

· 热带作物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240025



主持人:徐冉、张洪亮

山栏稻耐盐性评价与耐盐指标筛选

渠鹏正,袁潜华

(海南大学 热带农林学院,海口 570228)

摘要: 利用合理的评价指标评估山栏稻种质材料的耐盐程度,筛选耐盐性优良的山栏稻种质,对海南山栏稻的保护与利用具有重要的科学与现实意义。本研究采用盆栽实验对40份山栏稻、3份旱稻和3份水稻在芽期和全生育期进行盐胁迫处理,芽期设置0.6% NaCl溶液处理,全生育期设置 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的盐土处理。通过测定与水稻耐盐性相关的25个生长指标,运用相关性分析、灰色关联分析和综合评价等进行全生育期耐盐性分析并筛选耐盐指标。结果显示,单株产量、剑叶面积、每穗总粒数、结实率和有效穗数在不同材料间差异显著($P<0.05$),且对盐胁迫高度敏感。基于对46份水稻种质材料全生育期生长情况耐盐性的综合评价,可将其分为4类:耐盐性强的9份,在盐胁迫下可完成完整生育期;耐盐性较强的3份,可进入生殖生长阶段但无法形成产量;耐盐性一般的16份,在进入生殖生长前已死亡;耐盐性弱的18份,在受到盐胁迫35 d后全部死亡。利用主成分分析和隶属函数分析得到耐盐性综合度量值(D值),筛选出山栏稻‘WMS02’和旱稻‘黄叶稻’为耐盐性极强材料。通过相关性和灰色关联分析,确定分蘖期倒二叶叶面积和株高为早期耐盐性鉴定的评价指标。

关键词: 旱稻;山栏稻;全生育期;耐盐性;评价指标

中图分类号: S332.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054(2024)05-0531-16

渠鹏正,袁潜华. 山栏稻耐盐性评价与耐盐指标筛选[J]. 热带生物学报, 2024, 15(5):531-546. doi:10.15886/j.cnki.rdswwb.20240025

山栏稻(*Oryza sativa* L.),别名山兰稻,是海南岛的旱稻生态型,被当地黎苗族人民广泛种植在五指山、东方、白沙等地的丘陵与山区地带^[1]。由于山栏稻的众多特殊而优良的农艺性状,如稻谷籽粒大且饱满、米质特异、黏性强等^[2],在作为稻米果腹的同时还可用于酿制素有“海南茅台”之称的山栏米酒,使山栏稻成为海南特色产业的重要组成部分,在海南生态农业和可持续农业实践中展现出巨大潜力^[3],因此筛选并研究优质的山栏稻种质对海南农业绿色发展具有重要意义。

山栏稻在生产过程中表现出耐贫耐瘠、需水量小的特点^[4-5],其抗旱性已有众多研究。刘维俊等^[6]测定干旱胁迫下山栏稻与栽培水稻在苗期的株高等表观表现与脯氨酸含量等生理生化指标中发现,山栏稻在苗期干旱胁迫下比栽培水稻表现

出更优异的表型性状和更强的抗旱性;徐建欣等^[7]在对22个山栏稻品种进行全生育期干旱胁迫研究中发现,抗旱性高、中等级的山栏稻品种在各生育时期占群体总量的80%以上,这表明山栏稻中蕴含大量抗旱遗传资源;唐力琼等^[8]在对20个山栏稻品种进行PEG模拟干旱胁迫研究中发现,其中一半以上的山栏稻品种具有中抗以上的抗旱性;刘欣欣等^[9]通过对山栏稻的*ShuHKT2*基因进行克隆并对其编码的蛋白进行预测,推测该基因的表达能有效调节 K^+ 和 Na^+ 的运输,提高植物体内的 K^+ 与 Na^+ 的比率,从而增强植物对干旱胁迫的抗性;翟楠鑫等^[10]利用转录组测序技术研究山栏稻品种‘白沙糯’在模拟干旱胁迫前后的差异,发现以*Znf*家族转录因子为主的多个抗旱转录因子在干旱后显著上调;牛晓玲等^[11]对2个山栏稻品种干旱胁迫

收稿日期: 2024-04-18

修回日期: 2024-05-21

基金项目: 海南省重点研发项目(ZDYF2022XDNY182);海南省重大科技计划(ZDKJ202002-03)

第一作者: 渠鹏正(1997-),男,海南大学热带作物学院2019级硕士研究生。E-mail:q1326275281@sina.com

通信作者: 袁潜华(1963-),男,硕士,研究员。研究方向:作物遗传育种与栽培。E-mail:qhyuan@163.com

前后的转录组数据进行基因表达分析,发现山栏稻品种‘东方满坡香’主要通过改善干旱胁迫下光合作用相关途径的基因表达和提高抗氧化活性,而山栏稻‘白沙糯’则通过增减植物激素、增加角蛋白抗性和调节渗透压来抵御干旱;此研究结果证明山栏稻具有多种抗旱机制,表明山栏稻群体中拥有大量的强抗旱性种质资源。

在对作物抗旱性的研究过程中,多有报道作物具有良好抗旱性的同时,往往具有较好的耐盐性。周政等^[12]通过高产抗旱和耐盐导入系的聚合分析,培育并筛选出具有极端抗旱性和耐盐性的个体,进一步研究表明水稻抗旱和耐盐在遗传上存在一定程度的重叠;张伟伟^[13]将抗逆转录因子基因 *HhERF* 转入百脉根(*Lotus corniculatus* L.),发现其抗旱性与耐盐性均显著提高;王英等^[14]对 46 个水稻回交导入群体进行耐盐和抗旱筛选,发现其中 13 个群体均表现出较强的耐盐性与抗旱性。这些研究结果说明通过筛选具有较好耐旱性的山栏稻种质去挖掘优良耐盐种质是可行的。

为了能通过种植耐盐作物来改良滩涂土壤质量,并可同时获得一定的经济收益,水稻被认为是实现沿海滩涂和盐碱地改良的首选粮食作物^[15],因此筛选耐盐性水稻一直是育种家们的重要目标。评价作物的耐盐性是筛选耐盐作物品种的主要基础工作,确定有效的作物前期评价指标有利于提高耐盐品种的筛选效率。吕学莲等^[16]通过测定水稻芽期的发芽率、芽的生长情况与苗期的相对死叶率,筛选出耐盐性强的水稻品种‘长白 10 号’,同时发现同一品种在芽期与苗期的耐盐性表现不一;陶维旭等^[17]调查 51 份水稻品种在成熟期盐胁迫下的各项农艺性状,通过回归分析,筛选出 4 份耐盐性极强的水稻种质;张则宇等^[18]通过计算 59 份品种苜蓿株高、叶面积等表型指标的耐盐系数,鉴定苜蓿品种耐盐性,筛选出耐盐性极强的苜蓿品种‘美 11’。以上案例说明,通过针对不同生育时期适宜的表型指标开展大量的种质耐盐性鉴定,可更直观地、有效地筛选耐盐性种质资源。

水稻及其他作物耐盐性研究方面已经取得进展,但抗旱性较强的山栏稻在耐盐性方面的研究还有待深入展开,而全面评价山栏稻的耐盐性,并筛选出关键的耐盐指标,不仅将增进对水稻耐盐性的理解,而且能为耐盐水稻品种筛选和育种提

供快速有效的鉴定评价方法。本研究通过在盐胁迫条件下山栏稻全生育期的表型指标与农艺性状的调查统计,对山栏稻的耐盐性进行评价,同时优化山栏稻耐盐性的评价指标,筛选耐盐性较强的优良山栏稻品种,为早期筛选和评价水稻耐盐性提供参考,加速耐盐水稻品种的选育进程。

1 材料与方法

1.1 实验材料 供试的 40 份山栏稻种质:昌山麻糯、满坡香、文 37-2、紫糯、基东长粒早、昌江团红糯、直小长团、耐旱白沙、满坡紫、白沙早粳、长毛谷 10、海尾长大红、WMS02、C36-13、白沙糯、海尾团红、黑米白沙、白沙黑紫、满坡香红 29、白沙山团、半紫山栏、白沙花壳、白沙白糯、白沙早糯、湾岭 1 号、湾岭 2 号、湾岭 3 号、湾岭 4 号、湾岭 5 号、湾岭 6 号、湾岭 7 号、湾岭 8 号、琼中 15 白、SL1808、白沙黑紫 2、山川 24、南坤糯山栏、满坡紫 130、黑米白沙 2、粘稻白沙;3 份普通早稻品种:9311 早 B、海云 99、黄叶稻;3 份栽培稻品种:日本晴、9311、锦 214。以上种质材料均由海南大学生物多样性与水稻种质创新实验室收集、保存。

1.2 实验方法

1.2.1 山栏稻萌发期与全生育期的盐胁迫处理 选取完整饱满的山栏稻籽粒,用 75% 酒精浸渍消毒 10 min 后,用去离子水冲洗干净晾干备用;山栏稻萌发期的盐胁迫处理为每个品种分别设 0.6%NaCl 溶液(S)和自来水(CK)2 个处理,每个处理 3 次重复,1 个培养皿(150 mm 玻璃培养皿)为 1 次重复,每个培养皿经高温灭菌并在底部平铺无菌双层滤纸。选取 30 粒大小一致的山栏稻种子均匀放置在培养皿中,每日定时更换培养皿内溶液,使得皿内溶液含盐量保持相对稳定的水平,直至末次计数日。另取各品种山栏稻种子用于全生育期的盐胁迫实验,将洗净的山栏稻种子装入无菌的浸种袋中,于 30 °C 恒温培养箱中浸种 2 d,其间换水 6 次,即每 8 h 换水 1 次,之后用湿布包裹放于 35 °C 恒温培养箱中催芽 8 h,待种子露白后,于海南大学农学院基地进行幼苗培育。取基地的风干田园土(容重 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$) 7.5 kg 装入试验桶(内径 30 cm,桶高 35 cm,无下渗)中,每桶施 4 g 缓效肥作为基肥。2021 年 8 月在基地防雨大棚内进行盆栽实验,选取长势均匀的三叶一心期的壮苗,移栽到

试验桶(3棵·桶)中,每份水稻种质各6桶,共276桶。移栽7d后进行处理,按照土壤含盐量计算(土壤含盐量=烘干NaCl的质量/风干土壤质量),每份种质各3桶按照 $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 添加30g烘干的氯化钠作盐胁迫处理组(S),其余作为盐胁迫对照组(CK)。实验期间每桶保持2cm水层,插入相同刻度的标尺测定其水位,根据缺水情况,每桶补水至相同刻度。使用土壤含盐量测试仪监测桶内电导率与土壤含盐量(电导率 $8\,914\,\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, Na^{+} 浓度0.40%),以保证在山栏稻整个生育期桶内土壤含盐量长期保持相对稳定,在盐胁迫处理7d后开始相关指标的测定。

1.2.2 测定指标与方法 山栏稻萌发期的盐胁迫实验每日统计各培养皿中发芽种子个数,发芽以根长达种子长度为准。根据每日记录的发芽种子数(number of germination seeds),分别计算发芽率(germination rate)、发芽势(germination potential)、发芽指数(germination index)、萌发指数(germination index),同时培养至第8d后进行芽长(shoot length)、种根长(seminal root length)的测定^[19]。山栏稻全生育期的盐胁迫实验在山栏稻分蘖期每7d调查分蘖期株高(plant height at tillering stage)、分蘖数(tiller number)、倒二叶面积(penultimate leaf area)与盐害等级(salt injury score),直至分蘖期结束;在成熟期前调查各品种各处理的始穗日数(heading days, HD);成熟后测定单株株高(plant height, PH)、剑叶面积(flag leaf area, FLA)、穗长(panicle length, PL)、根长(root length, RL),同时洗根取整株测定地下生物量(belowground biomass, BB)、地上部生物量(above-ground biomass, AB)、根系含水率(root water content, RWC)与茎体含水率(stem water content, SWC)并调查包括千粒重(thousand grain weight, TGW)、结实率(seed setting rate, SSR)、每穗总粒数(spikelet number per panicle, SNP)、有效穗数(effective panicle numbers per plant, EPNP)与单株产量(grain yield, GY)^[20-21]。主要测定性状与统计方法见表1、表2、图1、表3。

1.3 数据处理 用Microsoft Excel 2020对原始数据进行简单处理,SPSS 25.0进行方差分析、变异系数计算、主成分分析、相关性分析与灰度关联性分析,计算山栏稻全生育期的盐胁迫下各品种各指

表1 萌发期指标测定与计算

Tab. 1 Measurement and calculation of indexes at the germination stage

萌发期指标 Index	统计方法 Statistic methods
发芽率 Germination rate/%	发芽终期发芽粒数/供试种子数 $\times 100$ Number of final germination grains $\div$ number of test seeds $\times 100$
发芽势 Germination potential/%	第4d正常发芽种子数/供试种子数 $\times 100$ Number of normally germinated seeds at fourth day $\div$ number of test seeds $\times 100$
发芽指数 Germination index	$\Sigma[Gt/Dt]$ (Gt 为第 t 天的发芽数; Dt 为发芽试验的第 t 天) (Gt is the number of sprouts at day t ; Dt is day t of the germination test)
种子萌发指数 Germination index	$1.00 \times nd2 + 0.75 \times nd4 + 0.50 \times nd6 + 0.25 \times nd8$ ($nd2, nd4, nd6, nd8$ 分别为第2、4、6、8天的种子萌发率) ($nd2, nd4, nd6, nd8$ mean germination rate at 2nd, 4th, 6th and 8th days, respectively)
芽长 Shoot length/cm	种芽基部到顶端的距离 The distance from the shoot base to the tip
种根长 Seminal root length/cm	种根基部到顶端的距离 The distance from the seminal root base to the tip

表2 盐害等级划分

Tab. 2 Classification of salt injury score

盐害等级 Salt injury score	盐害症状 Salt injury symptoms	耐盐性 Salt tolerance
1	分蘖生长基本正常,叶片无受害症状 The tiller growth was basically normal, and the leaves had no symptoms of injury	极强 Very strong
3	分蘖生长近正常,但叶尖或上部叶片1/2发白或卷曲;或分蘖生长受抑制,有些叶片卷曲 The tiller growth is nearly normal, but the tip of the leaf or the upper half of leaves are white or curly; or tiller growth is inhibited, and some leaves are curly	强 Strong
5	分蘖生长受到严重抑制,多数叶片卷曲,仅少数叶片伸长 The tiller growth was severely inhibited, with most leaves curling and only a few growing	中 Medium
7	分蘖生长停止,多数叶片干枯 The tiller growth ceased and most leaves dried up	弱 Weak
9	植株死亡或接近死亡 Plants were dead or nearly dead	极弱 Very weak



图1 盐害等级划分

Fig. 1 Classification of salt injury score

表3 主要性状考察方法

Tab. 3 The observation methods for main traits

农艺性状	考察方法
Agronomic traits	Methods of observation
根长 RL/cm	根系基部到最长根的顶端的距离 The distance from the root base to the tip of the longest root
株高 PH/cm	从地面到单株最高穗顶端的高度 The height from the ground to the tip of the highest spike
叶面积 LA/cm ²	平均叶长×平均叶宽×0.75 Mean leaf length × mean leaf width × 0.75
分蘖数 TN	近地面有3张以上完整叶片的分枝 The number of tillers which have more than 3 leaves
单株有效穗数 PP	单株每穗结实超过5粒的穗数 The number of panicles with more than 5 grains per panicle
穗长 PL/cm	有效穗穗颈到穗顶端的平均长度 Average length of effective panicles
地下部生物量 BB/g	地下全部根系的干质量 Dry mass of all underground root systems
地上部生物量 AB/g	地上整株(稻草和稻谷)的干质量 Dry mass of the above-ground whole plant (straw and grain)
根系含水率 RWC/%	(根系鲜质量-根系干质量)/根系鲜质量×100 (Fresh mass of root-dry mass of root)/ fresh mass of root ×100
茎体含水率 SWC/%	(茎体鲜质量-茎体干质量)/茎体鲜质量×100 (Fresh mass of stem-dry mass of stem)/ fresh mass of stem ×100
结实率 SSR/%	单株实粒数/单株总粒数×100 Number of filled grain /total number of grain ×100
单株产量 GY/g	单株的稻谷干质量 Dry mass of grain from a single plant

标耐盐系数,运用隶属函数法和主成分赋予权重法求出耐盐性综合度量值(D)进行耐盐性排序;利用相关性分析与灰度关联性分析进行耐盐性表型鉴定指标筛选,通过回归分析进行还原验证。

①耐盐系数:根据测量得到的原始数据,分别计算各指标对照(CK)和胁迫(S)测量的平均值,用公式(1)计算单项耐盐系数(salt resistance coefficient, SC)。

单项耐盐系数(SE)= $\frac{\text{S测量平均值}}{\text{CK测量平均值}}$, (1)

②权重:用公式(2)得到各个综合指标的权重(weighted value, W_i)。

$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$, (2)

式中, P_i 为各综合指标的方差百分比, n 为综合指标数量。

③隶属函数值:用公式(3)计算每份品种各综合指标的隶属函数值(subordinative function) $\mu(X_{ij})$ 。

$\mu(X_{ij}) = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$, (3)

式中, X_{ij} 表示第 j 个材料第 i 项综合指标值(comprehensive index); $X_{\min}$, $X_{\max}$ 分别代表所有参试材料的第 i 项综合指标的最小值和最大值。

④耐盐性综合度量值:用公式(4)计算每份品种的隶属函数值耐盐性度量值 D 值(D value)。

$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_{ij}) \times W_i]$, (4)

式中, X_{ij} 表示第 j 个材料第 i 项综合指标值(comprehensive index); W_i 为各个综合指标的权重。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫处理下不同水稻种质分蘖期的盐害等级 从处理第 7 d 开始,调查显示各品种的盐害等级逐渐上升,这反映了随着处理时间增长,植株生长遭受的抑制程度加剧。经过 35 d 的处理后,包括粘稻白沙、湾岭 6 号、白沙白糯、满坡香红 29、湾岭 8 号、湾岭 5 号、湾岭 7 号、日本晴、湾岭 1 号、湾岭 3 号、满坡紫 130、半紫山栏、湾岭 2 号、海尾长大红、9311 早 B、基东长粒早、昌江团红糯、海尾团红在内的 18 个品种完全枯萎死亡(盐害等级超过 8)。WMS02 和黄叶稻的耐盐表现较好,平均盐害等级分别是 1.75 和 3.89(表 4)。

表 4 品种盐害等级
Tab. 4 The salt injury score of each variety

品种 Varieties	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
WMS02	1.44 ± 0.88	1.89 ± 1.05	1.22 ± 0.67	1.44 ± 0.88	1.75 ± 1.04
黑米白沙 2 Heimibaisha2	3.89 ± 1.76	2.56 ± 0.88	3.22 ± 1.20	3.67 ± 1.00	3.89 ± 1.05
黄叶稻 Huangyedao	3.25 ± 0.71	3.50 ± 2.26	3.22 ± 2.54	4.33 ± 2.00	3.89 ± 2.26
文 37-2 Wen37-2	2.11 ± 1.05	3.00 ± 1.73	2.56 ± 1.33	3.89 ± 2.26	4.56 ± 1.94
SL1808	3.44 ± 0.88	3.44 ± 1.33	3.22 ± 1.20	3.89 ± 2.26	4.56 ± 1.94
锦 214 Jing214	4.11 ± 2.03	4.50 ± 3.16	5.00 ± 2.65	5.67 ± 2.24	4.56 ± 2.79
满坡香 Manpoxiang	1.67 ± 1.00	2.78 ± 1.56	3.67 ± 1.41	4.33 ± 1.41	4.78 ± 1.20
耐旱白沙 Naihanbaisha	2.56 ± 2.60	3.00 ± 2.45	3.67 ± 2.45	4.11 ± 2.03	5.00 ± 2.00
长毛谷 10 Changmaogu10	4.11 ± 1.76	3.50 ± 2.26	4.33 ± 2.65	4.56 ± 2.40	5.44 ± 2.79
山川 24 Shanchuan24	4.33 ± 1.41	4.11 ± 1.45	4.56 ± 1.94	4.56 ± 1.33	5.44 ± 1.33
白沙旱粳 Baishahangeng	3.00 ± 2.24	3.63 ± 3.07	5.44 ± 3.13	5.67 ± 2.83	5.67 ± 2.83
白沙花壳 Baishahuake	3.00 ± 1.41	2.78 ± 1.56	4.11 ± 2.03	4.78 ± 2.33	5.89 ± 3.02
C36-13	3.67 ± 1.41	3.89 ± 1.45	4.33 ± 2.24	5.67 ± 2.24	6.11 ± 2.03
黑米白沙 Heimibaisha	3.22 ± 1.56	3.00 ± 2.45	3.67 ± 2.24	4.56 ± 2.19	6.11 ± 1.76
9311	5.00 ± 2.24	3.75 ± 3.16	5.22 ± 2.54	5.67 ± 2.45	6.11 ± 2.85
白沙山团 Baishashantuan	2.11 ± 1.76	2.56 ± 1.67	3.44 ± 1.33	5.00 ± 2.00	6.33 ± 1.73
琼中 15 白 Qiongzong15Bai	4.56 ± 1.67	3.86 ± 2.45	5.89 ± 2.67	6.33 ± 2.83	6.33 ± 2.83
紫糯 Zinuo	1.89 ± 1.05	3.22 ± 1.56	3.44 ± 1.33	4.11 ± 1.45	6.56 ± 1.67
昌山麻糯 Changshanmanuo	5.44 ± 2.19	4.33 ± 2.47	5.67 ± 2.65	6.33 ± 2.45	6.78 ± 2.54
海云 99 Haiyun99	2.78 ± 2.54	3.29 ± 2.79	4.33 ± 2.65	6.33 ± 2.00	7.00 ± 1.41
白沙糯 Baishanuo	4.33 ± 2.83	4.67 ± 2.67	7.00 ± 2.65	7.67 ± 2.24	7.22 ± 2.91
白沙黑紫 2 Baishaheizi	3.22 ± 0.67	3.44 ± 1.33	3.67 ± 1.00	3.67 ± 1.73	7.22 ± 2.73
直小长团 Zhixiaochangtuan	4.33 ± 2.45	5.22 ± 2.11	6.56 ± 1.67	7.00 ± 1.73	7.44 ± 1.94

续表4 Tab. 4 Continued

品种 Varieties	7 d	14 d	21 d	28 d	35 d
满坡紫 Manpozi	2.11 ± 1.45	4.50 ± 2.24	5.00 ± 2.83	6.33 ± 2.45	7.67 ± 1.73
白沙黑紫 Baishaheizi	6.11 ± 1.45	5.50 ± 1.76	5.67 ± 2.00	6.56 ± 1.94	7.67 ± 2.24
白沙早糯 Baishahannuo	3.00 ± 1.73	4.13 ± 2.35	6.33 ± 2.24	8.11 ± 1.45	7.67 ± 2.24
南坤糯山栏 Nankunnuoshanlan	4.67 ± 2.34	4.20 ± 3.00	6.78 ± 2.91	7.44 ± 2.40	7.67 ± 2.24
湾岭4号 Wanling4	4.56 ± 2.60	3.25 ± 2.03	5.00 ± 2.45	6.78 ± 2.11	7.89 ± 1.05
白沙白糯 Baishabainuo	3.67 ± 1.00	4.25 ± 2.11	6.78 ± 1.56	7.89 ± 1.45	8.11 ± 1.76
湾岭6号 Wanling6	5.67 ± 2.65	4.33 ± 2.67	6.56 ± 2.79	7.22 ± 2.73	8.11 ± 2.03
粘稻白沙 Zhandaobaisha	3.89 ± 1.45	5.22 ± 1.86	5.44 ± 1.94	6.56 ± 2.96	8.11 ± 1.45
满坡香红29 Manpoxianghong29	4.33 ± 1.73	4.50 ± 2.65	6.56 ± 2.19	7.44 ± 1.33	8.33 ± 1.41
湾岭5号 Wanling5	4.56 ± 1.67	5.80 ± 2.11	6.11 ± 2.47	7.67 ± 2.00	8.56 ± 1.33
湾岭7号 Wanling7	5.22 ± 1.86	4.43 ± 2.60	6.11 ± 3.02	7.44 ± 1.94	8.56 ± 0.88
湾岭8号 Wanling8	4.33 ± 2.00	2.75 ± 2.40	4.78 ± 2.11	5.89 ± 2.85	8.56 ± 1.33
日本晴 Nipponbare	4.56 ± 1.33	5.50 ± 2.47	6.56 ± 2.40	7.67 ± 2.24	8.56 ± 0.88
湾岭1号 Wanling1	5.00 ± 1.33	5.89 ± 1.63	6.11 ± 1.68	8.11 ± 0.99	8.78 ± 0.40
湾岭2号 Wanling2	7.44 ± 1.94	5.40 ± 2.65	7.89 ± 2.03	8.56 ± 1.33	8.78 ± 0.67
湾岭3号 Wanling3	4.56 ± 1.33	5.29 ± 2.26	6.56 ± 2.60	7.44 ± 2.19	8.78 ± 0.67
半紫山栏 Banzishanlan	6.11 ± 1.43	7.22 ± 1.58	7.67 ± 1.48	8.33 ± 1.04	8.78 ± 0.40
满坡紫130 Manpozi130	4.78 ± 1.56	5.29 ± 2.03	7.44 ± 1.67	7.89 ± 2.26	8.78 ± 0.67
9311 旱B 9311Hanb	3.75 ± 1.04	4.67 ± 2.47	8.11 ± 1.05	8.78 ± 0.00	9.00 ± 0.00
基东长粒旱 Jidongchanglihan	5.89 ± 2.47	6.43 ± 2.00	8.33 ± 1.00	8.78 ± 0.67	9.00 ± 0.00
昌江团红糯 Changjiangtuanhongnuo	4.78 ± 2.11	5.86 ± 1.67	8.33 ± 1.41	9.00 ± 0.00	9.00 ± 0.00
海尾长大红 Haiweichengdahong	3.89 ± 1.45	6.11 ± 1.76	7.89 ± 1.45	8.56 ± 0.88	9.00 ± 0.00
海尾团红 Haiweituanhong	4.33 ± 1.73	6.00 ± 1.73	8.33 ± 1.00	8.78 ± 0.67	9.00 ± 0.00

2.2 盐胁迫处理下不同水稻种质的始穗日数 随着盐胁迫时间增长,多数品种在达到抽穗阶段前已枯萎死亡。只有昌山麻糯、耐旱白沙、C36-13、黄叶稻、紫糯、WMS02、SL1808、白沙黑紫2、黑米白沙2、白沙花壳、山川24、黑米白沙共12个品种能够正常抽穗。其中,5个偏粳型品种(昌山麻糯、耐旱白沙、C36-13、黄叶稻)在盐胁迫下抽穗提前,大部分偏粳型品种则抽穗延迟(表5)。

表5 各品种始穗日变化
Tab. 5 The duration between sowing date and first heading date of each variety

品种 Varieties	播-始日数 The number of days from sowing date to first heading date days/d		延迟日数 Days of delay/d
	对照 CK	盐处理 S	
昌山麻糯 Changshanmanuo	68	59	-9
耐旱白沙 Naihanbaisha	64	58	-6
C36-13	68	63	-5
黄叶稻 Huangyedao	64	59	-5
紫糯 Zinuo	68	64	-4
WMS02	62	60	-2
SL1808	68	70	2
白沙黑紫 2 Baishaheizi2	56	59	3
黑米白沙 2 Heimibaisha2	64	67	3
白沙花壳 Baishahuake	61	66	5
山川 24 Shanchuan24	64	70	6
黑米白沙 Heimibaisha	66	76	10

2.3 盐胁迫处理下成熟期水稻各指标分析 在全生育期盐胁迫处理下,9个品种(紫糯、SL1808、WMS02、白沙黑紫2、白沙花壳、昌山麻糯、黄叶稻、耐旱白沙、山川24)成功完成生育周期并获得产量。采用配对样本T检验分析这9个品种的指标值平均数,以评估差异的显著性(表6)。在4 g·kg⁻¹盐土全生育期胁迫下,除了根冠比和根系含水率外,盐胁迫对其他指标影响显著或极显著。所有指标的变异系数,无论是对照组还是胁迫组,其范围均在0.08~1.50。耐盐系数SC值的变异系数大小顺序:单株产量>剑叶面积>每穗总粒数>结实率>有效穗数>0.5>茎体含水率>地下部生物量>根长>根冠比>千粒重>穗长>株高>地上部生物量>根

系含水率,以单株产量变异系数最大,根系含水率变异系数最小,根冠比变异系数次之,说明9份种质材料在盐胁迫下除根系含水率与根冠比指标外,其余指标均存在较大差异。根冠比的耐盐系数(SC)>1,地上部生物量、根系含水率的SC值接近1,其余指标SC值均<1,表明盐胁迫对不同指标的影响程度不同。盐胁迫对茎干质量和根系含水率影响较小,但对产量、叶面积和株高造成显著抑制。

2.4 水稻种质耐盐性鉴定

2.4.1 成熟期各指标的相关性分析 各指标耐盐系数的相关性分析结果(表7)表明,多个指标间均呈显著相关($P < 0.05$)或极显著相关($P < 0.01$),

表 6 全生育期下水稻各指标测定值与差异分析

Tab. 6 The values of agronomic traits and their differences at the whole growth stage of rice

指标 Index	对照 CK			处理 S			耐盐系数 SC			T 检验 T Tests
	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV	
千粒重 TGW/g	20.72	5.14	0.25	16.22	5.11	0.31	0.79	0.18	0.22	3.228**
结实率 SSR	0.68	0.10	0.15	0.42	0.23	0.54	0.61	0.31	0.50	5.402**
每穗总粒数 SNP	80.29	33.31	0.41	49.33	33.45	0.68	0.60	0.32	0.54	3.408**
有效穗数 EPNP	3.44	0.89	0.26	2.11	0.93	0.44	0.64	0.32	0.50	5.367**
单株产量 GY/g	3.75	1.74	0.46	1.00	1.50	1.50	0.26	0.31	1.21	6.217**
株高 PH/cm	125.11	25.91	0.21	97.56	23.34	0.24	0.79	0.16	0.20	4.105**
穗长 PL/cm	23.49	3.22	0.14	18.38	3.61	0.20	0.79	0.16	0.21	5.489**
根长 RL/cm	28.18	5.23	0.19	21.86	7.05	0.32	0.78	0.20	0.25	3.740**
剑叶面积 FLA/cm ²	36.48	13.54	0.37	18.86	9.86	0.52	0.60	0.39	0.65	5.467**
地下部生物量 BB/g	6.02	1.32	0.22	4.98	1.01	0.20	0.86	0.22	0.26	3.254**
地上部生物量 AB/g	24.61	2.72	0.11	22.70	3.50	0.15	0.93	0.19	0.20	2.244*
根冠比 RSR	0.19	0.04	0.19	0.19	0.04	0.24	1.01	0.25	0.25	0.163
根系含水率 RWC/%	69.16	5.87	0.08	65.35	8.97	0.14	94.62	12.08	0.13	1.844
茎体含水率 SWC/%	50.41	7.37	0.15	35.76	10.04	0.28	72.10	23.38	0.32	6.113**

注：*表示差异显著($P < 0.05$)；**表示差异极显著($P < 0.01$)。
Note: * indicate significant difference at $P < 0.05$; **indicate significant difference at $P < 0.01$.

表 7 各指标耐盐系数间的相关性分析结果

Tab. 7 Correlation analysis between the salt tolerance coefficients of each index

指标 Index	各指标耐盐系数间的相关系数 The correlation coefficient among the salt tolerance coefficients														
	千粒重 TGW	结实率 SSR	每穗 总粒数 SNP	有效 穗数 EPNP	单株 产量 GY	株高 PH	穗长 PL	根长 RL	剑叶 面积 FLA	地下 生物量 BB	地上 生物量 DB	根冠比 RSR	根系 含水率 RWC	茎体 含水率 SWC	
千粒重 TGW	1														
结实率 SSR	0.465*	1													
每穗 总粒数 SNP	0.315	0.513**	1												
有效 穗数 EPNP	0.365	0.244	0.014	1											
单株 产量GY	0.579**	0.734**	0.698**	0.523**	1										
株高PH	0.243	0.422*	0.300	0.263	0.668**	1									
穗长PL	0.499**	0.528**	0.559**	0.463*	0.779**	0.616**	1								
根长RL	0.376	0.529**	0.417*	0.508**	0.750**	0.683**	0.749**	1							
剑叶面积 FLA	0.486*	0.235	0.340	0.345	0.622**	0.689**	0.673**	0.676**	1						
地下部 生物量 BB	0.216	0.089	0.357	0.599**	0.510**	0.128	0.222	0.255	0.089	1					
地上部 生物量 DB	0.460*	0.276	0.406*	0.589**	0.727**	0.610**	0.649**	0.668**	0.626**	0.614**	1				
根冠比 RSR	-0.202	-0.224	-0.033	0.081	-0.213	-0.561**	-0.446*	-0.387*	-0.600**	0.542**	-0.287	1			
根系 含水率 RWC	0.522**	0.507**	0.297	0.537**	0.613**	0.216	0.359	0.269	0.246	0.521**	0.430*	0.182	1		
茎体 含水率 SWC	0.389*	0.443*	0.238	0.343	0.598**	0.533**	0.336	0.266	0.398*	0.444*	0.446*	-0.045	0.591**	1	

注：*表示显著相关($P < 0.05$)；**表示极显著相关($P < 0.01$)。
Note: * represents a significant correlation at $P < 0.05$; ** represents a highly significant correlation at $P < 0.01$.

证明这些指标所提供的各品种耐盐性强弱的信息发生重叠,即不同指标多次重复评价水稻种质耐盐性。因此直接利用这些指标无法准确地评价山栏稻各品种耐盐性的强弱,应通过对各指标的数据进行降维处理,从而更好地鉴定各品种的耐盐性。

2.4.2 各指标耐盐系数的主成分分析 通过对 14 个耐盐系数指标^[19-21]的主成分分析和数据降维^[17-18],获得各综合指标及其贡献率(表 8)。前 5 个综合指标的累计贡献率为 86.41%,这表明它们

几乎覆盖了 14 个指标的大部分信息。在第 1 综合指标(PC1)中,单株产量、穗长、地上部生物量与根长的综合指标系数分别为 0.96、0.84、0.82、0.81;在第 2 综合指标(PC2)中,根冠比的综合指标系数为 0.88;在第 3 综合指标(PC3)中,结实率的综合指标系数为 0.60;在第 4 综合指标(PC4)中,每穗总粒数的综合指标系数为 0.55;在第 5 综合指标(PC5)中,茎体含水率的综合指标系数为 0.53。在综合指标中综合指标系数越大,说明该指标在该综合指标中贡献越高,对该综合指标更具有代表性。

表 8 各性状因子载荷及其贡献率
Tab. 8 The factor loading and contribution rate of each trait

性状 Trait	因子载荷 The factor loading				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
千粒重 TGW	0.64	0.07	0.18	-0.35	-0.44
结实率 SSR	0.66	-0.02	0.60	-0.14	-0.06
每穗总粒数 SNP	0.59	0.05	0.51	0.55	0.06
有效穗数 EPNP	0.60	0.40	-0.48	-0.12	-0.30
单株产量 GY	0.96	0.08	0.18	0.10	0.04
株高 PH	0.74	-0.39	-0.15	-0.04	0.42
穗长 PL	0.84	-0.24	0.02	0.17	-0.19
根长 RL	0.81	-0.24	-0.15	0.22	-0.13
剑叶面积 FLA	0.74	-0.42	-0.25	-0.06	0.01
地下部生物量 BB	0.48	0.77	-0.25	0.27	0.13
地上部生物量 DB	0.82	0.06	-0.37	0.16	0.03
根冠比 RSR	-0.33	0.88	0.07	0.19	0.02
根系含水率 RWC	0.62	0.53	0.17	-0.36	-0.06
茎体含水率 SWC	0.63	0.26	0.07	-0.42	0.53
贡献率 Contribution rate/%	29.20	17.57	14.55	14.26	10.83
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	29.20	46.77	61.32	75.58	86.41
权重 Weighted value	0.34	0.20	0.17	0.17	0.13

2.4.3 各水稻种质耐盐性综合度量值 通过综合指标系数和隶属函数值计算,结合权重得到各品种的耐盐性综合度量值(D 值)并进行排序(表 9)。耐盐性从强到弱排序依次为 WMS02、黄叶稻、白沙黑紫 2、昌山麻糯、SL1808、白沙花壳、山川 24、耐早白沙和紫糯。

2.4.4 各水稻种质的耐盐性强弱 根据实验结果分析,笔者将各水稻种质按其耐盐性强弱分为 4 类:1 类,耐盐性弱,这些种质在盐胁迫 35 d 后基本枯萎死亡,共 18 份种质:粘稻白沙、湾岭 6 号、白沙白糯、满坡香红 29、湾岭 8 号、湾岭 5 号、湾岭 7 号、日本晴、湾岭 1 号、湾岭 3 号、满坡紫 130、半紫

山栏、湾岭 2 号、海尾长大红、9311 早 B、基东长粒旱、昌江团红糯、海尾团红。2 类,耐盐性较弱,这些种质在盐胁迫下能正常进行营养生长却无法进入生殖生长,共 16 份种质:满坡香、9311、白沙旱粳、白沙黑紫、白沙糯、白沙山团、白沙早糯、海云 99、锦 214、满坡紫、南坤糯山栏、琼中 15 白、湾岭 4 号、文 37-2、长毛谷 10、直小长团。3 类,耐盐性较强,这些种质在盐胁迫下虽然进入了生殖生长却无法完成完整生育期从而收获产量,共 3 份种质:C36-13、黑米白沙、黑米白沙 2。4 类,耐盐性强,这些种质在盐胁迫下完成了完整的生育期,同时收获了产量,共 9 份种质:紫糯、SL1808、WMS02、白沙

表9 各品种 CIV、SFV、D 值及排序

Tab. 9 The comprehensive index value, subordinate function value, salt tolerance measurement D value and rank

品种 Varieties	综合指标值 Comprehensive index					隶属函数值 Subordinate function					D 值 D value	排序 Rank
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	μ1	μ2	μ3	μ4	μ5		
白沙黑紫 2 Baishaheizi2	0.043	-0.005	-0.274	0.874	-0.314	0.522	0.402	0.313	0.938	0.155	0.485	3
白沙花壳 Baishahuake	-0.520	0.475	-1.052	-0.839	0.769	0.351	0.582	0.000	0.000	0.850	0.343	6
昌山麻糯 Changshanmanuo	-1.684	1.594	0.581	0.403	-0.507	0.000	1.000	0.657	0.680	0.031	0.430	4
黄叶稻 Huangyedao	0.851	-0.296	1.433	0.283	-0.399	0.766	0.293	1.000	0.614	0.100	0.601	2
耐旱白沙 Naihanbaisha	-0.483	-0.594	0.274	-0.668	0.235	0.363	0.182	0.533	0.093	0.507	0.328	8
山川 24 Shanchuan24	0.364	-0.953	-0.698	-0.005	-0.416	0.618	0.048	0.142	0.456	0.089	0.329	7
紫糯 Zinuo	-0.273	-1.080	0.166	-0.304	-0.555	0.426	0.000	0.490	0.293	0.000	0.275	9
SL1808	0.074	-0.185	-0.456	-0.732	0.184	0.531	0.335	0.240	0.058	0.475	0.357	5
WMS02	1.627	1.044	0.027	0.988	1.003	1.000	0.794	0.434	1.000	1.000	0.863	1

黑紫 2、白沙花壳、昌山麻糯、黄叶稻、耐旱白沙、山川 24, 其中 WMS02 与黄叶稻在多个指标上表现出极强的耐盐性。

2.5 耐盐性评价指标的筛选与回归分析 D 值与其对应的芽期与分蘖期各指标耐盐系数(表 10)的相关性分析结果(表 11)表明,分蘖期株高和分蘖期倒二叶面积与 D 值呈极显著相关($P < 0.01$)。在灰色关联度分析中,关联度越大,则表示该因子的作用越大。将 D 值作为参考数列,9 个指标的耐盐系数作为比较数列进行灰色关联分析。各指标与 D 值的关联度大小顺序为:分蘖期倒二叶面积>分

蘖期株高>芽长>发芽率>发芽指数>种子萌发指数>种根长>分蘖期分蘖数>发芽势。把 D 值作因变量,与倒二叶面积耐盐系数作自变量,通过逐步回归分析建立的最优回归方程:

$$y = -0.367 + 0.751X_1 + 0.215X_2$$

式中,y 代表回归 $\hat{D}$ 值($\hat{D}$ value), X_1 代表分蘖期株高, X_2 代表倒二叶面积,方程决定系数 $R^2 = 0.996$,方程经检验达显著水平。

根据回归方程计算分蘖期仍存活的各水稻种质 $\hat{D}$ 值(表 12), $\hat{D}$ 值的排名与各水稻种质耐盐性评价结果基本一致。

表 10 盐浓度 0.6% 胁迫处理下水稻种质材料各鉴定指标相对值

Tab. 10 Relative values of each identification index of different accessions of rice germplasm under 0.6 % salt stress

品种名称 Varieties	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index	种子萌发指数 Germination index	种根长/cm Seminal root length	芽长/cm Shoot length
昌山麻糯 Changshanmanuo	0.58 ± 0.12	0.33 ± 0.12	0.44 ± 0.08	0.46 ± 0.16	0.65 ± 0.05	0.29 ± 0.04
9311 旱 B 9311Hanb	0.43 ± 0.19	0.08 ± 0.03	0.26 ± 0.09	0.27 ± 0.17	0.32 ± 0.12	0.29 ± 0.02
满坡香 Manpoxiang	0.75 ± 0.09	0.36 ± 0.09	0.60 ± 0.12	0.59 ± 0.18	0.54 ± 0.13	0.40 ± 0.08
文 37-2 Wen37-2	0.95 ± 0.03	0.11 ± 0.09	0.39 ± 0.14	0.48 ± 0.20	0.69 ± 0.08	0.41 ± 0.08
紫糯 Zinuo	0.94 ± 0.03	0.76 ± 0.17	0.68 ± 0.05	0.79 ± 0.14	0.97 ± 0.05	0.63 ± 0.11
基东长粒旱 Jidongchanglihan	0.61 ± 0.13	0.08 ± 0.13	0.38 ± 0.06	0.37 ± 0.16	0.21 ± 0.01	0.54 ± 0.09

续表 10 Tab.10 Continued

品种名称 Varieties	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index	种子萌发指数 Germination index	种根长/cm Seminal root length	芽长/cm Shoot length
昌江团红糯 Changjiangtuanhongnuo	0.70 ± 0.15	0.18 ± 0.21	0.36 ± 0.05	0.42 ± 0.17	0.32 ± 0.02	0.30 ± 0.09
直小长团 Zhixiaochangtuan	0.96 ± 0.02	0.52 ± 0.05	0.57 ± 0.09	0.65 ± 0.19	0.24 ± 0.05	0.23 ± 0.26
耐旱白沙 Naihanbaisha	0.79 ± 0.18	0.32 ± 0.18	0.46 ± 0.06	0.53 ± 0.15	0.66 ± 0.16	0.23 ± 0.09
满坡紫 Manpozi	0.10 ± 0.01	0.00 ± 0.00	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.16	0.00 ± 0.00	0.54 ± 0.23
白沙旱粳 Baishahangeng	0.11 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.07 ± 0.05	0.09 ± 0.17	0.00 ± 0.00	0.20 ± 0.11
长毛谷 10 Changmaogu10	0.71 ± 0.19	0.17 ± 0.02	0.45 ± 0.09	0.49 ± 0.15	0.35 ± 0.12	0.28 ± 0.36
海尾长大红 Haiweichengdahong	0.75 ± 0.13	0.28 ± 0.13	0.60 ± 0.08	0.6 ± 0.14	0.30 ± 0.02	0.59 ± 0.28
海云 99 Haiyun99	0.10 ± 0.08	0.00 ± 0.00	0.10 ± 0.04	0.1 ± 0.15	0.44 ± 0.00	1.71 ± 0.05
WMS02	0.92 ± 0.01	0.66 ± 0.10	0.70 ± 0.08	0.83 ± 0.15	0.99 ± 0.00	0.49 ± 0.05
C36-13	0.97 ± 0.01	0.49 ± 0.14	0.75 ± 0.12	0.78 ± 0.07	0.42 ± 0.12	0.49 ± 0.19
白沙糯 Baishanuo	0.68 ± 0.21	0.16 ± 0.11	0.38 ± 0.09	0.42 ± 0.17	0.06 ± 0.00	0.31 ± 0.07
海尾团红 Haiweituanhong	0.40 ± 0.13	0.12 ± 0.03	0.32 ± 0.08	0.32 ± 0.16	0.98 ± 0.00	0.62 ± 0.06
黑米白沙 Heimibaisha	0.83 ± 0.19	0.46 ± 0.19	0.72 ± 0.08	0.69 ± 0.16	0.45 ± 0.11	0.44 ± 0.12
白沙黑紫 Baishaheizi	0.75 ± 0.17	0.31 ± 0.17	0.54 ± 0.07	0.58 ± 0.05	0.41 ± 0.09	0.37 ± 0.16
满坡香红 29 Manpoxianghong29	0.60 ± 0.11	0.18 ± 0.11	0.74 ± 0.10	0.99 ± 0.19	0.24 ± 0.04	0.38 ± 0.04
白沙山团 Baishashantuan	0.98 ± 0.01	0.41 ± 0.24	0.77 ± 0.11	0.79 ± 0.18	0.58 ± 0.17	0.46 ± 0.22
半紫山栏 Banzishanlan	0.46 ± 0.19	0.19 ± 0.06	0.35 ± 0.09	0.35 ± 0.18	0.62 ± 0.18	0.29 ± 0.12
白沙花壳 Baishahuake	0.42 ± 0.18	0.14 ± 0.13	0.29 ± 0.05	0.32 ± 0.05	0.42 ± 0.18	0.36 ± 0.09
白沙白糯 Baishabainuo	0.78 ± 0.04	0.13 ± 0.04	0.46 ± 0.10	0.49 ± 0.17	0.22 ± 0.04	0.40 ± 0.14
白沙早糯 Baishahannuo	0.47 ± 0.12	0.07 ± 0.16	0.32 ± 0.06	0.34 ± 0.09	0.49 ± 0.16	0.57 ± 0.14
湾岭 1 号 Wanling1	0.87 ± 0.15	0.57 ± 0.19	0.63 ± 0.06	0.68 ± 0.19	0.27 ± 0.28	0.31 ± 0.16
湾岭 2 号 Wanling2	0.84 ± 0.04	0.40 ± 0.19	0.64 ± 0.02	0.63 ± 0.18	0.57 ± 0.38	0.60 ± 0.12
湾岭 3 号 Wanling3	0.69 ± 0.15	0.41 ± 0.15	0.43 ± 0.07	0.48 ± 0.16	0.99 ± 0.00	0.35 ± 0.09
湾岭 4 号 Wanling4	0.66 ± 0.14	0.51 ± 0.14	0.54 ± 0.07	0.57 ± 0.16	0.99 ± 0.00	0.77 ± 0.11
湾岭 5 号 Wanling5	0.57 ± 0.18	0.24 ± 0.18	0.36 ± 0.04	0.40 ± 0.18	0.85 ± 0.10	0.68 ± 0.23
湾岭 6 号 Wanling6	0.51 ± 0.05	0.19 ± 0.15	0.31 ± 0.06	0.37 ± 0.04	0.17 ± 0.03	0.28 ± 0.04
湾岭 7 号 Wanling7	0.66 ± 0.05	0.73 ± 0.05	0.62 ± 0.06	0.66 ± 0.17	0.87 ± 0.15	0.48 ± 0.08

续表 10 Tab.10 Continued						
品种名称 Varieties	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index	种子萌发指数 Germination index	种根长/cm Seminal root length	芽长/cm Shoot length
湾岭 8 号 Wanling8	0.61 ± 0.23	0.36 ± 0.03	0.51 ± 0.03	0.52 ± 0.17	0.09 ± 0.00	0.71 ± 0.16
琼中 15 白 Qiongzhong15Bai	0.47 ± 0.19	0.19 ± 0.09	0.32 ± 0.04	0.32 ± 0.19	0.31 ± 0.05	0.21 ± 0.08
SL1808	0.97 ± 0.05	0.47 ± 0.17	0.80 ± 0.06	0.84 ± 0.03	0.48 ± 0.06	0.53 ± 0.19
白沙黑紫 2 Baishaheizi2	0.74 ± 0.10	0.23 ± 0.17	0.53 ± 0.03	0.55 ± 0.18	0.49 ± 0.10	0.48 ± 0.15
山川 24 Shanchuan24	0.77 ± 0.08	0.23 ± 0.17	0.53 ± 0.16	0.55 ± 0.18	0.46 ± 0.05	0.32 ± 0.06
锦 214 Jing214	0.45 ± 0.10	0.17 ± 0.03	0.35 ± 0.03	0.36 ± 0.18	0.46 ± 0.17	0.28 ± 0.10
南坤糯山栏 Nankunnuoshanlan	0.64 ± 0.10	0.00 ± 0.00	0.33 ± 0.06	0.38 ± 0.18	0.21 ± 0.06	0.33 ± 0.48
满坡紫 130 Manpozi130	0.85 ± 0.10	0.56 ± 0.07	0.72 ± 0.05	0.76 ± 0.17	0.41 ± 0.17	0.47 ± 0.23
黑米白沙 2 Heimibaisha2	0.57 ± 0.10	0.34 ± 0.17	0.41 ± 0.05	0.46 ± 0.18	0.43 ± 0.02	0.38 ± 0.26
粘稻白沙 Zhandaobaisha	0.99 ± 0.00	0.31 ± 0.08	0.79 ± 0.03	0.76 ± 0.18	0.59 ± 0.08	0.72 ± 0.40
黄叶稻 Huangyedao	0.89 ± 0.10	0.19 ± 0.17	0.59 ± 0.05	0.63 ± 0.18	0.32 ± 0.07	0.24 ± 0.32
日本晴 Nipponbare	0.33 ± 0.06	0.20 ± 0.03	0.26 ± 0.05	0.31 ± 0.02	0.00 ± 0.00	0.81 ± 0.06
9311	0.92 ± 0.10	0.27 ± 0.04	0.50 ± 0.17	0.59 ± 0.02	0.48 ± 0.07	0.98 ± 0.01

表 11 D 值与各指标间的相关系数和关联度

Tab. 11 The correlation coefficient and correlation degree between D value and each index

指标 Index	相关系数 The correlation coefficient	排序 Rank	关联度 The correlation degree	排名 Rank
分蘖期株高 Plant height at the tillering stage	0.905**	2	0.793	2
倒二叶叶面积 Penultimate leaf area	0.956**	1	0.855	1
分蘖期分蘖数 Tiller number at the tillering stage	0.568	3	0.633	8
发芽率 Germination rate	0.202	8	0.699	4
发芽势 Germination potential	0.310	6	0.616	9
发芽指数 Germination index	0.273	7	0.663	5
种子萌发指数 Germination index	0.345	5	0.659	6
芽长 Sprout length	0.417	4	0.763	3
种根长 Seminal root length	0.152	9	0.651	7

注: **表示极显著相关($P < 0.01$)。
Note: ** represents a highly significant correlation at $P < 0.01$.

表 12 分蘖期水稻各指标耐盐系数与 $\hat{D}$ 值Tab. 12 The salt resistance coefficient of indexes and $\hat{D}$ values of rice at tillering stage

品种 Varieties	分蘖期株高 Plant height at the tillering stage	倒二叶面积 Penultimate leaf area	$\hat{D}$ 值 $\hat{D}$ value	排名 Rank
WMS02	0.98 ± 0.08	0.96 ± 0.21	0.58	1
黄叶稻 Huangyedao	0.89 ± 0.07	0.76 ± 0.34	0.46	2
昌山麻糯 Changshanmanuo	0.86 ± 0.10	0.70 ± 0.13	0.43	3
白沙黑紫 2 Baishaheizi2	0.85 ± 0.08	0.71 ± 0.16	0.42	4
耐旱白沙 Naihanbaisha	0.81 ± 0.11	0.74 ± 0.09	0.4	5
山川 24 Shanchuan24	0.83 ± 0.08	0.65 ± 0.16	0.4	6
黑米白沙 Heimibaisha	0.82 ± 0.09	0.67 ± 0.17	0.39	7
紫糯 Zinuo	0.84 ± 0.08	0.60 ± 0.15	0.39	8
9311	0.77 ± 0.18	0.77 ± 0.28	0.38	9
白沙旱粳 Baishahangeng	0.77 ± 0.07	0.70 ± 0.10	0.36	10
SL1808	0.80 ± 0.07	0.59 ± 0.15	0.36	11
琼中 15 白 Qiongzong15Bai	0.75 ± 0.13	0.75 ± 0.19	0.36	12
白沙花壳 Baishahuake	0.80 ± 0.08	0.49 ± 0.19	0.34	13
长毛谷 10 Changmaogu10	0.72 ± 0.07	0.75 ± 0.14	0.33	14
满坡紫 Manpozi	0.76 ± 0.11	0.60 ± 0.30	0.33	15
黑米白沙 2 Heimibaisha2	0.80 ± 0.12	0.42 ± 0.17	0.32	16
C36-13	0.75 ± 0.09	0.59 ± 0.16	0.32	17
直小长团 Zhixiaochangtuan	0.74 ± 0.09	0.60 ± 0.18	0.32	18
海云 99 Haiyun99	0.72 ± 0.07	0.61 ± 0.30	0.30	19
白沙山团 Baishashantuan	0.73 ± 0.05	0.54 ± 0.13	0.30	20
文 37-2 Wen37-2	0.70 ± 0.13	0.63 ± 0.27	0.29	21
满坡香 Manpoxiang	0.72 ± 0.10	0.51 ± 0.33	0.28	22
白沙早糯 Baishahannuo	0.69 ± 0.14	0.56 ± 0.11	0.27	23
锦 214 Jing214	0.70 ± 0.07	0.44 ± 0.07	0.25	24
湾岭 4 号 Wanling4	0.67 ± 0.08	0.43 ± 0.10	0.23	25
南坤糯山栏 Nankunnuoshanlan	0.60 ± 0.18	0.54 ± 0.12	0.20	26
白沙黑紫 Baishaheizi	0.59 ± 0.13	0.42 ± 0.15	0.17	27
白沙糯 Baishanuo	0.58 ± 0.09	0.32 ± 0.19	0.14	28

3 讨 论

3.1 山栏稻耐盐性综合评价 目前通过表型指标评价水稻耐盐性主要有2种方法:“形态伤害评价法”与“生长量比较法”^[22]。“形态伤害评价法”基于国际水稻研究所的标准,即观察盐胁迫下的受害症状和植株死亡率,从而对水稻植株个体的受害症状进行分级来评价水稻的耐盐性,在调查过程中,结果可能受调查者主观影响,导致误差,但其简单易行,适用于大量种质资源的初筛^[23-24];“生长量比较法”基于盐胁迫下水稻株高、穗长等指标的显著差异,最终会影响单株产量,通过调查这些表型指标的差异,可以体现各水稻品种最终产量的大致差别,用于鉴定不同品种的耐盐性^[25-26]。盐胁迫对水稻的影响表现在渗透胁迫、离子毒害与过氧化物胁迫等多个方面,是水稻耐盐能力的综合反映^[27-28],相对于“形态伤害评价法”对水稻的耐盐性评价,可调查多个不同指标的“生长量比较法”更能够体现水稻品种在盐胁迫下的多重影响。

全生育期的耐盐性鉴定因其复杂性和对自然条件的高度依赖而具有挑战性。早期研究通常聚焦于水稻的芽期和苗期的耐盐性鉴定。但Khan等^[29-30]发现,在盐处理下大多数水稻在芽期和成熟期均较耐盐,而在苗期、分蘖期和开花授粉期则敏感,同一水稻品种在各生育阶段的耐盐表现明显不同,因此本实验对水稻各生育阶段的耐盐性均进行了鉴定。由于同一水稻品种的耐盐指标间存在相关性,即不同指标间在耐盐性贡献上存在重叠,需对所有数据进行降维处理^[31],因此本实验以14个指标的耐盐系数为评价依据,采用加权隶属函数法对9份完成完整生育期的水稻材料(其中8份为山栏稻品种)耐盐性进行综合评价,其中WMS02、山川24与黄叶稻均具有强耐盐性和较强的抗旱性^[32]。

3.2 耐盐指标筛选 目前多数研究通过分析水稻的表型和生理生化指标来评估其耐盐性。王娜等^[33]对100个水稻品种进行了芽期与苗期的表型鉴定和回归分析,筛选出4个耐盐指标:种子发芽率、苗期盐害等级、相对苗长和相对根长。田蕾等^[34]以5种水稻为对象,发现在盐胁迫下,包括 Na^+ 、 K^+ 浓度、小分子有机物(如脯氨酸、可溶性糖)、相关酶活性(如抗氧化酶)及质膜透性在内的生

理生化指标显示出显著差异。相比表型鉴定,生理生化指标提供了对耐盐特性更深入的分析,但由于操作复杂,不适合大规模种质资源筛选。虽然表型鉴定不如生理生化分析细致,但它能更直观地筛选大量种质^[35]。本实验通过芽期和分蘖期的耐盐系数、D值的相关性及灰色关联度分析,筛选出2个关键表型指标:分蘖期株高和倒二叶面积,后者尤其反映了山栏稻的耐盐性;这2个指标通过线性回归分析进行了验证,除‘黑米白沙’与‘SL1808’外,其余各水稻种质耐盐性验证结果均符合实验结果,说明早期筛选结果可靠,但仍需进行全生育期盐胁迫实验以完整评价其耐盐性。此外,笔者还发现盐胁迫下芽期相关指标与出苗后表型指标的相关性较弱,故推测山栏稻在芽期与其他时期的耐盐机制可能有所不同。

4 结 论

本研究涉及40份山栏稻种质、3种普通旱稻和3种栽培水稻,使用盆栽土培法对这46种品种进行全生育期耐盐性筛选,结果表明品种间耐盐性差异显著。将46种品种根据耐盐性分为4类:9种品种耐盐性强,3种品种耐盐性较强,16种品种耐盐性一般,18种品种耐盐性较差。其中,山栏稻‘WMS02’耐盐性最强,早稻黄叶稻紧随其后。本研究结果为山栏稻耐盐性基因QTL定位及遗传机制的相关研究提供了材料基础。通过相关性和灰度关联度分析,确定分蘖期株高和倒二叶面积为早期筛选耐盐水稻品种的关键表型指标,评价这些指标将提升大规模种质资源筛选和鉴定的效率。

参考文献:

- [1] 陈志国, 倪根金, 周华. 海南黎族山栏稻的历史、价值及保护利用[J]. 广西民族大学学报(哲学社会科学版), 2018, 40(4): 82-87.
- [2] 何光亮. 不同栽培方式对山栏稻农艺性状和产量的影响[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- [3] 华南热带作物科学研究院. 海南岛作物(植物)种质资源考察文集[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 59-63.
- [4] 叶凡, 杨小波, 党金玲, 等. 中国山栏稻的研究进展[J]. 作物杂志, 2008(2): 12-15.
- [5] 刘华招, 季春德. 海南山栏稻种质资源的保护与利用[J]. 热带农业科学, 2016, 36(12): 49-51.
- [6] 刘维俊, 徐立新, 何美丹, 等. 干旱胁迫下山栏稻与栽培水稻品种苗期表型性状及生理差异[J]. 热带生物学报,

- 2014, 5(3): 260–264.
- [7] 徐建欣, 杨洁, 徐志军. 海南山栏稻品种全生育期抗旱性鉴定与评价[J]. 热带作物学报, 2018, 39(1): 55–60.
- [8] 唐力琼, 严小微, 唐清杰, 等. 山栏稻资源早期抗旱性评价及抗旱资源筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 170–175.
- [9] 刘欣欣, 徐立新, 袁潜华. 海南山栏稻 HKT2 基因片段的克隆与序列生物信息学分析[J]. 广东农业科学, 2013, 40(9): 128–132.
- [10] 翟楠鑫, 迟会, 夏珩琳, 等. 海南山栏稻抗旱基因转录组分析[J]. 生物技术通报, 2020, 36(12): 12–20.
- [11] NIU X, ZHAI N, YANG X, et al. Identification of drought-resistant genes in shanlan upland rice[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 150.
- [12] 周政, 李宏, 孙勇, 等. 高产、抗旱和耐盐选择对水稻产量相关性状的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(10): 1725–1735.
- [13] 张伟伟. 转 HhERF 基因百脉根的遗传转化及抗病、耐盐与抗旱性分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [14] 王英, 李宏, 崔彦茹, 等. 从回交导入群体中筛选耐盐和抗旱水稻植株[J]. 分子植物育种, 2010, 8(6): 1133–1141.
- [15] 王才林, 张亚东, 赵凌, 等. 耐盐碱水稻研究现状、问题与建议[J]. 中国稻米, 2019, 25(1): 1–6.
- [16] 吕学莲, 白海波, 李树华, 等. 水稻耐盐种质的鉴定评价[J]. 中国农学通报, 2013, 29(33): 50–55.
- [17] 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.
- [18] 张则宇, 李雪, 王焱, 等. 59 份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 112–121.
- [19] 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(3): 84–87. DOI:10.16819/j.1001-7216.2002.03.018.
- [20] 郭海峰. 水稻种质资源耐盐性的综合评价[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
- [21] 耿雷跃, 马小定, 崔迪, 等. 水稻全生育期耐盐性鉴定评价方法研究[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(2): 267–275.
- [22] 王明珍, 宋景芝, 译. 水稻耐盐性筛选技术[J]. 国外农业科技, 1992(5): 42–43.
- [23] 胡时开, 陶红剑, 钱前, 等. 水稻耐盐性的遗传和分子育种的研究进展[J]. 分子植物育种, 2010, 8(4): 629–640.
- [24] 顾晓, 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.
- [25] 孙现军, 姜奇彦, 胡正, 等. 水稻资源全生育期耐盐性鉴定筛选[J]. 作物学报, 2019, 45(11): 1656–1663.
- [26] 谢留杰, 段敏, 潘晓飏, 等. 不同类型水稻品系苗期和全生育期耐盐性鉴定与分析[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(3): 404–410.
- [27] 颜佳倩, 顾逸彪, 薛张逸, 等. 耐盐性不同水稻品种对盐胁迫的响应差异及其机制[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1463–1475.
- [28] 韦云飞, 白璐嘉, 宋晓叶, 等. 基于水稻幼穗盐胁迫响应转录组的 MYB 基因分析及耐盐基因挖掘[J]. 分子植物育种, 2023, 21(2): 360–369.
- [29] KHAN A, FORNES O, STIGLIANI A, et al. JASPAR 2018: update of the open-access database of transcription factor binding profiles and its web framework[J]. Nucleic Acids Research, 2018, 46(D1): D1284.
- [30] AHMAD KHAN M, ABDULLAH Z. Salinity-sodicity induced changes in reproductive physiology of rice (*Oryza sativa*) under dense soil conditions[J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 49(2): 145–157.
- [31] 陈之豪. 节水抗旱稻核心资源耐盐性评价、基因挖掘与种质创新[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [32] YANG X, NIU X, LI L, et al. Understanding the molecular mechanism of drought resistance in Shanlan upland rice by transcriptome and phenotype analyses[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 231: 123387.
- [33] 王娜, 陈亚萍, 田蕾, 等. 粳稻种质资源苗期根系形态特征与耐盐性相关分析[J]. 广东农业科学, 2015, 42(10): 1–10.
- [34] 田蕾, 王娜, 张雪艳, 等. 盐胁迫下不同粳稻品种的形态和生理特性[J]. 广东农业科学, 2014, 41(23): 1–6.
- [35] 周玉杰, 贺治洲, 林秋云, 等. 热带水稻种质资源全生育期耐盐性鉴定与评价[J]. 南方农业学报, 2023, 54(7): 1944–1952.

Identification of salt tolerance of Shanlan upland rice and screening of salt resistance index

QU Pengzheng, YUAN Qianhua

(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan, 570228, China)

Abstract: Evaluating and screening of salt-tolerant rice germplasm materials is of a great scientific and practical significance to conserve and utilize Shanlan upland rice in Hainan. Potting experiments were made and 40 accessions of Shanlan upland rice, 3 accessions of common upland rice and 3 accessions of common paddy rice were selected for treatment under salt stress at the germination stage and the whole growth stage. They were treated with 0.6% NaCl solution at the germination stage and 4g kg^{-1} at the whole growth stage. The 25 growth indexes related to the salt tolerance of rice were determined, and their salt tolerance at the whole growth stage was analyzed by using correlation analysis, grey relational analysis and comprehensive evaluation to screen salt tolerance indexes. The results showed that single plant yield, flag leaf area, total number of grains per panicle, seed set rate and effective panicle number varied significantly between rice accessions ($P < 0.05$), and were highly sensitive to salt stress. Comprehensive evaluation of the salt tolerance of 46 accessions of rice at the whole growth stage showed that 46 accessions can be divided into 4 categories: 9 accessions with high salt tolerance that could complete the growth period under salt stress; 3 accessions with high salt tolerance that could enter the reproductive growth stage but cannot form yield; 16 accessions with general salt tolerance that died before entering the reproductive growth; 18 accessions with poor salt tolerance that died after 35 days of salt stress. Through principal component analysis and membership function analysis, the comprehensive measurement value (D value) of salt resistance was obtained, and the Shanlan upland rice ‘WMS02’ and the common upland rice ‘Huangyedao’ were selected as materials with high salt resistance. Correlation analysis and grey relational analysis showed the penultimate leaf area and plant height at the tillering stage were identified as effective indexes for the identification of early stage salt tolerance.

Keywords: upland rice; Shanlan upland rice; full growth period; salt tolerance; evaluating index

(责任编辑:叶 静)