

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

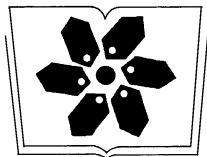
Acta Ecologica Sinica



第34卷 第2期 Vol.34 No.2 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 2 期 2014 年 1 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 连续免耕对不同质地稻田土壤理化性质的影响 龚冬琴, 吕 军 (239)
- 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局 孙才志, 闫晓露, 钟敬秋 (247)
- 完全水淹环境中光照和溶氧对喜旱莲子草表型可塑性的影响 许建平, 张小萍, 曾 波, 等 (258)
- 赤潮过程中“藻-菌”关系研究进展 周 进, 陈国福, 朱小山, 等 (269)
- 盐湖微微型浮游植物多样性研究进展 王家利, 王 芳 (282)
- 臭氧胁迫对植物主要生理功能的影响 列淦文, 叶龙华, 薛 立 (294)
- 啮齿动物分子系统地理学研究进展 刘 铸, 徐艳春, 戎 可, 等 (307)
- 生态系统服务制图研究进展 张立伟, 傅伯杰 (316)

个体与基础生态

- NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、运输与分配特性 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 等 (326)
- 不同生境吉首蒲儿根叶片形态和叶绿素荧光特征的比较 向 芬, 周 强, 田向荣, 等 (337)
- 小麦 LAI-2000 观测值对辐亮度变化的响应 王 龔, 田庆久, 孙绍杰, 等 (345)
- K^+ 、 Cr^{6+} 对网纹藤壶幼虫发育和存活的影响 胡煜峰, 严 涛, 曹文浩, 等 (353)
- 马铃薯甲虫成虫田间扩散规律 李 超, 彭 赫, 程登发, 等 (359)

种群、群落和生态系统

- 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化 孙鹏飞, 单秀娟, 吴 强, 等 (367)
- 黄海中南部不同断面鱼类群落结构及其多样性 单秀娟, 陈云龙, 戴芳群, 等 (377)
- 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析 陈小华, 李小平, 王菲菲, 等 (390)
- 盐城淤泥质潮滩湿地潮沟发育及其对米草扩张的影响 侯明行, 刘红玉, 张华兵 (400)
- 江苏省农作物最大光能利用率时空特征及影响因子 康婷婷, 高 苹, 居为民, 等 (410)
- 1961—2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析 曹 阳, 杨 婕, 熊 伟, 等 (421)
- 黑龙江省 20 世纪森林变化及对氧气释放量的影响 张丽娟, 姜春艳, 马 骏, 等 (430)
- 松嫩草原不同演替阶段大型土壤动物功能类群特征 李晓强, 殷秀琴, 孙立娜 (442)
- 小兴安岭 6 种森林类型土壤微生物量的季节变化特征 刘 纯, 刘延坤, 金光泽 (451)

景观、区域和全球生态

- 黄淮海地区干旱变化特征及其对气候变化的响应 徐建文, 居 辉, 刘 勤, 等 (460)

我国西南地区风速变化及其影响因素 张志斌,杨 莹,张小平,等 (471)

青海湖流域矮嵩草草甸土壤有机碳密度分布特征 曹生奎,陈克龙,曹广超,等 (482)

基于生命周期评价的上海市水稻生产的碳足迹 曹黎明,李茂柏,王新其,等 (491)

研究简报

荒漠草原区柠条固沙人工林地表草本植被季节变化特征 刘任涛,柴永青,徐 坤,等 (500)

跨地带土壤置换实验研究 靳英华,许嘉巍,秦丽杰 (509)

SWAT 模型对景观格局变化的敏感性分析——以丹江口库区老灌河流域为例
..... 魏 冲,宋 轩,陈 杰 (517)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 29 * 2014-01



封面图说: 高原盐湖——中国是世界上盐湖分布比较稠密的国家,主要分布在高寒的青藏高原以及干旱半干旱地区的新疆、内蒙古一带。尽管盐湖生态环境极端恶劣,但它们依然是陆地特别是高原生态系统中十分重要的组成部分。微微型浮游植物通常是指粒径在 0.2—3 μm 之间的光合自养型浮游生物。微微型浮游植物不仅是海洋生态系统中生物量 and 生产力的最重要贡献者,也是盐湖生态系统最重要的组成部分。研究显示,水体矿化度是影响微微型浮游植物平面分布及群落结构组成的重要因子,光照、营养成分和温度等也会影响盐湖水体中微微型浮游植物平面分布及群落结构组成(详见 P282)。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201303270530

刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 刘涛, 狄文彬. NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、运输与分配特性. 生态学报, 2014, 34(2): 326-336.
Liu Z X, Zhang H X, Yang X Y, Liu T, Di W B. Growth, and cationic absorption, transportation and allocation of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under NaCl stress. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 326-336.

NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长和阳离子吸收、 运输与分配特性

刘正祥^{1,2}, 张华新^{1,2,*}, 杨秀艳^{1,2}, 刘 涛^{1,2}, 狄文彬³

(1. 国家林业局盐碱地研究中心, 北京 100091; 2. 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091;
3. 北京市林业勘察设计院, 北京 100029)

摘要:沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 耐盐性强, 是我国北方生态脆弱地区造林绿化的一个先锋树种。为探讨沙枣的盐适应机制, 研究了不同浓度 NaCl (0、100 和 200 mmol/L) 胁迫 30d 对其水培幼苗生物量累积以及不同组织 (根、茎、叶) K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 吸收、运输与分配的影响。结果表明: 盐胁迫不同程度地促进了沙枣苗根系生长; 100 mmol/L NaCl 胁迫对幼苗生物量累积无明显影响, 而 200 mmol/L 则显著抑制了生物量累积; 盐胁迫幼苗根、茎、叶中 Na^+ 含量以及 K^+ - Na^+ 选择性运输系数 ($S_{K, Na}$) 和 Ca^{2+} - Na^+ 选择性运输系数 ($S_{Ca, Na}$) 显著或大幅度增加, 而 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量以及 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 比值则显著或大幅度下降; 200 mmol/L NaCl 胁迫沙枣根 Na^+ 含量和根 Na^+ 净累积量分别为 22.15 mg/g 干重和 1.87 mg/株 (是对照的 16.20 倍和 20.06 倍), 根成为 Na^+ 净累积量增加幅度最大的组织和 Na^+ 含量最高的组织; 200 mmol/L NaCl 胁迫沙枣茎、叶中的 Na^+ 含量以及冠组织 Na^+ 净累积量分别高达 5.15、7.71 mg/g 干重和 3.29 mg/株 (是对照的 7.22 倍、9.58 倍和 5.45 倍), 但幼苗仍能正常生长。综合分析认为, 沙枣的盐适应机制是根系拒盐和冠组织耐盐, 主要通过根系的补偿生长效应、根系对 Na^+ 的聚积与限制作用以及冠组织对 Na^+ 的忍耐来实现的, 同时也与根、茎和叶对 K^+ 、 Ca^{2+} 选择性运输能力显著增强有关。

关键词:沙枣; NaCl 胁迫; 生物量; 阳离子

Growth, and cationic absorption, transportation and allocation of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under NaCl stress

LIU Zhengxiang^{1,2}, ZHANG Huaxin^{1,2,*}, YANG Xiuyan^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, DI Wenbin³

1 Research Center of Saline and Alkali Land of State Forestry Administration, Beijing 100091, China
2 State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China
3 Beijing Forestry Survey and Design Institute, Beijing 100029, China

Abstract: As a salt-tolerant shrub/tree species, *Elaeagnus angustifolia* L. is widely planted for afforestation in many marginal lands or environmentally harsh conditions in northern China. Although *E. angustifolia* is well known for its strong adaptation to harsh conditions, the underpinning physiological mechanisms associated with ion transport and homeostasis under high-salt conditions have not been revealed. Has it developed some physiological mechanisms to avoid the high Na^+ in soil or sequester the Na^+ in some specific tissues or organs? The use of *E. angustifolia* to answer these questions can greatly enhance our understanding of the general physiological mechanisms that plants deploy to combat the environmental challenges.

To unravel the underlying physiological mechanisms responsible for the extra-ordinary adaptation to high salt in *E.*

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划资助项目 (2011BAD38B0102); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目 (CAFYBB2011005-5)

收稿日期:2013-03-27; **修订日期:**2013-08-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanghx1998@126.com

angustifolia, we used the well-controlled water culture experiment in greenhouse to investigate the biomass accumulation, and the absorption, transportation and allocation of multiple ions including K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in different plant tissues (roots, stems and leaves) of *E. angustifolia* seedlings upon being challenged by different NaCl concentrations (0, 100 and 200 mmol/L) for 30 days. Interestingly, the root growth was stimulated to a different extent by salt stress. The biomass accumulation of *E. angustifolia* seedlings was not obviously affected by 100 mmol/L NaCl stress, whereas it was significantly inhibited by 200 mmol/L NaCl stress. Compared with non-salt control, the K^+ - Na^+ selective transportation coefficients ($S_{K, Na}$) and Ca^{2+} - Na^+ selective transportation coefficients ($S_{Ca, Na}$) of different plant tissues (roots, stems and leaves) under two salt concentrations were all significantly elevated, while the contents of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , and the ratios of K^+/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ and Mg^{2+}/Na^+ in the three plant tissues were all significantly decreased. The Na^+ concentration and net Na^+ accumulation in 200 mmol/L NaCl-stressed seedlings' roots were 22.15 mg/g DW and 1.87 mg/plant, respectively, which were 16.20 and 20.06 times higher than that in the control roots, respectively. The concentration and the accumulating amplitude of Na^+ in roots were more conspicuous than any of other two tissues, implicating that roots may contribute vitally to the observed salt-tolerance of *E. angustifolia*. The Na^+ concentration in stems and leaves of 200 mmol/L NaCl-stressed seedlings increased to 5.15 and 7.71 mg/g DW, which were 7.22 and 9.58 times the content in corresponding control, respectively, and net Na^+ accumulation in 200 mmol/L NaCl-stressed seedlings' shoots was 3.29 mg/plant (5.45 times as much as in control shoot). However, all seedlings stressed by two salt concentrations exhibited a normal growth, no typical salt-damaged symptoms like succulent shoot and abscised leaves in treated seedlings were observed, indicating that shoots (including stems and leaves) can tolerate high concentration's Na^+ stress. In conclusion, our findings suggested that the salt-adaptation mechanisms of *E. angustifolia* are root salt-rejection and shoot salt-tolerance, which are primarily implemented by root growth stimulation, root Na^+ accumulation and restriction, and shoot Na^+ endurance, and are also correlated with a remarkably increased ability of K^+ and Ca^{2+} selective transportation in roots, stems and leaves.

Key Words: *Elaeagnus angustifolia*; NaCl stress; biomass; cation

受气候变暖引起的海平面上升、干旱等自然灾害发生更为频繁、不合理的灌溉措施等诸多因素影响,如今全球盐碱地正以每年超过 1.0×10^4 — 1.5×10^4 km²的速度在增长^[1],给当地人们的生产、生活、经济发展乃至生态环境带来严重威胁。研究表明,与埋设暗管、抬高地势、局部设置隔离层等工程措施相比,利用耐盐碱植物,尤其是耐盐碱林木,改良盐碱地具有投资小、适用范围广和可持续性强等优点,生物治理已经成为盐碱地改良与利用的根本措施^[2-3]。因此,培育耐盐碱植物,研究其耐盐机制对于耐盐碱植物选育、盐碱地生态系统恢复与重建以及现代盐土农业发展具有重要的理论和现实意义。

沙枣 (*Elaeagnus angustifolia* L.) 为胡颓子科 (Elaeagnaceae) 胡颓子属 (*Elaeagnus* L.) 落叶灌木或小乔木,在我国主要分布于西北各省和内蒙古西部,少量分布到华北北部、东北西部,并在山东、河北、天津等地有引种栽培。沙枣分布广,生活力强,具有抗风沙、耐盐碱、耐贫瘠等特性,兼具生态、经济和药用

价值^[4-5],已经成为我国北方生态脆弱地区造林绿化的一个先锋树种。在沙枣耐盐生理方面,研究涉及种子萌发、水分与渗透调节、抗氧化防御、光合生理等领域^[6-10];而对其矿质离子研究不够深入和系统^[11-13],且仅从参试树种之间盐离子累积量差异的角度研究了其盐适应类型,但并未从盐离子在沙枣体内不同组织间累积与分配的角度对其耐盐机制做进一步探讨^[14-15]。因此,沙枣表现出较强耐盐性中的一些关键问题有待解决:NaCl 胁迫下沙枣离子选择性吸收(或运输)特性以及离子平衡的破坏程度如何? 研究者在盐碱胁迫研究中较为关注的、毒害性较强的 Na^+ 在植株体内是否聚积,聚积(若有)的程度如何,在各组织水平上又是如何区隔化的? 此外,众多研究表明,植物的盐适应机制主要包括避盐和耐盐^[16-17],那么典型的耐盐植物沙枣又是通过何种机制来实现的?

为探讨上述问题,本文在温室水培条件下,以沙枣实生幼苗为材料,研究了 NaCl 胁迫下幼苗生物量

累积以及根、茎、叶各组织中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 矿质离子的吸收、运输和分配特性,以期深入了解沙枣的盐适应机制,为其在盐碱地生物治理中的规模化推广与应用提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2011 年 10 月下旬,在新疆北部的昌吉市大西渠乡采集沙枣成熟果实,脱去果皮,洗净种子,置于 4℃ 冰柜内贮藏备用。

1.2 试验方法

试验在中国林业科学研究院科研温室内进行。2012 年 6 月上旬,将经过低温沙藏并萌动露白的种子播种到装有蛭石的营养钵中。每盆播种 1 粒,置于温室中育苗。待幼苗生长至 8 片或 10 片叶龄,株高约为 10 cm 时,选取长势一致的幼苗定植到塑料容器中进行水培。盐胁迫前,对沙枣幼苗进行为期 18d 的预培养,以使其适应水培条件,正常生长。

2012 年 7 月 15 日进行盐处理,试验共设 3 个浓度水平,即 (1) CK: 1/4 Hoagland + 0 mmol/L NaCl; (2) 1/4 Hoagland + 100 mmol/L NaCl; (3) 1/4 Hoagland + 200 mmol/L NaCl,并在处理当天采集幼苗样品用于测定初始生物量和各种矿质离子的初始含量(最终用于计算 Na^+ 的净累积量)。每个盐处理培养幼苗 4 盆,每盆容器中培养幼苗 24 株。为避免对幼苗造成渗透休克,采取每天增加 50 mmol/L NaCl 的方式递增施盐,各处理在同一天(即 7 月 15 日)到达预定浓度,此时计为盐胁迫的第 0 天。试验期间,每 4d 更换 1 次营养液(pH 值=6.0),全天通气培养。试验于 8 月 14 日结束,共胁迫处理 30d,采样用于各项指标的测定。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生物量的累积与分配

试验结束时,每个盐处理随机选择幼苗 20 株(5 株/盆×4 盆),分别采集幼苗的根、茎和叶,在 105℃ 下杀青 15 min,然后 80℃ 烘至质量恒定(干重, DW),自然冷却后分别测得各组分的生物量,并计算冠生物量(=茎生物量+叶生物量)、全株总生物量(=根生物量+冠生物量)、相对生物量(=某处理的平均总生物量/对照的平均总生物量×100%)以及根冠比值(=根生物量/冠生物量)。

1.3.2 矿质离子含量的测定

准确称取烘干并粉碎的植物样品约 0.1 g(共 3 份),于 50 mL 小烧杯中,加入 10 mL HNO_3 和 1 mL $HClO_4$,置于电热板上 100℃ 左右低温加盖消解,蒸发至约剩 0.5 mL 时,开盖继续加热蒸发至近粘稠状,并加热至白烟冒尽。加 0.5 mL HNO_3 微加热,用亚沸水冲洗内壁,冷却后,定容至 5 mL 或 10 mL(最终体积依待测成分的含量而定),静止过夜,此溶液即为待测液。采用电感耦合等离子体光谱仪 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer, Optima 5300DV, Pekin-Elmer, USA) 测定沙枣幼苗根、茎和叶中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量,并计算各组织中的 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 比值。

1.3.3 离子选择性运输能力的计算

根据王磊等^[18]的方法计算沙枣根、茎、叶中 K^+ - Na^+ 选择性运输(吸收)系数($S_{K/Na}$)和 Ca^{2+} - Na^+ 选择性运输(吸收)系数($S_{Ca/Na}$)。

1.3.4 Na^+ 净累积与分配的计算

沙枣幼苗不同组织 Na^+ 净累积 (ΔNa^+_{tissue} , mg/株)根据下列公式计算:

$$\Delta Na^+_{tissue} = [Na^+_{tissue}]_{t1} \times W_{tissue,t1} - [Na^+_{tissue}]_{t0} \times W_{tissue,t0}$$

式中, $[Na^+_{tissue}]$ 为组织(根、茎或叶)中 Na^+ 浓度(mg/g 干重); W_{tissue} 为组织干质量(g/株); $t1$ 和 $t0$ 为 2 个时间节点,本研究中分别指盐处理前(0d)和试验结束时(30d)。冠 Na^+ 净累积(ΔNa^+_{shoot})、全株 Na^+ 净累积(ΔNa^+_{plant})以及不同组织 Na^+ 相对含量则分别按下式计算:

$$\Delta Na^+_{shoot} = \Delta Na^+_{stem} + \Delta Na^+_{leaf}$$

$$\Delta Na^+_{plant} = \Delta Na^+_{root} + \Delta Na^+_{shoot}$$

$$\text{组织 } Na^+ \text{ 相对含量} = \frac{\text{组织 } Na^+ \text{ 净累积}}{\text{全株 } Na^+ \text{ 净累积}} \times 100\%$$

1.4 数据处理与分析

所有数据均在 Microsoft Excel 2003 软件中进行整理和作图,采用 PASW Statistics 18 统计软件对数据进行方差分析(one-way ANOVA)和差异显著性比较(Duncan 新复极差法)。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对沙枣幼苗生物量累积与分配的影响

由表 1 可以看出,盐胁迫促进了沙枣幼苗根生物量的累积,其中,100 mmol/L NaCl 胁迫幼苗根生物量比对照的高 26.5%,2 者之间差异达到显著水平;而 200 mmol/L 胁迫植株的根生物量也比对照的高 2.4%。在 100 mmol/L 条件下,幼苗的茎、叶、冠以及全株总生物量仅略低于对照植株相应组织的生物量;而 200 mmol/L 胁迫植株的茎、叶、冠和全株总生物量均显著低于对照植株相应组织的生物量。经

100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫后,幼苗植株的总生物量分别为对照植株的 99.1%和 63.9%,而根冠比值则随盐胁迫浓度的升高呈现出依次显著增加的趋势。上述结果表明,100 mmol/L NaCl 胁迫对植株生物量累积并没有产生明显的影响,而 200 mmol/L NaCl 胁迫则具有显著的抑制效应,且两种浓度盐胁迫均显著改变了幼苗生物量的分配格局。

表 1 不同浓度 NaCl 胁迫对沙枣幼苗生物量累积和根冠比值的影响

Table 1 Effects of different NaCl concentrations on biomass accumulation and root/shoot ratio of <i>Elaeagnus angustifolia</i> seedlings							
盐浓度 Salt concentration / (mmol/L)	生物量累积 Biomass accumulation/(g/株)					相对生物量 Relative biomass /%	根冠比值 Root/ shoot ratio
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	冠 Shoot	全株 Whole plant		
0	0.083±0.006 b	0.405±0.035 a	0.426±0.036 a	0.832±0.0693 a	0.915±0.075 a	100.0	0.103±0.004 c
100	0.105±0.006 a	0.380±0.023 a	0.422±0.025 a	0.802±0.0475 a	0.907±0.053 a	99.1	0.132±0.004 b
200	0.085±0.009 ab	0.216±0.018 b	0.284±0.022 b	0.500±0.039 b	0.585±0.047 b	63.9	0.166±0.006 a

表中数据为平均值±标准误,n=20;同列中不同小写字母表示盐处理之间具有显著差异(P< 0.05)

2.2 NaCl 胁迫对沙枣幼苗不同组织阳离子含量的影响

2.2.1 K⁺ 含量

由图 1 可以看出,对照、100 和 200 mmol/L NaCl 处理植株 K⁺ 含量在不同组织之间具有相同规律,即叶>根>茎,且各组织间的差异均达到显著水平。在不同处理之间,随着 NaCl 胁迫浓度的升高,幼苗根、茎、叶中 K⁺ 含量均呈现出依次显著下降的趋势,其中,与相应的对照相比,200 mmol/L NaCl 胁迫植株茎 K⁺ 含量的下降幅度最大(为 35.6%),根和叶中的降幅较为一致(分别为 24.6%和 24.8%)。这说明,盐胁迫幼苗植株体内的 K⁺ 优先向根和叶分配,以避免 K⁺ 营养亏缺、提高其自身的耐盐性,从而维持植株正常的生理活动。

2.2.2 Na⁺ 含量

经盐胁迫后,沙枣幼苗植株各组织 Na⁺ 含量急剧增加,同一组织不同处理之间以及同一种处理各组织之间均具有显著差异(图 1)。其中,100 mmol/L NaCl 胁迫幼苗根、茎、叶中 Na⁺ 含量分别为对照相应组织 Na⁺ 含量的 8.56、6.03 和 4.50 倍,而 200 mmol/L 胁迫植株 Na⁺ 含量则是对照相应组织的 16.20、7.22 和 9.58 倍。对于 100 mmol/L NaCl 胁迫植株,各组织 Na⁺ 含量顺序为根>茎>叶,茎和叶中的 Na⁺ 含量分别为根中的 36.7%和 30.9%;而 200 mmol/L 处理植株 Na⁺ 含量则为根>叶>茎,叶和茎中的 Na⁺ 含量分别

为根中的 34.8%和 23.3%。上述结果表明,2 种浓度盐胁迫沙枣幼苗均吸收了大量的 Na⁺,并将绝大部分的 Na⁺ 贮藏、限制在根组织中,且盐胁迫改变了茎和叶中的 Na⁺ 含量顺序。

2.2.3 Ca²⁺ 含量

由图 1 看出,无论是对照、100 或 200 mmol/L NaCl 胁迫幼苗,其各组织 Ca²⁺ 含量顺序相同,即叶 Ca²⁺ 含量最高,其次是根,茎中最低,且 Ca²⁺ 含量在各组织间的差异均达到显著水平。随着 NaCl 胁迫浓度的升高,根 Ca²⁺ 含量依次显著下降,100 和 200 mmol/L NaCl 处理植株根 Ca²⁺ 含量则分别为对照植株的 77.3%和 66.6%。经 100 或 200 mmol/L 的 NaCl 胁迫后,幼苗茎和叶 Ca²⁺ 含量均显著低于对照,但茎、叶 Ca²⁺ 含量在 100 与 200 mmol/L 处理之间较为一致、无显著差异。这表明,即使在 200 mmol/L 的高浓度盐胁迫下,沙枣幼苗地上部分仍能保持较高的 Ca²⁺ 含量,有利于缓解 NaCl 对冠组织(尤其是叶片)的伤害。

2.2.4 Mg²⁺ 含量

对照、100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫沙枣幼苗中 Mg²⁺ 含量最高的组织均是根系,其次是叶片,茎最低,且 Mg²⁺ 含量在同一处理不同组织之间均具有显著差异(图 1)。随着胁迫溶液中 NaCl 浓度依次升高,叶片中的 Mg²⁺ 含量依次显著下降,而根和茎中的 Mg²⁺ 含量则先显著下降而后显著升高,且与对照相

比,根系中 Mg^{2+} 含量的下降幅度最大(为 36.1%)。

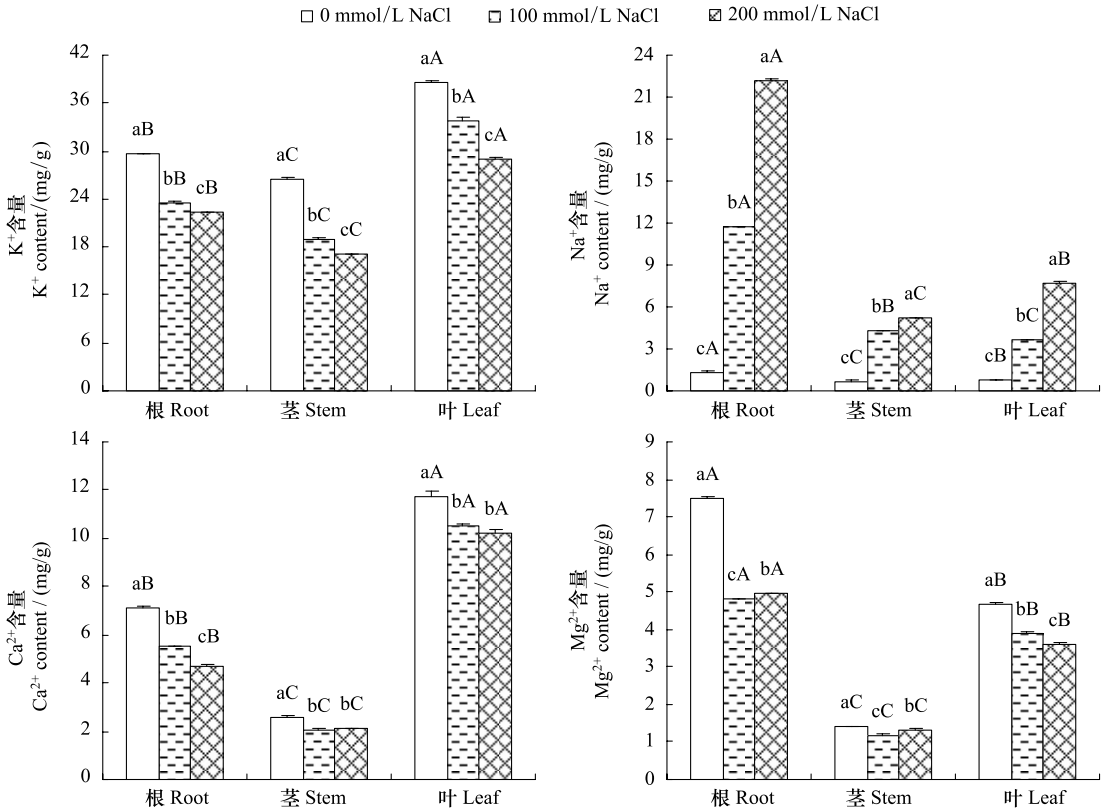


图1 不同浓度 NaCl 胁迫对沙枣幼苗各组织 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量的影响

Fig.1 Effects of different NaCl concentrations on K^+ , Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} content in different plant tissues of *Elaeagnus angustifolia* seedlings

图中误差棒为平均值的标准误, $n=3$; 不同小写字母表示离子含量在相同组织(根、茎或叶)不同盐处理之间具有显著差异 ($P<0.05$), 而不同大写字母则表示离子含量在相同盐处理(0、100 或 200 mmol/L NaCl)不同组织之间具有显著差异 ($P<0.05$)

2.3 NaCl 胁迫对沙枣幼苗各组织离子含量比值的影响

K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值常用来表征盐胁迫对离子平衡的破坏程度, 比值越低, 表明 Na^+ 对 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 吸收的抑制效应越强, 受盐害越严重。由图 2 可以看出, 盐胁迫沙枣幼苗根、茎、叶中的 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值均大幅度低于对照, 且随着盐胁迫浓度的增加总体上均呈现出下降的趋势。其中, 100 mmol/L NaCl 胁迫下, 根、茎、叶中的离子含量比值分别比对照相应组织下降了 90.7%、88.2%、80.6% (K^+/Na^+ 比值), 91.0%、86.8%、80.1% ($\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值), 以及 92.5%、86.2%、81.4% ($\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值)。当 NaCl 胁迫浓度继续增加至 200 mmol/L 时, 与 100 mmol/L 相比, 根 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值以及茎中的 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值下降幅度均较小(无显著差异), 而根、茎、叶中的其他离子含量比值降幅较大, 差异均达到显著水平。在同一种盐

处理下, 沙枣幼苗叶片 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值均高于或显著高于根和茎中的相应比值。上述结果表明, 在沙枣植株的 3 个组织中, 根系中的 Na^+ 对其 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 吸收的抑制效应最大, 而叶片最小。同时, 结合图 1 分析可知, 沙枣幼苗根、茎、叶中 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值随盐胁迫浓度的增大而下降是由于各组织 Na^+ 含量急剧增加, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量依次下降所致。

2.4 NaCl 胁迫对沙枣幼苗离子选择性吸收和运输的影响

由表 2 可知, 在 2 种浓度 NaCl 胁迫下, 沙枣幼苗根系的 $S_{\text{K, Na}}$ 和 $S_{\text{Ca, Na}}$ 远大于对照, 叶片 $S_{\text{K, Na}}$ 和 $S_{\text{Ca, Na}}$ 也显著高于对照(100 mmol/L NaCl 胁迫植株分别为对照的 2.10 和 2.20 倍); 幼苗根系 $S_{\text{K, Na}}$ 和叶片 $S_{\text{Ca, Na}}$ 在 100 与 200 mmol/L 2 个 NaCl 浓度之间相一致、无显著差异; 但 200 mmol/L NaCl 胁迫幼苗的

根系 $S_{Ca, Na}$ 和叶片 $S_{K, Na}$ 反而显著低于 100 mmol/L NaCl 胁迫植株。这表明,与对照相比,盐胁迫幼苗根

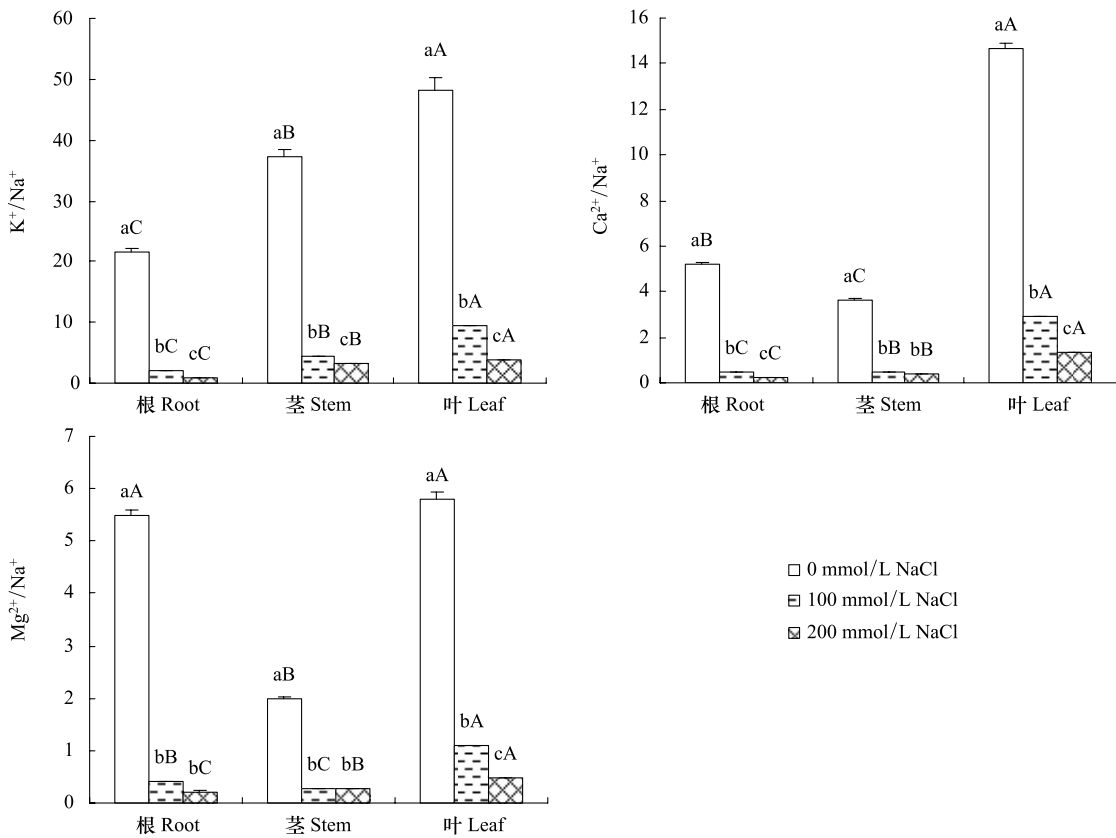


图2 不同浓度 NaCl 胁迫对沙枣幼苗各组织 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 以及 Mg^{2+}/Na^+ 比值的影响

Fig.2 Effects of different NaCl concentrations on K^+/Na^+ , Ca^{2+}/Na^+ and Mg^{2+}/Na^+ ratio in different plant tissues of *Elaeagnus angustifolia* seedlings

表2 不同浓度 NaCl 胁迫对沙枣幼苗各组织 K^+ 、 Ca^{2+} 选择性吸收和运输的影响

Table 2 Effects of different NaCl concentrations on selective absorption-transportation of K^+ and Ca^{2+} in different plant tissues of *Elaeagnus angustifolia* seedlings

盐浓度/ (mmol/L) Salt concentration	$S_{K, Na}$			$S_{Ca, Na}$		
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
0	0.01±0.00 bC	1.72±0.05 cB	2.21±0.08 cA	0.00±0.00 cC	0.70±0.02 cB	2.82±0.05 bA
100	76.57±0.38 aA	2.19±0.01 bC	4.64±0.00 aB	26.98±0.03 aA	1.02±0.01 bC	6.20±0.06 aB
200	76.79±0.21 aA	3.29±0.02 aC	3.72±0.01 bB	24.55±0.06 bA	1.93±0.02 aC	6.19±0.10 aB

表中数据为平均值±标准误, $n=3$; 同一列不同小写字母表示离子选择性运输系数在相同组织(根、茎或叶)不同盐处理之间具有显著差异 ($P<0.05$), 而同一行不同大写字母则表示离子选择性运输系数在相同盐处理(0、100 或 200 mmol/L NaCl) 不同组织之间具有显著差异 ($P<0.05$)

系和叶片具有很强的 K^+ 、 Ca^{2+} 选择性运输能力,且随着根和叶中 Na^+ 浓度进一步升高,这种能力在 100 mmol/L 时已趋近(或达到)饱和。在茎组织中, $S_{K, Na}$ 和 $S_{Ca, Na}$ 随 NaCl 胁迫浓度的升高依次显著增大,表明茎对 K^+ 、 Ca^{2+} 选择性运输能力逐渐增强,试图将更多的 Na^+ 限制在根系中。

由表 2 还可以看出, $S_{K, Na}$ 和 $S_{Ca, Na}$ 在不同组织之间具有较大差异。在无盐胁迫下, $S_{K, Na}$ 和 $S_{Ca, Na}$ 均表

现为叶>茎>根,即对 K^+ 与 Na^+ 、 Ca^{2+} 与 Na^+ 选择性运输(或吸收)能力最强的组织是叶片,其次是茎,根系最弱;当 NaCl 浓度为 100 或 200 mmol/L 时, $S_{K, Na}$ 和 $S_{Ca, Na}$ 均表现为根>叶>茎,幼苗根系转而成为离子选择性运输能力最强的组织。

2.5 NaCl 胁迫下沙枣幼苗 Na^+ 净累积与分配特性

由图 3 可以看出,随着盐胁迫浓度的升高,根、叶、冠以及整株幼苗 Na^+ 净累积量均依次增加,而茎

则先增加后减小。在 100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫下,沙枣幼苗 Na⁺净积累量分别是对照植株的 12.87 和 20.06 倍(根)、5.73 和 3.94 倍(茎)、4.66 和 6.77 倍(叶)、5.16 和 5.45 倍(冠)以及 6.19 和 7.41 倍(全株),其中,根 Na⁺净积累量增加幅度最大。当 NaCl 浓度由 100 mmol/L 升高至 200 mmol/L 时,整株幼苗 Na⁺净积累量显著增加,但冠 Na⁺净积累量增加有限(仅增加 5.60%),说明根是 Na⁺净积累量增加的

主要组织。Na⁺净积累量在不同处理之间差异较大;在对照幼苗中,Na⁺净积累量顺序为叶>茎>根,叶与茎之间无显著差异,且均显著高于根;100 mmol/L NaCl 胁迫植株中,Na⁺净积累量为茎>叶>根,茎与叶之间无显著差异,且均显著高于根;而经 200 mmol/L NaCl 胁迫后,Na⁺净积累量则为叶>根>茎,叶与根之间无显著差异,且均显著高于茎。

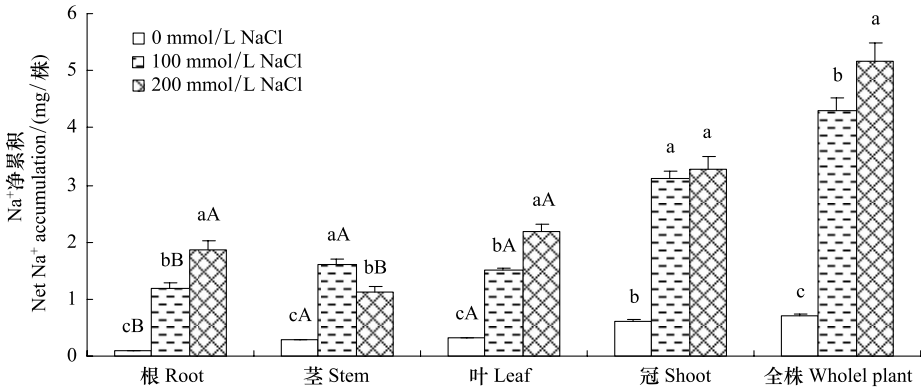


图3 不同浓度 NaCl 胁迫下沙枣幼苗根、茎、叶、冠以及全株 Na⁺净累积

Fig.3 Net Na⁺ accumulation in root, stem, leaf, shoot and whole-plant of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under different NaCl concentrations

以整株幼苗 Na⁺净积累量为 100%,探讨 Na⁺在不同组织之间的相对含量,即 Na⁺净增加量的分配格局。由图 4 可以看出,随着培养溶液中 NaCl 浓度由 0 升高至 100 mmol/L 并最终达到 200 mmol/L,根 Na⁺相对含量显著增加(分别为 13.40%、27.76%、36.22%),茎和冠均显著下降(分别为 40.45%、37.46%、21.51%,以及 86.60%、72.24%、63.78%),而叶则先显著下降后又显著升高至对照水平(分别为 46.15%、34.78%、42.27%)。在不同组织之间,对照

植株的 Na⁺相对含量顺序为叶>茎>根,差异均达到显著水平;100 mmol/L NaCl 胁迫植株为茎>叶>根,茎与叶之间无显著差异,且与根之间的差异均达到显著水平;而 200 mmol/L NaCl 胁迫植株则为叶>根>茎,相互之间的差异均达到显著水平。

3 结论与讨论

3.1 NaCl 胁迫下沙枣幼苗生长及其耐盐性

培养介质中的过量盐分主要通过离子毒害和渗透胁迫对植株造成伤害,生长抑制是植物对盐渍逆境最为常见的生理响应^[19-20]。然而,对于盐生植物或某些耐盐性较强的甜土植物来说,适度的盐胁迫不仅不会抑制甚至反而会促进其生长和生物量累积^[21]。本项研究中,在 100 mmol/L NaCl 胁迫下,沙枣幼苗的茎、叶、冠以及整株生长并未受到明显影响,总生物量累积仍然维持在对照水平;而 200 mmol/L NaCl 处理 30d 时,幼苗的相对生物量为 63.9%。可见,沙枣对盐胁迫具有较强的耐受性,这与杨升等^[14]的研究结论是一致的。

正常情况下,植物根、冠的大小和功能是平衡

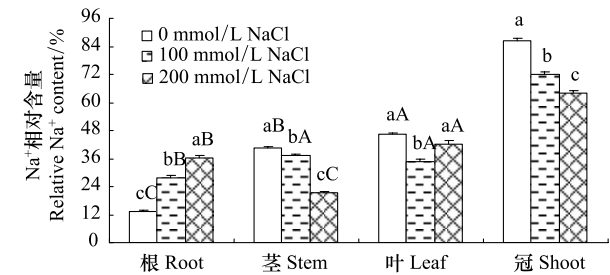


图4 不同浓度 NaCl 胁迫对沙枣幼苗根、茎、叶和冠中 Na⁺分配的影响

Fig.4 Effects of different NaCl concentrations on Na⁺ allocation in root, stem, leaf and shoot of *Elaeagnus angustifolia* seedlings

的。但在受到资源限制时,这种平衡随即被打破,植物通常会调节生物量分配以适应环境变化,而根冠比值是衡量生物量分配受逆境影响的重要指标^[22]。本研究结果显示,100 mmol/L NaCl 胁迫植株的根生物量和根冠比值均显著高于对照;当 NaCl 浓度升高至 200 mmol/L 时,其根生物量虽然较 100 mmol/L 胁迫植株下降了 19.0%,但仍比对照植株高 2.4%,而根冠比值则进一步显著增加。这表明,两种浓度(特别是 100 mmol/L)盐胁迫促进了沙枣幼苗根系的生长和发育,根系能够通过扩大生长量以补偿盐胁迫对其吸收功能的损伤,这种根系补偿生长效应对于维持植株地上部分的正常生长和水分需求具有重要意义^[21]。

莫海波等^[23]将相对生物量下降为对照植株的 50%和植株死亡率达到 50%时所对应的盐浓度分别作为该树种的生长临界浓度(C_{50})和半致死浓度(HLC_{50})。本研究中,与对照相比,100 mmol/L NaCl 胁迫植株的相对生物量下降 0.9%,死亡率为 3.1%;即使在 200 mmol/L 的高浓度下,相对生物量也仅下降 36.1%,死亡率仅为 4.9%,且植株仍能正常生长并未出现典型的盐害症状。这说明,在本试验条件下,沙枣的 C_{50} 和 HLC_{50} 均高于 200 mmol/L,且 HLC_{50} 高于 C_{50} 。同时,相关研究也指出,100 mmol/L NaCl 胁迫对沙枣盆栽幼苗的生长几乎没有影响^[14, 24],而在含盐量为 0.8%—1.2%的田间盐渍生境中沙枣也能够正常生长^[24],这与本试验水培条件下得出的结论是相吻合的。然而,对于沙枣在水培条件下的耐盐极限、 C_{50} 和 HLC_{50} ,有待随后的试验进一步明确。

3.2 NaCl 胁迫对沙枣幼苗离子平衡的影响

K、Ca 和 Mg 是植物生长所必需的大量矿质元素,具有重要的生理功能;Na 作为有益元素参与气孔调节、 C_4 和 CAM 植物 PEP(磷酸烯醇式丙酮酸)的催化再生、盐生植物的渗透调节等生理活动。但是,这些离子只有处于相对平衡时才能发挥正常的生理作用,而平衡关系的破坏将对其生理作用产生不利影响^[25]。本研究结果显示,与对照相比,盐胁迫沙枣幼苗根、茎、叶中 Na^+ 含量均大幅度增加,而 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量则显著下降,导致各组织 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 值大幅度降低,说明盐胁迫下 Na^+ 的大量进入,阻碍了沙枣各组织对营养离子的吸收,最终破坏了各组织的离子平衡。然而,与本结论

不同的是,公勤等^[12]研究发现:随着 NaCl 胁迫浓度的增加,沙枣幼苗根、茎、叶中 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量变化不大,但作者并未对盐胁迫研究中人们最为关注的 Na^+ 含量以及各种离子间的平衡做进一步探讨。

$S_{K, Na}$ 和 $S_{Ca, Na}$ 表征植物对离子选择性运输(或吸收)的能力,其值越大,表明植物从根系向地上部分选择性运输(或根系从介质中选择性吸收) K^+ 和 Ca^{2+} 的能力越强,运输或吸收 Na^+ 的能力越弱,留在根系中的 Na^+ 越多^[26]。在 100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫下,沙枣幼苗根 $S_{K, Na}$ 和根 $S_{Ca, Na}$ 远大于其他组织 $S_{K, Na}$ 和 $S_{Ca, Na}$,说明盐胁迫下根系选择性运输 K^+ 和 Ca^{2+} 的能力大幅度提高,尽可能多的截留 Na^+ ,以削弱 Na^+ 在冠组织(尤其是叶)中聚积带来的负面影响、维持植株体内的离子平衡。随着 NaCl 浓度的升高,叶片 $S_{K, Na}$ 先显著增加后显著降低(但仍显著高于对照),而其 $S_{Ca, Na}$ 则显著增加到一个稳定的水平,表明沙枣幼苗具有较高的根系向叶片选择性运输 K^+ 和 Ca^{2+} 的能力,有助于提高细胞膜的稳定性和对盐渍逆境的适应性。但在 200 mmol/L 高浓度条件下,叶片中 Na^+ 大量聚积、 K^+ 吸收量显著减少,最终使得叶片 K^+/Na^+ 比值和根系向叶片选择性运输 K^+ 的能力均显著低于 100 mmol/L NaCl 胁迫,这可能是“ Na^+ 和 K^+ 竞争相同的吸收位点和活性位点”^[27]所致。

3.3 NaCl 胁迫下沙枣幼苗 Na^+ 累积与分配特性

本研究中,盐胁迫沙枣根 Na^+ 含量远大于茎和叶(其中,200 mmol/L 处理植株根 Na^+ 含量分别是茎和叶的 4.30 倍和 2.87 倍),根系成为 Na^+ 含量最高的组织;同时,盐胁迫改变了茎和叶中的 Na^+ 含量顺序。分析认为,低浓度盐胁迫下茎能够有效地限制 Na^+ 向叶片运输,成为贮藏 Na^+ 的次要组织,从而使得功能叶片中的 Na^+ 维持在一个相对较低的水平,保证了植株生物量的正常累积;而当 NaCl 浓度升高至 200 mmol/L 时,茎中积累的 Na^+ 可能超出了其有效控制范围,并将过多的 Na^+ 运向功能叶片,使得叶片最终成为贮存 Na^+ 的次要组织,以致 Na^+ 聚积到影响植株正常生长的水平,这与两种浓度盐胁迫下沙枣生物量累积的结果是相符合的。

然而,不同于上述结论,杨升^[13]研究表明,沙枣根、茎、叶中 Na^+ 含量在 0—400 mmol/L NaCl 之间变化相对较小(依次为 1.009—2.133、0.272—0.408、

1.378—1.840 mg/g 干重),即使在 500 mmol/L 高浓度条件下,植株各组织 Na^+ 含量也大幅度低于本研究 200 mmol/L 胁迫植株相应组织的 Na^+ 含量;在不同组织之间,根和叶 Na^+ 含量较为一致且均高于茎。而马正龙等^[11] 也发现, Na^+ 含量在各组织间的顺序为成熟叶片>幼叶>根系>幼果。笔者分析认为,产生这种差异的原因可能有:1) 培养介质。本研究采用营养液培养,介质中的盐分均匀一致;而盐分在盆栽容器介质中的均一性相当较差,且田间土壤中多呈斑块状分布;2) 参试植物材料。本研究所用沙枣为生长 75 d 的幼苗;而杨升^[13] 中的则为 2 年生苗木;3) 植物材料前处理方法。相对于常规的沸水浴提取,本研究采用强酸消解可能会使沙枣组织中矿物质离子提取的更为完全;4) 试验处理时间。本研究中盐胁迫处理 30d,而杨升^[13] 中的则历时 40d;5) 试验分析仪器的差异。

此外,与对照相比,盐胁迫大幅度增加了沙枣幼苗根、茎、叶、冠以及全株 Na^+ 净累积量,其中,根 Na^+ 净累积量的增加幅度最大。从绝对值来看,对照、100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫植株中 Na^+ 净累积量最大的组织分别为叶、茎和叶;但从相对含量来看,3 个处理植株的根生物量仅占各自总生物量的 9.1%、11.6%和 14.5%,却分别聚积了 Na^+ 净累积总量中的 13.4%、27.8%和 36.2%。同时,与 100 mmol/L 相比,200 mmol/L NaCl 处理沙枣整株幼苗的 Na^+ 净累积量显著增加了 19.6%,而冠组织仅增加了 5.6%。由此可见,盐胁迫,尤其是高浓度盐胁迫,根虽然不是 Na^+ 净累积量最大的组织(因其相对生物量较小),但却是 Na^+ 净累积增加的主要组织,也是 Na^+ 含量最高的组织,在沙枣耐盐中具有重要作用。

3.4 沙枣幼苗对 NaCl 胁迫的适应机制

植物的盐适应机制主要包括避盐和耐盐,前者主要通过“拒盐”、“稀盐”或“泌盐”等方式避免盐离子的大量聚积(其中,拒盐机制主要是根部不让外界盐分进入体内,或进入植物体后贮存在根部而不向地上部分运输,或仅仅运输一部分,从而降低整体或地上部分的盐浓度,免遭盐离子毒害);而耐盐植物则能忍受体内较高浓度的盐离子,组织区隔化盐离子通常是其维持生理活跃区域内细胞离子平衡的主要途径^[16-17, 28]。本研究表明,盐胁迫沙枣根 Na^+ 含量、根 $S_{\text{K}, \text{Na}}$ 和根 $S_{\text{Ca}, \text{Na}}$ 均远高于茎和叶,根也是 Na^+

净累积量增加幅度最大的组织,且随着盐胁迫浓度的升高, Na^+ 在根中的分配比例显著增加。说明盐胁迫改变了沙枣 Na^+ 的分配格局,将大量的 Na^+ 聚积、限制在根系中,并大幅度提高了根系向叶片选择性运输 K^+ 、 Ca^{2+} 的能力,避免了 Na^+ 在冠中的大量累积,从而减轻了地上部分的离子毒害。因此,根系对盐离子的这种滞留作用成为沙枣最重要的拒盐机制,这是对杨升等^[14] 和赵可夫等^[15] 研究结论的必要补充和有力支持。

同时,本研究还发现,200 mmol/L NaCl 胁迫沙枣茎、叶中的 Na^+ 含量以及冠 Na^+ 净累积量分别是对照植株的 7.22、9.58 和 5.45 倍,但植株仍能正常生长,叶片并未呈现出“叶尖或叶缘发黄、焦枯似灼烧状”等典型的盐害症状和肉质化特征,也并非像高浓度盐胁迫下四季竹(*Oligostachyum lubricum*) 那样具有“通过叶片脱落将盐离子排除体外”这种典型的避盐机制^[29],说明沙枣冠组织能够忍耐一定浓度(至少为 200 mmol/L)的 NaCl 胁迫,即其盐适应机制是耐盐。

然而,本文仅从阳离子吸收、运输和分配的角度对沙枣耐盐机制进行了探讨,阴离子(如 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等)对植物的耐盐性也具有较大影响^[30-31],有关这些离子在沙枣耐盐中的作用还有待进一步研究,才能为沙枣的盐适应机制提供更为全面的信息。

References:

[1] Liu Z X, Zhang H X, Yang X Y, Liu T. Research advances in gene and genetic engineering for saline-alkaline tolerance of forest trees. World Forestry Research, 2012, 25(5): 11-17.

[2] Djanaguiraman M, Sheeba J A, Shanker A K, Devi D D, Bangarusamy U. Rice can acclimate to lethal level of salinity by pretreatment with sublethal level of salinity through osmotic adjustment. Plant and Soil, 2006, 284(1/2): 363-373.

[3] Li Y L, Su X H, Zhang B Y, Huang Q J, Zhang X H, Huang R F. Expression of jasmonic ethylene responsive factor gene in transgenic poplar tree leads to increased salt tolerance. Tree Physiology, 2009, 29(2): 273-279.

[4] Guo L J, Wang Y T. Conservation research and prospects of Elaeagnus germplasm resources and utilization values. Chinese Wild Plant Resources, 2008, 27(5): 32-34.

[5] Yu W W, Yan G R. Resources and research situation of Elaeagnus spp.. Journal of Tianjin Agricultural University, 2009, 16(2): 46-50.

[6] Liu B Y, Zhang W H, Liu X C, Jiang S. Salt tolerance of

Elaeagnus angustifolia L. and *Caragana korshinskii* Kom. during germination. Bulletin of Botanical Research, 2007, 27 (6): 721-728.

[7] Gong Q, Qiman Y, Ailijiang M. Effect of NaCl stress on matter accumulated and water content in the three species of *Oleaster* plants seedlings. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2008, 31(3): 46-50.

[8] Peng L X, Zhou L J, Feng T, Li H, Yan G R. Effects of salt stress on activities of antioxidant enzymes and membrane lipid peroxidation of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings. Journal of Tianjin Agricultural University, 2009, 16(4): 1-4.

[9] Zhang G X, Li S L. Effects of salt stress on activities of antioxidant enzymes of two kinds of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings. Northern Horticulture, 2011, (10): 46-49.

[10] Li L, Pan X L, Li H. Comparative effects of NaCl and polyethylene glycol on PS II activity of *Elaeagnus angustifolia*. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31 (4): 768-775.

[11] Ma Z L, Bai S W. The effect of soil salinity on ions distribution and osmotic adjustment of *Elaeagnus angustifolia* L.. Journal of Gansu Sciences, 2007, 19(3): 83-85.

[12] Gong Q, Qiman Y, Ailijiang M. Effects of salt stress on ion distribution and osmotic adjustment substances in *Elaeagnus oxycarpa* Schlecht. Nonwood Forest Research, 2008, 26 (3): 34-37.

[13] Yang S. Study on Selection and Evaluation Criteria of Salinity Tolerance Tree Species in Coastal Region [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.

[14] Yang S, Zhang H X, Liu T. Morphological changes and physiological characteristics of seedlings from 16 tree species with salt stress. Journal of Zhejiang Agricultural and Forestry University, 2012, 29(5): 744-754.

[15] Zhao K F, Zhou S B, Liu J Y. Determination of some physiological properties of *Elaeagnus angustifolia* under salt stress. Journal of Shandong Normal University, 1992, 7(1): 72-76.

[16] Zhang K, Tian C Y, Li C J. Review of progress of studies on salt-tolerance mechanisms of annual halophytes. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1220-1231.

[17] Liao Y, Peng Y G, Chen G Z. Research advances in plant salt-tolerance mechanism. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27 (5): 2077-2089.

[18] Wang L, Long X H, Meng X F, Liu Z P, Jin L. Effects of salicylic acid on photosynthesis and ion absorption *Helianthus tuberosus* seedlings under NaCl stress. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(9): 1901-1907.

[19] Grundmann O, Nakajima J, Seo S, Butterweck V. Anti-anxiety effects of *Apocynum venntum* L. in the elevated plus maze test. Journal of Ethnopharmacology, 2007, 110(3): 406-411.

[20] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1): 651-681.

[21] Wang S F, Hu Y X, Li Z L, Sun H J, Chen Y T. Effects of NaCl stress on growth and mineral ion uptake, transportation and distribution of *Quercus virginiana*. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(17): 4609-4616.

[22] Zhang Y, Sheng Y B, Luo X F. Effects of water stress on biomass and photosynthetic characteristics of Tetraploid Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) clones. Forest Research, 2010, 23 (4): 920-923.

[23] Mo H B, Yin Y L, Lu Z G, Wei X J, Xu J H. Effects of NaCl stress on the seedling growth and K⁺-and Na⁺-allocation of four leguminous tree species. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(5): 1155-1161.

[24] Zhang B Z, Cao Z Y, Zhao K F. A study on some physiological properties of *Elaeagnus angustifolia* under salt stress condition. Scientia Silvae Sinicae, 1992, 28(2): 187-189.

[25] Xia Y, Liang H M, Wang T M, Shu H R, Wang Q H, Chai C H. Effects of NaCl stress on Ca, Mg, Fe and Zn contents of different apple organs. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3): 431-434.

[26] Teakle N L, Flowers T, Real D, Colmer T. *Lotus tenuis* tolerates the interactive effects of salinity and waterlogging by 'excluding' Na⁺ and Cl⁻ from the xylem. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(8): 2169-2180.

[27] Blumwald E. Sodium transport and salt tolerance in plants. Current Opinion in Cell Biology, 2000, 12(4): 431-434.

[28] Yang S H, Ji J, Wang G. Effects of salt stress on plants and the mechanism of salt tolerance. World Science-Technology Research and Development, 2006, 28(4): 70-76.

[29] Gu D X, Chen S L, Gu L J, Ke X, Zhuang M H, Li Y. Impacts of NaCl stress on *Oligostachyum lubricum* cell membrane permeability and mineral ion uptake, transportation, and allocation. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30 (7): 1417-1422.

[30] Roberts S K. Plasma membrane anion channels in higher plants and their putative functions in roots. New Phytologist, 2006, 169 (4): 647-666.

[31] Teakle N L, Tyerman S D. Mechanisms of Cl⁻ transport contributing to salt tolerance. Plant, Cell and Environment, 2010, 33(4): 566-589.

参考文献:

[1] 刘正祥, 张华新, 杨秀艳, 刘涛. 林木耐盐碱相关基因与基因工程研究进展. 世界林业研究, 2012, 25(5): 11-17.

[4] 郭丽君, 王玉涛. 沙枣种质资源特性及利用价值. 中国野生植物资源, 2008, 27(5): 32-34.

[5] 于玮玮, 阎国荣. 沙枣的资源及研究现状. 天津农学院学报, 2009, 16(2): 46-50.

[6] 刘宝玉, 张文辉, 刘新成, 姜珊. 沙枣和柠条种子萌发期耐盐

性研究. 植物研究, 2007, 27(6): 721-728.

[7] 公勤, 齐曼·尤努斯, 艾力江·买买提. NaCl 胁迫对 3 种胡颓子属植物幼苗体内物质积累及水分含量的影响. 新疆农业大学学报, 2008, 31(3): 46-50.

[8] 彭立新, 周黎君, 冯涛, 李慧, 阎国荣. 盐胁迫对沙枣幼苗抗氧化酶活性和膜脂过氧化的影响. 天津农学院学报, 2009, 16(4): 1-4.

[9] 张桂霞, 李树玲. 盐胁迫对两种沙枣抗氧化酶活性的影响. 北方园艺, 2011, (10): 46-49.

[10] 李利, 潘响亮, 李宏. 模拟干旱和盐分胁迫对沙枣幼苗 PSII 活力的影响. 西北植物学报, 2011, 31(4): 768-775.

[11] 马正龙, 白生文. 盐度对沙枣离子分布和渗透调节影响的研究. 甘肃科学学报, 2007, 19(3): 83-85.

[12] 公勤, 齐曼·尤努斯, 艾力江·买买提. 盐胁迫对尖果沙枣离子分布及渗透调节的影响. 经济林研究, 2008, 26(3): 34-37.

[13] 杨升. 滨海耐盐树种筛选及评价标准研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.

[14] 杨升, 张华新, 刘涛. 16 个树种盐胁迫下的生长表现和生理特性. 浙江农林大学学报, 2012, 29(5): 744-754.

[15] 赵可夫, 周澍波, 刘家尧. 盐分胁迫下沙枣幼苗一些生理特性的观测. 山东师范大学报: 自然科学版, 1992, 7(1): 72-76.

[16] 张科, 田长彦, 李春俭. 一年生盐生植物耐盐机制研究进展. 植物生态学报, 2009, 33(6): 1220-1231.

[17] 廖岩, 彭友贵, 陈桂珠. 植物耐盐性机理研究进展. 生态学报, 2007, 27(5): 2077-2089.

[18] 王磊, 隆小华, 孟宪法, 刘赵普, 晋利. 水杨酸对 NaCl 胁迫下菊芋幼苗光合作用及离子吸收的影响. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1901-1907.

[21] 王树凤, 胡韵雪, 李志兰, 孙海菁, 陈益泰. 盐胁迫对弗吉尼亚栎生长及矿质离子吸收、运输和分配的影响. 生态学报, 2010, 30(17): 4609-4616.

[22] 张怡, 沈应柏, 罗晓芳. 水分胁迫对四倍体刺槐苗生长和光合作用的影响. 林业科学研究, 2010, 23(4): 920-923.

[23] 莫海波, 殷云龙, 芦治国, 魏秀君, 徐建华. NaCl 胁迫对 4 种豆科树种幼苗生长和 K^+ 、 Na^+ 含量的影响. 应用生态学报, 2011, 22(5): 1155-1161.

[24] 张宝泽, 曹子谊, 赵可夫. 盐分胁迫下沙枣某些生理特性的研究. 林业科学, 1992, 28(2): 187-189.

[25] 夏阳, 梁慧敏, 王太明, 束怀瑞, 王清华, 柴传华. 盐胁迫对苹果器官中钙镁铁锌含量的影响. 应用生态学报, 2005, 16(3): 431-434.

[29] 顾大形, 陈双林, 顾李俭, 可晓, 庄明浩, 李应. 盐胁迫对四季竹细胞膜透性和矿质离子吸收、运输和分配的影响. 生态学杂志, 2011, 30(7): 1417-1422.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34 ,No.2 Jan. ,2014 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

Effects of soil texture on variations of paddy soil physical and chemical properties under continuous no tillage GONG Dongqin, LÜ Jun (239)

Evaluation of the landscape patterns vulnerability and analysis of spatial correlation patterns in the lower reaches of Liaohe River Plain SUN Caizhi, YAN Xiaolu, ZHONG Jingqiu (247)

Effects of light and dissolved oxygen on the phenotypic plasticity of *Alternanthera philoxeroides* in submergence conditions XU Jianping, ZHANG Xiaoping, ZENG Bo, et al (258)

A review of the relationship between algae and bacteria in harmful algal blooms ZHOU Jin, CHEN Guofu, ZHU Xiaoshan, et al (269)

Biodiversity and research progress on picophytoplankton in saline lakes WANG Jiali, WANG Fang (282)

Effects of ozone stress on major plant physiological functions LIE Ganwen, YE Longhua, XUE Li (294)

The current progress in rodents molecular phylogeography LIU Zhu, XU Yanchun, RONG Ke, et al (307)

The progress in ecosystem services mapping: a review ZHANG Liwei, FU Bojie (316)

Autecology & Fundamentals

Growth, and cationic absorption, transportation and allocation of *Elaeagnus angustifolia* seedlings under NaCl stress LIU Zhengxiang, ZHANG Huaxin, YANG Xiuyan, et al (326)

Leaf morphology and PS II chlorophyll fluorescence parameters in leaves of *Sinosenecio jishouensis* in Different Habitats XIANG Fen, ZHOU Qiang, TIAN Xiangrong, et al (337)

Response of change of wheat LAI measured with LAI-2000 to the radiance WANG Yan, TIAN Qingjiu, SUN Shaojie, et al (345)

Effects of K⁺ and Cr⁶⁺ on larval development and survival rate of the acorn barnacle *Balanus reticulatus* HU Yufeng, YAN Tao, CAO Wenhao, et al (353)

Diffusion of colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*, adults in field LI Chao, PENG He, CHENG Dengfa, et al (359)

Population, Community and Ecosystem

Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River Estuary SUN Pengfei, SHAN Xiujuan, WU Qiang, et al (367)

Variations in fish community structure and diversity in the sections of the central and southern Yellow Sea SHAN Xiujuan, CHEN Yunlong, DAI Fangqun, et al (377)

Research on the difference in eutrophication state and indicator threshold value determination among lakes in the Southern Jiangsu Province, China CHEN Xiaohua, LI Xiaoping, WANG Feifei, et al (390)

Effect of tidal creek system on the expansion of the invasive *Spartina* in the coastal wetland of Yancheng HOU Minghang, LIU Hongyu, ZHANG Huabing (400)

The spatial and temporal variations of maximum light use efficiency and possible driving factors of Croplands in Jiangsu Province KANG Tingting, GAO Ping, JU Weimin, et al (410)

Simulation of summer maize yield influenced by potential drought in China during 1961—2010 CAO Yang, YANG Jie, XIONG Wei, et al (421)

Forest change and its impact on the quantity of oxygen release in Heilongjiang Province during the Past Century ZHANG Lijuan, JIANG Chunyan, MA Jun, et al (430)

Soil macro-faunal guild characteristics at different successional stages in the Songnen grassland of China	LI Xiaoqiang, YIN Xiuqin, SUN Lina (442)
Seasonal dynamics of soil microbial biomass in six forest types in Xiaoxing'an Mountains, China	LIU Chun, LIU Yankun, JIN Guangze (451)
Landscape, Regional and Global Ecology	
Variation of drought and regional response to climate change in Huang-Huai-Hai Plain ...	XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (460)
Wind speed changes and its influencing factors in Southwestern China	ZHANG Zhibin, YANG Ying, ZHANG Xiaoping, et al (471)
Characteristics of soil carbon density distribution of the <i>Kobresia humilis</i> meadow in the Qinghai Lake basin	CAO Shengkui, CHEN Kelong, CAO Guangchao, et al (482)
Life cycle assessment of carbon footprint for rice production in Shanghai	CAO Liming, LI Maobai, WANG Xinqi, et al (491)
Research Notes	
Seasonal changes of ground vegetation characteristics under artificial <i>Caragana intermedia</i> plantations with age in desert steppe	LIU Rentao, CHAI Yongqing, XU Kun, et al (500)
The experimental study on trans-regional soil replacement	JIN Yinghua, XU Jiawei, QIN Lijie (509)
Sensitivity analysis of swat model on changes of landscape pattern: a case study from Lao Guanhe Watershed in Danjiangkou Reservoir Area	WEI Chong, SONG Xuan, CHEN Jie (517)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 2 期 (2014 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 2 (January, 2014)

编 辑 《生态学报》编辑部
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085
电话:(010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主 编 王如松

主 管 中国科学技术协会

主 办 中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
地址:北京海淀区双清路 18 号
邮政编码:100085

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂

发 行 科 学 出 版 社
地址:东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717
电话:(010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

订 购 全国各地邮局

国外发行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第 8013 号

许 可 证

Edited by Editorial board of
ACTA ECOLOGICA SINICA
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Tel: (010)62941099
www.ecologica.cn
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong

Supervised by China Association for Science and Technology

Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010)64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

