

# 巴丹吉林典型高大沙山粒度分布规律研究

邵天杰<sup>1</sup> 赵景波<sup>1,2</sup> 李恩菊<sup>1</sup> 董治宝<sup>1,3</sup>

(1. 陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 选巴丹吉林沙漠典型高大沙山(1 605 m)为研究对象,对沙山沉积物进行系统采样分析。结果表明,巴丹吉林沙漠典型高大沙山(1 605 m)粒度组成中细砂含量最高,中砂次之;粗砂、极细砂和粗粉砂含量均较少,胶粒、粘粒、细粉砂未出现。迎风坡沉积物粒度比背风坡细。迎风坡砂粒大小均匀、分选好,迎风坡沉积物颗粒较背风坡总体要均匀。沙山迎风坡和背风坡沉积物由坡脚至顶部粒径总体变细,砂粒大小趋于均匀,分选变好,偏度和峰态由波动趋于稳定。大沙山迎风坡下部侵蚀作用为主,背风坡中上部以风力堆积为主,下部以重力堆积为主。

关键词: 高大沙山; 粒度组成; 巴丹吉林沙漠; 粒度参数; 迎风坡; 背风坡

中图分类号: S157 文献标识码: A 文章编号: 1000-0690(2010)05-0790-06

随着沙漠化和全球气候变暖程度的加剧,对沙漠的研究越来越成为人类关注的焦点<sup>[1~9]</sup>。巴丹吉林沙漠以其独特的地理位置与地貌景观吸引了众多学者的关注。早在20世纪30年代,中国、瑞典科学家就对溺水下游的终端湖泊进行考察<sup>[10]</sup>,60年代,中国科学院治沙队对巴丹吉林沙漠的自然地理特征展开过详细的调查研究<sup>[11,12]</sup>。随着近些年中国对环境的重视和防治沙漠化的加强,科学工作者对巴丹吉林沙漠的研究更加深入细致<sup>[13~20]</sup>。本文通过对巴丹吉林沙漠典型高大沙山考察研究,选取其东南缘海拔1 605 m高大沙山纵断面,对其沉积物作了系统的采样分析,阐述高大沙山的粒度特征、分布规律等科学问题。

## 1 研究区自然概况及研究方法

巴丹吉林沙漠位于内蒙古高原的西南缘,是中国第三大沙漠,面积约 $4.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,海拔1 400~1 610 m,也是世界高差最大沙丘所在地。巴丹吉林沙漠属于温带极干旱气候区,年降水量仅40~80 mm,多集中在6~8月份,而蒸发量是降水量的40~80倍。虽然气候极为干旱,但巴丹吉林沙漠丘间地中有不少永久性湖泊分布。据统计,面积在 $1.5 \text{ km}^2$ 以下沙漠湖泊有140多个,多为咸水湖。

沙丘背风处、湖岸边和泉水旁生长着芦苇、梭梭、柠条、霸王、籽蒿、胡杨、骆驼刺、芨芨草、白刺、莎草、莎米、沙枣、锁阳、苁蓉等沙生植被。

巴丹吉林沙漠东南部沙丘以高大的复合、复杂沙丘形态为主,一般高在200~300 m之间,最高可达400 m以上。采样沙丘为位于巴丹吉林沙漠高大沙山密集分布的东南部,为巴丹吉林沙漠高差第二大的沙山( $39^\circ 50' \text{ N}$ 、 $102^\circ 28' \text{ E}$ )海拔1 605 m,相对高度为432 m,其东为必鲁图湖泊,西为印德尔图湖泊。迎风坡较为和缓,斜坡长约2.2 km。迎风坡约2/3处有一波折,其下部坡度在 $10^\circ$ 以下,中部坡度 $10^\circ \sim 15^\circ$ ,中上部坡度 $24^\circ \sim 27^\circ$ ,顶部 $28 \sim 33^\circ$ ;落沙坡较陡,长约0.52 km,坡度一般介于 $25^\circ \sim 33^\circ$ 之间,在形态、规模及与沙漠湖泊交替分布等方面具有巴丹吉林沙漠高大沙山区典型高大沙山的特点。在沙山迎风坡和被风坡不同部位选择具有典型代表性的样点进行样品采集,由沙山迎风坡底部到沙山主峰顶采集沙样19个,再由主峰顶到被风坡底采集沙样23个,共取沙样42个,其中,迎风坡坡脚采集3个样,编为YB001~YB003,迎风坡中下部采集6个样,编为YB004~YB009,迎风坡中上部采集6个样,编为YB010~YB015,迎风坡顶部采集3个样,编为YB016~YB018,被风坡顶

收稿日期:2010-01-10; 修订日期:2010-06-07

基金项目:教育部“长江学者”特聘教授项目资助。

作者简介:邵天杰(1982-),男,安徽淮北人,博士研究生,主要从事区域环境学研究。E-mail: shaotianjie\_2002@163.com

通讯作者:赵景波,教授。E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

部采集 4 个样, 编为 YB019 ~ YB022, 被风坡中上部采集 5 个样, 编为 YB023 ~ YB027, 被风坡中下部采集 9 个样, 编为 YB028 ~ YB036, 被风坡坡脚采集 6 个样, 编为 YB037 ~ YB042(图 1)。沉积物采样深度距沙面 10 cm 左右。同时为使沙丘沙样包含沙波纹波峰、波谷, 采样面积设定为 20 cm × 20 cm, 每个样品重约 100 g。根据所采集样品的特点, 用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer2000 激光粒度仪对样品进行测定。各粒级含量以体积百分比表示, 粒度特征参数值的计算均采用 Folk and Ward(1957) 制定的公式<sup>[21 22]</sup>(颗粒粒径用  $\varphi$  值表示) 数据结果在 MS - Excel 中进行统计分析。

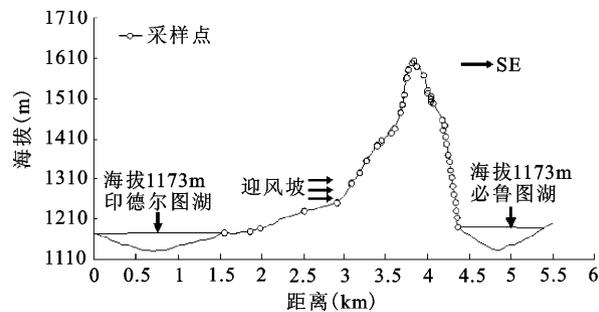


图 1 巴丹吉林沙漠典型高大沙山(1 605 m) 采样点分布位置

Fig. 1 Location of sampling sites of the classic megadunes (1 605 m) in Badain Jaran Desert

## 2 典型高大沙山粒度特征

### 2.1 沙山粒度组成特征

根据粒级划分标准<sup>[23]</sup>, 以 0.002、0.005、0.01、0.05、0.1、0.25、0.5、2 mm 作为胶粒、粘粒、细粉砂、粗粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂的分界线, 可得知该沙山各粒级组成具有如下特征:

胶粒 (< 0.002 mm)、粘粒 (0.002 ~ 0.005 mm)、细粉砂 (0.005 ~ 0.01 mm) 在剖面中未出现。

粗粉砂 (0.01 ~ 0.05 mm) 只出现背风坡的 YB028、YB035、YB038 和 YB039 这 4 个样中, 含量分别为 0.943%、1.027%、0.559% 和 0.614%。

极细砂 (0.05 ~ 0.10 mm) 在每个样品中均出现, 但总体含量很小, 其中迎风坡的平均含量为 0.712%, 变化范围为 0.01% ~ 3.451%。背风坡的平均含量为 2.192%, 变化范围为 0.037% ~ 8.151%。极细砂在迎风坡和背风坡各样品中的含量相差很小, 整个剖面的平均含量为 1.523%, 变

化范围在 0.01% ~ 8.151% 间; 最大含量出现在背风坡的 YB028 样中, 含量值为 8.151%; 最小含量出现在迎风坡的 YB005 样中, 含量为 0.01%。

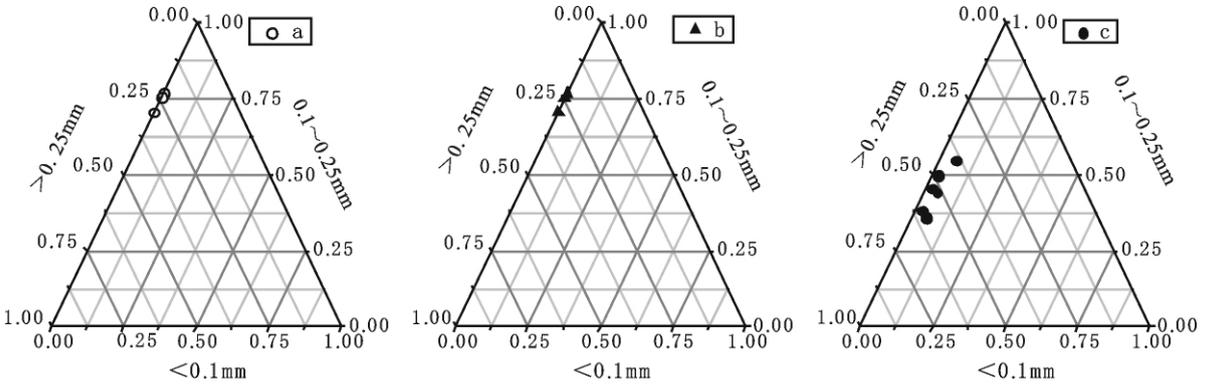
细砂 (0.10 ~ 0.25 mm) 在每个样品中均出现, 且总体含量特别大, 是该剖面粒级含量最大的。其中迎风坡的平均含量为 63.979%, 其变化范围为 40.51% ~ 77.438%; 背风坡平均含量为 57.503%, 变化范围为 35.936% ~ 71.947%。细砂在迎风坡含量比背风坡要高, 整个剖面平均含量 60.433%, 变化范围在 35.936% ~ 77.438% 之间; 最大含量出现在迎风坡的 YB001 样中, 含量为 77.438%; 最小含量出现在背风坡的 YB039 样中, 含量为 35.936%。

中砂 (0.25 ~ 0.50 mm) 在每个样品中均出现, 且总体含量较大, 粒级含量仅次于细砂。其中迎风坡平均含量为 34.957%, 变化范围为 19.315% ~ 55.869%; 背风坡的平均含量为 37.250%, 变化范围为 23.581% ~ 51.52%。中砂在迎风坡的含量比背风坡低。整个剖面的平均含量为 36.213%, 变化范围在 19.315% ~ 55.869% 之间。最大含量出现在迎风坡的 YB005 样中, 含量为 55.869%; 最小含量出现在迎风坡的 YB001 样中, 含量为 19.315%。

粗砂 (0.50 ~ 2 mm) 在部分样品中缺失。粗砂在迎风坡的平均含量为 0.352%, 变化范围为 0 ~ 3.611%; 背风坡的平均含量为 2.918%, 变化范围为 0 ~ 12.315%。粗砂在迎风坡中的含量比背风坡低。整个剖面的平均含量为 1.757%, 变化范围在 0 ~ 12.315% 之间。最大含量出现在背风坡的 YB041 样中, 含量为 12.315%。

由此可知, 巴丹吉林沙漠典型高大沙山 (1 605 m) 粒度组成是粗粉砂、极细砂、细砂、中砂、粗砂。其中细砂含量最高, 中砂次之, 粗砂、极细砂和粗粉砂含量均较少。

粒度成分三角图常用来对沉积物的粒度成分进行分类命名。根据沙山粒度成分三角图 (图 2) 可知, 大沙山迎风坡上部和下部中砂含量较高, 均达 75% 左右, 而中砂粒级以下较小, 只有 1% ~ 2%, 中砂粒径以上顶部略低于下部。背风坡中砂以上粒度组分占 37% 左右, 而中砂和中砂粒径以下含量分别为 61% 和 2%。可见, 虽然沙山沉积物粒度主要落在细砂和中砂之间, 但是迎风坡和背风坡粒度差别很大, 背风坡沉积物粒径明显大于迎风坡。



a 为迎风坡下部; b 迎风坡上部; c 背风坡下部

图 2 巴丹吉林沙漠典型高大沙山(1 605 m) 粒度成分三角图

Fig. 2 The triangular chart in particle size of the classic mega dunes (1 605 m) in Badain Jaran Desert

### 2.2 沙山粒度参数特征

从累积分布频率曲线图查出 5% ,16% 25% , 50% ,75% 84% 95% 处粒径值 ,分别为  $\Phi_5$ 、 $\Phi_{16}$ 、 $\Phi_{25}$ 、 $\Phi_{50}$ 、 $\Phi_{75}$ 、 $\Phi_{84}$ 、 $\Phi_{95}$  再采用 Folk and Ward 图解法的公式<sup>[21 22]</sup> 计算各参数值 Md( 中值粒径) 、Mz ( 平均粒径) 、 $\delta$ ( 标准偏差) 、Sk( 偏度) 、Kg( 峰态) ( 图 3) 。

根据巴丹吉林沙漠典型高大沙山( 1 605 m) 粒度参数数据计算可知 ,该沙山迎风坡沉积物的中值粒径 Md 值介于 7.533 ~ 8.094  $\phi$  之间 ,平均值则为

7.783  $\phi$  ,波动变率为 0.074。背风坡中值粒径 Md 值在 7.563 ~ 8.155  $\phi$  之间波动 ,平均值为 7.838  $\phi$  ,波动变率为 0.078 较迎风坡稍大。沙山迎风坡沉积物的平均粒径 Mz 值介于 7.530 ~ 8.090  $\phi$  之间 ,平均值为 7.780  $\phi$  ,波动变率为 0.074。背风坡平均粒径 Mz 值在 7.558 ~ 8.129 $\phi$  之间波动 ,平均值为 7.830 $\phi$  ,波动变率为 0.076 ,较迎风坡稍大。该沙山迎风坡沉积物的标准偏差的变化范围在 0.378 ~ 0.546 之间 ,平均值为 0.456 ,说明砂粒大小均匀、分选好; 背风坡沉积物的标准偏差介于

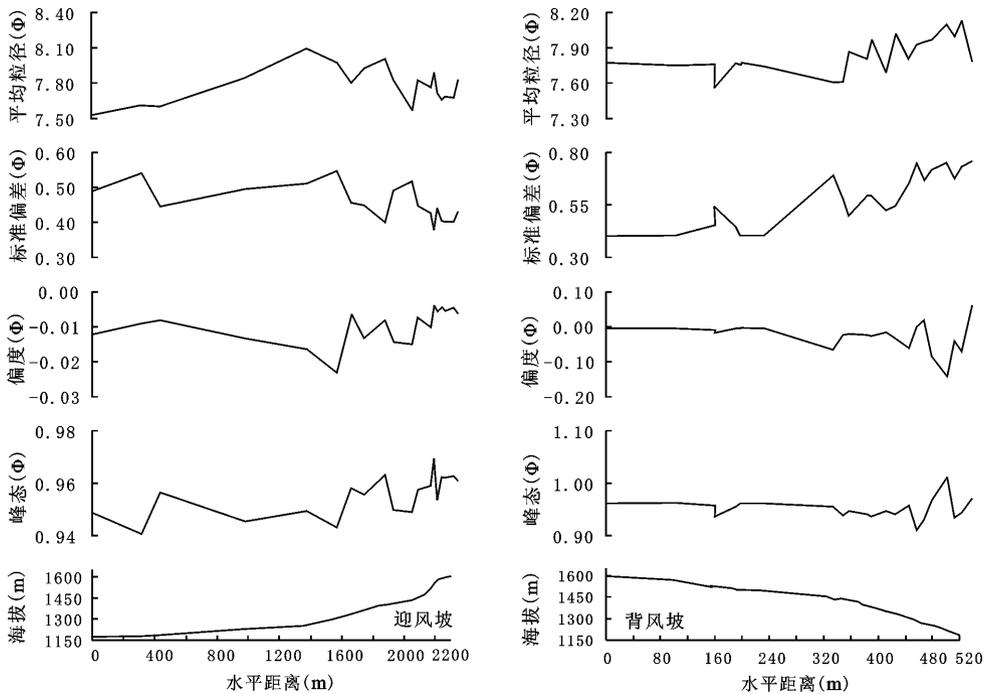


图 3 巴丹吉林沙漠典型高大沙山(1 605 m) 粒度参数

Fig. 3 The particle size parameter of the classic megadunes (1 605 m) in Badain Jaran Desert

0.403 ~ 0.758 之间,平均值是 0.572,分选中等。沙山整体的沉积物标准偏差在 0.378 ~ 0.758 之间波动,平均值为 0.52,分选中等。所以迎风坡沉积物颗粒较背风坡要均匀些。该沙山迎风坡沉积物的偏度  $S_k$  值变化范围在  $-0.023 \sim -0.04$  之间,平均值为  $-0.010$ ,颗粒集中在细端部分;背风坡沉积物的偏度  $S_k$  值介于  $-0.143 \sim 0.060$  之间,平均值是  $-0.026$ ,颗粒也集中在细端部分。根据沉积物偏度分级标准<sup>[28]</sup>,  $S_k$  值介于  $-0.30 \sim -0.10$  之间的,其沉积物颗粒粗细分布都呈近对称状态,所以迎风坡和背风坡沉积物颗粒分布均呈近对称状态。该沙山迎风坡沉积物的峰态( $K_g$ )值变化范围在 0.941 ~ 0.969 之间,背风坡沉积物的峰态( $K_g$ )值介于 0.911 ~ 1.012 之间,因此迎风坡和背风坡沉积物的峰态( $K_g$ )曲线均为中等峰态曲线。

### 3 讨论

#### 3.1 大沙山粒度组成变化特点

巴丹吉林沙漠高大沙山(1 605 m)不同部位沉积物粒度组成有一定差异(图 4),存在以下几个特点。一是通过对巴丹吉林沙漠高大沙山(1 605 m)不同部位沉积物粒度进行线性趋势拟合发现,无论是迎风坡还是背风坡,从沙山坡脚到坡顶粒度组成都呈现由粗变细趋势(图 4)。且背风坡粒度成分较迎风坡大。迎风坡粗砂含量很少,仅在中下部有少量粗砂,而背风坡自沙山顶部到坡脚粗砂的粒度含量不断增加(图 4),在坡脚处粗砂含量最高,达到 8.2%。可见,巴丹吉林沙漠高大沙山(1 605

m)迎风坡与背风坡沉积物由坡脚至顶部粒径呈变细趋势,但背风坡沉积物粒径总体大于迎风坡。因此沙山顶部沉积物粒度较沙山其他部位细。三是在迎风坡中部有时出现粒度成分变粗现象,表现为中砂含量增多,细砂含量减少。

#### 3.2 沙山粒度成分变化原因与风力作用

虽然在沙山迎风坡和背风坡从沙山坡脚到坡顶粒度组成都呈现由细变粗趋势(图 4)显示,然而它们形成原因和受到的动力作用有一定的不同。迎风坡坡脚粒度成分较粗,是在风力侵蚀作用下细小砂粒为风力搬运带走,剩下了较粗粒的成分决定的。野外实地观察可知,在坡脚沙丘表层粒度成分较粗,大约在 10 cm 深度以下粒度成分明显变细,指示沙丘表层物质是风蚀残留的物质。迎风坡中上部粒度成分较细是中上部坡度较大和高度加大,造成风力搬运能力降低并产生沉积而造成的。在沙山背风坡,下部粒度成分是最粗的,这是背风坡的坡度大(一般为 30°左右)沙山中上部的粗粒成分受重力作用影响显著而滚落到了下部的结果。沙山越高且坡度越大,坡脚处粗粒成分含量越高,粒径也更大一些。由沙山背风坡下部向上部,可观察到清楚的粒度成分的变细,表明重力作用的影响明显。因此,沙山下部物质成分变粗不代表风力作用强,指示的是重力作用的影响。在沙山中上部,粒度成分较细,这是越过沙山顶部的风沙流搬运堆积造成的。背风坡是沙丘接受堆积的斜坡,坡度大,堆积后的物质常受重力作用影响而向下滑落,粗粒成分滚动距离远,所以沙山中上部保留下来的

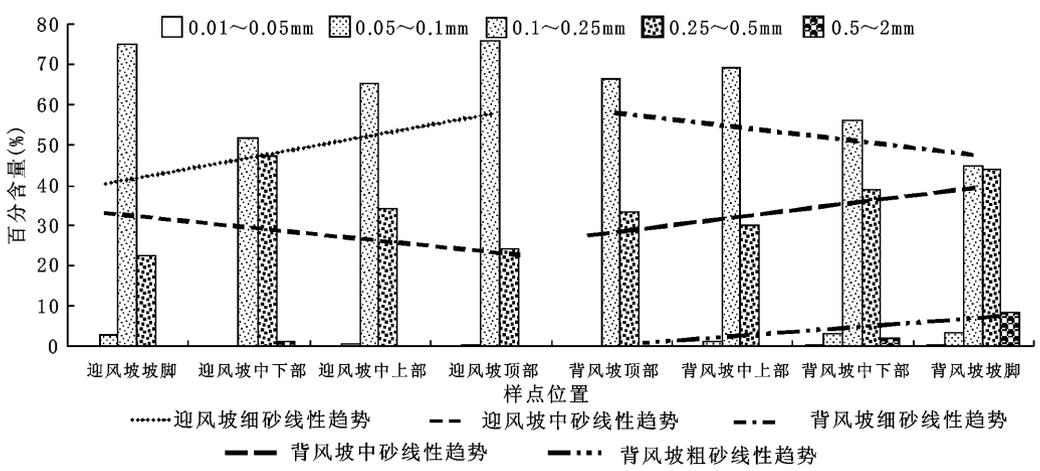


图 4 巴丹吉林沙漠高大沙山(1 605 m)不同部位粒度变化

Fig. 4 Variation in particle size distribution at different positions of the megadunes (1 605 m) in Badain Jaran Desert

物质成分很细。因此,沙山中上部粒度成分代表的风动力比实际发生的风动力要小。

### 3.3 沙山不同部位粒度分选性和粒度参数变化

沙山沉积物粒度参数在沙山不同部位有所不同(图4)。沙山沉积物平均粒径  $M_z$  和中值粒径  $M_d$  的最大值均出现在背风坡的坡脚处,分别为  $7.99 \phi$ 、 $8.00 \phi$ 。标准偏差  $\sigma$  的最大值为 0.72,出现在背风坡坡脚,砂粒分选差;最小值为 0.41,出现在迎风坡顶部,砂粒均匀,分选较好。沙山背风坡坡脚处的砂粒分选差主要与背风坡坡度大,重力作用明显,粗颗粒向下滚动聚集于坡脚处造成的。而迎风坡顶部因为海拔高,粗砂粒不能被风力搬运到沙山顶部,只有细砂粒可在沙山顶部沉积。迎风坡由坡脚到顶部,平均粒径先变粗再变细,砂粒大小趋于均匀,分选变好,偏度为近对称,峰态曲线为中等。沙山背风坡沉积物由坡脚到顶部,平均粒径总体变细,分选变好,偏度和峰态由波动趋于稳定。

## 4 结 论

综上所述,可以得出以下几点认识:

1) 巴丹吉林沙漠典型高大沙山(1 605 m) 粒度组成以细砂含量最高,中砂次之,粗砂、极细砂和粗粉砂含量均较少,胶粒、粘粒、细粉砂未出现。

2) 由于砂粒的搬运动力自坡脚到沙山顶部逐渐减弱,所以沙山迎风坡和背风坡沉积物由坡脚至沙山顶部粒径都呈变细趋势,且砂粒大小趋于均匀,分选变好,偏度和峰态由波动趋于稳定。沙山背风坡沉积物粒度总体大于迎风坡。

3) 迎风坡下部粒度成分较粗,是因为细小砂粒在风力侵蚀作用下被搬运带走,剩下了较粗粒的成分。野外实地观察可知,大约在 10 cm 深度以下粒度成分明显变细,指示大沙山迎风坡下部沙丘表层物质是风蚀残留的物质。背风坡是沙丘接受越过沙山顶部的风沙流堆积的斜坡,因其坡度较大,堆积后的物质常受重力作用而向下滑落,粗粒成分滚动距离远,较细粒度成分保留下来,所以沙山背风坡中上部物质成分很细。沙山背风坡下部粒度成分是最粗的,这是因为背风坡坡度大,沙山背风坡中上部的粗粒成分受重力作用影响而滚落到了下部,因此,沙山被风坡下部物质成分变粗不代表风力作用强,指示的是重力作用的影响。综上所述,大沙山迎风坡下部以侵蚀作用为主,背风坡中

上部以风力堆积为主,背风坡下部以重力堆积为主。

## 参考文献:

- [1] 黄银洲,王乃昂,何彤慧,等.毛乌素沙地历史沙漠化过程与人地关系[J].地理科学,2009,29(2):207~213.
- [2] Ruiping Zu,Xian Xue,Mingrui Qiang,et al. Characteristics of near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert,China[J].Geomorphology,2008,96(1-2):39-47.
- [3] ZHANG Jianguo,XU XinWen,LEI JiaQiang,et al. The salt accumulation at the shifting aeolian sandy soil surface with high salinity groundwater drip irrigation in the hinterland of the Taklimakan Desert[J].Chinese Science Bulletin,2008,53(2):63-71.
- [4] 韩致文,王涛,董治宝,等.塔克拉玛干沙漠公路沿线风沙活动的时空分布[J].地理科学,2005,25(5):455~161.
- [5] CHEN Jiansheng,ZHAO Xia,SHENG Xuefeng,et al. Geochemical Information Indicating the Water Recharge to Lakes and Immobile Megadunes in the Badain Jaran Desert[J].Acta Geologica Sinica-English Edition,2005,79(4):540-546.
- [6] 贾铁飞,银山.乌兰布和沙漠北部全新世地貌演化[J].地理科学,2004,24(2):217~222.
- [7] 何兴东,高玉葆,段争虎,等.塔里木沙漠公路植物固沙灌溉方式比较研究[J].地理科学,2002,22(2):213~219.
- [8] FANG Xiaomin,LI Jiju,CHEN Xiuling,et al. Loess in Kunlun Mountains and its implications on desert development and Tibetan Plateau uplift in west China[J].Science in China, Ser. D, 2002,45(4):289-299.
- [9] WANG Xuequan,GAO Qianzhao. The precipitation infiltration and runoff recharging experiment observation in the taklimakan desert[J].Chinese Geographical Science,1999,9(3):284-288.
- [10] Norin E. Sven Hedin Central Asia Atlas,Memoir on Maps. Vol III [M].Stockholm Statens Etnografiska Museum,1980:94-110.
- [11] 于守忠,李博,蔡蔚祺,等.内蒙古西部戈壁及巴丹吉林沙漠考察[J].治沙研究,1962,3(1):96-107.
- [12] 楼桐茂.甘肃民勤至巴丹吉林庙间沙漠成因及其改造利用[J].治沙研究,1962,3(1):90-95.
- [13] Zhibao Dong,Guangqiang Qian,Wanyin Luo,et al. Geomorphological hierarchies for complex mega-dunes and their implications for mega-dune evolution in the Badain Jaran Desert[J].Geomorphology,2009,106(3-4):180-185.
- [14] Xiaoping Yang,Nina Ma,Jufeng Dong,et al. Recharge to the inter-dune lakes and Holocene climatic changes in the Badain Jaran Desert, western China[J].Quaternary Research,2010,73(1):10-19.
- [15] 陈建生,凡哲超,汪集暘,等.巴丹吉林沙漠湖泊及其下游地下水同位素分析[J].地球学报,2003,24(6):497-504.
- [16] 陈建生,赵霞,盛雪芬,等.巴丹吉林沙漠湖泊群与沙山形成机理研究[J].科学通报,2006,51(23):2789~2897.
- [17] 闫满存,王光谦,李保生,等.巴丹吉林沙漠高大沙山的形成

- 发育研究[J]. 地理学报 2001 56(1): 83~92.
- [18] Steffen Mischke. New evidence for origin of Badain Jaran Desert of Inner Mongolia from granulometry and thermoluminescence dating[J]. Journal of Palaeogeography 2005 7(1): 79~98.
- [19] 马金珠, 陈发虎, 赵 华. 1000 年以来巴丹吉林沙漠地下水补给与气候变化的包气带地球化学记录[J]. 科学通报, 2004 49(1): 22~27.
- [20] Zhibao Dong, Tao Wang, Xunming Wang. Geomorphology of the megadunes in the Badain Jaran Desert [J]. Geomorphology, 2004 60(1-2): 191~203.
- [21] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物) 粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1976: 90~100.
- [22] 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 8~15.
- [23] 徐 馨, 何才华, 沈志达, 等. 第四纪环境研究方法[M]. 贵阳: 贵阳科技出版社, 1992: 74~75.

## Grain Size Composition of Typical Mega-dune in Badain Jaran Desert

SHAO Tian-jie<sup>1</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>1,2</sup>, LI En-ju<sup>1</sup>, DONG Zhi-bao<sup>1,3</sup>

(1. College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xian, Shaanxi 710062; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Earth Environment Institute, Chinese Academy of Science, Xi'an, Shaanxi 710075; 3. Key Laboratory of Desert and Desertification, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000)

**Abstract:** The paper selected the typical mega-dune (1 605 m) in Badain Jaran Desert as the object of the study, and analyzed the sediment samples systematically. The results showed that the content of the fine sand was the highest, followed by the medium sand. The contents of the coarse sand, very fine sand and coarse silt were less, and the colloidal particle, clay and fine silt didn't appear. The particle size of sediment on windward slope was smaller than that on leeward slope. The sand particle on windward slope was even-sized, well-separated. The sediment particle size became smaller, evener, better-separated, and the deviation and kurtosis more stable from the bottom to the top of the slope. The main function was erosion on bottom of windward slope, and the main function was accretion by wind action in middle and upper part and by gravity in bottom of leeward slope.

**Key words:** mega-dune; grain size composition; Badain Jaran Desert; particle size parameters; windward slope; leeward slope