

盐渍土壤大果沙枣树主要矿质阳离子的吸收和分配特征

罗青红¹, 周 斌^{1*}, 李英仑², 阿不都热西提·热合曼¹

(1 新疆林业科学院 造林治沙研究所, 乌鲁木齐 830063; 2 喀什地区瓜果蔬菜产业发展中心, 新疆喀什 844000)

摘 要: 为探明大果沙枣树体矿质离子渗透调节机制, 比较分析了盐渍化生境中 1~12a 生树的根、枝和叶部主要矿质阳离子的吸收、分配特征。结果表明: (1) 大果沙枣树体内 Ca^{2+} 的积累量最高 (13.79 g/kg), K^+ 次之 (5.92 g/kg), Na^+ 最低 (1.00 g/kg); 随着树龄的增大, 大果沙枣根部的 Na^+ 以及枝和叶部的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的积累量均逐渐增大, 而根部的 K^+ 含量则逐渐减少; 高龄段 (10~12a) 树体根部的 Na^+ 积累量显著 ($P < 0.05$) 高于中低龄 (1~9a) 段。 (2) 大果沙枣树体内 K^+/Na^+ 最大 (15.36), $\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+$ 次之 (12.25), $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 最小 (10.51), 根和枝部的 K^+/Na^+ 均随着树龄的增大而降低, 叶部则表现相反。 (3) 土壤中的 K^+ 和 Mg^{2+} 向根方向、根部 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 向枝方向以及根部的 K^+ 和 Mg^{2+} 向叶方向的选择运移系数均随着树龄的增大呈直线上升趋势。 (4) 土壤中 Na^+ 与根部 Na^+ 含量呈极显著正相关关系 (0.687, $P < 0.01$), 与叶部的 K^+ 含量呈显著正相关 (0.605, $P < 0.05$); 土壤中 K^+ 含量与根部的 Na^+ 、叶部的 K^+ 分别呈显著和极显著正相关 (0.544, 0.676), 与根部的 Mg^{2+} 呈显著负相关关系 (-0.499)。研究发现, 大果沙枣树生长过程中主要通过根部对 Na^+ 的聚积作用, 以及 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 在枝、叶部的吸收积累来维持植物体离子平衡, 以适应盐渍土壤环境。

关键词: 大果沙枣; 树龄; 矿质离子比; 运移系数

中图分类号: Q945.12

文献标志码: A

Absorption and Distribution of Main Mineral Cations of *Elaeagnus moorcroftii* in Salinized Land

LUO Qinghong¹, ZHOU Bin^{1*}, LI Yinglun², ABUDUREXITI Reheman¹

(1 Institute of Afforestation and Sand Control, Xinjiang Academy of Forestry, Urumqi 830063, China; 2 Kashgar Fruit and Vegetable Industry Development Center, Kashgar, Xinjiang 844000, China)

Abstract: To ascertain the mechanism of ion osmosis adjustment adapted to saline soil habitat, we studied the absorption and distribution of the main mineral cations in roots, branches and leaves of *E. moorcroftii* trees with the age of one to twelve. Result showed that: (1) the Ca^{2+} accumulation of the tree was the highest (13.79 g/kg), K^+ was the next (5.92 g/kg), Na^+ was the lowest (1.00 g/kg). With the increasing of tree age, the Na^+ content in the roots, the K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} contents in the branches and leaves had the rising trend, while K^+ content had the opposite trend. The accumulation of Na^+ in the root of the higher age grade trees were significantly bigger than that of the lower and middle age grade ones. (2) The

收稿日期: 2021-01-28; 修改稿收到日期: 2021-06-08

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目 (2019B00007); 中央财政林草推广项目 (新[2021]TG01); 自治区林业发展补助资金项目 (XJLYKJ-2020-09)

作者简介: 罗青红 (1980—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为干旱区林木生理生态。E-mail: lqh482325@sina.com

* 通信作者: 周 斌, 教授级高级工程师, 研究方向为生态经济林栽培。E-mail: 1369980179@qq.com

K^+/Na^+ of the tree was higher (15.36) than the Mg^{2+}/Na^+ (12.25) and the Ca^{2+}/Na^+ (10.51). The K^+/Na^+ of the root and branch decreased, while it increased in the leaf. (3) With the increasing of tree age, the selective transport coefficients of K^+ and Mg^{2+} from the soil to the root, and K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} from root to branch, as well as K^+ and Mg^{2+} from root to leaf showed the straight upward trend. (4) The Na^+ content in the soil had an extreme significant positive correlation with the Na^+ content in the root (0.687, $P<0.01$), and a significant positive correlation with the K^+ content in the leaf (0.605 $P<0.05$). The K^+ content in the soil had a significant and extreme significant positive correlation with the K^+ in the leaf and Na^+ in the root respectively (0.544, 0.676), and had a significant negative correlation with the Mg^{2+} in the root (-0.499). *E. moorcroftii* maintained the ion balance and adapted to saline soil habitat through accumulating Na^+ in the root and selective absorbing the K^+ , Mg^{2+} and Ca^{2+} in the branch and leaf.

Key words: *Elaeagnus moorcroftii*; tree age; ratios of mineral ions; transportation coefficient

盐胁迫会不同程度地抑制植物的生长发育。但有一些植物在漫长的生长进化过程中,逐渐形成了与生境相适应的特殊组织结构或内在生理机制,从而适应盐生环境并生长良好^[1]。多年来,学者已从分子、细胞、组织和器官等不同尺度,研究了盐胁迫环境中植物体内过氧化酶系统、有机渗透调节物质、渗透蛋白等^[2-5]的生理协变特征。然而,植物的耐盐性亦与盐离子在其体内的吸收、运输、分配、排泄,以及相关的生物膜功能、离子区域化作用和耐盐物质的合成与积累密切相关^[6],其作用机制相当复杂。一般说来,植物体可通过调节盐离子在不同器官、组织或细胞内的区化分布来减轻离子毒害,从而表现出较强的耐盐性^[6]。

土地盐渍化一直是新疆农、林及畜牧业发展的主要制约因素。第二次土壤普查数据显示,新疆耕地盐碱化总面积已近 122.9 万 hm^2 ,占全部耕地面积的 31.2%^[7]。沙枣耐贫瘠、耐盐碱、生长快,是盐碱地区及沙区优良的先锋树种^[8]。对于长期生长在盐渍化土壤中的植物而言,体内参与渗透调节的 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等主要矿质阳离子在其耐盐碱机制中起着重要作用,这些矿质离子对降低植物木质部的渗透势和维持体内水分平衡^[9]、维持细胞膜的结构完整性和功能稳定性^[9],以及保持体内代谢平衡方面起着重要作用^[10-12]。通常情况下,因物种、品种及生长发育时期的不同,这些离子在植物器官中的分配特征亦各异。

大果沙枣 (*Elaeagnus moorcroftii* Wall. ex Schlecht.) 是中国西部干旱荒漠区盐渍土环境中的一种重要的生态经济树种^[13],多年来一直是新疆尤其是塔克拉玛干沙漠周边盐渍土人工林(农田防护林、防风固沙林)建设的首选树种,对绿洲生态环境的保护、恢复和改善起着重要作用。迄今,关于沙枣(大果沙枣)对盐胁迫的生理响应和适应的研究,多

采用控制试验分析种子、幼苗或小树某一阶段对盐胁迫的光合生理响应及渗透调节物质、抗氧化酶等生理生化指标的响应特征^[14-19]。但有关大果沙枣生长过程中树体内离子吸收、运转和分配变化规律等方面的研究较少,因此,本研究以塔克拉玛干沙漠边缘不同树龄大果沙枣树为对象,分析其对土壤主要矿质离子 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的吸收、分配特征,进而探明大果沙枣树生长发育过程对盐渍土的适应机制,为保护和合理开发利用大果沙枣,充分发挥其生态和经济效益提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

以距离新疆喀什市方圆 40 km 范围内 12 个不同林龄的大果沙枣林(39°17'57"~39°49'00"N, 75°41'23"~76°11'30"E)为试验林,这些沙枣林都是同一个生态系统中的人工林,地势都较平坦,且具相同气候特征、土壤背景和地形特征,目前保留平均密度为 1 250 株/ hm^2 ,平均树高为 4.43 m、胸径为 15.75 cm、叶片组织相对含水量为 83.62%。土壤均为沙壤土,pH 为 8.42,有机质含量为 6.48 g/kg、速效氮、磷和钾含量分别为 26.59、7.59 和 102.83 mg/kg。土壤中总盐及 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 4 种主要矿质阳离子含量分别为 4.74、0.04、0.37、0.24 和 0.69 g/kg, CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 4 种主要阴离子含量分别为 0.015、0.40、0.44 和 2.37 g/kg。

1.2 林龄确定和龄段划分

在 12 个试验林中,分别随机选择 30 株健康单株,测定其胸径和株高后求平均,按照从小到大排序记录为 1、2、3、……、11、12 共 12 个林龄,采用组距分组法,将 12 个大果沙枣林分为 4 个龄段,即 I 龄段(1—3 龄)、II 龄段(4—6 龄)、III 龄段(7—9 龄)和 IV 龄段(10—12 龄)(表 1)。

表 1 采样区大果沙枣树生长情况及年龄分级

Table 1 The growth and age grade of *Elaeagnus moorcroftii* in sampling site

指标 Factor	林龄段 Age grade											
	I (1~3a)			II (4~6a)			III (7~9a)			IV (10~12a)		
林龄 Forest age/a	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
胸径 Diameter at breast height (DBH)/cm	2.67	4.64	6.32	8.01	12.14	12.27	19.67	23	23.25	25.67	26.93	28.7
树高 Tree height/m	2.07	2.76	3.06	3.53	4.67	3.6	4.16	6.08	5.95	5.875	6.4	8.63

1.3 样品采集

每个试验林中随机选择 6 棵生长基本一致,且彼此相距 10 m 以上的大果沙枣树作为试验样株,采集树冠中部健康的 1~2 年生枝条和成熟叶;在距样株基部 50 cm 和 100 cm 的位置,从东南西北四个方向,用根钻采集地下 0~100 cm 范围内直径≤1 cm 的根系;将每个试验林中试验样株的枝、叶、根样品分别混合,带回室内洗净阴干待测。同时,在每个试验林内随机选择 3 个土壤样点,用土钻分 3 层(0~30 cm、30~60 cm、60~100 cm)取样,将同一试验林内同层土壤样品混合,带回室内阴干待测。

1.4 测定指标及方法

1.4.1 植物样品主要矿质阳离子含量 大果沙枣根、枝、叶样品经烘干、磨碎、过筛后,参照刘正祥等^[20]的方法,用火焰光度法测定 Na⁺、K⁺ 含量,用滴定法测定 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量。

1.4.2 土样主要矿质阳离子含量 风干的土壤样品经过研碎、过筛后,参考《土壤农化分析》^[21]的方法,用乙炔空气火焰的原子吸收分光光度法测定 Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 的含量。

1.4.3 离子吸收、运移系数 参照 Pitman 等^[22]的方法计算树体各营养器官对矿质离子的选择性吸收、运移系数(S_{X,Na^+}), S_{X,Na^+} =库器官[X/Na⁺]/源器官[X/Na⁺],X 代表 K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺ 的含量, S_{X,Na^+} 值越大,说明源器官(根、枝)抑制 Na⁺、促进 K⁺、Mg²⁺ 或 Ca²⁺ 向库端(枝、叶)运输的能力越强,即库器官的选择吸收或运输能力越强。

1.5 数据处理与分析

实验数据用 Excel 2017 进行预处理,求得加权平均值和标准差,用 Origin 10.0 绘图,用 SPSS 22.0 软件做单因素方差分析、LSD 差异显著性检验和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 大果沙枣各营养器官矿质阳离子积累变化特征

图 1 显示,在大果沙枣树生长过程中,随着树龄

的增大,根部 Na⁺ 含量呈上升趋势,K⁺ 含量则呈波动下降趋势,Mg²⁺ 含量小幅上升、Ca²⁺ 呈上下波动不稳定的变化特征。随树龄的增大,枝部 K⁺ 和 Mg²⁺ 含量先小幅波动降低,随后迅速升高(10 龄林),然后再降低;Ca²⁺ 明显先降低后上升,Na⁺ 含量则是上下波动不稳定。叶部 Na⁺ 和 Ca²⁺ 含量随着树龄的增大而小幅降低,K⁺ 和 Mg²⁺ 则小幅升高。

同时,比较不同龄段大果沙枣树营养器官矿质离子含量(表 2)发现,Na⁺ 在根部的积累量以高龄段(Ⅳ段)最高,且与较低的 3 个龄段差异均显著($P<0.05$),而枝部和叶部 Na⁺ 含量在各树龄段之间差异均不显著($P<0.05$)。Ⅰ—Ⅲ 龄段,各器官 Na⁺ 含量高低顺序均为叶部>根部>枝部,而当树体生长至Ⅳ龄段时,根部 Na⁺ 的积累量达到 377 g/kg,显著高于叶部(1.19 g/kg)和枝部(0.15 g/kg);K⁺ 在根部的积累量随龄段的升高而减少,但各龄段间差异不显著,枝部和叶部的 K⁺ 含量在各树龄段之间差异也不显著,各龄段均表现为叶部明显高于根部、枝部;大果沙枣根部、枝部和叶部的 Mg²⁺ 含量在不同龄段间差异均不显著,4 个龄段各器官的 Mg²⁺ 积累量均表现为叶部>根部>枝部,但各器官间差异相对较小;4 个龄段 Ca²⁺ 积累量在大果沙枣根部、叶部和枝部间的差异均不显著,而同一龄段内,叶部 Ca²⁺ 含量总是显著高于枝部,但枝部与根部 Ca²⁺ 含量差异不明显。另外,大果沙枣在整个生长期,内,K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 在叶部的积累量最高,而 Na⁺ 则在根部的积累量最高。进一步分析可见,树体内 Ca²⁺ 的积累量最高(13.79 g/kg),K⁺ 次之(5.92 g/kg),Na⁺ 最低(1.00 g/kg)。

2.2 大果沙枣各营养器官矿质阳离子含量比变化特征

K⁺/Na⁺、Mg²⁺/Na⁺ 和 Ca²⁺/Na⁺ 能表征植株体内离子平衡遭受盐胁迫破坏的程度,其比值越小,表明 Na⁺ 抑制植株吸收 K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺ 的程度越大,植株受盐害越严重。由图 2 可知,大果沙枣根部 K⁺/Na⁺ 随树龄的增大而显著减小,枝部也有

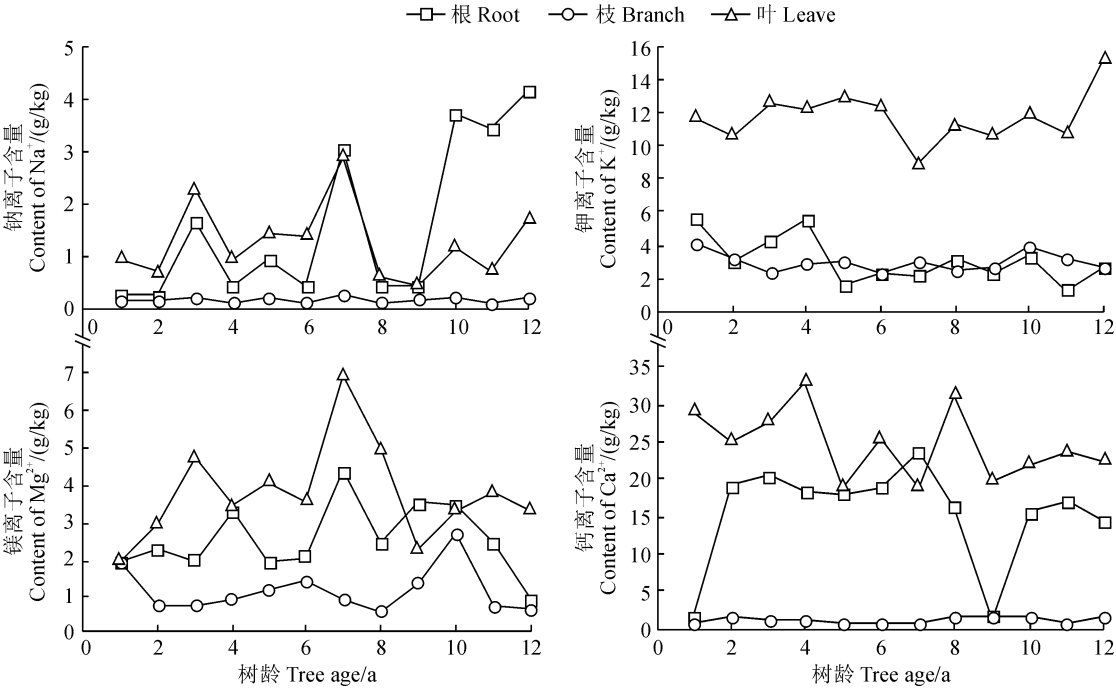


图 1 1~12 龄大果沙枣根、枝、叶部主要矿质阳离子含量的变化

Fig. 1 Changes on the contents of main mineral cations in root, branch and leaf of *E. moorcroftii* with the age from one to twelve

表 2 4 个龄段大果沙枣根、枝和叶部主要矿质阳离子含量

离子 Iron	器官 Organ	林龄段 Age grade				平均 Mean	总平均 Total mean
		I	II	III	IV		
Na ⁺ / (g/kg)	根 Root	0.72aB	0.60bB	1.29aB	3.77aA	1.59	1.00
	枝 Branch	0.17aA	0.12cA	0.17aA	0.15cA	0.15	
	叶 Leaves	1.29aA	1.24aA	1.31aA	1.19bA	1.26	
K ⁺ / (g/kg)	根 Root	4.30bA	3.17bA	2.51bA	2.38bA	3.09	5.92
	枝 Branch	3.18bA	2.68bA	2.73bA	3.28bA	2.97	
	叶 Leaves	11.61aA	12.47aA	10.22aA	12.61aA	11.73	
Mg ²⁺ / (g/kg)	根 Root	2.07abA	2.46bA	3.46abA	2.30abA	2.57	2.52
	枝 Branch	1.21bA	1.21cA	0.98bA	1.39bA	1.20	
	叶 Leaves	3.22aA	3.71aA	4.73aA	3.48aA	3.78	
Ca ²⁺ / (g/kg)	根 Root	1.21cA	0.95bA	1.28bA	1.41cA	1.21	13.79
	枝 Branch	13.74bA	18.33aA	13.76abA	15.70bA	15.38	
	叶 Leaves	27.27aA	25.76aA	23.33aA	22.78aA	24.79	

注: 同列同一离子内不同小写字母表示器官间在 0.05 水平差异显著, 而同行不同大写字母表示不同龄段间在 0.05 水平差异显著; 下同

Note: Different small letters within the same ion content of column mean significant difference among organs at the 0.05 level, while the different capital letters within the same ion content of rows mean significant difference among age grades at the 0.05 level. The same as below

小幅减小, 叶部则表现出相反趋势。根、枝和叶部 Mg^{2+}/Na^{+} 随着树龄的增大分别呈现出缓慢减小、上下波动和缓慢增大的趋势, 而各器官的 Ca^{2+}/Na^{+} 则表现为缓慢减小、缓慢增大和小幅波动的变

化趋势。

同时, 4 个龄段间相关分析表明(表 3), 大果沙枣根部 K^{+}/Na^{+} 和 Mg^{2+}/Na^{+} 均在 IV 龄段达到最大(45.10), 且均显著大于 I—III 龄段($P<0.05$), 而

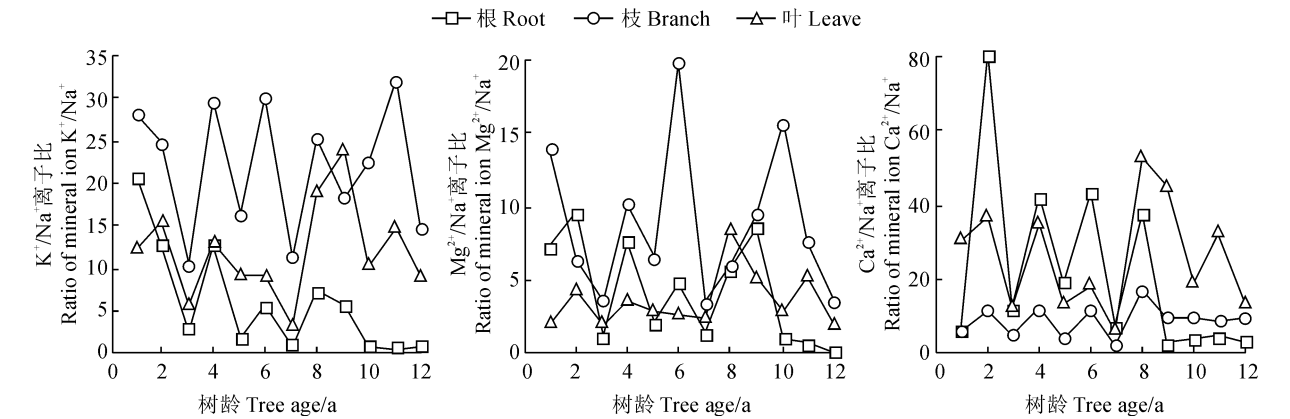


图2 1—12 龄大果沙枣根、枝、叶中矿质离子比的变化

Fig.2 Change on ratios of mineral ions in root, branch and leaf of *E. moorcroftii* with age from one to twelve

表3 4 个龄段大果沙枣根、枝和叶矿质离子比

Table 3 The ratio of mineral ions in root, branch and leaf of *E. moorcroftii* with four age grades

离子比 Ion ratio	器官 Organ	林龄段 Age grade				平均 Mean	总平均 Total mean
		I	II	III	IV		
K ⁺ /Na ⁺	根 Root	11.99aB	9.88aB	5.07aB	45.10aA	18.01	15.36
	枝 Branch	21.15aA	16.71aA	6.74aA	9.84aA	13.61	
	叶 Leaves	11.14bA	6.47aB	12.18aA	28.04aA	14.46	
Mg ²⁺ /Na ⁺	根 Root	2.65aB	4.74aB	8.84aB	29.70aA	11.48	12.25
	枝 Branch	19.31aA	17.23aA	4.67bA	10.61bA	12.95	
	叶 Leaves	7.06aA	8.18aA	8.06bA	25.99aA	12.32	
Ca ²⁺ /Na ⁺	根 Root	2.29aA	3.39aA	1.24aA	4.22aA	2.79	10.51
	枝 Branch	24.24aA	13.31aB	7.15aB	9.16aB	13.46	
	叶 Leaves	16.34aA	5.68aA	17.38aA	21.71aA	15.28	

枝部、叶部的 K^+/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 在 4 个龄段间的差异均不显著;根部和叶部的 Ca^{2+}/Na^+ 在 4 个龄段间差异不显著,但枝部 Ca^{2+}/Na^+ 以 I 龄段的最大,且显著高于 II—IV 龄段。在树体生长早期(I—II 龄段), K^+/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 均在枝部最大,而到了生长后期(IV 龄段), K^+/Na^+ 和 Mg^{2+}/Na^+ 则转变为根部最大,而 Ca^{2+}/Na^+ 则是叶部最大。另外,大果沙枣在整个生长期, K^+/Na^+ 、 Mg^{2+}/Na^+ 和 Ca^{2+}/Na^+ 最大的器官分别为根部、枝部和叶部,比值分别为 18.01、12.95 和 15.28;树体内各矿质离子比以 K^+/Na^+ 最大, Mg^{2+}/Na^+ 次之, Ca^{2+}/Na^+ 最小,比值分别为 15.36、12.25 和 10.51。

2.3 大果沙枣各营养器官矿质阳离子转移运输变化特征

随着大果沙枣树龄的增大, K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 从根向枝的选择运移系数值(S_{K^+,Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+} 、

S_{Ca^{2+},Na^+})呈近直线上升趋势,从枝向叶的选择运移系数值也随树龄缓慢增大, K^+ 和 Mg^{2+} 从根向叶的运输能力也随树龄的增大直线上升(图 3)。其中,树体内矿质离子从根向枝方向的运移系数表现为 $S_{K^+,Na^+} > S_{Mg^{2+},Na^+} > S_{Ca^{2+},Na^+}$,从枝向叶则是 $S_{Ca^{2+},Na^+} > S_{Mg^{2+},Na^+} > S_{K^+,Na^+}$,而从根向叶则为 $S_{K^+,Na^+} > S_{Ca^{2+},Na^+} > S_{Mg^{2+},Na^+}$ 。就单个离子而言, K^+ 、 Mg^{2+} 的运移系数以从根向枝的最大,其次是从根向叶,而从枝向叶的最小; Ca^{2+} 的运移系数则是从根向叶最大,从根到枝的最小。进一步分析 4 个龄段间的变化可知,树体生长至 IV 龄段(10—12 龄)时, K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 从根到枝、从根到叶的选择运移系数均较大幅度增大,但三者从枝向叶的运移系数在各龄段树体内均无明显变化。

2.4 大果沙枣树体对土壤矿质离子的选择吸收特征

随着树龄的增大,大果沙枣树体中 K^+ 和 Mg^{2+}

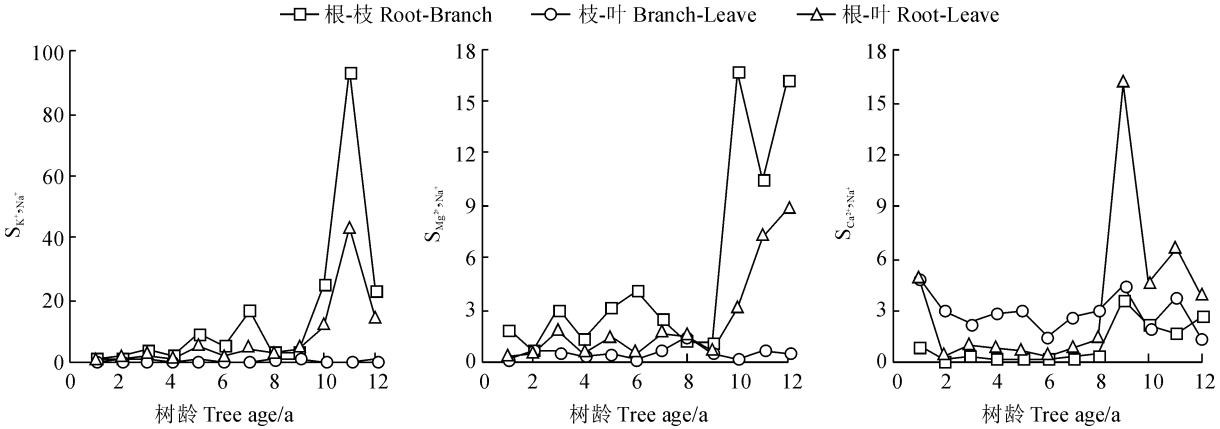


图3 1—12 龄大果沙枣根、枝和叶部矿质离子运移系数的变化

Fig. 3 Transport coefficients of mineral ions in root, branch and leaf of *E. moorcroftii* with age from one to twelve

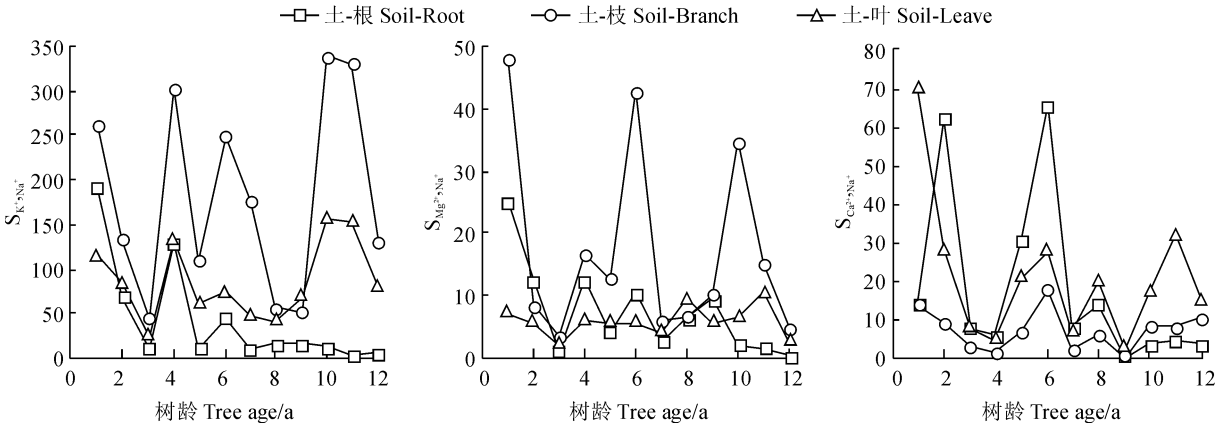


图4 土壤中矿质离子到根、枝和叶的运移系数随树龄的变化

Fig. 4 Transport coefficients of mineral ions from soil to different organs of *E. moorcroftii* with tree age increasing

从土壤到根部的选择运移系数(S_{K^+,Na^+} 、 S_{Mg^{2+},Na^+})均呈下降趋势, Ca^{2+} 从土壤到根部的选择运移系数(S_{Ca^{2+},Na^+})缓慢降低, K^+ 从土壤到枝和叶部的选择性运输能力则呈缓慢上升趋势(图4)。土壤中3种矿质离子向大果沙枣根、枝和叶部运移过程中, K^+ 的选择性运输能力明显高于 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 。同时,4个龄段大果沙枣根、枝和叶对土壤中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的选择性吸收能力差异不明显。

2.5 大果沙枣树体及土壤中矿质阳离子含量的相关性分析

大果沙枣树体与土壤中矿质离子含量的相关性分析结果(表4)显示,土壤中的 Na^+ 含量与根部 Na^+ 含量呈极显著正相关(0.687**)、与叶部 K^+ 呈显著正相关(0.605*);土壤中的 K^+ 与根部的 Na^+ 、叶部的 K^+ 含量分别存在显著(0.544*)和极显著(0.676**)正相关关系,与根部 Mg^{2+} 有显著负相关性(-0.499*);土壤中的 Mg^{2+} 与根部的 Na^+

(0.632*)、叶部 K^+ (0.627*)均呈显著正相关;土壤中的 Ca^{2+} 与根、枝和叶部的 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关性均不显著($P>0.05$)。同时,大果沙枣根部 K^+ 与叶部 Ca^{2+} 、根部 Ca^{2+} 与叶部 Mg^{2+} 、枝部 Na^+ 与叶部 Na^+ 、枝部 K^+ 与 Mg^{2+} 、叶部 Na^+ 与 Mg^{2+} 均有极显著正相关关系($P<0.01$);枝部 Na^+ 与叶部 Mg^{2+} 显著正相关(0.508*);而根部 Mg^{2+} 与叶部 K^+ ,以及枝部 Na^+ 与叶部 Ca^{2+} 存在极显著负相关关系($P<0.01$)。

3 讨论与结论

López等^[23]认为非盐生植物耐盐性的关键在于根系限制 Na^+ 的吸收以及维持叶片低 Na^+ 水平。 Na^+ 和 K^+ 的离子半径和水合能相似,二者会竞争转运体的统一结合位^[24],因而 Na^+ 会限制 K^+ 进入大果沙枣树体内, Na^+ 和 K^+ 竞争的结果,致使 Na^+ 聚集在根部,而 K^+ 则通过选择性运输主要聚集到

表 4 土壤及大果沙枣树体营养器官中矿质离子含量的相关系数
Table 4 Correlation coefficients of mineral ions among soil and different organs of *E. moorcroftii*

部位 Position	离子 Ions	土壤 Soil			根 Root			枝 Branch			叶 Leaf	
		Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺
土壤 Soil	Na ⁺	1.000										
	K ⁺	0.964 ^{**}										
	Mg ²⁺	0.986 ^{**}	0.985 ^{**}									
	Ca ²⁺	0.373	0.413	0.406								
根 Root	Na ⁺	0.687 ^{**}	0.544 [*]	0.632 [*]	0.046							
	K ⁺	-0.117	-0.131	-0.132	0.211	-0.375						
	Mg ²⁺	-0.377	-0.499 [*]	-0.415	0.226	0.028	-0.044					
	Ca ²⁺	0.023	-0.087	0.037	-0.273	0.285	-0.261	0.083				
枝 Branch	Na ⁺	0.222	0.129	0.225	-0.124	0.466	-0.085	0.221	0.208			
	K ⁺	0.041	-0.102	-0.085	-0.14	0.216	0.258	0.200	-0.345	0.117		
	Mg ²⁺	-0.123	-0.236	-0.236	-0.09	0.056	0.243	0.264	-0.405	0.034	0.673 ^{**}	
	Ca ²⁺	0.259	0.369	0.332	0.301	0.088	0.142	-0.175	-0.209	-0.141	-0.065	0.018
叶 Leaves	Na ⁺	0.269	0.137	0.260	-0.202	0.44	-0.079	0.112	0.549 [*]	0.799 ^{**}	-0.175	-0.127
	K ⁺	0.605 [*]	0.676 ^{**}	0.627 [*]	0.212	0.188	0.174	-0.772 ^{**}	-0.05	-0.08	-0.189	-0.019
	Mg ²⁺	-0.045	-0.138	-0.029	-0.285	0.305	-0.313	0.361	0.745 ^{**}	0.508 [*]	-0.340	-0.408
	Ca ²⁺	-0.219	-0.174	-0.202	0.092	-0.450	0.755 ^{**}	-0.198	-0.020	-0.533 [*]	-0.100	-0.160
											0.185	-0.320
												0.143
												-0.167

注: * 和 * * 分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)
Note: * and * * mean correlation is significant at 0.05 level ($P<0.05$) and 0.01 level ($P<0.01$), respectively

叶部,这与大果沙枣根和枝的补偿作用以及叶对 K^+ 的选择性吸收能力较强有关,也与陈少良^[25]对杨树以及王树凤等^[26]对弗吉尼亚栎的研究结论基本一致。本研究发现,随着树龄的增大,大果沙枣根部 Na^+ 积累量逐渐升高,叶部 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 含量也同时升高,说明在长期生长过程中大果沙枣树可利用阳离子作为无机渗透调节物来增大地上部分和根部的渗透势差,促进水分的吸收和向上运输。由此可见,尽管盐胁迫抑制了大果沙枣根对 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的吸收,但同时也增强了叶部对 K^+ 和 Mg^{2+} 的选择吸收以及根和茎的补偿作用,使得叶中 K^+ 和 Mg^{2+} 的含量能维持相对稳定,这对于维持叶片正常的生理功能具有重要意义。

土壤是植物体矿质元素的主要来源,土壤矿物质组成与含量影响植物地上部的矿质吸收、运输和积累特征^[27],但由于植物具有根据其自身生长需求进行选择吸收的特性,所以土壤的矿质离子特征又不能完全决定植物体矿质成分特征^[28]。盐渍化土壤中由于大量 Na^+ 的存在,与树体对矿质营养元素的吸收产生竞争,因此常用矿质营养离子与盐离子的比值作为植物耐盐性的主要评价指标^[29]。本研究结果显示,随着树龄的增大,大果沙枣枝和叶部 K^+ 积累量明显增大的同时, Na^+ 增量并不明显,由此维持细胞质中高的 K^+/Na^+ 是大果沙枣树抗盐的关键^[30]。本研究结果也表明,大果沙枣生长过程中,根部固定 Na^+ 的能力逐渐增强的同时,向地上

部分输送 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的能力未受到明显抑制,矿质营养离子的上移和对 Na^+ 的抑制能力反而增强。因此可推断,叶部 Mg^{2+}/Na^+ 、 Ca^{2+}/Na^+ 比值的下降主要是由于 Na^+ 含量的净增加,而 K^+/Na^+ 比值的增大主要是组织器官离子选择吸收和离子平衡调节的结果。

在盐胁迫环境下,维持和重建植物体细胞内的离子平衡,是细胞结构与功能正常运行的重要保证。高等植物耐盐的重要方式之一,是通过调节无机离子的种类、数量和比例来维持细胞内微环境的稳定^[31],抵御盐渍伤害^[32-33]。大果沙枣树体的根、枝和叶各营养器官通过对不同矿质离子的选择性吸收和适应性分配来调节无机离子渗透,从而降低盐胁迫土壤生境对树体的伤害和维持营养平衡。另外,在大果沙枣整个生长发育过程中,不同树龄间矿质营养离子与盐离子的比值差异不大,说明大果沙枣树体始终能够通过控制盐离子的吸收,维持相对稳定的离子比值,来保持相对较好的营养状况,这可能也是大果沙枣树从幼年到成年均可在盐渍土壤中正常生长的主要原因之一。大果沙枣树整个生长发育过程对盐胁迫均具有很强的耐受性,其耐盐性与根对盐胁迫的适应性密切相关,根的适应性主要体现为促进矿质营养元素向地上部运输,保证地上部的正常生长。因此,地上部营养器官特别是叶对 K^+ 、 Mg^{2+} 的选择性吸收能力,可作为评价大果沙枣耐盐性的重要指标。

参考文献:

[1] 林栖凤. 耐盐植物研究[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 34

[2] BOWLER C, SLOOTEN L, VANDENBRANDEN S, *et al.* Manganese superoxide dismutase can reduce cellular damage mediated by oxygen radicals in transgenic plants[J]. *The EMBO Journal*, 1991, **10**(7): 1 723-1 732.

[3] 赵福庚, 孙 诚, 刘友良. 盐胁迫激活大麦幼苗脯氨酸合成的鸟氨酸途径[J]. 植物学报, 2001, **43**(1): 36-40.
ZHAO F G, SUN C, LIU Y L. Ornithine pathway in proline biosynthesis activated by salt stress in barley seedlings[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **43**(1): 36-40.

[4] 舒卫国, 陈受宜. 植物在渗透胁迫下的基因表达及信号传递[J]. 生物工程进展, 2000, **20**(3): 3-7.
SHU W G, CHEN S Y. Gene expression and signal transduction in plants under osmotic stress[J]. *Progress in Biotechnology*, 2000, **20**(3): 3-7.

[5] THOMSON W W, FARADAY C D, OROSS W, *et al.* Solute Transport in Plant Cell and Tissues[M]. London: Longman Scientific and Technical, 1988: 498-537.

[6] 商宏艳. 盐离子在海滨木槵体内运输与分配机制研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2010.

[7] 张龙德. 新疆地区盐碱地的成因及治理措施[J]. 黑龙江水利科技, 2012, **40**(8): 193-194.
ZHANG L D. Causes of formation and control measures of saline-alkali land in Xinjiang[J]. *Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy*, 2012, **40**(8): 193-194.

[8] MARSCHNER H. Mineral Nutrition and Yield Response [M]//Mineral Nutrition of Higher Plants. Amsterdam: Elsevier, 1995: 184-200.

[9] HIRSCHI K D. The calcium conundrum. Both versatile nutrient and specific signal[J]. *Plant Physiology*, 2004, **136**(1): 2 438-2 442.

[10] LOUPASSAKI M H, CHARTZOULAKIS K S, DIGALAKI N B, *et al.* Effects of salt stress on concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sodium in leaves, shoots, and roots of six olive cultivars[J].

- Journal of Plant Nutrition*, 2002, **25**(11): 2 457-2 482.
- [11] FAGERIA V D. Nutrient interactions in crop plants[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2001, **24**(8): 1 269-1 290.
- [12] CASTILLO E G, TUONG T P, ISMAIL A, *et al.* Response to salinity in rice: Comparative effects of osmotic and ionic stresses [J]. *Plant Production Science*, 2007, **10**(2): 159-170.
- [13] TEAKLE N L, REAL D, COLMER T D. 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.
- [14] 周建明. 新疆的沙枣资源[J]. 生物学杂志, 1991, **8**(3): 19-20.
ZHOU J M. *Elaeagnus angustifolia* resources of Xinjiang [J]. *Journal of Biology*, 1991, **8**(3): 19-20.
- [15] 齐曼·尤努斯, 李秀霞, 李 阳, 等. 盐胁迫对大果沙枣膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 干旱区研究, 2005, **22**(4): 503-507.
QIMAN YUNUS, LI X X, LI Y, *et al.* Effects of salt stress on membrane lipid peroxidation and protective enzymes in leaves of *Elaeagnus angustifolia* L[J]. *Arid Zone Research*, 2005, **22**(4): 503-507.
- [16] 王利军, 马履一, 王 爽, 等. 水盐胁迫对沙枣幼苗叶绿素荧光参数和色素含量的影响[J]. 西北农业学报, 2010, **19**(12): 122-127.
WANG L J, MA L Y, WANG S, *et al.* Effects of water and salt stress on chlorophyll fluorescence parameters and pigment contents of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2010, **19**(12): 122-127.
- [17] 张桂霞, 李树玲. 盐胁迫对两种沙枣抗氧化酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2011, (10): 46-49.
ZHANG G X, LI S L. Effects of salt stress on activities of antioxidant enzymes of two kinds of *Elaeagnus angustifolia* L. seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2011, (10): 46-49.
- [18] 张晓勉, 王 泳, 高智慧, 等. 盐胁迫对尖果沙枣和大果沙枣膜脂过氧化和渗透调节的影响[J]. 浙江林业科技, 2012, **32**(4): 1-5.
ZHANG X M, WANG Y, GAO Z H, *et al.* Effect of salt stress on membrane lipid peroxidation and osmotic adjustment in *Elaeagnus oxycarpa* and *E. moorcroftii*[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2012, **32**(4): 1-5.
- [19] 刘 艳. 不同种源地沙枣种子萌发及幼苗耐盐性研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
- [20] 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.
LIU Z X, ZHANG H X, YANG X Y, *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.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] PITMAN M G. Transport Across the Root and Shoot Root Interaction [M]//STAPLES R C, TOENNISSON G A. Salinity Tolerance in Plants. Milton: Wiley. 1984.
- [23] LÓPEZ-AGUILAR R, ORDUNO-CRUZ A, LUCERO-ARCE A, *et al.* Response to salinity of three grain legumes for potential cultivation in arid areas[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2003, **49**(3): 329-336.
- [24] BLUMWALD E. Sodium transport and salt tolerance in plants [J]. *Current Opinion in Cell Biology*, 2000, **12**(4): 431-434.
- [25] 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**(Z1): 88-92.
CHEN S L, LI J K, YIN W L, *et al.* Tissue and cellular K⁺, Ca²⁺ and Mg²⁺ of poplar under saline salt stress conditions[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2002, **24**(Z1): 88-92.
- [26] 王树凤, 胡韵雪, 李志兰, 等. 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[J]. 生态学报, 2010, **30**(17): 4 609-4 616.
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): 4 609-4 616.
- [27] SUN J B, GAO Y G, ZANG P, *et al.* Mineral elements in root of wild *Saposhnikovia divaricata* and its rhizosphere soil [J]. *Biological Trace Element Research*, 2013, **153**(1/3): 363-370.
- [28] 张 科, 田长彦, 李春俭. 盐土和沙土对新疆常见一年生盐生植物生长和体内矿质组成的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(10): 3 069-3 076.
ZHANG K, TIAN C Y, LI C J. Influence of saline soil and sandy soil on growth and mineral constituents of common annual halophytes in Xinjiang [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, **32**(10): 3 069-3 076.
- [29] GRATAN S R, GRIEVE C M. Mineral element acquisition and growth response of plants grown in saline environments [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, **38**(4): 275-300.
- [30] ZHU J K. Regulation of ion homeostasis under salt stress [J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2003, **6**(5): 441-445.
- [31] 赵可夫, 李法曾. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 42-74.
- [32] ZHU J K. Plant salt tolerance[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, **6**(2): 66-71.
- [33] BRESSAN R A, BOHNERT H J, HASEGAWA P M. Genetic engineering for salinity stress tolerance[J]. *Advances in Plant Biochemistry and Molecular Biology*, 2008, **1**: 347-384.

(编辑:裴阿卫)