

NaCl胁迫下高纬度移植桐花树幼苗的生理生态效应*

郑春芳 冀德伟 刘伟成 仇建标 伍锦姑 陈少波** 黄丽 黄晓林

(浙江省海洋水产养殖研究所/浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室, 浙江温州 325005)

摘要 通过砂培试验,研究了不同浓度 NaCl(0、100、200、300 和 400 mmol · L⁻¹)处理对高纬度移植桐花树幼苗生物量、离子吸收、碳氮代谢、叶片光合色素和叶片抗氧化系统的影响。结果表明:100 mmol · L⁻¹NaCl 处理对桐花树生长有轻微的促进作用,当 NaCl 浓度达到 300 mmol · L⁻¹时,桐花树根、茎、叶器官的干鲜质量、根冠比、株高和基径均显著下降。高盐胁迫抑制了叶片抗氧化系统中超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)的活性,提高了丙二醛含量,降低了叶片中叶绿素、类胡萝卜素总量以及根茎叶的可溶性总糖和游离氨基酸总量。不同浓度 NaCl 胁迫下,桐花树根茎叶中 Na⁺含量快速上升,K⁺含量相对下降,K⁺/Na⁺快速下降,导致各器官中离子平衡失调。当 NaCl 浓度高于 300 mmol · L⁻¹时,桐花树根茎叶的碳氮代谢运转失调,抑制了植株的正常生长,导致各器官的生物量显著下降。

关键词 高纬度移植 桐花树 NaCl胁迫 生理生态效应

文章编号 1001-9332(2011)09-2279-06 **中图分类号** S728.6 **文献标识码** A

Eco-physiological responses of high-latitude transplanted *Aegiceras corniculatum* seedlings to NaCl stress. ZHENG Chun-fang, JI De-wei, LIU Wei-cheng, QIU Jian-biao, WU Jin-gu, CHEN Shao-bo, HUANG Li, HUANG Xiao-lin (Zhejiang Mariculture Research Institute, Zhejiang Province Key Laboratory of Exploitation and Preservation of Coastal Bio-resource, Wenzhou 325005, Zhejiang, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(9): 2279-2284.

Abstract: A sand culture pot experiment was conducted to study the eco-physiological responses of high-latitude transplanted mangrove *Aegiceras corniculatum* seedlings to varying concentration of NaCl (0, 100, 200, 300, and 400 mmol · L⁻¹). Under the stress of 100 mmol NaCl · L⁻¹, the seedling growth was slightly promoted; whereas at 300 mmol NaCl · L⁻¹, the plant height, stem basal diameter, fresh and dry mass, and root/shoot ratio were decreased significantly. High salt stress inhibited the leaf superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities, increased the leaf malondialdehyde (MDA) content, and decreased the leaf chlorophyll and carotenoids contents as well as the total soluble sugar and free amino acid contents in different organs. Under the stress of different concentration NaCl, the Na⁺ contents in leaf, stem, and root increased rapidly while the K⁺ contents had a relatively decrease, resulting in a rapid decrease of K⁺/Na⁺ ratio and an imbalance between K⁺ and Na⁺ in *A. corniculatum* vegetative organs. When the NaCl concentration in the medium was higher than 300 mmol · L⁻¹, the C and N metabolism of *A. corniculatum* vegetative organs was maladjusted, which inhibited the normal growth of the seedlings, resulting in a significant decrease in the plant height and fresh and dry mass.

Key words: high-latitude transplanting; *Aegiceras corniculatum*; NaCl stress; eco-physiological responses.

* 国家海洋公益性行业科研专项(200805072, 201005012)、联合国开发计划署-全球环境基金项目(CPR/SGP/OP4/Y3/RAF/2010/08)、浙江省近岸水域生物资源开发与保护重点实验室开放项目(2010F30003)、浙江省科技厅创新团队建设与人才培养项目(2009F20009)和浙江省海洋与渔业项目“高纬度红树林生态恢复关键技术应用示范”资助。

** 通讯作者。E-mail: chenshaobo@hotmail.com

2011-01-11 收稿, 2011-05-12 接受。

全球气候变化不仅造成海平面上升,威胁红树林生存,还使红树林分布格局发生变化,高纬度移植趋势明显^[1-2]。目前,浙江省温州市成为红树林人工移植的最北界^[3]。池伟等^[4]研究发现,在温州市,除秋茄能正常越冬外,桐花树也能成活,这为打破高纬度移植红树林品种单一的局面奠定了基础。红树林是热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落,具有重要的生态功能,能在含有较高 Na^+ 和 Cl^- 的水体或土壤中生长^[5]。桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 是红树林三大先锋树种之一,能够在 3% 的高盐中生长^[6]。Christian^[7] 研究发现,高盐胁迫可以抑制桐花树 β -类胡萝卜素合成,减少光合色素含量,降低了 PSII 反应中心光能捕获的转化效率。Fu 等^[8] 利用抑制差减杂交 (SSH) 技术,研究了盐胁迫下桐花树叶片在克隆转录水平上的耐盐基因表达。Ye 等^[9] 发现,在种子萌发的第 3 天和第 6 天, 15% NaCl 浓度对桐花树幼苗的影响并不显著;当 NaCl 浓度达到 25% 时,桐花树幼苗相对生长速率显著下降。此外,在废水处理方面,Wu 等^[10] 研究发现,桐花树能有效地减少溶解有机碳、氨氮以及无机氮。然而,盐胁迫对高纬度移植桐花树幼苗的生理生态效应研究尚未见报道。本研究以红树植物桐花树幼苗为试验材料,探讨盐胁迫对高纬度移植桐花树幼苗碳氮代谢、离子吸收以及叶片抗氧化系统的影响,旨在进一步揭示桐花树的耐盐机理,为高纬度苗木移植提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 供试材料及处理

试验于 2010 年 6 月 15 日至 8 月 30 日在浙江省海洋水产养殖研究所永兴基地玻璃温室内进行。选用 2010 年正常越冬且大小基本一致的 1 年生桐花树幼苗为试材。将其移植于盛有 40 kg 海砂的塑料箱中培养,分别采用盐度为 0、100、200、300 和 400 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 的 Hoagland 营养液(淡水配制)浇灌至沙基表面。每天用自来水补充蒸发的水量,5 d 调节盐度 1 次,15 d 更换 1 次 Hoagland 营养液,培养时间为 75 d。试验设计为随机区组设计,每个处理 3 次重复。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 植株形态指标的测定 在处理 75 d 时,按叶、茎和根各器官分样,每重复 3 株,蒸馏水冲洗数次,然后吸干表面水分,称取鲜质量后,于 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中杀青 10 min,75 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒量,称取干质量。根冠比 = 根干质量 / 地上部干质量,同时测量株高,游标

卡尺量基径。

1.2.2 光合色素含量的测定 称取 0.1 g 叶片,剪成数段放入 25 ml 无水乙醇:丙酮 1:1 的提取液中,在 25 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗条件下提取 24 h,测定提取液在 663、645 和 470 nm 处的吸光值,参照文献[11]的方法计算叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量。

1.2.3 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和丙二醛(MDA)含量的测定 参照文献[12]的方法,取 0.5 g 叶片,加 5 mL 50 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ pH 7.0 磷酸提取液冰浴研磨,4 $^{\circ}\text{C}$ (10000 \times g)离心 30 min,上清液为待测提取液。用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)法,560 nm 比色测定 SOD 活性;愈创木酚法测定 POD 活性;按照文献[13]的方法测定 MDA 含量。

1.2.4 可溶性总糖和游离氨基酸总量的测定 采用蒽酮法^[14]测定幼苗各器官的可溶性总糖含量,采用茚三酮比色法^[11]测定游离氨基酸含量。计算公式:可溶性总糖总量 = 器官可溶性总糖含量 \times 器官干质量;游离氨基酸总量 = 器官游离氨基酸含量 \times 器官干质量。

1.2.5 离子含量测定 取 0.1 g 干样,加入 5 mL 浓 H_2SO_4 消煮,30% H_2O_2 作为催化剂,定容到 100 mL,稀释数倍,采用原子吸收法测定 K^+ 和 Na^+ 含量。

1.3 数据处理

采用 SPSS 软件对试验数据进行方差分析和 LSD 显著性测验。数据结果为平均值 \pm 标准差(mean \pm SD)。采用 Excel 2003 作图。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫对桐花树幼苗生长的影响

由表 1 可以看出,随着 NaCl 浓度增加,桐花树幼苗的株高和基径降低,且在 300 和 400 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度处理时显著降低($P < 0.05$)。与对照相比,其株高分别下降 43.5% 和 50.5%,基径分别下降 18.6% 和 24.2%。

盐胁迫下,桐花树幼苗各器官鲜质量、干质量及根冠比变化趋势与株高和基径变化基本一致(表 1)。NaCl 浓度为 100 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,桐花树幼苗各器官均高于对照,但与对照无显著差异;当浓度超过 300 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,各指标开始显著下降。这表明较低的 NaCl 浓度能促进桐花树幼苗的生长,但处理间差异不显著,较高的 NaCl 浓度则抑制了桐花树幼苗的正常生长发育。

2.2 盐胁迫对桐花树幼苗叶片光合色素含量的影响

随着 NaCl 浓度的增加,桐花树叶片光合色素均

表 1 盐胁迫对桐花树幼苗生长的影响

Table 1 Effect of NaCl stress on the growth of *Aegiceras corniculatum* seedlings

NaCl 浓度 NaCl concentration (mmol · L ⁻¹)	叶片 Leaf		茎 Stem		根 Root		根冠比 Root/shoot ratio	株高 Plant height (cm)	基径 Stem basal diameter (mm)
	鲜质量 Fresh mass (g)	干质量 Dry mass (g)	鲜质量 Fresh mass (g)	干质量 Dry mass (g)	鲜质量 Fresh mass (g)	干质量 Dry mass (g)			
CK	13.41a	2.87a	8.76a	2.31a	13.5a	1.97a	0.38a	41.6a	9.1a
100	13.70a	2.90a	8.80a	2.48a	14.2ab	2.02a	0.38a	40.9a	9.0a
200	10.68ab	2.42b	6.56b	2.13a	9.50b	1.63a	0.36a	37.3b	7.6b
300	8.21b	1.98b	4.97b	1.93b	6.9b	1.20b	0.31b	23.5c	7.4bc
400	7.43b	1.79b	3.93b	1.57b	5.3b	0.97b	0.29b	20.6d	6.8c

同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters within the same column meant significant difference at 0.05 level.

呈先增后降的趋势(图 1). 100 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度时, 叶片的叶绿素 a 含量分别比 200、300 和 400 mmol · L⁻¹ 处理提高 21.4%、24.4% 和 28.5%, 叶绿素总量分别提高 20.0%、24.6% 和 31.1%; 叶绿素 b 和类胡萝卜素含量变化较平缓, 仅在 300 和 400 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度时与对照差异显著 ($P < 0.05$). 这表明盐胁迫对桐花树幼苗叶片光合色素的影响主要是叶绿素 a 的变化.

2.3 盐胁迫对桐花树幼苗器官中可溶性总糖和游离氨基酸含量的影响

由图 2 可以看出, 盐胁迫 75 d 后, 各处理桐花树幼苗器官中可溶性总糖总量均呈先增后降的趋势, 且 100 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度时, 各器官可溶性总糖总量达到最高. 其中, 100 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度的叶片可溶性总糖总量分别较对照、200、300 和 400 mmol · L⁻¹ NaCl 处理提高 10.1%、41.7%、56.2% 和 60.6%, 处理间均达到显著水平 ($P < 0.05$); 当 NaCl 浓度为 100 mmol · L⁻¹ 时, 茎和根中可溶性总糖总量均显著高于其他盐处理 ($P < 0.05$), 但与对照间无显著差异. 叶片中可溶性总糖总量高于茎和根, 而在

300 和 400 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 叶片可溶性总糖总量低于根中. 这表明在无盐或低盐胁迫下, 桐花树叶片是植株正常生长的关键; 而高盐胁迫下, 桐花根系的生长成为调节盐胁迫的重要器官.

盐胁迫对桐花树幼苗不同器官中游离氨基酸总量的影响不同. 100 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度处理能促进桐花树幼苗叶片中游离氨基酸总量的积累, 且总量显著高于其他盐处理 ($P < 0.05$); 茎中游离氨基酸总量仅在 300、400 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度时显著下降 ($P < 0.05$); 根中游离氨基酸总量在 200 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度时开始下降, 且在 300、400 mmol · L⁻¹ NaCl 浓度时达到显著水平 ($P < 0.05$).

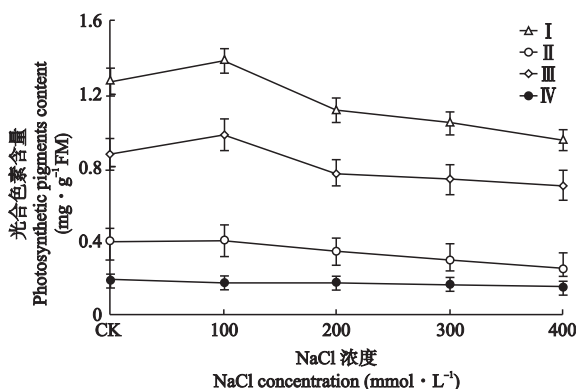


图 1 NaCl 胁迫对桐花树幼苗叶片光合色素含量的影响

Fig. 1 Effect of NaCl stress on contents of the photosynthetic pigments in leaves of *Aegiceras corniculatum* seedlings.

I: 叶绿素 Chlorophyll; II: 叶绿素 a Chlorophyll a; III: 叶绿素 b Chlorophyll b; IV: 类胡萝卜素 Carotenoid.

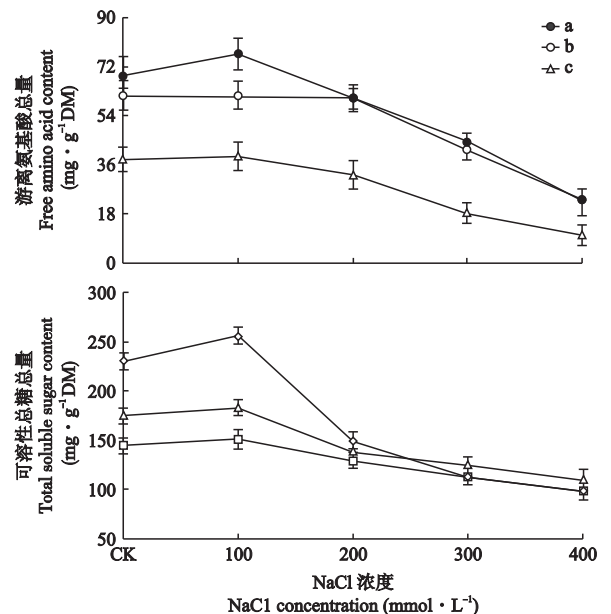


图 2 NaCl 胁迫对桐花树幼苗器官中游离氨基酸和可溶性总糖总量的影响

Fig. 2 Effect of NaCl stress on contents of the free amino acid and total soluble sugar in different organs of *Aegiceras corniculatum* seedlings.

a) 叶 Leaf; b) 茎 Stem; c) 根 Root. 下同 The same below.

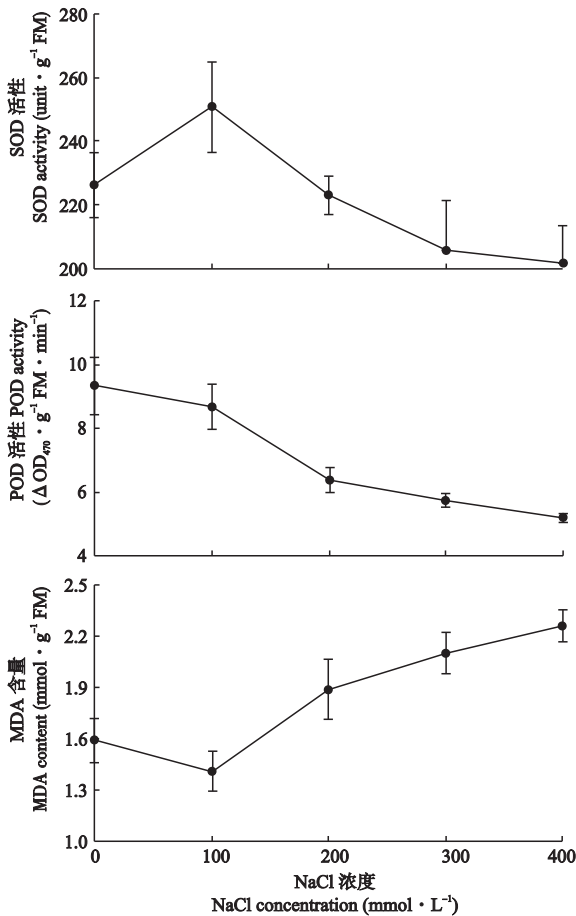


图3 NaCl胁迫对桐花树幼苗叶片SOD和POD酶活性及MDA含量的影响

Fig. 3 Effect of NaCl stress on the activities of SOD and POD and MDA content in leaves of *Aegiceras corniculatum* seedlings.

2.4 盐胁迫对桐花树幼苗叶片SOD、POD活性及MDA含量的影响

随着NaCl浓度的增加,桐花树幼苗叶片SOD活性先升后降,而POD活性呈下降趋势(图3).当NaCl浓度为100 mmol · L⁻¹时,叶片SOD活性升到最高,为对照的10.7% ($P < 0.05$);在400 mmol · L⁻¹ NaCl处理时,叶片SOD、POD活性均降到最低,分别为对照的12.2%和37.7%,且差异达到显著水平 ($P < 0.05$).

随NaCl浓度增加,桐花树幼苗叶片MDA含量呈先降后升的趋势(图3).当NaCl浓度为100 mmol · L⁻¹时,叶片MDA含量达到最低,为对照的88.7% ($P > 0.05$);而NaCl浓度为300和400 mmol · L⁻¹时,MDA含量分别为对照的1.3和1.4倍,差异达到显著水平 ($P < 0.05$).

2.5 盐胁迫对桐花树幼苗器官Na⁺、K⁺积累的影响

随NaCl浓度增加,桐花树叶中K⁺含量逐渐减少,而Na⁺含量逐渐增加(图4).与对照相比,低浓

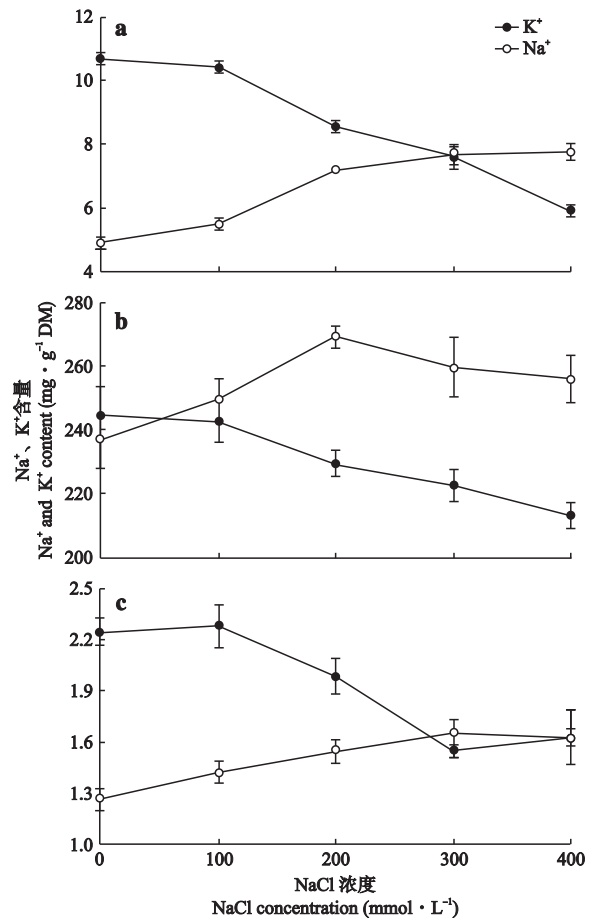


图4 NaCl胁迫对桐花树幼苗叶、茎、根中Na⁺、K⁺含量的影响

Fig. 4 Effect of NaCl stress on the contents of Na⁺ and K⁺ in leaves, stems and roots of *Aegiceras corniculatum* seedlings.

度NaCl对桐花树叶中K⁺、Na⁺离子吸收未有影响;当NaCl浓度达到300和400 mmol · L⁻¹时,叶片K⁺含量分别降低了46.6%和70.6%,而Na⁺含量增加4.0和4.1倍,均达到显著水平 ($P < 0.05$).

桐花树茎中K⁺含量减少,而Na⁺含量却呈先增加后下降的趋势.茎中K⁺含量与叶片中K⁺含量变化一致,仅在300和400 mmol · L⁻¹ NaCl浓度处理时K⁺含量显著低于对照.当NaCl浓度在300 mmol · L⁻¹时,Na⁺积累量达到最高 ($P < 0.05$),之后缓慢下降.

桐花树根中K⁺含量先增后降,而Na⁺含量则呈上升趋势.与对照相比,NaCl浓度为200 mmol · L⁻¹时K⁺含量开始显著下降,而Na⁺含量却开始显著增加.

3 讨论

本研究结果表明,无盐胁迫营养液中桐花树能够正常生长,株高、基径以及植株生物量均显著高于

高盐胁迫处理,与其他研究报道相同^[15-16]. Sobrado 等^[18]发现,无盐胁迫下桐花树能健康生长,叶片组织也未受伤害. Iyengar 和 Reddy^[19]研究表明,盐胁迫降低了桐花树的叶绿素和类胡萝卜素含量,可能是盐胁迫改变了色素蛋白复合物脂类蛋白比,或增加了叶绿素酶活性. 本研究中,当 NaCl 浓度为 100 mmol · L⁻¹时,桐花树叶绿素 a、b 和总叶绿素含量均提高,对株高、基径和干鲜质量增加有促进作用;当 NaCl 浓度超过 300 mmol · L⁻¹时,叶绿素含量、株高、基径和干鲜质量开始显著下降,而叶绿素 a/b 并未发生显著变化,说明盐胁迫没有改变类囊体膜的光获取复合物^[19]. 生物量的降低与叶绿素合成有着密切关系.

高 NaCl 浓度能使植物代谢受到氧化胁迫,诱导抗氧化酶活性改变,如过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)^[20],导致抗氧化系统平衡失调,产生大量活性氧(AOS)^[21],发生膜脂过氧化作用,从而形成 MDA. Ru 等^[22]认为,高盐胁迫下,秋茄叶片中 SOD、POD 活性迅速增加是秋茄耐盐的原因之一. 本研究中,低盐环境中桐花树幼苗叶片 SOD 活性增加;高盐胁迫下,其 SOD、POD 活性均降低,MDA 含量则迅速增加. 这表明低盐环境可以提高 SOD 活性,降低 MDA 含量,减少活性氧(ROS)的产生和膜脂过氧化反应的伤害,从而促进桐花树的生长. 这与郑海雷等^[23]的研究结果相一致.

盐胁迫抑制了甜土植物叶片光合色素的合成,蛋白水解酶活性下降,游离氨基酸、可溶性总糖含量减少,导致植物碳氮代谢下降^[24]. Kerepesi 等^[25]研究认为,盐胁迫能提高植物糖的含量(如果糖、果聚糖、蔗糖等). 高盐胁迫主要影响桐花树幼苗的蛋白合成或蛋白水解,游离氨基酸含量减少,但蛋白质含量并未受到影响. 同样,高盐胁迫提高淀粉含量,而降低可溶性总糖含量^[26]. 表明这种泌盐植物通过调节碳氮代谢来适应盐胁迫. 本研究中,低盐环境促进了桐花树叶片可溶性总糖和游离氨基酸总量的增加,当 NaCl 浓度达到 200 mmol · L⁻¹时,叶片、根中可溶性总糖显著下降,而 NaCl 浓度为 300 mmol · L⁻¹时,茎中可溶性总糖,叶片、茎和根中游离氨基酸总量显著下降. 可能是由于高盐胁迫下,桐花树叶片光合功能的衰退能够引起植株蛋白质和糖合成受阻,抑制植株碳氮代谢,尤其对叶片的影响更为明显.

适量的 Na⁺可以维持植物细胞内外离子的平衡. 盐胁迫下,植物体内会积累过量的 Na⁺,导致其

他阳离子(尤其是 K⁺)浓度发生改变^[27]. 盐生植物在长期的进化过程中形成了一系列生理机制来适应外界环境,在盐渍环境中,植物通过吸收大量 Na⁺和 Cl⁻来降低渗透势,有助于从土壤中吸收水分^[28]. 桐花树作为典型盐生植物,高盐胁迫时茎部的 Na⁺含量显著增加,而茎部含水量却显著降低. 因此,较低的含水量不足以弥补离子积累,进而阻止向根部和叶片输送离子^[29]. 本研究中,随 NaCl 浓度的增加,桐花树幼苗地上部和根部 Na⁺含量增加,K⁺含量却呈下降趋势. 低盐胁迫下,桐花树幼苗叶片和根部中 Na⁺含量要低于茎部,而 K⁺含量却高于茎部;高盐胁迫下,茎中 Na⁺含量显著高于叶片和根部,而 K⁺含量却低于叶片和根部. 这表明高盐胁迫下,根部 Na⁺向茎部和叶片运输后,桐花树幼苗茎部液泡对 Na⁺的封存能力显著高于根部和叶片,以维持细胞质中较低浓度的 Na⁺和较高浓度的 K⁺,利于桐花树对盐胁迫的适应. 此外,桐花树各器官中离子所在的位置和积累机制有待进一步研究.

综上所述,低盐胁迫能增加桐花树光和色素合成,提高清除 O₂⁻和 H₂O₂的 SOD 和 POD 活性,减少膜脂过氧化作用,促进碳氮代谢,加快植株生长;相反,当 NaCl 浓度超过 300 mmol L⁻¹时,桐花树光合色素含量会显著降低,且清除活性氧(ROS)的 SOD 和 POD 活性也显著降低,增加了膜脂过氧化物(MDA)的含量,抑制了各器官中可溶性总糖和游离氨基酸总量,导致碳氮代谢失调,致使植株生物量减少.

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [2] Gong J (龚 婕), Song Y-Q (宋豫秦), Chen S-B (陈少波). Effects of global climate change on mangrove in Zhejiang coast. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2009, **37** (20): 9742–9744 (in Chinese)
- [3] Shi L (石 莉). Distribution, growth and adaptability to environment of mangroves in China. *Marine Information* (海洋信息), 2002(4): 14–18 (in Chinese)
- [4] Chi W (池 伟), Chen S-B (陈少波), Qiu J-B (仇建标), et al. The ecological adaptability of mangroves under low temperature stress. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), 2008, **35** (4): 146–148 (in Chinese)
- [5] Li N, Chen S, Zhou X, et al. Effect of NaCl on photosynthesis, salt accumulation and ion compartmentation in

- two mangrove species, *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*. *Aquatic Botany*, 2008, **88**: 303–310
- [6] Duck NC, Ball MC, Ellison JC. Factors influencing biodiversity and distributional gradients in mangroves. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 1998, **7**: 27–47
- [7] Christian R. Interactive effects of salinity and irradiance on photoprotection in acclimated seedlings of two sympatric mangroves. *Trees*, 2005, **19**: 596–606
- [8] Fu X, Huang Y, Deng S, *et al.* Construction of a SSH library of *Aegiceras corniculatum* under salt stress and expression analysis of four transcripts. *Plant Science*, 2005, **169**: 147–154
- [9] Ye Y, Tam NFY, Lu CY, *et al.* Effects of salinity on germination, seedling growth and physiology of three salt-secreting mangrove species. *Aquatic Botany*, 2005, **83**: 193–205
- [10] Wu Y, Tam NFY, Wong MH. Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **57**: 727–734
- [11] Li H-S (李合生). *Experimental Principle and Technique for Plant Physiology and Biochemistry*. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [12] Tan W, Liu J, Dai T, *et al.* Alterations in photosynthesis and antioxidant enzyme activity in winter wheat subjected to post-anthesis waterlogging. *Photosynthetica*, 2008, **46**: 21–27
- [13] Du Z, Bramlage WJ. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1992, **40**: 1566–1570
- [14] Fales FW. The assimilation and degradation of carbohydrates by yeast cells. *Journal of Biological Chemistry*, 1951, **193**: 113–124
- [15] Werner A, Stelzer R. Physiological responses of the mangrove *Rhizophora mangle* grown in the absence and presence of NaCl. *Plant, Cell and Environment*, 1990, **13**: 243–255
- [16] Burchett MD, Clarke CJ, Field CD, *et al.* Growth and respiration in two mangrove species at a range of salinities. *Plant Physiology*, 1989, **75**: 299–303
- [17] Sobrado MA. Leaf photosynthesis of the mangrove *Aegiceras corniculatum* as affected by NaCl. *Photosynthetica*, 1999, **36**: 547–555
- [18] Iyengar ERR, Reddy MP. Photosynthesis in high salt-tolerant plants// Pesserkali M, ed. *Hand Book of Photosynthesis*. Baten Rose, USA: Marshal Dekar, 1996: 56–65
- [19] Parida AK, Das AB, Sanada Y, *et al.* Effects of salinity on biochemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*. *Aquatic Botany*, 2004, **80**: 77–87
- [20] Gossett DR, Banks SW, Millhollon EP, *et al.* Antioxidant response to NaCl stress in a control and NaCl-tolerant cotton cell line grown in the presence of paraquat, buthionine sulfoximine and exogenous glutathione. *Plant Physiology*, 1996, **112**: 803–809
- [21] Gomez JM, Hernandez JA, Jimenez A, *et al.* Differential response of antioxidative enzymes of chloroplasts and mitochondria to long-term NaCl stress of pea plants. *Free Radical Research*, 1999, **31**: 11–18
- [22] Ru QM, Xiao Q, Lin P, *et al.* Short- and long-term effects of NaCl on physiological and biochemical characteristics in leaves of a true mangrove, *Kandelia candel*. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, **56**: 363–369
- [23] Zheng H-L (郑海雷) Lin P (林鹏). The effect of salinity on membrane protection system for various organs of *Aegiceras corniculatum*. *Journal of Xiamen University (Natural Science)* (厦门大学学报·自然科学版), 1995, **34**(4): 629–633 (in Chinese)
- [24] Zheng C-F (郑春芳), Jiang D (姜东), Dai T-B (戴廷波), *et al.* Effects nitroprusside, a nitric oxide donor, on carbon and nitrogen metabolism and the activity of the antioxidation system in wheat seedling under salt stress. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(5): 1174–1183 (in Chinese)
- [25] Kerepesi I, Galiba G. Osmotic and salt stress-induced alteration in soluble carbohydrate content in wheat seedlings. *Crop Science*, 2000, **40**: 482–487
- [26] Parida AK, Das AB, Sanada Y, *et al.* Effects of salinity on biochemical components of the mangrove, *Aegiceras corniculatum*. *Aquatic Botany*, 2004, **80**: 77–87
- [27] Lee GJ, Duncan RR, Carrow RN. Nutrient uptake responses and inorganic ion contribution to solute potential under salinity stress in halophytic seashore paspalums. *Crop Science*, 2007, **47**: 2504–2512
- [28] Zhao KF, Fan H, Jiang XY, *et al.* Critical day-length and photoinductive cycles for the induction of flowering in halophyte *Suaeda salsa*. *Plant Science*, 2002, **162**: 27–31
- [29] Suaáñez N, Medina E. Influence of salinity on Na⁺ and K⁺ accumulation, and gas exchange in *Avicennia germinans*. *Photosynthetica*, 2006, **44**: 268–274

作者简介 郑春芳,女,1979年生,博士,助理研究员。主要从事海岸带生态学及海岸带生物资源保护理论研究,发表论文10余篇。E-mail: zcf66@sina.com

责任编辑 李凤琴
