

NaCl 胁迫下小胡系杨树的离子吸收规律与分配特征研究

田菊^{1,2,3},朱嘉磊²,王永福⁴,张金旺⁴,王君^{3,5*},李国雷^{1,2*}

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083;2. 北京林业大学 林学院,北京 100083;

3. 北京林业大学 林木育种国家工程实验室,北京 100083;4. 内蒙古通辽市林业科学研究院,内蒙古 通辽 028000;

5. 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心,北京 102206)

摘要:采用不同浓度的 NaCl 溶液胁迫处理‘小胡杨’(XHu)和‘辽胡杨 1 号’(LHu-1)当年生扦插苗,测量植株根、茎、叶中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 含量,研究其不同部位的离子选择性吸收规律及离子分配特征,为进一步评价和筛选优良耐盐小胡系杨树品种提供理论依据。结果表明:随着盐浓度的升高,2 个小胡系杨树品种苗木受害程度逐渐增加,根、茎和叶部 Na^+ 含量以及根向茎选择性运输系数(茎 $S_{\text{K},\text{Na}}$)升高,全株 K^+/Na^+ 比值以及茎向叶选择性运输系数(叶 $S_{\text{K},\text{Na}}$)下降;XHu 在盐胁迫条件下叶片厚度增加,最大为 291.45 μm ,是对照的 1.27 倍;NaCl 胁迫使小胡系杨树根和叶中 Na^+ 含量高于茎,叶中 K^+ 含量高于根和茎;盐胁迫下,LHu-1 茎、叶中 K^+ 含量以及 XHu 根中 K^+ 含量均升高,而 LHu-1 根中 K^+ 含量降低;盐胁迫只对 XHu 茎、叶部 Cl^- 含量有显著性影响,低盐浓度下其茎中 Cl^- 含量升高,而高盐浓度下其叶中 Cl^- 升高。综合分析表明,NaCl 胁迫下小胡系杨树主要是将 Na^+ 区隔在根中,并把 K^+ 运输至茎和叶中,从而缓解地上部分的盐害;XHu 的耐盐能力总体上高于 LHu-1。

关键词:小胡杨;盐胁迫;离子吸收;离子运输

中图分类号:S792.11

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2016)06-0065-06

Regularities of the Ion Uptake and Allocation Characteristics for
Populus simonii \times *P. euphratica* Varieties under NaCl Stress

TIAN Ju^{1,2,3}, ZHU Jia-lei², WANG Yong-fu⁴, ZHANG Jin-wang⁴, WANG Jun^{3,5*}, LI Guo-lei^{1,2*}

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 3. National Engineering Laboratory for Tree Breeding, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, China; 4. Tongliao Institute of Forestry Science, Tongliao, Inner Mongolia, 028000, China;
5. Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement with Forestry and Fruit trees, Beijing, 102206, China)

Abstract: In order to provide a theoretical foundation for evaluating and selecting excellent salt-tolerance varieties of *Populus simonii* \times *P. euphratica*, we studied the regularities of ion selective uptake and ion allocation characteristics of *P. simonii* \times *P. euphratica* (XHu) and *P. simonii* \times *P. euphratica* ‘Liaohu 1’ (LHu-1) under different NaCl concentrations. The results indicated that, with the increase of salt concentration, the injurious degree of seedlings gradually increased, Na^+ contents of root, stem, leaf and coefficient of selective transportation from root to stem (stem $S_{\text{K},\text{Na}}$) increased, the whole plant K^+/Na^+ and coefficient of selective transportation from stem to leaf (leaf $S_{\text{K},\text{Na}}$) descended. Leaf thickness of XHu gradually increased with the the increase of salt concentration, and the biggest leaf thickness was 291.45 μm for

收稿日期:2016-03-09 修回日期:2016-05-28

基金项目:高等学校全国优秀博士学位论文作者专项资金(201267);教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0672);科技创新服务能力建设-协同创新中心-林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2016_014207_000038);北京市科技新星计划项目(Z141105001814007)。

作者简介:田菊,女,在读硕士,研究方向:森林培育。E-mail:1215813245@qq.com

*通信作者:王君,男,博士,副教授,研究方向:林木染色体工程育种与细胞遗传学。E-mail:wangjun@bjfu.edu.cn

李国雷,男,博士,副教授,研究方向:森林培育。E-mail:glli226@163.com

XHu, which was 1.27 times of the control. Na^+ content of the root and leaf was higher than that of the stem, and K^+ content of the leaf was higher than that of the root and stem under NaCl stress. Under salt stress, K^+ content of the root for XHu and that of the stem and leaf for LHu-1 increased, but K^+ content of root for LHu-1 decreased. Salt stress only had a significant effect on Cl^- content of the stem and leaf for XHu, and Cl^- content of the root increased under low NaCl concentration, while decreased under high NaCl concentration. Comprehensive analysis showed under NaCl stress, the seedling mainly compartmented Na^+ in root, and transported K^+ to stem and leaf for *P. simonii* × *P. euphratica*, thus to remit the salt symptom of overground part, and the results indicated that XHu generally had stronger ability than LHu-1 in salt tolerance.

Key words: *Populus simonii* × *P. euphratica*; salt stress; ion uptake; ion transportation

盐渍化是限制植物生长和降低生产率的主要非生物胁迫因子^[1]。据估计,全球盐碱地每年以 $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2 \sim 1.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的速度在增长^[2],总面积约 $9.55 \times 10^8 \text{ hm}^2$ ^[3],已对各国经济和生态恢复造成严重威胁。我国是世界盐碱地大国之一,盐渍土总面积约 $9.91 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[4],严重影响我国植被分布以及农林业生产。因此,在盐泽土面积越来越多,林地和耕地面积逐渐锐减的情况下,掌握盐胁迫对植物生长发育的影响,并选育合适的农林业耐盐品种,对盐碱地区的生态环境建设和恢复有着十分重要意义。

小胡杨(*Populus simonii* × *P. euphratica*)是由小叶杨(*P. simoni*)与胡杨(*P. euphratica*)远缘杂交而获得,其继承了小叶杨耐旱、抗寒、易繁殖的特征以及胡杨耐盐碱、耐湿热、抗旱、抗风沙等特性。辽宁省杨树研究所进一步以小胡杨杂种与欧洲黑杨(*P. nigra*)复合杂交获得了辽胡杨(*P. simonii* × *P. euphratica* ‘Liaohu’)系列品种,具有速生、易繁殖、耐寒等特点^[5-6]。目前,我国不少盐碱地地区已经引进推广了小胡系杨树品种,然而有关小胡系杨树的耐盐机理尚不明确,而这恰是耐盐性小胡系杨树品种选育所需的理论依据,有必要针对小胡系杨树的耐盐机理进行研究,而相关研究表明植物的耐盐机理主要包括离子区域化和渗透调节两方面^[7],因此,开展小胡杨盐离子吸收规律和离子分配特征研究对揭示其耐盐机理有着重要价值。

本研究以‘小胡杨’和‘辽胡杨 1 号’2 个小胡系杨树品种 1 年生扦插苗为材料,进行盆栽盐胁迫试验,经不同浓度的 NaCl 胁迫处理,对植株根、茎、叶中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 含量进行测量,探讨植株不同部位的离子选择性吸收规律以及离子分配特征,为进一步评价和筛选优良耐盐小胡系杨树品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料

供试材料小胡杨(XHu)和‘辽胡杨 1 号’(LHu-

1)的 1 年生萌生条分别采集自内蒙古通辽市林业科学研究院和辽宁省杨树研究所。将采集的萌条剪为长 15 cm 的插穗,底部修剪成楔形,每个插穗至少保留 3 个健壮饱满的芽,最上部的一个芽离插穗顶端 1.5 cm 左右。扦插前先用水将插穗浸泡 24 h,然后扦插于直径为 28 cm、高为 30 cm 的塑料盆中,盆中装等质量的用蒸馏水洗净后的沙子。扦插时以插穗最上面的芽刚露出沙子为宜,置于北京林业大学温室培育,用 1/2 Hoagland 营养液浇灌,每次每盆浇灌量相同。

1.2 NaCl 胁迫处理

扦插苗生长 60 d 后,选择生长(苗高、地径)基本一致的苗木进行试验。设置 4 个 NaCl 浓度,分别为 50、100、200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 400 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[8-9],并以 0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐浓度为对照。每隔 7 d 进行 1 次盐处理,每次每盆浇 800 mL 用 1/2 Hoagland 营养液配制的盐溶液,对照每次浇灌同样浓度和用量的 1/2 Hoagland 营养液,共进行 5 次盐处理。盆下部垫编织袋和托盘以防止沙子流失。

1.3 研究方法

1.3.1 叶片厚度测量 第 5 次盐处理结束后,每个小胡系杨树品种每处理随机选择 3 株苗木,每株苗木取第 8、9、10 片叶,选取每片叶中部制作徒手切片,在显微镜(Olympus BX51)下测量叶片的厚度。

1.3.2 离子含量的测量 盐胁迫第 36 天(从第 1 次盐胁迫的第 1 天开始计算),每个小胡系杨树品种每处理随机选择 3 株苗木,先用自来水冲洗植株,再用去离子水洗净各部位,滤纸吸干水分。按根、茎、叶分别取样,然后置于 105℃ 杀青 2 h,60℃ 烘干至恒重。将烘干后的样品用粉碎机粉碎,过 0.5 mm 筛,称取 0.10 g 样品于浓 H_2SO_4 - H_2O_2 中消煮,FP6410 火焰光度计测定 K^+ 、 Na^+ 含量^[10];利用 AgNO_3 滴定法测定 Cl^- 含量。

1.4 数据分析

采用 PASW Statistics 18 数据分析软件中

ANOVA 进行均值间的差异性比较,若差异性显著,则采用 Duncan's test 进行多重比较($P=0.05$),并在方差分析前用探索功能对数据进行可疑值处理。利用 Microsoft Excel 2007 进行数据管理和制图。小胡系杨树的离子吸收规律与分配特征的计算公式如下^[11-12]:

$$\text{根 } S_{K,Na} = \text{根 } ([K^+]/[Na^+]) / \text{基质 } ([K^+]/[Na^+]) \quad (1)$$

$$\text{茎 } S_{K,Na} = \text{茎 } ([K^+]/[Na^+]) / \text{根 } ([K^+]/[Na^+]) \quad (2)$$

$$\text{叶 } S_{K,Na} = \text{叶 } ([K^+]/[Na^+]) / \text{茎 } ([K^+]/[Na^+]) \quad (3)$$

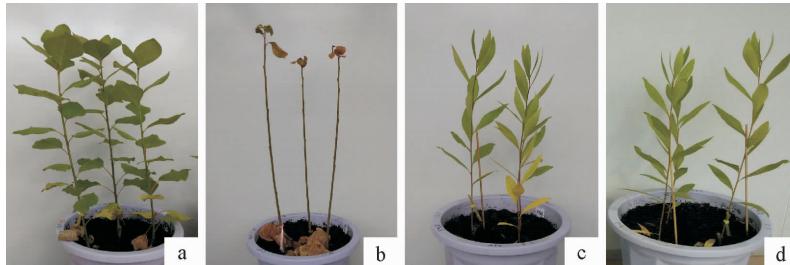
式中根 $S_{K,Na}$ 为根系对基质中 K^+ 、 Na^+ 的选择性吸收能力, 茎 $S_{K,Na}$ 为根向茎选择性运输 K^+ 、 Na^+ 能

力, 叶 $S_{K,Na}$ 为茎向叶选择性运输 K^+ 、 Na^+ 能力。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫下小胡系杨树的盐害特征研究

随着盐浓度的增加, 小胡系杨树苗木受害越严重, 其底部叶片最早变黄, 然后向上蔓延, 当盐害严重时, 叶片变褐色甚至脱落。盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, LHu-1 在第 2 次盐处理后叶片开始变黄脱落(图 1,a); 第 5 次盐处理后约 95% 的叶片脱落且茎顶端变褐(图 1,b)。XHu 在第 4 次施加 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, 叶片开始变黄(图 1,c); 第 5 次施加该盐浓度后, 叶片开始脱落(图 1,d)。可见, XHu 耐盐性表现较佳。



注:a. 第 2 次施加 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 浓度后, LHu-1 叶片变黄且脱落;b. 第 5 次施加 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 浓度后, LHu-1 约 95% 的叶片脱落且茎顶端变褐;c. 第 4 次施加 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 浓度后, XHu 叶片变黄;d. 第 5 次施加 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 浓度后, XHu 叶片脱落。

图 1 NaCl 胁迫下 2 个小胡系杨树品种的盐害症状

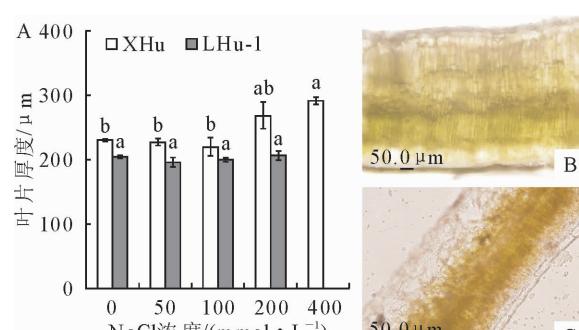
Fig. 1 Visual symptoms of salt damage for two varieties of *P. simonii* × *P. euphratica* under NaCl stress

2.2 NaCl 胁迫对小胡系杨树叶片厚度的影响

XHu 叶片厚度随着盐浓度的升高而增加, NaCl 浓度为 $200\sim400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其叶片厚度差异不显著, 但显著较 $0\sim100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 浓度处理下的叶片厚度高, 最大厚度为 $291.45 \mu\text{m}$ (图 2,A 和 B), 是对照的 1.27 倍; 而 LHu-1 在各盐浓度处理下, 叶片厚度无显著性差异, 最大厚度为 $207.41 \mu\text{m}$ (图 2,A 和 C)。此外, 盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 由于 LHu-1 盐害严重, 叶片脱落, 故未获得数据(下同)。

2.3 NaCl 胁迫对小胡系杨树体内无机离子含量的影响

2.3.1 Na^+ 含量 NaCl 胁迫下, 2 个小胡系杨树品种 Na^+ 含量均有显著性差异($P_{XHu}=0.008$; $P_{LHu-1}=0.013$), 两者根、茎和叶中 Na^+ 含量均随盐浓度的增加而逐渐升高, 其根和叶中 Na^+ 含量高于茎。在盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, XHu 根中 Na^+ 含量均值为 $(39.20 \pm 3.47) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 显著高于 $0\sim100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐浓度处理下根中的 Na^+ 含量, 与 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐浓度处理下根中 Na^+ 含量无显著差异; 在 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐浓度下, LHu-1 根中 Na^+



注:A. NaCl 胁迫下 2 个小胡系杨树品种的叶片厚度;B. 盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, XHu 的叶片切片图;C. 盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, LHu-1 的叶片切片图。不同小写字母表示同一品种在不同 NaCl 浓度处理下差异性显著($P<0.05$)。下同。

图 2 NaCl 胁迫对两个小胡系杨树品种叶片厚度的影响(标尺= $50 \mu\text{m}$)

Fig. 2 Effect of NaCl stress on leaf thickness for two varieties of *P. simonii* × *P. euphratica* (Bars = $50 \mu\text{m}$)

含量显著高于对照, 与其他各盐浓度处理下根部 Na^+ 含量差异不显著。XHu 在施加了 NaCl 的各处理间, 茎部 Na^+ 含量差异不显著, 但盐浓度为 $200\sim400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其茎中 Na^+ 含量显著高于对照; LHu-1 茎部 Na^+ 含量在盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$

时显著高于其他处理,除该浓度外其他各处理间茎部 Na^+ 含量差异不显著。在 $0\sim200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaCl 浓度下,XHu 叶中 Na^+ 含量差异不显著,但均显著低于 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时叶中 Na^+ 含量; LHu-1 叶中 Na^+ 含量在盐浓度为 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,显著高于其他处理,为 $(59.12 \pm 9.32) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 是对照的 6.10 倍(表 1)。

2.3.2 K^+ 含量 2 个品种体内 K^+ 含量差异均极显著(P 值均 <0.0001), XHu 和 LHu-1 叶中 K^+ 含量均高于根和茎(表 1)。XHu 根中 K^+ 含量随着盐浓度的增加而升高,在 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时根中 K^+ 含量显著高于其他处理,而其他处理间根中 K^+ 含量差异不显著; LHu-1 根中 K^+ 含量则是随着盐浓度的增加而降低,在盐浓度为 $0\sim100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $200\sim400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度段时,各浓度段内根部 K^+ 含量均差异不显著,但后浓度段中根部 K^+ 含量显著较前浓度段中低。XHu 茎部 K^+ 含量在各处理下差异均不显著($P=0.793$);而 LHu-1 茎部 K^+ 含量却随着 NaCl 浓度的增加而升高。XHu 叶部 K^+ 含量在各盐浓度处理下均差异不显著($P=0.379$);在 NaCl 浓度为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,LHu-1 叶中 K^+ 含量均显著低于其他处理条件下叶部 K^+ 含量,而其他各处理间叶部 K^+ 含量差异不显著,在盐浓度为 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时其叶中 K^+ 含量最高,可达 $(16.71 \pm 2.65) \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.3.3 Cl^- 含量 不同 NaCl 浓度对 XHu 根部 Cl^- 含量无显著性影响($P=0.794$),对其茎和叶中 Cl^- 含量影响极显著($P=0.007$)(表 1)。在 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,XHu 茎部 Cl^- 含量显著较其他处理下高,为 $22.50 \pm 0.86 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$;盐浓度为 $0\sim100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以及 $200\sim400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 2 个浓度段时,各浓度段内 XHu 叶部 Cl^- 含量差异不显著,但前浓度段叶中 Cl^- 含量显著低于后浓度段。 NaCl 胁迫对 LHu-1 根、茎、叶中 Cl^- 含量影响均不显著(P 值分别为 0.156 、 0.255 和 0.853)。

表 1 NaCl 胁迫对小胡系杨树根、茎和叶中 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 含量的影响

Table 1 Na^+ 、 K^+ and Cl^- contents in root, stem and leaf for two varieties of *P. simonii* \times *P. euphratica* under NaCl stress

| 器官 | NaCl 浓度 $/(\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1})$ | Na^+ 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | | K^+ 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | | Cl^- 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | |
|----|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|
| | | XHu | LHu-1 | XHu | LHu-1 | XHu | LHu-1 |
| 根 | 0 | 11.15 ± 0.27 b | 11.06 ± 1.14 b | 6.85 ± 0.20 b | 10.47 ± 1.03 a | 18.20 ± 2.52 a | 15.31 ± 2.55 a |
| | 50 | 16.38 ± 1.26 b | 26.24 ± 1.33 ab | 6.40 ± 0.14 b | 9.78 ± 0.67 a | 16.45 ± 1.56 a | 16.48 ± 0.91 a |
| | 100 | 20.46 ± 1.55 b | 38.35 ± 2.43 ab | 6.30 ± 0.35 b | 8.82 ± 0.52 a | 15.08 ± 2.60 a | 12.76 ± 0.02 a |
| | 200 | 30.63 ± 4.96 a | 47.65 ± 11.65 a | 7.01 ± 0.26 b | 5.02 ± 1.56 b | 15.54 ± 0.90 a | 18.05 ± 1.03 a |
| | 400 | 39.20 ± 3.47 a | 29.85 ± 9.53 ab | 9.56 ± 0.40 a | 4.65 ± 0.66 b | 17.37 ± 1.87 a | 15.38 ± 0.71 a |
| 茎 | 0 | 7.44 ± 0.39 b | 6.16 ± 0.52 b | 6.74 ± 0.93 a | 5.40 ± 0.51 c | 16.34 ± 1.11 b | 14.42 ± 1.04 a |
| | 50 | 11.17 ± 0.89 ab | 7.32 ± 0.35 b | 6.61 ± 0.22 a | 4.94 ± 0.52 c | 22.50 ± 0.86 a | 17.59 ± 1.51 a |
| | 100 | 11.17 ± 0.73 ab | 6.53 ± 0.36 b | 6.55 ± 0.10 a | 5.15 ± 0.74 c | 18.57 ± 0.41 b | 14.96 ± 1.31 a |
| | 200 | 12.07 ± 1.87 a | 13.90 ± 1.51 b | 7.34 ± 0.31 a | 7.65 ± 0.22 b | 15.88 ± 1.83 b | 18.75 ± 0.67 a |
| | 400 | 12.49 ± 0.59 a | 29.55 ± 4.00 a | 6.85 ± 0.40 a | 10.48 ± 0.88 a | 15.43 ± 0.90 b | 15.86 ± 2.23 a |
| 叶 | 0 | 11.07 ± 1.69 b | 9.70 ± 0.99 b | 9.15 ± 0.88 a | 11.07 ± 1.66 ab | 14.32 ± 0.45 b | 18.24 ± 1.05 a |
| | 50 | 15.60 ± 2.52 b | 9.39 ± 0.65 b | 11.04 ± 0.87 a | 8.54 ± 1.72 b | 15.35 ± 0.74 b | 19.47 ± 2.26 a |
| | 100 | 12.89 ± 0.34 b | 17.20 ± 0.97 b | 10.05 ± 0.88 a | 11.10 ± 0.90 ab | 13.74 ± 0.59 b | 17.81 ± 2.00 a |
| | 200 | 22.90 ± 6.72 b | 59.12 ± 9.32 a | 10.58 ± 0.88 a | 16.71 ± 2.65 a | 20.43 ± 2.15 a | 17.25 ± 1.87 a |
| | 400 | 40.17 ± 5.81 a | — | 9.13 ± 0.02 a | — | 20.08 ± 1.46 a | — |

注:小写字母表示同一品种在同一器官下不同浓度的显著性结果,“—”表示由于叶片脱落而未得到数据。

2.4 NaCl 胁迫对小胡系杨树全株 K^+/Na^+ 比值的影响

XHu 和 LHu-1 全株 K^+/Na^+ 比值均随着 NaCl 浓度的增加而降低(图 3),且两者均是对照条件下全株 K^+/Na^+ 比值显著高于施加了 NaCl 溶液的处理,最高全株 K^+/Na^+ 比值分别为 0.77 和 1.00,是盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 2.72 和 4.23 倍。此外,对照条件下,LHu-1 全株 K^+/Na^+ 比值较 XHu 高;然而盐胁迫条件下,LHu-1 全株 K^+/Na^+ 比值均低于 XHu。

2.5 NaCl 胁迫对小胡系杨树的离子选择性吸收和运输能力的影响

盐胁迫使 2 个小胡系杨树品种的根 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 显著下降($P<0.0001$)(图 4),而在盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其根 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 上升,但仍低于对照。 $0\sim200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐浓度胁迫下,XHu 和 LHu-1 茎 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 随着盐浓度的增加而逐渐升高,最高分别达 2.67 和 5.84,盐浓度为 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,茎 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 下降。2 个小胡系杨树品种叶 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 随着盐浓度的增加而降低,XHu 的叶 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 在 $400 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度下显

著低于 $0\sim100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度的处理; LHu-1的叶 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 在 $100\sim200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度下显著低于 $0\sim50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度的处理。

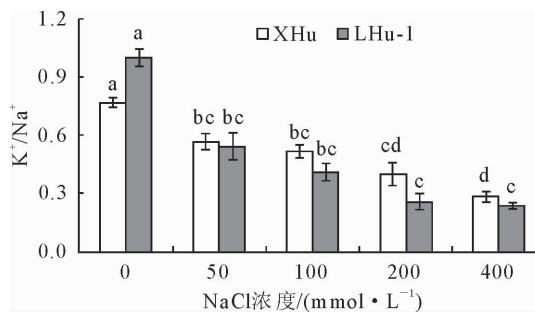


图3 NaCl胁迫对2个小胡系杨树品种 K^+/Na^+ 的影响

Fig.3 K^+/Na^+ for two varieties of *P. simonii* \times *P. euphratica* under NaCl stress

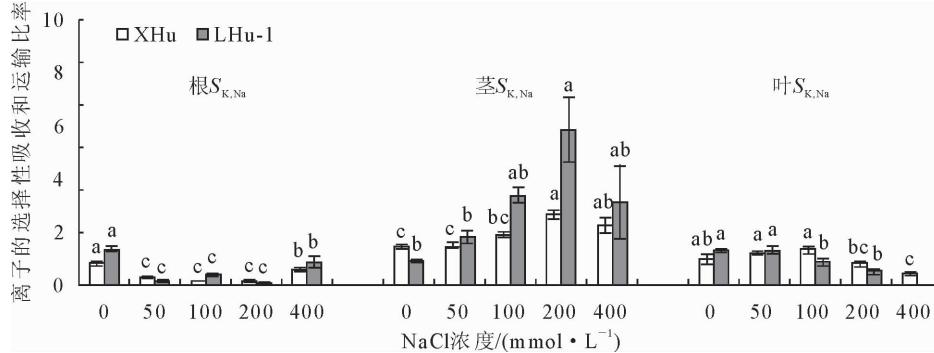


图4 NaCl胁迫下2个小胡系杨树品种对 K^+ 和 Na^+ 的选择性吸收和运输能力

Fig.4 The ability of K^+ and Na^+ selective uptake and transportation for two varieties of *P. simonii* \times *P. euphratica* under NaCl stress

大量水分,一方面将体内的盐分稀释而减轻盐害,另一方面还可以防止生理干旱,最终使植物正常进行新陈代谢,增强对环境的适应能力^[14]。可见,XHu相比于LHu-1,其耐盐性表现较好,且能通过叶片肉质化来缓解体内的离子毒害而提高耐盐性。

植物维持体内离子平衡能力的大小与其耐盐性有着非常重要的联系^[15]。NaCl胁迫下, Na^+ 会在膜运输和一些例如酶活化功能上与 K^+ 相竞争,损坏植物的生长能力。胡杨以及杂种胡杨中 Na^+ 含量均随着盐浓度的增加而升高^[16],本文中2个小胡系杨树品种均表现出相似结果。此外,两者根和叶中 Na^+ 含量均高于茎,其原因可能是根是控制 Na^+ 进入植物体以及将其运往茎和叶中的关键部位,往往将 Na^+ 阻隔在根中,使植物茎和叶片中 Na^+ 含量较低而避免地上部分的盐害^[9]。LHu-1茎和叶部及XHu根中 K^+ 含量均随着盐浓度的增加而升高,LHu-1根中 K^+ 含量则是随盐浓度的增加而降低,表明XHu的根能够从基质中选择性吸收 K^+ 来减轻盐害,而LHu-1则不能从基质中选择性吸收 K^+ ,而是将根中的 K^+ 运输到茎和叶中而减轻地上部分的盐害。此外,2个小胡系杨树品种叶部 K^+ 含量均

3 结论与讨论

土壤盐泽化是影响植物生长和生存的重要因子。盐分过量积累会造成植物叶片黄化、叶边缘形成枯斑以及叶片萎焉,甚至导致叶片脱落^[13]。2个小胡系杨树品种盐害情况均随着盐浓度的升高而加重,LHu-1出现盐害症状较早,盐害较严重,而XHu盐害症状出现较晚,盐害较轻。盐生植物往往通过叶片肉质化的方式来稀释盐分而避免盐离子毒害^[8-9]。胡杨为了适应不断升高的盐分而叶片变厚^[8]。XHu在高盐浓度胁迫下,叶片厚度明显增加,而LHu-1叶片厚度在各盐浓度下差异不显著。导致植物叶片肉质化程度增加的主要因素是 Na^+ 的过量积累,而叶片肉质化可以使植物吸收和贮存

高于根和茎,表明小胡系杨树为了减轻叶部盐害,而选择性吸收大量的 K^+ 。小胡系杨树全株 K^+/Na^+ 比值均随着盐浓度的增加而降低。造成 K^+/Na^+ 比值降低的原因有2个,一是组织中 Na^+ 的净增加,二是 K^+ 水平的降低^[17]。本研究中2个小胡系杨树品种从植株水平上可知 K^+ 含量没有下降,而 Na^+ 净增量却有一定程度的升高,说明造成 K^+/Na^+ 比值降低的原因是组织内 Na^+ 净增量的增加。XHu叶中 Cl^- 含量在高盐浓度胁迫下升高,然而盐胁迫对LHu-1各营养器官 Cl^- 含量均无显著性影响,表明XHu对 Cl^- 有着较强的吸收能力,而LHu-1对 Cl^- 的吸收能力较弱。

植物根 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 、茎 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 和叶 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 是离子选择性吸收和运输的一个尺度,值越大,说明根从基质中选择性吸收(根向茎、茎向叶选择性运输) K^+ 的能力越强,根从基质中吸收(根向茎、茎向叶选择性运输) Na^+ 的能力越弱,植物抗盐性越大,所受盐害越小^[18-19]。本研究结果显示,随着盐浓度的增加(400 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 除外),2个小胡系杨树品种根 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 和叶 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 均变小,而茎 $S_{\text{K},\text{Na}}$ 升高,表明盐胁迫使两者的根均从基质中大量吸收 Na^+ 而选择性运输 K^+ 到

茎中,将大量的 Na^+ 区隔在根中,而茎则是选择性地将过量的 Na^+ 运输到叶中,使得 Na^+ 在叶中逐渐积累,从而使植物的叶片首先表现出盐害症状。高盐条件下,2 个小胡系杨树品种茎 $S_{\text{K}, \text{Na}}$ 和叶 $S_{\text{K}, \text{Na}}$ 变小,表明它们将大量 K^+ 保留在根中,而选择性地将 Na^+ 从根中运输到茎和叶中来缓解根部盐害。

综合分析表明,XHu 的耐盐性表现优于 LHu-1;NaCl 胁迫下,小胡系杨树主要是将 Na^+ 区隔在根中,而把 K^+ 运输至茎和叶中,从而缓解地上部分的盐害症状。XHu 和 LHu-1 在耐盐性上的差异可能与其基因型不同有关,前者只有小叶杨和胡杨的基因,而后者拥有小叶杨、胡杨和欧洲黑杨的基因。小胡系杨树在盐碱地的改良方面有着十分重要的作用。小胡杨在滨海苏打盐渍土上种植,降低了土壤容重,增加了土壤孔隙度,使该地区变成轻盐碱土^[20]。18 年生‘辽胡杨 1 号’在 pH 为 9.0 左右,0.25%~0.40% 含盐量的中盐碱地上,树高、胸径和平均单株材积分别超小美旱 23.18%、41.92% 与 138.46%^[5-6],表明小胡系杨树品种在盐碱地造林方面具有较好的表现。

参考文献:

- [1] ALLAKHVERDIEV S I, SAKAMOTO A, NISHIYAMA Y, et al. Ionic and osmotic effects of NaCl-induced inactivation of photosystems I and II in *Synechococcus* sp. [J]. Plant Physiology, 2000, 123(3): 1047-1056.
- [2] 叶敬忠, 刘金龙, 林志斌. 参与·组织·发展: 参与式林业的理论、研究与实践[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [3] 教忠意, 王保松, 施士争, 等. 林木抗盐性研究进展[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(5): 60-64.
- [4] JIAO Z Y, WANG B S, SHI S Z, et al. Advances in salt resistance of trees [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(5): 60-64. (in Chinese)
- [5] 王遵亲, 祝寿泉, 愈仁培, 等. 中国盐泽土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [6] 孙士庆. 速生耐盐碱小胡系杨树的筛选及应用试验[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2003.
- [7] 王胜东, 彭儒胜. 杨树速生耐盐碱良种‘辽胡杨 1 号’[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 166.
- [8] WANG S D, PENG R S. The fast-growing and salt-alkali tolerant poplar elite variety of *Populus simonii* × *P. euphratica* ‘Liaohu 1’ [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 166. (in Chinese)
- [9] CHEN S L, POLLE A. Salinity tolerance of *Populus* [J]. Plant Biology, 2010, 12(2): 317-333.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [11] FLOWER T J, YEO A R. Ion relation of salt tolerance [M]. New York: John Wiley and Sons, 1988.
- [12] 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]. 植物生理学报, 2001, 27(4): 325-330.
- [13] 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 Photophysiol Sinica, 2001, 27(4): 325-330. (in Chinese)
- [14] CHEN S L, LI J K, WANG S S, et al. Salt, nutrient uptake and transport, and ABA of *Populus euphratica*; a hybrid in response to increasing soil NaCl [J]. Trees, 2001, 15(3): 186-194.
- [15] SLAMA I, GHNAYA T, SAVOURÉ A, et al. Combined effects of long-term salinity and soil drying on growth, water relations, nutrient status and proline accumulation of *Sesuvium portulacastrum* [J]. Comptes Rendus Biologies, 2008, 331(6): 442-451.
- [16] 史军辉, 王新英, 刘茂秀, 等. NaCl 胁迫对胡杨幼苗叶主要渗透调节物质的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6): 6-11.
- [17] SHI J H, WANG X Y, LIU M X, et al. Effects of NaCl stress on main osmotic adjustment substances in the seedling leaves of *Populus euphratica* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(6): 6-11. (in Chinese)
- [18] 马焕成, 王沙生. 盐胁迫下胡杨的离子响应[J]. 西南林学院学报, 1998, 18(1): 42-47.
- [19] MA H C, WANG S S. Ion response of *Populus euphratica* to salt stress [J]. Journal of Southwest Forestry College, 1998, 18(1): 42-47. (in Chinese)
- [20] 陈少良, 李金克, 尹伟伦, 等. 盐胁迫条件下杨树组织及细胞中钾、钙、镁的变化[J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 84-88.
- [21] CHEN S L, LI J K, YIN W L, et al. Tissue and cellular K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} of poplar under saline salt stress conditions [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6): 84-88. (in Chinese)
- [22] TEAKLE N L, FLOWERS T J, REAL D, et al. *Lotus tenuis* tolerates the interactive effects of salinity and waterlogging by ‘excluding’ Na^+ and Cl^- from the xylem [J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(8): 2169-2180.
- [23] 赵昕, 杨小菊, 石勇, 等. 盐胁迫下荒漠共生植物红砂与珍珠毛菜的根茎叶中离子吸收与分配特征[J]. 生态学报, 2014, 34(4): 963-972.
- [24] ZHAO X, YANG X J, SHI Y, et al. Ion absorption and distribution of symbiotic *reumuria soongorica* and *Salsola passerina* seedlings under NaCl stress [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 963-972. (in Chinese)
- [25] 魏忠平, 范俊岗, 潘文利, 等. 小胡杨对滨海苏打盐渍土改良效果研究[J]. 防护林科技, 2012(3): 14-16.