

李静芸,傅天阳,申玉龙,等.毛乌素沙地新月形和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征[J].中国沙漠,2023,43(2):226-232.

# 毛乌素沙地新月形和抛物线形沙丘 表层沉积物粒度特征

李静芸<sup>1</sup>,傅天阳<sup>2</sup>,申玉龙<sup>1</sup>,王立辉<sup>1</sup>,伍永秋<sup>1</sup>

(1.浙江师范大学 地理与环境科学学院,浙江 金华 321000; 2.北京师范大学 地理科学学部,北京 100875)

**摘要:**沙丘的粒度组成主要由风况、沙源、沙丘形态与气流之间的相互作用等决定,粒度组成可以反映沙丘的形成过程。对毛乌素沙地20个新月形沙丘及沙丘链,25个抛物线形沙丘的迎风坡脚、丘顶、背风坡脚表层0~5 cm进行了采样,并对其粒度组成进行了分析测试,来探讨其粒度特征。结果表明:(1)相比新月形沙丘,抛物线形沙丘分选性更差,悬移组分更高;抛物线形沙丘迎风坡相比新月形沙丘分选性更差,粗沙含量更高。(2)沙丘的粒度分布模式统计中,新月形沙丘出现最多的是迎风坡最细的类型,占比65%,而抛物线形沙丘则倾向于背风坡最细类型,占比56%。(3)植被、新月形沙丘和抛物线形沙丘相反的形态以及形态与气流的相互作用是导致两种沙丘粒度差异的主要因素。

**关键词:**毛乌素沙地;新月形沙丘;抛物线形沙丘;粒度特征

文章编号:1000-694X(2023)02-226-07

DOI:10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00140

中图分类号:P931.3

文献标志码:A

## 0 引言

地表沉积物的粒度特征不仅可以反映风力对沙源物质的搬运和分选<sup>[1-2]</sup>及沙源物质的组成特征<sup>[2-3]</sup>,而且可以结合具体的地表气流、植被覆盖及地形特征情况进一步地分析不同风沙地貌形成的原因及过程<sup>[4]</sup>。沙丘是典型的风沙地貌,在沙丘形成发育过程中,沙丘形态和外界条件(风况、植被覆盖度等)之间的相互作用会影响沙丘表面的风蚀沉积过程,从而导致沙丘表层沉积物粒度特征的变化<sup>[5]</sup>。沙丘形态与外界条件之间的这种相互作用可进一步解释为形态与气流之间的作用,风力分选结果在不同形态沙丘和同一形态沙丘各地貌部位之间出现不同程度的差异<sup>[6-7]</sup>,这些差异以最大程度表现在沙丘表层沉积物的粒度组成上,并导致不同类型沙丘出现迎风坡-丘顶-背风坡不同的粒度分布模式<sup>[8-10]</sup>。新月形沙丘和抛物线形沙丘形态截然相反,已有众多学者对不同地区沙漠中新月形沙丘和抛物线形沙丘的粒度特征进行了探讨<sup>[4,7,9-14]</sup>,沙丘

的粒度分布特征研究结果并不完全一致,但出现最多的是丘顶最粗模式<sup>[4,7,9,12-13]</sup>和迎风坡脚最粗模式<sup>[11,15]</sup>。虽然目前对于其他沙漠中新月形沙丘和抛物线形沙丘的粒度分布模式进行了较多探讨,但是对于这两种沙丘在毛乌素沙地中的粒度分布情况还需要进一步分析,观察其优势粒度分布模式情况。

毛乌素沙地作为中国四大沙地之一,具有特殊的地理位置,位于季风尾闾区,地处干旱区、半干旱区的过渡地带,以及沙漠-黄土过渡地带,区域内生态环境脆弱,风沙危害严重,是区域风沙地貌学研究的典型地区,也是中国沙漠化研究的热点地区<sup>[16]</sup>。现代毛乌素沙地及其附近的沙漠化土地是对地质历史时期形成的各种沉积物进一步搬运、分选和再沉积的结果,具有相对复杂的粒度特征<sup>[17]</sup>。因此本文选择了毛乌素沙地新月形沙丘和抛物线形沙丘两种沙丘类型作为研究对象,对其迎风坡脚、丘顶和背风坡脚的表层进行了采样,研究两种沙丘的粒度特征差异,分别统计了两种沙丘出现的

收稿日期:2022-07-08; 改回日期:2022-11-08

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41330748)

作者简介:李静芸(1997—),女,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail:540836738@qq.com

通信作者:伍永秋(E-mail:wuyongqiu@zjnu.edu.cn)

所有粒度分布模式,并分析了每种沙丘优势粒度分布模式的成因。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

毛乌素沙地(37°30′—39°30′N,107°15′—110°30′E)位于鄂尔多斯高原东南洼地,南北长220 km,东西宽100 km,最宽处150 km<sup>[18]</sup>,面积约3.9万 km<sup>2</sup><sup>[19]</sup>,是中国四大沙地之一。该区域属典型的温带大陆性半干旱气候,年降水量250~440 mm,集中于7—9月,占全年降水量的60%~75%,年潜在蒸散量1 800~2 500 mm。年均气温6.0~8.5 °C,1月平均气温-9.5~-12 °C,7月平均气温22~24 °C<sup>[20]</sup>。冬春季节盛行西北风,夏秋季节则以东南风为主,起沙风主要出现在冬末、春季,年大风时间20~40 d<sup>[18]</sup>。沙地内沙丘种类较多,主要有固定或半固定的沙垄、抛物线形沙丘、流动的新月形沙丘及沙丘链等<sup>[21]</sup>(图1)。

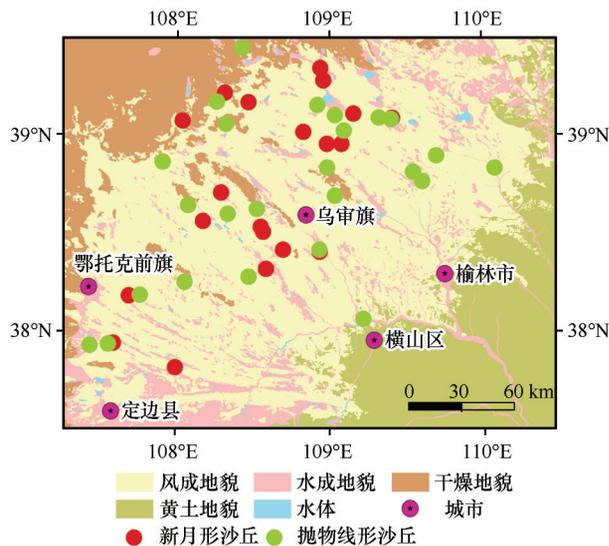


图1 毛乌素沙地概况以及采样点分布

Fig.1 Overview of the Mu Us Desert and the distribution map of the sampling points

### 1.2 样品采集及分析方法

在毛乌素沙地选取新月形沙丘及沙丘链20个,抛物线形沙丘25个,分别在其迎风坡脚、丘顶、背风坡脚(后面用迎风坡和背风坡代指迎风坡脚和背风坡脚)采集表层0~5 cm的沉积物样品(图1),其中每个点采3个重复样,以3个重复样的平均值来指代该点的值。同时记录每个沙丘的经纬度、基本特征

和周边环境特征。

样品在进行前处理后<sup>[22]</sup>,采用英国马尔文(Malvern)公司生产的Mastersizer-2000型激光粒度分析仪进行沉积物粒度的测量,该仪器的测量范围为0.02~2 000 μm,重复测量3次,误差<2%。

根据Krumbein对数转化公式<sup>[23]</sup>,将沉积物粒度真值转化为 $\Phi$ 值。然后基于Krumbein和Folk等提出的粒度参数计算公式<sup>[23]</sup>,计算平均粒径 $M_z$ 、分选系数 $\sigma$ 、偏度 $SK$ 、峰态 $K_g$ 等粒度参数。粒度参数选用了福克和沃德粒度参数分级标准<sup>[24]</sup>。粒度分级依据Udden-Wentworth方法<sup>[23]</sup>进行,单位用 $\Phi$ 值表示。利用Origin软件绘制粒度频率曲线和概率累计曲线,用SPSS进行单因素方差分析。

## 2 结果

### 2.1 沙丘粒度组成

毛乌素沙地两种沙丘含量最多的都是中沙,平均含量42.72%~47.05%(表1)。在同类沙丘的不同地貌部位,中沙含量不存在显著性差异( $P>0.05$ ),在不同沙丘同一个地貌部位的对比中,迎风坡和背风坡中沙含量不存在显著性差异,但新月形沙丘的丘顶中沙含量显著高于抛物线形沙丘丘顶( $P<0.05$ )。细沙含量仅次于中沙,含量31.17%~42.01%,其中新月形沙丘的迎风坡和丘顶细沙含量显著高于抛物线形沙丘( $P<0.05$ )。黏粒和极细沙含量分别为0.10%~0.25%和3.80%~6.01%,其中同类沙丘不同地貌部位以及不同沙丘之间都无显著性差异( $P>0.05$ )。粉沙和极粗沙含量分别为2.05%~3.85%和0.01%~0.49%,抛物线形沙丘丘顶的粉沙和极粗沙含量显著高于新月形沙丘的丘顶( $P<0.05$ )。抛物线形沙丘迎风坡的粗沙含量显著高于背风坡( $P<0.05$ ),且抛物线形沙丘迎风坡和丘顶的粗沙含量也显著高于新月形沙丘。总体上,两种沙丘的粒度组成没有显著性差异。

### 2.2 沙丘粒度参数

由表2可知,新月形沙丘的平均粒径为1.94  $\Phi$ ,不同地貌部位之间没有显著性差异( $P>0.05$ )。抛物线形沙丘平均粒径为1.89  $\Phi$ ,其中背风坡显著细于迎风坡( $P<0.05$ )。两种沙丘整体的平均粒径无显著性差异。新月形沙丘分选系数为0.66  $\Phi$ ,抛物线形沙丘分选系数为0.79  $\Phi$ ,两者的分选系数存在

表1 毛乌素沙地不同类型沙丘各部位沉积物粒度组成(%)

Table 1 Grain size composition of sediments in different types of Mu Us Desert

沙丘类型	沙丘部位	粒级百分含量%						
		黏粒 >9 Φ	粉沙 4~9 Φ	极细沙 3~4 Φ	细沙 2~3 Φ	中沙 1~2 Φ	粗沙 0~1 Φ	极粗沙 -1~0 Φ
新月形沙丘	迎风坡	0.12 ± 0.30 <sup>ac</sup>	2.47 ± 2.43 <sup>ac</sup>	6.01 ± 4.42 <sup>ac</sup>	42.01 ± 13.53 <sup>ac</sup>	42.72 ± 10.36 <sup>ac</sup>	6.63 ± 6.91 <sup>ac</sup>	0.05 ± 0.23 <sup>ac</sup>
	丘顶	0.11 ± 0.27 <sup>ac</sup>	2.27 ± 2.46 <sup>ac</sup>	4.00 ± 2.66 <sup>ac</sup>	37.60 ± 15.89 <sup>ac</sup>	46.79 ± 9.69 <sup>ac</sup>	9.22 ± 8.64 <sup>ac</sup>	0.01 ± 0.04 <sup>ac</sup>
	背风坡	0.10 ± 0.22 <sup>ac</sup>	2.05 ± 2.24 <sup>ac</sup>	3.80 ± 4.62 <sup>ac</sup>	39.16 ± 16.29 <sup>ac</sup>	47.05 ± 13.36 <sup>ac</sup>	7.83 ± 9.27 <sup>ac</sup>	0.02 ± 0.05 <sup>ac</sup>
	平均	0.11 ± 0.26 <sup>e</sup>	2.26 ± 2.22 <sup>e</sup>	4.60 ± 3.13 <sup>e</sup>	39.59 ± 14.51 <sup>e</sup>	45.52 ± 10.17 <sup>e</sup>	7.89 ± 7.66 <sup>e</sup>	0.03 ± 0.08 <sup>e</sup>
抛物线形沙丘	迎风坡	0.19 ± 0.24 <sup>ac</sup>	3.80 ± 2.60 <sup>ac</sup>	4.65 ± 4.12 <sup>ac</sup>	31.17 ± 14.19 <sup>ad</sup>	44.90 ± 7.50 <sup>ac</sup>	14.97 ± 12.81 <sup>ad</sup>	0.34 ± 0.83 <sup>ac</sup>
	丘顶	0.19 ± 0.28 <sup>ac</sup>	2.83 ± 2.85 <sup>ad</sup>	5.03 ± 3.34 <sup>ac</sup>	35.39 ± 15.10 <sup>ad</sup>	43.80 ± 8.28 <sup>ad</sup>	12.27 ± 12.56 <sup>abd</sup>	0.49 ± 1.91 <sup>ad</sup>
	背风坡	0.25 ± 0.36 <sup>ac</sup>	3.85 ± 4.50 <sup>ac</sup>	5.10 ± 3.90 <sup>ac</sup>	38.65 ± 13.03 <sup>ac</sup>	44.38 ± 7.93 <sup>ac</sup>	7.74 ± 7.93 <sup>bc</sup>	0.02 ± 0.08 <sup>ac</sup>
	平均	0.21 ± 0.27 <sup>e</sup>	3.49 ± 3.01 <sup>e</sup>	4.92 ± 3.20 <sup>e</sup>	35.07 ± 12.42 <sup>e</sup>	44.36 ± 6.50 <sup>e</sup>	11.66 ± 9.56 <sup>e</sup>	0.28 ± 0.80 <sup>e</sup>

同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),其中a、b是同类沙丘不同部位的对比,c、d是不同沙丘同一部位的对比,e、f是不同沙丘平均值的对比。

表2 不同类型沙丘各地貌部位沉积物粒度参数

Table 2 Particle size parameters of sediment at different sites of different types of sand dunes

沙丘类型	沙丘部位	平均粒径/Φ	分选系数/Φ	偏度	峰态
新月形沙丘	迎风坡	2.02 ± 0.25 <sup>ac</sup>	0.69 ± 0.17 <sup>ac</sup>	0.09 ± 0.10 <sup>ac</sup>	1.05 ± 0.18 <sup>ac</sup>
	丘顶	1.90 ± 0.25 <sup>ac</sup>	0.69 ± 0.21 <sup>ac</sup>	0.12 ± 0.13 <sup>ac</sup>	1.12 ± 0.29 <sup>ac</sup>
	背风坡	1.92 ± 0.31 <sup>ac</sup>	0.62 ± 0.17 <sup>ac</sup>	0.09 ± 0.10 <sup>ac</sup>	1.08 ± 0.23 <sup>ac</sup>
	平均	1.94 ± 0.25 <sup>e</sup>	0.66 ± 0.16 <sup>e</sup>	0.10 ± 0.10 <sup>e</sup>	1.09 ± 0.22 <sup>e</sup>
抛物线形沙丘	迎风坡	1.80 ± 0.32 <sup>ad</sup>	0.83 ± 0.20 <sup>ad</sup>	0.17 ± 0.14 <sup>ad</sup>	1.31 ± 0.39 <sup>ad</sup>
	丘顶	1.87 ± 0.32 <sup>abc</sup>	0.75 ± 0.21 <sup>ac</sup>	0.12 ± 0.11 <sup>ac</sup>	1.12 ± 0.34 <sup>ac</sup>
	背风坡	2.01 ± 0.25 <sup>bc</sup>	0.78 ± 0.32 <sup>ac</sup>	0.14 ± 0.16 <sup>ac</sup>	1.14 ± 0.31 <sup>ac</sup>
	平均	1.89 ± 0.23 <sup>e</sup>	0.79 ± 0.22 <sup>f</sup>	0.14 ± 0.12 <sup>e</sup>	1.19 ± 0.29 <sup>e</sup>

同列不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),其中a、b是同类沙丘不同部位的对比,c、d是不同沙丘同一部位的对比,e、f是不同沙丘平均值的对比。

显著性差异( $P < 0.05$ ),3个地貌部位中,抛物线形沙丘迎风坡的分选系数显著大于新月形沙丘迎风坡。根据分选程度分级标准,新月形沙丘分选更好,表明粒度分布比较集中。新月形沙丘偏度值均值为0.10,抛物线形沙丘偏度值均值为0.14,两者整体偏度无显著性差异( $P > 0.05$ ),但抛物线形沙丘的迎风坡要比新月形沙丘的迎风坡更正偏( $P < 0.05$ )。新月形沙丘和抛物线形沙丘峰态值分别为1.09和1.19,两者整体的峰态值没有显著性差异( $P > 0.05$ ),但抛物线形沙丘的迎风坡要比新月形沙丘的迎风坡峰态值更大( $P < 0.05$ ),表明抛物线形沙丘迎风坡的粒度频率曲线的峰态更尖锐,集中程度更高。

### 2.3 沙丘的粒配曲线

毛乌素沙地新月形沙丘和抛物线形沙丘3个部位的粒度频率曲线都是典型的单峰形态(图2)。其中新月形沙丘3个部位中,迎风坡峰值所对应的粒径为2.07 Φ,相对较细,丘顶和背风坡峰值所对应的粒径为1.90 Φ,而抛物线形沙丘迎风坡峰值所对应的粒径为1.74 Φ,相对较粗,丘顶和背风坡峰值所对应的粒径也是1.90 Φ。两种沙丘3个部位的粒度频率曲线峰态均为近似正态峰,曲线较高、较窄,曲线斜率非常高,分选性好。不管是哪一个地貌部位,粒度频率曲线的峰值都是新月形沙丘更高,表明其粒度分布更集中,而两种沙丘3个部位中,都是背风坡的峰值最高。此外,可以看到,新月形沙丘迎风坡的粒度频率曲线偏右,丘顶曲线偏左,说明迎风

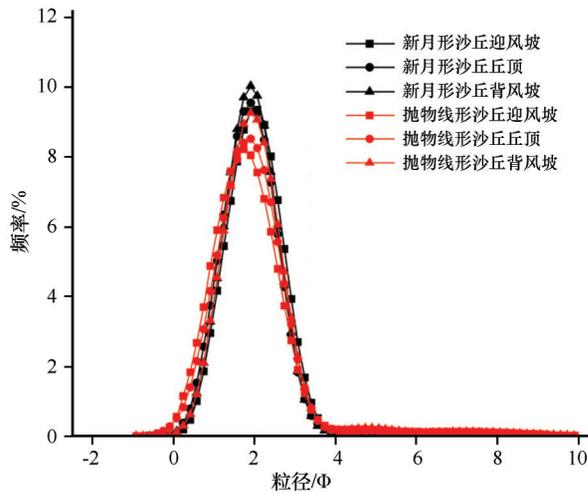


图2 毛乌素沙地不同沙丘3个部位的粒度频率曲线  
Fig.2 Grain-size frequency curves for three parts of different dunes in the Mu Us Desert

坡粒径较细,丘顶粒径较粗;抛物线形沙丘背风坡粒度频率曲线偏右,迎风坡曲线偏左,说明抛物线形沙丘背风坡粒径较细,迎风坡粒径较粗。

新月形沙丘和抛物线形沙丘平均概率累计曲线明显由两段组成,分别代表跃移组分和悬移组分,缺少蠕移组分,跃移组分和悬移组分的截点位于3~3.25  $\Phi$ ,其中跃移组分线段斜率最大,含量最高,可以占到整个样本的近95%,新月形沙丘跃移组分斜率相比抛物线形沙丘更大,分选更好(图3)。就两个沙丘类型的3个地貌部位而言,也都是由两段组成,跃移组分和悬移组分的截点也位于3~3.25  $\Phi$ 左右。两种沙丘类型不管是哪个部位,都是新月形沙丘跃移组分含量更高,悬移组分含量更低。

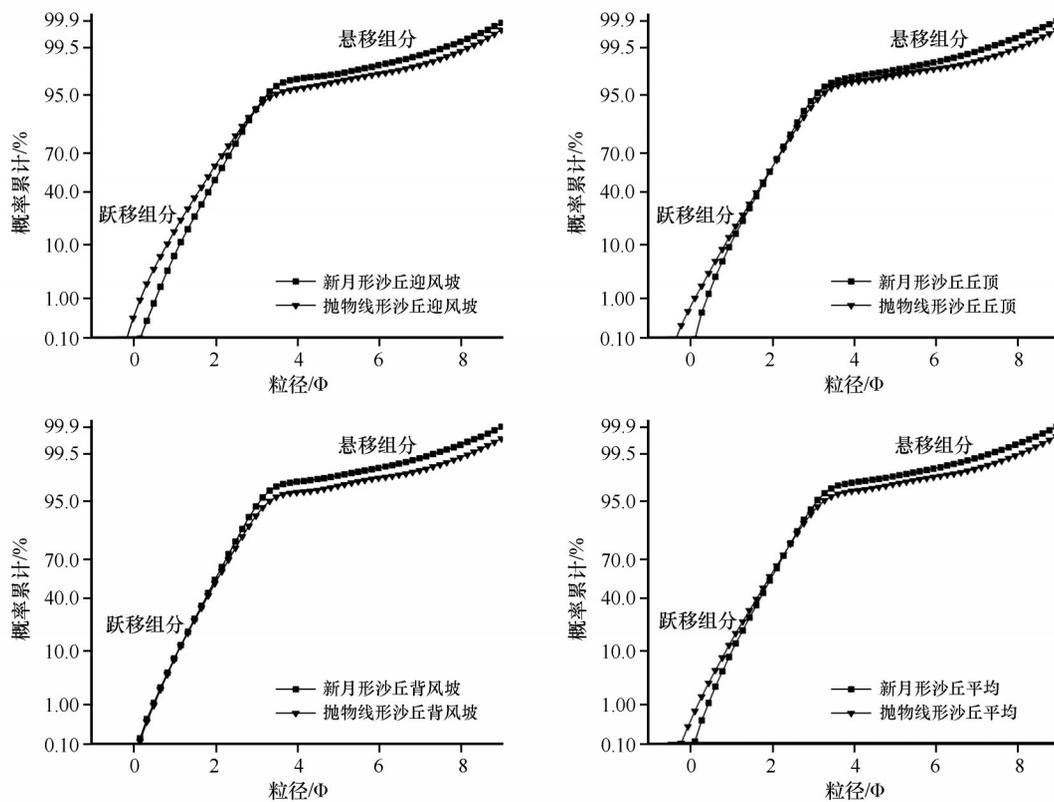


图3 新月形沙丘和抛物线形沙丘沉积物概率累计曲线  
Fig.3 The probability cumulative curve of barchan and parabolic dunes

### 2.4 沙丘的粒度分布模式

由于沙丘形态和气流的作用,不同沙丘形成了迎风坡-丘顶-背风坡不同的粒度分布模式。沙丘的粒度分布模式逻辑上可以有6种情况,毛乌素沙地新月形沙丘每种粒度分布模式都存在,抛物

线形沙丘除了第6种,其他5种也同时存在(图4)。新月形沙丘中出现最多的是迎风坡最细模式,占比65%,其中丘顶最粗占40%,背风坡最粗占25%;而抛物线形沙丘则最多的是背风坡最细模式,占比56%,其中丘顶最粗占36%,迎风坡最粗占20%。

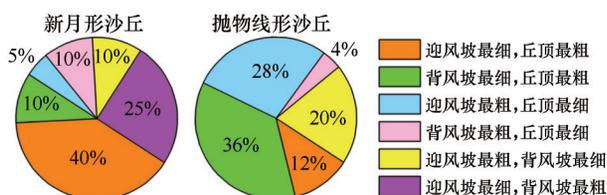


图4 毛乌素沙地两种沙丘的粒度分布模式统计图

Fig.4 Grain size distribution patterns of two types of dunes in the Mu Us Desert

### 3 讨论

#### 3.1 粒度参数差异

新月形沙丘和抛物线形沙丘的粒度参数大多没有显著性差异,但其中的分选系数,抛物线形沙丘要显著大于新月形沙丘( $P<0.05$ ),即分选更差。充分的分选过程可以有效提高风成沙的分选程度,降低 $\sigma$ 值,植被覆盖程度会显著影响风成沙的分选过程<sup>[25]</sup>。植被对分选作用的影响主要表现在以下几个方面:植被覆盖可以有效降低风速、从而减弱风对地表风成沙的侵蚀作用<sup>[26-28]</sup>,削弱风成沙的传输<sup>[28]</sup>,拦截运动中的粗颗粒,并增加细颗粒组分的含量<sup>[29]</sup>,降低风成沙的分选程度。新月形沙丘是典型的流动沙丘,表面植被覆盖度低,20个新月形沙丘的植被覆盖度为0.5%~15%,大部分在10%以下,植被对分选过程的影响较弱,随着风力不断作用,流动沙丘中的粗颗粒和细颗粒组分在这一过程中逐渐损失,跃移质组分不断增加,导致分选变好<sup>[30-31]</sup>。抛物线形沙丘是典型的半流动-半固定沙丘,表面植被覆盖度较高,25个抛物线形沙丘的植被覆盖度为5%~65%,其中超过一半的沙丘植被覆盖度大于20%,且最大的已超过50%,显著影响了风成沙的分选过程,因此分选较差。此外,抛物线形沙丘悬移组分略高于新月形沙丘,是由于抛物线形沙丘表面植被覆盖阻碍了风成沙粗颗粒的运动,捕获了风沙流中的细颗粒,以及植被风化成壤过程中产生的细颗粒,导致悬移组积累而含量增加。此外,3个地貌部位中,抛物线形沙丘的迎风坡分选系数显著大于新月形沙丘的迎风坡,这是由于抛物线形沙丘两翼的阻挡,导致两翼间地风沙流更强劲,当受到迎风坡的阻挡时,风速降低,从而使较粗颗粒在坡脚沉积,导致抛物线形沙丘迎风坡分选较差,而在新月形沙丘迎风坡下部的风蚀作用增大了较粗沙颗粒被搬运的概率,导致坡脚表沙粒径变

细,分选变好<sup>[32]</sup>,从表1中也可以看出,抛物线形沙丘迎风坡的粗沙含量显著大于新月形沙丘迎风坡( $P<0.05$ )。

#### 3.2 不同类型沙丘粒度分布模式偏向

新月形沙丘具有凸而缓的迎风坡和凹而陡的背风坡,且两侧对称翼角指向下风向。随着地表植被覆盖度的增加,限制和固定了新月形沙丘两翼的移动,而新月形沙丘中部则继续向下风向移动,最终形成对称翼角指向上风向、迎风坡平缓凹进、背风坡陡且呈弧形凸出、与新月形沙丘形态相反的抛物线形沙丘<sup>[4,33-35]</sup>。由图4发现,新月形沙丘中出现最多的是迎风坡最细模式(65%),其中丘顶最粗40%,背风坡最粗25%;而抛物线形沙丘则倾向于背风坡最细模式(56%),其中丘顶最粗36%,迎风坡最粗20%。两种沙丘截然不同的粒度分布模式偏向主要是两者相反的形态以及形态与气流之间的相互作用所造成的。新月形沙丘迎风坡的隆起改变了地表微地形从而加剧了地形的起伏,引起气流辐合加速<sup>[36]</sup>,迎风坡遭受侵蚀形状先向内凹,向上逐渐外凸,到了坡中部位曲率最大,风速急剧增大,沿坡线继续运动到距丘顶某个距离时,风速达到最大,此后因为坡度明显变缓风速减小,风沙流中的较粗颗粒在重力作用下先沉积,使得丘顶粒度最粗<sup>[37]</sup>。新月形沙丘迎风坡侵蚀作用大于背风坡,故迎风坡平均粒径最细,即迎风坡最细,丘顶最粗模式;而背风坡比丘顶更粗的模式,可能是由于随着沙丘高度的增加,气流越过丘顶后从而发生分离,风速下降致使沙粒沉积在沙丘背风坡,持续不断的沉积过程最终导致沙丘发生崩塌,从而形成沙丘落沙坡,同时也造成了表沙粒径由丘顶至落沙坡底部由小变大的趋势<sup>[32]</sup>。抛物线形沙丘两翼开口面朝迎风向,在两翼中间,由于近地面的风力会受到两翼的阻挡,即狭管效应,气流相比两翼更强劲,当风沙流运行至迎风坡坡脚时,由于受到沙丘迎风坡的阻挡,风速会略有降低,从而使风沙流中较粗颗粒首先在迎风坡脚发生沉积,当气流到达丘顶后,由于气流分散,风速降低,使沉积物中大量的粗物质在此发生沉积,这是造成丘顶平均粒径最粗的根本原因,在背风坡,由于气流分散导致风速迅速降低,风沙流中携带的大量碎屑物质沉降堆积导致背风坡脚的平均粒径较小<sup>[4]</sup>,即背风坡最细、丘顶最粗模式;而迎风坡比丘顶更粗的模式,可能是因为抛物

线形沙丘顶部的植被拦截了较多细小颗粒,使得迎风坡是3个部位中粒径最粗的,从表1可以看到,抛物线形沙丘丘顶的粉沙、极细沙和细沙含量稍多于迎风坡。从图2也可以看出,新月形沙丘的迎风坡和抛物线形沙丘的背风坡粒度频率曲线都偏右,说明粒径偏细,一定程度上也指示了两种沙丘粒度模式的偏向结果。

#### 4 结论

植被覆盖程度能显著影响风成沙的分选过程,抛物线形沙丘是典型的半流动-半固定沙丘,表面植被覆盖度高于新月形沙丘。植被能拦截风沙流中粗颗粒的运动,也能捕获细颗粒,以及植被风化成壤产生细颗粒,这些功能导致抛物线形沙丘相比新月形沙丘分选更差,悬移组分更高。由于抛物线形沙丘迎风坡的沉积和新月形沙丘迎风坡的侵蚀,抛物线形沙丘迎风坡分选较差,粗沙含量更高。

沙丘迎风坡-丘顶-背风坡的粒度分布模式中,新月形沙丘出现最多的是迎风坡最细模式,占比65%,其中丘顶最粗40%,背风坡最粗25%,而抛物线形沙丘则倾向于背风坡最细模式,占比56%,其中丘顶最粗36%,迎风坡最粗20%。新月形沙丘和抛物线形沙丘相反的形态特征以及形态与气流间的相互作用,使得两种沙丘类型出现截然不同的粒度组合偏向。从粒度频率曲线也可以看出,新月形沙丘的迎风坡和抛物线形沙丘的背风坡曲线都偏右,说明粒径偏细,这也指示了两种沙丘粒度模式的偏向结果。

#### 参考文献:

- [1] Livingstone I. Grain-size variation on a 'complex' linear dune in the Namib Desert [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1987, 35(1): 281-291.
- [2] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 161(1/2): 1-14.
- [3] Friedman G. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1961, 31(4): 514-529.
- [4] 马倩, 武胜利, 刘永泉, 等. 艾比湖流域抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 650-657.
- [5] Abolkhair Y M S. The statistical analysis of the sand grain size distribution of Al-Ubay-lah barchan dunes, Northwestern Arab-Rub-Alkhali desert, Saudi Arabia [J]. *GeoJournal*, 1986, 13(2): 103-109.
- [6] 哈斯, 庄燕美, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘横向沙丘粒度分布及其对风向变化的响应 [J]. *地理科学进展*, 2006(6): 42-51.
- [7] 苏松岭, 毛东雷, 蔡富艳, 等. 新疆策勒沙漠与砾质戈壁新月形沙丘表面沉积物粒度特征及其沉积环境 [J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(8): 124-132.
- [8] 唐进年, 王继和, 苏志珠, 等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘表面沙粒度分布特征 [J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 918-925.
- [9] 俞胜清, 阿布都米基提, 周向玲, 等. 新疆喀拉库姆沙漠新月形沙丘不同部位粒度特征 [J]. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1629-1635.
- [10] 王佩, 马倩, 朱元璞, 等. 新疆图开沙漠灌丛沙堆和抛物线形沙丘表层沉积物粒度特征及其沉积环境 [J]. *干旱区地理*, 2021, 44(6): 1644-1653.
- [11] 贺佳嘉, 全占军, 潘美慧, 等. 塔克拉玛干沙漠高大沙垄区垄间地沿主风向连续分布新月形沙丘表面沙粒粒度特征 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2012, 48(3): 292-297.
- [12] 周娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段新月形沙丘粒度分异研究 [J]. *地理科学*, 2011, 31(8): 958-963.
- [13] 吴霞, 哈斯, 杜会石, 等. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面粒度特征 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 937-944.
- [14] 凌智永, 李志忠, 李廷伟, 等. 塔克尔莫乎尔沙漠抛物线形沙丘的粒度分布模式 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 325-331.
- [15] 陈渭南, 雷加强. 塔克拉玛干沙漠新月形沙丘不同部位的粒度特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 1992, 6(2): 101-109.
- [16] 陈国祥. 毛乌素沙地风成沉积物沉积学特征 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2019.
- [17] 李智佩, 岳乐平, 薛祥煦, 等. 毛乌素沙地沉积物粒度特征与土地沙漠化 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(3): 578-586.
- [18] 李占宏, 海春兴, 丛艳静. 毛乌素沙地表土粒度特征及其空间变异 [J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 74-79.
- [19] 北京大学地理系. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [20] 王陇, 高广磊, 张英, 等. 毛乌素沙地风沙土粒径分布特征及其影响因素 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42(5): 1003-1010.
- [21] 吴正. 中国沙漠及其治理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] 高冲, 董治宝, 南维鸽, 等. 古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘沉积物理化特征及沉积环境 [J]. *中国沙漠*, 2022, 42(2): 14-24.
- [23] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [24] Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3-26.
- [25] 刘倩倩, 杨小平. 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 158-168.
- [26] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(5): 505-514.
- [27] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17(1): 50-68.
- [28] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Effect of veg-

- etation removal on airflow patterns and dune dynamics in the southwest Kalahari Desert[J]. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1994, 5(1): 13-24.
- [29] Fan D Q, Qin S G, Zhang Y Q, et al. Effects of sand-fixing vegetation on topsoil properties in the Mu Us Desert, northwest China[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2015, 14(4): 749-756.
- [30] 舒培仙, 牛东风, 李保生, 等. 毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 158-166.
- [31] 陈国祥, 董治宝, 崔徐甲, 等. 毛乌素沙地中部风成沙的组成与微形态特征[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 473-483.
- [32] 姜吴彬, 张德国, 杨小平. 沙丘形态及表沙粒度特征对风况和地表植被变化的响应[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(4): 120-129.
- [33] Lee D B, Ferdowsi B, Jerolmack D J. The imprint of vegetation on desert dune dynamics [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(21): 12041-12048.
- [34] Reitz M D, Jerolmack D J, Ewing R C, et al. Barchan-parabolic dune pattern transition from vegetation stability threshold [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(19): L19402.
- [35] Duran O, Herrmann H J. Vegetation against dune mobility [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(18): 188001.
- [36] 俞祥祥, 李生宇, 马学喜, 等. 不同发育阶段新月形沙丘表面粒度特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2019, 13(6): 111-118.
- [37] 刘宇胜, 魏翔鸿, 贾光普, 等. 一次大风过程对戈壁区新月形沙丘形态演变的影响[J]. *内蒙古林业科技*, 2018, 44(2): 14-20.

## Grain-size characteristics of surface sediments of barchan and parabolic dunes in the Mu Us Desert

Li Jingyun<sup>1</sup>, Fu Tianyang<sup>2</sup>, Shen Yulong<sup>1</sup>, Wang Lihui<sup>1</sup>, Wu Yongqiu<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321000, Zhejiang, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The grain size composition of dunes is mainly determined by wind regimes, sand sources, and the interaction between dune morphology and airflows. The grain-size composition of sand dunes can reflect the formation process of different types of dunes. Samples were collected from 0-5 cm of the surface layers at the foot of the windward slopes, the dune crests, and the foot of the leeward slopes of 20 barchan or dune chains and 25 parabola dunes in the Mu Us Desert. The grain-size composition of the samples was tested and analyzed to explore their grain size characteristics. The results show that: (1) There are no significant differences in grain-size composition and parameters between barchan dunes and parabola dunes, and the grain -size frequency distribution curves are typical single-peak shapes, but compared with barchan dunes, the parabolic dunes have worse sorting and higher suspended components; The windward slope of parabola dunes has worse sorting and higher coarse sand content than barchan dune. (2) In the statistics of grain-size distribution patterns of sand dunes, the barchan dunes tend to have the finest grain-size on the windward slope, accounting for 65%, whereas the parabolic dunes tend to have the finest grain-size on the leeward slope, accounting for 56%; The grain-size frequency distribution curve also indicated the biased results of the grain-size distribution patterns. (3) Vegetation, the opposite morphology of barchan dunes and parabola dunes and their interaction with airflows are the main factors that cause the differences in grain-size characteristics between the two types of dunes.

**Key words:** Mu Us Desert; barchan dune; parabolic dune; grain size characteristics