

吉兰泰盐湖中心盐爪爪灌丛沙堆形态及其沉积特征

魏亚娟¹, 党晓宏^{1,2}, 蒙仲举¹, 汪季^{1,2}, 翟正江³, 祁帅¹

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2.内蒙古杭锦荒漠生态系统国家定位观测研究站, 内蒙古 鄂尔多斯 017400; 3.神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300)

摘要:为了探究盐湖区盐爪爪灌丛沙堆形态特征和沉积特征,以阿拉善盟吉兰泰盐湖中心盐爪爪灌丛沙堆为研究对象,通过野外调查和室内分析研究了非围封区、围封区灌丛沙堆形态特征和表层沉积物粒度特征。结果表明:(1)研究区盐爪爪灌丛沙堆均处于初级发育阶段,非围封区盐爪爪灌丛沙堆密度远大于围封区。根据独立样本 T 检验分析,研究区盐爪爪灌丛沙堆高度(H_d)、体积(V)、底面积(A_d)、长轴与短轴之比(L/W)均无显著差异。(2)研究区表层颗粒主要以细砂和极细砂为主,但围封区粒度集中度大于非围封区,同时灌丛沙堆沉积物土壤粒度由迎风坡向背风坡趋于细化,从坡脚到坡顶沙粒趋于细化。(3)沉积物粒度由坡底到坡顶、迎风坡到背风坡平均粒度逐渐减小。灌丛沙堆分选性较差,沉积物粒度主要以细组分为主,沉积物颗粒分布较为集中。因此,研究结果有助于定量分析盐爪爪的固沙阻沙能力,为吉兰泰盐湖区生态系统保护与恢复提供了数据资料。

关键词:盐爪爪;灌丛沙堆;形态特征;沉积特征;围封区;盐湖中心

中图分类号:P931.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)03-0385-06

Morphological and Sedimentary Characteristics of Dune Covered by *Kalidium foliatum* Nebkhas in the Center of Jilantai Salt Lake

WEI Yajuan¹, DANG Xiaohong^{1,2}, MENG Zhongju¹, WANG Ji^{1,2}, ZHAI Zhengjiang³, QI Shuai¹

(1. Institute of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. National Observation and Research Station of Inner Mongolia Hangjin Desert Ecosystem, Ordos, Inner Mongolia 017400, China; 3. Shen Hua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China)

Abstract: The aim of this study was to explore the morphological and sedimentary characteristics of *Kalidium foliatum* Nebkhas in salt lake district. The dunes covered by *Kalidium foliatum* Nebkhas in the Center of Jilantai Salt Lake in Alashanmon, Inner Mongolia, China, was selected as the studied sites, and the investigation on morphological characteristics of and the grain size characteristics of the surface sediments in two land use patterns was carried out by means of correlation analysis and regression analysis. The results showed that: (1) *Kalidium foliatum* Nebkhas were all at the primary growth stage in two land use patterns; the density of *Kalidium foliatum* Nebkhas in non-enclosed area was much higher than that in enclosed area; according to independent sample T-test analysis, there was no significant difference in H_d , V , A_d , L/W between the two land use patterns; (2) the grains of surface sediment were mainly fine sand and very fine sand in research area, but the concentration of grain size in the enclosure area was greater than that in the non-enclosed area; at the same time, the grain size of leeward slope of *Kalidium foliatum* Nebkhas tends to be finer than that in the windward slope, and the grain size tends to be finer from the foot of slope to the top of slope; (3) under two land use patterns, the grain size of surface sediment of *Kalidium foliatum* Nebkhas gradually decreases from slope bottom to slope top, the average grain size of windward slope was larger than leeward slope, and sorting of grain size was weak in the dune covered by shrub, therefore, the grain size of sediment was mainly composed of coarse components, and the distribution of sediment particles was relatively dispersed. Therefore, the research results are helpful for quantitative analysis of sand fixation ability of

收稿日期:2019-03-18

修回日期:2019-06-27

资助项目:国家自然科学基金(41967009);内蒙古农业大学高层次人才引进科研启动项目(NDYB2016-08);国家重点研发计划专项(2016YFC0501003)

第一作者:魏亚娟(1994—),女,内蒙古赤峰人,在读博士,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:2404336139@qq.com

通信作者:党晓宏(1986—),男,陕西合阳人,博士,副教授,硕士生导师,从事荒漠化防治及荒漠地区碳汇研究。E-mail:dangxiaohong1986@126.com

Kalidium foliatum, and provide data for ecosystem protection and restoration in Jilantai Salt Lake area.

Keywords: *Kalidium foliatum*; nebkha; morphological characteristics; sedimentary characteristics; enclosed area; salt-lake center

20 世纪 70 年代,由于吉兰泰盐湖开采规模扩大,人口激增,导致“百万亩天然梭梭林地”荡然无存。植被资源掠夺性开发,使原本十分脆弱的绿洲生态环境遭到空前破坏。加之地下水资源过度开采,导致吉兰泰地下水位严重下降。随之地表流沙四起,威逼盐湖,直至大面积流沙覆盖干盐滩。与此同时,干旱多风的气候环境促进吉兰泰盐湖由沙漠中心盐湖向沙下盐湖转化^[1]。20 世纪 80 年代,通过封沙育林育草措施、人工造林措施和工程防护措施等综合治理,形成有效的防护林体系,对流沙侵害盐湖起到了明显的防护作用。尤其是荒漠—绿洲过渡带盐爪爪(*Kalidium foliatum*)灌丛沙堆,通过固定绿洲外围大量的流沙,阻止流沙对盐湖的侵袭,在防风固沙、保持绿洲过渡带生态多样性和抑制绿洲荒漠化以及对维护绿洲安全起着极其重要的作用^[2],是保护盐湖的最后一道生态防线。

随着风蚀地貌学和沙漠化过程研究的不断深入,灌丛沙堆得到广泛关注。Tengberg 和 Chen^[3]通过对基纳法索和突尼斯的灌丛沙堆形态参数进行回归分析,阐明了灌丛沙堆形态特征和发育模式。哈斯等^[4]通过对小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙堆野外调查,表明灌丛沙堆水平尺度与高度之间存在显著相关关系。常兆丰等^[5]对民勤地区沙漠边缘几种常见固沙植物进行比较,得出植物阻固流沙的能力与灌丛沙堆高度有关,沙堆高度越高,阻固流沙能力越强。张萍等^[6]对不同生境白刺(*Nitraria tangutorum*)灌丛沙堆表层沉积物的研究发现,沉积物属短距离风力搬运、分选产物。刘海霞等^[7]对毛乌素沙地灌丛沙堆进行了深入研究,结果表明灌丛沙丘粗颗粒物主要来自于丘间地中砂和细砂。王乐等^[8]通过野外采样和室内分析,研究了半干旱地区农田灌丛沙堆形态及其沉积特征。但是,迄今为止关于在盐湖绿洲区非围封和围封条件下对灌丛沙堆形态和沉积物的影响却鲜有报道。

经实地考察发现,盐爪爪不仅是荒漠生态系统的关键种,也是吉兰泰盐湖地带性植被(显域植被)。由于盐爪爪灌丛与风成沉积物的综合作用形成了盐爪爪灌丛沙堆,成为吉兰泰盐湖区典型风积地貌景观。基于此,本研究以盐爪爪灌丛沙堆为研究对象,通过野外测定和室内分析对吉兰泰盐湖中心非围封和围封条件下盐爪爪灌丛沙堆形态特征和沉积特征进行对比分析,以期了解吉兰泰盐湖中心盐爪爪灌丛沙堆的形态特征和沉积特征。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉兰泰荒漠—绿洲过渡带边缘的盐湖中心,地理位置 $105^{\circ}43'42''$ — $105^{\circ}45'16''$ E; $30^{\circ}47'10''$ — $39^{\circ}47'2''$ N。北部乌兰布和沙漠和西部雅玛雷克沙漠为其提供了充足的沙源^[9-10]。该区域属典型的温带大陆性季风气候,气候特点为:降雨稀少、夏热冬寒、风大沙多、蒸发强烈,气候条件十分恶劣。多年平均降雨量在 100~150 mm;年降雨变率较大,降雨主要集中在 7—9 月,占全年降雨量的 75%左右;年平均气温 8.6°C ,最热月平均气温 25.4°C (7 月),最冷月平均气温 -10.5°C (1 月);起沙风(6 m/s)年均出现 272.5 次,风向主要以西北风为主。该区域主要以沙生灌木和耐盐碱半灌木、小灌木为主,湖盆洼地、干河床及河滩地是植物赖以生存的生境。研究区 1 为非围封区,人为扰动相对较小,植物结构单一。主要植物为盐爪爪,植被盖度不足 8%。土壤类型主要为风沙土和盐碱土。地表结有 1.75 mm 左右的盐结皮。研究区 2 为围封区(1983 年采用围栏封育),其主要植物为盐爪爪,分布少量低矮的红砂(*Reaumuria songarica*)、白刺、芨芨草(*Achnatherum splendens*)。植被盖度在 20%左右,土壤主要为风沙土。

1.2 研究方法

于 2018 年 10 月初,根据围封方式和盐爪爪灌丛沙堆发育状况,分别在非围封区与围封区选择有代表性的位置设立 2 个面积为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 样地,2 个样区共测定 223 个灌丛沙堆。利用卷尺、游标卡尺对每一样地盐爪爪灌丛沙堆个数、沙堆走向和形态参数进行调查和测量。沙堆参数包括:长轴(L)(与主风向一致)、短轴(W)(垂直于主风向)、沙堆高(H_d)。盐爪爪参数包括:高度(H_z)、植被盖度(C)。因为盐爪爪灌丛沙堆均呈丘顶浑圆,底面积呈圆形或椭圆形,侧影面积近似抛物线。故根据张萍^[11]等人对白刺灌丛沙堆的研究,计算其水平尺度(D)、底面积(A_d)、体积(V)、侧影面积(A_c)。

根据沙堆形态大小,在 2 个样区共选取 10 个中等大小的典型灌丛沙堆作为沉积物采样对象。分别采集灌丛沙堆各部位(迎风坡坡脚、迎风坡坡中、沙堆顶部、背风坡坡中、背风坡坡脚)表层沉积物,带回实验室用 3000MU 型激光粒度仪进行测定,共测定 50 个样品。盐爪爪灌丛沙堆土壤机械组成以美国制^[12]作为土壤粒径分级标准。采用 Folk-Ward 的图解法^[13]计算粒度参数:平均粒径(d_0)、标准偏差(δ)、偏度(SK)与峰态(K_g)。

1.3 数据处理与分析

运用 Microsoft Excel 2010 对灌丛沙堆数据进行整理, 采用 SPSS 20.0 软件对灌丛沙堆数据进行统计分析、运用 Origin 2017 绘图。

2 结果与分析

2.1 围封对盐爪爪灌丛沙堆形态特征的影响

由表 1 可知, 2 个样区灌丛沙堆个数相差 97 个, 非

表 1 不同围封方式灌丛沙堆形态参数统计分析

参数	非围封区—面积: 30 m×30 m 样本数: 160 个										
	L/cm	W/cm	H/cm	D/cm	H _d /cm	A _d /cm ²	V/cm ³	A _c /cm ²	L/W	H _z /cm	C/%
平均值	82.87±39.35a	60.62±32.15a	22.35±9.45b	71.75±34.44a	10.7±6.14a	995.17±1076.69a	16425.36±41153.46a	2342.03±2579.54a	1.4±0.34a	12.87±5.29b	44.75±17.67b
最大值	185.00	143.00	39.33	154.50	23.00	3194.44	74721.53	9369.07	2.57	26.00	78
最小值	24.00	21.00	8.33	24.00	4.00	149.33	661.49	226.08	0.70	6.00	18
变异系数	0.47	0.53	0.42	0.48	0.57	1.08	2.51	1.10	0.24	0.41	0.39
参数	围封区—面积: 30 m×30 m 样本数: 63 个										
	L/cm	W/cm	H/cm	D/cm	H _d /cm	A _d /cm ²	V/cm ³	A _c /cm ²	L/W	H _z /cm	C/%
平均值	56.08±18.12b	41.38±15.22b	41.13±9.87a	48.73±16.12b	15.79±5.8a	1189.53±620.34a	19153.57±17484.03a	1032.38±667.04b	1.4±0.28a	25.34±7.48a	57.30±7.63a
最大值	93.00	76.00	61.00	84.00	29.00	2650.00	77461.71	2769.48	2.40	41.00	81
最小值	25.00	15.00	20.00	22.00	7.00	253.33	1564.24	189.97	1.04	12.00	35
变异系数	0.32	0.37	0.24	0.33	0.37	0.52	0.91	0.65	0.20	0.30	0.11

注: 小写字母相同表示差异不显著, $p > 0.05$; 小写字母不同, 表示差异显著, $p < 0.05$ 。

2.2 盐爪爪灌丛沙堆各形态参数之间的关系

在 2 个样区中, L 与 W 的相关系数分别为 0.869, 0.854, 说明在 2 个样区中, 灌丛沙堆 L 与 W 在 0.01 水平上呈显著相关。根据回归方程可知, L 与 W 在非围封区和围封区均为一次函数, R^2 分别为 0.729 5, 0.755 2。说明灌丛沙堆宽度随长度的增大而增大, 但围封区增大速率较非围封区快(图 1A, B)。

在 2 个样区中, H 与 D 在 0.01 水平上呈显著相关, H 与 D 的相关系数分别为 0.635, 0.759, 回归方程均为二次函数, R^2 分别为 0.625 5, 0.410 3, 其中, 二次项系数均为负, 表明沙堆形成初期, 灌丛高度随水平尺度增加而增高, 然后到达一定高度后, 随水平尺度增加, 灌丛高度逐渐降低。截距为负, 说明该样区在灌丛沙堆形成之前, 便有一定高度(图 1C, D)。

2 样区内, A_c 与 V 在 0.01 水平上均呈显著相关, A_c 与 V 的相关系数分别为 0.843, 0.817。通过回归分析发现 2 样区最佳拟合方程为幂函数, R^2 系数分别为 0.929 7, 0.778 3。由公式知, 其幂函数指数均大于 1, 拟合曲线上陡下缓, 即起初灌丛沙堆侧影面积增加速率大于体积增大速率, 当达到某一值后, 沙堆体积增大速率小于侧影面积的速率(图 1G, H)。

2 样区中, H_d 与 A_d 在 0.01 水平上均呈显著相关, H_d 与 A_d 的相关系数分别为 0.762, 0.885。回归方程均表现为一次函数, R^2 分别为 0.996 8, 0.464 0。在非围封区 A_d 与 H_d 为一次函数, 表明沙堆高随底面积增大而增高; 在围封区为二次函数, 其二次系数为负, 沙堆高度随底面积增大而增高, 表明起初沙堆高度随底面积增大而增

围封区是围封区的 1.54 倍。可见非围封区灌丛沙堆密度远远大于围封区。围封区 H_z , C 较非围封区分别增加 96.89%, 28.04% ($p < 0.05$), 有利于灌丛截阻更多的流沙。另外, 根据独立样本 T 检验对灌丛沙堆相关指标实测数据进行检验, 发现研究区 H_d , V , A_d , L/W 组内和组间 Sig 值 > 0.05 , 说明非围封区和围封区这些指标无显著差异; 其余指标组内和组间 Sig 值 < 0.05 , 说明非围封区和围封区其余指标存在显著差异。

高, 当沙堆高达到 51 cm 左右, 经过短暂的稳定期后, 沙堆高随底面积增大而减小。这说明 2 种围封方式下灌丛沙堆均处于初始发育阶段(图 1E, F)。

2.3 盐爪爪灌丛沙堆表层沉积物粒度特征

2.3.1 盐爪爪灌丛沙堆表层沉积物粒度特征 由表 2 知, 非围封区与围封区盐爪爪灌丛沙堆土壤颗粒组成主要以细砂(48.89%, 47.74%)和极细砂(24.83%, 24.36%)为主, 其次是中砂(12.75%, 15.49%)和粉粒(10.47%, 9.59%), 其他粒径含量相对较少。围封区灌丛沙堆表层沙粒分布较非围封区集中。从不同坡向看, 迎风坡黏粒、粉粒和极细砂含量小于背风坡, 其他砂粒含量与之相反。也就是说, 由迎风坡向背风坡沙粒趋向于细化。从不同坡位看, 黏粒、粉粒含量表现为: 坡顶 $>$ 背风坡坡底 $>$ 背风坡坡中 $>$ 迎风坡坡中 $>$ 迎风坡坡底; 极细砂: 背风坡坡底 $>$ 背风坡坡中 $>$ 坡顶 $>$ 迎风坡坡中 $>$ 迎风坡坡底; 细砂: 迎风坡坡中 $>$ 背风坡坡中 $>$ 背风坡坡底 $>$ 坡顶 $>$ 迎风坡坡底; 其他粒径含量大体表现为坡底 $>$ 坡中 $>$ 坡顶。从中可以发现, 从坡底到坡顶沙粒趋于细化。

2.3.2 盐爪爪灌丛沙堆表层沉积物粒度参数特征 平均粒度(d_0)反映了沙堆表层沉积物平均粒度分布状况。标准偏差(δ)反映了表层沉积物分布的离散状况; 其值越小表示沉积物分布集中, 分选性越好, 反之分选性越差。偏度(SK)反映沉积物粒度频率曲线的对称性, 表示沉积物粗细分布特征。峰度(K_g)是土壤颗粒粒度分布在平均粒度两侧集中程度的参数。由表 3 可知, 2 个样地灌丛沙堆表层沉积物由坡底到

坡顶平均粒度逐渐减小,且背风坡小于迎风坡,说明平均粒径逐渐细化;灌丛沙堆表层沉积物 δ 在 0.96~1.43,说明 2 个样地灌丛沙堆不同坡向和坡位分选性表现为中等和较差;SK 在 -0.95~-0.05,坡底和坡

中呈极负偏,坡顶近于对称,说明表层沉积物以细组分为主。而 K_g 分别呈中等、尖窄和很尖窄,说明沉积物颗粒频率分布曲线峰形逐渐变窄,沉积物颗粒分布较为集中。

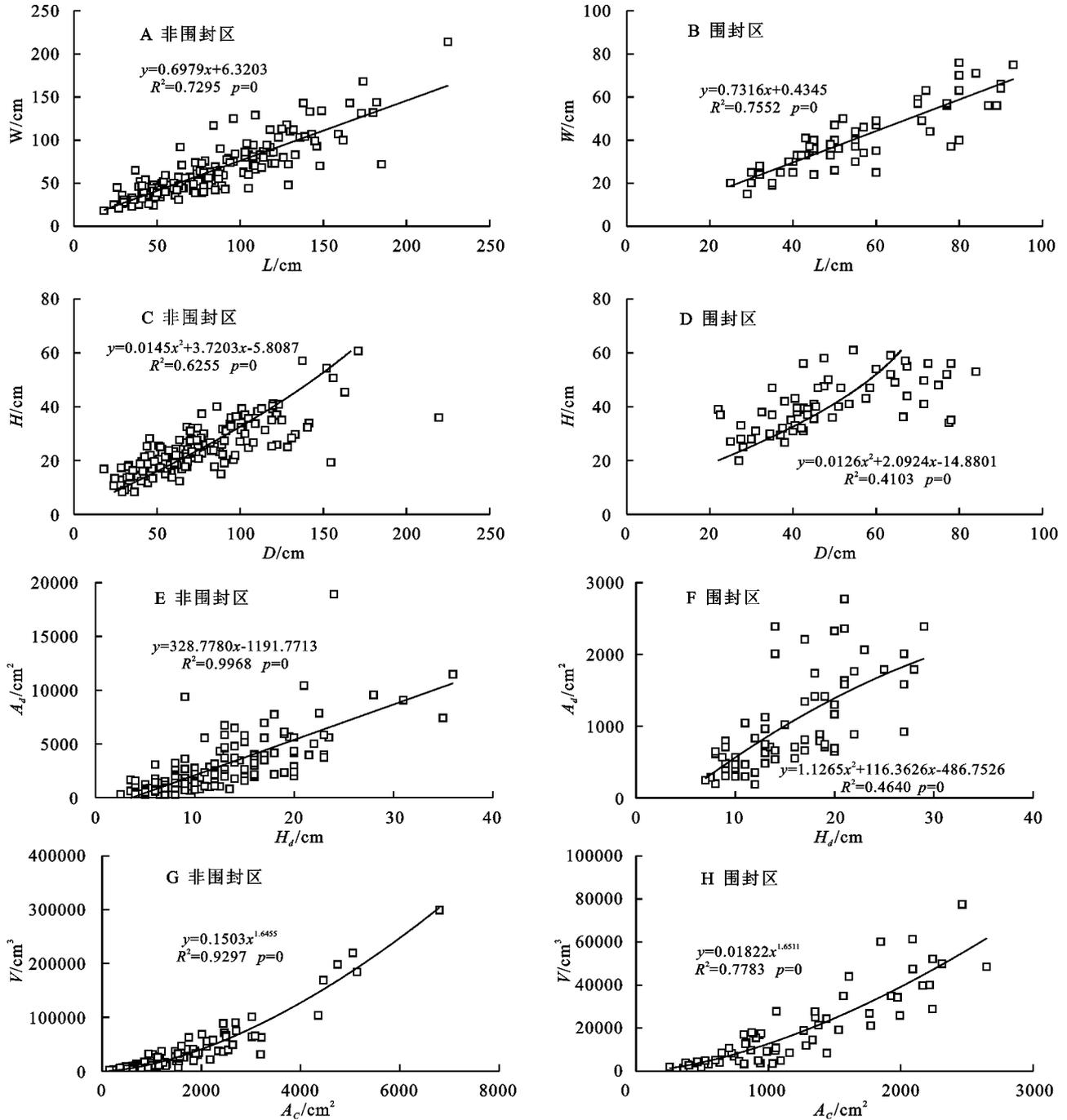


图 1 不同围封方式盐爪爪灌丛沙堆形态参数之间关系

3 讨论

吉兰泰盐湖荒漠绿洲过渡带属于温带大陆性季风气候,风是该区域沙粒运移的主要动力来源。前人研究表明,植被盖度是影响土壤风蚀状况的关键因素,植被通过覆盖地表,阻挡气流分解风力,改变灌丛沙堆风场结构和灌丛积沙体表面蚀积分布。本研究发现,非围封

区沙堆单体规模、沙堆密度较围封区大,说明围封对盐湖周边生态环境有一定改善作用。多年围封封育,植被生长条件得到改善,植被盖度为 20%,而非围封区仅为 8%,植被盖度增加不仅增大地表沙粒起动风速,减少或抑制表层颗粒物质的吹蚀,而且有利于细颗粒物降尘堆积。此外,盐爪爪蒸腾速率一般小于其他沙生灌木,有利于保持土壤水分,防治土壤进一步风蚀。植物阻沙

能力是由地上部分和地下部分共同作用的结果^[14]。围封区盐爪爪高度大于非围封区, 可能是因为围封区灌丛沙堆水分、养分条件优于非围封区, 该结果有待于进一

步论证。非围封区灌丛沙堆植被盖度在 18%~78%, 围封区在 35%~81%, 说明 2 种围封方式下绝大部分灌丛沙堆处于连续堆积的状态^[15]。

表 2 不同围封方式灌丛沙堆表层土壤颗粒组成

立地类型	坡位	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%					砾石/%
				极细砂	细砂	中砂	粗砂	极粗砂	
非围封区	迎风坡坡底	0	2.52	12.85	45.35	28.68	10.22	0.35	0.03
	迎风坡坡中	0.02	6.81	16.68	54.02	21	1.47	0	0
	坡顶	0.32	18.15	30.87	46.33	2.17	1.44	0.72	0
	背风坡坡中	0.13	11.16	31.53	51.12	6.06	0	0	0
	背风坡坡底	0.22	13.71	32.23	47.64	5.85	0.28	0.07	0
	平均值	0.14	10.47	24.83	48.89	12.75	2.68	0.23	0.01
围封区	迎风坡坡底	0	2.08	12.92	44.74	29.49	10.77	0	0
	迎风坡坡中	0	6.49	16.24	52.02	23.03	2.22	0	0
	坡顶	0	16.02	29.88	43.32	10.78	0	0	0
	背风坡坡中	0	10.52	31.34	50.52	7.62	0	0	0
	背风坡坡底	0	12.86	31.44	48.12	6.51	1.07	0	0
	平均值	0	9.59	24.36	47.74	15.49	2.81	0	0

表 3 不同围封方式灌丛沙堆表层粒径配级

立地类型	坡位	平均粒度(d_0)	标准偏差(δ)	偏度 (SK)	峰度 (K_g)
非围封区	迎风坡坡底	3.31	1.43	-0.8	1.71
	迎风坡坡中	3.06	1.06	-0.7	1.43
	背风坡坡顶	2.15	0.98	-0.06	0.97
	背风坡坡中	2.54	0.99	-0.47	1.26
	背风坡坡底	3.15	1.17	-0.89	1.59
	平均值	2.15	0.98	-0.06	0.97
围封区	迎风坡坡底	3.23	1.17	-0.95	1.48
	迎风坡坡中	3.05	0.98	-0.54	1.29
	背风坡坡顶	2.14	0.96	-0.05	0.95
	背风坡坡中	2.54	0.97	-0.38	1.22
	背风坡坡底	3.13	1.07	-0.67	1.42
	平均值	2.14	0.96	-0.05	0.95

本研究中, 非围封区与围封区灌丛沙堆 H 与 L , W 比值分别为 0.13, 0.17, 0.28, 0.38, 表明灌丛沙堆水平增长速度大于垂直增长速度, 这是盐爪爪生长发育过程中的一种自我保护策略^[16]。非围封区和围封区灌丛沙堆 L 与 W 最佳拟合关系为一次函数, 该试验结果与张金虎等^[17] 对荒漠绿洲过渡带的影响结果不同。这说明 2 种围封方式下盐爪爪灌丛沙堆均处于初始发育阶段^[3,11]。通过函数斜率可知, 围封区灌丛沙堆增长速率大于非围封区, 表明围封区灌丛沙堆拦截沙的能力能力大于非围封区。灌丛沙堆 D 与 H 最佳拟合方程为二次函数, 根据二次方程求出, 灌丛沙堆高度分别为 128 cm, 83 cm, 对应的水平尺度分别为 232 cm, 72 cm。可见沙堆最大高度远远

大于实测值, 说明灌丛沙堆现在仍然处于初始发育阶段, 且非围封区增长空间较围封区大。而 2 种围封方式下灌丛沙堆 A_d 与 H_d 最佳拟合曲线分别为一次函数和二次函数, 该试验结果与彭飞等^[18] 对白刺灌丛沙堆的研究结果相同。灌丛沙堆 A_c 与 V 最佳拟合函数为幂函数, 这是盐爪爪与风沙流之间互馈效应的结果。盐爪爪植株生长, 使其捕沙能力增强, 促进沙堆体积快速增长, 而沙物质增多又增加了盐爪爪的增长。

灌丛沙堆是远源和近源沙物质遇到灌丛阻拦, 并在周围沉积、重新分选形成的^[19-20]。本研究中, 2 种围封方式下灌丛沙堆表层沉积物差异不大, 总体特征为以细砂和极细砂为主, 其次是粗砂, 粉粒和黏粒含量相对较少。平均粒径 ($>122.53 \mu\text{m}$) 偏粗, 分选性差, 沉积物主要以粗组分为主, 颗粒分布相对分散。该结果与尚河英等^[21] 对不同立地盐爪爪灌丛沙堆的研究结果一致, 再一次证明了 2 种围封方式下盐爪爪灌丛沙堆处于初始发育阶段。但非围封区灌丛沙堆粉粒、黏粒含量较围封区多, 有利于灌丛沙堆碳氮物质的积累^[22]。非围封区地表植被覆盖度较低, 为土壤风蚀提供了条件, 促进了地表细颗粒物质的流失。其次, 非围封区的灌丛沙堆密度大于围封区, 使进入样区的紊流加强, 气流对丘间低地的侵蚀作用加强, 导致灌丛沙堆表层沉积物质粉粒、黏粒含量大于围封区。另外, 表层沉积物由迎风坡向背风坡沙粒趋于细化, 从坡脚到坡顶沙粒趋于细化。这是顺风向粒度变细的结果。风沙流在运移过程中受到灌丛沙堆阻

挡,在迎风坡前形成反射流,与前进的气流相撞,消耗了一部分能量,风速在迎风坡前降低,加之粗颗粒自身重力的影响,使粗颗粒在此沉积。与此同时,风沙流在向上爬升过程中消耗的能量最多,加之盐爪爪植株干扰,使到达顶端的风沙流风速最低,细颗粒物在此沉积。而剩余细颗粒物被运移至背风坡,气流在背风坡形成回旋流,风速再次减弱,输沙率降低,细颗粒物在背风坡沉降^[23]。另外气流由灌丛沙堆两侧向背风坡移动过程中,由于受到灌丛和积沙体共同作用,气流向外扩散,使到达背风坡风速减小,细颗粒物进行沉降^[24]。

4 结论

(1) 非围封区盐爪爪灌丛沙堆密度是围封区的1.54倍。吉兰泰盐湖区灌丛沙堆形态相关性($r > 0.762$)较好,且灌丛沙堆均处于初级发育阶段。

(2) 灌丛沙堆表层颗粒主要以细砂($>45\%$)和极细砂($>20\%$)为主,但围封区粒度集中度大于非围封区,同时灌丛沙堆迎风坡向背风坡沙粒趋向于细化,从坡脚到坡顶沙粒趋于细化。灌丛沙堆表层沉积物粒度由坡底到坡顶、迎风坡到背风坡平均粒度逐渐减小;灌丛沙堆分选性($\delta > 0.96$)较差,沉积物粒度主要以粗组分为主,沉积物颗粒分布较为分散。

参考文献:

- [1] 耿侃,陈育峰.吉兰泰盐湖的形成、发育和演化[J].地理学报,1990,45(3):341-349.
- [2] 席军强,赵翠莲,杨自辉,等.荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆土壤水分空间分布及入渗特征[J].草业学报,2016,25(11):15-24.
- [3] Tengberg A, Chen D. A comparative analysis of nebkhas in central Tunisia and northern Burkina Faso[J]. Geomorphology, 1998,22(2):181-192.
- [4] 哈斯,社会石,孙禹.内蒙古高原小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛沙丘:形态特征及表面气流[J].第四纪研究,2013,33(2):314-324.
- [5] 常兆丰,张进虎,石学刚,等.沙漠植物分层侧影与积沙成丘的关系[J].生态学报,2017,37(21):338-345.
- [6] 张萍,哈斯,岳兴玲,等.白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J].干旱区地理,2008,31(6):926-932.
- [7] 刘海霞,李晋昌,苏志珠,等.毛乌素沙地西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度和元素特征[J].中国沙漠,2015,35(1):24-31.
- [8] 王乐,李改欣,王仁德,等.半干旱区农田灌丛沙堆形态及沉积特征[J].水土保持研究,2014,21(1):76-80.
- [9] 王心源,王飞跃,杜方明,等.阿拉善东南部自然环境演变与地面流沙路径的分析[J].地理研究,2002,21(4):479-486.
- [10] 杨恒贵,张志广.吉兰泰盐湖沙害综合治理[J].中国沙漠,1994,14(2):64-68.
- [11] 张萍,哈斯,岳兴玲,等.白刺灌丛沙堆形态与沉积特征[J].干旱区地理:汉文版,2008,31(6):130-136.
- [12] 高广磊,丁国栋,赵媛媛,等.生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响[J].农业机械学报,2014,45(1):115-120.
- [13] Folk R L, Ward W C. A study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957,27(1):3-26.
- [14] 董鸣.风沙移动与植物生物量的关系以及植物固沙能力研究(英文)[J].植物学报,2001,43(9):979-982.
- [15] Kuriyama Y, Mochizuki N, Nakashima T. Influence of vegetation on aeolian sand transport rate from a back shore to a foredune at Hasaki, Japan[J]. Sedimentology, 2005,52(5):1123-1132.
- [16] 高永,党晓宏,虞毅,等.乌兰布和沙漠东南缘白沙蒿(*Artemisia sphaerocphala*)灌丛沙堆形态特征与固沙能力[J].中国沙漠,2015,35(1):1-7.
- [17] 张进虎,唐进年,李得禄,等.民勤荒漠绿洲过渡带灌丛沙堆形态特征及分布格局[J].中国沙漠,2015,35(5):1141-1149.
- [18] 鹏飞,王涛,刘立超,等.民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J].中国沙漠,2012,32(3):593-599.
- [19] 郎丽丽,王训明,哈斯,等.灌丛沙丘形成演化及环境指示意义研究的主要进展[J].地理学报,2012,67(11):1526-1536.
- [20] 谭凤翥,王雪芹,王海峰,等.柽柳灌丛沙堆及丘间地蚀积分布随背景植被变化的风洞试验[J].干旱区地理,2018,41(1):56-65.
- [21] 尚河英,尹忠东,张鹏.盐爪爪沙堆形态特征及其固沙能力分析:以卡拉贝利工程区为例[J].干旱区资源与环境,2016,30(4):79-84.
- [22] Li J, Okin G S, Epstein H E. Effects of enhanced wind erosion on surface soil texture and characteristics of windblown sediments[J]. Journal of Geophysical Research, 2009,114(2):1-8.
- [23] 张萍,哈斯,吴霞,等.单个油蒿灌丛沙堆气流结构的野外观测研究[J].应用基础与工程科学学报,2013,21(5):881-889.
- [24] 安晶,哈斯,社会石,等.内蒙古高原小叶锦鸡儿灌丛沙堆对气流结构与风蚀的影响[J].干旱区研究,2015,32(2):304-312.