

## 盐胁迫对热带水稻生长、生理生化特性及产量构成的影响

周玉杰, 贺治洲, 龙开意, 林秋云, 胡伟, 谢振宇\*

中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101

**摘要:** 我国土壤盐渍化问题日趋严重, 水稻是盐渍化土地改良的首选粮食作物, 而盐胁迫是影响水稻生长和产量的主要非生物胁迫之一。为全面深入了解盐胁迫对水稻的影响, 以 31 份不同耐盐性的热带水稻品种(系)为试验材料, 采用幼苗期培养箱水培法和全生育期盆栽土培法开展试验, 研究 0 NaCl (CK)、0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 对热带水稻生长、生理生化特性及产量构成的影响。结果表明: (1) 盐胁迫抑制了热带水稻幼苗和根系的生长。其中苗高和根数随 NaCl 浓度的升高而显著降低; 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的根长显著低于 CK 处理; 0.6% NaCl 处理的苗鲜重显著低于 CK 和 0.3% NaCl 处理。(2) 盐胁迫使热带水稻叶片的叶绿素积累降低, 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 及类胡萝卜素含量均显著低于 CK 处理; 脯氨酸 (Pro)、丙二醛 (MDA) 及  $\text{Na}^+$  积累增加, 0.6% NaCl 处理的 Pro 含量、MDA 含量及  $\text{Na}^+$  含量均显著高于 CK 和 0.3% NaCl 处理;  $\text{K}^+$  积累下降, 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的  $\text{K}^+$  含量显著低于 CK 处理。(3) 盐胁迫下, 热带水稻的分蘖数、穗数、穗长、穗粒数、千粒重及单株产量均随 NaCl 浓度的升高而显著降低。

**关键词:** 热带水稻; 盐胁迫; NaCl; 生理生化特性

中图分类号: S511.01 文献标识码: A

## Effects of Salt Stress on the Growth, Physiological and Biochemical Indices Characteristics and Yield Composition of Tropical Rice

ZHOU Yujie, HE Zhizhou, LONG Kaiyi, LIN Qiuyun, HU Wei, XIE Zhenyu\*

Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

**Abstract:** The problem of soil salinization in my country is becoming more and more serious. Rice is the preferred food crop for the improvement of salinized land, but salt stress is one of the main abiotic stresses that influence the growth and yield of rice. In order to fully understand the effect of salt stress on the rice, 31 varieties (lines) of tropical rice with different salt tolerance were used as experimental materials, and experiments were carried out by hydroponics in seedling stage incubator and potted soil cultivation method in the whole growth period, to study the effects of 0 NaCl (CK), 0.3% NaCl and 0.6% NaCl on the growth, physiological and biochemical characteristics, and yield composition of tropical rice. The result showed that: (1) The seedlings and roots growth of tropical rice were inhibited under salt stress. The seedling height and root number were significantly decreased with the increase of NaCl concentration, the root length in 0.3% NaCl and 0.6% NaCl treatments was significantly lower than CK treatments; and the fresh weight of seedling in 0.6% NaCl treatments was significantly lower than CK and 0.3% NaCl treatments. (2) Chlorophyll accumulation of tropical rice leaves were decreased under salt stress. The contents of chlorophyll a, chlorophyll b and Car in the treatments with 0.3% NaCl and 0.6% NaCl concentrations were significantly lower than CK treatments. The accumulation of proline (Pro), malondialdehyde (MDA) and  $\text{Na}^+$  were increased. The content of Pro and MDA and  $\text{Na}^+$  in the treatments with 0.6% NaCl concentration were significantly higher than treatments with CK and 0.3% NaCl concentration. The accumulation of  $\text{K}^+$  were decreased. The  $\text{K}^+$  content in the 0.3% NaCl and 0.6% NaCl concentration treatments was significantly lower than the CK concentration treatments. (3) Under salt stress, the tiller number, panicle number, panicle length, panicle grain number,

收稿日期 2022-09-21; 修回日期 2022-12-08

基金项目 海南省自然科学基金高层次人才项目 (No. 320RC727); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630032019037); 海南省重大科技计划项目 (No. ZDKJ202001)。

作者简介 周玉杰 (1980—), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 水稻栽培与生理生态。\*通信作者 (Corresponding author): 谢振宇 (XIE Zhenyu), E-mail: pzs-xzhy@163.com。

thousand-kernel weight and yield of per plant were significantly decreased with the increase of NaCl concentration.

**Keywords:** tropical rice; salt stress; NaCl; physiological and biochemical characteristics

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.12.018

沿海地区的盐渍土属于滨海盐土，是盐渍土的一个亚分类，海水浸渍是其形成的主要方式之一，即海水倒灌后海水的短期浸渍和田面滞水使海盐迅速积累在土壤中，造成沿海滩涂农田土壤向盐渍化演变。由于海水的主要成分是 NaCl 盐，沿海地区盐渍土的盐分组成与海水基本一致，以氯化物占绝对优势<sup>[1]</sup>。研究认为，沿海是我国盐渍土的主要集中分布地区之一<sup>[2]</sup>。处于热带沿海地区的海南岛几乎每年都会发生台风，引发海水倒灌，海水倒灌引发土地不同程度的盐渍化，严重影响了水稻的种植和生产，大量农田被迫弃耕。

水稻是重要的粮食作物之一，也是沿海滩涂和盐渍化土地开发利用的首选粮食作物，但水稻属盐敏感作物，对土壤中的盐分，特别是 NaCl 非常敏感。土壤盐分是影响水稻生长发育和产量最重要的环境因子，也是主要的非生物胁迫之一<sup>[3-4]</sup>。据早期的文献报道，世界上约 30% 的水稻种植土地受到盐分胁迫的影响<sup>[5-6]</sup>，如今该问题变得日趋严重。盐胁迫会明显抑制水稻的种子萌发和植株生长，并且影响到开花、穗的形成等，从而影响水稻的最终产量。研究表明，水稻在种子萌发阶段受到盐胁迫，会延迟种子萌发和出苗<sup>[7]</sup>，幼苗苗长、苗重、根长和根重都显著降低<sup>[8]</sup>。分蘖期受到盐胁迫，水稻分蘖高峰明显推迟或不出现分蘖高峰，抽穗期延长<sup>[9]</sup>，株高降低，单茎绿叶数和有效分蘖数减少<sup>[10]</sup>；孕穗期受到盐胁迫，水稻茎秆和花序的长度严重缩短，且有效穗数、千粒重等产量构成指标明显减低<sup>[11]</sup>。

国内外学者在盐胁迫对水稻生理生化的影响以及水稻对盐胁迫响应方面做了大量研究<sup>[12-15]</sup>。研究认为盐胁迫会产生渗透胁迫和离子毒害，从而抑制作物植株生长发育。渗透胁迫是盐胁迫下土壤中含有大量可溶性盐，降低了土壤渗透势，使作物根系吸水困难或根本不能吸水，从而使作物生长受到抑制<sup>[16]</sup>。植物体在遭受盐胁迫时，会自身合成一些有机物来调节渗透势和直接稳定蛋白质，如脯氨酸、可溶性糖等<sup>[17]</sup>，这些有机物在正常环境中积累量较低，但是在盐胁迫时就会随

着盐浓度的增加而增加从而降低细胞渗透势，保护细胞中蛋白质、蛋白复合物和膜结构免遭破坏，使细胞维持正常生理活动进而提高水稻耐盐性<sup>[18]</sup>。离子毒害是当作物受到盐胁迫后，细胞内  $K^+$  浓度降低， $Na^+$  浓度迅速升高， $Na^+$  取代  $K^+$  干扰氨基酸之间非共价键之间的相互作用，从而破坏蛋白质的构象和蛋白质功能。此外，盐胁迫下，水稻植株的正常代谢被扰乱，叶绿素酶活性的增加使叶绿素加速分解，导致植物的光合速率下降<sup>[19]</sup>。

尽管目前盐胁迫对水稻生长及生理生化的影响已有较多的研究，但涉及产量构成的研究相对甚少，尤其热带沿海地区土壤盐渍化对水稻生长发育及生理生化的影响少有报道。本研究以 31 份不同耐盐性的热带水稻品种（系）为试验材料，研究不同浓度 NaCl 胁迫对水稻幼苗期和全生育期的生长、生理生化特性及产量构成的影响，旨在为热带耐盐水稻资源筛选、品种选育、栽培以及生产实践提供重要依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本研究以中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所热带粮食作物研究中心收集和自主杂交培育的 31 份热带水稻品种（系）为试验材料（表 1）。

### 1.2 方法

1.2.1 种子萌发及幼苗期试验 热带水稻种子萌发及幼苗期试验设置 NaCl 溶液为 0 (CK)、0.3% 和 0.6% 三个处理。选择饱满谷粒，用蒸馏水清洗干净并均匀平铺于垫有滤纸的无菌培养皿中，每个培养皿放置 100 粒谷粒，每个品种每个处理重复 3 次。在 CK 处理的培养皿加入蒸馏水 20 mL，在盐胁迫处理的培养皿分别加入 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 盐溶液 20 mL，盖好皿盖，置于 30 °C 恒温箱内培养。每天更换等体积蒸馏水或盐溶液 1 次，保持整个试验期间盐胁迫处理的盐浓度恒定。

1.2.2 全生育期试验 盐胁迫对热带水稻生理生化特性及产量构成的影响采用全生育期培育法。试验在中国热带农业科学院热带作物品种资源研

表 1 试验材料及来源  
Tab. 1 Experimental materials and resources

编号 No.	品种 (系) Variety (line)	来源 Resource	编号 No.	品种 (系) Variety (line)	来源 Resource
1	ST003	国际水稻研究所	17	ST004	国际水稻研究所
2	2015S/ST003	自主杂交	18	ST005	国际水稻研究所
3	W20/ST003	自主杂交	19	ST007	国际水稻研究所
4	W25S/ST003	自主杂交	20	ST009	国际水稻研究所
5	Y58S/ST003	自主杂交	21	ST010	国际水稻研究所
6	晶 4155S/ST003	自主杂交	22	ST011	国际水稻研究所
7	ST006	国际水稻研究所	23	ST012	国际水稻研究所
8	隆香 634A/ST006	自主杂交	24	ST013	国际水稻研究所
9	C185S/ST006	自主杂交	25	ST014	国际水稻研究所
10	ST008	国际水稻研究所	26	ST015	国际水稻研究所
11	隆香 634A/ST008	自主杂交	27	ST016	国际水稻研究所
12	815S/ST008	自主杂交	28	ST017	国际水稻研究所
13	ST022	国际水稻研究所	29	ST018	国际水稻研究所
14	33S/ST022	自主杂交	30	ST019	国际水稻研究所
15	盐粳 156	江苏	31	ST020	国际水稻研究所
16	ST002	国际水稻研究所			

究所儋州水稻试验基地防雨大棚内采用盆栽土培法进行, 试验基土取自基地内水稻试验田土壤。以风干基土作为 CK 处理, 并设置 0.3% 和 0.6% 两个不同 NaCl 浓度处理。供试材料于育苗盘中播种培育至四叶一心期时移栽到种植框中, 每框种植 20 株秧苗, 框内插入相同刻度的标尺测定其水位, 保持 2 cm 左右水层。盐胁迫试验期间, 每日早上用盐度计监测盐分浓度并适时添加 NaCl 盐溶液或淡水, 以保证整个生育期种植框内盐溶液浓度保持相对稳定。

1.2.3 指标测定 (1) 生长指标测定。种子播种盐胁迫处理 20 d 后观察种子萌发及幼苗生长情况。首先计数每个培养皿内的发芽种子粒数和未发芽种子粒数, 计算发芽率; 再从中随机选取 10 株秧苗, 考察苗高、根数和根长; 最后分别收取每份试验材料各个处理的 3 个重复所有秧苗, 包括受盐胁迫影响、没有长成秧苗的种子, 称量鲜重。

(2) 生理生化特性指标测定。水稻幼苗期取新鲜叶片, 剪碎, 混匀, 称取 0.2 g 样品, 1 个重复为 1 份, 分别放入试管中, 加入 25 mL 95% 乙醇, 盖上试管塞, 用黑布遮盖置于黑暗处。于室温下放置 24 h 浸提至叶片全白, 将上清液装入比色皿中。利用分光光度计测定波长 665、649 和 470 下的 OD 值, 根据公式计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量。

水稻始穗期, 采集新鲜叶片用液氮处理后放入 -80 °C 超低温培养箱内保存测定可溶性糖含

量、脯氨酸 (Pro) 含量和丙二醛 (MDA) 含量。可溶性糖含量采用蒽酮法测定, Pro 含量采用酸性茚三酮法测定, MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定。同时, 每个处理随机选取 3 株水稻整株挖取, 洗净泥土, 带回实验室吸干水分, 于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 然后 80 °C 恒温下烘干至恒重, 用打粉机将植株样品磨成粉状, 采用原子分光光度法测定  $K^+$  和  $Na^+$  含量。

(3) 产量构成指标测定。在秧苗移栽 30 d 后计数水稻植株的分蘖数。水稻收获时, 各处理每个重复随机选取 5 株无病虫害的代表性植株, 测量穗长及计数穗数、穗粒数, 计算结实率, 稻谷自然晒干后测量水分含量并考察千粒重和单株产量。

### 1.3 数据处理

试验数据分别采用 Excel 软件进行数据初步处理, SPSS 19.0 统计软件进行差异显著性分析 (Waller-Duncan 法进行显著性检验)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 NaCl 胁迫对热带水稻种子萌发及幼苗生长的影响

由表 2 所示, 不同浓度 NaCl 处理间发芽率差异不显著, 说明 NaCl 胁迫对热带水稻种子萌发的影响不大。苗高和根数随 NaCl 浓度升高而明显降低, CK、0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理间的苗高和根数均存在显著差异; 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的根长显著低于 CK 处理, 但 0.3% NaCl 和

0.6% NaCl 处理间差异不显著; 0.6% NaCl 处理的苗鲜重显著低于 CK 和 0.3% NaCl 处理, 但 CK 和 0.3% NaCl 处理间的苗鲜重差异不显著。由此

可见, NaCl 胁迫抑制了热带水稻幼苗的长高和根系生长, 0.6% NaCl 胁迫使热带水稻苗鲜重显著降低。

表 2 不同浓度 NaCl 胁迫下热带水稻种子萌发及幼苗生长指标

Tab. 2 Seed germination and seedling growth indexes of tropical rice under NaCl stress of different concentrations

处理 Treatment	发芽率 Germination rate/%	苗高 Seedling height/cm	根数 Root number	根长 Root length/cm	苗鲜重 Seedling fresh weight/g
CK	93.98±5.70 <sup>a</sup>	11.6±1.29 <sup>a</sup>	12±1.85 <sup>a</sup>	6.0±1.30 <sup>a</sup>	1.92±0.55 <sup>a</sup>
0.3% NaCl	92.26±5.70 <sup>a</sup>	10.2±0.94 <sup>b</sup>	10±1.25 <sup>b</sup>	4.3±1.23 <sup>b</sup>	2.13±0.46 <sup>a</sup>
0.6% NaCl	91.01±6.10 <sup>a</sup>	7.6±0.99 <sup>c</sup>	9±1.55 <sup>c</sup>	4.6±1.34 <sup>b</sup>	1.81±0.54 <sup>b</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

## 2.2 不同浓度 NaCl 胁迫对热带水稻生理生化特性的影响

2.2.1 对热带水稻幼苗叶绿素含量的影响 从热带水稻幼苗叶片的叶绿素含量来看, 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量均显著低于 CK 处理, 但 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理间的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量差异不显著 (表 3)。

2.2.2 对热带水稻主要生理生化特性的影响 热带水稻始穗期叶片的主要生理生化指标测定结果表明: 不同浓度 NaCl 处理间的可溶性糖含量差异不显著; 0.6% NaCl 处理的 Pro 含量、MDA 含量及 Na<sup>+</sup> 含量均显著高于 CK 和 0.3% NaCl 处理, 但 CK 和 0.3% NaCl 处理间的 Pro 含量、MDA 含量

及 Na<sup>+</sup> 含量差异均不显著; 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的 K<sup>+</sup> 含量显著低于 CK 处理, 但 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理间差异不显著 (表 4)。

表 3 不同浓度 NaCl 胁迫下热带水稻幼苗叶片叶绿素含量

Tab. 3 Chlorophyll content in leaves of tropical rice seedlings under NaCl stress of different concentrations

处理 Treatment	叶绿素 a Chla/(mg·g <sup>-1</sup> )	叶绿素 b Chlb/(mg·g <sup>-1</sup> )	类胡萝卜素 Car/(mg·g <sup>-1</sup> )
CK	1.51±0.37 <sup>a</sup>	0.42±0.14 <sup>a</sup>	0.33±0.07 <sup>a</sup>
0.3% NaCl	0.96±0.27 <sup>b</sup>	0.26±0.10 <sup>b</sup>	0.22±0.08 <sup>b</sup>
0.6% NaCl	0.86±0.27 <sup>b</sup>	0.22±0.08 <sup>b</sup>	0.20±0.06 <sup>b</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

表 4 不同浓度 NaCl 胁迫下热带水稻主要生理生化指标

Tab. 4 Main physiological and biochemical indexes of tropical rice under NaCl stress of different concentrations

处理 Treatment	可溶性糖 Soluble sugar/%	脯氨酸 Pro/(μg·g <sup>-1</sup> )	丙二醛 MDA/(μmol·g <sup>-1</sup> )	Na <sup>+</sup> /%	K <sup>+</sup> /%
CK	1.42±0.80 <sup>a</sup>	205.28±20.05 <sup>b</sup>	0.041±0.01 <sup>b</sup>	1.16±0.39 <sup>b</sup>	1.12±0.38 <sup>a</sup>
0.3% NaCl	1.75±0.93 <sup>a</sup>	253.27±24.34 <sup>b</sup>	0.039±0.01 <sup>b</sup>	1.38±0.33 <sup>b</sup>	0.80±0.13 <sup>b</sup>
0.6% NaCl	2.05±1.03 <sup>a</sup>	598.21±68.05 <sup>a</sup>	0.054±0.01 <sup>a</sup>	2.39±0.54 <sup>a</sup>	0.78±0.09 <sup>b</sup>

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P<0.05$ ).

2.2.3 不同浓度 NaCl 胁迫对热带水稻产量构成的影响 分蘖数是决定单位面积穗数的因素之一, 在适当的基本苗数基础上, 分蘖数越多, 产量就越高。热带水稻的分蘖数随 NaCl 浓度提高而逐渐减少, CK、0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理间差异显著, 说明盐胁迫对热带水稻的分蘖产生了明显的抑制作用。

穗数、穗长、穗粒数、千粒重均为水稻产量的构成因素。在 NaCl 胁迫下, 热带水稻的穗数、穗长、穗粒数及千粒重均随 NaCl 浓度的提高而明

显降低, CK、0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理间的穗数、穗长、穗粒数及千粒重均存在显著差异。从热带水稻的结实率来看, 0.6% NaCl 处理的结实率显著低于 CK 和 0.3% NaCl 处理, 但 CK 和 0.3% NaCl 处理间差异不显著。

热带水稻的单株产量随 NaCl 浓度增加而显著降低, 其中 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理显著低于 CK 处理, 0.6% NaCl 处理显著低于 0.3% NaCl 处理 (表 5)。

表 5 不同浓度 NaCl 胁迫下热带水稻的产量构成  
Tab. 5 Yield components of tropical rice under NaCl stress of different concentrations

处理 Treatment	分蘖数 Tiller number	穗数 Panicle number	穗长 Panicle length/cm	穗粒数 Panicle grain	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 Kernel weight/g	单株产量 Yield of per plant/g
CK	9±1.82 <sup>a</sup>	7±1.80 <sup>a</sup>	24.79±1.75 <sup>a</sup>	155±34.73 <sup>a</sup>	70.35±8.91 <sup>a</sup>	23.05±3.89 <sup>a</sup>	17.83±3.91 <sup>a</sup>
0.3% NaCl	5±1.50 <sup>b</sup>	5±1.71 <sup>b</sup>	22.30±1.65 <sup>b</sup>	110±18.35 <sup>b</sup>	65.12±13.38 <sup>a</sup>	19.18±3.71 <sup>b</sup>	7.88±2.76 <sup>b</sup>
0.6% NaCl	2±0.89 <sup>c</sup>	3±1.61 <sup>c</sup>	18.47±2.10 <sup>c</sup>	48±18.66 <sup>c</sup>	22.10±13.27 <sup>b</sup>	14.99±3.51 <sup>c</sup>	1.12±0.92 <sup>c</sup>

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论

#### 3.1 盐胁迫对热带水稻种子萌发及幼苗生长的影响

种子萌发和幼苗生长是水稻个体发育的重要阶段，而种子萌发主要受内外环境因素的调控。有学者认为水稻种子萌发阶段对盐胁迫的耐性较强<sup>[20]</sup>，适当的盐胁迫浓度对水稻种子萌发影响不显著，当盐分浓度高于临界值时会受到抑制<sup>[21]</sup>。本研究不同浓度 NaCl 胁迫下热带水稻种子的发芽率差异不显著，这可能与供试品种（系）在种子萌发阶段对盐胁迫的耐性较强有关，或者是 NaCl 胁迫的浓度还未达到抑制种子萌发的临界值。

研究认为水稻幼苗期对盐较为敏感，盐胁迫会导致水稻出苗后苗高降低以及侧根和根长显著减少<sup>[22-23]</sup>；芽长、根长和根数随盐浓度升高而下降<sup>[24-26]</sup>；NaCl 胁迫显著抑制水稻根系生长，如降低水稻主根的长度、根系生长速率以及侧根的数量<sup>[27]</sup>；水稻总根长、根数、根系表面积及根体积均随着胁迫溶液浓度增加而降低<sup>[28]</sup>。本研究中热带水稻幼苗的苗高和根数随 NaCl 浓度的提高而显著降低，且 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的根长显著低于 CK 处理，说明盐胁迫抑制了热带水稻幼苗长高和根系生长，这和前人的研究结果基本一致。0.6% NaCl 处理的苗鲜重显著低于 CK 和 0.3% NaCl 处理，但 CK 和 0.3% NaCl 处理间的苗鲜重差异不显著，说明 0.6% NaCl 的相对高盐浓度胁迫对幼苗鲜重具有明显抑制作用，但 0.3% NaCl 的低盐浓度胁迫对热带水稻幼苗鲜重的抑制作用不明显。

#### 3.2 盐胁迫对热带水稻生理生化特性的影响

叶绿素是重要的光合作用物质，其含量在一定程度上反映植物光合作用的强度，并影响植物的正常生长<sup>[29]</sup>。本研究中，0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的热带水稻幼苗叶片叶绿素 a、叶绿素

b 和类胡萝卜素含量均显著低于 CK 处理。说明在盐胁迫下，热带水稻叶片细胞内离子含量增高，使得叶绿素和叶绿体蛋白间的结合变得松弛，从而促进叶绿素被分解，抑制了叶绿素的合成和积累<sup>[30]</sup>。

研究表明，盐胁迫促进热带水稻植株 Pro 的合成与积累，作为有机渗透调节物质共同调节渗透胁迫，以缓解盐胁迫对其生长的抑制<sup>[13, 31-32]</sup>。MDA 是细胞膜质过氧化产物，其含量可作为植物叶片细胞膜遭受破坏程度的指标，最终反映植物遭受逆境伤害的程度。NaCl 浓度增加迫使水稻叶片 MDA 不断积累，导致细胞膜透性逐渐增大<sup>[15]</sup>。本研究结果表明，0.6% NaCl 处理热带水稻叶片的 Pro 含量和 MDA 含量均显著高于 CK 和 0.3% NaCl 处理，但 CK 和 0.3% NaCl 处理间的 Pro 含量和 MDA 含量均差异不显著，说明 0.3% NaCl 低盐胁迫处理下热带水稻叶片积累的 Pro 和 MDA 相对较少，受盐害的影响较小，而 0.6% NaCl 的相对高盐胁迫促进热带水稻叶片内的 Pro 和 MDA 大量积累，受盐害的程度相对较重。

$\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  代谢是植物适应盐渍化环境最为重要的生理代谢活动， $\text{Na}^+$  是造成植物盐害的主要离子，当  $\text{Na}^+$  含量增高时，会拮抗植物对  $\text{K}^+$  的吸收。研究表明，在不同盐胁迫浓度下，水稻叶片  $\text{Na}^+$  积累量呈上升趋势，而  $\text{K}^+$  积累量呈下降的趋势<sup>[33]</sup>。本研究中 0.6% NaCl 处理热带水稻叶片的  $\text{Na}^+$  含量显著高于 CK 和 0.3% NaCl 处理，而 0.3% NaCl 和 0.6% NaCl 处理的  $\text{K}^+$  离子含量显著低于 CK 处理，这和以往的研究结果基本一致。说明盐胁迫致使  $\text{Na}^+$  在热带水稻叶片内不断积累，尤其当 NaCl 胁迫浓度达 0.6% 时  $\text{Na}^+$  的积累进而拮抗了热带水稻叶片对  $\text{K}^+$  的吸收。

#### 3.3 盐胁迫对热带水稻产量构成的影响

水稻产量是产量构成因素共同作用的结果。以往研究表明，盐胁迫对水稻产量及产量构成因

素具有显著或极显著影响, 并且随着盐逆境水平的增加, 产量、有效穗数、每穗粒数、千粒重和结实率均显著减少, 进而导致产量降低<sup>[34]</sup>; 盐胁迫严重影响幼穗的正常分化和小穗的形成, 导致空秕率的增加, 最终导致产量下降<sup>[35]</sup>。本研究结果表明, NaCl 胁迫对热带水稻的产量构成因素和单株产量产生影响, 并且随着 NaCl 胁迫浓度的升高, 分蘖数显著减少, 穗数、穗长、穗粒数和千粒重显著下降, 单株产量显著降低。由此可以推测, 盐胁迫对热带水稻产量的影响主要是分蘖期抑制分蘖的产生, 并影响孕穗期和抽穗期的穗数、穗长和穗粒数, 以及灌浆期导致空秕率增加, 影响千粒重, 最终导致产量下降, 且盐胁迫浓度越高, 影响越严重。

## 参考文献

- [1] 唐奇志, 刘兆普. 半干旱区海水灌溉农田土壤盐分运移规律的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 47-50.  
TANG Q Z, LIU Z P. Study on salinity migration in plough layer soil irrigated by seawater in semi-arid region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 18(1): 47-50. (in Chinese)
- [2] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.  
YANG J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845. (in Chinese)
- [3] WANG Z F, CHENG J P, CHEN Z W, HUANG J, BAO Y M, WANG J F, ZHANG H S. Identification of QTLs with main epistatic and QTL environment interaction effects for salt tolerance in rice seedlings under different salinity conditions[J]. Theoretical and Applied Genetics, 2012, 125(4): 807-815.
- [4] MA N L, CHE LAH W A, ABD KADIR N, MUSTAQIN M, RAHMAT Z, AHMAD A, LAM S D, ISMAIL M R. Susceptibility and tolerance of rice crop to salt threat: physiological and metabolic inspections[J]. PLoS One, 2018, 13(2): e0192732.
- [5] FLOWERS T J. Improving crop salt tolerance[J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55(396): 307-319.
- [6] TAKEHISA H, SHIMODATE T, FUKUTA Y, UEDA T, YANO M, YAMAYA T, SATO T. Identification of quantitative trait loci for plant growth of rice in paddy field flooded with salt water[J]. Field Crops Research, 2004, 89(1): 85-95.
- [7] GIRDHAR I K. Effect of sodic water irrigating on the growth development product and chemistry system of rice on the salt soil[J]. Salt-alkaline Soil Use, 1992(1): 45-50.
- [8] 袁杰, 王学强, 张燕红, 赵志强, 贾春平, 王奉斌, 李自超. 水稻种质资源苗期耐盐性鉴定[J]. 分子植物育种, 2019, 18(20): 6808-6814.  
YUAN J, WANG X Q, ZHANG Y H, ZHAO Z Q, JIA C P, WANG F B, LI Z C. Identification and screening of salt tolerance in rice germplasm resources at seedling stage[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(20): 6808-6814. (in Chinese)
- [9] 梁正伟, 杨福, 王志春, 陈渊. 盐碱胁迫对水稻主要生育性状的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(1): 43-46.  
LIANG Z W, YANG F, WANG Z C, CHEN Y. Effect of the main growth characteristics of rice under saline-alkali stress[J]. Ecology and Environment, 2004, 13(1): 43-46. (in Chinese)
- [10] 程广有, 许文会, 黄永秀. 植物耐盐碱性的研究 - 水稻耐盐性与耐碱性相关分析[J]. 吉林林学院学报, 1996, 12(4): 214-217.  
CHENG G Y, XU W H, HUANG Y X. Study on the saline-alkaline tolerance in plants-correlation analysis between saline-tolerance and alkaline-tolerance of rice[J]. Journal of Jilin Forestry University, 1996, 12(4): 214-217. (in Chinese)
- [11] LEE C K, YOON Y H, SHIN J C. Growth and yield of rice as affected by saline water treatment at different growth stages[J]. Korean Journal of Crop Science, 2002, 47(6): 402-408.
- [12] 祁栋灵, 郭桂珍, 李明哲, 曹桂兰, 张俊国, 周庆阳, 张三元, 徐锡哲, 韩龙植. 水稻耐盐碱性生理和遗传研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2007, 8(4): 486-493.  
QI D L, GUO G Z, LEE M C, CAO G L, ZHANG J G, ZHOU Q Y, ZHANG S Y, SU X Z, HAN L Z. Progress of physiology and genetic research on saline-alkaline tolerance in rice[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(4): 486-493. (in Chinese)
- [13] 徐晨, 凌风楼, 徐克章, 武志海, 刘晓龙, 安久海, 赵兰坡. 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.  
XU C, LING F L, XU K Z, WU Z H, LIU X L, AN J H, ZHAO L P. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different rice varieties[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2013, 27(3): 280-286. (in Chinese)
- [14] 隆艳喜, 唐琦璠, 吴楠, 陈亮, 王宁宁. 水稻耐盐调节机制的研究进展[J]. 分子植物育种, 2018, 16(7): 2364-2370.  
LONG Y X, TANG Y F, WU N, CHEN L, WANG N N. Research progress on regulatory mechanism of salt tolerance in rice[J]. Molecular Plant Breeding, 2018, 16(7): 2364-2370. (in Chinese)
- [15] 王旭明, 赵夏夏, 周鸿凯, 陈景阳, 莫俊杰, 谢平, 叶昌辉.

- NaCl 胁迫对不同耐盐性水稻某些生理特性和光合特性的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(5): 882-890.
- WANG X M, ZHAO X X, ZHOU H K, CHEN J Y, MO J J, XIE P, YE C G. Effects of NaCl Stress on some physiological and biochemical indices and photosynthetic physiology characteristics of rice cultivars with different salt tolerance[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(5): 882-890. (in Chinese)
- [16] 杨晓慧, 蒋卫杰, 魏珉, 余宏军. 植物对盐胁迫的反应及其抗盐机理研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2006, 37(2): 302-305.
- YANG X H, JIANG W J, WEI M, YU H J. Review on plant response and resistance mechanism to salt stress[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2006, 37(2): 302-305. (in Chinese)
- [17] 王波, 宋凤斌, 张金才. 植物耐盐性研究进展[J]. 农业系统科学与综合, 2007, 23(2): 212-216.
- WANG B, SONG F B, ZHANG J C. Advances in study of salt-stress tolerance in plants[J]. System Science and Comprehensive Studies in Agriculture, 2007, 23(2): 212-216. (in Chinese)
- [18] 王洋, 张瑞, 刘永昊, 李荣凯, 葛建飞, 邓仕文, 张徐彬, 陈英龙, 韦还和, 戴其根. 水稻对盐胁迫的响应及耐盐机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(2): 105-117.
- WANG Y, ZHANG R, LIU Y H, LI R K, GE J F, DENG S W, ZHANG X B, CHEN Y L, WEI H H, DAI Q G. Rice response to salt stress and research progress in salt tolerance mechanism[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2022, 36(2): 105-117. (in Chinese)
- [19] 李海波, 陈温福, 李全英. 盐胁迫下水稻叶片光合参数对光强的响应[J]. 应用生态学报, 2006, 17(9): 1588-1592.
- LI H B, CHEN W F, LI Q Y. Responses of rice leaf photosynthetic parameters to light intensity under NaCl stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(9): 1588-1592. (in Chinese)
- [20] 孙伟, 郑崇珂, 解丽霞, 和亚男, 谢先芝, 吴修. 水稻对盐胁迫的生理和分子反应研究进展[J]. 山东农业科学, 2016, 48(4): 148-153.
- SUN W, ZHENG C K, XIE L X, HE Y N, XIE X Z, WU X. Research progress on physiological and molecular responses to salt stress in rice[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2016, 48(4): 148-153. (in Chinese)
- [21] 信彩云, 马惠, 赵庆雷, 王瑜, 刘奇华, 杨军, 陈博聪, 林香青. 不同浓度 NaCl 胁迫对水稻种子发芽及幼苗生长的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2019, 36(3): 7-10.
- XIN C Y, MA H, ZHAO Q L, WANG Y, LIU Q H, YANG J, CHEN B C, LIN X Q. Effects of salt stress on rice seed germination and seedling growth[J]. Barley and Cereal Sciences, 2019, 36(3): 7-10. (in Chinese)
- [22] KHANM S A, HAMID A, KARIM M A. Effect of sodium chloride on germination and seedling characters of different types of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 1997, 179: 163-169.
- [23] 单文忠, 宋虎彪, 李新永, 张鹏里, 常振利. 水稻遭受盐碱危害的生育表现和防治对策[J]. 垦殖与稻作, 2006(1): 44-46.
- SHANG W Z, SONG H B, LI X Y, ZHANG P L, CHANG Z L. Discuss the question and countermeasure among the control technique which is harmless about diseases-pests-grass in rice[J]. Reclaiming and Rice Cultivation, 2006(1): 44-46. (in Chinese)
- [24] 贺奇, 王昕, 马洪文, 殷延勃. 盐胁迫下粳稻种子发芽特性及耐盐性评价[J]. 中国稻米, 2018, 24(1): 28-32.
- HE Q, WANG X, MA H W, YIN Y B. Germination characteristics and salt tolerance evaluation of japonica rice seeds under salt stress[J]. China Rice, 2018, 24(1): 28-32. (in Chinese)
- [25] 潘世驹, 李红宇, 姜玉伟, 郑桂萍, 周健, 赵婷婷, 王龙, 吕艳东, 阚宝林. 寒地水稻幼苗期耐盐资源筛选[J]. 南方农业科学, 2015, 46(10): 1775-1779.
- PAN S J, LI H Y, JIANG Y W, ZHENG G P, ZHOU J, ZHAO T T, WANG L, LYU Y D, KAN B L. Screening of salt-tolerant rice resources at seedling stage in cold region[J]. Journal of Southern Agriculture, 2015, 46(10): 1775-1779. (in Chinese)
- [26] 王奉斌, 张燕红, 袁杰, 布哈丽且木·阿布力孜, 魏玉波, 梁乃亭. 新疆耐盐水稻种质资源的筛选[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(3): 501-505.
- WANG F B, ZHANG Y H, YUAN J, BUHALIQIEMU A B L Z, WEI Y B, LIANG N T. Screening of germplasm resources of salt-resisting rice in Xinjiang[J]. Xinjiang Agriculture Science, 2009, 46(3): 501-505. (in Chinese)
- [27] 徐芬芬, 彦有娟, 韦蓉香. NaCl 和 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 胁迫对水稻根系生长的影响[J]. 杂交水稻, 2020, 35(3): 76-78.
- XU F F, YAN Y J, WEI R X. Effects of NaCl and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> stress on growth of rice root[J]. Hybrid Rice, 2020, 35(3): 76-78. (in Chinese)
- [28] 吕海艳. 盐碱胁迫对水稻根系形态特征及产量的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- LYU H Y. The effect of saline-alkaline stress on root system morphological and yield[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [29] GOLLDACK D, LUKING I, YANG O. Plant tolerance to drought and salinity: stress regulating transcription factors and their functional significance in the cellular transcriptional network[J]. Plant Cell Reports, 2011, 30(8): 1383-1391.

- [30] PARDO J M. Biotechnology of water and salinity stress tolerance[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(2): 185-196.
- [31] TRIPATHI S B, GURUMURTHI K, PANIGRAHI A K. Salinity induced changes in proline and betaine contents and synthesis in two aquatic macrophytes differing in salt tolerance[J]. *Biologia Plantarum*, 2007, 51(1): 110-115.
- [32] 张慧, 周骏马, 郭岩, 陈受宜. 水稻突变体 M-20 的耐盐生理特性[J]. *植物生理学报*, 1997(2): 181-186.  
ZHANG H, ZHOU J M, GUO Y, CHEN S Y. A physiological study on the salt-tolerant mutant of rice[J]. *Acta Phytobiologica Sinica*, 1997(2): 181-186. (in Chinese)
- [33] 王旭明, 赵夏夏, 黄露莎, 陈景阳, 莫俊杰, 叶昌辉, 周鸿凯, 谢平. 盐胁迫下 4 个不同耐盐基因型水稻  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  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, CHEN J Y, MO J J, YE C H, ZHOU H K, XIE P. The  $\text{Na}^+$  and  $\text{K}^+$  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)
- [34] 翟彩娇, 张蛟, 崔士友, 陈澎军. 盐逆境对耐盐水稻穗部性状及产量构成因素的影响[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(4): 1-9.  
ZAI C J, ZHANG J, CUI S Y, CHEN P J. Effects of salt stress on the panicle traits and yield components of rice cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(4): 1-9. (in Chinese)
- [35] 张瑞珍, 邵玺文, 童淑媛, 汪恒武, 齐春燕, 孙长占. 盐碱胁迫对水稻源库与产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2006, 20(1): 116-118.  
ZHANG R Z, SHAO X W, TONG S Y, WANG H W, QI C Y, SUN C Z. Effect of saline-alkali stress on source sink and yield of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(1): 116-118. (in Chinese)