

两种麻疯树苗对盐胁迫的生理生态响应

陈健妙¹, 郑青松¹, 刘兆普^{1,2,*}, 刘联², 隆小华¹

(1. 南京农业大学 江苏省海洋生物学重点实验室, 南京 210095; 2. 南京农业大学海南滩涂农业研究所, 海南乐东 572541)

摘要: 研究两种不同基因型麻疯树苗(南油 2、3 号)在不同 NaCl 浓度下生理生态响应特征, 并比较不同基因型麻疯树苗的耐盐差异性。结果表明: ①用 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 南油 2 号全株干重与对照无显著差异, 而南油 3 号全株干重比对照显著降低。用 100 mmol·L⁻¹ 或以上浓度的 NaCl 处理, 随着盐度增加, 两种树苗全株干重皆比对照显著降低, 且 3 号苗降低的幅度大于 2 号苗。②在用 200 mmol·L⁻¹ 或以下浓度的 NaCl 处理, 南油 2、3 号叶片相对含水量(RWC)皆与对照无显著差异, 而在用 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 则分别比对照显著降低 5% 和 8%。③用 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 南油 2 号可溶性糖(SS)含量比对照显著降低, 3 号与对照无显著差异; 用 200、300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理后, 两者 SS 含量均比对照显著降低。同时, 2 号苗可溶性蛋白(SP)含量比对照显著增加, 3 号苗 SP 含量与对照无显著差异。④随着盐度增加, 南油 2 号苗超氧化物歧化酶(SOD)活性先增加后降低。用 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 比对照显著降低。随着盐度增加, 3 号苗的 SOD 活性递减, 皆显著低于对照。用 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 两种树苗的过氧化物酶(POD)活性与对照无显著差异。随着盐度增加, 2 号苗的 POD 活性比对照显著增加, 而 3 号苗比对照显著降低。用 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理, 两种树苗的过氧化氢酶(CAT)活性皆比对照显著增加, 且随着盐度增加, 其变化趋势如 SOD 活性。结果表明, 麻疯树幼苗具有较好的耐盐性, 且南油 2 号比南油 3 号具有更高的耐盐性, 因为前者具有更高的保护酶活性、叶片保水能力和叶片 SP 含量。

关键词: 麻疯树; 盐胁迫; 耐盐性; 抗氧化酶

Response characteristics of physiology and ecology to salt stresses in two varieties of *Jatropha curcas* L. seedlings

CHEN Jianmiao¹, ZHENG Qingsong¹, LIU Zhaopu^{1,2,*}, LIU Lian², LONG Xiaohua¹

1 College of Resources and Environmental Sciences, Key Laboratory of Marine Biology, Jiangsu Province, N A U, Nanjing 210095, China

2 Hainan Coastal Agricultural Institute, N A U, Ledong, Hainan 572541, China

Abstract: Nanyou 2 and Nanyou 3 are two cultivars of barbadoscult (*Jatropha curcas* L.) with different genotypes. Physiological and ecological responses of these two cultivars to salt stress were studied by comparing their tolerances to various concentrations of NaCl. When the seedlings were exposed to NaCl at 25 and 50 mmol·L⁻¹, Nanyou 2 showed no change while Nanyou 3 decreased significantly in total dry weight. When treated with NaCl at 100 mmol·L⁻¹ or higher concentrations, the total dry weight of seedlings of both cultivars decreased significantly, and Nanyou 3 decreased to a greater extent than Nanyou 2 did. Relative water contents of seedling leaves showed no changes upon treatment with NaCl at 200mmol·L⁻¹ or lower concentrations, but a significant decrease by 5% and 8% in Nanyou 2 and Nanyou 3, respectively, upon treatment with NaCl at 300mmol·L⁻¹. When treated with NaCl at 25 and 50 mmol·L⁻¹, Nanyou 2 decreased significantly whereas Nanyou 3 showed no change in the soluble sugar contents. As the NaCl concentration increased to 200 and 300 mmol·L⁻¹, the soluble sugar contents of both cultivars decreased significantly. Meanwhile, Nanyou 2 had a significant increase while Nanyou 3 showed no change in the soluble protein contents. The SOD activity of Nanyou 2 displayed an increase-decrease curve as the NaCl concentrations increased, and, upon treatment with NaCl at 300 mmol·L⁻¹, it was significantly lower than the control plants. The SOD activity of Nanyou 3 decreased steadily as salt

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2007AA091702); 江苏省海洋生物学重点实验室资助项目

收稿日期: 2008-12-29; **修订日期:** 2009-04-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sea@njau.edu.cn

concentrations increased and was significantly lower than the control plants in all treatments. The POD activities of both cultivars showed no differences with the control plants as treated with 25 and 50 mmol · L⁻¹ of NaCl. As the NaCl concentrations increased, POD activity of Nanyou 2 increased and that of Nanyou 3 decrease significantly as compared to corresponding controls. The CAT activities of both cultivars increased significantly when treated with NaCl at 25 and 50 mmol · L⁻¹, and then showed similar trend as the SOD activities did in both cultivars respectively as the salt concentrations increased. These results suggested that barbadosnut seedlings were salt tolerant, and the Nanyou 2 was more tolerant than Nanyou 3, mainly due to its higher protective enzyme activities, ability to maintain higher leaf water contents and higher soluble protein contents upon exposure to salt stress.

Key Words: barbadosnut; salt stress; salt tolerance; antioxidative enzymes

麻疯树(*Jatropha curcas* L.)为大戟科(Euphorbiaceae)麻疯树属多年生灌木或小乔木,绝大多数生长在美洲和亚洲热带地区,在我国四川、海南、云南、广西等地有分布和种植^[1]。其种子含油量高达40%—60%,油质好,是一种非常环保的理想生物燃料油源。近年来,各国竞相种植麻疯树以制造生物柴油,我国也因地制宜地在南方省份极力扶持开发,已成为我国发展生物柴油的首选树种^[2-3]。出于我国国情,生物质能源的扶植框架首要原则:坚持不与粮食争地,促进能源与粮食“双赢”。因此,选育抗逆性强、经济产量高的麻疯树品种,可以在干旱、盐渍、贫瘠、退化的土壤上种植,就成为麻疯树经济利用至为关键的一环。目前,国内外有关麻疯树在重金属胁迫^[4]、冷胁迫^[5-6]、干旱胁迫^[7]方面已见诸文献报告,但盐渍生境对麻疯树生长及其生理生化效应研究鲜有报导。

盐胁迫引起树木一系列的生理生化变化,进而影响其生长。有害反应主要有吸收水分的能力降低、膜选择透性改变、光合作用下降、产生离子胁迫等,但树木通过增加根冠比^[8]、离子区隔化^[9-10]、增加以Na⁺、Cl⁻离子为主的无机或有机渗透物质^[7,11]、增加茎及叶等肉质化程度^[11-12]等来增强吸水能力,以缓解渗透和离子胁迫;增加SOD、POD等保护酶活性来维持膜稳定性和功能性^[13-14],以维持光合作用等代谢活动等来适应盐胁迫。本课题组以往试验结果表明,盐胁迫下,麻疯树茎、叶中的盐离子含量远高于根中(数据未列出),间接证明盐胁迫下麻疯树与红树、胡杨等一样,具有高效的离子区隔化作用;100 mmol · L⁻¹ NaCl以下处理,麻疯树净光合速率无显著降低,生长和生物量无显著减小,具有一定的耐盐性。本试验通过对表观耐盐性不同的两种不同基因型麻疯树苗进行不同NaCl浓度处理,探讨其对盐胁迫的生长、生理生态响应,阐明麻疯树对盐渍的形态、生理响应机制以及不同基因型麻疯树的耐盐适应机制,为今后提高麻疯树抗盐性以及耐盐品种改良,以充分利用海涂和不同程度的盐碱地种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试麻疯树种子为两个不同基因型,南油2号属于海南品种资源,南油3号属于云南品种资源,种子均采自南京农业大学(海南)滩涂农业研究所太阳城中试基地。

1.2 培养与处理

将种子清水浸泡24 h,去壳播种于装有蛭石的穴盘中,于温室育苗,保持基质湿润。待苗长4叶期,挑选生长健壮、长势一致的苗进行砂培(盆直径19 cm,高15 cm),用1/2 Hoagland培养液浇灌,20 d后,用含0、25、50、100、200 mmol · L⁻¹和300 mmol · L⁻¹ NaCl的1/2 Hoagland培养液进行处理,每个处理重复10次(每盆两株),整个培养过程在昼/夜(30 ± 2)℃/(25 ± 2)℃,自然光照下进行。2 d换1次培养液。每天早晚各通气0.5 h。处理24 d后取样测定。

1.3 植株干重、根含水量、地上部含水量的测定

实验苗处理24 d后,数好处理植株新增叶片数,然后从盆中取出植株,用流水冲洗砂子,再用去离子水洗净,擦干,每处理随机取10株,用称重法测量倒5功能叶单叶面积,然后称量地上部、根部鲜重,然后在105℃

杀青 20 min 后,于 75℃ 烘干至恒重,称得干重。根和地上部含水量按照下列公式:

$$\text{根的含水量}(\%) = \frac{\text{根鲜重} - \text{根干重}}{\text{根鲜重}} \times 100$$

$$\text{地上部含水量}(\%) = \frac{\text{地上部鲜重} - \text{地上部干重}}{\text{地上部鲜重}} \times 100$$

式中,鲜、干重和各含水量测定结果为 10 株(次)平均值;单叶面积和单株叶片增长数为 4 次重复平均值。

1.4 叶片相对含水量(RWC)的测定

每处理随机抽取 4 株,取每株倒 5 功能叶按照下列公式测定叶片 RWC:

$$RWC(\%) = \frac{W_f - W_d}{W_t - W_d} \times 100$$

式中, W_f 为叶片鲜重, W_d 为叶片干重, W_t 为叶片被水充分饱和后重量。测定结果为 4 株(次)平均值。

1.5 其他生理生化指标的测定

每一处理随机抽取 4 株,每株同样选倒 5 功能叶除去叶脉,用镊子夹住叶子剪碎混匀,用于测定下列生理生化指标:丙二醛(MDA)含量测定用硫代巴比妥酸(TBA)方法测定,可溶性糖(SS)采用蒽酮比色法测定,可溶性蛋白质(SP)采用考马斯亮蓝 G-250 法测定,SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)法^[15];POD 活性测定采用愈创木酚法,以每分钟内 A_{470} 变化 0.01 的酶量为 1 个酶活性单位 U^[16];CAT 活性参照 Aebi H 法^[17],3 ml 反应体系中含 50 mmol·L⁻¹ pH7.0 磷酸缓冲液 1.9 ml,45 mmol·L⁻¹ H₂O₂ 1.0 ml,0.1 ml 酶液,以每分钟内 A_{240} 变化 0.01 的酶量为 1 个酶活性单位 U。以上生理生化指标以 4 株(次)测定的平均值为测定结果。

1.6 数据处理

利用 Microsoft Excel 软件、SPSS10.0 软件进行试验数据的统计,采用 Duncan 检验进行显著性分析。

2 结果

2.1 不同 NaCl 浓度胁迫对两种麻疯树苗生长的影响

如表 1 所示,25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,随着盐度增加,南油 2 号树苗地上部干重逐渐降低,而根干重比对照显著增加,根冠比比对照显著增大,全株干重与对照无显著差异;南油 3 号苗根干重、地上部干重及全株干重皆比对照显著降低,根冠比与对照无显著差异。100、200 mmol·L⁻¹ 和 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,随着盐度增加,两种麻疯树苗的地上部干重、根干重及全株干重均逐渐显著下降,根冠比依然显著高于对照,南油 2 号

表 1 不同 NaCl 浓度处理对麻疯树苗干重及根冠比的影响

Table 1 Effects of different concentration of NaCl on dry weight(DW/(g·plant⁻¹)) and root/shoot ratio in *Jatropha curcas* seedlings

NaCl 处理/(mmol·L ⁻¹) NaCl Treatments		地上部干重 Shoot DW	根干重 Root DW	根冠比 Root/shoot ratio	全株干重 Total plant DW
南油 2 号	CK	14.34 ± 0.42 a	2.90 ± 0.19 b	0.20 ± 0.01b	17.24 ± 0.60 a
Nanyou 2	25	13.90 ± 0.17 ab	4.10 ± 0.62 a	0.29 ± 0.04 a	18.00 ± 0.76 a
	50	13.31 ± 0.61 b	4.53 ± 0.40 a	0.34 ± 0.01a	17.84 ± 0.47 a
	100	7.17 ± 0.76 c	2.59 ± 0.42 b	0.36 ± 0.02 a	9.76 ± 1.18 b
	200	4.37 ± 0.40 d	1.55 ± 0.24 c	0.35 ± 0.01 a	5.91 ± 0.63 c
	300	2.97 ± 0.15 e	1.01 ± 0.10 c	0.34 ± 0.02 a	3.98 ± 0.17 d
南油 3 号	CK	15.03 ± 0.25 a	3.81 ± 0.08 a	0.25 ± 0.01c	18.84 ± 0.24 a
Nanyou 3	25	13.27 ± 0.25 b	3.47 ± 0.09 b	0.26 ± 0.01c	16.74 ± 0.34 b
	50	13.13 ± 0.15 b	3.58 ± 0.04 b	0.27 ± 0.01c	16.71 ± 0.18 b
	100	4.23 ± 0.31 c	2.43 ± 0.18 c	0.57 ± 0.02 a	6.66 ± 0.49 c
	200	2.37 ± 0.15 d	1.04 ± 0.11 d	0.44 ± 0.03 b	3.41 ± 0.20 d
	300	1.43 ± 0.02 e	0.61 ± 0.01e	0.42 ± 0.03 b	2.05 ± 0.05 e

表中数据分别为 10 次重复平均值 ± 标准差,在南油 2、3 号基因型中,同列数据后相同的字母表示在 $P < 0.05$ 水平上无显著差异,下同

苗全株干重分别比对照显著降低 44%、66% 和 77%，3 号苗全株干重分别比对照显著降低 65%、82% 和 89%。

随着盐度的增加 (25—100 mmol·L⁻¹ NaCl)，南油 2 号单叶面积与对照差异均不显著，盐度达到 200 mmol·L⁻¹ NaCl，叶面积显著下降，达到 300 mmol·L⁻¹ NaCl，叶面积下降更显著；而 25 mmol·L⁻¹ NaCl，南油 3 号叶面积即显著下降，随着盐度的增加，叶面积下降越显著 (图 1A)。叶片数增加量的变化趋势也是这样，随着盐度的增加 (25—50 mmol·L⁻¹ NaCl)，南油 2 号叶片数增加量与对照差异均不显著，盐度达到 100 mmol·L⁻¹ NaCl，叶片数增加量即显著下降；而 25 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下南油 3 号叶片数增加量即显著下降，随着盐度的增加，叶片数增加量下降越显著 (图 1B)。

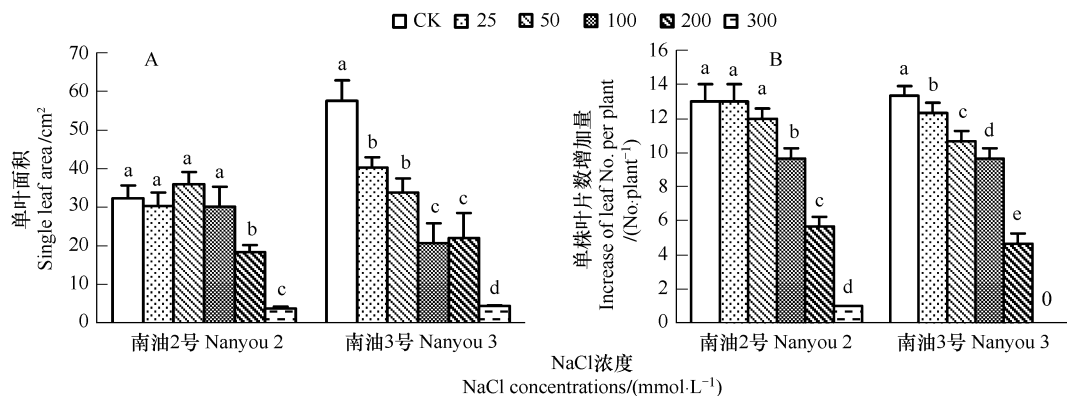


图 1 不同 NaCl 浓度对两种麻疯树苗叶面积增加量(A)和单株叶片数增加量(B)的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of NaCl on increase of leaf area (A) and leaf numbers (B) in *Jatropha curcas* seedlings leaves

条栏中数据为 4 次重复平均值 ± 标准差，在南油 2、3 号基因型中，同条栏数据后相同的字母表示在 $P < 0.05$ 水平上无显著差异，下同

2.2 不同 NaCl 浓度胁迫对两种麻疯树苗含水量的影响

南油 2 号麻疯树苗根含水量在 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理，与对照无显著差异，而 3 号苗根含水量随着盐度增加比对照显著降低，100、200 和 300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理，两种麻疯树苗根含水量随着盐度增加呈递减趋势，皆比对照显著降低，3 号苗降低的幅度相对大 (表 2)。南油 2 号苗地上部含水量在 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理，比对照显著增加，3 号苗地上部含水量与对照无显著差异，100、200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理，两种树苗地上部含水量皆显著高于对照，300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理，南油 2 号苗地上部含水量与对照无显著差异，而 3 号苗显

表 2 不同 NaCl 浓度处理对麻疯树苗地上部和根含水量以及叶片相对含水量的影响

Table 2 Effects of different concentration of NaCl on water content of shoot and root and relative leaf water content of *Jatropha curcas* seedlings

NaCl 处理/(mmol·L ⁻¹) NaCl Treatments		根含水量/% Root water content	地上部含水量/% Shoot water content	叶片相对含水量/% Leaf mol RWC mol
南油 2 号 Nanyou 2	CK	89.28 ± 1.18 a	85.87 ± 0.59 c	91.85 ± 2.56 a
	25	90.50 ± 0.91 a	88.32 ± 0.31 ab	91.95 ± 4.29 a
	50	89.12 ± 0.83 a	88.74 ± 1.10 a	94.21 ± 2.12 a
	100	85.77 ± 0.25 b	87.49 ± 0.33 ab	93.82 ± 4.33 a
	200	85.13 ± 0.81 b	88.51 ± 1.04 a	96.13 ± 1.27 a
	300	83.37 ± 0.55 d	87.11 ± 0.18 bc	87.03 ± 0.95 b
南油 3 号 Nanyou 3	CK	89.85 ± 1.43 a	87.11 ± 1.02 b	93.41 ± 1.17 a
	25	87.63 ± 0.45 b	86.30 ± 1.12 b	93.02 ± 0.96 a
	50	87.45 ± 0.51 b	86.96 ± 0.06 b	93.50 ± 2.13 a
	100	85.48 ± 0.30 c	90.36 ± 0.32 a	92.73 ± 0.17 a
	200	84.40 ± 0.53 c	90.50 ± 0.44 a	93.73 ± 0.92 a
	300	82.33 ± 0.58 d	81.06 ± 1.07 c	86.07 ± 0.50 b

著低于对照。南油 2、3 号树苗叶片 RWC 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 以下处理,皆与其对照无显著差异, $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,RWC 分别比对照显著降低 5% 和 8%。

2.3 不同 NaCl 浓度处理对两种麻疯树苗叶片可溶性糖(SS)和可溶性蛋白质(SP)含量的影响

如图 2A 所示,南油 2 号苗 SS 含量在所有盐度处理下,皆比对照显著降低,在 25、50 和 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,随着盐度增加逐渐递减,而 3 号苗 SS 含量在 25、50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,与对照无显著差异, $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,比对照显著降低。 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理两者 SS 含量皆有所回升但依然比对照显著降低, $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理再小幅度降低。如图 2B 所示,随着盐度增加,南油 2、3 号树苗的 SP 先降低,然后随着盐度增加而递增, 200 、 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,南油 2 号苗 SP 含量比对照显著增加,而 3 号苗 SP 与对照无显著差异。

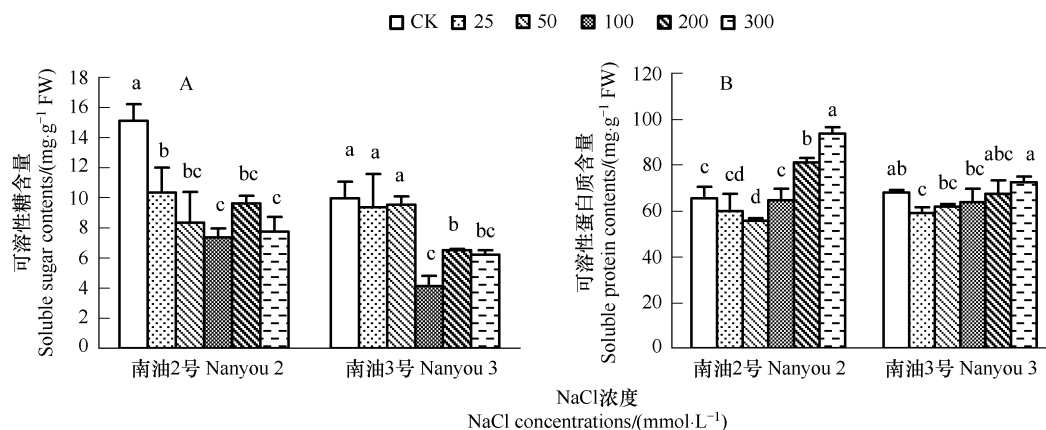


图 2 不同 NaCl 浓度对两种麻疯树苗叶片可溶性糖(A)和可溶性蛋白(B)含量的影响

Fig. 2 Effects of different concentration of NaCl on soluble sugar (A) and soluble protein (B) content in two *Jatropha curcas* seedlings leaves

2.4 不同 NaCl 浓度对两种麻疯树苗叶片 MDA 含量和保护酶(SOD、POD 和 CAT)活性的影响

如图 3 所示,25、50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,随着盐度增加,南油 3 号树苗 SOD 活性显著降低,2 号树苗 SOD 活性 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理比对照显著增加,两种树苗 POD 活性皆与对照无显著差异,但两种树苗 CAT 活性皆比对照显著增加,MDA 含量皆与对照无显著差异。 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,南油 3 号树苗 SOD、POD 和 CAT 活性皆比对照显著降低,MDA 含量比对照显著增加,而 2 号树苗 POD 活性显著增加,SOD、CAT 活性依然比对照增加,MDA 含量与对照无显著差异。 200 、 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,南油 3 号苗 SOD、POD 和 CAT 活性更大幅度显著降低,2 号苗 SOD、CAT 活性在 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理比对照降低但无显著差异, $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理比对照显著降低,而 POD 活性则随着盐度增加显著增加,MDA 含量增加的幅度小于 3 号苗。

3 讨论

盐分抑制植物生长主要由于水分不足以及特定盐离子或过量离子效应两种原因造成^[18]。同种植物不同基因型,因细胞耐盐适应性不同,植株生长表现不一样^[19-20]。本研究结果表明,25、50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 处理,南油 2 号麻疯树苗根干重比对照显著增加,根冠比明显增大,提高树苗对基质中营养、水分的利用率,从而保证对地上部水分、矿质元素和有机质等养分供给,由地上部提供给根部生长必需的糖类和维生素等养分也得到保证,植株整体生长受盐胁迫影响不大,而南油 3 号苗根干重比对照显著降低,根冠比无显著增加,地上部生长显著减小,植株整体生长受盐胁迫明显影响。 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或以上的 NaCl 处理,两种麻疯树苗地上部干重、根干重皆随着盐度增加而递减,但与假乌卜拉树^[8]一样,盐胁迫下皆通过增大根冠比来提高抗盐性。2 号苗全株干重降低的幅度相对小,细胞耐盐适应性强于 3 号苗。

高盐对植物易产生渗透胁迫。本实验结果表明, $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 以下处理,两种麻疯树苗叶片 RWC

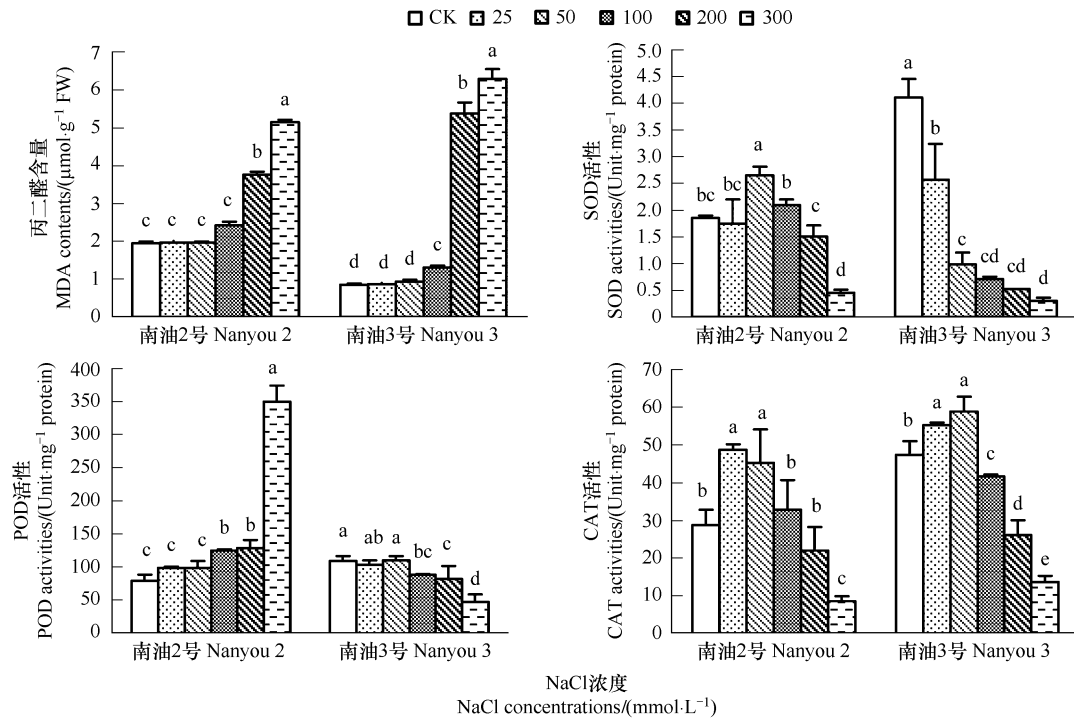


图3 不同 NaCl 浓度对两种麻疯树苗叶片丙二醛 MDA 含量(A)以及 SOD(B)、POD(C)和 CAT(D)活性的影响

Fig. 3 Effects of different concentration of NaCl on malondialdehyde content(A) and SOD(B), POD(C) and CAT(D) activities in two *Jatropha curcas* seedlings leaves

皆与对照无显著差异,受渗透胁迫程度不重,但两种树苗维持水分平衡的方式略有不同。25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,南油 2 号苗根含水量与对照无显著差异,地上部生长受影响小且含水量比对照显著增加,主要是靠增大吸水量来维持水分平衡,而 3 号苗根含水量比对照显著降低,地上部生长显著减小但含水量无明显变化,树苗主要通过减小地上部生长、减小叶面积和叶片数以降低蒸腾失水来维持水分平衡。100、200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,两种麻疯树苗根含水量皆比对照显著降低,地上部生长、叶面积、叶片数皆显著减小但含水量皆比对照显著增加,间接证明两种麻疯树苗与胡杨^[12]、沙枣^[11]等一样,主要通过增加茎、叶肉质化程度来增强地上部保水能力,辅以降低蒸腾失水来维持水分平衡。300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,两种树苗 RWC 皆比对照显著降低,受渗透胁迫程度加重。2 号苗 RWC 降低幅度比 3 号苗小,耐受渗透胁迫能力比 3 号苗强。盐胁迫下,麻疯树增加茎、叶肉质化程度,既克服由于吸水不足造成的水分亏缺,又能稀盐以缓解离子胁迫伤害,是麻疯树对盐胁迫的一种适应。

本实验结果表明,25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,两种麻疯树苗 SS 含量变化明显不同,南油 2 号与桑树 (*Morus alba* L.) M-5 基因型^[21]及盐生植物红树 (*A. corniculatum* (L.) Blanco)^[22]在植株未受盐胁迫严重伤害时的 SS 含量变化类似,即随着盐度增加递减,比对照显著降低,主要是 2 号苗根生长比对照显著增加,所必需的糖类需求增加,但根不能自身合成糖类,糖类加快从叶片运往根部以满足根生长需求,而 3 号苗根生长比对照显著减小,根冠比增加不明显,故含量与对照无显著差异,两者 SP 含量也呈先降低后增加趋势。SS、SP 加快向根部运输,还利于降低根部细胞渗透势,促进细胞吸水 and 维持细胞膨压,这是 2 号树苗在 25、50 mmol·L⁻¹ NaCl 处理下根吸水能力和生长强于 3 号苗的主要原因。100 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,随着根冠比增至最大,两种树苗的 SS 含量降至最低。与杉木苗在水分胁迫下^[23]以及水稻在锌铬复合胁迫下^[24]的研究相一致,即逆境条件下,植物协调自身源流库的关系,使光合产物趋向地下部运输,以提高生态适应能力。200 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,两种麻疯树苗植株根冠比趋于减小,根系吸水能力降低,叶片 SS、SP 含量皆回升,以利于叶片渗透调节,维持水分平衡。300 mmol·L⁻¹ NaCl 处理,两种树苗渗透胁迫程度明显增大,但 SS 含量依然比

对照显著降低,可能是碳代谢朝着更有利于渗透调节的有机物生成方向转移,如蛋白质、次生代谢物甜菜碱等。2号苗SP含量增加的幅度大于3号苗,是其抗脱水能力比3号苗好的主要原因之一。

盐胁迫下,植物的光能利用和CO₂的同化受抑制,使叶绿体电子传递链中电子传递给O₂的机率增大,促进O₂⁻、H₂O₂和¹O₂等活性氧(ROS)的增加,耐盐性强的植物具有较强的清除ROS酶活性和较高含量的抗氧化物质。本实验结果表明,25、50 mmol·L⁻¹NaCl处理,南油2、3号麻疯树苗主要通过显著增加CAT活性,有效清除ROS,植株整体生长正常,3号苗全株干重显著减小主要是受光合总面积减少引起。100 mmol·L⁻¹NaCl处理,2号苗叶片SOD、CAT活性稳定增加,POD活性显著增加,有效清除ROS,MDA含量与对照无显著差异,膜结构稳定性和功能性正常,全株干重显著减小也主要是光合总面积减少引起,而3号苗SOD、POD和CAT活性皆比对照显著降低,清除ROS能力明显减弱,MDA含量比对照显著增加,植株生长明显受抑制。200、300 mmol·L⁻¹NaCl处理,两种麻疯树苗MDA含量皆比对照显著增加,2号苗维持相对高的SOD、CAT活性和诱导显著增加的POD活性,维持膜系统的稳定性和功能性能力相对强,是其比3号苗耐盐的主要原因。

综上所述,盐渍下,两种麻疯树在形态上主要通过增大根冠比,减小株型、叶面积以及叶片数等;在生理上主要通过调节SOD、POD等抗氧化酶活性以抵抗氧化胁迫,增加吸水量、SP等有机溶质等来抵抗渗透和离子胁迫来提高抗盐性。盐胁迫下,两种麻疯树耐渗透胁迫的能力都较强,南油2号麻疯树苗主要具有相对高抗氧化酶活性,以及相对强的根吸水能力和地上部保水能力,抵抗氧化和离子胁迫能力相对强,从而比南油3号苗耐盐。在形态上,单叶面积、新叶增长数,在生理上,SOD活性、叶片MDA和SP含量三者的增加程度以及根含水量是麻疯树不同基因型、品种间进行耐盐比较的潜在性参考指标。麻疯树耐盐生理生化机制有待进一步研究,有望结合组织培养和细胞培养,筛选耐盐突变体,再结合常规育种、染色体工程和基因工程研究技术,利用快速有效的分子遗传标记,检测再生植株耐盐性的稳定性,鉴定耐盐体细胞突变体以及其耐盐性能否遗传给后代,以培育出优良的耐盐麻疯树品种。

References:

- [1] Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. Key to Family and Genus of Chinese Higher Plants. Beijing: Science Press, 1979: 253.
- [2] Dai X R, Jiang L K, Luo M. The assume and advice of developing country biomass energy sources. World Agriculture, 2006, 327(6): 52-55.
- [3] Gou Y, Hua J. Discussion on Utilization, Latest Development and Prospects of *Jatropha Curcas* Resources. Resource Development & Market, 2007, 23(6): 519-522.
- [4] Kumar G P, Yadav S K, Thawale P R, Singh S K, Juwarkar A A. Growth of *Jatropha curcas* L. on heavy metal contaminated soil amended with industrial wastes and *Azotobacter* — A greenhouse study. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 2078-2082.
- [5] Luo T, Ma D W, Deng W Y, Chen F. Effect of low temperature on physiological indexes of *Jatropha curcas*. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2005, 27(4): 50-54.
- [6] Zhang M S, Zhang L X, Wu S J, Li J Q, Yang Y H. Effects of Three Types Stress Pretreatment on Chilling Resistanc of *Jatropha curcas* Seedlings. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2006, 30(5): 60-62.
- [7] Dou X Y, Wu G J, Huang H Y, Hou Y J, Gu Q, Peng C L. Responses of *Jatropha curcas* L. seedlings to drought stress. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1425-1430.
- [8] Elizamar Ciríaco da Silva, Rejane Jurema Mansur Custódio Nogueira, Francisco Pinheiro de Araújo, Nataniel Franklin de Melo, André Dias de Azevedo Neto. Physiological responses to salt stress in young umbu Plants. Environmental and Experimental Botany, 2008, 63(3): 147-157.
- [9] DAI S X, CHEN S L, Eberhard Fritz, Andrea Olbrich, Christine Kettner Andrea Polle, Aloys Hüttermann. Ion compartmentation in leaf cells of *Populus euphratica* and *P. tomentosa* under salt stress. Journal of Beijing Forestry University, 2006, 28(12): 1-5.
- [10] Werner A, stezer R. Physiological response of the mangrove *Rhizophora mangle* growth in the absence and presence of NaCl. Plant Cell and Environ, 1990 (13): 243-255.
- [11] Zhang B Z, Zhao K F. Study on salt tolerance in *Robinia* and *Elaeagnus angustifolia*. Shandong Science, 1996, 9(2): 53-55.
- [12] Ma H C, Wang S S, Jiang X N. Photosynthetic and Growth Response to Salt Stress in *P euphratica*. Journal of Southwest Forestry College, 1998, 18(1): 33-40.
- [13] Zhou X Q, Ji Q H. Changes in Antioxidant Enzyme Activities in *Casuarina equisetifolia* Seedlings Under NaCl Stress and Ca²⁺ Regulation in Them. Plant Physiology Communications, 2004, 10(2): 184-186.

- [14] Wang R G, Chen S L, Liu L Y, Hao Z Y, Weng H J, Li H, Yang S, Duan S. Genotypic differences in antioxidative ability and salt tolerance of three poplars under salt stress. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(3): 46-52.
- [15] Li H S. Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment // LI H S ed. Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [16] Zheng B S. Modern Plant Physiological Biochemical Experiment. Beijing: Weather Press, 2006: 41-42.
- [17] Aebi H. Catalase in vitro. *Methods Enzymology*, 1984, 105: 121-126.
- [18] Munns R, James R A, Läuchli A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J Exp Bot*, 2006, 57: 1025-1043.
- [19] Wahid A, Masood I, Javed I U H. Phenotypic flexibility as marker of sodium chloride tolerance in sunflower genotypes. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 42: 85-94.
- [20] María F L, Vicent A, Rosa M P, Aurelio G. Relationship between salt tolerance and photosynthetic machinery performance in citrus. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62: 176-184.
- [21] Agastina P, Kingsley S J, Vivekanandan M. Effect of salinity on photosynthesis and biochemical characteristics in mulberry genotypes. *Photosynthetica*, 2000, 38(2): 287-290.
- [22] Parida A K, Das A B, Sanada Y, Prasanna Mohanty. Effects of salinity on biochemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*. *Aquatic Botany*, 2004, 80: 77-87.
- [23] Wei L L, Zhang X Q, Hou Z H. Effects of water stress on photosynthesis and carbon allocation in *Cunninghamia lanceolata* seedlings. *Journal of Plant Ecology*, 2005, 29(3): 394-402.
- [24] Zhu X M, Lin L Q, Yang Y X. Effects of Compound Stresses of Zn and Cr on Carbon and Nitrogen Metabolisms of Rice Plant. *Research of Soil and Water Conservation*, 2008, 15(5): 149-151.

参考文献:

- [1] 中国科学院植物研究所. 中国高等植物科属检索表. 北京: 科学出版社, 1979: 253.
- [2] 戴向荣, 蒋立科, 罗曼. 发展农村生物质的设想与建议. *世界农业*, 2006, 327(7): 52-55.
- [3] 苟圆, 华坚. 麻疯树资源的开发利用现状及前景. *资源开发与市场*, 2007, 23(6): 519-522.
- [5] 罗通, 马丹伟, 邓骛远, 陈放. 低温对麻疯树生理指标的影响. *中国油料作物学报*, 2005, 27(4): 50-54.
- [6] 张明生, 张丽霞, 吴树敬, 李金强, 杨永华. 三种胁迫预处理对麻疯树幼苗抗冷性的影响. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2006, 30(5): 60-62.
- [7] 窦新永, 吴国江, 黄红英, 侯雨佳, 顾群, 彭长连. 麻疯树幼苗对于旱胁迫的响应. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1425-1430.
- [9] 戴松香, 陈少良, Eberhard Fritz, Andrea Olbrich, Christine Kettner Andrea Polle, Aloys Hüttermann. 盐胁迫下胡杨和毛白杨叶细胞中的离子区隔化. *北京林业大学学报*, 2006, 28(12): 1-5.
- [11] 张宝泽, 赵可夫. 刺槐和沙枣耐盐性能的研究. *山东科学*, 1996, 9(2): 53-55.
- [12] 马焕成, 王沙生, 蒋湘宁. 盐胁迫下胡杨的光合和生长响应. *西南林学院学报*, 1998, 18(1): 33-41.
- [13] 周希琴, 吉前华. 盐胁迫下木麻黄幼苗抗氧化酶活性的变化及 Ca^{2+} 对它的调控. *植物生理学通讯*, 2004, 40(2): 184 ~ 186.
- [14] 王瑞刚, 陈少良, 刘力源, 郝志勇, 翁海娇, 李鹤, 杨爽, 段杉. 盐胁迫下 3 种杨树的抗氧化能力与耐盐性研究. *北京林业大学学报*, 2005, 27(3): 46-52.
- [15] 李合生. 见: 李合生主编. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [16] 郑柄松. 现代植物生理生化研究技术. 北京: 气象出版社, 2006. 41-42.
- [23] 韦莉莉, 张小全, 侯振宏. 杉木苗木光合作用及其产物分配对水分胁迫的响应. *植物生态学报*, 2005, 29(3): 394-402.
- [24] 朱雪梅, 林立金, 杨远祥. 锌铬复合胁迫对水稻植株碳氮代谢的影响. *水土保持研究*, 2008, 15(5): 149-151.