

赵记伍,成云峰,刘永权,等. 盐胁迫对海稻 86 生长及矿质元素吸收、运输和分配的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 7-14.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.04.002

# 盐胁迫对海稻 86 生长及矿质元素吸收、运输和分配的影响

赵记伍<sup>1</sup>, 成云峰<sup>2</sup>, 刘永权<sup>2</sup>, 向永玲<sup>1</sup>, 黄意<sup>1</sup>, 王晓玲<sup>1</sup>

1. 长江大学农学院, 荆州 434025; 2. 武汉海稻国际生物科技有限公司, 武汉 430205

**摘要** 采用盆栽试验方法, 以黄华占为对照, 探讨盐胁迫对海稻 86 植株生长和矿质元素吸收、运输及分配的影响。结果显示: 盐胁迫抑制了水稻干物质量的积累, 海稻 86 与黄华占耐盐阈值分别为 8.72、6.35 g/kg, 与黄华占相比, 海稻 86 表现出较强的耐盐能力。盐胁迫下, 与黄华占相比, 海稻 86 通过根系选择性吸收  $\text{Na}^+$ , 调节  $\text{Na}^+$  在各器官水平的分配, 其叶鞘能积累更多  $\text{Na}^+$ , 可减少  $\text{Na}^+$  对叶片的毒害。盐胁迫下, 黄华占叶片中  $\text{K}^+$  含量与对照无显著变化, 但其叶鞘及根系中  $\text{K}^+$  含量在土壤全盐含量为 4.64 g/kg 条件下, 其  $\text{K}^+$  含量大幅降低, 降幅分别达 53.8% 和 70.0%; 海稻 86 各器官中  $\text{K}^+$  含量随盐胁迫程度增加而逐渐下降, 叶片中  $\text{K}^+$  含量降幅相对较低。随着盐胁迫程度加深, 黄华占叶鞘中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量显著下降, 而海稻 86 无显著变化; 此外, 与黄华占相比, 海稻 86 具有较强抑制  $\text{Na}^+$ , 促进  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  向上运输的能力。

**关键词** 水稻; 海稻 86; 盐胁迫; 耐盐阈值; 矿质元素; 选择性运输

**中图分类号** S 511.501 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)04-0007-08

土壤盐碱化是一个全球性的资源与环境问题, 约 20% 的灌溉土壤受到土壤盐碱化的危害, 导致粮食作物大幅减产<sup>[1]</sup>。水稻是重要的粮食作物, 开发研究耐盐碱水稻品种可以减轻土壤盐碱化对水稻生产带来的危害, 有助于提升粮食安全水平<sup>[2]</sup>。由土壤盐碱化导致的盐胁迫是抑制水稻植株生长、导致粮食大幅减产的主要因素, 土壤盐分聚集导致植物被迫吸收并积聚过多的盐分离子, 植物细胞质内  $\text{Na}^+$  等盐分离子浓度过高, 将对植物造成离子毒害。研究表明, 水稻在盐碱胁迫下,  $\text{Na}^+$  主要在根部累积, 叶鞘中  $\text{Na}^+$  含量多于叶片, 是水稻适应盐碱胁迫的一种重要的生理机制<sup>[3]</sup>, 当叶片中  $\text{Na}^+$  累积量超过细胞区隔化能力, 将造成盐害。另外, 植物对某些矿质元素的吸收存在拮抗关系, 盐胁迫下植物对  $\text{Na}^+$  吸收较多, 将抑制植物对其他某些矿质元素(如  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  等)的吸收, 造成营养亏缺<sup>[4]</sup>。为适应盐胁迫, 维持植株体内矿质元素的平衡对提高水稻耐盐性具有重要作用<sup>[2]</sup>。

海稻 86 是一种盐碱耐性强的水稻品种, 其萌发期及幼苗期的强盐碱耐性已被证实, 其耐性生理机制也得到初步解析<sup>[5-7]</sup>。但水稻不同生育期耐盐性

是不同的<sup>[8]</sup>, 矿质元素的代谢调节是水稻耐盐性机制中的重要部分<sup>[2,9]</sup>, 因此, 需要进一步完善海稻 86 盐耐性的鉴定及耐性机制解析。本研究采用盆栽试验方法, 以黄华占为对照, 探讨盐胁迫对海稻 86 植株生长及矿质元素吸收、运输和分配的影响, 旨在为海稻 86 盐碱耐性解析及后续研究提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验品种为海稻 86, 对照品种为黄华占(不耐盐水稻品种), 供试品种由武汉海稻国际生物科技有限公司提供。试验于 2018 年在长江大学农学院试验基地进行。

### 1.2 试验设计与方法

采用盆栽试验方法, 人工配制盐土, 设置 5 个海盐质量分数处理 S1~S5, 分别为 0.3%、0.4%、0.5%、0.6%、0.7%, 以不加海盐为对照, 记为 S0。3 个重复, 每重复 3 盆, 每盆 10 穴, 每穴 1 株。

盐土配制方法, 在风干土中拌入海盐, 风干土为荆州水稻土, 取自土壤耕层 0~20 cm, 土壤碱解氮 64.22 mg/kg, 速效磷 17.54 mg/kg, 速效钾 94.33

收稿日期: 2019-12-09

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2018YFD0301306)

赵记伍, 硕士研究生. 研究方向: 作物逆境生理生态. E-mail: 464688059@qq.com

通信作者: 王晓玲, 教授. 研究方向: 作物栽培生理. E-mail: wangxl309@yangtzeu.edu.cn

mg/kg, 有机质 18.81 g/kg, pH 值 7.54, 全盐含量 0.62 g/kg(非盐土), 每盆装入风干土 10 kg(盆规格: 上下口径分别为 33、30 cm, 高 27 cm), 加入 6 g 复合肥(25-10-16, 总养分 $\geq 51\%$ ), 根据相应的海盐质量分数处理加入对应质量的海盐, 充分拌匀, 灌入淡水泡土, 水面距盆口 2 cm, 确保无水溢出, 泡土时间为 7 d。

早育秧技术育苗, 育秧土为荆州水稻土, 试验于 6 月 12 日播种, 秧龄 25 d 时选素质一致的秧苗移栽, 根系用清水洗净, 防止根系带土中和土壤盐分, 盆栽全程置于防雨的透明塑料薄膜大棚中。移栽后进行统一的肥水管理, 使用淡水进行灌溉, 灌溉要求无水溢出, 防止盐分流失。海稻 86 于 10 月 12 日抽穗, 11 月 26 日收获; 黄华占于 8 月 29 日抽穗, 10 月 13 日收获。

供试土壤 pH 值及全盐含量检测结果见表 1。风干土加入不同浓度海盐后, 土壤全盐含量显著上升, pH 值无显著变化。

表 1 供试土壤 pH 值及全盐含量

Table 1 The pH value and total salt content of soil

处理 Treatment	海盐质量分数/% Concentration of sea-salt	pH 值 pH value	全盐含量/(g/kg) Total salt content
S0	0.0	7.54 $\pm$ 0.17a	0.62 $\pm$ 0.08e
S1	0.3	7.60 $\pm$ 0.03a	4.64 $\pm$ 0.48d
S2	0.4	7.62 $\pm$ 0.04a	7.13 $\pm$ 0.53c
S3	0.5	7.57 $\pm$ 0.05a	8.54 $\pm$ 1.06bc
S4	0.6	7.47 $\pm$ 0.08a	9.33 $\pm$ 0.80b
S5	0.7	7.51 $\pm$ 0.07a	11.78 $\pm$ 1.52a

注: 同列数据后跟不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ), 表 2 同此。Note: Means in the same column with different small letters indicated significant difference at 0.05 level. The same as Table 2.

### 1.3 植株存活率统计及干物质质量测定

植株存活率: 于收获日统计植株存活数, 植株存

活率 = 存活数 / 移栽苗数  $\times 100\%$ 。

植株干物质量: 收获地上部植株, 于 105 °C 杀青 30 min, 在 80 °C 下烘干至恒质量, 称取干质量。

### 1.4 矿质元素的测定及选择性运输系数 $S_{(X, Na^+)}$ 的计算

收获后, 分别取海稻 86、黄华占各处理盆中植株材料(叶片、叶鞘、根系)。使用去离子水洗净、烘干、剪短后粉碎、过筛, 采用原子吸收分光光度计(用盐酸浸提法对植株样品进行前处理)检测其中的  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  等离子含量<sup>[10]</sup>。

矿质元素选择性运输系数  $S_{(X, Na^+)}$  值越大表示源器官抑制  $Na^+$ , 促进库器官对 X 的吸收及运输的能力越强<sup>[11]</sup>。计算公式为:  $S_{(X, Na^+)} = \text{库器官}_{(X/Na^+)}/\text{源器官}_{(X/Na^+)}$ , 式中 X 表示  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 。

### 1.5 数据处理

采用 Excel、DPS 统计软件对数据进行相关处理和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐胁迫对海稻 86 与黄华占生长的影响

盐胁迫下, 海稻 86 与黄华占植株存活率均下降(表 2)。比较海稻 86 与黄华占生长状况: 海稻 86 在 S1~S4 盐胁迫处理时植株存活率均为 100%, 在 S5 时开始出现死苗, 植株存活率为 68.89%; 黄华占在 S1 时即出现死苗, 且随盐胁迫程度升高, 存活率越低, 在 S3 时仅为 58.89%, 在 S5 时, 植株全部死亡。

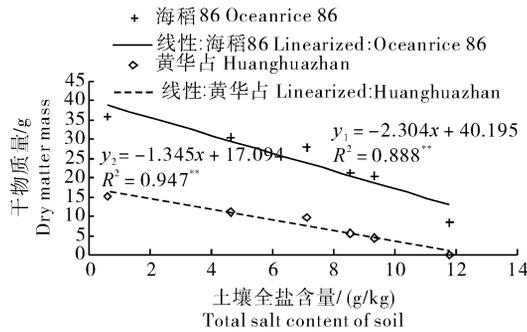
盐胁迫下, 海稻 86 与黄华占干物质量均较对照下降, 盐胁迫程度越高, 干物质量越低, 在 S1 时, 海稻 86 干物质量较对照差异不显著, 而黄华占较对照显著下降(表 2)。海稻 86 与黄华占地上部干物质

表 2 盐胁迫下植株存活率及干物质量

Table 2 Plant survival rate and dry matter under salt stress

处理 Treatment	植株存活率/% Plant survival		干物质量/g Dry matter weight	
	海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan	海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan
S0	100.00	100.00	35.84 $\pm$ 3.47a	15.20 $\pm$ 0.87a
S1	100.00	97.78	30.47 $\pm$ 6.27ab	11.12 $\pm$ 0.72b
S2	100.00	92.22	27.86 $\pm$ 1.43b	9.74 $\pm$ 0.71c
S3	100.00	58.89	21.29 $\pm$ 4.01c	5.60 $\pm$ 0.54d
S4	100.00	50.00	20.43 $\pm$ 1.81c	4.35 $\pm$ 0.20e
S5	68.89	0.00	8.42 $\pm$ 1.08d	0.00 $\pm$ 0.00f

量与土壤全盐含量均显著线性相关(图 1)。根据线性回归方程,以生长量或生物量下降 50%为标准,界定植物耐盐阈值<sup>[11]</sup>,计算得海稻 86 与黄华占耐盐阈值分别为 8.72、6.35 g/kg。



\*\* 表示 0.01 显著水平。 \*\* represent significant levels of 0.01, the same as below.

图 1 海稻 86 与黄华占植株干物质量与土壤全盐含量的回归

Fig.1 Linear regression of aboveground dry matter under salt stress

表 3 盐胁迫下植株叶片、叶鞘及根系中 Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 含量

Table 3 Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> content of leaves, leaf sheaths and roots under salt stress

g/kg

器官 Organ	处理 Treatment	Na <sup>+</sup> 含量 Na <sup>+</sup> content		K <sup>+</sup> 含量 K <sup>+</sup> content	
		海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan	海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan
叶片 Leaf	S0	0.80±0.09f	0.69±0.12d	7.92±0.11a	7.71±0.60a
	S1	3.57±0.51e	7.47±0.38c	6.19±0.53b	7.23±0.65a
	S2	5.67±0.87d	9.72±0.80c	5.76±0.19bc	7.79±0.96a
	S3	7.69±1.18c	12.62±1.49b	5.79±0.19bc	7.67±0.50a
	S4	11.41±0.30b	18.51±2.25a	5.31±0.21c	7.79±0.92a
	S5	14.89±1.68a	—	5.43±0.15c	—
叶鞘 Leaf sheath	S0	3.19±0.45e	2.35±0.72c	5.08±0.25a	5.85±0.94a
	S1	7.53±0.58d	9.06±1.09b	3.04±0.65b	2.70±0.42b
	S2	10.30±1.09c	9.64±0.30ab	2.99±0.72b	2.83±0.47b
	S3	11.17±1.31c	10.86±3.84ab	2.51±0.12bc	2.98±0.84b
	S4	13.39±0.40b	12.83±2.15a	2.17±0.13c	3.01±0.16b
	S5	16.37±1.70a	—	2.19±0.16c	—
根系 Root	S0	2.62±0.24f	1.88±0.07e	0.85±0.04a	0.70±0.18a
	S1	4.81±0.53e	3.97±0.42d	0.58±0.10b	0.21±0.02b
	S2	5.77±0.77d	5.42±0.59c	0.41±0.04c	0.27±0.04b
	S3	6.82±0.21c	6.79±0.29b	0.33±0.05cd	0.28±0.06b
	S4	8.32±0.40b	7.98±0.19a	0.24±0.02d	0.29±0.04b
	S5	10.15±0.47a	—	0.32±0.03cd	—

注:同一品种、同一器官后跟不同小写字母表示差异显著(P<0.05),表 4 同此。Note: Means of mineral element content of the same variety and organ with different small letters indicated significant difference at 0.05 level, The same as Table 4.

量无显著变化,叶鞘及根系 K<sup>+</sup> 含量显著下降(表 3)。总体趋势上,盐胁迫下,黄华占以维持叶片 K<sup>+</sup> 含量稳定为关键,直到植株趋近死亡,叶片中

## 2.2 盐胁迫对海稻 86 矿质元素吸收、运输及分配的影响

1)盐胁迫对 Na<sup>+</sup> 含量的影响。盐胁迫下,海稻 86 与黄华占各器官(叶片、叶鞘及根系)Na<sup>+</sup> 含量均显著上升,盐胁迫程度越高,Na<sup>+</sup> 含量越大(表 3)。在相同盐胁迫下,海稻 86 各器官中 Na<sup>+</sup> 含量较对照 S0 增幅均低于黄华占。在不同器官中,相同盐胁迫下,海稻 86 叶片 Na<sup>+</sup> 含量均低于黄华占;在叶鞘中,海稻 86 在 S1 处理下,Na<sup>+</sup> 含量低于黄华占,而随着盐胁迫程度加深,海稻 86 叶鞘中 Na<sup>+</sup> 含量逐渐高于黄华占;相同盐胁迫下,海稻 86 根系中 Na<sup>+</sup> 含量始终高于黄华占。结果表明,海稻 86 各器官 Na<sup>+</sup> 含量受盐胁迫影响程度较黄华占小,盐胁迫扰乱了植株体内 Na<sup>+</sup> 的分配格局,与黄华占相比,海稻 86 叶鞘及根系能积聚更多的 Na<sup>+</sup> 以减少其对叶片的毒害。

2)盐胁迫对 K<sup>+</sup> 含量的影响。盐胁迫下,海稻 86 各器官 K<sup>+</sup> 含量均显著下降,黄华占叶片 K<sup>+</sup> 含

量仍较对照差异不显著,但叶鞘及根系中 K<sup>+</sup> 含量大幅降低,在 S1 处理下降幅分别达 53.8%和 70.0%;盐胁迫下,海稻 86 各器官中 K<sup>+</sup> 含量均逐

渐降低,在 S5 处理下,叶片降幅为 31.4%,而叶鞘与根系在 S1 处理下降幅即分别达到 40.2% 和 31.8%,与叶鞘及根系相比,叶片  $K^+$  含量降幅相对较低。

3) 盐胁迫对  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量及选择性运输的影响。盐胁迫不仅对植株  $Na^+$ 、 $K^+$  含量影响显著,对  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  也有较大影响(表 4)。在本试验条件

下,盐胁迫对海稻 86 各器官中  $Ca^{2+}$  含量影响不显著( $P>0.05$ ),黄华占叶鞘中  $Ca^{2+}$  含量随盐胁迫程度增加而逐渐减少,达极显著水平( $P<0.01$ )。盐胁迫显著增加了海稻 86 叶片中  $Mg^{2+}$  含量,对黄华占叶片中  $Mg^{2+}$  含量影响不显著,但盐胁迫显著降低了黄华占叶鞘中  $Mg^{2+}$  含量,且随盐胁迫程度增加逐渐降低。

表 4 盐胁迫下植株叶片、叶鞘及根系中  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量

Table 4  $Ca^{2+}$  and  $Mg^{2+}$  content of leaves, leaf sheaths and roots under salt stress

g/kg

器官 Organ	处理 Treatment	$Ca^{2+}$ 含量 $Ca^{2+}$ content		$Mg^{2+}$ 含量 $Mg^{2+}$ content	
		海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan	海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan
叶片 Leaf	S0	10.97±0.39a	14.93±0.44ab	0.44±0.03d	0.68±0.02a
	S1	11.13±0.05a	15.11±0.44a	0.54±0.01a	0.69±0.02a
	S2	10.89±0.23a	14.48±0.36bc	0.51±0.02abc	0.61±0.10a
	S3	10.80±0.23a	14.25±0.29c	0.49±0.01bc	0.65±0.01a
	S4	10.95±0.23a	15.01±0.12ab	0.52±0.02ab	0.68±0.01a
	S5	11.09±0.22a	—	0.47±0.02cd	—
叶鞘 Leaf sheath	S0	14.26±0.51abc	11.96±0.26a	0.65±0.02bc	0.54±0.01a
	S1	14.52±0.26abc	10.37±0.45bc	0.66±0.01abc	0.47±0.02b
	S2	14.23±0.38bc	10.68±0.58b	0.65±0.02abc	0.49±0.03b
	S3	14.90±0.29a	10.55±0.52b	0.68±0.02a	0.48±0.02b
	S4	14.75±0.22ab	9.40±0.65c	0.67±0.01ab	0.43±0.03c
	S5	14.07±0.27c	—	0.64±0.01c	—
根系 Root	S0	11.21±0.46ab	11.91±0.22a	0.51±0.02ab	0.54±0.01a
	S1	11.02±1.66b	12.18±0.40a	0.50±0.08ab	0.55±0.02a
	S2	12.52±0.48a	11.89±0.49a	0.57±0.02a	0.54±0.02a
	S3	10.93±0.46b	12.01±0.25a	0.50±0.02b	0.55±0.01a
	S4	10.54±0.17b	12.34±0.23a	0.48±0.01b	0.56±0.01a
	S5	10.82±0.45b	—	0.49±0.02b	—
F 值 F value	叶片 Leaf	0.84	3.76	10.08**	1.72
	叶鞘 Leaf sheath	2.35	9.18**	2.44	9.17**
	根系 Root	2.34	1.02	2.02	1.41

由图 2A、C 可见,植株根系→叶鞘  $S_{(Ca^{2+}, Na^+)}$ 、 $S_{(Mg^{2+}, Na^+)}$  值随土壤全盐含量的升高先降后增再降,即 O→A、A→B 和 B→C 3 个过程,A 点和 B 点是过程转变的拐点。整体上,与黄华占相比,海稻 86 植株根系→叶鞘  $S_{(Ca^{2+}, Na^+)}$ 、 $S_{(Mg^{2+}, Na^+)}$  值较高。随着土壤全盐含量上升,海稻 86 与黄华占分别在土壤全盐含量约为 7.5 g/kg 时达谷点 A,随着土壤全盐含量继续上升,分别在土壤全盐含量为 9.8 g/kg 时达到峰点 B,此后随着土壤全盐含量上升, $S_{(Ca^{2+}, Na^+)}$ 、 $S_{(Mg^{2+}, Na^+)}$  值均呈下降趋势,海稻 86 降幅较小。由图 2B、D 可知,叶鞘→叶片  $S_{(Ca^{2+}, Na^+)}$ 、 $S_{(Mg^{2+}, Na^+)}$  均随土壤全盐含量升高而降低,且呈显

著线性相关( $P<0.01$ ), $y_1$  回归系数绝对值均低于  $y_2$ 。在土壤全盐含量为 4.64 g/kg (S1) 时,海稻 86 与黄华占叶鞘→叶片  $S_{(Ca^{2+}, Na^+)}$  较对照降幅分别为 47.09%、58.66%,此外,叶鞘→叶片  $S_{(Mg^{2+}, Na^+)}$  较对照降幅分别为 36.32%、58.66%,海稻 86 降幅均较低。结果表明,盐胁迫下,海稻 86 较黄华占具有较强抑制  $Na^+$ ,促进  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  向上运输的能力。

### 2.3 盐胁迫下地上部植株干物质质量与矿质元素含量及离子选择性运输系数相关性分析

由表 5 可知,盐胁迫下,植株各器官中  $Na^+$  含量与植株干物质质量相关性最强,呈极显著负相关

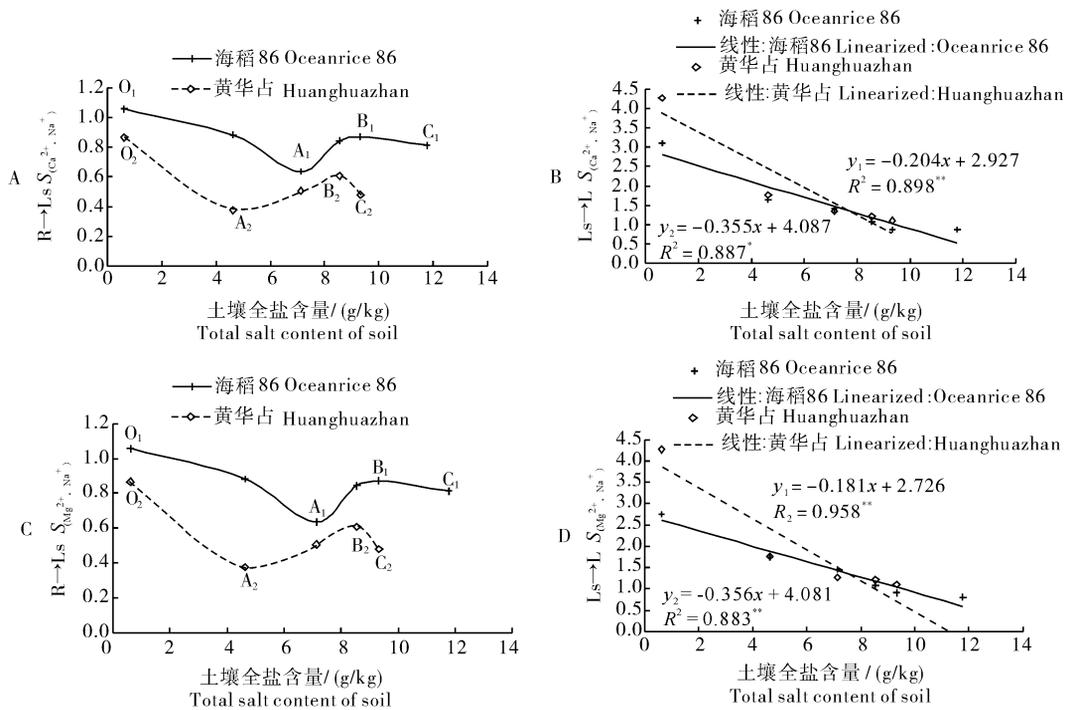


图 2 不同盐胁迫对植株从根到地上部器官选择性运输  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的影响  
 Fig.2 Effects of salt stress on  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  selectively transported from the root to the aboveground parts of rice plants

表 5 盐胁迫下植株地上部干物质与矿质元素含量及选择性运输系数相关性分析

Table 5 Correlation analysis of aboveground dry matter, mineral element content and selective transport coefficient of rice plants

项目 Item	海稻 86 Oceanrice 86	黄华占 Huanghuazhan	
$\text{Na}^+$	叶片 Leaf	-0.97**	-0.97**
	叶鞘 Leaf sheath	-0.95**	-0.93**
	根系 Root	-0.98**	-0.99**
$\text{K}^+$	叶片 Leaf	0.76*	-0.27
	叶鞘 Leaf sheath	0.80*	0.71
	根系 Root	0.79*	0.67
$\text{Ca}^{2+}$	叶片 Leaf	-0.11	0.34
	叶鞘 Leaf sheath	0.07	0.86*
	根系 Root	0.39	-0.58
$\text{Mg}^{2+}$	叶片 Leaf	0.02	0.14
	叶鞘 Leaf sheath	0.07	0.86*
	根系 Root	0.39	-0.58
$S_{(\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+)}$	Ls→L	0.81*	0.86*
	R→Ls	0.36	0.51
$S_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+)}$	Ls→L	0.87*	0.85*
	R→Ls	0.36	0.51

注: \*、\*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下差异显著。Note: \*, \*\* indicated significant difference at 0.05 and 0.01 level.

( $P < 0.01$ ),  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量与植株干物质相关性存在品种与器官间差异, 海稻 86 各器官中  $\text{K}^+$  含量与干物质质量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而黄华占未达到显著水平。植株地上部干物质质量与叶鞘→叶片  $S_{(\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+)}$ 、 $S_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+)}$  均呈显著正相关, 与根系→叶鞘  $S_{(\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+)}$ 、 $S_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+)}$  均未达显著相关水平。

### 3 讨论

植株存活率和干物质质量变化能直接反映其受盐胁迫危害程度, 前人常以植株生长量或生物量下降 50% 为标准, 界定植物的耐盐阈值<sup>[11-12]</sup>。本试验结果表明, 与黄华占相比, 海稻 86 在盐胁迫下, 植株存活率高, 植株干物质质量受影响程度相对较小。海稻 86 与黄华占耐盐阈值分别为 8.72、6.35 g/kg, 与黄华占相比, 海稻 86 表现出较强的耐盐能力。

植株对矿质元素的吸收受土壤盐分的影响, 盐胁迫能扰乱水稻植株矿质元素吸收平衡<sup>[13]</sup>。研究表明, 盐胁迫对植株造成伤害的主要矿质元素是  $\text{Na}^+$ , 植株通过根系对矿质元素进行选择吸收, 然后在器官、组织及细胞水平对  $\text{Na}^+$  等离子区隔化是

其重要的耐盐机制<sup>[14-15]</sup>。本试验结果表明,与黄华占相比,相同盐胁迫下,海稻 86 各器官中  $\text{Na}^+$  含量增幅较低,表现出较强的拒  $\text{Na}^+$  能力。研究表明,水稻不同器官(茎鞘、根系及叶片)对盐胁迫的反应是不一样的<sup>[16]</sup>,叶鞘主要是由含中央大液泡的薄壁细胞组成,而中央大液泡具有储存细胞液、调节细胞渗透压等功能,叶片主要由叶肉细胞组成,含大量叶绿体,液泡占比小,对  $\text{Na}^+$  敏感,利用叶鞘截留  $\text{Na}^+$ ,形成  $\text{Na}^+$  库,对维持植株生理代谢具有重要作用<sup>[17]</sup>。本试验结果表明,与黄华占相比,海稻 86 能更多地将  $\text{Na}^+$  分配到叶鞘及根系中以减少  $\text{Na}^+$  对叶片的毒害,与前人研究结果<sup>[18]</sup>类似。 $\text{Na}^+$  可通过  $\text{K}^+$  转运载体进入植物细胞,植物对  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的吸收存在拮抗关系<sup>[3]</sup>。本研究结果表明,盐胁迫下,黄华占叶片中  $\text{K}^+$  含量稳定,直到植株趋近死亡,叶片中  $\text{K}^+$  含量较平衡状态无显著差异,但其叶鞘及根系  $\text{K}^+$  含量在较低盐胁迫下即大幅降低,海稻 86 各器官中  $\text{K}^+$  含量则表现为随盐胁迫程度加深而逐渐降低,叶片中  $\text{K}^+$  含量降幅相对较低。这与前人研究结果存在差异,前人研究认为,植株耐盐性不仅取决于叶片中  $\text{Na}^+$  含量,保持叶片中较高  $\text{K}^+$  含量也是植物具备强盐耐性的重要原因<sup>[19]</sup>,而本试验结果显示不耐盐品种黄华占维持叶片中  $\text{K}^+$  含量稳定的能力强于耐盐品种海稻 86,可能原因是,海稻 86 对  $\text{Na}^+$  的调控作用远优于黄华占,进入植株叶片的  $\text{Na}^+$  远少于黄华占,在这一情况下,稳定  $\text{K}^+$  在不同器官间含量可能更有利于海稻 86 的生长发育。此外,本试验结果还表明,海稻 86 各器官  $\text{K}^+$  含量与其干物质质量均达到显著相关水平,而黄华占并未达显著相关水平,表明植株  $\text{K}^+$  含量并不能有效指示某些品种耐盐能力。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  参与调节植株多种生长代谢活动,盐胁迫导致植株对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  吸收失衡<sup>[20]</sup>。本试验中盐胁迫下,黄华占叶鞘中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  含量随盐胁迫程度加深而显著下降,而海稻 86 无显著变化,这对维持叶片光合作用及其他生理代谢活动具有重要作用<sup>[20]</sup>。

矿质元素选择性运输系数能反映植株抑制  $\text{Na}^+$ 、促进其他矿质元素向上运输的能力<sup>[21]</sup>。本试验结果表明,根系对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  向叶鞘选择性运输能力随盐胁迫程度加深先降后升再降。李菊艳等<sup>[22]</sup>研究表明,轻中度盐胁迫下,胡杨幼苗  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  由根向茎的运输受到抑制,而在重度盐胁迫下,选择性运输能力显著提高,与本试验结果类似,

总体上,与黄华占相比,相同盐胁迫下海稻 86 根系对  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  向叶鞘选择性运输能力更强;此外,本试验结果还表明,植株叶鞘抑制  $\text{Na}^+$ ,促进  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  向叶片运输的能力与盐胁迫程度呈显著负相关,与黄华占相比,盐胁迫对海稻 86 影响程度相对较小,即与黄华占相比,海稻 86 具有较强抑制  $\text{Na}^+$ ,促进  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  向上运输的能力。

前人研究表明,小麦对盐胁迫敏感程度与地上部植株  $\text{Na}^+$  含量呈显著正相关<sup>[23]</sup>,盐胁迫下,矿质元素  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  选择性运输系数越大,表示植株抑制  $\text{Na}^+$ ,促进矿质离子向上运输能力越强,耐盐性也就越强<sup>[24]</sup>。本试验结果表明,植株各器官中  $\text{Na}^+$  含量与植株干物质质量均呈极显著负相关,与叶鞘→叶片  $S_{(\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+)}$ 、 $S_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+)}$  值均呈显著正相关。表明植株各器官  $\text{Na}^+$  含量和叶鞘→叶片  $S_{(\text{Ca}^{2+}, \text{Na}^+)}$ 、 $S_{(\text{Mg}^{2+}, \text{Na}^+)}$  值可作为评价植株耐盐性的参考指标,这与李树华等<sup>[23]</sup>在春小麦以及董静等<sup>[24]</sup>在马齿苋中的研究结果类似。

本试验主要对海稻 86 耐盐阈值及在对矿质元素离子吸收、运输及分配进行了研究,自然盐碱环境中,盐碱土常以混合形式存在,而盐胁迫与碱胁迫是不同性质的胁迫,两者对作物的危害具有相似点,但也存在差别<sup>[25]</sup>,后期将对海稻 86 耐碱性进行研究,完善海稻 86 盐碱耐性机制。

## 参考文献 References

- [1] QADIR M, QUILLEROU E, NANGIA V, et al. Economics of salt-induced land degradation and restoration[J]. Natural resources forum, 2014, 38(4): 282-295.
- [2] RADANIELSON A M, ANGELES O, LI T, et al. Describing the physiological responses of different rice genotypes to salt stress using sigmoid and piecewise linear functions[J]. Field crops research, 2018, 220: 46-56.
- [3] 王志春, 杨福, 陈渊, 等. 苏打盐碱胁迫下水稻体内的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  响应[J]. 生态环境, 2008, 17(3): 1198-1203. WANG Z C, YANG F, CHEN Y, et al. Sodium and potassium responses to sodicity stress in rice[J]. Ecology and environment, 2008, 17(3): 1198-1203(in Chinese with English abstract).
- [4] 张金林, 李惠茹, 郭妹媛, 等. 高等植物适应盐逆境研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 220-236. ZHANG J L, LI H R, GUO S Y, et al. Research advances in higher plant adaptation to salt stress[J]. Acta prataculturae sinica, 2015, 24(12): 220-236(in Chinese with English abstract).
- [5] 赵记伍, 雷传松, 刘永权, 等. 海稻 86 萌发期耐盐碱性特征初探[J]. 中国稻米, 2018, 24(3): 87-92. ZHAO J W, LEI C S, LIU Y Q, et al. Primary exploration on saline-alkali tolerance

- of Haidao 86 in germination period[J]. *China rice*, 2018, 24(3):87-92(in Chinese with English abstract).
- [6] 李婷,朱长波,李俊伟,等.海水胁迫对海稻86种子萌发和幼苗生长的影响[J].*南方农业学报*,2018,49(7):1297-1303. LI T,ZHU C B,LI J W, et al. Effects of seawater stress on seed germination and seedling growth of Sea rice 86[J]. *Journal of southern agriculture*, 2018, 49(7):1297-1303(in Chinese with English abstract).
- [7] 祝一文,赵方贵,成云峰,等.‘海稻86’耐盐碱胁迫生理机制的初步研究[J].*青岛农业大学学报(自然科学版)*,2018,35(1):32-39. ZHU Y W,ZHAO F G,CHENG Y F, et al. The preliminary study on alkali-salt tolerance of ‘Sea rice 86’ and physiological mechanisms[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (natural science edition)*, 2018, 35(1):32-39(in Chinese with English abstract).
- [8] SINGH D,SINGH A,MISHRA S, et al. Allelic diversity for salt stress responsive candidate genes among Indian rice landraces[J]. *Indian journal of biotechnology*, 2016, 15(1):25-33.
- [9] MUNNS R,TESTER M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. *Annual review of plant biology*, 2008, 59(1):651-681.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000(in Chinese).
- [11] 於朝广,李颖,谢寅峰,等. NaCl胁迫对中山杉幼苗生长及离子吸收、运输和分配的影响[J]. *植物生理学报*, 2016, 52(9):1379-1388. YU C G,LI Y,XIE Y F, Effects of NaCl stress on growth and absorption, transportation and distribution of ions in Zhongshanshan seedlings [J]. *Plant physiology journal*, 2016, 52(9):1379-1388(in Chinese with English abstract).
- [12] 王殿,袁芳,王宝山,等.能源植物杂交狼尾草对NaCl胁迫的响应及其耐盐阈值[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(6):572-577. WANG D,YUAN F,WANG B S, et al. Response of plant biofuel hybrid *Pennisetum* to NaCl stress and its salinity threshold [J]. *Chinese journal of plant ecology*, 2012, 36(6):572-577(in Chinese with English abstract).
- [13] 赵海燕,孙志国,管永祥,等.保水缓释肥对盐胁迫下水稻矿质元素分配的调控[J]. *土壤学报*, 2016, 53(5):1316-1325. ZHAO H Y,SUN Z G,GUAN Y X, et al. Regulation of water retaining controlled-release fertilizer on distribution of mineral elements in rice plants under salt stress[J]. *Acta pedologica sinica*, 2016, 53(5):1316-1325(in Chinese with English abstract).
- [14] 刘庆,董元杰,刘双,等.外源SA对盐胁迫下棉花幼苗生长、叶绿素含量及矿质元素吸收的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6):167-171. LIU Q,DONG Y J,LIU S, et al. Effects of exogenous salicylic acid on growth, chlorophyll content and mineral nutrients absorption of cotton seedlings under salt stress [J]. *Journal of soil and water conservation*, 2013, 27(6):167-171(in Chinese with English abstract).
- [15] ABDUL S,MUMTAZ A C,HAKOOMAT A, et al. Silicon mediates the changes in water relations, photosynthetic pigments, enzymatic antioxidants activity and nutrient uptake in maize seedling under salt stress[J]. *Grassland science*, 2016, 62(4):262-269.
- [16] SAINI S,KAUR N,PATI P K, et al. Reactive oxygen species dynamics in roots of salt sensitive and salt tolerant cultivars of rice[J]. *Analytical biochemistry*, 2018, 550:99-108.
- [17] 王宝山,邹琦. NaCl胁迫对高粱根、叶鞘和叶片液泡膜ATP酶和焦磷酸酶活性的影响[J]. *植物生理学报*, 2000, 26(3):181-188. WANG B S,ZHOU Q. Effects of NaCl stress on the tonoplast ATPase and PPase activity in roots, sheaths and blades of sorghum seedlings[J]. *Acta photophysiological sinica*, 2000, 26(3):181-188(in Chinese with English abstract).
- [18] 王旭明,赵夏夏,黄露莎,等.盐胁迫下4个不同耐盐基因型水稻Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>积累效应[J]. *热带作物学报*, 2018, 39(11):2140-2146. WANG X M,ZHAO X X,HUANG L S, et al. The Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> accumulative effect of four different salt tolerance genotypes in rice under salt stress[J]. *Chinese journal of tropical crops*, 2018, 39(11):2140-2146(in Chinese with English abstract).
- [19] SHABALA S,CUIN T A. Potassium transport and plant salt tolerance[J]. *Physiologia plantarum*, 2008, 133(4):651-669.
- [20] 谷亚娟,李景鹏,杨福,等.盐碱胁迫对水稻稻壳和籽粒中矿质元素含量的影响[J]. *土壤与作物*, 2019, 8(1):50-59. GU Y J, LI J P,YANG F, et al. Effects of saline-alkaline stress on mineral element contents in rice husk and grain [J]. *Soils and crops*, 2019, 8(1):50-59(in Chinese with English abstract).
- [21] 周琦,祝遵凌. NaCl胁迫对2种鹅耳枥幼苗生长及离子吸收、分配与运输的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(12):7-16. ZHOU Q,ZHU Z L. Effects of NaCl stress on seedling growth and mineral ions uptake, distribution and transportation of two varieties of *Carpinus* L[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(12):7-16(in Chinese with English abstract).
- [22] 李菊艳,赵成义,闫映宇,等.盐分对胡杨(*Populus euphratica*)幼苗生长和离子平衡的影响[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(3):613-620. LI J Y,ZHAO C Y,YAN Y Y, et al. Effect of salinity on growth, ionic homeostasis in organs of *Populus euphratica* seedlings[J]. *Arid land geography*, 2016, 39(3):613-620(in Chinese with English abstract).
- [23] 李树华,许兴,惠红霞,等.土壤盐碱胁迫对春小麦K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>选择性吸收的影响[J]. *西北植物学报*, 2002, 22(3):587-594. LI S H,XU X,HUI H X, et al. Study on K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> selective absorption of different organs of spring wheat under soil saline sodic stress in different growth season[J]. *Acta botanica boreali-occidentalia sinica*, 2002, 22(3):587-594(in Chinese with English abstract).
- [24] 董静,邢锦城,洪立洲,等. NaCl胁迫对马齿苋幼苗生长及体内离子分布的影响[J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(2):236-243. DONG J,XING J C,HONG L Z, et al. Effects of NaCl treatments on growth and ion distribution of *Portulaca oleracea* seedlings[J]. *Acta agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(2):

236-243(in Chinese with English abstract).

[25] 王俭珍,刘倩,高娅妮,等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报,2017,37(16):5565-5577. WANG Q Z,LIU

Q,GAO Y N,et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta ecologica sinica, 2017,37(16):5565-5577(in Chinese with English abstract).

## Effects of salt stress on growth of Oceanrice 86 and absorption, transportation and distribution of mineral elements

ZHAO Jiwu<sup>1</sup>,CHENG Yunfeng<sup>2</sup>,LIU Yongquan<sup>2</sup>,XIANG Yongling<sup>1</sup>,HUANG Yi<sup>1</sup>,WANG Xiaoling<sup>1</sup>

1.College of Agriculture,Yangtze University,Jingzhou 434025,China;

2.Wuhan Oceanrice International Biotech Co.,LTD,Wuhan 430205,China

**Abstract** The pot experiment was used to study the effects of salt stress on growth of Oceanrice 86 and absorption, transportation and distribution of mineral elements using Huanghuazhan as control. The results showed that salt stress inhibited the dry matter accumulation of rice plants. The salt tolerance threshold of Oceanrice 86 and Huanghuazhan was 8.72 g/kg and 6.35 g/kg, respectively. Compared with Huanghuazhan, salt tolerance of Oceanrice 86 was stronger. Under salt stress, Oceanrice 86 selectively absorbed  $\text{Na}^+$  through the root system and regulated the distribution of  $\text{Na}^+$  at the organ level. Its leaf sheath accumulated more  $\text{Na}^+$ , reducing the toxicity of  $\text{Na}^+$  to the leaves. The content of  $\text{K}^+$  in Huanghuazhan leaves did not change significantly from that of the control, but the  $\text{K}^+$  content in the leaf sheath and root system was 4.64 g/kg in the soil. The  $\text{K}^+$  content was greatly reduced by 53.8% and 70.0%, respectively. The  $\text{K}^+$  content in various organs of Oceanrice 86 gradually decreased with the increase of the degree of salt stress, and the decrease of  $\text{K}^+$  content in leaves was relatively low. The content of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  in the leaf sheath of Huanghuazhan decreased significantly with the increase of salt-stress, while Oceanrice 86 had no significant changes. Compared with Huanghuazhan, Oceanrice 86 had a strong ability to inhibit  $\text{Na}^+$  and promote the upward transport of  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$ .

**Keywords** rice; Oceanrice 86; salt stress; salt tolerance threshold; mineral elements; selective transport

(责任编辑:张志钰)