

# 新疆巴里坤鸣沙山风成沉积物粒度特征

徐利强

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 对新疆巴里坤鸣沙山风成沉积物粒度进行了分析, 并对其特征进行了探讨。结果表明: 巴里坤鸣沙山风成沉积物以中沙为主, 分选较好, 偏度值接近 0, 峰态很窄。概率累积曲线揭示风成沉积物碎屑颗粒的主要搬运方式为跃移, 所占比例为 40%~95%。沿沙脊—山坡—山脚的方向, 平均粒径逐渐变大, 分选性变差, 蠕移组分含量增加。粒度具有分形特征, 分维值平均为 0.94, 与常见碎屑物质相比, 处于较低的水平。分维值与标准偏差显著相关, 说明分选程度会对分形特征产生影响。

**关键词:** 巴里坤鸣沙山; 沙漠; 粒度; 分形

**文章编号:** 1000-694X(2017)05-0836-07

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00062

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

碎屑物质的粒度可反映沉积过程中搬运介质的流体力学性质, 是碎屑物质最基本的结构特征之一, 也是沉积物和沉积岩分类的重要依据<sup>[1]</sup>。粒径分析也因此被广泛用于湖泊沉积物、海洋沉积物、风成沉积物等环境载体的分析中<sup>[2-5]</sup>。碎屑物质的粒度特征是分析沉积环境的重要指标, 也是识别碎屑物质来源的重要工具<sup>[6-7]</sup>。作为一种典型的第四系沉积, 沙漠沉积物是典型的风成沉积物, 此类碎屑物质的粒度分析可反映风对颗粒的搬运过程, 并为进一步分析地形的成因提供基础<sup>[8-9]</sup>。

中国西北地区地处亚欧大陆腹地, 受大气环流和青藏高原的影响, 干旱少雨, 属温带大陆性气候, 境内的沙漠主要分布在西北干旱地区<sup>[10]</sup>。巴里坤鸣沙山位于新疆维吾尔自治区哈密地区, 是一个非常典型的小型沙漠。目前, 针对巴里坤鸣沙山地貌及其成因的探讨还十分少见, 也未见有针对巴里坤鸣沙山风成沉积物粒度特征的公开报道。研究表明, 一些碎屑沉积物具有分形特征, 但沙漠沉积物粒度的分形特征讨论相对较少, 也尚未见到巴里坤鸣沙山沉积物分形特征的相关报道。本文以采自巴里坤鸣沙山的风成沉积物为研究对象, 对其粒度特征进行分析, 为进一步探讨该地区风沙动力环境奠定基础。

## 1 研究区概况

巴里坤鸣沙山位于新疆维吾尔自治区哈密地区, 地跨巴里坤哈萨克自治县和伊吾县, 距离哈密市区约 60 km。鸣沙山地区海拔约 2 000 m, 长约 5 km, 宽约 3 km, 周边被高山草甸环绕。鸣沙山地区是天山山脉中的洼地, 三面环山, 分别为南面的天山支脉南巴尔摩山、北面的黑山和东面的白石山。据巴里坤哈萨克自治县气象观测站的资料, 该地区年平均气温为 2.7 °C, 年降雨量仅为 230.5 mm, 而年蒸发量高达 1 622 mm。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与测试方法

样品采自巴里坤鸣沙山东南缘最高的一座沙丘, 采样时间为 2015 年 7 月。该沙丘相对海拔约 120 m, 分别在沙山凸形山丘迎风坡的不同位置(沙脊、山坡、山脚)采集样品 20 个(编号为 MSS-1~MSS-20)。其中 MSS-1~MSS-10 采自沙山山脊, MSS-11~MSS-15 采自山坡, MSS-16~MSS-20 采自山脚(图 1)。使用不锈钢工具铲取 10 cm×10 cm 的表层沉积物样品约 500 g, 使用自封袋封装, 带回实验室保存。

MSS 系列样品呈松散态, 无明显胶结现象, 前

收稿日期: 2016-04-03; 改回日期: 2016-05-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(41402148); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2017HG TB0201)

作者简介: 徐利强(1984—), 男, 河北魏县人, 博士, 副教授, 研究方向为第四纪地质学。E-mail: xliq@hfut.edu.cn

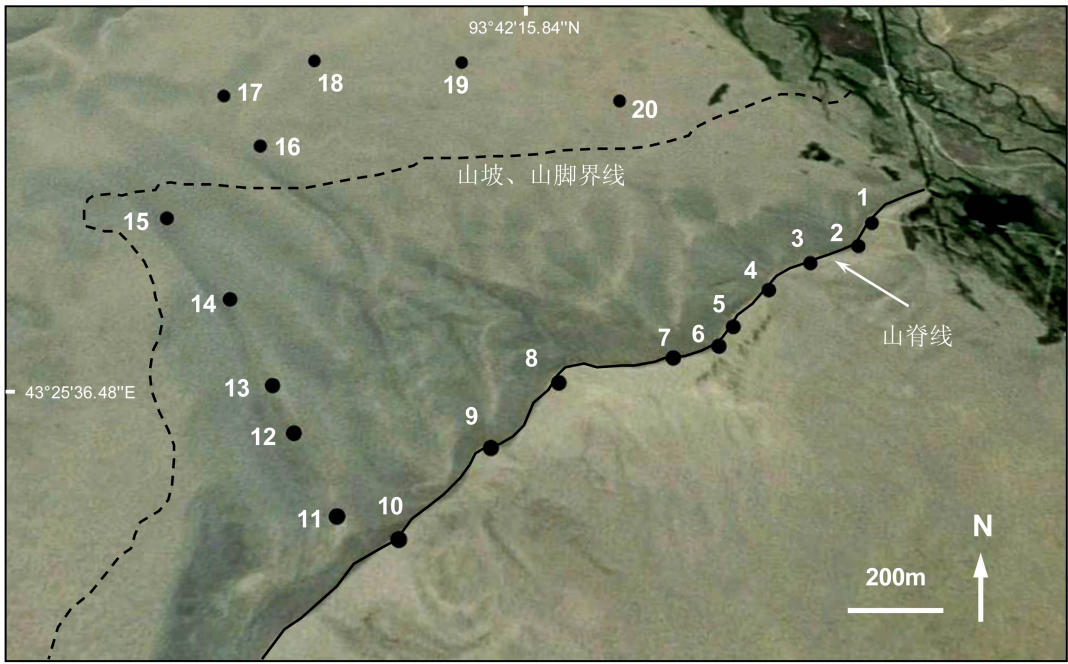


图 1 巴里坤鸣沙山东南缘沙丘采样点位置图(底图取自 Google Earth)

Fig. 1 Sampling sites in southeastern part of the Balikun Mingshashan Desert (modified from Google Earth)

处理及粒度测试流程如下：首先取少量混合均匀的样品于离心管中，加入 10 mL 10% 的分散剂六偏磷酸钠，超声震荡 10 min，以保证样品均匀分散在溶液中，然后上机测试。测试单位为合肥工业大学公共测试中心，所使用激光粒度仪型号为 Malvern APA2000，粒度测量范围为 0.02~2 000 μm，仪器重复测量相对误差 < 1%。

### 2.2 分析方法

粒级以 Krumbein 粒级(Φ)计，转换公式为  $\Phi = -\log_2(d)$ ， $d$  为粒径(mm)。

使用矩法计算样品的平均粒径( $M_z$ )、标准偏差( $S_d$ )、偏度( $SK$ )和尖度( $K_g$ )，各参数的计算公式分别为<sup>[11]</sup>：

$$M_z = \sum_{i=1}^n f_i M_{\Phi_i}$$

$$S_d = \left[ \sum_{i=1}^n f_i (M_{\Phi_i} - M_z)^2 \right]^{1/2}$$

$$SK = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (M_{\Phi_i} - M_z)^3}{S_d^3}$$

$$K_g = \frac{\sum_{i=1}^n f_i (M_{\Phi_i} - M_z)^4}{S_d^4}$$

式中： $M_{\Phi}$ 为粒级(以 Φ 值计)； $f_i$ 为每个粒级所对应的频率。

根据分形理论，自然界很多物质具有自相似性。

该理论也被应用于地质学中，分形几何也被广泛用于描述碎形物质的特征。分形程度常用分维值来表示，值越大，对象的自相似性越高。分维值的计算方法有多种，本文使用最为广泛的幂指数法来计算<sup>[12-14]</sup>，具体计算过程为：

- (1) 在双对数直角坐标系(lg-lg)上绘制  $m(r)/m$  和  $r$  的散点图( $m(r)/m$  为直径小于  $r$  的颗粒累积质量  $m(r)$  与总质量  $m$  的百分比，假设碎屑颗粒密度不变，可用累积体积百分比代替质量百分比)；
- (2) 对数据点进行线性拟合，得到拟合直线的斜率  $b$ ；
- (3) 根据公式  $D=3-b$ ，计算得到分维值  $D$ 。

## 3 结果与分析

### 3.1 粒度组成特征

样品的粒径范围为 -1~4 Φ，即所有颗粒均属于沙，不含粉沙和砾石。样品粒度的频率曲线以单峰态为主，且峰形较窄，累积频率曲线也相对较陡(图 2)，说明沉积物经过了充分的分选，也反映了一定风沙动力条件下碎屑颗粒搬运方式相对简单。

沙山不同位置样品的峰形仍表现出一定的差别。沙脊样品的频率曲线最窄，累积频率曲线斜率也较大；山坡和山脚样品的频率曲线逐渐变宽，累积频率曲线的斜率也逐渐变小，这意味风成沉积物在

沙脊、山坡和山脚间发生了分异,样品的分选性沿山

脊—山坡—山脚的方向逐渐变差。

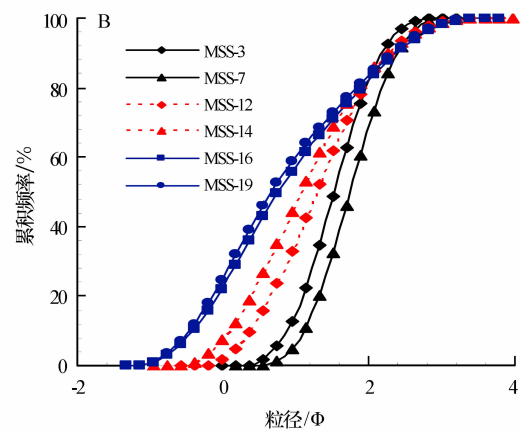
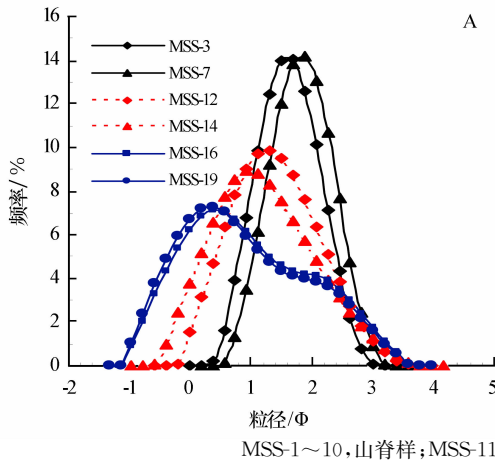


图2 代表性样品粒度频率分布曲线(A)与累积频率曲线(B)

Fig. 2 Grain size frequency curves (A) and cumulative curves (B) of typical samples

总的来看,巴里坤鸣沙山沙粒比较粗,中沙为粒级的主体,接近一半(44.4%),细沙和粗沙含量相当,平均含量约为20%;极细沙和极粗沙的含量共计约10%(图3)。沙丘不同地方,沉积物粒径级别存在差异。沙脊以中沙为主,占63.1%,细沙占29.7%,粗沙含量较少,只占7.0%,且不含极粗沙。山坡也是以中沙为主,但含量稍有下降,占40.7%;细沙和粗沙含量较为接近,分别占25.5%和23.9%;并出现了少量的极粗沙,占6.9%。山脚的沉积物粒度组成相对复杂,中沙含量进一步下降至29.4%,粗沙含量增加到32.8%。总体来看,巴里坤鸣沙山样品粒级组成与库姆塔格沙漠中北部样品较为相似<sup>[15]</sup>。月牙泉鸣沙山沉积物以细沙为主<sup>[16]</sup>,巴里坤鸣沙山风成沉积物则是以中沙为主,这反映了巴里坤地区相对强的风沙搬运能力。

沿沙脊—山坡—山脚的方向,沉积物由细沙—中沙—粗沙三元体系过渡到更为多元的极细沙—细沙—中沙—粗沙—极粗沙体系,中沙和细沙含量逐渐下降,但粗沙含量逐渐增加,即平均粒径增加,而分选性则逐渐变差。

### 3.2 粒度参数特征

巴里坤鸣沙山样品  $M_z$  变化范围为 0.91~1.94  $\Phi$  (261~532  $\mu\text{m}$ ), 平均值 1.50  $\Phi$  (364  $\mu\text{m}$ ) (图4A), 平均粒径明显高于塔克拉玛干沙漠和肖塘过渡带的沙粒<sup>[17-18]</sup>, 但比准噶尔中南部沙尘暴源区地表沉积物略小<sup>[19]</sup>。  $M_z$  值也说明巴里坤鸣沙山样品中的颗粒以沙为主, 这与频率分布曲线的分析结果一致。

样品  $S_d$  的变化范围为 0.40~1.11  $\Phi$ , 平均值 0.65  $\Phi$  ( $n=20$ , 图4B), 按照 Folk 等<sup>[20]</sup> 对分选程度的划分, 属中等到较好程度的分选, 这也在一定程度上反映了相对稳定的风沙动力。从  $S_d$  的绝对值来看, 巴里坤鸣沙山风成沉积物的分选性明显优于中新世黄土和中国中东部地区河流、湖泊、三角洲、滨海和浅海沉积物<sup>[11,21]</sup>, 与敦煌月牙泉鸣沙山相当<sup>[16]</sup>, 但比腾格里沙漠沙坡头地区样品的分选性要差<sup>[22]</sup>。较好的分选性也暗示了该地风成沉积物远离沙源区及较长的风沙作用时间。

样品  $SK$  变化范围为 -0.22~0.49  $\Phi$ , 平均值 0.11  $\Phi$  (图4C), 与中国北方代表性沙漠沉积物样品的  $SK$  较为一致<sup>[18]</sup>。沙脊样品的  $SK$  接近 0, 即近乎对称, 但山坡和山脚样品的  $SK$  明显偏大, 说明粗粒组分相对集中。

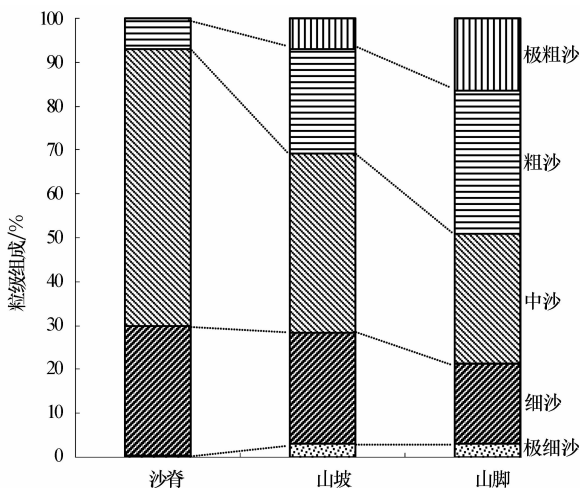


图3 不同位置样品的粒级组成

Fig. 3 Grain size compositions of samples in different locations

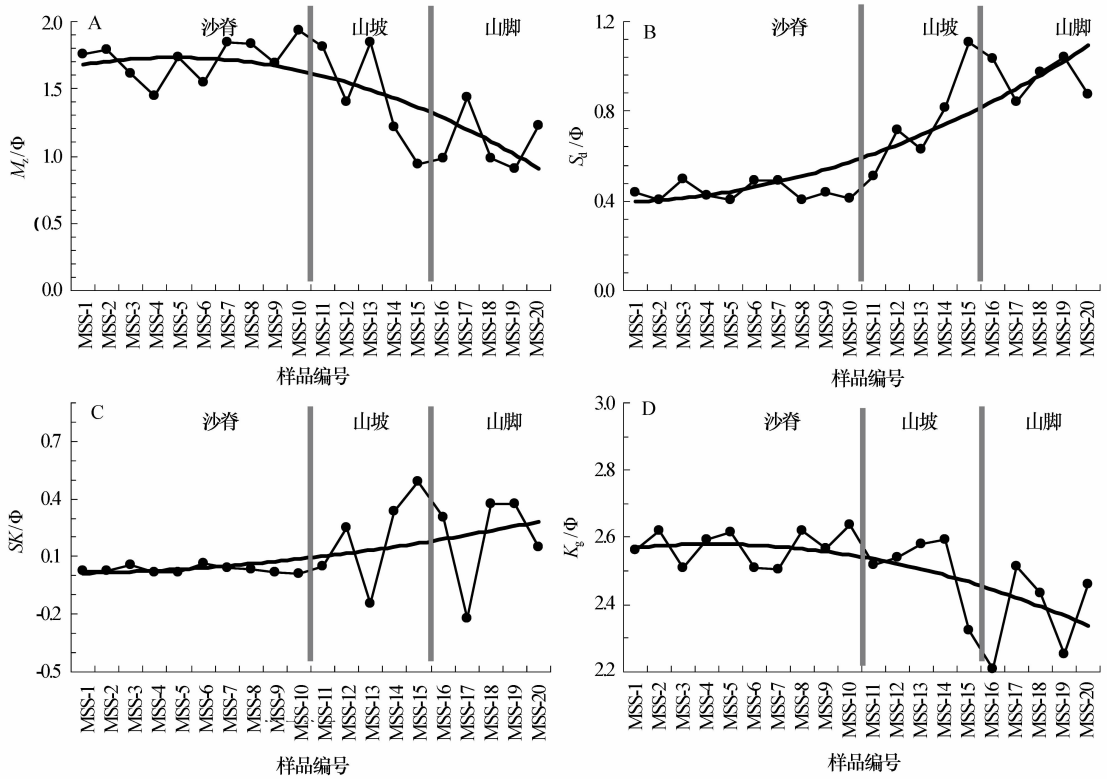


图 4 系列样品粒度参数  
Fig. 4 Grain size parameters for the samples

样品  $K_g$  变化范围为 2.21 ~ 2.64  $\Phi$ , 平均值 2.51  $\Phi$  (图 4D), 总体而言样品峰态为很窄。

巴里坤鸣沙山不同位置沉积物的粒度特征沿沙脊—山坡—山脚的方向表现出一定的变化规律 (图 4)。沙脊、山坡和山脚的  $M_z$  分别为 1.72  $\Phi$ 、1.44  $\Phi$  和 1.10  $\Phi$ , 反映了自山脊到山脚平均粒径逐渐增大。从分选性来看, 山坡样品的标准偏差  $S_d$  为 0.76  $\Phi$ , 是山脊 (0.44  $\Phi$ ) 的 1.73 倍, 山脚样品的  $S_d$  高达 0.95  $\Phi$ , 是山脊的 2.2 倍。即山脊分选性最好, 山坡次之, 山脚最差。沙脊、山坡和山脚的  $K_g$  值逐渐下降, 说明样品的峰形变宽, 同时也意味着分选性逐渐变差。

沙脊、山坡和山脚不同部位沉积物粒度特征存在明显的差异。一般来说, 沙丘表面粒度的分布是沙丘形态与气流之间相互作用的结果 [23]。由于样品采自迎风坡, 为高饱和风沙流环境, 沿坡脚向沙脊方向风的侵蚀能力逐渐减弱, 导致山脚蚀余粗颗粒富集, 分选性也较差。同时, 沙粒向沙脊迁移的过程也是一个分选的过程, 并在沙脊处发生卸载堆积 [17], 沙脊沙粒的粒径更小, 但分选更好, 尖度也有所增加。这与腾格里沙漠东南缘凸形沙丘迎风坡的情况类似 [24]。

### 3.3 概率累积曲线特征

风的搬运方式可以分为蠕移、跃移和悬移, 在概率累积曲线上通常表现为几条直线段。巴里坤鸣沙山系列沉积物的概率累积曲线表现为三段式和两段式两种类型 (图 5)。对于三段式概率累积曲线, 3 条线段分别反映了蠕移、跃移和悬移 3 种方式, 而两段式只存在跃移和悬移两种方式, 蠕移、跃移、悬移的临界粒径约为 0.6  $\Phi$  和 2.7  $\Phi$ 。由图 5 可以看出, 跃移构成了鸣沙山沉积物的主要运动方式, 但在不同位置比例有所变化。对于沙脊处的样品 (图 5 中 MSS-3, MSS-7), 搬运方式相对单一, 超过 95% 的组分以跃移的方式运动, 且不含蠕移组分。与之相比, 山坡处的样品搬运方式相对复杂, 同时含有蠕移、跃移和悬移组分, 但跃移组分的含量下降至 50% 左右, 出现了蠕移组分 (即在跃移颗粒的冲击下, 粒径较大的沙粒沿着地面慢慢滚动), 占比约 20% ~ 30% (图 5 中 MSS-12, MSS-14)。对于山脚处的样品, 也同时存在蠕移、跃移和悬移 3 种搬运方式, 各组分占比约为 40%、40% 和 20% (图 5 中 MSS-16, MSS-19), 跃移组分含量进一步下降, 蠕移组分含量继续增加。在迎风坡山脚处, 风吹蚀地表时, 相对较

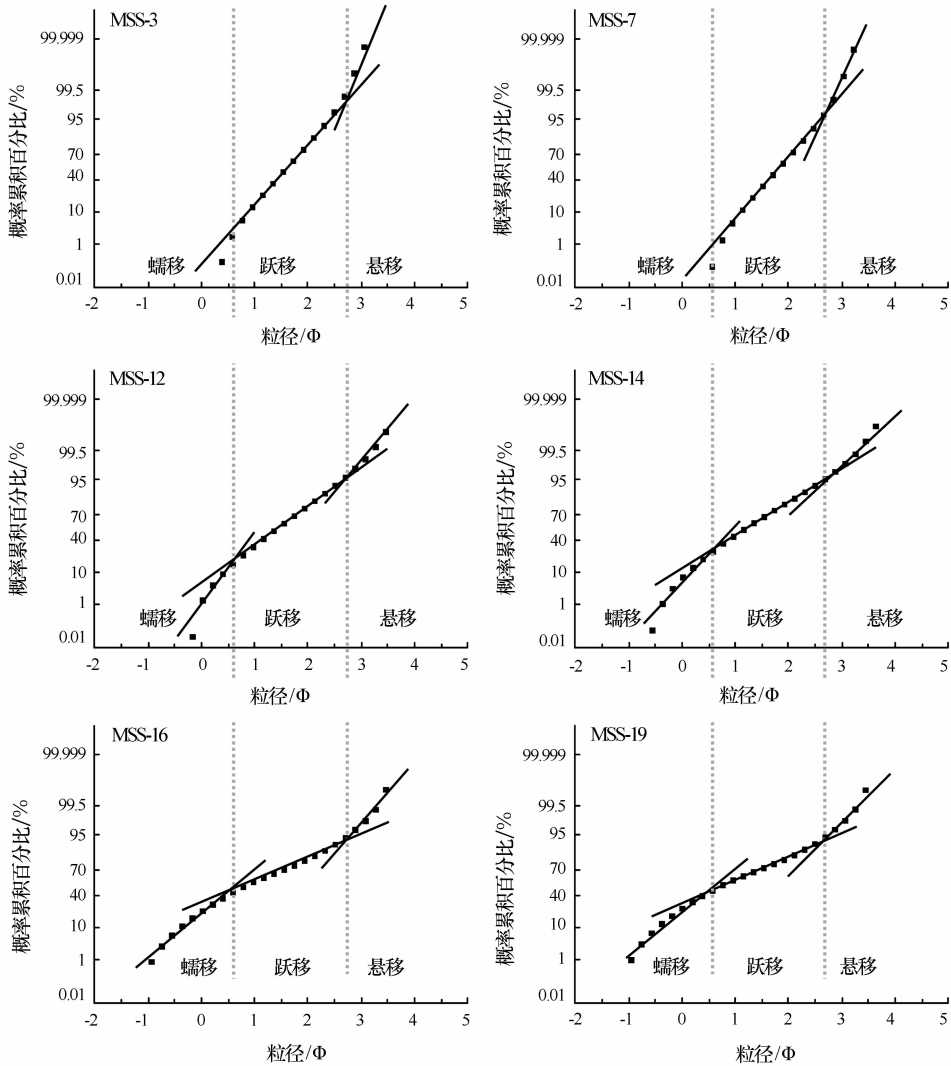


图 5 代表性样品概率累积曲线

Fig. 5 Accumulation probability curves for typical samples

细的沙粒被带走, 蚀余颗粒粒径变大, 在跃移组分的撞击下, 以蠕移的形式被搬运。即沿沙脊—山坡—山脚的方向, 风成沉积物中的跃移组分逐渐下降, 蠕移组分逐渐增加。

### 3.4 粒度分形特征

在 5%~95% 无标度区间内, 以 MSS-18 样品为例,  $\lg[m(r)/m]$  和  $\lg(r)$  在统计学上具有显著的正相关性(图 6A), 说明鸣沙山风成沉积物具有分形特征, 即自相似性。

巴里坤鸣沙山风成沉积物系列样品分维值分布范围为 0.06~1.90, 平均值 0.94 ( $n=20$ , 图 6B)。与其他碎屑物质(断层泥、黄土、湖泊沉积、冰碛物、粉尘和阶地沉积等)相比<sup>[12, 25-27]</sup>, 巴里坤鸣沙山风成沉积物的分维值明显偏小, 与古尔班通古特沙漠表层沉积物的分维值较为接近<sup>[19]</sup>, 说明这些沉积物

的复杂程度相对较低, 自相似性相对较差。

沙脊、山坡和山脚处样品的平均分维值分别为 0.38、1.32 和 1.70, 不同位置的样品表现出不同程度的自相似性, 这可能与分选程度有关。巴里坤鸣沙山风成沉积物系列样品的分维值与标准偏差  $S_d$  显著正相关 ( $r^2=0.94$ , 图 6C), 进一步证实了分选性对分维值的影响。在分选性较差时, 沉积物的组成和结构也就相对复杂和混乱, 导致较高的自相似性和较大的分维值。

## 4 结论

新疆巴里坤鸣沙山风成沉积物主要由沙组成, 以中沙为粒级主体, 样品粒径平均值 1.50  $\Phi$  (364  $\mu\text{m}$ ), 且沿沙脊—山坡—山脚方向粒径逐渐增大。

粒度的频率分布曲线以单峰态为主, 峰形近乎对称, 峰度较窄, 累积频率曲线相对较陡, 说明风沙

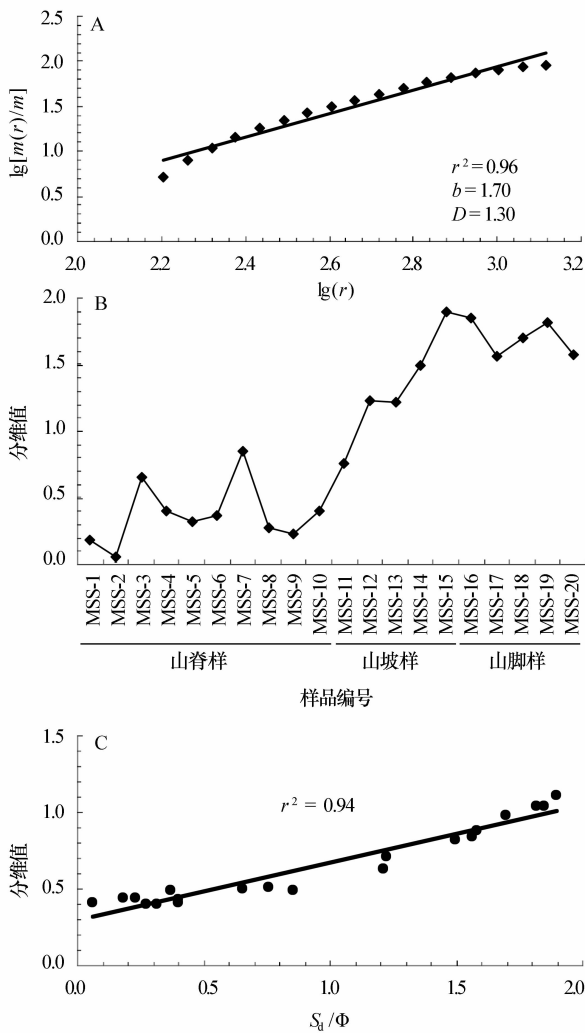


图 6 MSS-18 样品的  $\lg[m(r)/m]-\lg(r)$  关系图(A)、系列样品的分维值(B)及分维值与标准偏差相关性(C)  
 Fig. 6 Plots of  $\lg[m(r)/m]-\lg(r)$  for MSS-18 (A), fractal dimension values (B) and correlation analysis between fractal dimension and standard deviation

动力相对稳定,分选性较好。概率累积曲线表明这些碎屑物质的主要搬运方式为跃移,比例超过 40%。

样品粒度具有分形特征,分维值平均值为 0.94,该值相对其它碎屑物质较小。分选程度会影响粒度分形特征,分选性越差,分维值越大。

**致谢:**合肥工业大学张达玉副教授、硕士研究生叶龙翔在采样过程中给予了帮助,在此表示感谢。

**参考文献:**

[1] 沈吉,薛滨,吴敬禄,等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京:科学出版社,2010.  
 [2] 陈敬安,万国江,张峰,等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J]. 中国科学: D 辑, 2003, 33

(6):563—568.  
 [3] 郑洪波,陈国成,谢昕,等. 南海晚第四纪陆源沉积:粒度组成,动力控制及反映的东亚季风演化[J]. 第四纪研究, 2008, 28(3):414—424.  
 [4] Hao Q, Wang L, Oldfield F, et al. Delayed build-up of Arctic ice sheets during 400,000-year minima in insolation variability [J]. Nature, 2012, 490(7420):393—396.  
 [5] 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.  
 [6] 沈亚萍,张春来,李庆,等. 中国东部沙区表层沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(1):150—157.  
 [7] Pan B, Pang H, Zhang D, et al. Sediment grain-size characteristics and its source implication in the Ningxia-Inner Mongolia sections on the upper reaches of the Yellow River [J]. Geomorphology, 2015, 246:255—262.  
 [8] 李恩菊,董治宝,赵景波. 巴丹吉林沙漠典型高大沙山迎风坡粒度特征[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3):471—478.  
 [9] Wang X, Dong Z, Zhang J, et al. Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea [J]. Sedimentary Geology, 2003, 161(1):1—14.  
 [10] Ding Z, Yu Z, Rutter NW, et al. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits [J]. Quaternary Science Reviews, 1994, 13(1):39—70.  
 [11] Qiao Y, Guo Z, Hao Q, et al. Grain-size features of a Miocene loess-soil sequence at Qinan: implications on its origin [J]. Science in China, 2006, 49(7):731—738.  
 [12] 柏春广,王建. 一种新的粒度指标:沉积物粒度分维值及其环境意义[J]. 沉积学报, 2003, 21(2):234—239.  
 [13] Zhang R, Wang Y, Gao J, et al. Sediment texture and grain-size implications: the Changjiang subaqueous delta [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(4):38—49.  
 [14] Ling Y, Zhou C H, Li X Y. Influence of microwave and ultrasound on sludge dewaterability [C] // International Conference on Material and Environmental Engineering. Paris, France: Atlantis Press, 2014.  
 [15] 何清,杨兴华,霍文,等. 库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J]. 中国沙漠, 2009, 29(1):18—22.  
 [16] 张号,张克存,安志山,等. 敦煌月牙泉景区沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3):645—649.  
 [17] 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—108.  
 [18] 霍文,何清,杨兴华,等. 中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究[J]. 水土保持研究, 2011, 18(6):6—11.  
 [19] 钱亦兵,吴兆宁,陈冬梅,等. 准噶尔中南部沙尘暴源区地表沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6):831—837.  
 [20] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1):3—26.  
 [21] Zhu C, Wang Z H, Xue B, et al. Characterizing the depositional settings for sedimentary organic matter distributions in the Lower Yangtze River—East China Sea Shelf System [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 93(3):182—191.

- [22] 哈斯,王贵勇. 沙坡头地区新月形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 271—275.
- [23] 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, 25(6): 42—51.
- [24] 哈斯,王贵勇. 腾格里沙漠东南缘横向沙丘粒度变化及其与坡面形态的关系[J]. 中国沙漠, 1996, 16(3): 215—220.
- [25] 陈冬梅,穆桂金. 不同沉积环境下沉积物的粒度分形特征的对比研究[J]. 干旱区地理, 2004, 27(1): 47—51.
- [26] 赵梅. 黄海中部海岸末次冰盛期第 1 硬质黏土层的粒度分维特征及其环境意义[J]. 海洋地质动态, 2008, 24(10): 8—13.
- [27] 徐利强,徐芳,周涛发. 巢湖沉积物粒度特征及其沉积学意义[J]. 地理科学, 2015, 35(10): 1318—1324.

## Grain Size Features for Aeolian Sediments from Balikun Mingshashan Desert, Xinjiang, China

Xu Liqiang

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Grain size of aeolian sediments from Balikun Mingshashan Desert, Xinjiang was analyzed, and its features were discussed in the present study. The results show that medium-size sands are the predominate component in the sediments. Frequency distribution curves of grain size of those deposits are nearly symmetrical, well-sorted and very leptokurtic. Probability cumulative curves reveal that the grains mainly move in the form of saltation, which accounts for approximately 40%—95%. Along the downward direction from sand ridge to the foot of the sand dune, mean grain sizes of the sediments increase gradually. Ratio of coarse component also elevates, but sorting of the grains becomes poor. The mean fractal dimension is 0.94, which is relatively low in comparison with some common detritus. A significant positive correlation between fractal dimension and standard deviation implies potential impact of sorting degree on fractal characteristics.

**Key words:** Balikun Mingshashan Desert; desert; grain size; fractal dimension