

不同白榆品系对滨海盐碱地的改良效果及盐分离子的分布与吸收

张梦璇¹, 董智¹, 李红丽¹, 王强², 梁玉³, 韩秀峰¹

(1. 山东农业大学林学院, 山东省土壤侵蚀与生态修复重点试验室, 泰山森林生态系统定位研究站, 山东泰安 271018; 2. 山东林业外资与工程项目管理站, 济南 250014; 3. 山东省林业科学研究院, 济南 250014)

摘要: 为揭示不同白榆(*Ulmus pumila* L.)品系对滨海盐碱地土壤盐分的改良作用及盐离子在土壤—白榆系统中的分布与吸收特征, 筛选适宜在滨海盐碱地造林的耐盐白榆品系, 以中度盐渍化生境下4年生的6种白榆品系(1, 5, 28, 30, 46, 105号)为试验材料, 采用野外取样与室内测试相结合的方法, 研究了 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等盐离子在土壤及白榆品系各器官(根、茎、叶)中的分布特征。结果表明: (1) 白榆可降低滨海盐碱地土壤中盐离子及全盐含量, 不同白榆品系较对照的土壤全盐含量降低了55.0%~63.1%, 30号白榆降幅最大。 (2) 不同白榆品系将 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 优先积累到叶中, 且叶中维持较高的 K^+/Na^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 比值, 不同白榆品系通过建立新的离子平衡以适应盐胁迫环境。 (3) 不同白榆品系的离子吸收选择性系数均为 $S_{\text{K}, \text{Na}} > S_{\text{Ca}, \text{Na}} > S_{\text{Mg}, \text{Na}}$, 其对 K^+ 的吸收选择性大于对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收选择性; 种内差异导致不同白榆品系对 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收选择能力不同, 28号白榆根系对 K^+ 的吸收性最强, 5号白榆根系对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的吸收性最强。

关键词: 滨海盐碱地; 白榆; 可溶性盐离子; 离子吸收选择性

中图分类号: S156.4⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)06-0340-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.06.049

Improvement Effects of Different *Ulmus Pumila* Strains on Coastal Saline Alkali Soil and Distribution and Absorption of Salt Ions

ZHANG Mengxuan¹, DONG Zhi¹, LI Hongli¹, WANG Qiang², LIANG Yu³, HAN Xiufeng¹

(1. Forestry College of Shandong Agricultural University, Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Taishan Forestry Ecosystem Research Station, Tai'an, Shandong 271018;

2. Shandong Project Management Office, Jinan 250014; 3. Shandong Academy of Forestry, Jinan 250014)

Abstract: In order to reveal the improvement effects of different *Ulmus pumila* strains on soil salt in coastal saline alkali land and the distribution and absorption characteristics of salt ions in the soil; *Ulmus pumila* system, and to select the salt tolerant *Ulmus pumila* strains for afforestation in coastal saline alkali soil, six species of *Ulmus pumila* (No. 1, 5, 28, 30, 46, 105 respectively) with 4 years old under moderate saline habitat were taken as test materials. Through field sampling and lab analysis, the distribution characteristics of salt ions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) in roots, stems, leaves of *Ulmus pumila* and soils were analyzed. The results showed that: (1) *Ulmus pumila* could significantly reduce the total salt contents of coastal saline alkali land, and the salt contents under different *Ulmus pumila* strains were 55.0%~63.1% lower than that of the control, *Ulmus pumila* of No. 30 gave the biggest reduction. (2) All the *Ulmus pumila* accumulated Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} preferentially in the leaves, and high K^+/Na^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ and $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ ratios were maintained in leaves. *Ulmus pumila* could adapt to salt stress by establishing new ionic equilibrium. (3) The absorption selectivity coefficients for all different *Ulmus pumila* strains were $S_{\text{K}, \text{Na}} > S_{\text{Ca}, \text{Na}} > S_{\text{Mg}, \text{Na}}$. The absorption selectivity of K^+ was greater than those of Ca^{2+} and Mg^{2+} . Different *Ulmus pumila* strains had different absorption ability for Na^+ , K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} , among which No. 28 had the highest absorbency to K^+ , And No. 5 had the strongest absorbency to Ca^{2+} and Mg^{2+} .

Keywords: coastal saline soil; *Ulmus pumila* L.; soluble salt ions; ion absorption selectivity

收稿日期: 2018-06-19

资助项目: 国家“十三五”重点研发计划项目(2016YFC0500504); 欧洲投资银行贷款山东沿海防护林建设项目(SCSFP-JC); 山东省林业科技创新项目(LYCX03-2018-17)

第一作者: 张梦璇(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土流失防治研究。E-mail: aiyaya_sun@163.com

通信作者: 李红丽(1972—), 女, 博士, 副教授, 主要从事荒漠化防治、盐碱地治理与植被恢复研究。E-mail: lhl@sdau.edu.cn

中国盐渍化土地面积广阔,约 $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 的盐渍土分布在滨海地带^[1]。盐渍化不仅造成大面积的土地资源难以利用,而且成为制约滨海区域农林业持续发展的主要障碍因素之一。有研究^[2]表明,与抬高地势、使用化学改良剂等措施相比,利用植物来改良盐碱地的生物措施具有投资小、脱盐持久等优点。但在盐碱胁迫环境下,盐碱危害成为制约植物生长的主要因素,常常导致植物生长不良或死亡^[3]。因此,选择对盐分离子具有较好吸收选择性的适宜在盐碱地生长的耐盐植物对改良和利用盐碱地具有重要意义。

白榆(*Ulmus pumila* L.)是广泛分布于中国、朝鲜、蒙古、俄罗斯和中亚等地的一个树种^[4-5],是亚洲、北美、阿根廷和欧洲南部人工造林的主要树种^[6]。白榆具有抗干旱、耐严寒和抗盐碱等特性,是我国北方地区用材林和盐碱地造林的主要树种之一^[7],开展白榆优良无性系抗盐性的筛选研究对于生物改良盐碱地具有重要意义。关于白榆耐盐性的研究集中于盐胁迫下的生长量及生长状况^[8]、盐胁迫对种子萌发、出苗、幼苗生长的影响^[9],盐胁迫下的生理特性及 Na^+ 、 K^+ 含量的变化^[7,10-12]及耐盐基因型等^[13]方面,但对滨海盐碱地自然生境盐胁迫下不同盐分离子在白榆不同品系及其不同器官间分配与耐盐机制间的关系的研究相对薄弱。植物的耐盐性不仅存在种间差异,也存在着明显的种内差异^[11],探索不同白榆品系对盐分离子的分布与吸收的差异可进一步明确其耐盐机制。基于此,本文以滨海盐碱地自然生境下4年生的6种白榆品系为试验材料,研究不同白榆品系下土壤可溶性盐离子含量及盐胁迫环境下白榆各器官中离子分布情况,探讨不同白榆品系对土壤盐分的改良作用及离子在白榆体内分布与吸收特征,以期为滨海盐碱地的生态改良及植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山东省河口区,山东省林业科学研究院白榆良种试验基地,地理坐标为 $37^\circ 54' 46'' \text{N}$, $118^\circ 35' 01'' \text{E}$,属暖温带半湿润大陆性季风气候区。年平均气温 12.3°C ,极端最高气温 41.9°C ,极端最低气温 -23.3°C ;年太阳辐射总量 $5\,278 \text{ J/m}^2$,年日照时间 $2\,571 \sim 2\,865 \text{ h}$,平均无霜期 210 d ;年均降水量 692 mm ,其中 63.9% 的降水集中于夏季。土壤类型为盐化潮土。2014年6月24日栽植不同白榆品系组培营养钵苗,栽植时土壤含盐量为 $(3.78 \pm 0.25) \text{ g/kg}$,属中度盐渍土。

1.2 试验材料的选取

所有白榆品系的外植体采自于山东省金乡县白注

林场(原林业部和山东省林业厅确定的林木良种基地)白榆基因库,研究材料是从220个白榆种质资源中选取40个生长量大、抗病虫能力较强的白榆优良无性系外植体,再经耐盐组织培养获得的具有抗盐能力的白榆品系。试验白榆组培营养钵苗于2014年6月24日栽植,栽植苗高 $4 \sim 7 \text{ cm}$;2017年9月4日,在白榆良种试验基地选取6个白榆品系(编号为1,5,28,30,46,105号)进行每木调查。每个品系选择长势良好、无病虫害的标准木3株,取其根、茎、叶作试验材料。各品系的茎、叶分别采集冠层中部向阳与不向阳的样品进行混合;在白榆植株基部挖取土壤剖面,取 $0.5 \sim 2 \text{ cm}$ 的根段。将采集的样品按叶、茎、根分类整理后放在 80°C 烘箱中烘干至恒重,用 1 mm 的粉碎机粗粉后再用 0.5 mm 的粉碎机粉成小颗粒,装入纸袋作为试验样品。同步,在开挖的土壤剖面上取 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的土壤样品装袋,带回实验室风干后进行离子测试分析。

1.3 离子测定

白榆根、茎、叶器官和土壤中的可溶性盐离子 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 的测定采取水提取液分析法。具体步骤为:取样品 2.000 g ,置于 200 mL 三角瓶中,加入 200 mL 蒸馏水浸提 14 h ,过滤后的清液为试验测定离子的样品。可溶性盐的测定:参照《土壤农化分析》^[14] 中可溶盐离子的测定方法, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 用 EDTA 滴定法, K^+ 和 Na^+ 用火焰光度计法, CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 用双指示剂法, Cl^- 用 AgNO_3 滴定法。以上离子测定,每个样品重复3次。按公式计算不同器官对离子吸收选择性系数^[15]: $(S_{X,\text{Na}} = [\text{Na}^+/\text{X}]_{\pm} / [\text{Na}^+/\text{X}]_{\text{根}})$ (X 代表 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})。

1.4 数据分析

使用 SPSS 22.0 软件对各指标进行差异显著性分析,并用 Excel 2016 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同白榆品系土壤中可溶性离子及全盐含量

由表1可以看出,研究区不同白榆品系样地及对照土壤中均无 CO_3^{2-} 存在,阴离子主要由 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 组成。对照空地阴离子以 Cl^- 为主,阳离子则以 Na^+ 为主;与对照空地相比,不同白榆品系土壤中阴离子以 HCO_3^- 为主, Cl^- 含量明显降低;阳离子则以 Na^+ 为主,不同白榆品系下土壤中 Na^+ 含量较对照空地减少 $50.4\% \sim 66.1\%$ 。

从全盐含量来看,栽植时土壤盐分含量为 $(3.78 \pm 0.25) \text{ g/kg}$,对照空地的全盐含量为 3.20 g/kg ,仍为中度盐渍土,经白榆的改良作用,林下土壤中含盐量均小于 1.50 g/kg ,各白榆品系含盐量降低幅度为

55.0%~63.1%，其中 30 号白榆土壤中含盐量降低幅度最大，为 63.1%。不同白榆品系对土壤中含盐量的降低幅度表现为 30 号>28 号>105 号>46 号>1 号>5 号。

表 1 不同白榆品系土壤中可溶性离子含量 单位:g/kg

品系	土层深度/cm	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	全盐量
1 号	0-20	0.04±0.00ab	0.43±0.01d	0.04±0.00a	0.13±0.01ab	0.06±0.00bc	0.48±0.02d	0.11±0.01b	1.29±0.11c
5 号	0-20	0.05±0.00a	0.57±0.05b	0.02±0.00b	0.12±0.00bc	0.05±0.00c	0.53±0.05b	0.10±0.00b	1.44±0.15b
28 号	0-20	0.05±0.00a	0.47±0.02c	0.04±0.00a	0.11±0.00c	0.07±0.00b	0.39±0.01f	0.08±0.00c	1.21±0.09cd
30 号	0-20	0.03±0.00b	0.39±0.01e	0.02±0.00b	0.12±0.00bc	0.07±0.00b	0.45±0.02e	0.10±0.00b	1.18±0.11d
46 号	0-20	0.04±0.00ab	0.44±0.00d	0.02±0.00b	0.13±0.01ab	0.06±0.00bc	0.51±0.02c	0.07±0.00c	1.27±0.12cd
105 号	0-20	0.04±0.00ab	0.46±0.02c	0.03±0.00ab	0.14±0.01a	0.06±0.00bc	0.46±0.04e	0.08±0.00c	1.27±0.06cd
对照空地	0-20	0.04±0.00ab	1.15±0.08a	0.03±0.00ab	0.13±0.01ab	0.12±0.01a	0.77±0.03a	0.97±0.05a	3.20±0.18a

注:表中数据为平均值±标准差(n=3),不同字母代表同列数据之间差异显著(P<0.05);下同。

2.2 不同白榆品系各器官中可溶性 K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 含量

2.2.1 K⁺ 含量 K⁺ 是植物体内必需的营养元素之一,也是植物细胞中含量较为丰富的阳离子之一,参与植物体内众多生理生化过程。白榆依靠根系从土壤中获取 K⁺,并将从土壤中吸收的 K⁺ 运输到体内的各个器官,维持其正常代谢和生长发育。由图 1 可以看出,叶中 K⁺ 含量以 5,105 号白榆最多,28 号白榆含量最少。5,105 号白榆叶中 K⁺ 含量无显著差异,但与其他 4 个白榆品系均存在显著差异。各白榆品系根中 K⁺ 含量低于叶中的含量,且各白榆品系根中 K⁺ 含量存在显著差异。不同白榆品系中 K⁺ 含量在各个器官中的分布具有相同的规律,均为叶>根>茎,这说明各白榆品系从土壤中吸收的 K⁺ 优先分配于叶和根。

2.2.2 Na⁺ 含量 Na⁺ 作为盐碱地中主要的盐害阳离子,植物各器官积累过多的 Na⁺ 对植物吸收其他阳离子有拮抗作用,影响植物的正常生长。土壤中可溶性阳离子以 Na⁺ 浓度最高,Na⁺ 顺着电化学势梯度被动运输到植物体内,Na⁺ 在根系中不断积累,并随水分运输到白榆品系的各个器官。由图 1 可知,Na⁺ 含量在不同白榆品系各个器官中的分布规律不同。1,30,105 号白榆 Na⁺ 含量在各个器官中的分布规律为叶>根>茎;5,28,46 号白榆则为叶>茎>根。各白榆品系中 Na⁺ 含量均以叶中最高,由此可见白榆优先将 Na⁺ 积累在叶中。

2.2.3 Ca²⁺ 含量 钙离子作为第二信使在植物盐害中具有重要作用^[16],植物受到盐害刺激时,细胞膜上的 Ca²⁺ 通道激活,细胞外 Ca²⁺ 进入细胞质,从而增强植物的耐盐性。由图 1 可以看出,Ca²⁺ 含量在各白榆品系器官中(1 号除外)的分布规律为:叶>根>茎。5,28,46 号白榆叶中 Ca²⁺ 含量无显著差异,与其他白榆品系的差异均达到显著水平。根中 Ca²⁺ 含量最高的为 28 号白榆,其次为 1 号白榆,且 1 号白榆各器官中 Ca²⁺ 含量以根中最多。茎中 Ca²⁺ 含量在各器官中最少,其中 5,28,105 号白榆 Ca²⁺ 含量差异不明显,与其

他白榆品系均呈显著差异。

2.2.4 Mg²⁺ 含量 镁是叶绿素的重要组成成分之一,是植物合成叶绿素的必要物质。由图 1 可知,不同白榆品系叶中 Mg²⁺ 含量在各个器官中含量最高,不同白榆品系间叶中 Mg²⁺ 含量差异均达到显著水平。不同白榆品系叶中 Mg²⁺ 含量是对应品系根中 Mg²⁺ 的 2 倍,在可溶性阳离子中差异最大。与其他阳离子在不同白榆品系器官间的分布规律相同,Mg²⁺ 在白榆各器官中含量均为叶>根>茎。

2.3 不同白榆品系各器官离子含量的比值差异 由图 2 可知,不同白榆品系根中 K⁺/Na⁺ 比值的变化范围为 2.24~3.29,其中 28 号白榆最大为 3.29,且与其他白榆品系存在显著差异;K⁺/Na⁺ 比值在各品系白榆茎中相差不大;而在叶中 K⁺/Na⁺ 比值变化范围为 2.05~2.63,30 号白榆 K⁺/Na⁺ 比值最大,是比值最小 105 号白榆的 1.28 倍。不同白榆品系的 Ca²⁺/Na⁺ 比值在各个器官中规律不明显且波动幅度较大,根中 Ca²⁺/Na⁺ 比值以 28 号白榆最大,30 号白榆最小;不同白榆品系茎中 Ca²⁺/Na⁺ 比值差异均达到显著水平;各白榆品系叶中 Ca²⁺/Na⁺ 比值 30 号白榆最大,其次为 28 号白榆。Mg²⁺/Na⁺ 比值在白榆各器官中总体变化趋势为叶>根>茎(5 号白榆品系除外)。叶中 Mg²⁺/Na⁺ 比值为 30 号白榆最大,其次为 28 号白榆,1 号白榆比值最小,且 30 号白榆的 Mg²⁺/Na⁺ 比值是 1 号的 2.15 倍,不同白榆品系间的差距较大。

2.4 不同白榆品系离子的选择性吸收

植物的耐盐性主要取决于根系对离子的选择性吸收,其吸收能力的大小可用吸收选择性系数表示。由表 2 可知,不同白榆品系的吸收选择性系数均为 S_{K,Na}>S_{Ca,Na}>S_{Mg,Na}。其中 28 号白榆的 S_{K,Na} 最大,其次为 30 号白榆,而 1 号白榆在各品系中 S_{K,Na} 较小,28 号白榆 S_{K,Na} 是 1 号白榆的 1.26 倍;S_{K,Na} 吸收选择性系数在不同白榆品系表现为 28 号>30 号>5 号>105 号>46 号>1 号,28 号白榆根系对 K⁺ 的选

择吸收性最强。不同白榆品系间 $S_{K,Na}$ 吸收选择性系数存在显著差异。不同白榆品系 $S_{Ca,Na}$ 吸收选择性系数大小为 5 号>28 号>46 号>30 号>105 号>1 号,5 号白榆 $S_{Ca,Na}$ 是 1 号白榆的 2.03 倍,5 号白榆根系对 Ca^{2+} 的选择吸收性最强,1 号白榆对 Ca^{2+} 的选

择吸收性最弱。1 号和 5 号白榆 $S_{Ca,Na}$ 吸收选择性系数差异显著,而其他 4 个白榆品系不存在显著差异。 $S_{Mg,Na}$ 吸收选择性系数则为 5 号白榆最大,105 号白榆最小,相差 2.12 倍。其他白榆品系 $S_{Mg,Na}$ 吸收选择性系数差异显著。

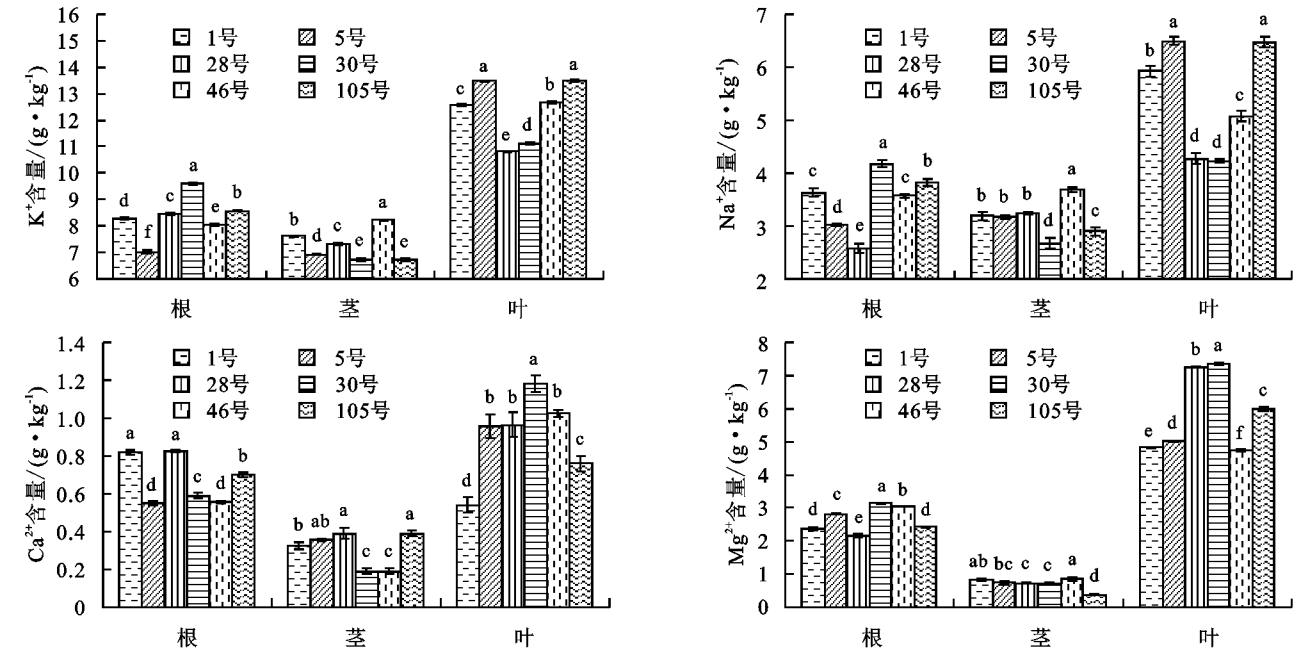


图 1 不同白榆品系各器官中 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量

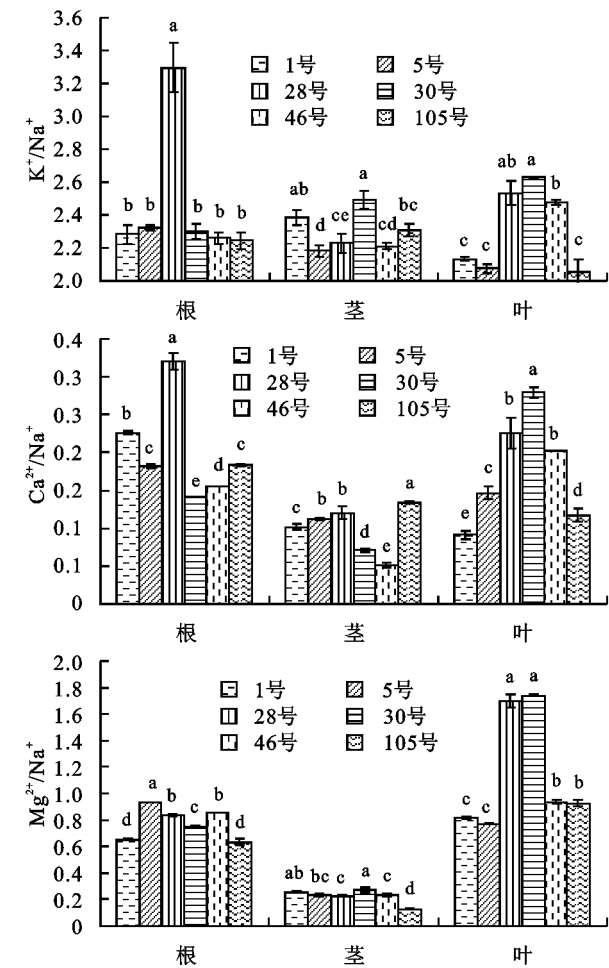


图 2 不同白榆品系各器官中 K^+/Na^+ 、

Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值

表 2 不同白榆品系的吸收选择性系数

吸收选择性 系数	$S_{K,Na}$	$S_{Ca,Na}$	$S_{Mg,Na}$
1 号	$24.54 \pm 0.51c$	$2.55 \pm 0.69b$	$2.18 \pm 0.20d$
5 号	$26.48 \pm 0.41b$	$5.18 \pm 0.13a$	$4.44 \pm 0.41a$
28 号	$30.97 \pm 1.45a$	$3.96 \pm 1.18ab$	$3.60 \pm 0.42b$
30 号	$29.95 \pm 1.05a$	$3.37 \pm 1.92ab$	$2.45 \pm 0.23cd$
46 号	$24.85 \pm 0.50c$	$3.42 \pm 0.08ab$	$2.90 \pm 0.20c$
105 号	$25.79 \pm 0.51bc$	$3.03 \pm 1.05ab$	$2.09 \pm 0.10d$

3 讨论

离子区域化是植物适应和响应盐胁迫的重要途径,耐盐植物通过盐离子的区域化维持体内离子平衡^[17],提高自身的耐盐性。不同的植物自身结构特征不同,使离子区域化的方式不同,沙枣(*Elaeagnus angustifolia* L.)^[18]等植物优先将 Na^+ 积累在根中;唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)^[19]等优先将 Na^+ 积累在叶中;而菊芋(*Helianthus tuberosus*)^[20]则将 Na^+ 优先积累在茎中。本研究表明,不同白榆品系各器官中 Na^+ 含量以叶中最多,说明白榆吸收的 Na^+ 主要贮存在叶片中,含有大量 Na^+ 的叶中形成低渗透势而吸水,维持细胞内的正常渗透压,从而规避盐害对白榆的影响。 K^+ 和 Na^+ 的离子半径与水合能相似, Na^+ 竞争 K^+ 的吸收点及活性位点^[21],使 Na^+ 利用 K^+ 的运输通道进入植物体内。而植物正常的

生长发育对 K^+ 的需求量大, K^+ 在阳离子吸收上又有较强的竞争力, 研究表明, K^+ 在各器官中的含量均高于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 说明植物通过加大对 K^+ 的吸收, 抑制 Na^+ 在植物体内过量积累, 维持体内离子平衡, 避免植物受到盐害的影响。 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 是促进植物生长的矿质离子, 对植物的生长不会形成盐害影响^[22]。 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子的积累有助于维持植物较低的细胞渗透势促进植物根系吸收水分, 促进植物代谢与生长; 另一方面, Ca^{2+} 可以加速 Na^+ 的外排和抑制 K^+ 的外排^[23], 使植物体内离子处于相对平衡状态。 本研究中, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 在各器官中含量为叶 > 根 > 茎, 这是由于叶中 K^+ 和 Na^+ 含量高, 为减小 2 种离子对叶片的毒害作用, 大量 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 运输到叶片中。 盐渍环境下, 植物建立了新的离子平衡以适应盐胁迫, 叶中适当 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度有利于避免营养亏缺, 从而维持植物正常生命活动。

K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值常用来表征盐胁迫对植物体内离子平衡的破坏程度, 其比值越低, 表明 Na^+ 对 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收的抑制效应越强, 植物受盐害越严重^[18]。 本研究表明, 不同白榆品系叶中的 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值普遍高于其他器官, 这是由于叶片中 Na^+ 含量增加时, 白榆受到盐离子胁迫, 为维持体内细胞离子平衡, 此时叶片中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 含量相应升高; K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值也增大, 以此抵御盐离子对植物叶片的毒害作用。 叶作为植物的营养器官, 维持叶中稳定的 K^+/Na^+ , 对植物的生长有利^[24]。 本研究结果表明 30 号白榆叶片中的 K^+/Na^+ 比值最大, 105 号白榆叶片中最小, 说明 30 号白榆叶片对 K^+ 吸收能力大于 105 号白榆。 不同白榆品系叶片通过增加对 Ca^{2+} 的吸收, 维持相对稳定的 Ca^{2+}/Na^+ 比值, 从而保持盐胁迫环境下白榆体内正常的生理代谢。 Mg^{2+} 作为植物合成叶绿素的重要物质, 在叶片中大量积累, 叶片中较高 Mg^{2+}/Na^+ 比值有利于增强植株的光合作用, 从而增强植物的耐盐性, 本研究中 30 号白榆叶片中 Mg^{2+}/Na^+ 比值明显优于其他白榆品系, 30 号白榆通过增强对 Mg^{2+} 的吸收来保证较强的光合能力从而适应盐胁迫环境。 离子选择性吸收系数反映了植物体对离子吸收和向上部分运输的选择性^[25], $S_{K,Na}$ 、 $S_{Ca,Na}$ 、 $S_{Mg,Na}$ 值越大, 表示植物根系向地上部分选择性运输 K^+ 、 Ca^{2+} 或 Mg^{2+} 的能力越强, 抑制 Na^+ 运输。 对不同白榆品系的研究显示, $S_{K,Na}$ 吸收选择性系数维持较高值, $S_{Ca,Na}$ 次之, $S_{Mg,Na}$ 的吸收选择性系数最低, 表明盐胁迫环境下白榆根系加强了对 K^+ 的选择性吸收, 尽可能多的截留

Na^+ , 以消除 Na^+ 在地上部位的积累带来的负面影响。 $S_{Ca,Na}$ 大于 $S_{Mg,Na}$ 的选择吸收性系数是由于 Ca^{2+} 在植物根系受到盐胁迫时, 能防止盐害对细胞膜的过度伤害, 对植物的渗透调节作用有积极影响。 这与 Grattan 等^[26] 研究的植物根系可以通过维持足够的 Ca^{2+} 含量以减少 Na^+ 毒害作用相一致。 不同白榆品系 $S_{Ca,Na}$ 和 $S_{Mg,Na}$ 在盐胁迫环境下为了减少地上部离子失衡对植物造成的单一盐害影响, 加强根系对 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的选择性吸收, 保持白榆体内稳定的离子平衡, 从而增强白榆的耐盐性。

4 结论

(1) 白榆对滨海盐碱地具有改良作用, 可降低土壤中盐离子含量和全盐含量, 不同白榆品系的土壤含盐量较对照降低了 55.0%~63.1%, 降幅表现为 30 号 > 28 号 > 105 号 > 46 号 > 1 号 > 5 号, 30 号白榆对滨海盐碱地的改良效果最好。

(2) 不同白榆品系 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在各器官中含量均为叶 > 茎 > 根, 白榆将可溶性盐离子优先积累到叶中, 为避免离子失衡对植物生理代谢造成的影响, 白榆在叶中建立新的离子平衡, 维持较高的 K^+/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 比值以适应盐胁迫环境。

(3) 不同白榆品系的离子吸收选择性系数均为 $S_{K,Na} > S_{Ca,Na} > S_{Mg,Na}$, 不同白榆品系不仅表现为对 K^+ 的吸收选择性大于对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收选择性, 而且种内差异导致其对 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收选择能力不同, 其中, 28 号白榆根系对 K^+ 的吸收性最强, 5 号白榆根系对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 吸收性最强。

参考文献:

- [1] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [2] 马晨, 马履一, 刘太祥, 等. 盐碱地改良利用技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(2): 28-32.
- [3] Munns R. Comparative physiology of salt and water stress[J]. Plant, Cell and Environment, 2002, 25(2): 239-250.
- [4] Xin F L, Whittemore Y, Ulmaceae A, et al. Flora of China[M]. Vol. 5. Beijing and USA: Science Press and Missouri Botanical Garden Press, 2002.
- [5] Wesche K, Walther D, Wehrden H V, et al. Trees in the desert: Reproduction and genetic structure of fragmented *Ulmus pumila*, forests in Mongolian drylands[J]. Flora, 2011, 206(2): 91-99.
- [6] Hirsch H, Brunet J, Zalapa J E, et al. Intra- and inter-specific hybridization in invasive Siberian elm[J]. Biological Invasions, 2017, 19(6): 1-16.

- [7] 张晓晓,殷小琳,李红丽,等. NaCl 胁迫对不同白榆品系生物量及光合作用的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7258-7265.
- [8] 慕德宇. 离体培养条件下 12 个白榆优良无性系氯化钠盐分抗性筛选的研究[J]. 山东大学学报(理学版), 2013, 48(3): 19-23.
- [9] 刘炳响,王志刚,杨敏生,等. 模拟盐胁迫对白榆种子发芽、出苗及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 39-46.
- [10] 刘炳响,王志刚,梁海永,等. 盐胁迫对不同生境白榆生理特性与耐盐性的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1481-1489.
- [11] 苏丹,殷小琳,董智,等. 白榆无性系生长特性及离子分布对 NaCl 胁迫的响应[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(5): 48-57.
- [12] Batkhuu N, Enkhchimeg T, Jamsran T. Salt tolerance of *Ulmus pumila* L. seedlings from geographically different seed sources[C]// XXIV IUFRO World Congress Sustaining Forests, Sustaining People: The Role of Research. 2014.
- [13] Mu D, Zwiazek J J, Li Z, et al. Genotypic variation in salt tolerance of *Ulmus pumila*, plants obtained by shoot micropropagation[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(8): 1-16.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 12-21.
- [15] 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.
- [16] 孙涛. 小麦 CIPK 基因家族鉴定与分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [17] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. [J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59(1): 651-681.
- [18] 刘正祥,张华新,杨秀艳,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.
- [19] 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.
- [20] 王磊,隆小华,孟宪法,等. 水杨酸对 NaCl 胁迫下菊芋幼苗光合作用及离子吸收的影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1901-1907.
- [21] Kopittke P M. Interactions between Ca, Mg, Na and K: Alleviation of toxicity in saline solutions[J]. Plant and Soil, 2012, 352(1/2): 353-362.
- [22] 陆嘉惠,吕新,梁永超,等. 新疆胀果甘草幼苗耐盐性及对 NaCl 胁迫的离子响应[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 839-850.
- [23] 鲁彦君. 两种非泌盐红树离子平衡调控机理与耐盐性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [24] Zhang J L, Flowers T J, Wang S M. Differentiation of low-affinity Na⁺, uptake pathways and kinetics of the effects of K⁺, on Na⁺, uptake in the halophyte *Suaeda maritima*[J]. Plant and Soil, 2013, 368(1/2): 629-640.
- [25] 宁建凤,郑青松,杨少海,等. 高盐胁迫对罗布麻生长及离子平衡的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2): 325-330.
- [26] Grattan S R, Grieve C M. Mineral nutrient acquisition and response by plants grown in saline environments[M]. New York: Pessarakli Med. Handbook of Plant and Crop Stress. Marcel Dekker, 1999: 203-229.

(上接第 339 页)

- [20] 杜毅飞,方凯凯,王志康,等. 生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4260-4267.
- [21] 戴雅婷,侯向阳,闫志坚,等. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物群落功能多样性研究[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 56-65.
- [22] Govaerts B, Mezzalama M, Unno Y, et al. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 37(1/2): 18-30.
- [23] 郑华,欧阳志云,赵同谦,等. 不同森林恢复类型对土壤生物学特性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2006, 12(1): 36-43.
- [24] 朱平,陈仁升,宋耀选,等. 祁连山不同植被类型土壤微生物群落多样性差异[J]. 草业学报, 2015, 24(6): 75-84.
- [25] Zhong W H, Gu T, Wang W, et al. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. Plant and Soil, 2010, 326: 511-522.
- [26] 韩冬雪,王宁,王楠楠,等. 不同海拔红松林土壤微生物功能多样性[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3649-3656.
- [27] Lennon J T, Jones S E. Microbial seed banks: The ecological and evolutionary implications of dormancy[J]. Nature Reviews Microbiology, 2011, 9(2): 119-130.
- [28] 唐宏亮,郭秋换,张春潮,等. 磷供应对玉米根际微生物碳源利用和功能多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1312-1319.