塔克拉玛干沙漠不同区域柽柳沙包土壤盐分分布特征及其影响因素

董正武^{1,2} 赵英^{1*} 雷加强¹ 喜银巧¹

¹中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; ²新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054

摘要 柽柳(*Tamarix chinensis*)沙包是塔克拉玛干沙漠特殊的生物地貌景观, 对维持区域生态环境的稳定具有极其重要的作用。该研究采用野外调查与室内分析相结合的方法, 选取且末、阿拉尔、策勒、塔中4个典型区域的柽柳沙包为研究对象, 对柽柳沙包0–500 cm土壤垂直剖面进行采样, 测定土壤pH值、枯落物含量、电导率及 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 含量, 分析柽柳沙包中土壤盐分的空间变化规律及其影响因素。结果表明: 1)从且末、阿拉尔、策勒到塔中, 土壤pH值总体呈升高趋势, 土壤电导率及 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 含量总体呈降低趋势, K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 含量没有明显的变化规律。2)盐分在4个样区的垂直分布主要表现为: 且末和策勒样区柽柳沙包的土壤盐分呈表层聚集现象; 阿拉尔和塔中样区柽柳沙包的土壤盐分呈深层聚集现象。随着土层深度的增加, 土壤pH值总体呈升高的趋势, 土壤枯落物含量总体呈降低趋势; 土壤电导率在且末和策勒样区总体呈降低趋势, 阿拉尔样区呈先降低后升高再降低的变化趋势, 而塔中样区呈先升高后降低再升高的变化趋势。3)根据相关性分析和主成分分析, 且末样区土壤枯落物含量、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 为影响土壤盐分含量的主要因子, 且土壤盐分以硫酸盐为主; 阿拉尔样区影响土壤盐分组成的主要因子为 Cl^- 、 Na^+ ; 策勒样区为 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ ; 塔中样区为 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} , 且土壤盐分均以氯化物为主。综合分析表明, 不同区域柽柳沙包中土壤盐分存在空间变异性, 柽柳沙包土壤盐分的变化与干旱沙漠地区强烈的蒸发作用、地表风蚀强度、地下水埋深、土壤中枯落物及柽柳的生物积盐效应等因素密切相关, 是影响不同区域土壤盐分分布的关键因子。

关键词 柽柳沙包; 不同区域; 土壤盐分; 主成分分析; 塔克拉玛干沙漠

董正武, 赵英, 雷加强, 喜银巧 (2018). 塔克拉玛干沙漠不同区域柽柳沙包土壤盐分分布特征及其影响因素. 植物生态学报, 42, 873–884. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0060

Distribution pattern and influencing factors of soil salinity at *Tamarix* cones in the Taklimakan Desert

DONG Zheng-Wu^{1,2}, ZHAO Ying^{1*}, LEI Jia-Qiang¹, and XI Yin-Qiao¹

¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Ürümqi 830011, China; and ²College of Geography and Tourism, Xinjiang Normal University, Ürümqi 830054, China

Abstract

Aims The *Tamarix* cone is a coppice dune, which is a specific bio-geographical phenomenon in the Taklimakan Desert, helpful for stabilizing and maintaining the structure and function of desert ecosystems. This study aims to investigate the soil salinity of *Tamarix* cones at different sites.

Methods *Tamarix* cones were selected to investigate the spatial variations of soil salinity. Soil samples (0–500 cm) were collected for soil pH, and electrical conductivity (EC), HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and Na^+ content analysis.

Important findings 1) From Qiemo to Aral, Qira and Tazhong, soil pH generally increased, soil litter content decreased first and then increased, soil electrical conductivity (EC), Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-} content decreased, and K^+ , Cl^- , HCO_3^- content had no obvious change. 2) For the distribution layer, salt accumulation in the upper soil was significant within the Qiemo and Qira of *Tamarix* cones, and within the Aral and Tazhong, there was a significant pattern of salt accumulation along the soil profile. However, with increasing soil depth, soil pH generally increased and soil litter content decreased, soil EC at Qiemo and Qira generally decreased, and soil EC content

收稿日期Received: 2018-03-22 接受日期Accepted: 2018-08-01

基金项目: 国家“青年千人计划”新疆项目(Y472241001)。Supported by the National “the Thousand Youth Talents Plan Program” Xinjiang Project (Y472241001).

* 通信作者Corresponding author (yzhaosols@gmail.com)

showed the trend of decrease-increase-decrease at Aral, and the trend of increase-decrease-increase at Tazhong. 3) Correlation analysis and principal component analysis showed that soil litter content, SO_4^{2-} , K^+ and Na^+ content mainly affected soil salt content at Qiemo, where soil salt was mainly composed of sulfate. The major ion was Cl^- , Na^+ at Aral, Cl^- , Na^+ and K^+ at Qira, and Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} and SO_4^{2-} at Tazhong. Therefore, soil salinity at *Tamarix* cones had an obvious spatial variability among different habitats. Soil salinity variation at *Tamarix* cones were closely related to the intensive evaporation, wind erosion, groundwater depth, litter content and the salinity of *Tamarix chinensis*, which was the key factor affecting the distribution of soil salinity at different sites.

Key words *Tamarix* cone; different sites; soil salinity; principal component analysis; Taklimakan Desert

Dong ZW, Zhao Y, Lei JQ, Xi YQ (2018). Distribution pattern and influencing factors of soil salinity at *Tamarix* cones in the Taklimakan Desert. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 873–884. DOI: 10.17521/cjpe.2018.0060

怪柳(*Tamarix chinensis*)属怪柳科灌木或小乔木,是典型的泌盐植物,具有很高的抗旱、耐盐能力,在防风固沙、保持水土等方面起着极其重要的作用(张道远等, 2003; 孙丽坤等, 2016)。在干旱沙漠地区,由于降水稀少,怪柳主要通过深根系吸收地下水维持生命活动。同时,怪柳主要通过无性方式进行繁殖,能够在沙埋的枝干上形成新的植株,经过怪柳灌丛与沙粒互作条件下长期的抗风沙侵蚀等作用,形成了干旱沙漠区特有的生物地貌景观——怪柳沙包(夏训诚等, 2005)。怪柳沙包作为高大的灌丛沙丘,其高度一般为3–10 m, 长度为5–50 m, 其形成和发育受气候变化和人类活动的影响很大,是绿洲和沙漠之间重要的生态屏障,在一定程度上遏制了沙漠的蔓延(Muhtar *et al.*, 2002; 赵元杰和夏训诚, 2011)。在新疆干旱地区,怪柳沙包主要分布于塔克拉玛干沙漠及塔里木河等河流下游地带(赵元杰和夏训诚, 2011)。由于受全球气候变化和人类活动的影响,塔克拉玛干沙漠生态环境有进一步恶化的趋势(郑田等, 2010; 刘进辉等, 2016),使该地区的怪柳沙包呈现一定的衰败和退化现象。由于怪柳沙包对该地区的生态环境稳定及环境演化起着极其重要的作用(赵存玉和王涛, 2005; 刘冰等, 2008),其严重退化可能直接威胁到该地区生态系统的安全稳定发展(赵元杰和夏训诚, 2011)。

目前,关于怪柳沙包的研究主要集中在其形成机理、形态结构、环境指示意义(穆桂金, 1994; Muhtar *et al.*, 2002; 夏训诚等, 2005; 赵元杰和夏训诚, 2011; 张锦春等, 2014),以及怪柳沙堆表层土壤盐分的研究等方面(Ladenburger *et al.*, 2006; 尹传华等, 2013; 刘进辉等, 2016)。尹传华等(2012)的研究表明生境变化对怪柳灌丛沙堆土壤盐分离子的富集有着不同的影响,并认为由于风蚀及怪柳凋落物的堆积作用,怪柳灌丛沙堆表层土壤(0–30 cm)盐分富

集不明显,而深层土壤(30–120 cm)盐分呈明显的富集效应(尹传华等, 2013),进而影响区域生物地球化学循环过程。随着植被总盖度的降低和风沙活动的不断加剧,以风蚀作用为主的非生物因素使得怪柳灌丛沙堆表层土壤的盐分富集效应趋于减弱和消失(刘进辉等, 2016)。通常,与沙堆间地表层土壤相比,沙堆下土壤具有较高的盐分含量和较低的pH值(Lesica & Deluca, 2004)。然而,由于土壤盐分的积累与气候特点、地形地貌、成土母质、生物作用和地下水等自然因素以及人为因素密切相关,在小型怪柳沙堆发育成高大怪柳沙包的过程中,有关不同区域怪柳沙包的土壤盐分分布及变化程度及其影响因素的研究还较为缺乏,特别是对于干旱沙漠地区处于稳定阶段的怪柳沙包中深层土壤剖面盐分变化的研究更为少见。基于此,本研究以塔克拉玛干沙漠不同区域的怪柳沙包为研究对象,通过对怪柳沙包中土壤剖面盐分的对比分析,揭示怪柳沙包中土壤盐分的空间变异规律及其影响因素,探讨怪柳沙包的形对土壤盐分分布的影响。研究结果有助于理解怪柳沙包的存在对深层土壤盐分变化规律的影响,并对理解干旱沙漠地区怪柳在生物地球化学循环中的作用,以及植被分布格局对局地土壤空间异质性的作用机理提供知识补充,为怪柳沙包的保护及其利用提供理论依据,也对该地区生态环境的保护、恢复与重建具有参考价值。

1 研究区域和方法

1.1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠(36.83°–41.17° N; 77.67°–88.33° E)地处塔里木盆地中央,东西长约1 000 km,南北宽约400 km,面积约为 $3.37 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该地区降水稀少,年降水量小于100 mm。年蒸发量高达2 500–3 000 mm,属于极端干旱大陆性气候。风沙

危害严重, 浮尘天气高达100天, 各种强度的沙尘暴发生期通常跨越整个春夏季。植被以旱生、超旱生的荒漠半灌木和灌木为主, 种类稀少, 覆盖度低, 主要植物有怪柳、胡杨(*Populus euphratica*)、花花柴(*Karelinia caspia*)、骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等, 部分可形成大小不等的植物沙包。由于受气候变化和不同程度人类活动的影响, 怪柳沙包的形成特征在不同区域存在差异。

根据怪柳沙包形成动力的差异和分布区气候、水文及植被覆盖状况等特征(表1), 本研究以风蚀和水蚀形成的怪柳沙包为研究对象, 选择了4个具有代表性的怪柳沙包区域, 并与不同的气候-土壤-地下水耦合体系相对应。样区A位于塔克拉玛干沙漠东南缘且末境内沙漠公路沿线, 沙包上怪柳的盖度为50%左右, 植被以怪柳为主, 伴生有芦苇(*Phragmites communis*)、盐生草(*Halostachys glomeratus*)等, 该地区位于冲积平原下部与沙漠的过渡带, 地下水埋深约为6.0 m (曾妍妍等, 2015), 由于附近山脉雪水融化形成洪水的冲积及强烈的蒸发作用, 地表具有盐结皮, 土壤主要为盐土、风沙土。样区B位于塔克拉玛干沙漠北缘阿拉尔市附近, 属荒漠绿洲过渡带, 沙包上怪柳的盖度为40%–45%, 植被以怪柳为主, 周围稀疏分布有盐穗木(*Halostachys caspica*)等, 由于人类活动对水资源的利用, 地下水埋深较深, 约为8.0–10.0 m (龚伟华等, 2011), 地表有轻微的结皮, 土壤呈中度盐渍化, 主要为风沙土, 并且采样区附近的沙丘进行了草方格人工固沙。样区C位于塔克拉玛干沙漠南缘策勒县中国科学院策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站附近, 属荒漠绿洲过渡带, 沙包上怪柳的盖度为30%–35%, 植被以怪柳为主, 周围稀疏分布有骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)等灌木。由于农林灌溉等对水资源的利用, 该地区地下水埋藏较深, 约为11.0–16.0 m (Zeng *et al.*, 2013), 地表以流沙为主, 土壤呈轻度盐渍化, 主要为风沙土。样区D位于塔克拉玛干沙漠腹地塔中油田区中国科学院塔克拉玛干沙漠研究站附近, 沙包上怪柳的盖度约为20%, 地表裸露, 大面积流沙稀疏散布有怪柳沙包, 地下水埋深约为5.5 m (范敬龙等, 2013), 土壤呈极轻度盐渍化, 主要为风沙土, 沙堆基部及外围丘间地均发生强烈风蚀, 受风蚀影响地表组成物质粗化迹象明显。

表1 样区位点、地下水埋深和气候状况

Table 1 Meteorological data, groundwater depth and location of the sampling sites

样区 Site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	地下水 埋深 Groundwater depth (m)	年平均温度 Annual mean temperature (°C)	年降水量 Annual precipitation (mm)	年蒸发量 Annual evaporation (mm)
且末 Qiemo	84.68°	38.03°	6.0	10.68	27.97	2 360.6
阿拉尔 Aral	81.25°	40.42°	8.0–10.0	10.97	51.54	1 813.2
策勒 Qira	80.69°	37.04°	11.0–16.0	12.52	41.67	2 790.2
塔中 Tazhong	83.67°	39.06°	5.5	11.82	25.11	3 559.6

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

本研究选择的4个样区很好地代表了塔克拉玛干沙漠怪柳沙包的基本特征, 其地理位置如图1所示。在各样地分别选择3个长势较为一致、大小相近、处于稳定阶段、发育成熟的怪柳沙包(高度为3.5 ± 0.5 m, 直径约为10 m)。为便于表述和理解, 各样区标号为A、B、C和D的怪柳沙包直接用所在地名称且末、阿拉尔、策勒和塔中表示。

1.2.2 土壤样品采集

为避免降水对土样采集造成的影响, 本研究选择基本没有降水发生的夏季进行采样。于2016年6月20日至7月11日, 先后在各样地进行样品采集。在每个怪柳沙包顶部的中心位置, 选择3个较为一致的样点, 用土钻以20 cm为一个取样层分层进行采样; 根据怪柳沙包的高度, 取样深度设定为0–500 cm, 即每个样点采集土样25个, 每个怪柳沙包采集土样75个, 并对每个怪柳沙包上3个样点的土样分层混匀, 装入自封袋, 带回实验室进行测试和分析。

1.2.3 指标测定

土样在室内经自然风干后过筛(孔径0.5 mm), 制备土水质量体积比为1:5的土壤浸提液进行测定分析。土壤电导率采用电导率仪(DDS-307, 上海仪电科学仪器股份有限公司, 上海)测定; CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 含量的测定采用双指示剂中和法; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量测定采用EDTA络合滴定法。 Cl^- 含量测定采用 AgNO_3 滴定法。 K^+ 、 Na^+ 含量采用火焰光度计(FP6410, 上海精密科学仪器有限公司, 上海)测定。 SO_4^{2-} 含量测定采用EDTA间接滴定法。pH值采用pH计(pHS-2C, 上海仪电科学仪器股份有限公司, 上

图1 柽柳沙包样区分布图。

Fig. 1 Sampling plots at *Tamarix* cones.

海)测定。土壤枯落物测定采用称量法。具体分析方法参见《土壤农业化学分析法》(鲍士旦, 2000)。其中部分土壤由于 CO_3^{2-} 含量太少没有检出。

1.2.4 取样土层确定

基于柽柳沙包土壤剖面的电导率值以及各土层盐分离子含量及变异程度, 共划分为5个层次: 0–60、60–160、160–260、260–360和360–500 cm层。

1.2.5 数据分析

利用SPSS 17.0统计软件进行描述性统计分析、Pearson相关性分析和主成分分析, 土壤盐分各指标数据进行单因素方差分析和最小显著差异法多重比较。气象数据来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/data/weatherBk.html>), 地下水数据参考相关文献(龚伟华等, 2011; 范敬龙等, 2013; Zeng *et al.*, 2013; 曾妍妍等, 2015)。

2 结果和分析

2.1 土壤pH值变化

在各区域, 柽柳沙包的土壤pH值均呈现表层(0–60 cm)最低, 随着土层深度的增加, pH值总体呈增加的趋势, 且各土层间pH值的差异逐渐减弱(图2A)。且末样区土壤pH值在0–60、60–160及160–500 cm层之间存在显著差异($p < 0.05$), 而160 cm以下土层间没有明显差异($p > 0.05$)。阿拉尔样区土壤pH值在0–160 cm层间没有明显差异($p > 0.05$), 而与160 cm以下各土层存在显著差异($p < 0.05$)。策勒样区土壤pH值在0–60 cm与60 cm以下各土层间存在明显差异($p < 0.05$), 而60 cm以下各土层间没有明

图2 不同区域柽柳沙包土壤pH值(A)和土壤枯落物含量(B)变化(平均值±标准误差, $n = 75$)。

Fig. 2 Soil pH (A) and soil litter content (B) at *Tamarix* cones in different sites (mean $\pm$ SE, $n = 75$).

显差异($p > 0.05$)。塔中样区土壤pH值在0–260 cm间没有明显差异($p > 0.05$), 但0–260 cm层pH值明显低于260 cm以下土层($p < 0.05$)。从且末、阿拉尔、策勒到塔中, 土壤pH值总体呈增高的趋势。且末样

区土壤pH值最低, 平均值为7.32; 塔中样区的pH最高, 平均值为8.03; 阿拉尔和策勒样区之间土壤pH值没有明显差异。

2.2 土壤枯落物含量变化

随着土层深度的增加, 柽柳沙包的土壤枯落物含量总体呈降低趋势(图2B)。且末样区土壤枯落物含量在60–160 cm层最高, 且与其他各土层存在显著差异($p < 0.05$); 而在160 cm以下随着深度增加, 土壤枯落物含量逐渐降低。阿拉尔和策勒样区柽柳沙包均为0–60 cm土壤枯落物含量最高, 且与60 cm以下各土层存在显著差异($p < 0.05$), 而在60–500 cm层间土壤枯落物含量没有明显差异($p > 0.05$)。塔中样区土壤枯落物含量在0–60、60–260及260–500 cm层间存在显著差异($p < 0.05$)。从且末、阿拉尔、策勒到塔中, 土壤枯落物含量总体呈先降低后增高的趋势, 最大值位于且末样区, 平均值为3.28%, 最小值位于阿拉尔样区, 平均值为0.17%。在0–60 cm层, 且末和塔中样区土壤枯落物含量明显高于阿拉尔和策勒样区($p < 0.05$); 在60 cm以下, 且末样区的土壤

枯落物含量明显高于其他各样区($p < 0.05$)。

2.3 土壤电导率的变化

随着土层深度的增加, 柽柳沙包的土壤电导率在且末和策勒样区总体呈降低趋势; 阿拉尔样区呈先降低后升高再降低的变化趋势, 而在塔中样区呈先升高后降低再升高的变化趋势(图3)。在且末和策勒样区, 最大值位于表层0–60 cm, 最小值位于深层360–500 cm, 且在且末样区土壤电导率从0–60 cm至360–500 cm, 降幅达150%以上; 策勒样区土壤电导率从0–60 cm至360–500 cm降幅约为130%; 说明且末和策勒样区柽柳沙包的土壤盐分垂直分布呈表层聚集现象。阿拉尔样区最大值位于160–260 cm, 最小值位于360–500 cm, 降幅约为100%; 塔中样区最大值位于60–160 cm, 最小值位于260–360 cm, 降幅约为180%; 而360–500 cm又呈现升高的趋势, 表明塔中样区柽柳沙包的土壤盐分垂直分布呈底层聚集现象。从且末、阿拉尔、策勒到塔中, 土壤电导率总体呈降低的趋势。且末样区土壤电导率明显高于其他各样区($p < 0.05$), 阿拉尔和策勒样区的土壤

图3 不同区域柽柳沙包土壤盐分变化(平均值±标准误差, $n = 75$)。

Fig. 3 Soil salinity at *Tamarix* cones in different sites (mean $\pm$ SE, $n = 75$).

电导率在0–60 cm层明显高于塔中样区($p < 0.05$), 阿拉尔样区的土壤电导率在60 cm以下相对高于策勒和塔中样区($p < 0.05$)。

变异系数 CV 值反映样点的离散程度, $CV < 0.1$ 为弱变异性; $0.1 \leq CV \leq 1$ 为中等变异性; $CV > 1$ 为强变异性(雷志栋, 1998)。由表2可知, 不同深度土壤盐分含量的变异程度不同, 在且末样区, 表层0–160 cm为弱变异, 深层160–500 cm为中等变异; 在阿拉尔和塔中样区, 0–360 cm为中等变异, 360–500 cm为弱变异; 说明深层土壤盐分的空间变异减弱; 在策勒样区, 0–500 cm为中等变异。

2.4 土壤盐分离子含量变化

在不同区域柽柳沙包的土壤盐分离子含量变化见图3, 就单个土壤剖面而言, 随着土层深度的增加, 且末样区各离子含量总体呈降低趋势, 除 Cl^- 外, 均表现为0–60 cm层离子含量最高。在阿拉尔样区, SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 含量呈先升高后降低的变化趋势, CO_3^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 含量没有明显的变化规律; K^+ 、 HCO_3^-

含量呈降低趋势, 并以0–60 cm层含量最高。在策勒样区, SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 含量呈先降低后升高再降低的变化趋势, 且均表现为0–60 cm层高于其他各土层; Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 含量呈降低趋势, 随着深度的增加各土层间的差异显著性呈减弱趋势。在塔中样区, SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 含量在各层间没有明显的变化; 其余各离子均呈先升高后降低再升高的变化趋势, 且以60–160 cm层最大。

从且末依次到塔中, 土壤阳离子总量、阴离子总量、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 SO_4^{2-} 含量总体呈降低趋势, 最大值位于且末样区, 平均值分别为3.64、2.82、0.98、2.34、0.18、1.28 $mg \cdot g^{-1}$, 最小值位于塔中样区, 平均值分别为0.50、1.37、0.17、0.18、0.07、0.19 $mg \cdot g^{-1}$ 。 CO_3^{2-} 由于含量非常少, 在且末样区的柽柳沙包中没有检出, 其余各柽柳沙包中含量也非常低, 平均约为0.02 $mg \cdot g^{-1}$ 。 K^+ 、 Cl^- 、 HCO_3^- 含量从且末到塔中样区没有明显的变化规律。

2.5 土壤盐分离子间的相关性分析

对不同区域柽柳沙包的土壤盐分指标进行相关性分析(表3)。在且末样区, HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 是影响土壤盐分状况的主要离子, 与土壤电导率的相关系数分别为0.898、0.972、0.697、0.799, 0.782、0.894, 土壤pH植与 HCO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 呈极显著负相关关系($p < 0.01$), 说明土壤酸碱度主要由上述4种离子含量决定。土壤枯落物与 HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 呈极显著正相关关系($p < 0.01$)。在阿拉尔样区, HCO_3^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 是影响土壤盐分含量的主要离子, 与土壤电导率的相关系数分别为0.623、0.649、0.909、0.689, 且土壤盐分以碳酸氢盐为主。土壤pH植与枯落物、 HCO_3^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 呈显著负相关关系($p < 0.05$), 土壤枯落物与 HCO_3^- 、 K^+ 呈极显著正相关关系($p < 0.01$)。在策勒样区, Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 是影响土壤盐分含量的主要离子, 与土壤电导率的相关系数分别为0.988、0.941、0.984、0.944, 且土壤盐分以氯化物为主。土壤pH植与电导率、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 呈极显著负相关关系($p < 0.01$), 土壤枯落物与 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 呈极显著正相关关系($p < 0.01$)。在塔中样区, 土壤电导率与各指标之间相关性均不显著($p > 0.05$), 土壤pH植与枯落物、 Cl^- 、 K^+ 呈极显著负相关关系($p < 0.01$), 土壤枯落物与 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 K^+ 呈极显著正相关关系($p < 0.01$)。

表2 土壤电导率的描述统计值

Table 2 Descriptive statistics of soil electrical conductivity

区域 Site	土壤深度 Soil depth (cm)	最小值 Minimum m	最大值 Maximum m	均值 Mean	标准 偏差 Standard deviation	方差 Variance	变异系数 Coefficient of variation
且末 Qiemo	0–60	26.400	30.580	28.553	2.093	4.380	0.073
	60–160	21.580	23.230	22.552	0.719	0.517	0.032
	160–260	12.350	19.400	16.448	2.714	7.365	0.165
	260–360	13.000	16.830	14.515	1.673	2.799	0.115
	360–500	9.500	13.800	11.052	1.632	2.665	0.148
阿拉尔 Aral	0–60	5.750	7.200	6.508	0.727	0.529	0.112
	60–160	4.430	8.750	5.495	1.829	3.347	0.333
	160–260	4.150	9.630	7.370	2.146	4.605	0.291
	260–360	3.800	5.400	4.413	0.682	0.465	0.155
	360–500	3.330	4.100	3.663	0.323	0.104	0.088
策勒 Qira	0–60	4.950	6.430	5.660	0.742	0.550	0.131
	60–160	3.180	4.400	3.642	0.469	0.220	0.129
	160–260	2.030	3.230	2.750	0.448	0.201	0.163
	260–360	2.280	3.500	2.867	0.475	0.226	0.166
	360–500	1.980	3.600	2.480	0.588	0.346	0.237
塔中 Tazhong	0–60	1.450	1.950	1.693	0.250	0.063	0.148
	60–160	1.580	4.430	3.074	1.187	1.410	0.386
	160–260	1.550	2.980	1.978	0.574	0.329	0.290
	260–360	0.600	1.280	1.009	0.229	0.053	0.227
	360–500	3.680	4.330	4.047	0.333	0.111	0.082

表3 怪柳沙包土壤各指标之间的相关矩阵
Table 3 Correlation coefficient matrix of soil indexes

区域 Site	指标 Item	pH	电导率 Electrical conductivity (EC)	土壤枯落物 Soil litters (SL)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺
且末 Qiemo	EC	-0.756**								
	SL	-0.269	0.550**							
	HCO ₃ ⁻	-0.699**	0.898**	0.680**						
	Cl ⁻	-0.783**	0.972**	0.463*	0.838**					
	SO ₄ ²⁻	-0.739**	0.697**	0.366	0.667**	0.659**				
	K ⁺	-0.351	0.799**	0.648**	0.770**	0.717**	0.410*			
	Na ⁺	-0.411*	0.782**	0.562**	0.694**	0.709**	0.443*	0.917**		
	Ca ²⁺	-0.658**	0.894**	0.551**	0.834**	0.880**	0.704**	0.708**	0.627**	
	Mg ²⁺	-0.079	0.151	-0.335	0.044	0.169	-0.082	0.258	0.124	0.09
阿拉尔 Aral	EC	-0.312								
	SL	-0.670**	0.329							
	HCO ₃ ⁻	-0.486*	0.623**	0.547**						
	Cl ⁻	0.202	0.415*	0.066	-0.109					
	SO ₄ ²⁻	-0.168	0.206	0.099	0.090	0.105				
	K ⁺	-0.538**	0.649**	0.597**	0.441*	0.448*	0.291			
	Na ⁺	-0.324	0.909**	0.342	0.653**	0.231	0.103	0.618**		
	Ca ²⁺	-0.490*	0.689**	0.310	0.639**	-0.339	0.093	0.350	0.763**	
	Mg ²⁺	-0.369	0.268	0.080	0.001	-0.009	0.550**	0.410*	0.141	0.292
策勒 Qira	EC	-0.794**								
	SL	-0.420*	0.610**							
	HCO ₃ ⁻	-0.334	0.291	0.236						
	Cl ⁻	-0.758**	0.988**	0.565**	0.301					
	SO ₄ ²⁻	-0.462*	0.482*	0.087	0.220	0.477*				
	K ⁺	-0.706**	0.941**	0.645**	0.205	0.920**	0.450*			
	Na ⁺	-0.771**	0.984**	0.566**	0.251	0.981**	0.497**	0.933**		
	Ca ²⁺	-0.725**	0.944**	0.590**	0.326	0.926**	0.426*	0.866**	0.886**	
	Mg ²⁺	-0.202	0.258	0.325	0.145	0.251	0.529**	0.229	0.297	0.118
塔中 Tazhong	EC	-0.159								
	SL	-0.441*	-0.057							
	HCO ₃ ⁻	-0.256	0.011	0.643**						
	Cl ⁻	-0.551**	0.161	0.183	0.361					
	SO ₄ ²⁻	-0.290	0.390	0.074	-0.038	0.167				
	K ⁺	-0.769**	0.349	0.579**	0.475*	0.641**	0.276			
	Na ⁺	-0.524*	0.140	0.293	0.450*	0.873**	0.057	0.666**		
	Ca ²⁺	-0.458*	0.103	0.565**	0.254	0.664**	0.069	0.672**	0.619**	
	Mg ²⁺	-0.260	0.285	0.038	-0.233	0.135	0.559**	0.382	-0.038	0.206

*, 在0.05水平(双侧)上显著相关; **, 在0.01水平(双侧)上显著相关。

*, correlation is significant at the 0.05 level (two-tailed); **, correlation is significant at the 0.01 level (two-tailed).

2.6 各主成分的特征值与方差贡献率

通过对土壤HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、电导率、pH值、枯落物10个变量进行主成分分析, 分析塔克拉玛干沙漠不同区域怪柳沙包的土壤盐分分布规律(表4), 依据累计贡献率大于85%、特征值大于1来确定主成分个数。

在且末样区, 前3个主因子的特征值大于1, F1、

F2和F3主成分因子的特征值分别为3.866、3.743和1.291, 所对应的方差贡献率分别为38.685%、37.430%和12.908%, 累计方差贡献率为88.996%。在阿拉尔样区, 前3个主因子的特征值大于1, F1、F2和F3主成分因子的特征值分别为3.852、2.508和1.812, 所对应的方差贡献率分别为38.519%、25.079%和18.118%, 累计方差贡献率为81.716%。在

表4 各主成分的特征值和累积贡献率
Table 4 Eigenvalues and variance contribution of principal component analysis

区域 Site	主成分因子 principal component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Rate of variance (%)	累积贡献率 Cumulative rate (%)
且末 Qiemo	F1	3.866	38.658	38.658
	F2	3.743	37.430	76.088
	F3	1.291	12.908	88.996
阿拉尔 Aral	F1	3.852	38.519	38.519
	F2	2.508	25.079	63.598
	F3	1.812	18.118	81.716
策勒 Qira	F1	5.618	56.184	56.184
	F2	1.879	18.787	74.971
塔中 Tazhong	F1	5.096	50.964	50.964
	F2	1.934	19.336	70.301
	F3	1.732	17.321	87.621

策勒样区, 前2个主因子的特征值大于1, F1和F2主成分因子的特征值分别为5.618和1.879, 所对应的方差贡献率分别为56.184%和18.787%, 累计方差贡献率为74.971%。在塔中样区, 前3个主因子的特征值大于1, F1、F2和F3主成分因子的特征值分别为5.096、1.934和1.732, 所对应的方差贡献率分别为50.964%、19.336%和17.321%, 累计方差贡献率为87.621%。以上样区主成分分析表明特征值大于1的主成分基本包含了10个指标中的绝大部分信息。

2.7 各因子的主成分表达

土壤10个初始因子与主成分的相关系数见表5。在且末样区, 土壤 SO_4^{2-} 、pH值在第一主成分F1中有较高的载荷, 代表了土壤的盐分特征和酸碱度, 并反映了土壤盐分以硫酸盐为主; K^+ 、 Na^+ 在第二主成分F2中有较高的载荷, Mg^{2+} 、枯落物在第三主成分

F3中有较高的载荷, 代表土壤的盐分组成, 并说明枯落物含量在一定程度上影响土壤盐分。在阿拉尔样区, 电导率、 Cl^- 、 Na^+ 在第一主成分中有较高的载荷, 代表了土壤的盐分组成, 并以氯化物为主; HCO_3^- 、pH、枯落物在第二主成分中有较高载荷, 代表土壤的酸碱度。在策勒样区, Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 在第一主成分中有较高载荷, 代表了土壤的盐分组成, SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 在第二主成分中有较高载荷, 代表土壤的结构状况, 说明该样区土壤盐分以氯化为主, 同时也受到硫酸盐的影响。在塔中样区, Cl^- 、 Na^+ 在第一主成分中有较高的载荷, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 在第二主成分中有较高载荷, 代表土壤盐分以氯化物和硫酸盐为主; pH值和枯落物在第三主成分中有较高载荷, 代表了土壤的酸碱度, 反映出土壤酸碱度在一定程度上受枯落物含量的影响。

3 讨论

3.1 怪柳沙包中土壤盐分变化

怪柳灌丛土壤盐分的形成存在生物积盐效应(尹传华等, 2012), 主要表现为根系对土壤盐分的吸收、运输, 并以凋落物的形式回落到土壤的生物积盐过程。在干旱沙漠地区, 表层土壤盐分主要源于地下水蒸发聚盐累积(刘广明等, 2002; 何玉惠等, 2015), 由于蒸腾作用及盐生植物根系对盐分的吸收作用使土壤中的盐分发生迁移(弋良朋等, 2007)。刘进辉等(2016)认为怪柳灌丛沙堆表层土壤具有明显的盐富集效应, 但随着植被总盖度的降低和风沙活动的不断加剧, 灌丛盐分富集效应趋于减弱和消

表5 主成分因子的得分系数矩阵
Table 5 Score coefficient matrix of principal component analysis

因子 Factor	且末 Qiemo			阿拉尔 Aral			策勒 Qira		塔中 Tazhong		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F1	F2	F3
HCO_3^-	0.097	0.108	-0.060	0.034	0.278	-0.246	0.002	0.159	0.147	-0.006	0.051
Cl^-	0.186	0.016	0.101	0.300	-0.145	0.008	0.176	-0.026	0.268	-0.213	0.016
SO_4^{2-}	0.367	-0.210	-0.130	-0.003	-0.042	0.444	-0.106	0.527	-0.220	0.670	-0.011
K^+	-0.207	0.397	0.128	0.107	0.151	0.131	0.181	-0.055	0.104	0.156	0.041
Na^+	-0.161	0.345	0.073	0.276	-0.076	-0.096	0.164	0.003	0.282	-0.247	-0.022
Ca^{2+}	0.159	0.039	0.003	0.150	0.079	0.038	0.199	-0.106	-0.008	0.345	0.068
Mg^{2+}	-0.038	0.052	0.743	-0.031	-0.021	0.516	-0.183	0.635	0.099	0.158	-0.139
电导率 Electrical conductivity	0.137	0.076	0.069	0.281	-0.100	0.008	0.180	-0.029	0.246	-0.147	-0.019
pH	-0.423	0.267	-0.028	0.159	-0.409	-0.114	-0.129	-0.030	0.050	-0.183	-0.525
土壤枯落物 Soil litters	-0.170	0.324	-0.406	-0.072	0.407	-0.066	0.135	-0.061	0.038	-0.169	0.522

失。也有研究认为盐生灌木凋落物的累积可以显著降低土壤表层盐分的聚集(Farrell *et al.*, 2011), 柽柳也可通过凋落物和有机酸分泌的方式达到增强土壤肥力, 削弱灌丛下土壤盐渍化的效果(Lesica & Deluca, 2004; 张立华和陈小兵, 2015)。本研究发现, 随着沙包上柽柳盖度的降低, 表层土壤电导率呈降低趋势, 最大值位于且末样区, 最小值位于塔中样区; 而土壤枯落物呈先降低后增高的趋势, 最大值位于塔中样区, 最小值位于策勒样区(图2, 图3)。一方面与且末样区的柽柳沙包地表存在盐结皮有关, 盐结皮可使地表土壤不易被风蚀, 可保持较高的盐分含量; 另一方面由于且末样区沙包上柽柳的盖度较高, 从而使土壤表层不易受到风沙侵蚀的影响。另外, 由于且末样区的柽柳沙包位于冲积平原下部, 受到附近山脉洪水的侵蚀, 同时该样区地下水埋深约为6 m (曾妍妍等, 2015), 由于强烈的蒸发作用, 使土壤盐分随着水分的蒸发向表层聚集, 形成了盐结皮。而塔中样区沙包上柽柳的盖度最小, 枯落物含量在表层相对较高, 盐分含量最低; 这主要是由于塔中样区位于沙漠腹地, 风沙活动极其强烈, 且地表以流沙为主, 柽柳沙包表层沙物质损失比较严重, 由于沙物质的损失, 导致表层土壤盐分含量较低; 另一方面由于表层土壤枯落物含量较多(采样时观察到枯枝落叶、枯萎的根等分布于沙包表面), 可能削弱了表层土壤盐分的聚集。柽柳沙包由于受植物和风沙活动的共同作用而形成沙物质与枯落物互层的交错层理, 被称为“年层”(夏训诚等, 2005)。这种特殊结构也能够有效阻断毛管作用, 减轻了地面蒸发和地表返盐, 从而减少盐分的表层聚集; 此外, 土壤枯落物含量越高, 枯落物层越厚, 抑盐效果越明显(尹传华等, 2013), 上述原因也解释了与0–60 cm层相比, 60–120 cm层土壤电导率、阴离子、阳离子含量在塔中样区的柽柳沙包中均有明显的增加。策勒样区植被盖度相对较小, 且土壤枯落物含量相对较少, 依据地下水蒸发聚盐原理, 表层土壤盐分的累积量应相对较大。本研究发现策勒样区表层土壤盐分累积量反而低于且末和阿拉尔样区, 这主要是由于策勒样区的柽柳沙包位于荒漠-绿洲过渡带, 地下水埋深约为11.0–16.0 m (Zeng *et al.*, 2013), 地下水蒸发聚盐的能力相对较弱, 使表层土壤盐分聚集能力减弱; 同时该地区风沙活动强烈, 年平均风速达 $2.36 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Zeng *et al.*, 2013), 强烈的

风沙活动使表层枯落物和沙物质损失较为严重, 导致表层聚集的盐分大量损失, 从而使策勒样区柽柳沙包表层土壤盐分的聚集效应减弱。

就不同土壤深度而言, 不同区域柽柳沙包土壤盐分也表现出不同的变化规律。尹传华等(2013)认为柽柳沙堆表层0–30 cm土层的盐分低于30–120 cm的盐分, 并且30–120 cm层土壤盐分呈现富集态势, 形成明显的“盐岛”现象。本研究中, 阿拉尔和塔中样区土壤电导率分别在160–260和60–160 cm土层达到最大值; 在阿拉尔样区, Cl^- 、 Na^+ 在160–260 cm层土壤中有聚集效应, 在塔中样区, Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在60–160 cm层土壤中存在聚集效应。这与尹传华等(2013)对塔里木盆地北缘洪积冲积扇末端柽柳沙堆土壤盐分研究的结果较为一致, 表明柽柳沙包内土壤盐分易在较深层土壤聚集。塔中样区的土壤盐分含量在360–500 cm层呈第二次峰值, 可能与柽柳根系分布及地下埋深有关。在塔中样区, 地下水埋深约为5.5 m (范敬龙等, 2013), 420–500 cm层土壤主要由黏粒和粉粒组成, 并且420–500 cm层土壤含水量高达27%; 有利于柽柳根系对水盐的吸收利用, 可能会使土壤盐分在该层存在聚集现象。

3.2 影响柽柳沙包盐分特征的因素

柽柳在生长过程中, 其根系对土壤中盐分的吸收具有选择性(雷金银等, 2011; 尹传华等, 2012), Schlesinger等(1996)认为如果仅仅是生物过程在起作用, 那么“资源岛”只积累对灌丛生长所必需的元素。尹传华等(2008)认为 Cl^- 、 Na^+ 、 K^+ 可能是柽柳生长所必需的元素, 而 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为非必需元素。李从娟等(2009)发现 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 在柽柳根际土壤中出现了聚集现象, 而 Na^+ 发生了亏缺。本研究通过相关性分析和主成分分析发现, 在且末样区, 土壤枯落物含量、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 K^+ 为影响土壤盐分含量的主要因子; 在阿拉尔样区, Cl^- 、 Na^+ 为影响土壤盐分含量的主要因子; 而在策勒样区, Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 为影响土壤盐分含量的主要因子, 塔中样区主要为 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 。这说明在不同区域柽柳可通过生物过程对 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ 大量地富集, 且柽柳沙包中的土壤盐分以硫酸盐、氯化物为主, 也进一步说明不同区域柽柳沙包的土壤盐分呈现不同的变化规律。这与刘进辉等(2016)对荒漠-绿洲过渡带柽柳灌丛沙堆表层土壤盐分的研究结果较为相似。另外, 由于不同区域柽柳沙包风沙活动

强度的不同, 导致怪柳沙包表层土壤盐分流失程度存在差异, 从而使不同区域的怪柳沙包中表层土壤盐分含量的差异性显著增强。

关于灌丛沙堆土壤pH值的变化, 在不同研究中存在不同的结果。一些研究认为盐生植物能够显著增加表层土壤的pH值, 具有增强土壤碱性的作用(尹传华等, 2012); 而另有研究认为盐生灌丛下表层土壤具有较高的电导率和较低的pH值(Lesica & Deluca, 2004; Dong *et al.*, 2009), 这可能与植物对离子不平衡吸收及根系分泌物等多种因素有关(张立华等, 2016)。本研究发现从且末依次到塔中, 土壤盐分呈降低趋势, 而土壤pH值呈升高趋势; 随着土壤深度的增加, 土壤pH值呈逐渐增大的趋势, 这可能与怪柳根系在土壤深层的分布特征有关, 也进一步证实了怪柳可能具有增强土壤碱性的作用。已有研究发现灌丛沙堆土壤pH值的变化与枯落物的酸碱度有关(Titus *et al.* 2002; Ohrtman *et al.*, 2012), 怪柳灌丛下土壤pH值偏高可能也与其同化枝盐腺与空气中CO₂结合形成HCO₃⁻有关(郝金标等, 2004)。本研究发现土壤pH值与所有盐分指标均呈负相关关系, 土壤pH值与HCO₃⁻在且末和阿拉尔样区呈显著负相关关系, 而在策勒和塔中样区呈弱负相关关系; 土壤pH值与枯落物在阿拉尔、策勒和塔中样区呈显著负相关关系, 而与且末样区呈弱负相关关系; 说明HCO₃⁻在且末和阿拉尔样区对土壤pH值有重要影响, 而在策勒和塔中样区土壤枯落物含量对土壤pH值的变化有极其重要的作用。

3.3 怪柳沙包中盐分变化的生态效应

依据土壤中盐随水来, 盐随水去的原理, 地下水蒸发是引起干旱沙漠地区土壤盐分运移的主要动力。作为泌盐植物, 怪柳枝叶中含有较高的盐分, 在怪柳沙包形成过程中, 由于怪柳枯枝落叶的分解, 加重了沙包中土壤盐分的聚集。通过对不同区域怪柳沙包中土壤盐分的分析及结合前人的研究, 我们认为怪柳沙包土壤盐分在不同区域具有不同的变化规律, 主要表现为土壤盐分在浅层和深层的聚集, 即可能存在盐岛效应。在塔克拉玛干沙漠地区, 由于长期的风沙侵蚀, 强烈的蒸发作用, 地下水埋深的不同, 土壤中枯落物的遮蔽作用以及怪柳自身的特性(泌盐作用等)均影响到怪柳沙包中土壤盐分的分异规律。从不同区域怪柳沙包中土壤离子变化来看, 各因子所表现出的作用效果各不相同, 其交互

作用过程还值得进一步深入研究。

4 结论

在塔克拉玛干沙漠不同区域怪柳沙包中, 从且末依次到塔中, 土壤pH值总体呈升高的变化趋势, 土壤枯落物含量总体呈先降低后增高的趋势, 土壤电导率、阳离子总量、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺及SO₄²⁻含量总体呈降低趋势, 且Cl⁻、SO₄²⁻、Na⁺、K⁺是影响土壤盐分含量的主要因子。土壤盐分在4个样区的垂直分布主要表现为: 且末和策勒样区呈表聚现象; 阿拉尔和塔中样区呈深层聚集现象。随着土层深度的增加, 土壤pH值总体呈增加的趋势, 枯落物含量总体呈降低趋势。

怪柳沙包中土壤盐分存在聚集效应, 可将其看作局部形成的一个盐分库。如果对其开发利用, 怪柳沙包的破坏会导致区域环境风沙入侵的加剧, 怪柳沙包中富集的盐分将加重土壤盐渍化。在怪柳沙包自然衰退过程中, 沙包中盐分的聚集也会造成土壤盐渍化, 加剧区域环境的退化。因此, 从怪柳沙包聚盐的角度来说, 对怪柳沙包应设法利用其盐分的聚集效应, 并使其保持相对稳定的状态, 防止其成为新的沙源, 从而达到维持沙漠生态系统稳定的目的。

参考文献

- Bao SD (2000). *Soil Agricultural Chemistry Analysis*. China Agriculture Press, Beijing. 152–200. [鲍士旦 (2000). 土壤农化分析. 中国农业出版社, 北京. 152–200.]
- Dong XW, Zhang XK, Bao XL, Wang JK (2009). Spatial distribution of soil nutrients after the establishment of sand-fixing shrubs on sand dune. *Plant Soil and Environment*, 55, 288–294.
- Fan JL, Jin XJ, Lei JQ, Xu XW, Zhou HW (2013). Responses of ground water level to pumping water of the Tarim Desert highway shelterbelt project. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29(2), 114–119. [范敬龙, 金小军, 雷加强, 徐新文, 周宏伟 (2013). 塔里木沙漠公路防护林工程抽水的地下水位响应. 中国农学通报, 29(2), 114–119.]
- Farrell C, Szota C, Hobbs RJ, Colmer TD (2011). Microsite and litter cover effects on soil conditions and seedling recruitment in a saline agricultural system. *Plant and Soil*, 348, 397–409.
- Gong WH, Wang YG, Gao QZ, Shen YP, Wang SD (2011). Ecological comprehensive monitoring for Aral station in Tarim River Basin. *Arid Land Geography*, 5, 762–771. [龚伟华, 王彦国, 高前兆, 沈永平, 王顺德 (2011). 塔里

- 木河流域阿拉尔站生态综合监测分. 干旱区地理, 5, 762–771.]
- He YH, Liu XP, Xie ZK (2015). Enrichment of soil salinity and nutrients under desertification shrub *Reaumuria soongorica*. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 29, 115–119. [何玉惠, 刘新平, 谢忠奎 (2015). 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, 29, 115–119.]
- Ladenburger CG, Hild AL, Kazmer DJ (2006). Soil salinity patterns in *Tamarix* invasions in the Bighorn Basin, Wyoming, USA. *Journal of Arid Environments*, 65, 111–128.
- Lei JY, Ban NR, Zhang YH, Wang CJ (2011). Effects and partition characteristics of *Tamarix ramosissima* on nutrients and salt of saline-alkali soils. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 31, 73–76. [雷金银, 班乃荣, 张永宏, 王长军 (2011). 怪柳对盐碱土养分与盐分的影响及其区化特征. 水土保持通报, 31, 73–76.]
- Lei ZD, Yang SX, Xie SC (1998). *Soil Water Dynamics*. Tsinghua University Press, Beijing. [雷志栋, 杨诗秀, 谢森传 (1998). 土壤水动力学. 清华大学出版社, 北京.]
- Lesica P, Deluca TH (2004). Is tamarisk allelopathic? *Plant and Soil*, 267, 357–365.
- Li CJ, Ma J, Li Y (2009). Salt content in the rhizosphere of five psammophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 4649–4655. [李从娟, 马健, 李彦 (2009). 五种沙生植物根际土壤的盐分状况. 生态学报, 29, 4649–4655.]
- Liu B, Zhao WZ, Yang R (2008). Characteristics and spatial heterogeneity of *Tamarix ramosissima* nebkhas at desert-oasis ecotone. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 1446–1455. [刘冰, 赵文智, 杨荣 (2008). 荒漠绿洲过渡带怪柳灌丛沙堆特征及其空间异质性. 生态学报, 28, 1446–1455.]
- Liu GM, Yang JS, Li DS (2002). Evaporation regularity and its relationship with soil salinity. *Acta Pedologica Sinica*, 39, 384–389. [刘广明, 杨劲松, 李冬顺 (2002). 地下水蒸发规律及其与土壤盐分的关系. 土壤学报, 9, 384–389.]
- Liu JH, Wang XQ, Ma Y, Tan FZ (2016). Spatial variation of soil salinity on *Tamarix ramosissima* nebkhas and interdune in oasis-desert ecotone. *Journal of Desert Research*, 36, 181–189. [刘进辉, 王雪芹, 马洋, 谭凤翥 (2016). 绿洲沙漠过渡带怪柳(*Tamarix ramosissima*)灌丛沙堆-丘间地系统土壤盐分含量特征. 中国沙漠, 36, 181–189.]
- Mu GJ (1994). The environmental significance of vegetation cones of the Taklimakan Desert, China. *Arid Zone Research*, 11(1), 34–41. [穆桂金 (1994). 塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义. 干旱区研究, 11(1), 34–41.]
- Muhtar Q, Hiroki T, Mijit H (2002). Formation and internal structure of *Tamarix* cones in the Taklimakan Desert. *Journal of Arid Environments*, 50, 81–97.
- Ohrtmann MK, Sher AA, Lair KD (2012). Quantifying soil salinity in areas invaded by *Tamarix* spp. *Journal of Arid Environments*, 85, 114–121.
- Schlesinger WH, Raikes JA, Hartley AE (1996). On the spatial patterns of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 77, 364–374.
- Sun LK, Liu WQ, Chen T, Liu GX (2016). Review on mechanism of habitat adaptability and resource value of *Tamarix* species. *Journal of Desert Research*, 36, 349–356. [孙丽坤, 刘万秋, 陈拓, 刘光琇 (2016). 怪柳属(*Tamarix*)植物生境适应机制与资源价值研究进展. 中国沙漠, 36, 349–356.]
- Titus JH, Nowak RS, Smith SD (2002). Soil resource heterogeneity in the Mojave Desert. *Journal of Arid Environments*, 52, 269–292.
- Xi JB, Zhang FS, Chen Y, Mao DR, Yin CH, Tian CY (2004). A preliminary study on salt contents of soil in root-canopy area of halophytes. *Journal of Applied Ecology*, 15, 53–58. [郝金标, 张福锁, 陈阳, 毛达如, 尹传华, 田长彦 (2004). 盐生植物根冠区土壤盐分变化的初步研究. 应用生态学报, 15, 53–58.]
- Xia XC, Cao QY, Wang FB, Lei JQ, Zhao YJ (2005). Significance of studying age layers of *Tamarix ramosissima* sand-hillock in Lop Nur region, Xinjiang. *Arid Land Geography*, 28, 565–568. [夏训诚, 曹琼英, 王富葆, 雷加强, 赵元杰 (2005). 罗布泊地区红柳沙包年层的研究意义. 干旱区地理, 28, 565–568.]
- Yi LP, Ma J, Li Y (2007). Soil salt and nutrient concentration in the rhizosphere of desert halophytes. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 3565–3571. [弋良朋, 马健, 李彦 (2007). 荒漠盐生植物根际土壤盐分和养分特征. 生态学报, 27, 3565–3571.]
- Yin CH, Feng G, Tian CY, Zhang FS (2008). Enrichment effects of soil organic matter and salinity under the tamarisk shrubs in arid area. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 16, 263–265. [尹传华, 冯固, 田长彦, 张福锁 (2008). 干旱区怪柳灌丛下土壤有机质、盐分的富集效应的研究. 中国生态农业学报, 16, 263–265.]
- Yin CH, Dong JZ, Shi QM, Zhang K, Zhao ZY, Tian CY (2012). Salt island effect of halophytic shrubs in different habitats and its ecological implication. *Acta Pedologica Sinica*, 49, 289–295. [尹传华, 董积忠, 石秋梅, 张科, 赵振勇, 田长彦 (2012). 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, 49, 289–295.]
- Yin CH, Shi QM, Liang F, Tian CY (2013). Distribution pattern of soil salinity in *Tamarix* nebkhas in Tarim Basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 33, 287–293. [尹传华, 石秋梅, 梁飞, 田长彦 (2013). 塔里木盆地怪柳灌丛沙堆盐分分布特点研究. 水土保持通报, 33, 287–293.]
- Zeng FJ, Song C, Guo HF, Liu B, Luo WC, Gui DW, Arndt S, Guo DL (2013). Responses of root growth of *Alhagi sparsifolia* Shap. (Fabaceae) to different simulated groundwater

- depths in the southern fringe of the Taklimakan Desert, China. *Journal of Arid Land*, 5, 220–232.
- Zeng YY, Zhou JL, Li Q, Zhao JT, Meng Q (2015). Assessment of groundwater quality and pollution in Ruoqiang and Qiemo region of Xinjiang. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 38(1), 72–78. [曾妍妍, 周金龙, 李巧, 赵江涛, 孟奇 (2015). 新疆若羌-且末地区地下水质量与污染评价. *新疆农业大学学报*, 38(1), 72–78.]
- Zhang DY, Yin LK, Pan BR (2003). Study on drought resisting mechanism of *Tamarix* L. and assessing of its potential application. *Journal of Desert Research*, 23, 252–256. [张道远, 尹林克, 潘伯荣 (2003). 柽柳属植物抗旱性能研究及其应用潜力评价. *中国沙漠*, 23, 252–256.]
- Zhang LH, Chen PH, Li J, Chen XB, Feng Y (2016). Distribution of soil salt ions around *Tamarix chinensis* individuals in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 36, 5741–5749. [张立华, 陈沛海, 李健, 陈小兵, 冯亚 (2016). 黄河三角洲柽柳植株周围土壤盐分离子的分布. *生态学报*, 36, 5741–5749.]
- Zhang LH, Chen XB (2015). Characteristics of “salt island” and “fertile island” for *Tamarix chinensis* and soil carton, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in saline-alkali land. *Journal of Applied Ecology*, 26, 653–658. [张立华, 陈小兵 (2015). 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*, 26, 653–658.]
- Zhang JC, Liu CZ, Yao T, Sun T, Guo CX, Yuan HB, Tang JN, Ding F, Li XM, Song DW (2014). Exploration to sedimentary environment and grain-size characteristics in age layers of *Tamarix* sand-hillocks in Kumtag Desert. *Arid Land Geography*, 37, 1155–1162. [张锦春, 刘长仲, 姚拓, 孙涛, 郭春秀, 袁宏波, 唐进年, 丁峰, 李学敏, 宋德伟 (2014). 库姆塔格柽柳沙包年层粒度特征及其沉积环境探讨. *干旱区地理*, 37, 1155–1162.]
- Zhao CY, Wang T (2005). Current research status and prospects of vegetation succession on sandy land during its desertification process in semiarid regions of China. *Chinese Journal of Ecology*, 24, 1343–1346. [赵存玉, 王涛 (2005). 沙质草原沙漠化过程中植被演替研究现状和展望. *生态学杂志*, 24, 1343–1346.]
- Zhao YJ, Xia XC (2011). *Research on the Relationship between Tamarix Cone and Environmental Change in Lop Nur Region of Xinjiang*. Science Press, Beijing. 38–142. [赵元杰, 夏训诚 (2011). 新疆罗布泊红柳沙包与环境研究. 科学出版社, 北京. 38–142.]
- Zheng T, Li JG, Li WH, Wan JH (2010). Soil heterogeneity and its effects on plant community in oasis desert transition zone in the lower reaches of Tarim River. *Journal of Desert Research*, 30, 128–134. [郑田, 李建贵, 李卫红, 湾疆辉 (2010). 塔里木河下游绿洲荒漠过渡带土壤异质性及对植物群落的影响. *中国沙漠*, 30, 128–134.]

责任编辑: 李新荣 责任编辑: 李 敏

扫码加入读者圈
听语音, 看问答