

网络出版时间:2018-04-20 16:29 DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2018.09.008
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20180420.1628.016.html

NaCl 胁迫对侧柏幼苗生长及矿质离子吸收和分配的影响

唐晓倩^{1,2},白应飞³,刘广亮⁴,刘广全^{1,5}

(1 中国水利水电科学研究院,北京,100038;2 国家林业局盐碱地研究中心,北京,100091;3 延安市退耕还林
工程办公室,陕西 延安,716000;4 吴起县林业局,陕西吴起 717600;5 国际泥沙研究培训中心,北京,100048)

【摘 要】 【目的】探讨侧柏幼苗对盐生环境的适应性及耐盐机制。【方法】以当年生侧柏幼苗为材料,通过温室土培模拟盐分不同梯度胁迫试验,研究不同浓度(0,100,200 mmol/L)NaCl 胁迫对侧柏幼苗生物量积累及其不同器官(根、茎、叶)K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺吸收、运输与分配的影响。【结果】(1)盐胁迫不同程度地促进了侧柏幼苗根系生长,但显著抑制了幼苗生物量的积累。(2)随着 NaCl 浓度的升高,侧柏幼苗各器官中 Na⁺ 含量增加,且 Na⁺ 含量在不同浓度盐胁迫下具有相同的分配规律,即根>叶>茎;随着 Na⁺ 含量的升高,各器官中 K⁺ 含量显著减少,Ca²⁺ 含量在根和叶中显著升高。(3)各器官中 K⁺/Na⁺、Ca²⁺/Na⁺ 和 Mg²⁺/Na⁺ 总体随 NaCl 胁迫浓度的升高呈下降趋势,叶片和茎部离子比值始终高于根部。(4)随着 NaCl 胁迫浓度的增加,根部到茎部的离子选择性运输系数 S_{K,Na}、S_{Ca,Na}、S_{Mg,Na} 逐渐降低;而茎部到叶部的 S_{K,Na}、S_{Ca,Na}、S_{Mg,Na} 在低浓度盐胁迫时显著升高,在高浓度盐胁迫下受到抑制。【结论】侧柏幼苗对 NaCl 胁迫具有一定的耐受性,这与根系对 Na⁺ 的聚积和限制作用以及低浓度盐胁迫下地上部对 K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 选择性运输能力的提高有关。

【关键词】 NaCl 胁迫;侧柏幼苗;生物量;矿质离子
【中图分类号】 Q945.78;S791.38 【文献标志码】 A 【文章编号】 1671-9387(2018)09-0060-07

Effects of NaCl stress on growth and mineral ions absorption and distribution of *Platycladus orientalis* seedlings

TANG Xiaoqian^{1,2}, BAI Yingfei³, LIU Guangliang⁴, LIU Guangquan^{1,5}

(1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2 Research Center of Saline and Alkali Land of State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3 Yan'an Municipal Management Office for Returning Farmland to Forest Project, Yan'an, Shaanxi 716000 China; 4 Wuqi County Forestry Bureau, Wuqi, Shaanxi 717600 China; 5 International Research and Training Center on Erosion & Sedimentation, Beijing 100048, China)

Abstract: 【Objective】 This study aimed to understand the growth adaptability and salt tolerance mechanism of *Platycladus orientalis* seedlings under NaCl stress. 【Method】 A potting experiment was conducted in a greenhouse to study the biomass accumulation as well as absorption, transportation and allocation of mineral ions including K⁺, Na⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ in different plant organs (roots, stems and leaves) of raw *P. orientalis* seedlings under NaCl stress with different concentrations (0, 100 and 200 mmol/L). 【Result】 1) The roots growth of *P. orientalis* seedlings was stimulated by NaCl stress, while the biomass accu-

【收稿日期】 2017-05-26
【基金项目】 “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0501602, 2016YFC0501705); Sztechand 产学研合作项目(THRD016); IWHR 成果转化专项(沙 1003012016)
【作者简介】 唐晓倩(1986—),女,山东莱芜人,在读博士,主要从事耐盐碱植物育种研究。E-mail: txqcaf@163.com
【通信作者】 刘广全(1964—),男,陕西商南人,教授,博士(后),博士生导师,主要从事生态系统管理技术研究。E-mail: gqliu@iwhr.com

mulation was significantly inhibited. 2) The contents of Na^+ in roots, stems and leaves were significantly increased with the increase of NaCl stress and the distribution was in the order of roots > stems > leaves. With the increase of Na^+ , K^+ were significantly decreased, while Ca^{2+} in roots and leaves were significantly increased. 3) With the increase of NaCl stress, the ratios of K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ in all organs decreased, and the ratios of leaf and stem were always higher than that of roots. 4) The selective transport coefficients, $S_{\text{K},\text{Na}}$, $S_{\text{Ca},\text{Na}}$ and $S_{\text{Mg},\text{Na}}$, from roots to stems decreased with the increase of NaCl stress; while those from stems to leaves were enhanced at low NaCl stress but were inhibited at high NaCl stress. 【Conclusion】 *P. orientalis* seedlings had certain tolerance to NaCl stress, which was mainly related to the accumulation and restriction of Na^+ in roots and increased selective transport ability of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in shoots under low salt stress.

Key words: NaCl stress; *Platycladus orientalis* seedlings; biomass; mineral ions

土壤盐渍化是一个全球性的资源与生态问题。据统计,全球盐碱地面积超过 $8 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[1], 由于受全球气候变暖引起的冰川融化海平面上升, 森林、草地和湿地等面积减小, 干旱等自然灾害频繁发生以及工业高速发展和不合理灌溉等因素的影响, 全球盐渍化土壤仍以每年 $(1.0 \times 10^6) \sim (1.5 \times 10^6) \text{ km}^2$ 的速度增加^[2]。我国各类盐渍土面积约为 $1 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[3], 尤其是西北干旱和半干旱等生态脆弱地区, 土壤盐渍化现象尤为严重^[4]。盐渍化对植物的伤害作用, 主要包括渗透胁迫、离子毒害及营养失衡等, 最终表现为抑制植物生长, 甚至导致死亡^[5]。盐胁迫下, 植物依靠自身积累无机盐离子进行渗透调节, 但高浓度的盐胁迫(高浓度 Na^+) 会抑制植物对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等矿质元素的吸收^[6-7], 一方面抑制了以 K^+ 为辅助因子的多种酶的活性; 另一方面影响了细胞膜的稳定性和地上部光合作用, 造成植物体内矿质元素比例失调, 影响植物正常的生长和发育^[8]。因此, 盐胁迫下维持和重建植物细胞中的离子平衡, 对植物正常的生理活动具有重要意义。

侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco) 为柏科侧柏属常绿乔木, 中国特产, 除青海、新疆外, 全国其余省(自治区)均有分布, 其适应性强, 耐寒、耐旱、抗盐碱、耐污染, 是我国应用最为普遍的观赏和造林树种^[9]。目前针对侧柏耐盐生理的研究主要集中在种子萌发、幼苗生长、光合生理、渗透调节及耐盐能力评价等方面^[10-13], 而对其矿质离子研究, 仅从参试的不同树种离子积累差异的角度分析其盐适应性强弱^[12-13], 而未见从离子在侧柏幼苗体内不同器官间运输和分配角度对其盐适应机制进行研究的报道。本试验以当年生侧柏幼苗为材料, 通过温室土培模拟 NaCl 不同梯度胁迫试验, 研究 NaCl 胁迫对幼苗生物量积累及根、茎、叶中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、

Mg^{2+} 的吸收、运输与分配的影响, 以期从离子积累与分配的角度进一步探讨侧柏的耐盐生理机制, 为侧柏在困难立地造林提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

供试侧柏种子采自河南省安阳市林州县。试验于 2016 年 4—8 月在中国林业科学研究院科研温室内进行。侧柏种子用温水浸泡 24 h, 与湿沙混合催芽, 2016 年 4 月中旬, 将萌动露白的种子播种到营养钵中, 每钵播种 2 粒, 于温室内育苗。待幼苗生长 2 个月后, 选取长势一致的幼苗移栽至 $30 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ (直径 $\times$ 高度) 的塑料盆中, 盆中加入等量基质, 基质成分为蛭石和珍珠岩, 按照体积比 3 : 1 混合, 装盆前栽培基质和塑料盆用多菌灵进行全面消毒处理。盐胁迫前, 侧柏幼苗缓苗 1 个月左右, 以适应土培条件, 达到正常生长。

试验采用单因素完全随机设计, 设置 0 (CK), 100 和 200 mmol/L NaCl 3 个盐胁迫水平, 每个处理 3 次重复。NaCl 处理按每天 50 mmol/L 浓度增至目标浓度, 各处理在同一天到达预定浓度。NaCl 胁迫处理 21 d 后进行各项指标的测定。

1.2 测算指标及其方法

1.2.1 生物量 小心将植株从培养基质中取出, 先用自来水冲洗净植株表面的杂质, 然后用去离子水冲洗 5 遍, 吸干水分, 分别将根、茎、叶装入信封中编号放入烘箱, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 杀青 30 min, $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒质量 (DW), 自然冷却后分别测定其生物量, 并计算冠生物量、全株生物量、根冠比以及相对生物量。

冠生物量 = 茎生物量 + 叶生物量;

全株生物量 = 根生物量 + 冠生物量;

根冠比 = 根生物量 / 冠生物量;

相对生物量=某处理的平均总生物量/CK 的平均总生物量×100%。

1.2.2 矿质离子含量 分别称取各处理侧柏幼苗根、茎、叶研磨粉碎后的样品约 0.1 g,用 V(HNO₃):V(HClO₄)=10:1 于 100℃左右电热板上加热消解,最后用去离子水定容至 10 mL,参考刘正祥等^[4]的方法采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺含量。

1.2.3 离子选择性运输能力 S_{X,Na}为不同器官对离子的选择性运输系数,其计算公式为:S_{X,Na}=库器官[X/Na⁺]/源器官[X/Na⁺],其中 X 代表 K⁺、Ca²⁺和 Mg²⁺中任意 1 种离子的含量。S_{X,Na}值越大,表示源器官控制 Na⁺、促进 X 向库器官运输的能力越强,即库器官选择性运输能力越强^[14]。

表 1 不同浓度 NaCl 胁迫对侧柏幼苗生物量积累和根冠比的影响

Table 1 Effect of different NaCl concentrations on biomass accumulation and root/shoot ratio of *Platycladus orientalis* seedlings

NaCl/ (mmol·L ⁻¹)	生物量/(g·株 ⁻¹) Biomass					相对生物量/% Relative biomass	根冠比 Root/shoot ratio
	根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves	冠 Shoots	全株 Whole plant		
0 (CK)	0.394±0.006 b	0.321±0.006 a	1.735±0.005 a	2.056±0.001 a	2.450±0.005 a	100.00	0.192±0.003 c
100	0.491±0.008 a	0.310±0.006 a	1.615±0.005 b	1.925±0.001 b	2.381±0.030 b	98.61	0.255±0.004 b
200	0.397±0.006 b	0.190±0.006 b	1.091±0.005 c	1.281±0.011 c	1.678±0.005 c	68.53	0.310±0.007 a

注:表中数据为“平均值±标准差”,同列数据后标不同小写字母表示差异达显著水平(P<0.05)。下表同。
Note:Data in the table are ‘mean±standard error’,different small letters in each column indicate significant difference at P<0.05 level.
The same below.

2.2 NaCl 胁迫对侧柏幼苗根、茎、叶中离子含量的影响

2.2.1 Na⁺和 K⁺含量 由图 1 可以看出,NaCl 胁迫下,侧柏幼苗各器官中 Na⁺含量急剧增加,抑制了对 K⁺的吸收,且同一器官不同处理间 Na⁺含量差异达到了显著水平。

1.3 数据处理与分析

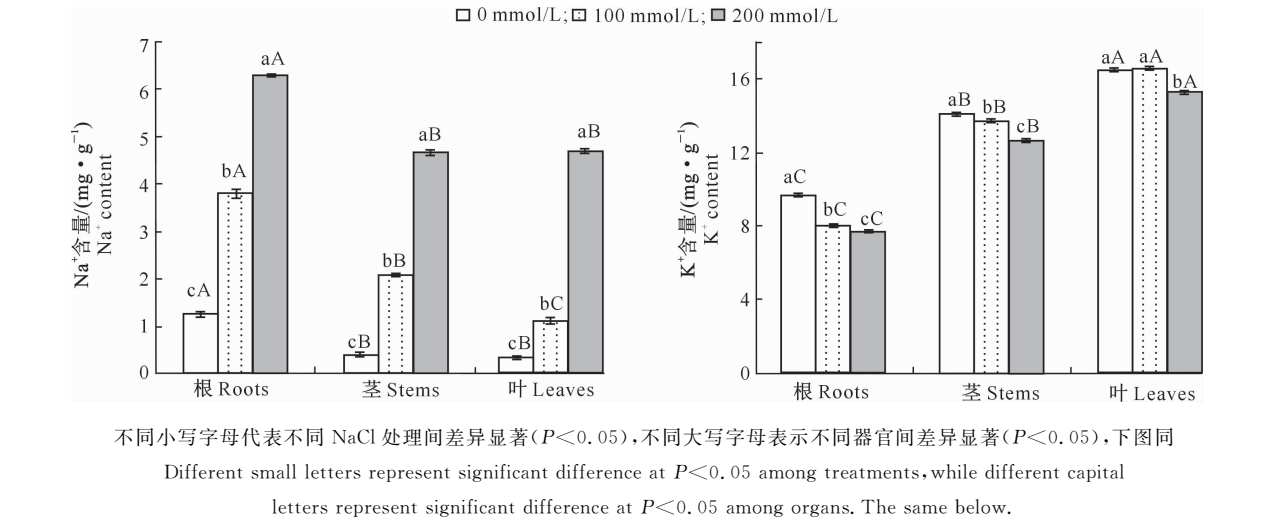
利用 Excel 2007 软件进行数据整理和做图,采用 SPSS 16.0 统计软件对数据进行方差分析和差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对侧柏幼苗生物量积累的影响

表 1 显示,盐胁迫可促进侧柏幼苗根生物量的积累,100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫幼苗根生物量较对照分别提高 24.62%和 0.76%。随着盐胁迫浓度的增加,侧柏幼苗的茎、叶、冠及全株生物量总体显著降低,而根冠比显著增大。经 100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫后,幼苗植株的相对生物量分别为 CK 的 98.61%和 68.53%。

迫下,侧柏幼苗各器官中 Na⁺含量急剧增加,抑制了对 K⁺的吸收,且同一器官不同处理间 Na⁺含量差异达到了显著水平。



不同小写字母代表不同 NaCl 处理间差异显著(P<0.05),不同大写字母表示不同器官间差异显著(P<0.05),下图同
Different small letters represent significant difference at P<0.05 among treatments,while different capital letters represent significant difference at P<0.05 among organs. The same below.

图 1 不同浓度 NaCl 胁迫对侧柏幼苗各器官中 Na⁺和 K⁺含量的影响

Fig. 1 Effects of different NaCl concentrations on contents of K⁺ and Na⁺ in different organs of *Platycladus orientalis* seedlings

与 CK 相比,100 mmol/L NaCl 胁迫植株各器官 Na⁺含量的顺序为根>茎>叶,茎和叶中 Na⁺含

量分别为根中的 54.0% 和 29.4%; 200 mmol/L NaCl 胁迫植株 Na^+ 含量则为根>叶>茎, 叶和茎中 Na^+ 含量分别为根中的 74.9% 和 74.5%。随 NaCl 浓度的升高, 侧柏幼苗根、茎、叶中 K^+ 含量呈显著下降的趋势, 且根中 K^+ 含量下降的幅度最大, 叶中 K^+ 含量变化较小。0 (CK)、100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫下植株 K^+ 含量在不同器官间具有相同的变化规律, 即叶>茎>根, 且各器官间的差异均达到显著水平。

2.2.2 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量 由图 2 可见, 侧柏幼苗根中 Ca^{2+} 含量随 NaCl 浓度的增加显著增加, 叶中 Ca^{2+} 含量随 NaCl 浓度的增加先上升后下降, 而茎中 Ca^{2+} 含量则呈先下降后升高的趋势。其中 100

mmol/L NaCl 胁迫处理下, 根和叶中 Ca^{2+} 含量分别比 CK 增加了 2.31% 和 2.46%, 而茎中 Ca^{2+} 含量较 CK 下降了 8.09%。但无论是 CK 还是 2 个 NaCl 胁迫处理幼苗, 各器官中 Ca^{2+} 含量顺序相同, 即茎中 Ca^{2+} 含量最高, 其次是叶, 根中最低, 且 Ca^{2+} 含量在各器官间的差异达到显著水平。

CK 及 100 和 200 mmol/L NaCl 胁迫处理的侧柏幼苗中, Mg^{2+} 含量最高的器官均是叶, 其次是根, 茎中最低, 且在同一处理不同器官间 Mg^{2+} 含量具有显著差异。随着 NaCl 胁迫浓度的升高, 叶片中 Mg^{2+} 无显著变化, 根中 Mg^{2+} 含量逐渐升高, 茎中 Mg^{2+} 含量先下降后上升。

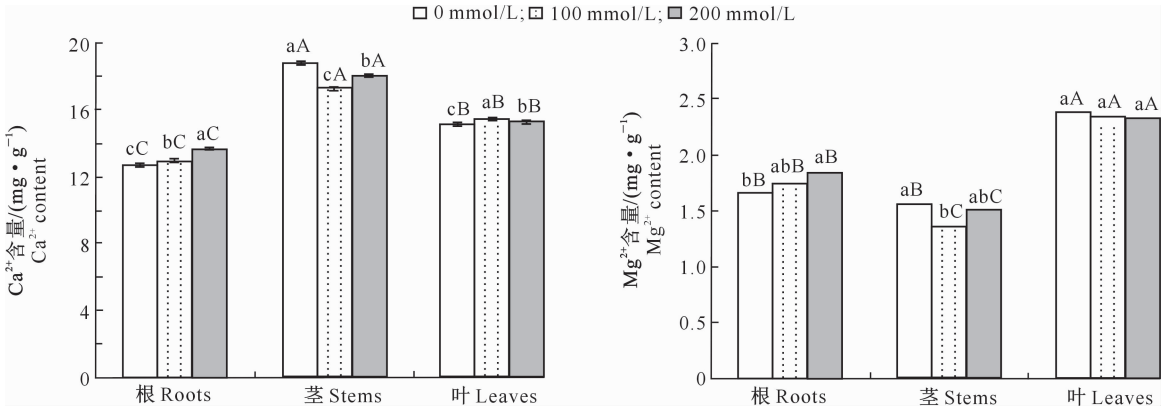


图 2 不同浓度 NaCl 胁迫对侧柏幼苗各器官中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量的影响
Fig. 2 Effects of different NaCl concentrations on contents of Ca^{2+} and Mg^{2+} in different organs of *Platycladus orientalis* seedlings

2.3 NaCl 胁迫对侧柏幼苗各器官离子含量比值的影响

叶中 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 均大幅低于 CK, 且随着 NaCl 浓度的增加均呈现下降的趋势。

由图 3~5 可以看出, 盐胁迫下侧柏幼苗根、茎、

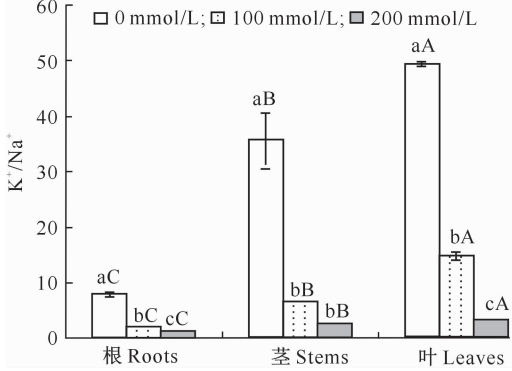


图 3 不同浓度 NaCl 胁迫对侧柏幼苗各器官 K^+/Na^+ 的影响

Fig. 3 Effects of different NaCl concentrations on K^+/Na^+ ratios in different organs of *Platycladus orientalis* seedlings

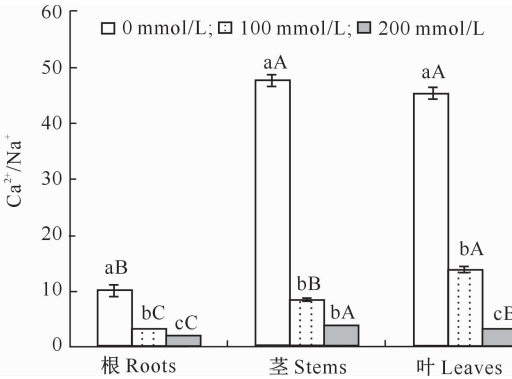


图 4 不同浓度 NaCl 胁迫对侧柏幼苗各器官 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 的影响

Fig. 4 Effects of different NaCl concentrations on $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ ratios in different organs of *Platycladus orientalis* seedlings

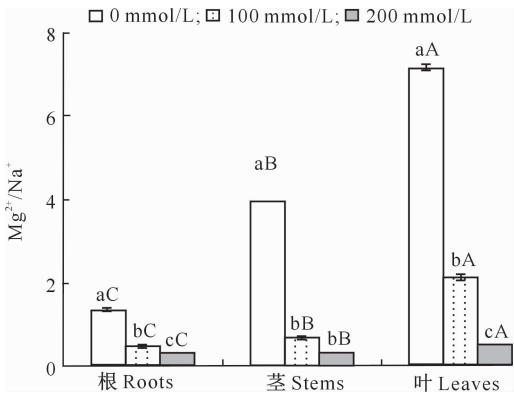


图 5 不同浓度 NaCl 胁迫对侧柏幼苗各器官 Mg^{2+}/Na^{+} 的影响

Fig. 5 Effects of different NaCl concentrations on Mg^{2+}/Na^{+} ratios in different organs of *Platycladus orientalis* seedlings

100 mmol/L NaCl 胁迫下,侧柏根、茎、叶中 $K^{+}/$

表 2 NaCl 胁迫下侧柏幼苗地上器官对 K^{+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的选择性运输

Table 2 Selective transportation of K^{2+} , Ca^{+} and Mg^{2+} in organs of *Platycladus orientalis* seedlings under NaCl stress

NaCl/ (mmol · L ⁻¹)	$S_{K,Na}$		$S_{Ca,Na}$		$S_{Mg,Na}$	
	根—茎 Root—stem	茎—叶 Stem—leaf	根—茎 Root—stem	茎—叶 Stem—leaf	根—茎 Root—stem	茎—叶 Stem—leaf
CK	4.593±0.421 a	1.387±0.172 b	4.711±0.419 a	0.951±0.117 b	2.982±0.250 a	1.812±0.218 b
100	3.164±0.016 b	2.214±0.096 a	2.470±0.011 b	1.647±0.070 a	1.446±0.049 b	3.162±0.244 a
200	2.204±0.016 c	1.201±0.012 b	1.767±0.006 c	0.843±0.009 b	1.097±0.017 b	1.543±0.054 b

由表 2 还可以看出,叶片对营养元素的选择性吸收能力与茎部不同,100 mmol/L NaCl 胁迫下,侧柏幼苗由茎部向叶片的离子运输能力 $S_{K,Na}$ 、 $S_{Ca,Na}$ 、 $S_{Mg,Na}$ 与 CK 相比呈显著上升的趋势;200 mmol/L NaCl 胁迫下,由茎部向叶片的运输能力 $S_{K,Na}$ 、 $S_{Ca,Na}$ 、 $S_{Mg,Na}$ 较 CK 下降,但差异均不显著。总体而言,由茎部到叶片的离子运输能力 $S_{Mg,Na}$ 高于 $S_{K,Na}$ 和 $S_{Ca,Na}$ 。

3 讨论与结论

3.1 NaCl 胁迫对侧柏幼苗生长的影响

盐胁迫对植物造成的危害有渗透胁迫、离子毒害和营养元素亏缺^[15],最终体现为生长受到抑制、生物量积累下降、根冠比增加等^[1,16]。然而对于盐生植物或某些耐盐性较强的甜土植物而言,适度的盐胁迫不仅不会抑制其生长,反而会促进其生长和生物量的积累^[17],如弗吉尼亚栎^[17]、木麻黄^[18]等。本研究发现,NaCl 胁迫显著提高了侧柏幼苗根生物量并改变了生物量分配的格局,具体表现为根生物量、根冠比随着 NaCl 浓度的升高显著增加,同时侧柏幼苗植株的相对生物量随 NaCl 浓度的升高显著下降。这表明 NaCl 胁迫促进了侧柏幼苗根系的生

Na^{+} 、 Ca^{2+}/Na^{+} 和 Mg^{2+}/Na^{+} 较 CK 均下降了 65% 以上;当 NaCl 浓度继续增加到 200 mmol/L 时,根、茎、叶中的离子含量比值分别比 CK 相应器官下降 84.13%,92.38%和 93.41% (K^{+}/Na^{+}),78.41%,91.90%和 92.82% (Ca^{2+}/Na^{+}),77.80%,91.84%和 93.05% (Mg^{2+}/Na^{+})。在同一 NaCl 浓度处理下,侧柏幼苗叶片和茎中 K^{+}/Na^{+} 、 Ca^{2+}/Na^{+} 和 Mg^{2+}/Na^{+} 均高于根中。

2.4 NaCl 胁迫对侧柏幼苗离子选择性运输的影响

由表 2 可以看出,随着 NaCl 胁迫浓度的增大,侧柏幼苗由根部向茎部的离子运输能力 $S_{K,Na}$ 、 $S_{Ca,Na}$ 、 $S_{Mg,Na}$ 总体上显著降低,且对 K^{+} 的选择性运输大于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。这说明侧柏根系选择性运输 Na^{+} ,而抑制 K^{+} 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 进入茎中,且对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的抑制作用大于 K^{+} 。

长和发育,根系通过扩大生长量以平衡盐胁迫对根系吸收功能的损伤,这对于维持植株地上部的正常生长发育具有重要意义^[17]。

3.2 NaCl 胁迫对侧柏幼苗离子平衡的影响

离子区隔化是植物耐盐性的重要特性之一,也是植物维持细胞内离子平衡的重要机制之一^[19-20]。不同植物根据自身的结构特点表现出不同的离子区隔化方式,如牛叠肚^[21]将 Na^{+} 优先积累在茎中,沙枣^[4]、鹅耳枥^[22]等将 Na^{+} 优先积累在根中,唐古特白刺^[23]等则将 Na^{+} 优先积累在叶片中。非盐生植物的耐盐性主要取决于植株根系对 Na^{+} 的限制性吸收及维持叶片中较低的 Na^{+} 含量。本研究结果显示,随着 NaCl 胁迫浓度的升高,侧柏幼苗植株各器官 Na^{+} 含量急剧增加,且在不同浓度 NaCl 胁迫下,根中 Na^{+} 含量始终高于茎和叶。这说明盐胁迫下,细胞幼苗优先将 Na^{+} 积累在根系中,这可以减轻 Na^{+} 对代谢旺盛部位的干扰,同时可以利用积累在根部的 Na^{+} 进行渗透调节,降低水势,保持植物的吸水能力,减轻生理干旱^[24]。这可能是侧柏适应盐胁迫的一种机制。

高等植物通过调节矿质离子的种类和数量来维持细胞质中微环境的相对稳定,通过保持较高的

K^+/Na^+ 及矿质离子平衡的能力来适应盐渍环境^[25]。如沙枣^[4]、西瓜^[19]等植物在盐胁迫下,植物根系吸收大量的 Na^+ ,抑制了植物对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收和运输。植物体内矿质元素的含量和分布情况对其耐盐能力有很大影响。本研究中,NaCl 胁迫下侧柏幼苗根、茎、叶中 Na^+ 及根中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量增加,根、茎、叶中 K^+ 、 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 及茎、叶中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量降低,这表明 NaCl 胁迫下,大量 Na^+ 进入侧柏幼苗体内,抑制了侧柏幼苗对其他矿质离子的吸收和运输,导致侧柏幼苗植株体内离子失衡。由于离子区隔化作用,侧柏茎和叶中维持了相对较高水平的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,且茎和叶中 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 显著高于根系。随着 NaCl 胁迫浓度的升高,根系中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量增加及根向茎和茎向叶中 $S_{Ca,Na}$ 、 $S_{Mg,Na}$ 的降低,说明侧柏幼苗在 NaCl 胁迫下 Ca^{2+} 向地上部的运输能力降低,而根系中 Ca^{2+} 含量增加可以激活 Ca^{2+} 依赖的蛋白激酶(CDPK)、钙结合蛋白等,以调节根细胞中矿质离子的平衡来适应盐胁迫^[26]。同时,大量研究表明,外施 Ca^{2+} 可减少细胞内净 Na^+ 流入和促进细胞中 K^+ 和 Na^+ 稳态的维持,从而提高植株的耐盐性^[27]。 Ca^{2+} 通过活化 SOS 信号通路,增强 SOS3-SOS2 激酶复合体对 SOS1 的调控,提高植物对 Na^+ 的外排,以调节植株体内的 K^+ 和 Na^+ 稳态,从而促进植株体内新的离子平衡的建立^[15]。综合本研究发现,NaCl 胁迫下侧柏幼苗叶片中的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量始终高于根或茎,这对于维持地上部的光合作用和细胞膜的稳定性具有重要意义。

3.3 侧柏幼苗对 NaCl 胁迫的适应机制

综合本研究结果认为,侧柏幼苗对 NaCl 胁迫具有一定的耐受性,NaCl 胁迫下侧柏幼苗一是通过提高根系生物量来补偿根系吸收功能的降低,二是将大量 Na^+ 限制、聚积在根系中,以维持地上部相对较高的 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 值,同时提高营养元素 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 向地上部的选择性吸收和运输能力,以提高渗透调节能力,降低 Na^+ 在地上部积累造成的离子毒害作用并维持地上部离子的平衡,维持植株正常的生理活动,从而适应盐胁迫的生存环境。

[参考文献]

[1] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance [J]. *Annu Rev Plant Biol*, 2008, 59: 651-681.

[2] 张建锋,张旭东,周金星,等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施 [J]. *水土保持研究*, 2005, 12(6): 28-30.
Zhang J F, Zhang X D, Zhou J X, et al. World resources of saline soil and main amelioration measures [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, 12(6): 28-30.

[3] Ci L J, Yang X H. Desertification and its control in China [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

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

[5] Zheng Q S, Liu L, Liu Y L, et al. Effects of salt and water stresses on osmotic adjustment and osmotic accumulation in *Aloe vera* seedlings [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2002, 29(6): 585-588.

[6] 赵可夫,范海. 盐胁迫下真盐生植物与泌盐植物的渗透调节物质及其贡献的比较研究 [J]. *应用与环境生物学报*, 2000, 6(2): 99-105.
Zhao K F, Fan H. Comparative study on osmotic and their contributions to osmotic adjustment in eu-halophytes and rethohalophytes [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2000, 6(2): 99-105.

[7] Shabala S, Cuin T. Cellular mechanisms of potassium transport in plants [J]. *Physiol Plant*, 2008, 133: 651-669.

[8] Teakle N, Real D, Colmer T. Growth and ion relations in response to combined salinity and waterlogging in the perennial forage legumes *Lotus corniculatus* and *Lotus tenuis* [J]. *Plant and Soil*, 2006, 289(1/2): 369-383.

[9] 郑万钧,傅立国. 中国植物志: 第七卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1978: 321.
Zheng W J, Fu L G. *Flora of China*: vol 7 [M]. Beijing: Science Press, 1978: 321.

[10] 闫兴富,李静,方苏,等. 复合钠盐对侧柏种子萌发的胁迫效应 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(6): 22-23.
Yang X F, Li J, Fang S, et al. Stress effects of complex sodium salt on germination of *Platycladus orientalis* seeds [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(6): 22-23.

[11] 戴蒲英. 盐胁迫对主要造林树种种子活力及幼苗生理特性的影响 [J]. *广西科学*, 1998, 5(1): 62-65, 70.
Dai P Y. Salt conerce effect on major afforestation plants seeds vigor and tenderseedling physiology character [J]. *Guangxi Sciences*, 1998, 5(1): 62-65, 70.

[12] 支欢欢,杨敏生,张华新,等. 3 种园林植物耐盐性对比分析 [J]. *河北农业大学学报*, 2009, 32(3): 71-75.
Zhi H H, Yang M S, Zhang H X, et al. Comparison analysis of salt tolerance in three kinds of landscape plants [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2009, 32(3): 71-75.

[13] 汪贵斌,曹福亮,游庆方,等. 盐胁迫对 4 种树叶片中 K^+ 和 Na^+ 的影响及其耐盐能力的评价 [J]. *植物资源与环境学报*, 2001, 10(1): 30-34.

Wang G B,Cao F L,You Q F,et al. Effects of salt stress on concentrations of Na^+ , K^+ and Na^+/K^+ in the leaves of four tree species and evaluation of salt tolerance [J]. Journal of Plant Resources and Environment,2001,10(1):30-34.

[14] 郑青松,王仁雷,刘友良. 钙对盐胁迫下棉苗离子吸收分配的影响 [J]. 植物生理与分子生物学学报,2001(4):325-330.

Zheng Q S,Wang R L,Liu Y L. Effects of Ca^{2+} on absorption and distribution of ions in salt-treated cotton seedlings [J]. Acta Phytophysiological Sinica,2001(4):325-330.

[15] Zhu J K. Plant salt tolerance [J]. Trends in Plant Science, 2001,6(2):66-71.

[16] Zhang J L,Shi H. Physiological and molecular mechanisms of plant salt tolerance [J]. Photosynthesis Research,2013,115 (1):1-22.

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

[18] KÖHL K I. The effect of NaCl on growth, dry matter allocation and ion uptake in salt marsh and inland populations of *Armeria maritima* [J]. New Phytologist,1997,135(2):213-225.

[19] 韩志平,郭世荣,郑瑞娜,等. 盐胁迫对小型西瓜幼苗体内离子分布的影响 [J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(4):908-917.

Han Z P,Guo S R,Zheng R N,et al. Effect of salinity on distribution of ions in mini-watermelon seedlings [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer,2013,19(4):908-917.

[20] Jing S H, Ji J, Wang G. Effects of salt stress on plants and the mechanism of salt tolerance [J]. World Sci-Tech R&D,2006 (4):11.

[21] 李玉梅,郭修武,姜云天. 牛叠肚幼苗对盐胁迫的离子响应 [J]. 干旱区研究,2016,33(2):353-361.

Li Y M,Guo X W,Jiang Y T. Response of ions in *Rubus crataegifolius* seedlings to saltstress [J]. Arid Zone Research, 2016,33(2):353-361.

[22] 周琦,祝遵凌. NaCl 胁迫对 2 种鹅耳枥幼苗生长及离子吸收,分配与运输的影响 [J]. 北京林业大学学报,2015,37 (12):7-16.

Zhou Q,Zhu Z L. Effects of NaCl stress on seedling growth and mineral ions uptake, distribution and transportation of two varieties of *Carpinus* L. [J]. Journal of Beijing Forestry University,2015,37(12):7-16.

[23] 杨秀艳,张华新,张丽,等. NaCl 胁迫对唐古特白刺幼苗生长及离子吸收、运输与分配的影响 [J]. 林业科学,2013,49 (9):165-171.

Yang X Y,Zhang H X,Zhang L,et al. Effects of NaCl stress on growth and absorption, transportation and distribution of ions in *Nitraria tangutorum* [J]. Scientia Silvae Sinicae,2013, 49(9):165-171.

[24] 於丙军,罗庆云. 盐胁迫对盐生野大豆生长和离子分布的影响 [J]. 作物学报,2001,27(6):776-780.

Yu B J,Luo Q Y. Effects of salt stress on growth and ionic distribution of salt-born *Glycine soja* [J]. Acta Agronomica Sinica,2001,27(6):776-780.

[25] 李银鹏,林鹏. 盐度对木榄幼苗某些金属元素累积的影响及钙的效应 [J]. 应用生态学报,2000,11(2):177-180.

Li Y P,Lin P. Impact of salinity on accumulation of several metal elements in *Bruguiera gymnorrhiza* seedlings and Ca effect [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2000,11(2): 177-180.

[26] Dodd A N,Kudla J,Sanders D. The language of calcium signaling [J]. Annual Review of Plant Biology,2010,61:593-620.

[27] Sun J,Dai S,Wang R,et al. Calcium mediates root K^+/Na^+ homeostasis in poplar species differing in salt tolerance [J]. Tree Physiology,2009,29(9):1175-1186.