标综合得分前 5 名的分别是 Y26 (新疆香 10)、Y61 (佳香 7)、Y1 (垦稻 26)、Y48 (品 93) 和 Y28 (兴育 GA10 号)。

表 5 供试水稻品种主要耐碱指标评价结果  
Table 5 Evaluation results of main alkaline tolerance indicators of tested rice varieties

编号 Number	综合指标值 Comprehensive index value				$D$ 值 $D$ -value	排序 Rank
	PC1	PC2	PC3	PC4		
Y1	1.3095	0.9880	0.0992	0.0147	0.801	3
Y2	0.7301	0.5952	-0.2614	-0.1588	0.378	55
Y3	1.0606	0.6835	-0.0155	-0.3222	0.547	26
Y4	1.0535	0.6771	0.0657	-0.3762	0.550	25
Y5	1.0440	0.8247	0.1342	-0.2721	0.621	15
Y6	1.0077	0.9568	0.0553	-0.1179	0.656	10
Y7	1.0752	0.7868	-0.0535	-0.3640	0.572	20
Y8	0.6565	0.8063	-0.2462	-0.3458	0.395	51
Y9	1.1165	0.7814	0.2247	-0.1787	0.663	9
Y10	0.7733	0.6454	-0.3188	-0.2705	0.383	53
Y11	0.9664	0.8361	0.1125	-0.1339	0.612	18
Y12	1.0367	0.7829	0.0442	-0.2725	0.588	19
Y13	0.9679	0.7263	0.1646	-0.2587	0.570	21
Y14	1.2887	0.5524	-0.0399	-0.4498	0.565	22
Y15	0.8973	0.5146	-0.2916	-0.3216	0.384	52
Y16	1.1284	0.7320	0.1286	-0.2883	0.618	17
Y17	0.8857	0.4204	0.1741	0.0173	0.485	38
Y18	0.9688	0.6595	-0.3712	-0.0938	0.472	41
Y19	1.1134	0.5926	-0.0497	-0.3606	0.526	28
Y20	1.0968	0.4992	-0.0381	-0.3433	0.495	37
Y21	1.2350	0.7169	-0.1532	-0.1368	0.620	16
Y22	0.6111	0.5080	-0.4483	-0.1822	0.270	59
Y23	1.1741	0.5925	-0.0511	-0.2837	0.558	23
Y24	1.2840	0.7279	-0.1857	-0.2285	0.623	14
Y25	0.9696	1.0801	0.0444	0.0042	0.697	6
Y26	1.1158	1.2147	0.3441	0.0455	0.853	1
Y27	0.9843	0.7559	0.0537	-0.3090	0.558	24
Y28	1.2941	0.9382	0.1218	-0.2648	0.745	5
Y29	0.8153	0.7256	0.1417	-0.2773	0.508	30

续表 5 Table 5 (continued)

编号 Number	综合指标值 Comprehensive index value				$D$ 值 $D$ -value	排序 Rank
	PC1	PC2	PC3	PC4		
Y30	0.8791	0.8479	-0.1639	-0.0307	0.547	27
Y31	0.7159	0.7310	-0.4276	0.6580	0.499	34
Y32	0.9042	0.8984	0.0069	0.1170	0.625	13
Y33	0.9122	0.4321	-0.1359	0.0537	0.445	44
Y34	1.0880	1.0043	-0.0941	-0.0151	0.687	8
Y35	0.6228	0.6575	-0.2335	-0.0453	0.381	54
Y36	0.4251	0.6677	-0.3687	-0.1463	0.274	58
Y37	0.9152	1.0543	0.0740	-0.2860	0.634	12
Y38	0.5457	0.6433	-0.2467	-0.2675	0.315	57
Y39	0.3910	0.6005	-0.1962	-0.2275	0.261	60
Y40	-0.1785	0.3603	0.2624	0.0201	0.102	61
Y41	1.0415	0.9956	0.0973	-0.0771	0.694	7
Y42	0.6819	0.9028	-0.1523	-0.1335	0.482	39
Y43	0.7453	0.8903	-0.1326	-0.1201	0.506	32
Y44	0.7591	0.7469	-0.1420	-0.2763	0.442	46
Y45	0.5768	0.8423	-0.0331	-0.1649	0.443	45
Y46	0.6153	0.7422	-0.0452	-0.1629	0.423	48
Y47	0.8533	0.8907	0.3174	-0.0200	0.643	11
Y48	1.1864	1.1423	-0.1570	0.2551	0.792	4
Y49	0.5973	0.9923	-0.1853	0.1144	0.508	31
Y50	0.6660	0.8466	-0.4248	-0.0588	0.418	50
Y51	0.7911	0.6883	0.0670	-0.0724	0.503	33
Y52	0.8260	0.6556	0.1841	-0.1967	0.509	29
Y53	0.7847	0.5390	0.1568	0.0118	0.482	40
Y54	0.6992	0.6962	0.1643	-0.2215	0.470	42
Y55	0.8363	0.6728	0.1428	-0.2864	0.498	36
Y56	0.7302	0.5908	0.0856	-0.3041	0.421	49
Y57	0.5344	0.6683	-0.1236	-0.2091	0.350	56
Y58	0.5761	0.8243	-0.1276	-0.1350	0.424	47
Y59	0.7595	0.6419	0.0887	-0.1889	0.465	43
Y60	0.7832	0.7499	-0.0726	-0.0299	0.499	35
Y61	1.2975	0.9674	0.1747	0.0093	0.804	2

采用组间联接法对表 5 的综合得分进行系统聚类分析 (图 2), 在欧式距离 5 处, 可以将 61 份水稻品种分为 5 大类, 其中第 1 类为强耐碱材料, 共 5 份, 分别为 Y26、Y61、Y1、Y48 和 Y28, 占比 8.20%; 第 2 类为耐碱材料, 共 38 份, 占比 62.30%; 第 3 类为中度耐碱材料, 有 13 份, 占比 21.31%; 第 4 类为敏感材料, 有 4 份; 第 5 类为极敏感材料, 有 1 份。

### 3 讨论

碱性盐碱土主要以  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  和  $\text{NaHCO}_3$  为主, 使作物受离子毒害和高 pH 双重损伤。有研究<sup>[17-18]</sup> 选用单一的碱盐模拟碱胁迫环境, 为了模拟更贴

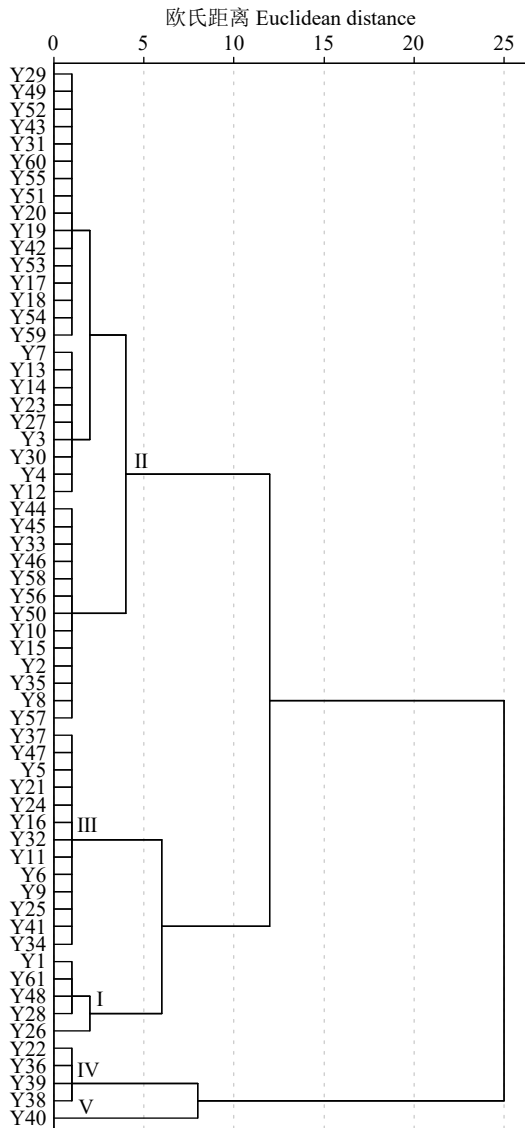


图 2 供试水稻品种综合得分聚类  
Fig.2 Cluster diagram of comprehensive scores of rice varieties tested

近真实的碱土胁迫环境，本文选用混合碱盐来模拟碱胁迫环境。

有研究<sup>[16,19]</sup>表明，耐碱系数（胁迫下指标值/对照指标值）可以有效消除品种或测量指标间存在的基础差异，本文选用耐碱系数或抑制率进行评价，从各耐碱指标可见，碱处理对芽长和根长均有明显的抑制作用，其中根长抑制率范围为 64.72%~100.00%，相对芽长范围 19.39%~94.75%，可见对根长的抑制作用更强。在相关性分析中，芽长与根长抑制率呈现显著负相关。根系是植物物质储存、水分和养分吸收的重要器官，其直接与土壤（碱胁迫）接触，受到的胁迫也是最直接、最强烈的<sup>[15]</sup>。有研究<sup>[20-23]</sup>表明，碱胁迫对水稻芽和根的生长均有

抑制作用，对胚根的抑制作用更强，地下部分比地上部分对碱胁迫更敏感，这与本研究结果一致。本研究中发现，碱胁迫会提高部分品种发芽率和相对组织含水量，这可能与不同材料对碱胁迫的耐受性不同有关。

因不同品种在各项耐受指标中表现不同，无法直观、快捷地筛选出所需抗碱性状。有研究<sup>[16]</sup>选用隶属函数法消除不同指标间信息交叉与重叠，但该方法通过简单累加隶属函数值计算平均数，无法按各指标在筛选中所占权重大小进行筛选。本文选用主成分分析法进行筛选分析，通过隶属函数的方式对数据进行标准化，再通过主成分分析提取了 4 个主成分，累计贡献率达 85.973%，可以概括主要研究信息，再通过聚类分析，将 61 份材料分成 5 大类，筛选出抗碱胁迫的水稻品种。

#### 4 结论

本研究表明，碱处理对水稻根长和芽长抑制较强，对少数品种的其他指标呈促进效应。耐碱性指标间存在不同程度相关性，相对发芽势与相对发芽率呈极显著正相关，与相对芽鲜重呈显著正相关，与相对芽长呈负相关；相对芽鲜重与相对组织总含水量呈显著正相关，根长抑制率与相对芽长呈极显著负相关。主成分分析提取 4 个主成分，累计贡献率 85.973%，可有效反映核心耐碱信息。聚类分析将供试品种划分为 5 个耐碱等级，其中强耐碱品种 5 份（Y26、Y61、Y1、Y48 和 Y28），占比 8.20%；耐碱、中度耐碱、敏感、极敏感品种分别为 38 份（62.30%）、13 份（21.31%）、4 份、1 份。

#### 参考文献

- [1] 周婷芳, 李冉, 刘倩倩, 等. 东北区 118 份玉米杂交种萌发期耐盐性分析. 作物杂志, 2025(5): 1-10.
- [2] 马国辉, 郑殿峰, 母德伟, 等. 耐盐碱水稻研究进展与展望. 杂交水稻, 2024, 39(1): 1-10.
- [3] 王英, 张国民, 李景鹏, 等. 寒地粳稻耐碱研究进展及开发前景. 作物杂志, 2016(6): 1-8.
- [4] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [5] Guo R, Yang Z Z, Li F, et al. Comparative metabolic responses and adaptive strategies of wheat (*Triticum aestivum*) to salt and alkali stress. BMC Plant Biology, 2015, 15(1): 170.
- [6] Liang W J, Ma X L, Wan P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: a review. Biochemical & Biophysical Research Communications, 2018, 495(1): 286-291.
- [7] Wei L X, Lv B S, Wang M M, et al. Priming effect of abscisic acid on alkaline stress tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, 90: 50-57.

- [8] 徐璐, 王志春, 赵长巍, 等. 东北地区盐碱土及耕作改良研究进展. 中国农学通报, 2011, 27(27): 23-31.
- [9] 梁银培, 孙健, 索艺宁, 等. 水稻耐盐性和耐碱性相关性状的QTL定位及环境互作分析. 中国农业科学, 2017, 50(10): 1747-1762.
- [10] 杨学乐, 张璐, 李志清, 等. 苦荞种质资源表型性状的遗传多样性分析. 作物杂志, 2020(5): 53-58.
- [11] 游书梅, 曹应江, 郑家奎, 等. 73份亚洲水稻恢复系农艺性状的主成分与聚类分析. 植物遗传资源学报, 2015, 16(2): 16-23.
- [12] 李培富, 杨淑琴, 马宏伟. 宁夏水稻主要农艺性状的主成分及聚类分析. 中国农学通报, 2006, 22(12): 162.
- [13] 姜秀英, 王佳, 高振环, 等. 辽宁省水稻品种主要农艺性状的主成分及聚类分析. 辽宁农业科学, 2025(2): 1-6.
- [14] 谢国生, 朱伯华, 彭旭辉, 等. 水稻苗期对不同pH值下NaCl和NaHCO<sub>3</sub>胁迫响应的比较. 华中农业大学学报, 2005, 24(2): 121-124.
- [15] 路旭平, 李芳兰, 石亚飞, 等. 不同水稻品种幼苗响应碱胁迫的生理差异及胁迫等级构建. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1757-1768.
- [16] 孙兴容, 卞景阳, 刘琳帅, 等. 碱胁迫对寒地粳稻芽期生长的影响及评价. 黑龙江农业科学, 2021(8): 16-23.
- [17] 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): 226-230.
- [18] 王志欣, 邹德堂, 刘华龙, 等. 东北粳稻芽期耐盐碱性差异研究. 黑龙江农业科学, 2012(8): 6-11.
- [19] 李红宇, 李逸, 司洋, 等. 北方粳稻耐盐碱相关性状主成分分析及综合评价. 核农学报, 2020, 34(8): 1862-1871.
- [20] 耿雷跃, 马小定, 崔迪, 等. 水稻全生育期耐盐鉴定评价方法研究. 植物遗传资源学报, 2019, 20(2): 267-275.
- [21] Zhang H, Liu X L, Zhang R X, et al. Root damage under alkaline stress is associated with reactive oxygen species accumulation in rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 580.
- [22] 杜志强, 张玉先, 田中艳, 等. 寒地粳稻品种芽期耐碱性筛选. 黑龙江农业科学, 2017(2): 6-9.
- [23] 冷春旭, 郑福余, 赵北平, 等. 水稻耐碱性研究进展. 生物技术通报, 2020, 36(11): 103-111.

## Alkali Tolerance of Cold-Region *Japonica* Rice at the Bud Stage

Yu Han<sup>1,2</sup>, Hu Bo<sup>1,2</sup>, Cao Zhengnan<sup>1,2</sup>, Zhao Zhendong<sup>1,2</sup>, Zhao Zeqiang<sup>1,2</sup>,  
Ning Xiaohai<sup>1,2</sup>, Chen Dequan<sup>3</sup>, Guo Yuzhu<sup>3</sup>, Cao Liyong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, Zhejiang, China;

<sup>2</sup>Baoqing Northern Rice Research Center, Baoqing 155600, Heilongjiang, China;

<sup>3</sup>853 Branch, Heilongjiang Beidahuang Agriculture Co., Ltd., Baoqing 155600, Heilongjiang, China)

**Abstract** To screen cold-region *japonica* rice germplasm resources suitable for planting in saline-alkali soil, 61 cold-region *japonica* rice germplasms were treated with 40 mmol/L mixed alkali (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> and NaHCO<sub>3</sub>), and physiological indicators such as germination potential, germination rate, bud length were observed. The single-item alkaline tolerance coefficient was used as the screening criterion, and principal component analysis was applied to calculate the comprehensive score for each variety. The screened varieties were classified using cluster analysis. The results showed that alkali stress inhibited root length and bud length in all varieties. In contrast, in terms of germination rate, some varieties exhibited a promoting effect under alkali stress. Principal component analysis (PCA) revealed that the first four principal components accounted for a cumulative contribution rate of 85.973%, which could effectively cover the core information of the alkali-tolerance indices. Cluster analysis results showed that the 61 materials were divided into five categories. The first category included five highly alkali-tolerant materials, the second category included 38 alkali-tolerant materials, the third category included 13 moderately alkali-tolerant materials, the fourth category included four sensitive materials, and the fifth category included one extremely sensitive material.

**Key words** Alkali stress; *Japonica* rice; Bud stage; Principal component analysis