

史慧杰,武胜利,张燕,等.艾比湖流域4种典型灌丛植物的环境效应[J].中国沙漠,2026,46(3):318-329.

## 艾比湖流域4种典型灌丛植物的环境效应

史慧杰<sup>1a</sup>,武胜利<sup>1ab</sup>,张燕<sup>2</sup>,肖佳奇<sup>1a</sup>,陈鹏鹏<sup>1a</sup>,黄露蕊<sup>1a</sup>,张宇博<sup>3</sup>

(1.新疆师范大学 a.地理科学与旅游学院, b.新疆维吾尔自治区高等学校师资培训中心,新疆 乌鲁木齐 830054;2.新疆生产建设兵团第五师农业科学研究所,新疆 博乐 833400;3.长春工业大学 人文信息学院,吉林 长春 130000)

**摘要:**研究艾比湖流域的梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳(*Tamarix chinensis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)与盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)典型灌丛的环境效应,对认识干旱区灌丛沙堆的形成机制、优化防风固沙植物配置具有较强的理论价值与实际意义。本文系统测定4种典型灌丛及灌丛沙堆形态参数,分析灌丛沙堆表层沉积物粒度与分形特征,识别环境敏感组分,比较4种灌丛固沙能力。结果表明:(1)4种灌丛在株高、冠幅等形态特征上存在显著差异。怪柳株高可达2.4 m、冠幅可达83.32 m<sup>2</sup>,形成的沙堆体积约167.73 m<sup>3</sup>,显著高于梭梭、白刺、盐节木。(2)不同灌丛下沉积物的粒级组成、粒度参数、分形维数及环境敏感组分含量呈现明显差异。提取2.82~39 μm和39~709 μm两个环境敏感组分,怪柳对细组分(2.82~39 μm)的拦截能力最强(含量>20%, $D>2.5$ );梭梭对粗组分(39~709 μm)的富集能力最强(含量>90%, $D<2.1$ );白刺和盐节木的特征介于二者之间。(3)灌丛形态与灌丛沙堆形态存在一定正相关关系,灌丛与灌丛沙堆协同发育。4种灌丛单位冠幅面积拦截沙物质量从大到小依次为怪柳(22.52 m<sup>3</sup>)、白刺(1.51 m<sup>3</sup>)、盐节木(0.92 m<sup>3</sup>)、梭梭(0.53 m<sup>3</sup>),怪柳灌丛固沙能力最强。

**关键词:**灌丛沙堆;固沙能力;分形维数;环境敏感组分;艾比湖流域

文章编号:1000-694X(2026)03-318-12

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00251

中图分类号:Q94

文献标志码:A

### 0 引言

灌丛沙堆是风沙流前进过程中受灌丛阻挡,在灌丛内和灌丛周边风沙流中的碎屑物质沉降、堆积而形成的风积地貌,广泛分布于干旱、半干旱地区及沙质海岸带<sup>[1]</sup>。灌丛沙堆在干旱区生物多样性保护、区域生态建设、土地荒漠化监测与评价以及区域环境演变历史重建等方面具有重要意义<sup>[2]</sup>。灌丛沙堆的形成与演化需植物、沙源和风力共同作用<sup>[3]</sup>。其形态随灌丛类型、群落密度和演化阶段差异显著<sup>[4-5]</sup>。灌丛植株改变风沙流结构,拦截风沙流中的碎屑物质,直接影响灌丛沙堆表层沉积物的粒级组成<sup>[6-7]</sup>。区域沙源条件是灌丛沙堆形成与演变的基础<sup>[8-9]</sup>。环境敏感粒级的提取可揭示关键粒径区间,准确地反映风蚀强度与植被阻沙效率<sup>[10-11]</sup>。环境敏感粒级在揭示沉积物动力条件、物源变化等方面研究成果显著<sup>[12-15]</sup>。但不同灌丛形态沙堆表层沉积物

的粒度特征、环境敏感粒级特征及其固沙能力的系统研究鲜见报道。

艾比湖流域位于准噶尔盆地最低点、东邻古尔班通古特沙漠,是西北干旱区典型的内陆封闭型湖泊。艾比湖流域是北疆荒漠-绿洲-湖泊复合生态系统的核心地区,也是风沙输送与盐尘释放的重要源区,在中国荒漠化过程研究与防控中具有重要地位<sup>[16]</sup>。自20世纪50年代以来,在气候变化与人类活动共同影响下,艾比湖湖面显著萎缩、盐渍化与沙漠化持续加剧,诱发更频繁次的盐尘风暴<sup>[17]</sup>。自国家级自然保护区设立以来,当地已陆续启动湿地恢复、草地植被修复、退耕还林还草及水资源调控等一系列生态治理工程,但来水的刚性约束与高强度的农业灌溉之间的矛盾依然突出,持续进行荒漠化防治势在必行<sup>[18-20]</sup>。本研究以艾比湖流域4种典型固沙灌丛为研究对象,测定灌丛与沙堆形态参数,分析沙堆表层沉积物的粒度组成、粒度参数及

收稿日期:2025-07-18; 改回日期:2025-10-21

资助项目:湖北省重点研发计划援疆援藏项目(2023EGA124)

作者简介:史慧杰(2002—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail:2984747390@qq.com

通信作者:武胜利(E-mail:wushengli77@126.com);张燕(E-mail:1104094958@qq.com)

环境敏感粒度组分,定量研究4种灌丛固沙能力,旨在为艾比湖流域荒漠化防治提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

艾比湖流域属于温带大陆性干旱气候,年均气温约7.8℃,多年平均降水量90.9mm,多年平均蒸发量1662mm。全年大风日数164d,最多185d,最大风速55.0 m·s<sup>-1</sup>,发生在春夏两季,风向多为西北风。

研究区位于艾比湖流域东南部,流域4种典型固沙灌丛梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、怪柳(*Tamarix*

*ix chinensis*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)与盐节木(*Halocnemum strobilaceum*)的空间格局呈现显著的方向性差异(图1,2)。从整体分布特征来看,以湖岸为中心向四周,植被类型依次过渡为盐节木、白刺和梭梭。北部分布有盐节木和怪柳群落,呈连续的环带分布,白刺与梭梭镶嵌其中。南部分布有怪柳、梭梭、白刺和盐节木群落,怪柳沿河道发育成较宽的环带,外围以梭梭为主、白刺为辅,盐节木少量分布。东部分布有白刺、怪柳、盐节木和梭梭群落,其中白刺分布面积最大,怪柳呈条带状分布,与白刺相间分布,盐节木散点分布其中,梭梭面积最小。西部分布有梭梭、盐节木、白刺和怪柳,梭梭斑块集中且规模最大,盐节木次之,白刺和怪柳零星分布。

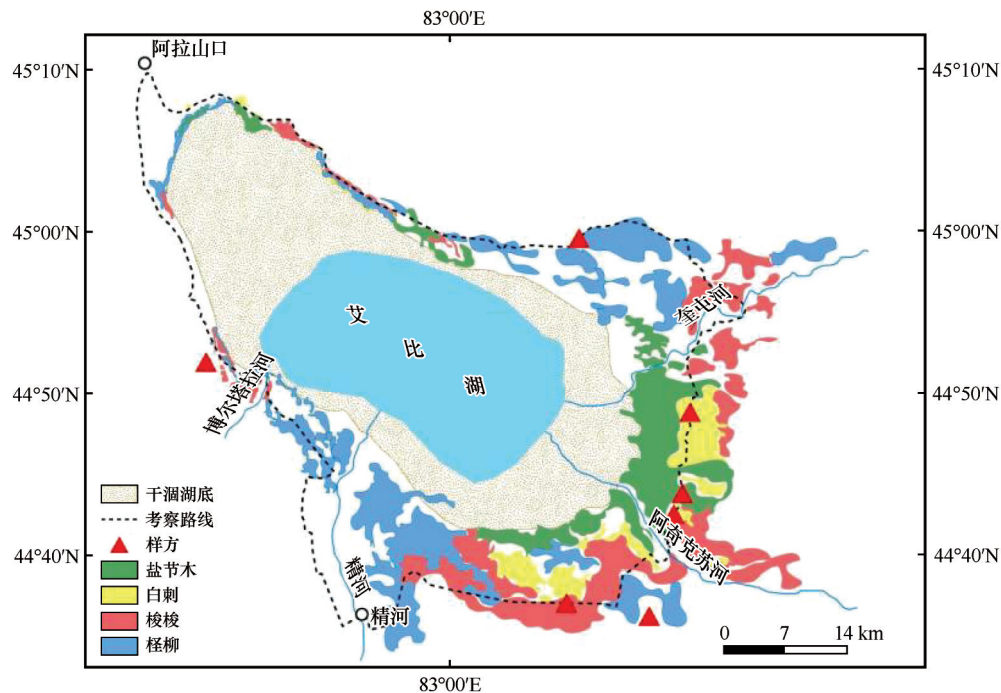


图1 4种灌丛植物分布及样方分布

Fig.1 Distribution of four shrub species and locations of sampling plots in the study area

### 1.2 数据来源及处理

#### 1.2.1 植物形态测量

沿环艾比湖路线,在4种典型灌丛分布区,按随机取样原则自南向北布设7个样方(表1)。使用卷尺测量沙堆上植物的株高、冠幅,记录伴生植物种类及植被盖度。

#### 1.2.2 沙堆形态测量

用卷尺对样方内每个沙堆的长轴、短轴、高度进行测量,对每个形态参数均重复测量3次,其中灌丛的冠幅、灌丛沙堆长轴、短轴均采用十字交叉法。

野外实地调查发现,梭梭、怪柳、白刺与盐节木灌丛沙堆在自然状态下多呈近半椭球体。灌丛的冠幅在二维投影上接近椭圆,因此以椭圆估算其冠幅面积。以椭球体估算其灌丛体积,以半椭球体估算其沙堆体积,单位冠幅面积可拦截沙物质的体积,计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$S_p = 1/4\pi \times L_d \times W_d \quad (1)$$

$$V_p = 1/6\pi \times W_p \times H_p \quad (2)$$

$$V_d = 1/6\pi \times L_d \times W_d \times H_d \quad (3)$$

$$V = V_d/S_p \quad (4)$$

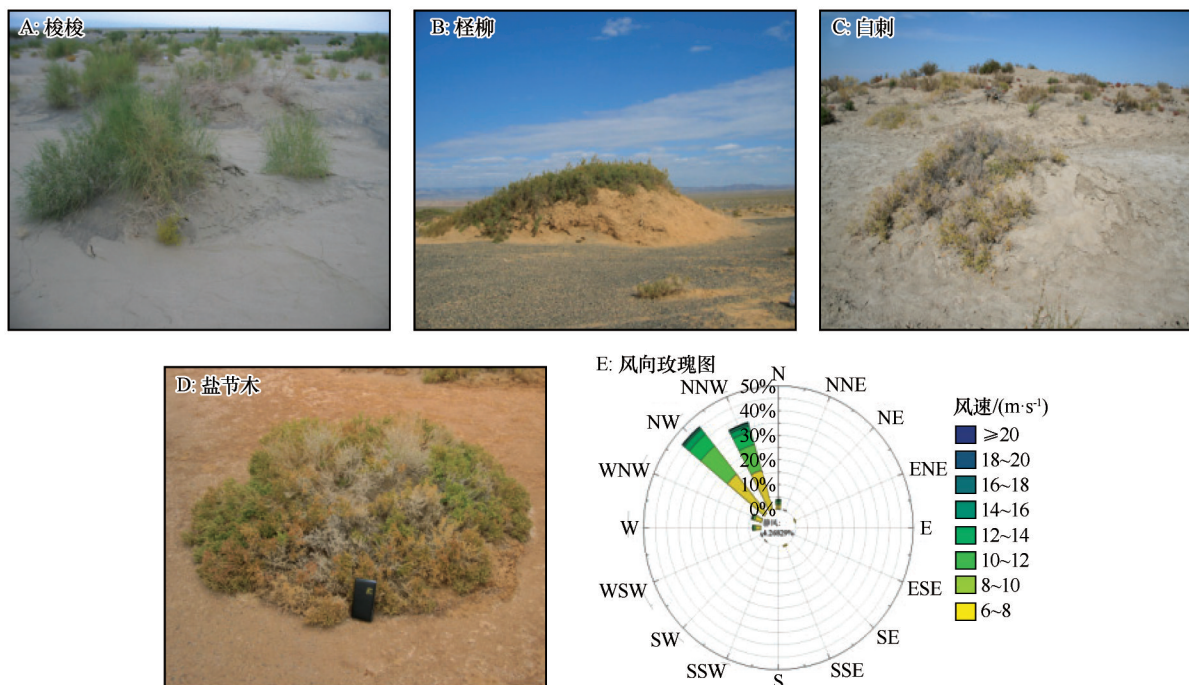


图2 研究区固沙植物与风向玫瑰图

Fig.2 Wind rose diagram and spatial distribution of sand-stabilizing vegetation in the study area

表1 样方大小及各类灌丛样本数

Table 1 Sizes of sampling plots and number of samples for each shrub species

样方	灌丛类型	样本数/株	样方面积
样方一	梭梭	25	50 m×50 m
样方二	怪柳	21	100 m×100 m
样方三	白刺、盐节木	14、2	50 m×50 m
样方四	盐节木、白刺	31、11	50 m×50 m
样方五	白刺	45	100 m×100 m
样方六	怪柳	5	100 m×100 m
样方七	白刺	8	50 m×50 m

$$R_d = (L_d + W_d) / 2 \quad (5)$$

式中： $L_p$ 、 $W_p$ 、 $H_p$ 分别为灌丛的长度、宽度、高度； $S_p$ 为灌丛冠幅面积； $V_p$ 为单位冠幅面积可拦截沙物质的体积； $L_d$ 、 $W_d$ 、 $H_d$ 分别为灌丛沙堆长轴、短轴和高度； $S_d$ 为沙堆底面积； $V_d$ 为沙堆体积； $R_d$ 为沙堆半径。

1.2.3 沉积物样品采集及测定

以灌丛为中心,按照迎风坡坡前、迎风坡坡脚、迎风坡中、坡顶、背风坡坡中、背风坡坡脚、背风坡坡前采集样品,将单株灌丛下的沉积物样品进行均匀混合,最终共采集56个混合样品。对采集的所有土样进行实验前预处理后,使用Malvern公司的Mastersizer2000激光粒度仪进行粒度测定。

1.2.4 粒度参数计算及粒级组成划分标准

粒度参数的计算采用Folk-Ward的粒度公式<sup>[22]</sup>,用GRADISTAT粒度分析软件得到各粒度参数,粒度分级采用Wentworth分类<sup>[23]</sup>(表2)。

表2 粒级组成划分标准

Table 2 Grain-size composition classification standard

粒级	μm
黏土	0~2
极细粉砂	2~4
细粉砂	4~8
中细粉砂	8~16
粗粉砂	16~63
极细砂	63~125
细砂	125~250
中砂	250~500
粗砂	500~1 000
极粗砂	1 000~2 000

1.2.5 分形维数的计算

分形维数能够表示土壤中不同大小颗粒物的含量<sup>[24]</sup>。

$$\left( \frac{R_i}{R_{max}} \right)^{3-D} = \frac{V(r < R_i)}{V_T} \quad (6)$$

式中： $D$ 为分形维数； $r$ 为土壤粒径； $R_i$ 为第*i*级的土壤粒径(mm)； $R_{max}$ 为土壤粒径的极大值(mm)； $V(r < R_i)$ 为土壤粒径小于*R*的土壤体积分数(%)； $V_T$ 为各粒径等级体积分数之和(%)。

### 1.2.6 环境敏感粒度组分分析

采用计算简便、得到广泛应用的粒度—标准偏差来提取沉积物对环境敏感的粒度组分。利用沉积物粒度数据,获得不同粒级的体积百分含量;使用Excel软件计算各个粒级的标准偏差;将粒级的对数作为横坐标,将标准偏差作为纵坐标,得到粒度—标准偏差曲线<sup>[12]</sup>。

### 1.2.7 统计学分析

使用Excel 2021对数据进行初步整理和分析,计算平均值和标准差。使用SPSS进行单因素方差分析,在进行方差分析前,对不同植物沙堆表层沉

积物的粒度组成进行正态性检验和方差齐性检验,发现数据总体差异显著( $P < 0.05$ ),采用LSD法进行事后多重比较。使用Origin 2021进行相关性分析和回归分析,并绘制相关图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 4种灌丛和灌丛沙堆的形态特征

#### 2.1.1 灌丛形态特征

艾比湖流域内梭梭、怪柳、白刺和盐节木灌丛在株高和冠幅上存在明显差异(表3)。灌丛株高怪柳(1.61 m) > 梭梭(0.76 m) > 盐节木(0.35 m) > 白刺(0.34 m)。灌丛冠幅面积怪柳(25.19 m<sup>2</sup>) > 白刺(11.75 m<sup>2</sup>) > 盐节木(2.93 m<sup>2</sup>) > 梭梭(2.60 m<sup>2</sup>)。怪柳株高与冠幅均明显高于其他灌丛;白刺虽然株高较低,但冠幅较大;梭梭与盐节木的冠幅均较小。

表3 灌丛沙堆形态参数

Table 3 Morphometric parameters of nebkhas formed by the four shrub species

灌丛类型	测量指标	$H_p/m$	$L_p/m$	$W_p/m$	$S_p/m^2$	$V_p/m^3$	$L_d/m$	$W_d/m$	$H_d/m$	$S_d/m^2$	$V_d/m^3$
梭梭	最大值	1.50	4.30	4.30	14.52	1.34	3.45	3.70	0.90	15.69	9.42
	最小值	0.40	0.50	0.50	0.20	0.10	1.00	0.50	0.10	0.44	0.04
	平均值	0.76	1.63	1.62	2.60	0.53	2.76	1.75	0.41	4.50	1.79
	标准差	0.28	0.86	0.86	3.03	0.31	1.16	0.80	0.24	4.02	2.53
怪柳	最大值	2.40	19.20	11.70	83.32	429.76	36.00	19.20	3.00	542.87	810.53
	最小值	0.45	1.00	1.00	0.79	0.90	6.40	2.90	0.75	14.58	13.61
	平均值	1.61	5.90	5.23	25.19	22.52	16.05	8.85	1.65	129.41	167.73
	标准差	0.50	3.47	2.70	19.36	81.60	7.38	3.73	0.58	116.77	197.28
白刺	最大值	0.73	11.00	11.00	95.03	4.32	15.60	12.80	1.95	156.83	97.47
	最小值	0.14	0.50	0.40	0.16	0.26	2.36	1.20	0.24	2.45	0.54
	平均值	0.34	3.32	3.72	11.75	1.51	6.10	4.22	0.88	23.20	16.67
	标准差	0.12	1.82	2.09	13.67	0.97	2.44	1.99	0.40	21.99	20.26
盐节木	最大值	0.56	3.30	3.20	7.55	1.79	6.90	4.30	0.87	23.30	13.52
	最小值	0.15	0.53	0.45	0.27	0.32	0.90	0.80	0.18	0.57	0.11
	平均值	0.35	1.82	1.85	2.93	0.92	3.32	2.24	0.58	6.43	2.86
	标准差	0.14	0.71	0.74	1.93	0.37	1.30	0.73	0.19	4.36	2.66

注： $L_p, W_p, H_p$ 分别为灌丛的长度、宽度、高度； $S_p$ 为灌丛冠幅面积； $V_p$ 为单位冠幅面积所能拦截沙物质的体积； $L_d, W_d, H_d$ 分别为灌丛沙堆长轴、短轴和高度； $S_d$ 为沙堆底面积； $V_d$ 为沙堆体积。统计单元为单株灌丛及对应沙堆,总计162个样本。各有效样本量为:梭梭 $n=25$ ,怪柳 $n=26$ ,白刺 $n=78$ ,盐节木 $n=33$ 。

#### 2.1.2 灌丛沙堆形态特征

4种典型灌丛沙堆形态的差异,能够直接反映出植物对风沙的截留与堆积作用(表3)。怪柳沙堆

平均长轴16.05 m、短轴8.85 m、高度1.65 m;白刺沙堆平均长轴6.10 m、短轴4.22 m、高度0.88 m;梭梭沙堆平均长轴2.76 m、短轴1.75 m、高度0.41 m;盐

节木沙堆平均长轴3.32 m、短轴2.24 m、高度0.58 m。灌丛沙堆底面积柽柳沙堆(129.41 m<sup>2</sup>)>白刺沙堆(23.20 m<sup>2</sup>)>盐节木沙堆(6.43 m<sup>2</sup>)>梭梭沙堆(4.50 m<sup>2</sup>)。灌丛沙堆体积柽柳沙堆(167.73 m<sup>3</sup>)>白刺沙堆(16.67 m<sup>3</sup>)>盐节木沙堆(2.86 m<sup>3</sup>)>梭梭沙堆(1.79 m<sup>3</sup>)。灌丛单位冠幅面积拦截沙物质的体积柽柳(22.52 m<sup>3</sup>)>白刺(1.51 m<sup>3</sup>)>盐节木(0.92 m<sup>3</sup>)>梭梭(0.53 m<sup>3</sup>)。柽柳沙堆体积最大,柽柳灌丛具有最强的拦沙与积聚作用;白刺沙堆虽然较矮,但底面积和体积仅次于柽柳沙堆,白刺灌丛具较强的拦沙与积聚作用;梭梭与盐节木沙堆则表现为低矮型堆积,沙堆体积较小,其中梭梭灌丛积沙能力最弱。

## 2.2 灌丛沙堆表层沉积物粒度特征

### 2.2.1 粒度组成

梭梭、柽柳、白刺、盐节木沙堆表层沉积物中,各粒级占比有显著差异(表4)。从细颗粒组成来看,4类灌丛沙堆中黏土的体积百分含量柽柳>白刺>盐节木>梭梭,粉砂和极细砂的百分含量与黏土含量的大小顺序基本一致;从粗颗粒组成来看,灌丛沙堆中中砂的体积百分含量梭梭>盐节木>白刺>柽柳,粗砂的百分含量与中砂的大小顺序基本一致。白刺和盐节木的土壤粒级组成占比介于柽柳和梭梭之间,其中柽柳的黏土和粉砂体积百分比最高,显著高于其他植物。梭梭各细颗粒粒级组分含量总体偏低,中砂、粗砂含量显著高于其他灌丛沙堆。

表4 沙堆表层沉积物粒度组成(%)

Table 4 Grain-size composition of surface sediments on nebkhas of different shrub species (%)

种类	黏土	极细粉砂	细粉砂	中细粉砂	粗粉砂	极细砂	中砂	粗砂	极粗砂
梭梭	1.18±0.53 <sup>c</sup>	1.34±0.50 <sup>c</sup>	1.33±0.46 <sup>c</sup>	1.03±0.42 <sup>c</sup>	1.33±0.62 <sup>c</sup>	9.25±7.65 <sup>c</sup>	36.52±9.15 <sup>a</sup>	19.41±15.31 <sup>a</sup>	1.37±2.42 <sup>a</sup>
柽柳	3.94±0.83 <sup>a</sup>	4.22±1.10 <sup>a</sup>	6.01±1.81 <sup>a</sup>	8.00±2.20 <sup>a</sup>	16.97±3.66 <sup>a</sup>	28.76±2.85 <sup>a</sup>	6.46±1.62 <sup>c</sup>	0.98±0.82 <sup>b</sup>	—
白刺	2.40±0.89 <sup>b</sup>	3.31±1.02 <sup>ab</sup>	4.74±1.69 <sup>ab</sup>	5.84±1.93 <sup>ab</sup>	7.83±2.68 <sup>b</sup>	23.79±7.52 <sup>ab</sup>	12.94±6.23 <sup>bc</sup>	4.10±4.59 <sup>b</sup>	0.97±2.02 <sup>a</sup>
盐节木	2.08±1.12 <sup>bc</sup>	2.75±1.33 <sup>b</sup>	3.74±2.19 <sup>b</sup>	4.47±2.96 <sup>b</sup>	5.22±4.00 <sup>b</sup>	20.05±3.70 <sup>b</sup>	16.50±5.04 <sup>b</sup>	5.63±4.59 <sup>b</sup>	2.20±3.68 <sup>a</sup>

注:小写字母代表相同粒径的不同植物之间存在显著差异(ANOVA, LSD,  $P < 0.05$ )。各有效样本量  $n=7$ 。

整体上,颗粒直径梭梭>盐节木>白刺>柽柳。植物种类影响沉积物粒级组成,柽柳对细颗粒的拦截作用强于梭梭、白刺和盐节木;梭梭对粗颗粒的拦截作用强于柽柳、白刺和盐节木;白刺和盐节木则介于两者之间。

### 2.2.2 粒度参数

4种典型固沙植物沙堆表层沉积物具有显著的分形特征。与传统粒度参数相比,分形维数是能够更好地评价阻沙带固沙潜力与沉积动力过程的有效指标<sup>[25]</sup>。

4种典型固沙植物沙堆表层沉积物的粒度特征与分形维数负相关(图3,4)。整体呈现随着分形维数的增加,平均粒径递减的规律。柽柳沙堆表层沉积物的分形维数和分选系数最高、平均粒径最低,沉积物以极细砂至粉砂为主;梭梭沙堆表层沉积物分形维数和分选系数最低、平均粒径最大,以中砂为主;白刺沙堆与盐节木沙堆表层沉积物特征介于二者之间。

分选系数越高,代表沉积物分选性越差,受风力搬运的影响越明显。4种典型固沙灌丛沙堆表

层沉积物的分选系数变化趋势与分形维数一致,表现为:柽柳沙堆≈盐节木沙堆>白刺沙堆>梭梭沙堆,数值越高表明沉积物成分越复杂、沉积动力越多样。偏度方面,4种灌丛沙堆表层沉积物均呈负偏,白刺沙堆表层沉积物负偏最强;峰态方面,梭梭和白刺沙堆表层沉积物为窄峰态,柽柳沙堆表层沉积物为窄峰态向中峰态过渡,盐节木沙堆表层沉积物为双峰态,与分形维数特征相呼应。

### 2.2.3 沙堆表层沉积物频率分布曲线

梭梭、柽柳、白刺、盐节木沙堆表层沉积物分布均呈现多峰态(图5)。对经平滑处理的粒径分布曲线计算一阶导数,导数由正变负对应一个峰的位置;若曲线上存在大于两个的明显独立峰,则判定为多峰分布。白刺在粗粒径区间(100~1 000 μm)形成最高且尖锐的主峰,盐节木在粗粒径区间有明显但较低的峰值,梭梭在粗粒径区间形成次高且较宽的峰值,柽柳则在细粒径区间(1~10 μm)和中粒径区间(10~100 μm)形成突出的峰值。

白刺沙堆沉积物颗粒分布范围最宽,其次为柽柳,颗粒分布范围白刺>柽柳>盐节木>梭梭。主峰

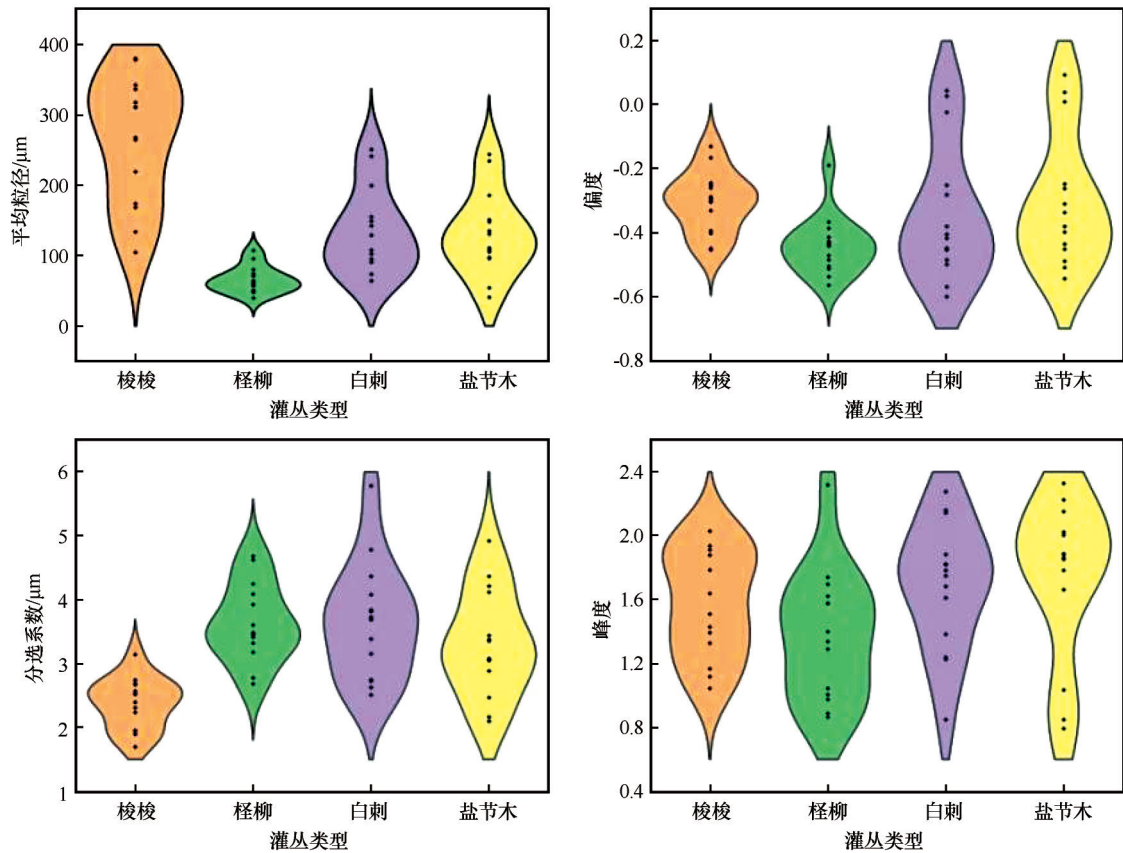


图3 沙堆表层沉积物的粒度特征

Fig.3 Grain-size characteristics of surface sediments on the nebkhas.

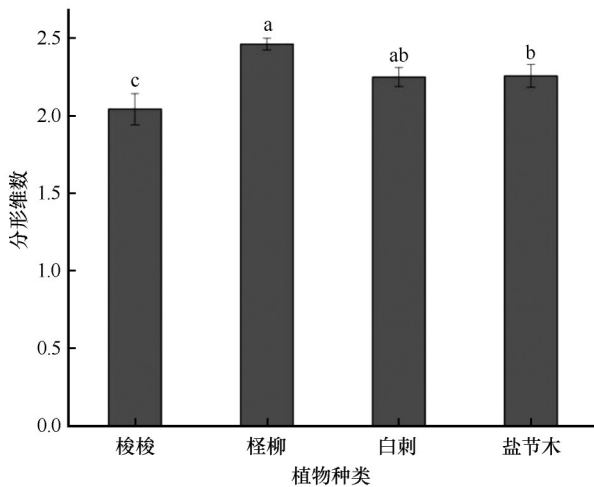


图4 沙堆表层沉积物的分形维数

Fig.4 Fractal dimensions of surface sediments on the nebkhas

白刺>梭梭>盐节木>柽柳。

### 2.2.4 环境敏感粒级组分

基于粒级-标准偏差法提取的环境敏感粒级显示：在艾比湖流域风沙活动环境下，风沙沉积物粒级-标准偏差曲线出现在2.82~709 μm，在14、

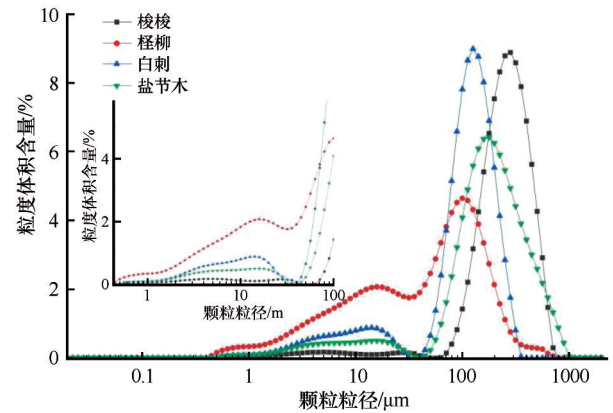


图5 4种沙堆的沉积物粒度频率分布曲线

Fig.5 Grain-size frequency distribution curves of sediments from the four nebkha types

126、399 μm 出现明显的峰值(图6)。在39 μm 出现了最低值,该值为粗细粒度组分的分界,因此粒度组分划分为细组分(2.82~39 μm)和粗组分(39~709 μm)。

4种沙堆细粗组分百分含量的变化范围分别为3.30%~22.39%和72.08%~91.95%(图7)。4种沙堆的细组分百分含量柽柳>白刺>盐节木>梭梭,粗组

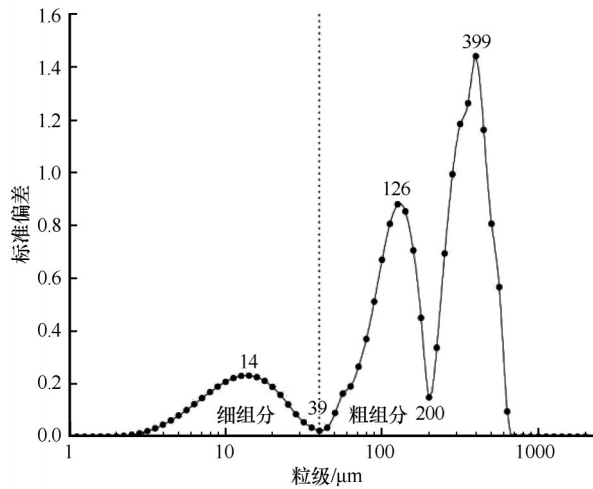


图6 粒径-标准偏差曲线

Fig.6 Standard deviation-grain size plot for identifying environmentally sensitive fractions

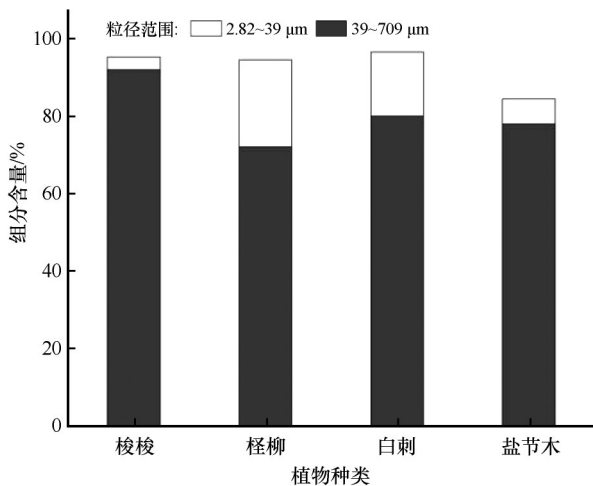


图7 沙堆表层沉积物环境敏感组分比例

Fig.7 Proportions of environmentally sensitive grain-size components in surface sediments of the nebkhas

分百分含量梭梭>白刺>盐节木>柽柳。

### 2.3 环境敏感粒级组分与植株形态相关性

将环境敏感组分与4种灌丛植物形态进行相关性分析(表5),柽柳沙堆的细组分含量与冠幅呈显著正相关( $P<0.01$ ),粗组分含量与冠幅呈显著负相关( $P<0.01$ ),表明较大的冠幅能有效拦截细颗粒;盐节木沙堆粗细组分与盖度均呈相关性( $P<0.05$ ),说明盖度对沉积物颗粒组成具有重要影响。

### 2.4 4种灌丛沙堆形态参数的相关性

4种灌丛沙堆的形态参数间相关性存在显著差异(图8)。梭梭沙堆长轴、短轴、高度之间的相关系

表5 环境敏感组分体积百分含量与植物形态的相关分析  
Table 5 Correlation analysis between the volume percentage of sensitive fractions and shrub morphological traits

植物种	敏感组分	株高	冠幅	盖度
梭梭	细组分	0.255	0.004	-0.386
	粗组分	0.138	0.298	0.173
柽柳	细组分	0.529	0.772**	0.445
	粗组分	-0.541	-0.773**	-0.449
白刺	细组分	0.524	0.302	0.243
	粗组分	-0.559	-0.259	-0.184
盐节木	细组分	0.115	0.262	0.512*
	粗组分	-0.083	-0.068	-0.482*

注:\*, $P<=0.05$ ; \*\*, $P<=0.01$

数介于0.7~0.88,长短轴高度线性相关( $P<0.01$ ),高度与长、短轴亦显著相关,表明梭梭沙堆垂直发育主要受灌丛长度、宽度调控,灌丛高度影响小。盐节木沙堆长短轴及高度相关性最高(0.7~0.9,  $P<0.01$ ),三者协同性最强,表明盐节木沙堆垂直发育主要依赖灌丛长度、宽度,高度影响较小。柽柳沙堆长短轴显著相关( $P<0.01$ ),但高度与灌丛长度、宽度相关系数仅0.54~0.71,表明柽柳沙堆垂直发育主要由灌丛长度、宽度控制,灌丛高度无明显影响。白刺沙堆长轴、短轴、高度相关性整体偏低(0.3~0.7),仅长短轴显著相关( $P<0.01$ ),表明白刺低矮贴地的植株形态使沙堆发育受限。

### 2.5 4种灌丛沙堆形态参数的回归分析

对梭梭、柽柳、白刺、盐节木灌丛与沙堆形态参数分别进行拟合分析(图9)。灌丛长度与沙堆长轴、灌丛长度与沙堆短轴均呈线性关系。梭梭与盐节木拟合度最高( $0.49<R^2<0.85$ ),斜率大,表明其沙堆水平尺度随灌丛扩展增长更快;柽柳、白刺拟合度较低。沙堆高度与灌丛高度相关性弱( $-0.034<R^2<0.43$ ),但与灌丛长度、宽度显著相关。梭梭、盐节木的拟合度较高( $0.49<R^2<0.78$ ),显示其拦截风沙效率更强;柽柳、白刺的拟合关系较弱。4种灌丛冠幅面积与沙堆底面积、体积均呈线性递增关系,其中梭梭和盐节木的拟合度和斜率显著高于柽柳和白刺( $0.18<R^2<0.70$ ),表明梭梭与盐节木在冠幅扩展过程中对沙堆体积的促进作用更为显著。

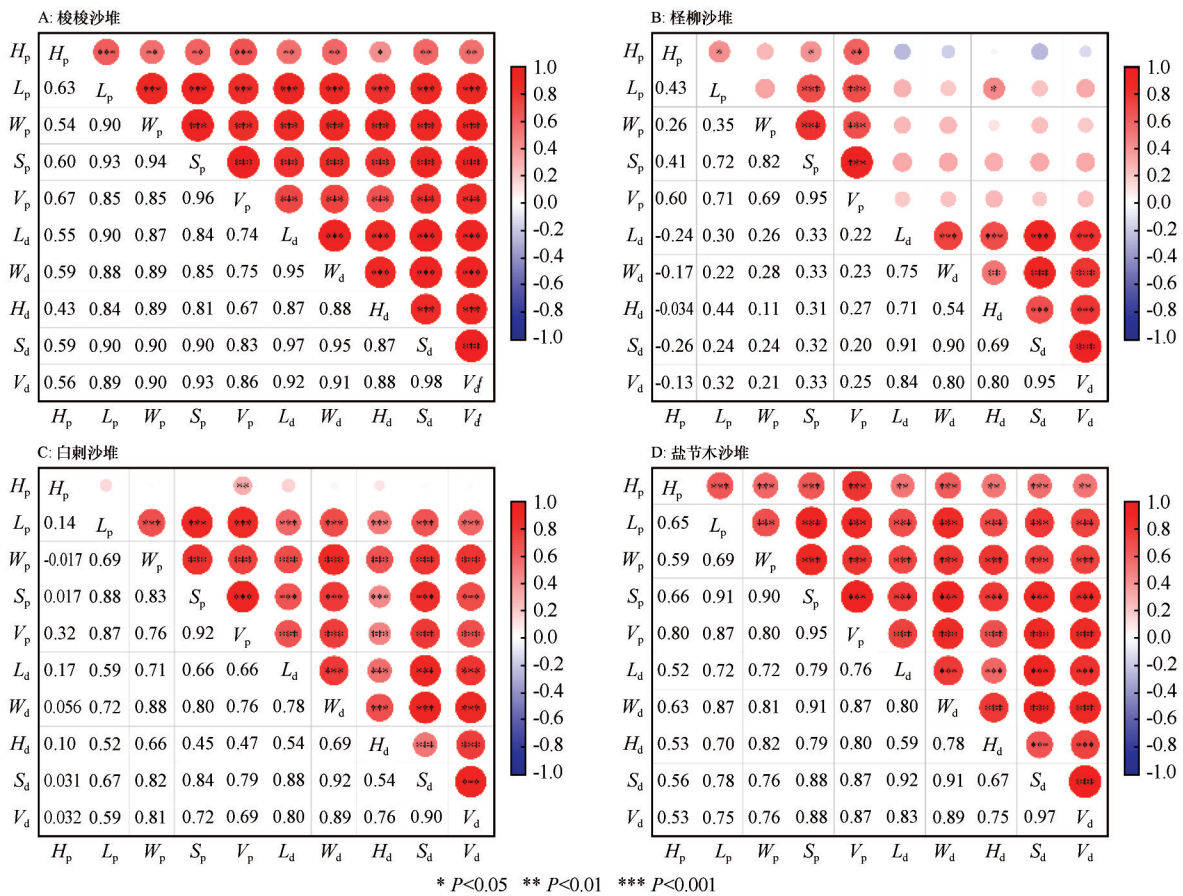


图 8 沙堆形态参数的相关性热图

Fig.8 Correlation heatmaps of morphometric parameters for the nebkhas

### 3 讨论

#### 3.1 不同植物类型对沙堆形态的影响

灌丛沙堆的形态不仅取决于植物的种类,更与植株的生长状态与习性密切相关<sup>[26]</sup>。植株高度、冠幅大小、枝叶密度与刚性等因素,通过改变近地气流的减速区、加速区及涡流区分布模式,直接决定了沙堆的几何构型及发育过程<sup>[27]</sup>。风洞观测与野外测量表明,当灌丛的冠幅与株高接近时,灌丛沙堆的迎风侧和两翼会产生明显的气流加速区,侧向流速可达上风风速的 110%~130%,而在背风侧会形成速度骤降的尾涡区,最低可降至上风风速的 20% (图 10)。

高大、冠幅广、枝条刚性强的灌丛(如怪柳)在背风侧容易形成范围稳定的弱涡流区,涡流维持时间长、范围大,有利于细颗粒物的沉降<sup>[28]</sup>。怪柳沙堆在生长初期易形成圆锥形沙堆,成熟期在沙源充足时可发育为高陡的半球形沙堆。本研究中,怪柳冠幅面积是梭梭冠幅面积的 9.68 倍,单位冠幅面积

拦截的沙物质体积(22.52 m<sup>3</sup>)远高于其他 3 类,形成的沙堆体积最大。冠幅大但高度有限的灌丛(如白刺)多形成低矮半球状沙堆,其面积与体积较大但高度较低,这类灌丛更倾向在水平尺度扩展。而低矮贴地、冠层通透性高的灌丛(如盐节木)迎风坡对风沙流的减速作用弱,两侧绕流加速效应显著<sup>[29]</sup>,垂向堆积有限,常形成低矮半球或扁穹形堆体。尽管这类沙堆体积较小,但形态与灌丛长宽高度拟合度高(0.49 <  $R^2$  < 0.85),体现了其在水平扩展过程中的形态协同性。

灌丛改变近地面流场结构。植株增加了沙堆表面粗糙度,对气流阻滞消能,使气流减速,并改变不同高度的气流速度与涡流强度范围,进而影响输沙量的垂向分布<sup>[28-29]</sup>。这种流场扰动既能阻截风沙、促使粉尘沉降,也有助于维持乃至促进沙堆持续发育。

#### 3.2 不同植物类型对粒度参数的影响

粒级含量和粒度参数是描述沉积物粒度分布

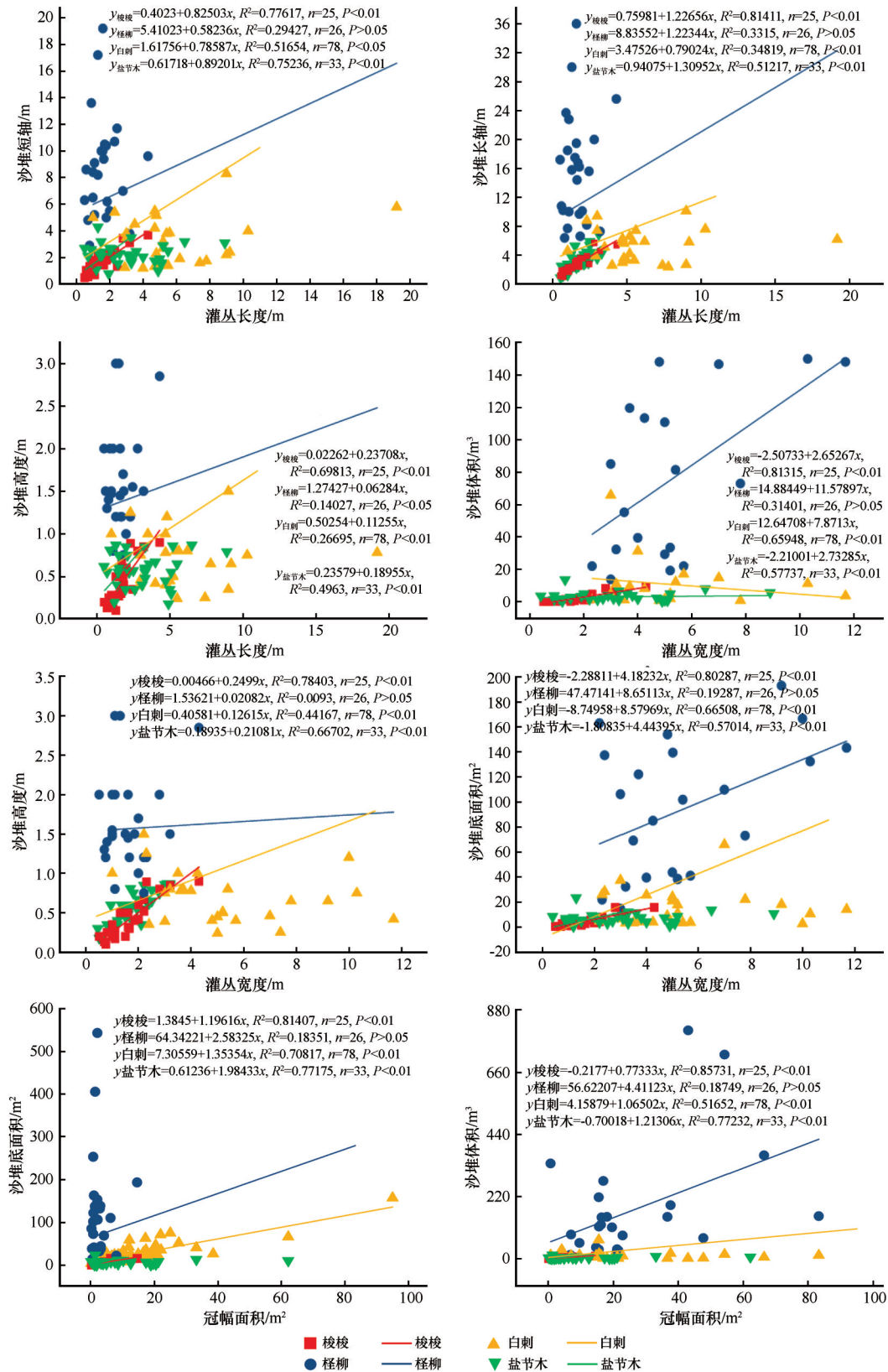


图9 灌丛与沙堆形态参数间的拟合关系

Fig.9 Regression relationships between shrub morphological traits and nebkha morphometric parameters

和变化特征的有效工具<sup>[30]</sup>。植被覆盖度对风成沙的分选有很大影响。灌丛冠层对风成沙流场的影

响会使沉积物被分选,最终在灌木周围沉积形成粒度特征的差异<sup>[31]</sup>。本研究表明,不同灌丛的形态结

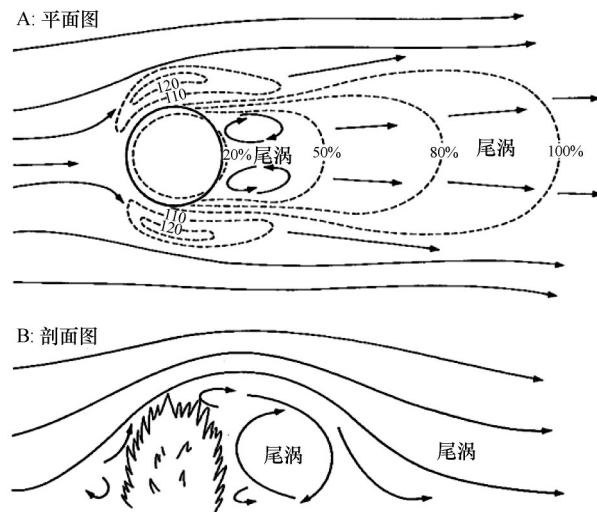


图10 单株灌丛周围风速和流线图(引自[27])

Fig.10 Airflow velocity and streamline patterns around an individual shrub (adapted from [27])

构通过气流分选作用控制沙堆沉积物的颗粒组成。梭梭沙堆表层沉积物分选系数最低,分选好,粒度分布集中,以中粗砂为主,沉积物成分单一,分形维数最低。通透冠型有利于粗颗粒在梭梭植株迎风侧富集。怪柳分选系数最高,分选最差,细颗粒比例高(>20%),负偏度强,分形维数最大,粒度组成复杂,表明其对多粒级范围风沙物的捕获能力最强。这是由于其高大密集冠层在怪柳灌丛内及背风涡流区拦截来自远方和高空的细粒,且有效沉降在怪柳灌丛内和后方。白刺表现为低分选性,比怪柳植株矮,对细颗粒有一定截留能力;盐节木粒度分布与盖度显著相关。

灌丛形态对沉积物的敏感组分影响显著。在粒级—标准偏差曲线(图6)中,提取的敏感组分在2.82~709  $\mu\text{m}$ ,在艾比湖流域风沙环境下,细颗粒组分含量怪柳>白刺>盐节木>梭梭,而粗颗粒组分含量梭梭>白刺>盐节木>怪柳。这与上文的平均粒径、分选系数及分形维数的分析吻合。对怪柳而言,其粗、细组分与冠幅显著相关,说明其高大密集宽阔的株冠对风沙流中细颗粒的拦截起到主导作用;冠幅密集贴地的盐节木沙堆的粗、细组分与盖度显著相关,盖度越大意味着其侧向遮蔽能力越强,能够在颗粒的沉积上产生更明显的作用。综上,高大密闭冠型植株产生更大、更稳定的背风涡流区,利于细粒沉降;贴地通透冠型植株主要截留粗颗粒。

### 3.3 沉积物环境敏感组分的物理意义

艾比湖流域属于典型的温带大陆性干旱气候,风力是该区域最主要的搬运动力。通过计算艾比湖流域年输沙势可以看出,艾比湖流域属于高风险环境区。董治宝等<sup>[32]</sup>的风洞实验将风成沙按可蚀性划分为不同等级,其中易蚀颗粒直径75~400  $\mu\text{m}$ ,较难蚀颗粒直径400~700  $\mu\text{m}$ 。本研究提取的环境敏感组分(2.82~709  $\mu\text{m}$ ),其范围包含易蚀颗粒区间,也包含较难蚀的粗颗粒区间,反映了风沙活动对被搬运的沙物质的综合影响。Pye<sup>[33]</sup>指出,风沙流中跃移颗粒占比显著,其粒径为70~500  $\mu\text{m}$ ;而粒径小于70  $\mu\text{m}$ 的颗粒,在风沙运动过程中主要作为悬移质被输送。由此可判断本研究中的细组分对应风沙活动中的悬移质,粗组分则对应跃移质。

## 4 结论

艾比湖流域灌丛的形态特征对其形成的沙堆形态影响显著。灌丛的形态特征直接决定了其对风沙流的干扰方式与拦沙能力,从而影响沙堆的发育尺度与形态特征。高大、密集、宽阔的灌丛能够形成稳定的背风涡流区,促使细颗粒沉降,形成大尺度的灌丛沙堆;低矮、贴地、密集型灌丛能捕集风沙流中各粒级颗粒,形成低矮、紧实的灌丛沙堆。

不同类型灌丛对灌丛沙堆沉积物的粒度组成具有显著调控作用。高大密集型冠层更易拦截细颗粒,使沙堆粒径分布宽且分形特征显著;贴地通透型冠层则倾向富集粗颗粒,粒度分布集中且分选性较好。艾比湖流域灌丛沙堆表层沉积物细组直径2.82~39  $\mu\text{m}$ ,粗组直径39~709  $\mu\text{m}$ 。环境敏感组分分析方法能准确反映局地风沙沉积过程与植被阻沙特征,能够科学评估不同灌丛的固沙能力。

### 参考文献:

- [1] Nickling W G, Wolfe S A. The morphology and origin of nabkhas, region of Mopti, Mali, West Africa[J]. *Journal of Arid Environments*, 1994, 28(1): 13-30.
- [2] 武胜利. 新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [3] An H, Zhao F, Li H, et al. The typical sand-fixing plants in the Ulan Buh Desert-Oasis Area significantly changed the distribution pattern of surface sediments[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 13: 1556083.
- [4] Valiente-Banuet A, Bolongaro-Crevenna A, Briones O, et al. Spatial relationships between cacti and nurse shrubs in a semi-

- arid environment in Central Mexico [J]. *Journal of Vegetation Science*, 1991, 2(1): 15-20.
- [5] 唐艳, 刘连友, 屈志强, 等. 植物阻沙能力研究进展[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 43-48.
- [6] 黄富祥, 王明星, 王跃思. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J]. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 626-633.
- [7] 杜建会, 严平, 董玉祥. 干旱地区灌丛沙堆研究现状与展望[J]. *地理学报*, 2010, 65(3): 338-346.
- [8] 杨帆, 王雪芹, 何清, 等. 绿洲-沙漠过渡带柽柳灌丛沙堆形态特征及空间分布格局[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(3): 556-563.
- [9] 张萍, 哈斯额尔敦, 杨一, 等. 小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*) 灌丛沙堆形态对沙源供给形式和丰富度的响应[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1453-1460.
- [10] 高永, 丁延龙, 汪季, 等. 不同植物灌丛沙丘表面沉积物粒度变化及其固沙能力[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(22): 135-142.
- [11] 金耀涛, 田丽慧, 张登山, 等. 高寒沙地地表风沙沉积物粒度特征的时空变化[J]. *青海农林科技*, 2024(4): 82-90.
- [12] 张云峰, 张振克, 丁海燕, 等. 江苏启东嘴潮滩敏感粒度组分及环境意义[J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(1): 81-86.
- [13] 张威, 杨蝉玉. 辽南黄土晚更新世粒度敏感组分的古环境意义[J]. *辽宁师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 45(1): 83-92.
- [14] 何强强, 毛东雷, 徐佳瑞, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带不同沙丘的沉积物粒度特征及沉积环境[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(03): 135-145.
- [15] 易定红, 刘应如, 李积永, 等. 柴达木盆地台南地区滩坝砂体粒度特征及水动力[J]. *沉积学报*, 2025, 43(6): 2102-2113.
- [16] 曾小箕, 丁建丽, 樊亚辉. 新疆艾比湖地区土地沙漠化时空演变及其成因[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(2): 287-292.
- [17] 邓浩鑫, 汤秋鸿, 张志栋, 等. 人类活动对西北地区艾比湖长期及季节变化的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2025, 55(2): 485-499.
- [18] 郭佳丽, 马勇刚, 潘恒, 等. 艾比湖春夏季土壤盐渍化卫星监测对比分析[J]. *干旱区地理*, 2025, 48(12): 2143-2157.
- [19] 井云清, 张飞, 张月. 基于CA-Markov模型的艾比湖湿地自然保护区土地利用/覆被变化及预测[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3649-3658.
- [20] 莫丰瑞, 楚新正, 马晓飞, 等. 景观格局变化下艾比湖湿地防风固沙功能及其价值评估[J]. *生态科学*, 2017, 36(6): 195-206.
- [21] Zhang P J, Yang J, Zhao L Q, et al. Effect of *Caragana tibetica* nebkhas on sand entrapment and fertile islands in steppe-desert ecotones on the Inner Mongolia Plateau, China [J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1/2): 79-90.
- [22] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of sedimentary research*, 1957, 27(1): 3-26.
- [23] Udden J A. Mechanical composition of clastic sediments [J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1914, 25(1): 655-744.
- [24] Wang G L, Zhou S L, Zhao Q G. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 550.
- [25] 柏春广, 穆桂金, 王建. 艾比湖湖相沉积物粒度的分维特征与环境意义[J]. *干旱区地理*, 2002, 25(4): 336-341.
- [26] El-Bana M I, Nijs I, KoCkelbergh F. Microenvironmental and vegetational heterogeneity induced by phytogenic nebkhas in an arid coastal ecosystem [J]. *Plant and Soil*, 2002, 247: 283-293.
- [27] Ash J E, Wasson R J. Vegetation and sand mobility in the Australian desert dunefield [J]. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1983, 45(Supp.): 7-25.
- [28] 李志忠, 武胜利, 王晓峰, 等. 新疆和田河流域柽柳沙堆的生物地貌发育过程[J]. *地理学报*, 2007, 62(5): 462-470.
- [29] 武胜利, 李志忠, 海鹰, 等. 新疆和田河流域单株柽柳灌丛流场的实验研究[J]. *干旱区研究*, 2006, 23(4): 539-543.
- [30] 葛拥晓, 吉力力·阿不都外力, 马龙, 等. 新疆艾比湖干涸湖底沉积物粒径分布及其对风蚀的响应[J]. *干旱区研究*, 2014, 31(4): 636-642.
- [31] 王倩, 毛东雷, 赵枫, 等. 策勒绿洲-沙漠过渡带不同植被沙丘表面风沙沉积物粒度特征分析研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(3): 96-102.
- [32] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998(4): 2-6.
- [33] Pye K. *Aeolian Dust and Dust Deposits* [M]. London, UK: Elsevier, 2015.

## Environmental effects of four typical shrub plants in the Ebinur Lake Basin

Shi Huijie<sup>1a</sup>, Wu Shengli<sup>1ab</sup>, Zhang Yan<sup>2</sup>, Xiao Jiaqi<sup>1a</sup>, Chen Pengpeng<sup>1a</sup>, Huang Lurui<sup>1a</sup>, Zhang Yubo<sup>3</sup>

(1.a.School of Geography and Tourism / b.Xinjiang Uygur Autonomous Region Higher Education Teacher Training Center, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2.Agricultural Science Research Institute of the Fifth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Bole 833400, Xinjiang, China; 3.College of Humanities Information, Changchun University of Technology, Jilin 130000, China)

**Abstract:** Investigating the environmental effects of four typical shrub species—*Haloxylon ammodendron*, *Tamarix chinensis*, *Nitraria tangutorum*, and *Halocnemum strobilaceum*—in the Ebinur Lake Basin is of substantial theoretical and practical significance for understanding the formation mechanisms of shrub-nebkhas in arid regions and for optimizing the arrangement of windbreak and sand-stabilizing vegetation. In this study, we systematically quantified the morphological parameters of the four shrub species and their associated nebkhas, analyzed the grain-size distribution and fractal characteristics of surface sediments, identified environmentally sensitive grain-size components, and compared the sand stabilization capacity among species. The results indicate that: (1) The four species display pronounced differences in morphological traits such as plant height and crown area. *T. ramosissima* reaches heights of up to 2.4 m and crown areas of 83.32 m<sup>2</sup>, forming nebkhas with an average volume of 167.73 m<sup>3</sup>—significantly larger than those formed by *H. ammodendron*, *N. sibirica*, and *H. strobilaceum*. (2) The grain-size composition, particle-size parameters, fractal dimensions, and proportions of sensitive components in the sediments vary markedly among shrub types. Two sensitive fractions (2.82–39 μm and 39–709 μm) were identified. *T. ramosissima* exhibited the highest capacity to intercept fine particles (2.82–39 μm), with contents exceeding 20% and fractal dimensions ( $D$ )>2.5; *H. ammodendron* was most effective at trapping coarse particles (39–709 μm), with contents > 90% and  $D$ <2.1; *N. sibirica* and *H. strobilaceum* showed intermediate characteristics. (3) A positive correlation was observed between shrub morphology and nebkha form, indicating their coordinated development. The volume of trapped sediment per unit crown area for the four shrubs, in descending order, was: *T. ramosissima* (22.52 m<sup>3</sup>), *N. sibirica* (1.51 m<sup>3</sup>), *H. strobilaceum* (0.92 m<sup>3</sup>), and *H. ammodendron* (0.53 m<sup>3</sup>), with *T. ramosissima* demonstrating the strongest sand stabilization capacity.

**Key words:** nabkhas; sand-fixing ability; fractal dimension; environmentally sensitive components; Ebinur Lake Basin