

DOI: 10.5846/stxb201504230839

张立华, 陈沛海, 李健, 陈小兵, 冯亚. 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布. 生态学报, 2016, 36(18): - .

Zhang L H, Chen P H, Li J, Chen X B, Feng Y. Distribution of soil salt ions around *Tamarix chinensis* individuals in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布

张立华^{1,*}, 陈沛海², 李 健², 陈小兵¹, 冯 亚³

1 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

2 烟台大学化学化工学院, 烟台 264005

3 烟台大学环境与材料工程学院, 烟台 264005

摘要:为探讨柽柳的盐分富集效应及其对不同盐分离子分布的影响,以黄河三角洲盐碱地柽柳为研究对象,分析了离植株不同距离不同土层中的盐分离子组成、含量、离子比及不同离子之间的相关性。研究结果表明:各土层阳离子中 Na^+ 含量最高,其次是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , K^+ 最低, Cl^- 在阴离子中的含量最高, SO_4^{2-} 次之, HCO_3^- 最低,而未检测到 CO_3^{2-} 。在柽柳植株周围,尤其是表层土壤中,离植株越近盐分含量越高,显示出柽柳对盐分的富集效应,其中对不同阳离子的富集程度表现为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$,而对阴离子的富集程度表现为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。冠层下凋落物中盐分的释放和树干径流可能是导致盐分在柽柳植株周围水平方向上存在差异的主要原因。土壤总可溶性盐含量随着土层的加深而升高。阳离子和阴离子向下迁移程度分别表现为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 和 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \approx \text{HCO}_3^-$,因而随土层加深而升高的 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- ,显示出底聚特征,而 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 含量则随着土层的加深而降低,具有表聚特征。降水淋溶、盐分离子迁移速率的差别和各土层中不同生物量根系对盐分吸收的差异可能是造成盐分在垂直方向上含量变化的主要因素。

关键词:黄河三角洲;盐碱地;柽柳;盐岛;盐分离子

Distribution of soil salt ions around *Tamarix chinensis* individuals in the Yellow River Delta

ZHANG Lihua^{1,*}, CHEN Peihai², LI Jian², CHEN Xiaobing¹, FENG Ya³

1 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences; Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

2 College of Chemistry and Chemical Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China

3 School of Environment and Materials Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China

Abstract: Spatial heterogeneity is considered a ubiquitous feature of natural ecosystems. A typical example of spatial heterogeneity in ecosystems is the formation of salt islands, which form around small shrubs and are important local and regional salt reserves that influence community structure and ecosystem function. These salt islands are formed where salts accumulate under the shrub canopy. Soil salinity has been shown to vary significantly between areas covered by shrub canopies and interspaces. To quantify the effect of halophyte plants on the salinity characteristics of salt islands in saline and alkaline soil, the native *Tamarix chinensis* of the Yellow River Delta (YRD) was selected as a study species, and its soil salt ion composition and content were analyzed. Differences in the cation and anion contents and ratios among distances and

基金项目:国家自然科学基金项目(41201293);海洋公益性行业科研专项(201105020)

收稿日期:2015-04-23; **网络出版日期:**2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhzhang@yic.ac.cn

horizons were analyzed using an analysis of variance and multiple comparisons. A correlation analysis was also conducted, to determine the relationships among different salt ions. The results show that salt islands are mainly distributed in the surface soil. Both the cations and the anions were present in higher concentrations near *T. chinensis* individuals. Of the cations, Na^+ was found in the highest levels of the profile, followed by Ca^{2+} and Mg^{2+} in the lower layers, and K^+ in the deepest part of the profile. Anions in all soil depths both showed $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, but CO_3^{2-} was not detected. The distance from the center of the shrub to the sampling point had a significant effect on most salt ions and their ratios, with the exception of Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, and $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$. The soil depth had a significant effect on almost all of ions and ratios, with the exception of the Na^+/K^+ ratio. The interaction between distance and depth only had a significant effect on Cl^- and HCO_3^- . Na^+/K^+ , $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$, $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$, and $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ increased in the 0—20 cm layer, while the $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ and $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ ratios decreased along the gradient between the canopied area and the interspace. Therefore, the cations enrichment due to the proximity of a *T. chinensis* individual was as follows: $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. However, anions enrichment was determined to occur as follows: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ as $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ decreased and $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ and $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ increased in the 20—40 cm soil layer, along the gradient from the shrub center to the interspace. The total soluble salt content of the soil increased with depth. However, K^+ , SO_4^{2-} , and HCO_3^- concentration decreased with soil depth, indicating the presence of significant surface accumulation. The Na^+/K^+ , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$, $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$, $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, and $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ ratios increased and $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ decreased significantly with increased depth; however, $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ didn't change significantly with depth. Consequently, the downward migration of cations and anions was ranked as follows: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, and $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \approx \text{HCO}_3^-$, respectively. The relationships among different salt ions were significant, but no significant correlation was found between SO_4^{2-} and Na^+ or between SO_4^{2-} and Ca^{2+} concentration. In conclusion, the root biomass and distribution, the climatic conditions (e.g., evaporation and precipitation), the rate of salt ion migration, and the sampling time may influence the detected distribution of cations and anions in the soil. The findings of this study may serve as a reference for the elucidation of the salinization-alkalization processes at work in coastal saline soil, and in the amelioration of the soil in the Yellow River Delta.

Key Words: the Yellow River Delta; saline-alkali land; *Tamarix chinensis*; salt island; salt ions

土壤空间异质性被认为是自然生态系统的一个普遍特征^[1-4],尤其是在以乔灌木为主导的荒漠生态系统中^[5]。有研究表明^[6-7],由于生物积盐的作用,盐生灌木可以在其植丛下形成“盐岛”^[8],而“盐岛”效应则是荒漠生态系统土壤空间异质性的一个典型现象^[9]。虽然“盐岛”是土壤小尺度空间异质性的表现,但对生态系统大尺度植被格局具有重要影响^[10]。尹传华等^[11]对塔里木盆地北缘盐化草甸生境和灌丛生境盐生灌木的研究表明,多枝怪柳(*Tamarix ramosissima*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)和盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)均有不同程度的“盐岛”效应,且三者产生的盐岛效应增强了土壤表层的积盐速率。Stock 等^[12]和 Dong 等^[13]的研究显示,树冠下土壤电导率高于树冠边缘及外围空地。但也有相反的结论,即土壤在树干中心形成了低盐的环境^[14]。另外,也不乏树冠下土壤 pH 值和电导率与树冠外围土壤并无差异的报道^[15]。由于不同地区的生物组成、气候特点和成土母质不同,致使土壤盐渍化成因存在差异,进而导致土壤总体盐分状况、盐分离子组成及离子之间的相关性不同^[16-17]。这可能是造成不同研究结果存在差异的主要原因之一。

怪柳(*Tamarix chinensis*)属怪柳科植物,多为灌木,是典型的泌盐植物,具有很高的耐盐能力,喜光,耐潮湿,耐瘠薄,能防风固沙、保持水土、调节气候,维护陆海生态平衡,且能显著改良土壤理化性质。作为关键的木本植物建群物种,在黄河三角洲滨海沿岸盐碱地及内陆低洼盐渍区构成大面积天然林带,形成了黄河三角洲最大的灌木群落和山东最大的天然灌丛^[18]。其生存发育在极大程度上影响着该区域植物群落的结构和组成,同时影响土壤盐分的变化过程。目前针对植株对土壤盐分分布格局的影响和作用机制的研究主要集中在内陆干旱区,而滨海盐渍化地区植株对周围土壤盐分影响的研究还鲜见报道。张立华和陈小兵^[19]对黄河三

角洲怪柳植株影响下不同土层电导率进行了研究,结果表明,在 0—20 cm 土层中,土壤电导率随着离植株距离的增加而降低,表现出明显的“盐岛”效应,而该效应在其他土层中不显著,但该研究没有涉及“盐岛”效应影响下不同盐分离子的分布特征。由于不同盐离子在土壤中的运移规律存在差异,植株周围存在“盐岛”效应与否是否与土壤中盐分离子的组成和类型有关?基于此,本文对黄河三角洲盐碱地怪柳植株周围不同距离范围内不同土层中的盐离子组成、含量、离子比及不同离子之间的相关性进行了研究,旨在进一步揭示怪柳对贫瘠盐碱地生境空间异质性的影响及其适应机制,并为黄河三角洲盐碱地的植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

黄河三角洲位于渤海湾畔,土地总面积约 12000 余平方公里,是我国三大河口三角洲之一,也是世界上增长速度最快和尚未得到大规模开发的最大三角洲之一^[20]。黄河三角洲作为我国最年轻的河口湿地,有中国暖温带最广阔、最完整的河口新生湿地生态系统,具有原始的生态系统特征,是河口生态演替研究的重要地点。该区自然资源丰富,但由于形成时间较晚,是海陆交互作用形成的退海之地,土壤肥力低,加之气候干旱,地下水矿化度高,极易引起土壤盐渍化。该区域属于温带半湿润大陆性季风气候,年均气温 11.7—12.8 °C,年均蒸发量和降水量分别为 1900—2400 mm 和 530—630 mm,70% 的降水分布在夏季^[21]。土壤以滨海潮土和滨海盐土为主。该区域分布的主要植被有怪柳 (*T. chinensis*)、芦苇 (*Phragmites australis*)、翅碱蓬 (*Suaeda salsa*)、獐茅 (*Aeluropus littoralis* var. *sinensis*)、狗牙根 (*Cynodon dactylon*) 和香蒲 (*Typha angustifolia*) 等^[22]。研究样地设在中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站 (37°45'50" N, 118°59'24" E),样地内以怪柳和芦苇为主。

1.2 样品采集

为确定盐碱地怪柳个体周围土壤养分和盐分的空间分布,2013 年 8 月在样地内随机选取长势基本一致的怪柳 (*T. chinensis*) 5 株,基径、株高和冠幅分别为 8 cm、2 m 和 3 m×3 m 左右。在怪柳主干周围半径 3 m 内,按东、南、西、北四个方向用土钻在分别距主干 0.5 m、1.0 m、1.5 m 和 2.0 m 四个点位取样(图 1),每个点位取 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm 和 80—100 cm 五个土层,每株采集土壤样品 80 个。土样装入自封袋带回实验室经自然风干后去除植物残体和石块,取部分风干土样过 18 目孔筛装袋备用。

1.3 分析方法

采用 5:1 的水土比对土壤进行浸提,振荡 5 分钟后,以 5000 r min⁻¹ 的转速离心 5 分钟,上清液经 0.45 μm 针头过滤器过滤后用于测定土壤可溶性盐离子组成。其中 CO₃²⁻ 和 HCO₃⁻ 采用双指示剂滴定法^[23],K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 利用离子色谱仪(美国戴安有限公司, Dionex ICS3000)进行测定。

1.4 统计分析

测得的数据应用 Excel 2013 软件统计、采用 SPSS 15.0 for Windows 在单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 的基础上,利用多重比较的方法 (S-N-K) 对离怪柳主干不同距离和不同土层间土壤盐离子含量和离子比的差异;以距离和深度两个因素分别对以上指标的影响进行单变量多因素方差分析 (univariate

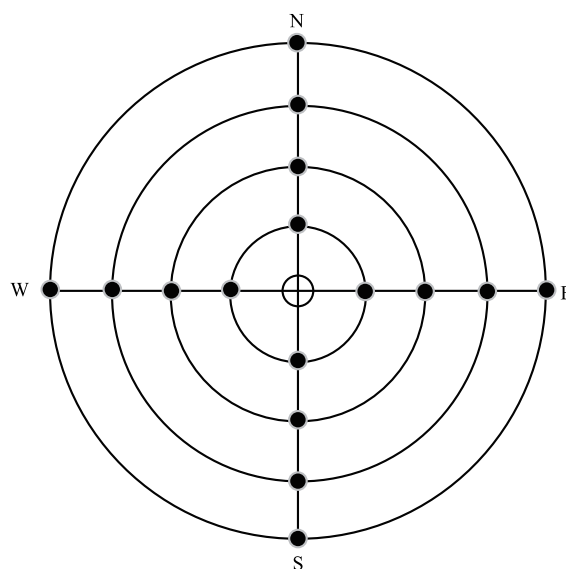


图 1 怪柳个体周围土壤采样点

Fig.1 Sampling points at the individual of *T. chinensis*.

analysis of variance) 和 Tukey HSD 多重比较;采用 SPSS 15.0 for Windows 进行相关分析(包括线性相关分析和偏相关分析)。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分离子的变化

如图 2 所示,在离怪柳植株不同距离的 4 个点上,各土层中的阳离子中,以 Na^+ 含量最高,其次是 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , K^+ 含量最低;阴离子中以 Cl^- 含量最高,其次是 SO_4^{2-} , HCO_3^- 含量最低,而未检测到 CO_3^{2-} 。离怪柳植株距离越远, K^+ 含量越低, Na^+ 含量也呈降低的趋势,尤其在 0—40 cm 的土层中,在 0—80 cm 的土层中, Cl^- 在距怪柳植株 2 m 处的含量显著低于其他位置,在 0—20 cm 的土层中, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 在 0.5 m 处的含量则显著高于其他位置,而 0.5 m 处的 HCO_3^- 含量则在各土层中均高于其他位置。阳离子和阴离子总量在离植株最远处最低,尤其在 0—20 cm 的土层中,均表现为 0.5 m > 1.0 m > 1.5 m > 2.0 m。在 7 种离子中, Na^+ 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 随着土壤深度的增加而升高,而 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 降低, Ca^{2+} 则随土层变化没有明显的变化趋势。

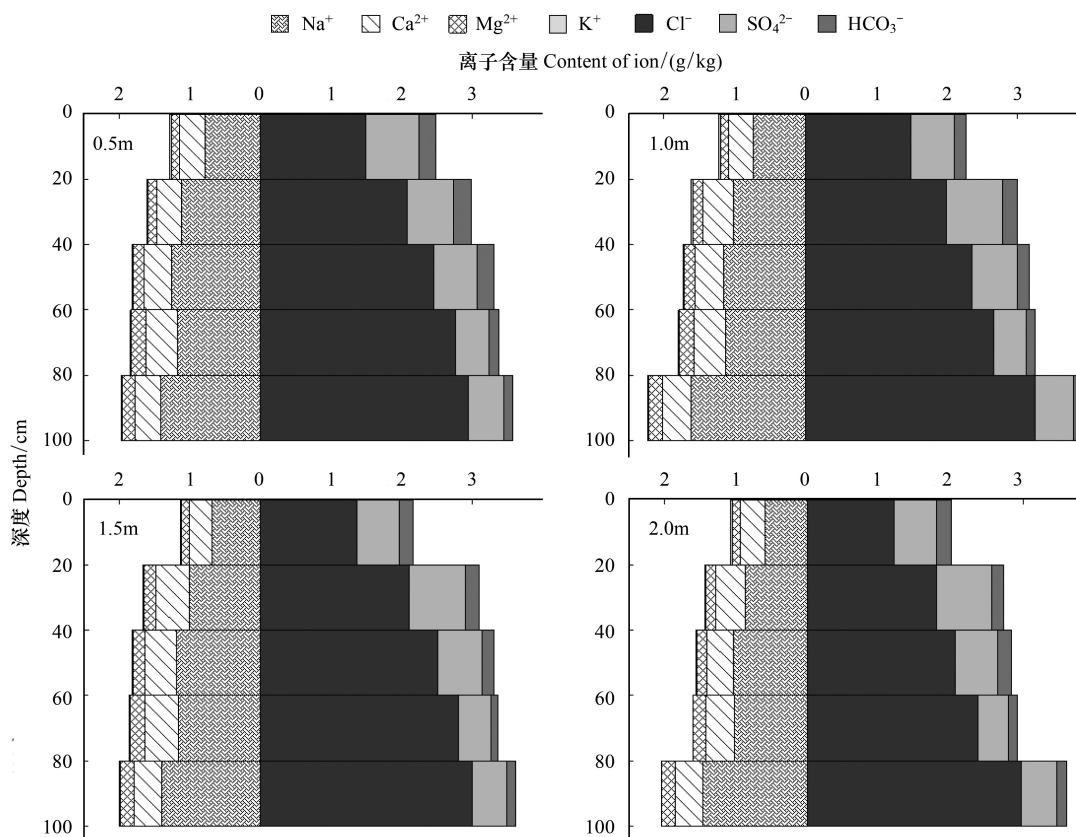


图 2 怪柳个体周围不同土层盐分离子的含量

Fig.2 Salt ions contents of different depth around the individual of *T. chinensis*

多因素方差分析(表 1)和偏相关分析的结果显示(表 2),距离对 K^+ 、 Na^+ 、 Cl^- 和 HCO_3^- 的含量具有显著影响,且离怪柳植株越近含量越高,尽管距离对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 的影响没有达到显著水平,但三者距离怪柳植株 0.5 m 处 0—20 cm 土层中的含量高于其他位点,尤其是 SO_4^{2-} ,表现出怪柳对这些盐离子明显的富集效应;而深度对 7 种离子的影响均达到显著水平,其中, K^+ 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 随着土层的加深而降低,其他 4 种离子显著升高;但距离和深度的交互效应仅对 HCO_3^- 具有显著影响。

表 1 距离和深度及其交互效应对土壤盐离子及其比值的方差分析

Table 1 Analysis of variance for effects of distance and depth on soil salt ions and their ratios

因素 Factors	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺ /K ⁺
距离 Distance	* * *	* * *	0.260	0.119	* *	0.845	* * *	*
深度 Depth	* * *	* * *	* *	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *
距离 * 深度 Distance * Depth	0.699	0.157	0.962	0.893	0.788	0.710	* *	0.059
因素 Factors	Na ⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺ /Mg ²⁺	Ca ²⁺ /K ⁺	Mg ²⁺ /K ⁺	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ /HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻ /HCO ₃ ⁻
距离 Distance	0.073	*	* *	* *	0.301	0.231	* * *	*
深度 Depth	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	* * *	0.139
距离 * 深度 Distance * Depth	0.622	0.380	0.656	0.540	0.954	0.805	*	0.080

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

表 2 土壤盐离子及其比值与距离和深度的偏相关关系

Table 2 Partial correlation coefficient of soil salt ions and their ratios with distance and depth

因素 Factors	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺ /K ⁺
距离 Distance	-0.396(0.002)	-0.419(0.001)	0.037(0.784)	0.013(0.925)	-0.356(0.006)	-0.085(0.524)	-0.419(0.001)	0.314(0.016)
深度 Depth	-0.826(0.000)	0.877(0.000)	0.365(0.005)	0.788(0.000)	0.926(0.000)	-0.568(0.000)	-0.744(0.000)	0.908(0.000)
因素 Factors	Na ⁺ /Ca ²⁺	Na ⁺ /Mg ²⁺	Ca ²⁺ /K ⁺	Mg ²⁺ /K ⁺	Ca ²⁺ /Mg ²⁺	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻	Cl ⁻ /HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻ /HCO ₃ ⁻
距离 Distance	-0.277(0.035)	-0.285(0.030)	0.380(0.003)	0.366(0.005)	0.075(0.574)	-0.136(0.307)	0.126(0.347)	0.228(0.085)
深度 Depth	0.663(0.000)	-0.12(0.927)	0.782(0.000)	0.853(0.000)	-0.939(0.000)	0.939(0.000)	0.881(0.000)	0.221(0.096)

括号内为 P 值

2.2 土壤盐离子比值的变化

土壤阳离子之间的比值如图 3 所示,随着离植株距离的增加 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 降低,而 Na^+/K^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 均升高,因而柽柳对不同阳离子的富集程度表现为 $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ 。 Na^+/K^+ 随着土层的加深而升高; $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 的变化趋势相似,在 0—60 cm 的土层中升高,在 60—80 cm 土层中显著降低,之后又呈升高趋势; $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ 具有相似的变化趋势,均在 0—80 cm 土层中逐渐升高,而在最底层的 80—100 cm 处降低; $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 则呈逐渐降低的趋势,因而不同阳离子向下迁移的程度表现为 $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ 。总体而言,除 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 外,距离对其他阳离子比值具有显著影响(表 1),深度则对所有阳离子比值的影响均达到显著水平,相反,距离与深度的交互效应对所有阳离子比值的影响均不显著。偏相关分析的结果则显示(表 2),随着离植株距离的增加, Na^+/K^+ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ 显著升高, $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ 显著降低;深度与 Na^+/K^+ 、 $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{K}^+$ 与 $\text{Mg}^{2+}/\text{K}^+$ 呈显著正相关关系,即 4 个指标随土层的加深而升高,而 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 则显著降低。

由图 4 可见, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 均随着土层的加深而升高,而 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 随土层的变化趋势不明显,故阴离子向下迁移的程度表现为 $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \approx \text{HCO}_3^-$ 。阴离子比在 20—40 cm 土层中具有显著的变化规律,其中 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 随着离植株距离的增加而降低,而 $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ 升高,故柽柳对阴离子的富集程度表现为 $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ 。而三种阴离子比值在其他土层中随距离的变化趋势不明显。

2.3 土壤盐离子之间的相关性

土壤盐离子之间的相关性分析表明(表 3), K^+ 与其他 3 种阳离子之间均具有显著负相关关系,而 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 两两之间的关系则呈显著正相关。阴离子之间的相关性也均达到显著水平,不同的是, Cl^- 与 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 均呈负相关,而 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 呈正相关。阴离子与阳离子之间的相关性显示, Cl^- 与 K^+ 具有显著负相关关系,而与其他 3 中阳离子呈显著正相关,相反, HCO_3^- 与 K^+ 呈正相关而与其他 3 种阳离子呈负相关关系,且均达到显著水平, SO_4^{2-} 则与 K^+ 呈显著正相关,与 Mg^{2+} 呈显著负相关,而与 Na^+ 和 Ca^{2+} 的相关性不显著。表明土壤盐分包括氯化钠、氯化钙、氯化镁、硫酸钾和碳酸氢钾。

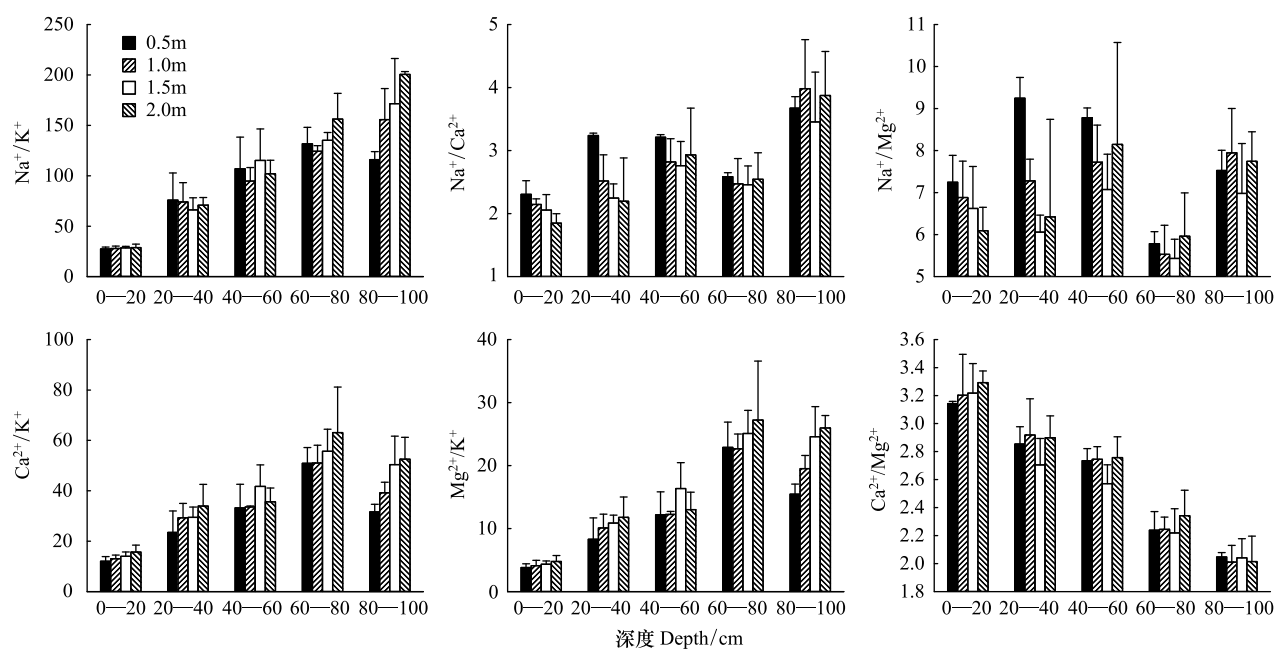


图 3 柽柳个体周围不同土层阳离子比的变化

Fig.3 Changes in ratios among cations of different soil depth around the individual of *T. chinensis*

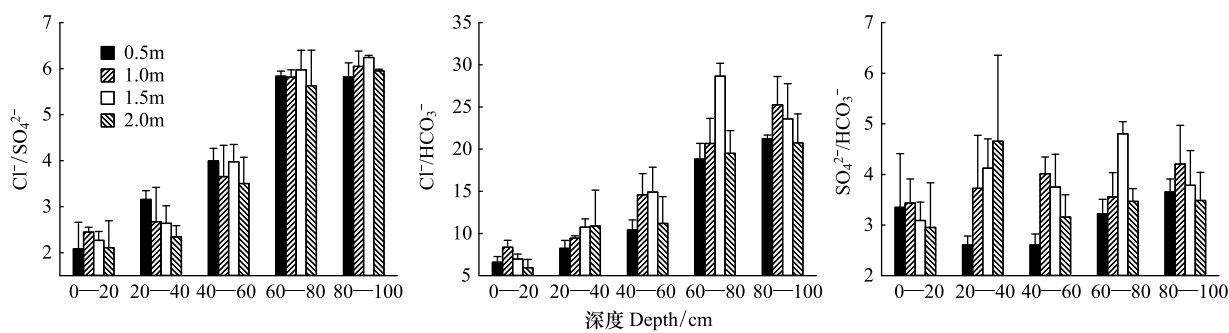


图 4 柽柳个体周围不同土层阴离子比的变化

Fig.4 Changes in ratios among anions of different soil depth around the individual of *T. chinensis*

表 3 土壤盐分离子之间的相关性分析

盐分离子 Salt ions	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
K ⁺	1						
Na ⁺	-0.656 **	1					
Ca ²⁺	-0.374 **	0.373 **	1				
Mg ²⁺	-0.651 **	0.723 **	0.816 **	1			
Cl ⁻	-0.727 **	0.938 **	0.584 **	0.902 **	1		
SO ₄ ²⁻	0.459 **	-0.248	0.155	-0.268 *	-0.373 **	1	
HCO ₃ ⁻	0.566 **	-0.405 **	-0.463 **	-0.726 **	-0.614 **	0.532 **	1

* $P<0.05$; $P<0.01$

3 讨论

有研究认为,生物积盐作用是造成植株周围盐分富集并在其冠层下形成“盐岛”的主要因素^[6],且耐盐能

力越强的植物对盐分的累积效应越明显^[24]。柽柳属于典型的泌盐植物,能够选择性吸收盐分并将其排出体外,且柽柳植株低矮,株型紧凑,能够有效积累和保护冠层下的凋落物不受损失,凋落物中的盐分得以最大程度返还土壤,使得盐分在冠层下土壤中大量富集,导致柽柳冠层下土壤某些盐分离子含量明显高于冠层外。这与荒漠盐生植物根际 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的富集程度较其他离子高的研究结果^[25-26] 有所不同,造成研究结果存在差异的原因可能与盐生植物不同耐盐途径有关。在本研究中,除了以上三种离子, K^+ 、 HCO_3^- 以及 0—20 cm 土层中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在根系分布较多的冠层下也表现出明显的富集,这与尹传华等^[11] 对多枝柽柳的研究结果相似。

同时,柽柳对盐分的富集作用可能与其本身的选择性吸收特性有关,Burke 等^[27] 认为,对灌丛生长愈重要的土壤元素在沃岛中的聚集就愈显著,空间异质性现象就愈明显。本研究土壤盐分离子含量组成结果表明,柽柳冠层下 Na^+ 和 K^+ 的富集效应明显强于 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ,而 Na^+ 含量显著高于 K^+ ,表明柽柳冠层下盐分富集以钠盐为主, Na^+ 对柽柳的生长较其它几种元素更为重要。这进一步说明柽柳植株周围盐分的富集主要是由于其对土壤盐分选择性吸收,并通过凋落物回归等途径返还土壤的结果^[7, 28]。另外,除凋落物回归外,树干径流也是造成灌丛周围盐分分布差异的因素之一,李从娟等^[14] 有关梭梭“盐岛”效应的研究发现,树干径流会将盐分带走,在主根附近形成低盐的环境。但本研究总体表现为离植株越近盐分越高,与梭梭对盐分的影响不同,而与尹传华等^[7] 对多枝柽柳、盐穗木和盐节木,以及何玉惠等^[29] 对红砂灌丛的研究结果相似,这可能是由于柽柳、盐穗木、盐节木和红砂属于泌盐盐生植物,降水将树冠中茎叶分泌的盐分淋洗下来后在冠层下被凋落物截留,从而形成“盐岛”,而梭梭属于稀盐盐生植物,降雨不但没有从茎叶表面淋洗出盐分,植株附近,尤其是表层土壤中的盐分反而在树干径流的影响下向深层土壤和远离植株的方向移动,从而在植株附近形成低盐的区域。另外,与内陆干旱区相比,尽管滨海地区降雨量较大,但由于研究区地势低平,坡度一般在 1/10000—20000,因此土壤中的盐分水平运动比较滞缓,这可能也在一定程度上消除了降水对“盐岛”效应的破坏,导致在水平方向上滨海地区与内陆地区具有相似的研究结果。

结合不同盐分离子在土壤剖面中的分布,硫酸钾和碳酸氢钾表现为表聚特征,而氯化钠、氯化钙和氯化镁表现为底聚特征。盐分在土壤表层聚集,在很多情况下被认为是由于蒸发使盐分随土壤水分的运动而向上运移,从而使土壤表层产生明显的积盐现象^[30-31]。另外,如前所述,植物根系吸收盐分后转运到茎叶部位,盐分又通过淋洗和凋落物进入土壤表层,从而表现出盐分表聚,如弋良朋等^[32] 的结果表明,荒漠盐生植物根际盐分的盈亏在吸收盐分的过程中起到了盐泵的作用,促进了盐分向地上部的运输。

本研究中,总盐含量,主要是氯化物随着土层的加深而升高,硫酸钾和碳酸氢钾则降低,其原因可能有以下两个方面:首先,本次采样是在雨季之后的八月下旬开展的,土壤表层某些盐分离子经过雨水的淋洗向土壤深层渗漏,根据易溶性盐分上行过程中氯化物表聚性较硫酸盐更为强烈的原理^[33],在淋溶过程中氯化物也比硫酸盐更易向下迁移,也因此可以推断水分蒸发引起的土壤积盐不是本研究中柽柳植株下 K^+ 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 表聚的驱动因素;其次,生物积盐与盐生植物根系对盐分的吸收和转运直接相关,所以,尽管盐岛的发生主要集中于冠层下的表层土壤,但根际过程在其中起到了重要的作用^[11],由于柽柳根系生物量随着土壤深度的增加而显著降低,使柽柳根系在浅层土壤中比在深层土壤中吸收更多的盐分,且柽柳对 K^+ 向茎叶部的选择运输性较高,而对 Na^+ 的选择运输性较低^[34-35],导致土壤中的盐分浅层少深层多。张鸣等^[36] 也认为,盐分在植株周围不同区域内的变化差异主要是由于根系对离子的选择吸收和吸收速率不同造成的。

因此,植株周围是否形成“盐岛”,“盐岛”的大小,以及盐分离子在土壤剖面上的分布差异,可能与盐生植物的耐盐途径、根系生物量及分布、气候条件(如蒸发强度及持续时间、降雨强度及持续时间等)、不同离子的迁移速率和采样时间等有关,有必要进一步开展不同类型植物干湿交替过程中不同土层盐分含量的变化,以揭示不同因素驱动下盐分在土壤中的水平和垂直运移规律,为盐碱地的生物改良提供理论指导。

4 结论

(1) 在柽柳植株周围,尤其是表层土壤中,离植株越近盐分含量越高,表明柽柳存在一定程度的生物积盐

作用,从而表现出明显的“盐岛”效应。这一方面可能是由于冠层下的凋落物分解后其中的盐分进入土壤,另一方面降水将树冠中茎叶分泌的盐分淋洗下来后在冠层下被凋落物截留,从而在植株周围形成一个高盐区域。

(2) 浅层土壤阴阳离子比例的变化表明,柽柳对不同阳离子的富集程度表现为 $K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$,而对阴离子的富集程度表现为 $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ 。

(3) 土壤总可溶性盐随着土层的加深而升高,可能是土壤盐分在雨水淋洗作用下向深层迁移的结果,另外,浅层土壤柽柳根系生物量高于深度土壤,可能也是导致土壤中的盐分浅层少深层多的原因。

(4) 各离子之间相关性分析结果说明研究区土壤盐由氯化钠、氯化钙、氯化镁、硫酸钾和碳酸氢钾组成。其中,硫酸钾和碳酸氢钾表现为表聚特征,而氯化钠、氯化钙和氯化镁表现为底聚特征。

参考文献 (References):

- [1] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. 生态学报, 2002, 22(8): 1215-1223.
- [2] Gallardo A. Spatial variability of soil properties in a floodplain forest in northwest Spain. Ecosystems, 2003, 6(6): 564-576.
- [3] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地景观的植被与土壤特征空间格局及其相关分析. 植物生态学报, 2001, 25(3): 265-269.
- [4] 李从娟, 李彦, 马健. 古尔班通古特沙漠土壤化学性质空间异质性的尺度特征. 土壤学报, 2011, 48(2): 302-310.
- [5] Schlesinger W H, Pilmanis A M. Plant-soil interactions in deserts. Biogeochemistry, 1998, 42(1/2): 169-187.
- [6] 郝金标, 张福锁, 陈阳, 毛达如, 尹传华, 田长彦. 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究. 应用生态学报, 2004, 15(1): 53-58.
- [7] 尹传华, 冯固, 田长彦, 白灯莎, 张福锁. 塔克拉玛干沙漠边缘柽柳对土壤水盐分布的影响. 中国环境科学, 2007, 27(5): 670-675.
- [8] Ohrtman M K, Sher A A, Lair K D. Quantifying soil salinity in areas invaded by *Tamarix* spp. Journal of Arid Environments, 2012, 85: 114-121.
- [9] Lal R. Carbon sequestration in dryland ecosystems of west Asia and North Africa. Land Degradation & Development, 2002, 13(1): 45-49.
- [10] Hillerislambers R, Rietkerk M, van den Bosch F, Prins H H T, de Kroon H. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems. Ecology, 2001, 82(1): 50-61.
- [11] 尹传华, 董积忠, 石秋梅, 张科, 赵振勇, 田长彦. 不同生境下盐生灌木盐岛效应的变化及生态学意义. 土壤学报, 2012, 49(2): 289-295.
- [12] Stock W D, Dlamini T S, Cowling R M. Plant induced fertile islands as possible indicators of desertification in a succulent desert ecosystem in northern Namaqualand, South Africa. Plant Ecology, 1999, 142(1/2): 161-167.
- [13] Dong X W, Zhang X K, Bao X L, Wang J K. Spatial distribution of soil nutrients after the establishment of sand-fixing shrubs on sand dune. Plant, Soil and Environment, 2009, 55(7): 288-294.
- [14] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 王永东, 范敬龙. 树干径流对梭梭“肥岛”和“盐岛”效应的作用机制. 生态学报, 2012, 32(15): 4819-4826.
- [15] Li J, Zhao C, Zhu H, Li Y, Wang F. Effect of plant species on shrub fertile island at an oasis-desert ecotone in the South Junggar Basin, China. Journal of Arid Environments, 2007, 71(4): 350-361.
- [16] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 陈德明. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究. 土壤学报, 2008, 45(1): 56-65.
- [17] 付秋萍, 张江辉, 王全九, 李玉生, 赵春艳. 塔里木盆地土壤盐分变化特征分析. 自然科学进展, 2007, 17(8): 1091-1097.
- [18] 田家怡. 黄河三角洲生物多样性研究. 青岛: 青岛出版社, 1999.
- [19] 张立华, 陈小兵. 盐碱地柽柳“盐岛”和“肥岛”效应及其碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, 2015, 26(3): 653-658.
- [20] Guo W H, Wang R Q, Zhou S L, Zhang S P, Zhang Z G. Genetic diversity and clonal structure of *Phragmites australis* in the Yellow River delta of China. Biochemical Systematics and Ecology, 2003, 31(10): 1093-1109.
- [21] 宋创业, 刘高焕, 刘庆生, 曹铭昌, 黄翀. 黄河三角洲植物群落分布格局及其影响因素. 生态学报, 2008, 27(12): 2042-2048.
- [22] 崔保山, 刘兴土. 黄河三角洲湿地生态特征变化及可持续性管理对策. 地理科学, 2001, 21(3): 250-256.
- [23] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法. 北京: 科学出版社, 2012.
- [24] Nosetto M D, Jobbágy E G, Tóth T, Jackson R B. Regional patterns and controls of ecosystem salinization with grassland afforestation along a rainfall gradient. Global Biogeochemical Cycles, 2008, 22(2): GB2015.
- [25] 弋良朋, 马健, 李彦. 两种土壤条件下荒漠盐生植物根际系统养分分布的实验研究. 中国沙漠, 2008, 28(3): 443-448.
- [26] 李从娟, 马健, 李彦. 五种沙生植物根际土壤的盐分状况. 生态学报, 2009, 29(9): 4649-4655.
- [27] Burke I C, Reiners W A, Sturges D L, Matson P A. Herbicide treatment effects on properties of mountain big sagebrush soils after fourteen years. Soil Science Society of America Journal, 1987, 51(5): 1337-1343.
- [28] 胡文杰, 李跃进, 刘洪波, 张昊, 蒙荣, 芦永兴. 土默川平原土壤盐渍化与盐生植物分布及盐分离子特征的研究. 干旱区资源与环境,

2012, 26(4): 127-131.

- [29] 何玉惠, 刘新平, 谢忠奎. 红砂灌丛对土壤盐分和养分的富集作用. 干旱区资源与环境, 2015, 29(3): 115-119.
- [30] 姚荣江, 杨劲松. 黄河三角洲地区土壤盐渍化特征及其剖面类型分析. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 106-112.
- [31] 闫正龙, 王晓国, 高凡, 黄强, 袁著春, 卓锐. 塔里木河干流上游地区土壤盐渍化时空变化监测分析. 干旱区资源与环境, 2010, 24(10): 105-110.
- [32] 弋良朋, 马健, 李彦. 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征. 生态学报, 2007, 27(9): 3565-3571.
- [33] 王雪梅, 塔西甫拉提·特依拜, 柴仲平, 胡江玲, 龚爱谨. 新疆典型盐渍化区离子特征分析. 干旱区资源与环境, 2009, 23(12): 183-187.
- [34] 侯军铭, 梁海永, 王颖, 纪清巨, 闫继峰, 马长明, 袁玉欣. 不同盐碱区白榆、白蜡、紫穗槐、柽柳体内离子分布特征. 中国农学通报, 2009, 25(9): 277-281.
- [35] 王合云, 李红丽, 董智, 陈新闻. 滨海盐碱地不同土壤-树种系统中盐分离子分布与运移. 水土保持学报, 2014, 28(4): 222-226.
- [36] 张鸣, 张力, 石晓妮, 叶鹤琳, 李雪, 高天鹏. 民勤绿洲盐生草生境土壤盐分特征及离子组成. 水土保持通报, 2014, 34(6): 231-235.