

# 盐胁迫对 4 个水稻种质抗逆性生理的影响

王旭明\*, 麦绮君\*, 周鸿凯\*\*, 赵夏夏, 陈景阳, 龚茂健, 杨善, 谢平, 莫俊杰, 叶昌辉

(广东海洋大学农学院, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 为筛选水稻(*Oryza sativa*)耐盐种质资源, 研究了水稻耐盐相关生理指标。结果表明, 盐胁迫下, 耐盐种质 Pokkali、FL478、JX99 的电导率较低, 细胞膜透性较小, 叶片叶绿素含量较高, 受盐害程度较弱。盐胁迫促进了丙二醛的大量积累, 加剧了细胞膜脂过氧化程度, 而耐盐种质的丙二醛积累较少, 但高盐胁迫下 3 个耐盐种质的丙二醛含量升高, 破坏了细胞膜的完整性。感盐种质 R29 的临界饱和和亏的增幅较大, 耐盐种质相对含水量降幅小。应用模糊隶属函数法综合评价, 4 个水稻种质的耐盐性依次为 JX99>Pokkali>FL478>IR29。

**关键词:** 水稻; 盐胁迫; 抗逆性; 丙二醛; 脯氨酸

doi: 10.11926/jtsb.3920

## Effects of Salt Stress on Resistance Physiology of Four Rice Germplasms

WANG Xu-ming\*, MAI Qi-jun\*, ZHOU Hong-kai\*\*, ZHAO Xia-xia, CHENG Jing-yan, GONG Mao-jian, YANG Shan, XIE Ping, MO Jun-jie, YE Chang-hui

(College of Agriculture, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

**Abstract:** In order to select salt-tolerance germplasms of rice (*Oryza sativa*) germplasms, the physiological indexes related salt tolerance were studied under salt stress. The results showed that the salt tolerance germplasms, such as Pokkali, FL478 and JX99, had low conductivity, small cell membrane permeability, and high chlorophyll content in leaf, showing weak salt damage. The malondialdehyde content, the degree of cell membrane lipid peroxidation increased under salt stress. The malondialdehyde accumulated in salt-tolerant germplasm less than that in sensitive germplasm, but the malondialdehyde content in three salt-tolerant germplasms also increased under high salt stress, which destroyed the integrity of cell membrane. The critical saturation deficit in sensitive germplasm R29 greatly enhanced, while the relative water content in salt-tolerant germplasms slightly decreased. So, the order of salt tolerance was JX99>Pokkali>FL478>IR29 by fuzzy membership function method.

**Key words:** Rice; Salt Stress; Stress Resistance; Malondialdehyde; Proline

我国盐碱土可分为滨海盐渍区、黄淮海平原盐渍区、荒漠及荒漠草原盐渍区、草原盐渍区四大类型。盐碱地是我国重要的土地资源, 据统计, 广东

省岛屿众多, 全省大陆岸线长 3 368.1 km, 沿海土地面积大, 受海水侵蚀而盐碱化的土地多<sup>[1]</sup>。水稻 (*Oryza sativa*)是广东省的主要粮食作物, 土壤盐碱

收稿日期: 2018-04-04 接受日期: 2018-07-05

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41073059); 广东省高等教育高校创新强校工程项目(GDOU2017052604, 2017KZDXM044); 广东省农业科技创新及推广项目(2018LM2173); 湛江市科技计划项目(2015A03015)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41073059), the Project for Innovation and Strong School of Higher Education Institutions in Guangdong (Grant No. GDOU2017052604, 2017KZDXM044), the Project for Provincial Agricultural Science and Technology Innovation and Promotion in Guangdong (Grant No. 2018LM2173), and the Project for Science and Technology in Zhanjiang (Grant No. 2015A03015).

作者简介: 王旭明(1992~), 男, 硕士研究生, 主要从事作物抗逆生理方面研究。E-mail: m18793630087@163.com

\* 对本文有同等贡献, 并列第一作者

\*\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: 897961801@qq.com

化和次生盐碱化成为制约水稻稳产高产的主要因素<sup>[2]</sup>。耐盐水稻的种植不仅减少了利用物理化学方法对盐碱土改良的经济成本和时间成本,而且对改良盐碱化土壤、改善土壤肥力,提高粮食产量,增加植被多样性以及充分利用土壤资源等方面有重要生态学意义。多数水稻品种受高浓度盐胁迫影响后会大幅度减产甚至死亡,盐胁迫是限制水稻生长、影响水稻产量的主要限制因子之一。周毅等<sup>[3]</sup>研究表明,盐胁迫下,盐离子首先伤害植物细胞质膜的完整性,导致细胞膜透性增大和质膜过氧化作用增强。盐胁迫对植物的伤害主要是渗透胁迫和离子毒害两个方面<sup>[4-5]</sup>,渗透胁迫是由于环境中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  浓度增加,水分难以进入植物体内而造成的<sup>[6]</sup>,细胞通过积累脯氨酸进行渗透调节,以保持植物体内水分,维持正常生长。对水稻幼苗期在盐胁迫下的生理生化特性研究较多,而对水稻其他生长时期的抗逆性生理响应的研究较少,亦较少分析盐胁迫对水稻植株不同部位水分生理的影响。水稻耐盐性是受多因素共同影响,且各因素间相互作用,抗逆性生理响应机制复杂。本文以水稻 4 个种质为材料,设置 6 个盐胁迫水平进行盆栽试验,分析了 9 个生理生化指标,探讨盐胁迫对耐盐性不同的水稻抗逆生理的影响,并通过模糊隶属函数法对参试的水稻种质耐盐性进行综合评价,以期对耐盐水稻种质资源的筛选提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

4 个水稻(*Oryza sativa*)种质 IR29、FL478、JX99、Pokkali 均为广东海洋大学农学院提供,其中 IR29 为盐敏感种质,FL478、Pokkali 和 JX99 为耐盐种质。试验用的水稻土取自广东海洋大学试验田,土壤肥力符合水稻生长需求, pH 6.47,有机质含量  $32.86 \text{ g kg}^{-1}$ ,全磷、全钾和水溶性盐总量分别为  $0.46$ 、 $22.41$  和  $0.85 \text{ g kg}^{-1}$ ,速效磷、速效钾和碱解氮含量分别为  $65.00$ 、 $117.21$  和  $177.45 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

### 1.2 试验设计

试验在 2016 年 3-6 月进行。4 月 7 日选取长势均匀的 3 叶 1 心期秧苗移栽到试验盆中(口径 30 cm,高 35 cm),内装 15 kg 晒干土,设置 6 个土壤含盐量梯度,用分析纯 NaCl 分别配制 0、0.1%、0.2%、0.3%、

0.4% 和 0.5% 溶液(NaCl 占土壤质量百分率),相应的土壤含盐量分别为  $(0.027 \pm 0.003)\%$ 、 $(0.107 \pm 0.003)\%$ 、 $(0.162 \pm 0.026)\%$ 、 $(0.251 \pm 0.022)\%$ 、 $(0.360 \pm 0.017)\%$  和  $(0.427 \pm 0.024)\%$ ,相应的土壤电导率分别为  $(566 \pm 82.478)$ 、 $(2\ 483 \pm 249.438)$ 、 $(3\ 798 \pm 171.18)$ 、 $(4\ 883 \pm 351.61)$ 、 $(7\ 474 \pm 49.987)$  和  $(9\ 283 \pm 603.10) \mu\text{S cm}^{-1}$ 。每盆 6 株,随机区组试验设计,3 次重复,共 72 盆。将试验盆放在玻璃温室内,保持 2 cm 水层。早晚观察水稻的生长状况,每天拍照记录,并使用土壤含盐量测试仪(台湾衡欣 Az8371 型)监测土壤含盐量,以保证整个生长过程土壤含盐量保持相对稳定。

于 2016 年 5 月 8 日(水稻幼穗分化期),每盆取 3 株大小相似的植株,参照周祖富<sup>[7]</sup>的方法测定叶绿素含量(Chl,  $\text{mg g}^{-1}$ )、丙二醛(MDA,  $\mu\text{mol g}^{-1}$ )含量、脯氨酸(Pro,  $\mu\text{g g}^{-1}$ )含量、叶和根的细胞膜透性(LCMP 和 RCMP,  $\mu\text{S cm}^{-1}$ );参照 Zhou 等<sup>[8]</sup>的方法测定叶和叶鞘的相对含水量(LRWC 和 SRWC, %)、叶和叶鞘的水分临界饱和和亏(LCSD 和 SCSD, %),并观察水稻植株的表观特征变化。每处理 3 次重复。

### 1.3 水稻耐盐性评价

采用模糊隶属函数法<sup>[9]</sup>对水稻耐盐性进行评价,以各指标的隶属度平均值作为耐盐性的综合评判标准并排序。

### 1.4 数据统计分析

用 IBM SPSS Statistics 19 专业数据处理系统对数据进行方差分析和 Duncan 法显著性分析( $P < 0.05$ ),用 Microsoft Office Excel 2007 绘图。

## 2 结果和分析

### 2.1 盐胁迫下主要生理指标的方差分析

根据试验数据,以种质为因素 A,盐胁迫浓度为因素 B 进行双因素随机区组设计方差分析。由表 1 可知,4 个种质间和 6 个盐浓度间对叶绿素含量均呈极显著相关,但对叶绿素含量的辅助作用呈不显著性;对丙二醛含量、脯氨酸含量、叶片细胞膜透性和根细胞膜透性均呈极显著相关,且均呈极显著辅助作用。

### 2.2 盐胁迫下主要生理指标的含量

在盐胁迫下,4 个水稻种质的叶绿素含量、丙

表 1 方差分析

Table 1 Variance analysis

		变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
		Variance resource	Sum of square	Degree of freedom	Mean square		
Chl	品种间	Between varieties (A)	8.374	3	2.791	32.649	0.000
	盐浓度间	Between salt concentrations (B)	14.375	5	2.875	33.627	0.000
	A×B		0.963	15	0.064	0.751	0.722
	误差	Error	4.104	48	0.085		
	总计	Total	711.329	72			
MDA	A		10.671	3	3.557	45.194	0.000
	B		19.667	5	3.933	49.977	0.000
	A×B		8.382	15	0.559	7.100	0.000
	误差	Error	3.778	48	0.079		
	总计	Total	2 295.167	72			
Pro	A		1 080.199	3	360.066	186.139	0.000
	B		1 709.362	5	341.872	176.734	0.000
	A×B		77.155	15	5.144	2.659	0.005
	误差	Error	92.851	48	1.934		
	总计	Total	33 286.896	72			
LCMP	A		256 466.333	3	85 488.778	76.137	0.000
	B		673 131.667	5	134 626.333	119.899	0.000
	A×B		193 902.000	15	12 926.800	11.513	0.000
	误差	Error	53 896.000	48	1 122.833		
	总计	Total	3 221 638.000	72			
RCMP	A		13 707.708	3	4 569.236	51.956	0.000
	B		175 938.236	5	35 187.647	400.112	0.000
	A×B		12 955.708	15	863.714	9.821	0.000
	误差	Error	4 221.333	48	87.944		
	总计	Total	3 628 987.000	72			

二醛含量、脯氨酸含量、叶和根细胞膜透性均存在显著差异(表 2)。

4 个水稻种质的叶绿素含量随盐浓度升高逐渐下降,且同一盐浓度下,不同种质间的叶绿素含量存在差异。IR29 的叶绿素含量与其余 3 个种质的差异显著。在 0.5% NaCl 胁迫时,4 个种质的叶绿素含量比对照明显下降,以耐盐种质 Pokkali 降幅较小,达 28.32%,这表明盐胁迫阻碍了叶绿素的合成,耐盐性较强的种质叶绿素合成能力相对较高。

IR29 和 FL478 的丙二醛含量随盐胁迫水平升高而增加, JX99 和 Pokkali 则在 0.2% NaCl 胁迫达到峰值,随后降低。同一盐浓度下,丙二醛的积累在 4 个种质间存在差异, IR29 和 FL478 间均无显著差异, Pokkali 均与其余 3 个种质有显著差异。这表明盐胁迫促进了丙二醛的积累,且耐盐性不同的种质丙二醛的积累量不同,耐盐性高的 Pokkali 的丙二醛积累量较少。

4 个水稻种质的脯氨酸含量随盐胁迫水平升高呈先升后缓慢降低的趋势(图 2),且同一盐浓度胁迫下,4 个种质间的脯氨酸积累量存在极显著差异。除

IR29 在 0.2% NaCl 胁迫时达到峰值外,其余 3 个种质的脯氨酸含量均在 0.3% NaCl 胁迫时达到峰值。在高浓度盐胁迫下, JX99 和 Pokkali 的脯氨酸含量无显著差异,而与 IR29 呈显著差异。这表明盐胁迫影响了脯氨酸的合成,耐盐性强的 JX99、Pokkali 脯氨酸合成能力较高。

组织相对电导率反映了细胞膜的透性状况。4 个水稻种质的相对电导率都随盐胁迫水平升高逐渐增加。且在同一盐胁迫下,4 个种质间的叶片和根相对电导率均存在差异。叶片相对电导率的变化较根的明显。在 0.3%~0.5% 盐胁迫下,4 个水稻种质间的叶片相对电导率均有显著差异,以 IR29 的增幅较大, Pokkali 的较小且相对电导率维持在较低水平。这表明盐胁迫破坏了叶片细胞的膜透性,耐盐性不同的 4 个种质,叶片的细胞膜透性也不同,感盐种质的细胞膜透性较大,而耐盐种质 Pokkali 的较小。

Pokkali 与其余 3 个水稻种质间的根相对电导率均呈显著差异。在高盐胁迫下, Pokkali 的根相对电导率增幅最小,其余 3 个种质的增幅较大。这表明

表 2 4 个水稻种质的主要生理指标

Table 2 Main physiological indexes of four rice germplasms

品种 Variety	NaCl /%	Chl (mg g <sup>-1</sup> )	MDA (μmol g <sup>-1</sup> )	Pro (μg g <sup>-1</sup> )	LCMP (μS cm <sup>-1</sup> )	RCMP (μS cm <sup>-1</sup> )
IR29	0	3.19 ±0.21a	4.52 ±0.26d	6.17 ±0.22e	121.67 ±12.01d	144.67 ±8.74e
	0.1	2.86 ±0.12b	5.19 ±0.17c	12.63 ±0.49d	148.67 ±5.13d	171.00 ±7.02d
	0.2	2.56 ±0.13c	5.87 ±0.19b	21.20 ±1.25a	164.01 ±9.85cd	211.67 ±11.02c
	0.3	2.35 ±0.19cd	6.18 ±0.33ab	19.43 ±0.76b	280.02 ±4.04c	221.33 ±7.77c
	0.4	2.21 ±0.15de	6.36 ±0.23a	18.34 ±0.62b	360.33 ±8.02b	247.02 ±9.54b
	0.5	2.00 ±0.16e	6.61 ±0.33a	15.90 ±0.71c	442.33 ±7.23a	289.33 ±2.52a
FL478	0	3.58 ±0.31a	4.63 ±0.15c	8.44 ±0.56e	98.33 ±4.51c	130.67 ±12.66d
	0.1	3.52 ±0.34ab	5.16 ±0.39c	15.57 ±0.43d	120.33 ±2.08c	165.67 ±6.03c
	0.2	3.36 ±0.31ab	5.91 ±0.27b	20.75 ±0.60b	150.02 ±3.61c	175.33 ±13.20c
	0.3	3.02 ±0.20bc	6.08 ±0.55b	23.37 ±0.67a	219.01 ±4.03b	206.67 ±6.51b
	0.4	2.69 ±0.32cd	6.39 ±0.20ab	21.40 ±0.60b	240.33 ±5.03b	224.01 ±13.75b
	0.5	2.38 ±0.26d	6.92 ±0.40a	17.60 ±0.51c	321.02 ±7.03a	294.01 ±8.19a
JX99	0	4.11 ±0.32a	4.38 ±0.20c	14.28 ±1.23d	79.33 ±8.74d	139.67 ±4.51f
	0.1	4.04 ±0.38a	4.83 ±0.20bc	23.89 ±2.17c	111.67 ±9.61d	175.67 ±11.02e
	0.2	3.67 ±0.22ab	5.68 ±0.24a	25.09 ±1.70bc	123.33 ±22.94d	222.33 ±4.16d
	0.3	3.35 ±0.23bc	5.36 ±0.35ab	29.64 ±1.24a	173.02 ±19.31c	264.67 ±5.13c
	0.4	2.98 ±0.50cd	4.76 ±0.25bc	27.09 ±0.88b	212.67 ±21.78b	295.67 ±6.11b
	0.5	2.41 ±0.31d	4.57 ±0.59c	25.82 ±0.71bc	266.67 ±9.87a	329.02 ±19.29a
Pokkali	0	3.62 ±0.28a	4.84 ±0.13e	14.40 ±2.68d	50.01 ±2.65d	178.02 ±7.01e
	0.1	3.70 ±0.40a	5.67 ±0.03d	21.88 ±1.27c	63.67 ±3.06cd	188.00 ±9.54de
	0.2	3.44 ±0.39a	6.49 ±0.02a	25.17 ±3.84bc	78.33 ±3.06bcd	199.33 ±8.50d
	0.3	3.26 ±0.19a	6.13 ±0.06b	30.32 ±1.38a	92.02 ±3.01bc	233.33 ±7.02c
	0.4	3.06 ±0.38ab	5.91 ±0.06c	28.19 ±1.84ab	121.33 ±2.52b	250.67 ±4.51b
	0.5	2.59 ±0.32b	5.81 ±0.17cd	26.03 ±0.72b	153.67 ±5.51a	274.67 ±12.67a

同一种质数据后不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

Data followed different letters within variety indicate significant difference at 0.05 level.

盐胁迫破坏了根的细胞膜透性,耐盐性不同的 4 个种质,根的细胞膜透性也不同,以耐盐性高的 Pokkali 种质较小。

### 2.3 盐胁迫下叶片和叶鞘的相对含水量变化

随盐胁迫水平的升高,水稻叶片和叶鞘的相对含水量逐渐降低(图 1),且不同盐胁迫下,4 个种质间叶片和叶鞘的的相对含水量存在显著差异,叶片相对含水量的变化幅度大于叶鞘。

在盐胁迫下 IR29 和 FL478 的叶片相对含水量无显著差异,在高盐胁迫下, JX99 和 Pokkali 的叶片相对含水量均无显著差异,但与 IR29 呈显著差异,且 Pokkali 的相对含水量比 IR29 高,这表明盐胁迫影响了叶片的水分状况,耐盐性不同的种质叶片相对含水量不同,感盐种质 IR29 的叶片相对含水量较低,耐盐性强的种质 Pokkali 叶片的相对含水量较高。IR29 与其余 3 个种质的叶鞘相对含水量均呈显著差异,且 IR29 的叶鞘相对含水量较高, FL478、JX99 和 Pokkali 间均无显著差异,这表明盐胁迫对叶鞘的水分状况也有影响,耐盐性不同的

种质叶鞘相对含水量不同,盐胁迫对盐敏感种质 IR29 的叶鞘相对含水量影响较小。

### 2.4 盐胁迫下叶片和叶鞘的水分临界饱和和亏含量变化

叶片和叶鞘的水分临界饱和和亏都随着盐胁迫水平升高呈上升趋势,叶鞘的增幅整体大于叶片,且在同一盐胁迫下不同种质间存在显著差异(图 2)。

盐胁迫下 IR29 和 FL478 间的叶片水分临界饱和和亏均无显著差异,而与 Pokkali 有显著差异。IR29 叶片的水分临界饱和和亏较高, Pokkali 较低,这表明盐胁迫增加了叶片水分亏缺状况,耐盐性不同的种质叶片水分亏缺不同,感盐种质 IR29 临界饱和和亏受盐胁迫影响较大。Pokkali 的叶鞘水分临界饱和和亏与 IR29 的呈显著差异,这表明盐胁迫影响了叶鞘的水分亏缺状况,对耐盐性强的种质叶鞘水分临界饱和和亏影响较小,而对感盐种质影响大。

### 2.5 盐胁迫下株高的变化

从图 3 可见,大于 0.4% NaCl 胁迫时,4 个水稻种质受盐害影响较明显,株高均明显变矮,叶面积

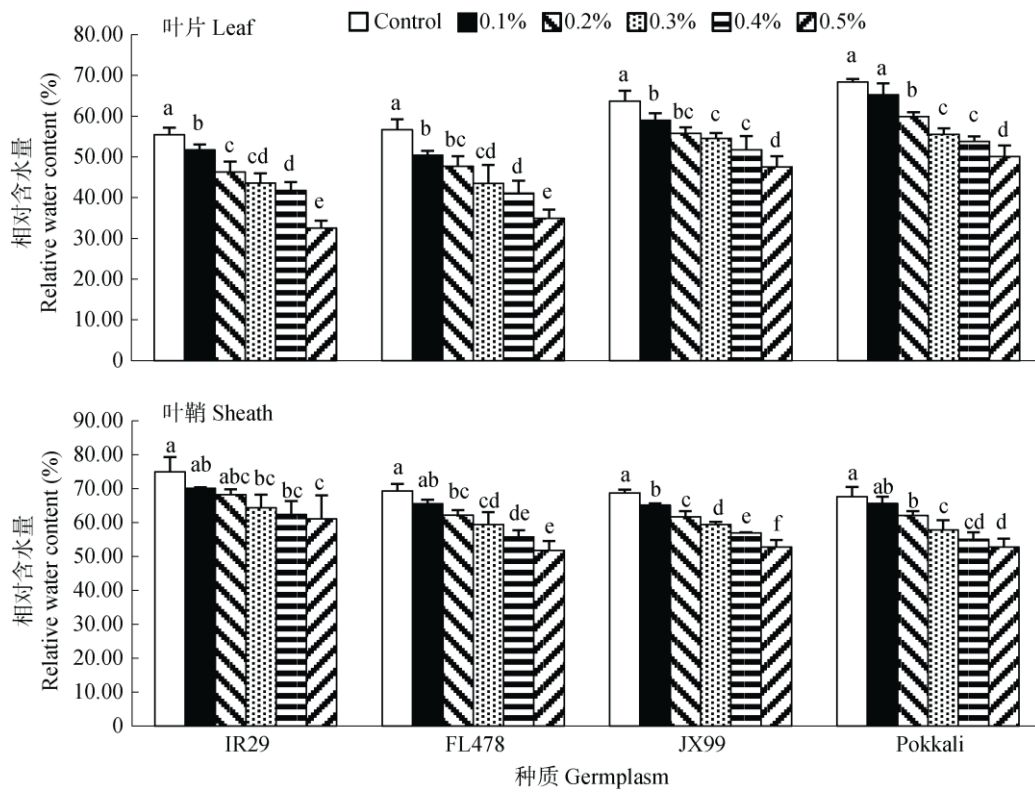


图 1 盐胁迫下水稻叶片、叶鞘的相对含水量

Fig. 1 Relative water content in leaves and sheath of four rice germplasm under salt stress

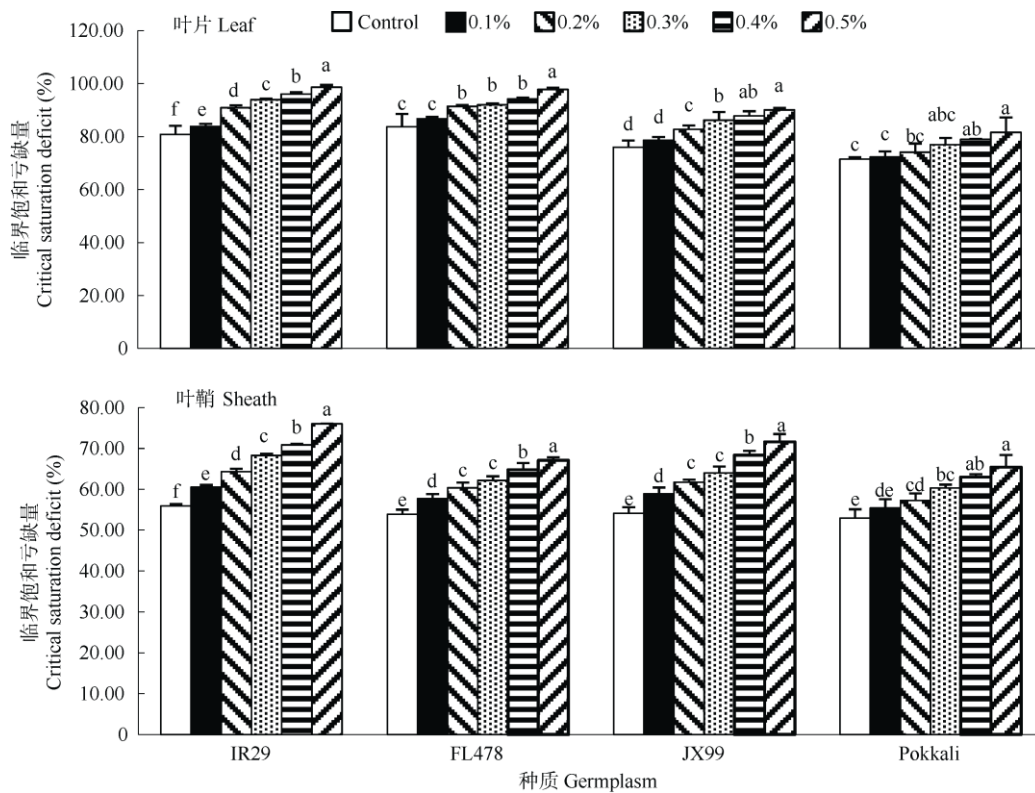


图 2 盐胁迫下水稻种质叶片、叶鞘的水分临界饱和和亏含量

Fig. 2 Critical saturation deficient in leaves and sheaths of four rice germplasm under salt stress

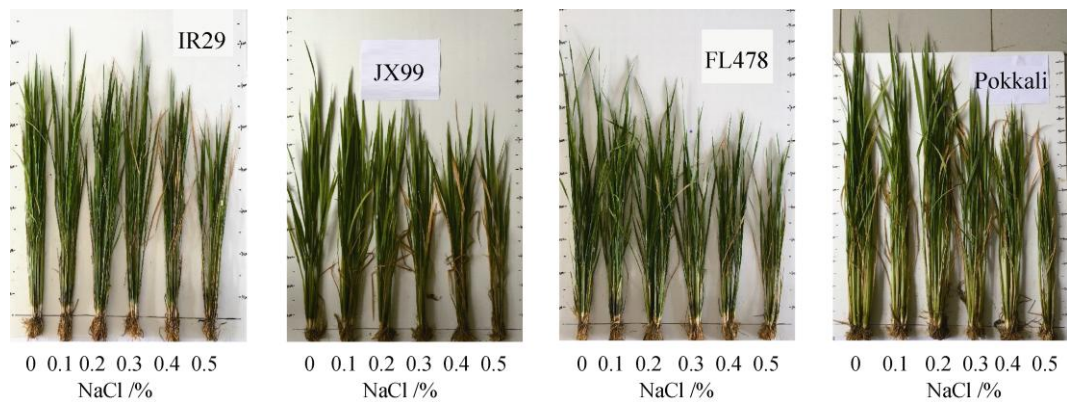


图3 盐胁迫下水稻的生长状况

Fig. 3 Growth of rice under salt stress

变小, 分蘖均较少, 心叶卷曲, 叶片发黄, 叶缘枯萎, 其中以 IR29 受盐害最严重, FL478 受害也较明显, 而 Pokkali 和 JX99 受害较轻。

## 2.6 水稻种质耐盐性综合评价

不同种质的各指标隶属度平均值反映了水稻耐盐能力。从表 3 可见, 水稻 4 个种质的耐盐性为 JX99>Pokkali>FL478>IR29。

## 3 讨论和结论

水稻在生长过程中经常会遇到各种逆境胁迫, 盐胁迫是影响水稻正常生长的主要因子之一, 也是制约水稻稳定高产的主要因素之一。而水稻对盐胁迫存在抗逆性生理响应机制。

叶绿素是主要的光合色素, 作为耐盐性指标之一, 一定程度上反映了水稻光合作用能力的强弱, 也反映了水稻的生长状况。本研究结果表明, 4 个水稻种质的叶绿素含量在盐胁迫下均降低, 说明盐渍胁迫促使水稻种质细胞中的叶绿体分解<sup>[10]</sup>, 阻碍叶绿素合成; 耐盐性种质保持较高的叶绿素含量, 可能是因为叶肉细胞积累  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  较少, 叶绿素合

成能力较强。

盐胁迫对水稻组织的伤害程度常通过以细胞膜透性来衡量, 是耐盐性指标之一。在正常情况下, 植物细胞内自由基的产生与消除处于平衡状态, 不易导致膜质过氧化<sup>[11]</sup>。肖军等<sup>[12]</sup>的研究表明, 随着盐浓度增加, 细胞膜透性增加, 膜脂过氧化作用加强, 进而破坏膜系统。本研究结果表明, 盐胁迫破坏叶片细胞的膜透性, IR29 细胞膜受损较大, 其余 3 个种质受损较小。

质膜是植物在逆境胁迫中首先伤害的原初位点, 主要表现为质膜透性增大, 细胞内渗透压增加, 质膜产生过氧化作用, 膜脂过氧化物丙二醛含量升高, 损害质膜结构, 进而影响细胞正常生理代谢<sup>[13]</sup>。因此, 常用丙二醛作为膜脂过氧化的指标, 反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件的抵抗能力。本研究结果表明, 盐胁迫促进了丙二醛的大量积累, 加剧了细胞膜脂过氧化程度, 进一步破坏了细胞膜的完整性, 耐盐性强的种质丙二醛积累较少, 但是, 在高盐胁迫下丙二醛也有一定的积累, 破坏了细胞膜的完整性。

盐胁迫下, 细胞质膜受损导致细胞膜透性增加, 而渗透调节功能是植物在盐胁迫等逆境胁迫下

表 3 水稻 4 个种质生理指标的隶属函数值和耐盐性综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation index of membership function value and salt tolerance of four rice germplasm under salt stress

种质 Germplasms	Chl	MDA	Pro	LCMP	RCMP	LRWC	SRWC	LCSD	SCSD	隶属度均值 Mean value of membership	排序 Rank
IR29	0.000	0.066	0.000	0.000	0.616	0.000	1.000	1.000	1.000	0.409	4
FL478	0.628	0.000	0.257	0.489	1.000	0.034	0.080	1.019	0.270	0.420	3
JX99	1.000	1.000	0.996	0.485	0.000	0.778	0.120	0.524	0.587	0.610	1
Pokkali	0.835	0.046	1.000	1.000	0.447	1.000	0.000	0.000	0.000	0.481	2



的重要生理机制, 其中, 渗透调节物质脯氨酸含量是植物抗逆能力强弱的一项重要生理指标。植物体内通过脯氨酸合成积累调节细胞内的渗透压, 提高细胞的保水能力<sup>[14]</sup>, 从而帮助植物抵抗盐胁迫等逆境状况<sup>[15]</sup>。Koca等<sup>[16]</sup>的研究表明, 盐胁迫使植物体内脯氨酸含量呈显著上升趋势。本研究结果表明, 盐胁迫影响了脯氨酸的合成, 脯氨酸含量在0.3%盐胁迫时达到峰值, 随盐胁迫水平升高脯氨酸含量降低, 这说明水稻在盐胁迫下, 可以通过累积脯氨酸调节细胞渗透压, 但细胞这种调节能力是有一定范围的。耐盐种质的脯氨酸含量较高, 能提高细胞的保水能力, 减少对细胞膜完整性的破坏, 保证水稻能够正常生长。

相对含水量是反映植物水分状况的重要指标<sup>[17]</sup>, 组织的相对含水量与植物抗逆性呈正相关, 细胞的相对含水量反映了细胞受逆境胁迫的程度。本研究结果表明, 盐胁迫下水稻4个种质的叶片和叶鞘的相对含水量均降低, 说明盐胁迫使细胞受到伤害, 引起细胞渗透压增加, 细胞膜透性增加, 水溶性物质外渗, 导致植物失水。耐盐种质的相对含水量降幅相对小, 是因为细胞有一定的自我调节能力, 减少盐胁迫对正常生长的不利影响。

植物通过增加体内水分临界饱和和亏维持其自身正常生长所需的相对含水量, 增强耐盐性, 因此, 水分临界饱和和亏是反映植物抗脱水能力的指标。本研究结果表明, 盐胁迫下, 4个种质的叶片和叶鞘水分临界饱和和亏均呈上升趋势, 其中IR29的增幅较大。

应用模糊隶属函数法对水稻的耐盐性进行综合评价, 依次为JX99>Pokkali>FL478>IR29, 其中IR29为盐敏感种质, Pokkali为强耐盐种质, JX99也表现出较强的耐盐性。有研究表明, 植物的耐盐性与多种酶活性相关<sup>[18]</sup>, 4个水稻种质的耐盐性与酶系统的关系还有待于进一步研究。

## 参考文献

- [1] LIANG Z J, HUANG H X, LIN Y E, et al. Investigation and identification of the drought/salt resistance vegetable germplasm resources in seaside region in Guangdong [J]. Guangdong Agric Sci, 2013, 40(2): 143–145. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2013.02.046.  
梁肇均, 黄河勋, 林毓娥, 等. 广东省沿海地区抗旱耐盐碱蔬菜资源考察与收集鉴定 [J]. 广东农业科学, 2013, 40(2): 143–145. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2013.02.046.
- [2] LI B, WANG Z C, SUN Z G, et al. Resources and sustainable resource exploitation of salinized land in China [J]. Agric Res Arid Areas, 2005, 23(2): 154–158. doi: 10.3321/j.issn:1000-7601.2005.02.032.  
李彬, 王志春, 孙志高, 等. 中国盐碱地资源与可持续利用研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 154–158. doi: 10.3321/j.issn:1000-7601.2005.02.032.
- [3] ZHOU Y, CUI F L, YANG P, et al. Effect of salt stress on physiological and biochemical characteristics of different rice varieties during seedling stage [J]. Jiangsu Agric Sci, 2016, 44(1): 90–93. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.023.  
周毅, 崔丰磊, 杨萍, 等. 盐胁迫对不同品种水稻幼苗生理生化特性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2016, 44(1): 90–93. doi: 10.15889/j.issn.1002-1302.2016.01.023.
- [4] MUNNS R, TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. Annu Rev Plant Biol, 2008, 59: 651–681.
- [5] WANG N, CAO M J, YU J L. Effects of NaCl Stress on organic osmotica of maize seedlings [J]. J Maize Sci, 2009, 17(4): 61–65, 69. doi: 10.13597/j.cnki.maize.science.2009.04.020.  
王宁, 曹敏建, 于佳林. NaCl胁迫对玉米幼苗有机渗透调节物质的影响 [J]. 玉米科学, 2009, 17(4): 61–65, 69. doi: 10.13597/j.cnki.maize.science.2009.04.020.
- [6] XU C, LING F L, XU K Z, et al. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different rice varieties [J]. Chin J Rice Sci, 2013, 27(3): 280–286. doi: 10.3969/j.issn.1001-7216.2013.03.008.  
徐晨, 凌风楼, 徐克章, 等. 盐胁迫对不同水稻品种光合特性和生理生化特性的影响 [J]. 中国水稻科学, 2013, 27(3): 280–286. doi: 10.3969/j.issn.1001-7216.2013.03.008.
- [7] ZHOU Z F, LI Z A. Guidance on Plant Physiological Experiment [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2005: 114–116.  
周祖富, 黎兆安. 植物生理学试验指导 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 114–116.
- [8] ZHOU B, GUO Z, LIU Z. Effects of abscisic acid on antioxidant systems of *Stylosanthes guianensis* (Aublet) Sw. under chilling stress [J]. Crop Sci, 2005, 45(2): 599–605. doi: 10.2135/cropsci2005.0599.
- [9] XU L Z, PANG S Q, DIAO M, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of different processing tomato cultivars by membership function method [J]. Xinjiang Agric Sci, 2017, 54(5): 833–842. doi: 10.6048/j.issn.1001-4330.2017.05.006.  
许立志, 庞胜群, 刁明, 等. 隶属函数法评价不同加工番茄品种耐盐性 [J]. 新疆农业科学, 2017, 54(5): 833–842. doi: 10.6048/j.issn.1001-4330.2017.05.006.
- [10] PARDO J M. Biotechnology of water and salinity stress tolerance [J].

- Curr Opin Biotechnol, 2010, 21(2): 185–196. doi: 10.1016/j.copbio.2010.02.005.
- [11] XIAO J, CHEN X, ZHAO Y, et al. Research overview and prospect on rice under salt stress [J]. Liaoning Agric Sci, 2012(6): 48–53. doi: 10.3969/j.issn.1002-1728.2012.06.012.  
肖军, 陈珣, 肇莹, 等. 水稻盐胁迫的研究概况与展望 [J]. 辽宁农业科学, 2012(6): 48–53. doi: 10.3969/j.issn.1002-1728.2012.06.012.
- [12] YANG G H, SHI D C. Effects of NaCl stresses on relative water contents and defense enzymes activities in leaves of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch. [J]. J Henan Agric Sci, 2009, 38(12): 104–106. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2009.12.032.  
杨国会, 石德成. NaCl 胁迫对甘草叶片相对含水量及保护酶活性的影响 [J]. 河南农业科学, 2009, 38(12): 104–106. doi: 10.3969/j.issn.1004-3268.2009.12.032.
- [13] SHI L R, NIU Y L, LI M Z. Physiological response of *Sonchus brachyotus* to salt stress [J]. Acta Pratacult Sin, 2010, 19(6): 272–275.  
时丽冉, 牛玉璐, 李明哲. 苣荬菜对盐胁迫的生理响应 [J]. 草业学报, 2010, 19(6): 272–275.
- [14] YANG L F, ZHU Y L, HU C M, et al. Effects of NaCl stress on the contents of the substances regulating membrane lipid oxidation and osmosis and photosynthetic characteristics of grafted cucumber [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2006, 26(6): 1195–1200. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.06.017.  
杨立飞, 朱月林, 胡春梅, 等. NaCl 胁迫对嫁接黄瓜膜脂过氧化、渗透调节物质含量及光合特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2006, 26(6): 1195–1200. doi: 10.3321/j.issn:1000-4025.2006.06.017.
- [15] TAN W J, LI Q Y, SHEN X F, et al. Study on seed germination of weedy rice and cultivated rice under salinity stress [J]. Guangdong Agric Sci, 2014(3): 5–8. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2014.03.002.  
谭卫军, 李其勇, 沈雪峰, 等. 盐胁迫对杂草稻和水稻种子萌发特性的影响 [J]. 广东农业科学, 2014(3): 5–8. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2014.03.002.
- [16] KOCA H, BOR M, ÖZDEMİR F, et al. The effect of salt stress on lipid peroxidation, antioxidative enzymes and proline content of sesame cultivars [J]. Environ Exp Bot, 2007, 60(3): 344–351. doi: 10.1016/j.envexpbot.2006.12.005.
- [17] LI Q, LIU J H, WU J Y, et al. Effect of salt stress on membrane permeability and Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> absorption of oat [J]. Acta Agric Boreali Sin, 2009, 24(6): 88–92.  
李倩, 刘景辉, 武俊英, 等. 盐胁迫对燕麦质膜透性及 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>吸收的影响 [J]. 华北农学报, 2009, 24(6): 88–92.
- [18] ZHAO M L, DU Q L, JIAO J, et al. Physiological response and salt resistance evaluation of six varieties of *Olea europaea* under salt stress [J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci), 2016, 45(1): 19–25. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.01.004.  
赵曼利, 杜启兰, 焦健, 等. 盐胁迫对不同品种油橄榄抗盐性生理指标的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(1): 19–25. doi: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.01.004.