

雅江河谷佛掌沙丘表层沉积物粒度特征

潘美慧¹, 杨安娜¹, 伍永秋², 马建军¹, 薛雯轩¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心, 北京 100875)

摘要: 造山带河流的河谷深切, 滑坡堰塞湖及其溃决洪水频发, 洪水滞流沉积物经风力改造, 在两岸形成大面积沙丘(以白格堰塞湖溃决洪水为例)。对雅鲁藏布江沿岸沙丘表层沉积物粒度特征的研究, 可以为鉴别河谷中的古洪水沉积与风成沉积提供一定的参考意义, 并为该区域防风治沙工程提供理论支持。选取雅鲁藏布江中下游河漫滩的爬坡沙丘——佛掌沙丘为研究对象, 分析其与其上四个叠置的新月形沙丘表层沉积物的粒度特征和分异规律, 揭示其沉积环境。粒度分析结果表明: 佛掌沙丘表层沉积物以中砂为优势粒径, 分选较差, 极正偏, 尖窄峰态。叠置新月形沙丘的粒度分布模式为坡顶粒径最粗, 分选最好; 就整个佛掌沙丘而言, 随高度上升, 沉积物的粒径变细, 分选变好, 这是风力分选与重力分异共同作用的结果。利用萨胡判别式判定该沙丘沉积环境为河流沉积, 但将粒度数据与其他区域的河岸沙丘粒度特征进行对比发现该沙丘为典型的风成沙丘, 可能是由于该区域物源较近, 且受地形阻挡风力分选作用不明显, 导致萨胡判别式无法很好地区分风力沉积与河流沉积。根据与河漫滩沙样的粒度特征对比发现, 佛掌沙丘主要由河流中携带的物质提供沙源。

关键词: 雅鲁藏布江; 佛掌沙丘; 表层沉积物; 粒度特征

沙丘表面沉积物的粒度分布特征具有一定的规律性, 是风沙地貌学重要的研究指标之一, 也是区分风沙动力过程、沙丘形成过程和沉积环境的重要因素^[1,2]。对沙丘沉积物粒度特征的研究始于20世纪初期, 沙丘沉积物的粒度分异原因主要是物质来源^[3]和风力状况^[4-8]差异。在区域尺度上, 沉积物粒度特征的空间分异不仅能够直接反映沉积物的搬运和堆积过程, 还对沙丘沙的物源具有一定的指示作用^[9]; 但从单个沙丘来看, 沉积物粒度特征在空间上的变化可以体现不同类型沙丘和同一沙丘不同地貌部位风沙动力过程的差异^[3,9,10]。目前对于沙丘的研究主要集中在干旱区大型沙漠中的新月形沙丘^[8,11]、抛物线形沙丘^[12,13]、横向沙丘^[14,15]、金字塔形沙丘^[16], 以及河岸沙丘^[17]和海岸沙丘^[18,19]等, 但对高原半湿润河谷地带爬坡沙丘沉积物粒度特征的研究尚不多见。以雅鲁藏布江为代表的藏东南山区造山河流河谷深切, 地形陡峭, 滑坡堰塞湖及其溃决洪水频发^[20-22], 大量洪水冲刷物提供沙源导致两岸出现大面积沙丘, 与风成沙丘在形态、构造和层理等方面较为相似, 不易区分。沉积物的粒度特征可以为鉴别古洪水沉积与风力沉积、区分河岸两侧的风成沙丘和古洪水滞流物提供理论依据。另外, 雅鲁藏布江流域多风沙灾害, 佛掌沙丘不断蔓延至岗派公路造成了公路沙害, 严重影响行车安全。众多学者^[23-25]对沙漠公路的风沙灾害进行研究, 积累了大量治沙经验, 并提出了许多行之有效的防风治沙措施, 但目

收稿日期: 2019-05-30; 修订日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807448)

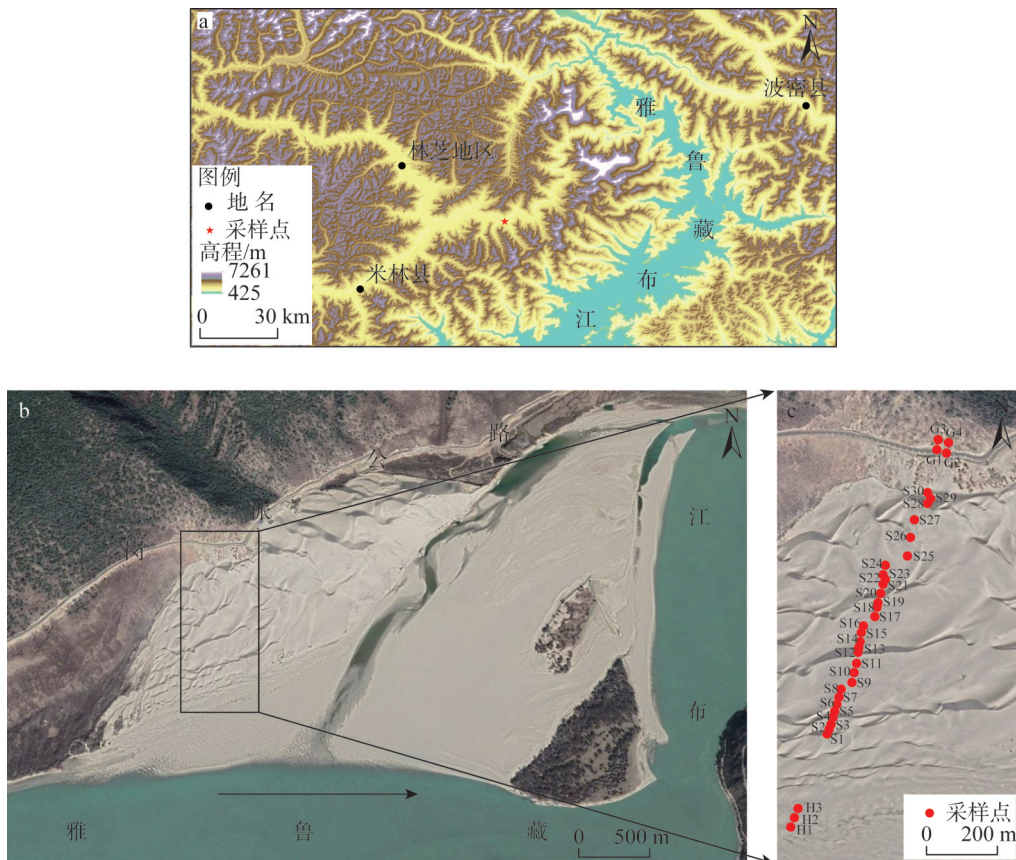
作者简介: 潘美慧(1983-), 女, 安徽合肥人, 博士, 副教授, 主要从事风沙地貌与环境演变、第四纪地质学等方面的研究。E-mail: panmh@nwnu.edu.cn

前亟需推进分区治理与精准修复^[26-28]。本文以佛掌沙丘及其上叠置的小型新月形沙丘为研究对象,分析其表层沉积物的粒度特征和空间分异,揭示高原半湿润季风气候区河谷地带爬坡沙丘的物源和沉积环境,为雅鲁藏布江流域的防风固沙工程提供理论借鉴。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

佛掌沙丘位于米林县丹娘乡(29°28'11.94"N, 94°43'56.22"E),雅鲁藏布江中下游河段凸岸的河漫滩上,海拔3086 m,沙丘旁为岗派公路(图1)。该区域为藏东高原温带半湿润性季风气候,冬冷夏温,雨热同期,日照时间短,无霜期长。据米林县气象站1953—2014年气象资料显示,多年平均气温8.7℃,1月均温-0.2℃,7月均温16.4℃。多年平均降雨量664.5 mm,且降水主要集中在5-9月,占全年降水量的81.4%。多年平均年日照时数2064.6 h,平均相对湿度64.2%。根据林芝机场地面风的观测资料统计显示,米林县常年盛行南风,平均风速7.09 m/s,而最大平均风速为8.15 m/s,出现在东南方向。该研究区大风日数多,年均175天,风速大、持续时间长,且大风多集中在午后与冬春两季,上午地面风较小,多为静风^[29]。2008年多达2075 h的起沙风超过5 m/s,每月



注: a为研究区概况图; b、c为采样点分布示意图。

图1 研究区概况及采样点分布

Fig. 1 Overview of the study area and sand sampling sites

起沙风累计时间均超过120 h, 属于高风能环境^[30]。

1.2 样品采集和测试

佛掌沙丘为爬坡沙丘, 高差约165 m。爬坡沙丘上部叠置了众多的小型新月形沙丘。沿主导风向(南风)自河漫滩至公路选取了爬坡沙丘上叠置的四个小型新月形沙丘XYSQ1、XYSQ2、XYSQ3、XYSQ4, 分别在迎风坡坡脚、迎风坡坡面和坡顶、背风坡坡面和背风坡坡脚共计采集了30个样品。其中XYSQ1的采样点为S1~S7#, YYSQ2的采样点为S8~S14#, YYSQ3的采样点为S15~S23#, YYSQ4的采样点为S24~S30#。每个样品的采样点均采用高精度GPS定位, 采样点分布如图1c、图1d所示。为客观反映该沙丘粒度分布的一般规律, 分析沙丘物源, 另采集河漫滩样品3个(H1、H2、H3)。此外, 采集了4个岗派公路的沙样(G1、G2、G3、G4), 便于研究该沙丘对岗派公路路段的风沙危害。采集的粒度样品采用Mastersizer 2000激光粒度仪进行测试, 仪器测量范围为0.02~2000 μm , 数据结果采用福克—沃德公式计算平均粒径、标准偏差、偏度与峰度等粒度参数。粒度分级依据《风沙地貌学》^[31]中的原则进行划分, 具体见表1。样品前处理与测试均在兰州大学西部环境研究教育部重点实验室粒度测试中心完成。

表1 粒度分级原则

Table 1 Size classification principle

(mm)

粒级	粘土	粉砂	极细砂	细砂	中砂	粗砂
粒径	<0.004	0.004~0.063	0.063~0.125	0.125~0.25	0.25~0.5	>0.5

2 结果分析

沉积物的粒度特征作为陆表沉积物的物理性质, 揭示了不同粒级颗粒物的配比和分布情况, 其特征参数受地形、气候、搬运介质和方式以及沉积环境等因素的影响表现出不同的变化趋势, 可以表征颗粒物的运动状况和沉积环境的演化过程^[32,33]。

2.1 粒度组成

沙粒级配可以直观地反映沙丘的主要组分和不同粒组的相对含量与变化, 它与沙源及风沙的搬运和堆积过程密切相关^[34]。粒度级配统计结果表明(表2), 四个叠置的新月

表2 佛掌沙丘、河漫滩和岗派公路表层沉积物的粒级级配

Table 2 The surface sediment grain-size parameters

(%)

采样点	粒级级配/mm						
	黏土 (<0.004)	粉砂 (0.004~0.063)	极细砂 (0.063~0.125)	细砂 (0.125~0.25)	中砂 (0.25~0.5)	粗砂 (0.5~2)	
河漫滩 (n=3)	0.64	9.89	9.36	24.66	37.06	18.39	
佛掌沙丘 (n=30)	XYSQ1	0.87	7.87	2.65	25.47	47.18	15.95
	XYSQ2	1.10	8.67	3.50	14.47	42.36	29.90
	XYSQ3	1.06	8.74	2.72	22.24	48.34	16.91
	XYSQ4	1.00	7.15	2.99	41.27	45.05	2.54
	平均值	1.01	8.15	2.95	25.62	45.91	16.36
岗派公路 (n=4)	1.48	7.62	5.15	44.27	39.99	1.49	

注: n为采样个数, 下同。

形沙丘皆以中砂为优势粒组, 含量分别为47.18%、42.36%、48.34%、45.05%, 其次为细砂和粗砂, 含量分别为25.47%、14.47%、22.24%、41.27%和15.95%、29.90%、16.91%、2.54%, 粉砂、极细砂和粘土含量较少, 均不超过10%。XYSQ2至XYSQ4细砂含量由14.47%增加至41.27%, 而粗砂含量则由29.90%减少至2.54%, 整体粒径变细。

整个佛掌沙丘的级配特征用四个新月形沙丘的平均值进行说明。其表面沉积物以中砂为主, 其次为细砂和粗砂, 含量分别为45.91%、25.62%和16.36%, 三者之和超过87%, 占绝对优势; 河漫滩样品的主要组分为中砂、细砂和粗砂, 含量分别为37.06%、24.66%和18.39%; 岗派公路沉积物的细砂含量大幅增加至44.27%, 超过中砂含量39.99%成为主要组分, 粗砂含量骤减至1.49%。因此自河漫滩至岗派公路表层沉积物中砂含量先增后减, 细砂含量增多, 粗砂含量减少, 表现为整体变细的趋势。

四个叠置新月形沙丘的发育状况存在差异, 导致坡长不同, 因此在比较沙丘不同部位沉积物的粒度特征时, 选取了四个沙丘均采集的部位, 分别为迎风坡坡脚、下部、中部、上部、坡顶和背风坡坡脚, 根据四个沙丘不同部位的平均值绘制粒级级配图(图2)。

如图2所示, 六个部位的优势粒组皆为中砂, 含量分别为48.39%、43.94%、43.97%、45.62%、49.65%和46.05%, 其中坡顶的中砂含量最多, 迎风坡下部含量最少; 粘土含量六个部位均最少, 分别为0.93%、1.09%、1.06%、0.94%、0.85%和0.92%, 其中坡顶粘土含量占比最小, 迎风坡下部占比最大, 与中砂含量相反。坡顶沉积物的粗砂含量21.12%大于细砂含量19.25%, 其余部位粗砂含量分别为16.48%、15.18%、17.18%、14.32%和17.74%, 均小于其细砂含量24.48%、28.00%、26.11%、26.82%和24.96%。

2.2 粒度参数

研究沉积物的粒度参数有助于沙丘沉积环境的反演和释译^[35]。粒度参数统计结果表明(表3), 四个沙丘平均粒径的范围分别为1.48~2.05 Φ 、1.08~1.98 Φ 、1.54~2.09 Φ 、1.95~2.19 Φ , 平均值分别为1.79 Φ 、1.60 Φ 、1.76 Φ 、2.08 Φ , 前三个沙丘属中砂范围, YYSQ4为细砂; 标准偏差的范围分别为0.97~1.35、1.02~1.69、1.12~1.28、0.92~1.09, 均值为1.14、1.31、1.20、1.00, 分选均较差; 偏度的范围为0.31~0.44、0.31~0.48、0.37~0.42、0.31~0.37, 均值为0.35、0.40、0.40、0.35, 均为极正偏; 峰度的范围为1.75~2.02、1.34~2.19、1.92~2.67、1.89~2.49, 平均值为1.92、1.85、2.13、2.16, 为尖窄峰态。其中XYSQ2表面沉积物粒径最粗, 分选最差, 正偏较强, 峰态较宽平; YYSQ4平均粒径表现为细砂, 因此粒径最细, 分选最好, 正偏较弱, 峰态较尖窄。可见除XYSQ4沉积物粒径明显变细之外, 其他参数未见明显差异。

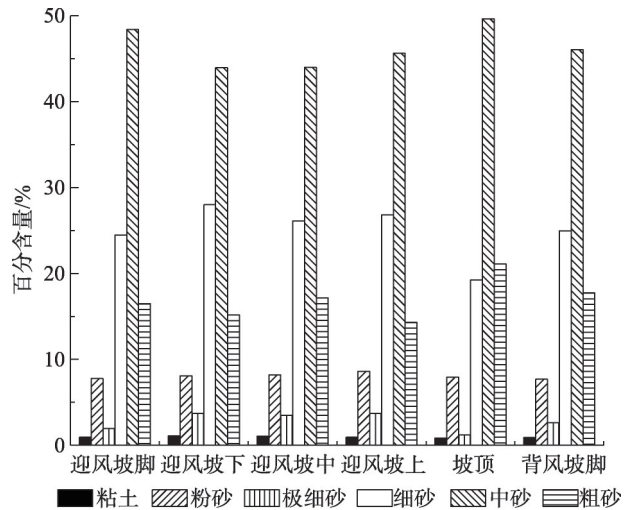


图2 新月形沙丘各部位沉积物粒级级配

Fig. 2 Grain grading diagram of sediments in various parts of barchan dune

表3 表层沉积物的粒度参数

Table 3 The surface sediment grain-size distribution

采样位置	平均粒径 Mz/Φ			标准偏差 σ			偏度 Sk			峰度 K_G		
	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值
河漫滩 ($n=3$)	2.03	2.13	1.89	1.34	1.39	1.28	0.33	0.35	0.31	1.32	1.34	1.28
佛掌沙丘 ($n=30$)												
XYSQ1	1.79	2.05	1.48	1.14	1.35	0.97	0.35	0.44	0.31	1.92	2.02	1.75
XYSQ2	1.60	1.98	1.08	1.31	1.69	1.02	0.40	0.48	0.31	1.85	2.19	1.34
XYSQ3	1.76	2.09	1.54	1.20	1.28	1.12	0.40	0.42	0.37	2.13	2.67	1.92
XYSQ4	2.08	2.19	1.95	1.00	1.09	0.92	0.35	0.37	0.31	2.16	2.49	1.89
平均值	1.81	2.08	1.51	1.16	1.35	1.01	0.37	0.43	0.33	2.01	2.34	1.73
岗派公路 ($n=4$)	2.20	2.33	1.95	1.06	1.20	0.87	0.36	0.39	0.31	2.17	2.31	2.02

根据四个新月形沙丘的均值分析佛掌沙丘的参数特征, 平均粒径范围为1.51~2.08 Φ , 平均值1.81 Φ , 属于中砂; 标准偏差的范围为1.01~1.35, 平均值1.16, 分选较差; 偏度的范围为0.33~0.43, 平均值0.37, 为极正偏, 频率分布曲线图表现为有一细尾; 峰度的范围为1.73~2.34, 平均值2.01, 为尖窄峰态。河漫滩沉积物的平均粒径范围为1.89~2.12 Φ , 均值2.03 Φ , 属于细砂; 标准偏差范围1.28~1.39, 均值1.34, 分选较差; 偏度范围为0.31~0.35, 均值0.33, 极正偏; 峰度的范围1.28~1.34, 均值1.32, 属尖窄峰态。岗派公路平均粒径的范围为1.95~2.33 Φ , 平均值为2.20 Φ , 为细砂; 标准偏差的范围为0.87~1.20, 平均值为1.06, 分选较差; 偏度的范围为0.31~0.39, 平均值为0.36, 极正偏; 峰度的范围为2.02~2.31, 平均值为2.17, 为尖窄峰态。可见从河漫滩到公路表面沉积物粒度特征整体表现为粒径先变粗后变细, 分选变好, 正偏先加强后减弱, 峰态则渐见尖锐。

为了便于分析, 计算四个新月形沙丘代表性部位的粒度参数平均值, 绘制参数分布图(图3)。从图中可以看出, 自沙丘迎风坡坡脚至背风坡坡脚的平均粒径(图3a)分别为1.75 Φ 、1.89 Φ 、1.81 Φ 、1.87 Φ 、1.60 Φ 和1.76 Φ , 均属于中砂范围, 坡顶最细, 迎风坡下部最粗; 标准偏差(图3b)分别为1.13、1.19、1.19、1.18、1.09和1.14, 分选性均较差, 坡顶分选性稍好于其他部位; 偏度(图3c)的各部位均值相差不大, 均位于0.36~0.38的范围内, 属极正偏, 频率曲线表现为有一细尾; 峰度值(图3d)分别为2.07、1.86、1.98、1.92、2.31和1.98, 为尖锐峰态, 坡顶最大, 较尖窄, 迎风坡下部最小, 稍宽平。整体而言, 各部位参数分布表现为坡顶粒径最粗、分选最差, 迎风坡下部粒径最细、分选最好。

2.3 频率分布曲线与概率累计曲线

频率分布曲线可以直观地反映沉积物粒级的分布情况, 获得众数粒径值, 对偏度和峰态进行定性描述^[36]。沙丘沙的概率累计曲线一般由2~3段

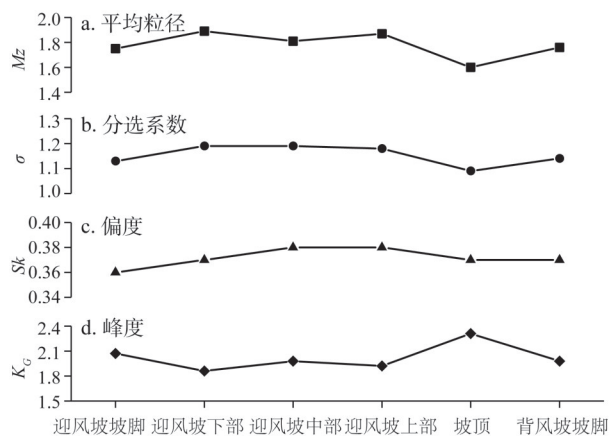
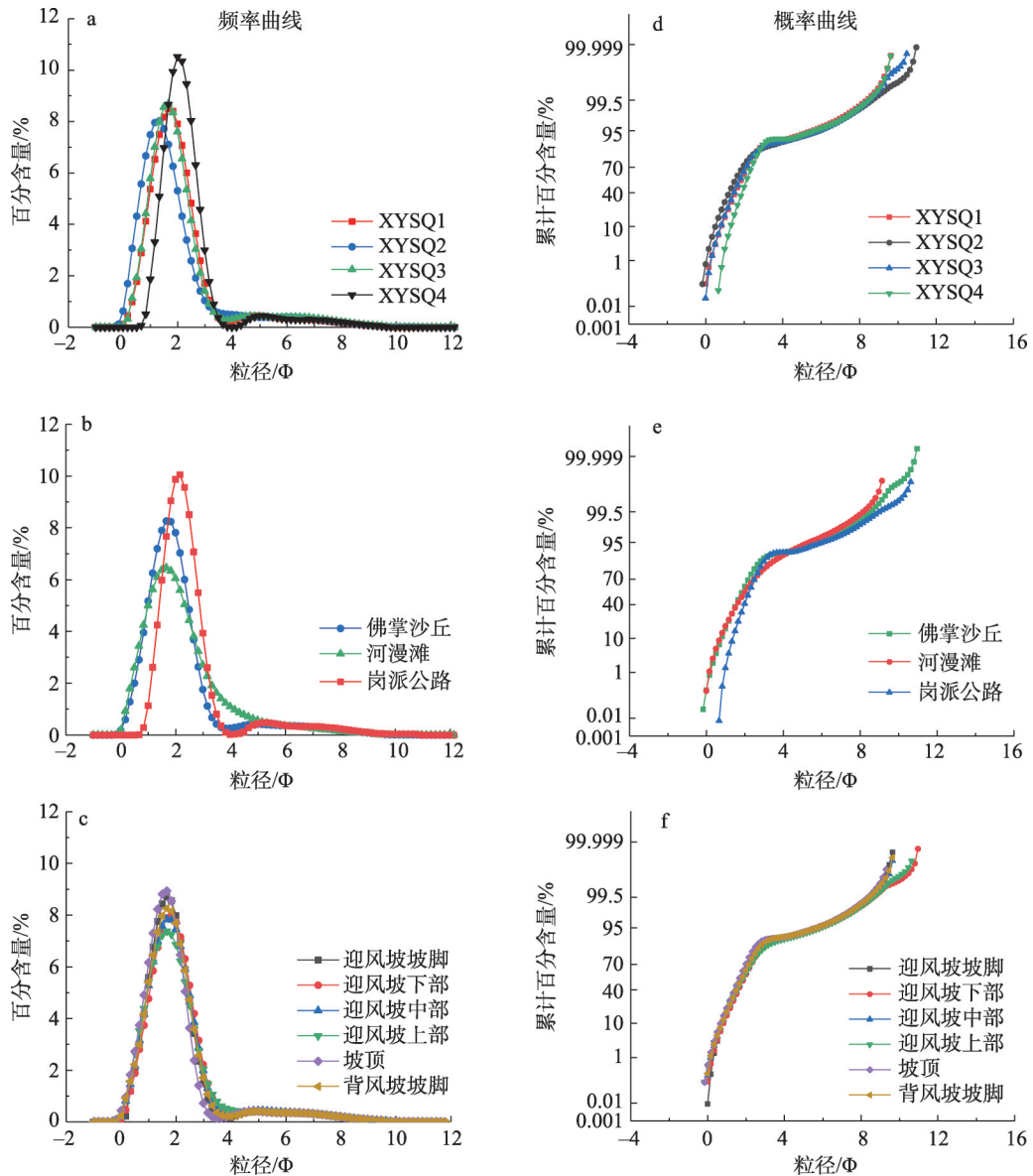


图3 新月形沙丘不同部位粒度参数

Fig. 3 Grain size parameters of different parts of barchan dunes

线段组成, 可以揭示沉积物的移动方式^[37]。线段的斜率与沉积物的分选性具有相关关系, 斜率越大, 分选性越好^[38], 风沙活动频率越高^[39]。

从频率曲线图(图4a~图4c)中可以看出该区域表层沉积物均为单峰分布, 粗偏, 有一细尾。四个新月形沙丘中XYSQ4的频率曲线最为高窄, 众数粒径值为1.99 Φ , 对应含量为10.52%, YYSQ2的曲线最为宽平, 众数粒径值为1.33 Φ , 对应含量为8.03%, 且XYSQ2的频率曲线整体位于最左侧, YYSQ4的频率曲线位于最右侧, 因此XYSQ2表层沉积物粒度最粗, YYSQ4沉积物最细。佛掌沙丘、河漫滩和岗派公路三者中, 河漫滩的



注: a、d分别为新月形沙丘的频率曲线和概率曲线; b、e分别为佛掌沙丘、河漫滩和岗派公路的频率曲线与概率曲线; c、f分别为新月形沙丘六个部位平均值的频率曲线与概率曲线。

图4 频率分布曲线图与概率累计曲线

Fig. 4 Frequency distribution curve and probability accumulation curve

曲线最为低平,众数粒径值为 1.66Φ ,对应含量为6.46%;岗派公路的曲线最高窄,众数粒径为 2.16Φ ,对应含量为10.05%;佛掌沙丘的曲线介于两者之间,众数粒径为 1.66Φ ,对应含量为8.27%。整体而言,岗派公路的曲线位于最右侧,表明其整体粒径最细。六个地貌部位的频率曲线走向基本一致,众数粒径值均处 1.65Φ 左右,说明六个部位的沉积物粒度差异不大。其中坡顶的众数粒径值对应的含量最多,为8.93%,迎风坡上部众数对应的含量最小,为7.38%。可见六个地貌部位中坡顶沉积物的粒径较粗,而迎风坡上部的沉积物粒径较细。

概率累计曲线(图4d~图4f)表明,沉积物的累计曲线均为2~3条线段,粗细组分截点皆位于 3Φ 左右,沉积物蠕移组分含量很少;跃移组分占绝对优势,累计含量90%左右,且线段斜率较大,分选较好;悬移组分累计含量不足10%,斜率小,分选差。在佛掌沙丘、河漫滩和岗派公路的沉积物概率曲线图(图4e)中,岗派公路的曲线位于最右侧,河漫滩的曲线位于最左侧,表现出自河漫滩至岗派公路沉积物粒径整体变细的趋势。

2.4 沉积环境判别

Sa等^[40]建立了一种基于粒度参数的经验判别公式,可以用来分析沉积物的沉积环境。具体公式如下:

$$Y1 = -3.5688Mz + 3.7016\sigma^2 - 2.0766SK_1 + 3.1135K_G \quad (1)$$

Y1 小于-2.7411 则判定为风成沉积, 否则继续 Y2;

$$Y2 = 15.6534Mz + 65.7091\sigma^2 + 18.1071SK_2 + 18.5043K_G \quad (2)$$

Y2 小于 65.3650 则判定为海滩沉积, 否则继续 Y3;

$$Y3 = 0.2852Mz - 8.7604\sigma^2 - 4.8932SK_3 + 0.0482K_G \quad (3)$$

Y3 大于-7.4190 则判定为浅海沉积, 否则继续 Y4;

$$Y4 = 0.7215Mz - 0.4030\sigma^2 + 6.7322SK_4 + 5.2927K_G \quad (4)$$

Y4 小于 9.8433 则判定为浊流沉积, 否则为河流沉积。

将样品的粒度参数带入公式,计算结果显示沙丘样品均为河流沉积,沉积环境单一(表4)。但是王勇等^[17,41,42]对响水河沿岸不同的河岸沙丘表层沉积物的粒度特征进行研究,结果均表明河谷沿岸的风成沙丘皆以中砂为主,占比43.85%~56.10%不等,平均粒径均值在 $1.62 \sim 1.95 \Phi$ 之间,中等分选,偏度近对称,尖窄峰态。本文的粒度结果显示佛掌沙丘的表层沉积物以中砂为主(45.91%),平均粒径 1.81Φ ,尖窄峰态,数据结果对比显示该沙丘为风成沙丘。另外,雅江河谷中下游河段干湿季分明,河流枯水期与丰水期流量悬殊,水位变幅大,丰水期河流中游输沙量大,待冬春枯水期时大面积出露在河漫滩堆积,为沙丘提供丰富的沙源。但沙丘明显高于河漫滩,沙粒在风力作用下向岸输送,形成沙丘。尽管河流为该沙丘提供沙源,但风仍然是形成沙丘的主要外动力。因此萨胡判别式在判定该沙丘的沉积环境时存在偏差,可能是由于受雅江河谷地形的限制,沙丘离物源很近,该公式在此类环境下无法明确区分河流沉积与风力沉积环境。周娜等^[35]在对毛里塔尼亚的沙丘进行研究时得出看相似的结论,认为萨胡判别式对河流沉积的判别缺乏准确性,另外Liu等^[43]也认为萨胡判别式在判别风成环境时准确性尚有待验证,因此该判别式的适用性还需视具体情况而定。

表4 沉积环境结果表

Table 4 sedimentary environment

样品名	Y1	Y2	Y3	Y4	沉积环境	样品名	Y1	Y2	Y3	Y4	沉积环境
S1	2.824674	131.2301	-9.24219	13.37072	河流沉积	S20	3.659976	172.4304	-14.4706	13.64723	河流沉积
S2	2.071131	136.5549	-10.1546	12.27891	河流沉积	S21	6.06424	165.5133	-12.3228	17.53943	河流沉积
S3	3.303797	159.4643	-12.7166	13.58776	河流沉积	S22	4.153659	178.0651	-14.3914	14.86125	河流沉积
S4	4.459592	172.9453	-14.8903	13.22971	河流沉积	S23	3.115749	164.0291	-12.5777	14.55346	河流沉积
S5	4.694816	164.6117	-14.135	13.03626	河流沉积	S24	2.821948	158.5968	-11.5376	15.03225	河流沉积
S6	1.745887	138.5882	-9.48731	13.50912	河流沉积	S25	1.156906	137.4885	-9.00259	13.89613	河流沉积
S7	6.847499	188.6318	-17.6398	13.99275	河流沉积	S26	1.964407	149.4952	-10.3365	14.51887	河流沉积
S8	5.326945	162.0224	-13.6802	13.76779	河流沉积	S27	0.913255	128.236	-8.16754	13.24203	河流沉积
S9	7.246369	245.6958	-24.755	12.78646	河流沉积	S28	3.714843	150.6511	-10.0465	16.67934	河流沉积
S10	6.02602	178.153	-16.1561	13.32911	河流沉积	S29	2.799259	146.1341	-9.54228	15.95078	河流沉积
S11	6.947143	250.8451	-26.7194	10.52672	河流沉积	S30	2.947681	145.9214	-10.2829	14.68935	河流沉积
S12	5.825869	182.7372	-16.6179	14.01623	河流沉积	G1	1.451956	122.7787	-7.42181	13.86768	河流沉积
S13	6.072063	132.6148	-10.4865	14.32165	河流沉积	G2	2.850887	170.7301	-12.3832	15.98475	河流沉积
S14	3.179821	130.97	-10.4616	11.55524	河流沉积	G3	2.091708	156.3564	-10.7191	15.42191	河流沉积
S15	6.023858	177.4651	-15.6189	14.47563	河流沉积	G4	3.185725	176.1426	-13.8333	14.85862	河流沉积
S16	4.665626	153.9757	-12.9173	13.28976	河流沉积	H1	2.603355	165.7395	-15.1476	9.557715	浊流沉积
S17	5.62738	171.8929	-15.2918	13.66525	河流沉积	H2	2.681887	179.1314	-16.4449	10.06139	河流沉积
S18	5.613249	176.6321	-15.9059	13.68584	河流沉积	H3	2.983632	191.8333	-18.0249	10.20717	河流沉积
S19	5.07212	165.5152	-12.8915	15.79156	河流沉积						

3 讨论

3.1 叠置新月形沙丘不同部位的沉积物粒度分异规律及原因

有研究者总结出各地沙丘表面沉积物粒度的两种分布模式^[3]: 一是自两侧坡底至坡顶沉积物粒径变细, 分选逐渐变好; 二是由两侧坡脚至坡顶沉积物粒径变粗, 分选变好。该研究区叠置新月形沙丘表面沉积物不同部位粒度特征的平均值(图3)与第二种模式相似, 表现为坡顶沉积物粒径最粗, 分选最好, 迎风坡下部粒径最细, 分选最差。该粒度分异规律是由于坡顶长期遭受风力吹蚀和分选, 极细砂、粉砂等细颗粒物被风吹蚀, 而细砂、中砂、粗砂等较粗颗粒物在坡顶相对集中; 迎风坡下部风速剪切力小, 细颗粒损失量较小, 粒径较细, 而粗细颗粒混合使该部位沉积物分选较差^[8]。另外, 迎风坡坡脚沉积物粒径粗于迎风坡坡面, 可能是受上风向沙丘背风坡坡脚沉积颗粒粒度的影响。随着沙粒增多, 沙丘高度增加, 大部分沙越过丘顶后在背风坡上部堆积, 达到休止角后发生坍塌, 粗砂在重力分选的作用下快速滑落至背风坡坡脚, 对下风向沙丘的迎风坡坡脚沉积物的粒度进行干扰。沙丘的分选性主要受沙丘的坡形及高度控制, 当沙丘规模不断变大, 沙丘在主风向上展宽, 迎风坡变长, 丘顶渐宽阔^[17], 因此当风沙流沿坡爬升时, 随高度的增加风力不断加大, 对沉积物不断进行风力分选, 到达坡顶时由于风力骤减, 粗颗粒大量沉降, 细颗粒被风带走而导致坡顶粒径最粗, 分选最好。

3.2 自河漫滩至岗派公路的沉积物粒度分布规律及原因分析

根据三个主要组分(中砂、粗砂和细砂)的含量绘制的组分三角图(图5)表明,

所有样品的中砂含量差异较小，均在50%左右，而细砂和粗砂的含量差异较大，河漫滩样品细砂与粗砂组分均位于25%左右，XYSQ2的粗砂含量最多，而XYSQ4和岗派公路的粗砂含量最少，细砂含量最多，即XYSQ4与岗派公路的沉积物粒径整体较细。

根据采样点数据绘制的海拔高度与平均粒径之间的散点图(图6)显示平均粒径与海拔高度之间存在不显著的正相关(Pearson系数为0.33015)关系，随着高度增加，沉积物粒径变细。这与表2显示的结果相契合，即随高度逐渐升高，XYSQ2到XYSQ4的表层沉积物整体粒径逐渐变细。沙丘表面的粒度特征是沙丘形态与风力侵蚀共同作用的结果，与各部位相对高度的变化也相关。不同粒径的颗粒物爬升能力与移动方式不同，随高度增加，细砂以上的粗颗粒爬升能力逐渐减弱，在较低处沉降堆积，而较细颗粒则可以随风跃移至较高位置。另外，由于重力分选的作用，较粗的颗粒物在重力作用下向低海拔的沙丘滑落。XYSQ4海拔最高，因此其沉积物粒径最细，分选最好。此外，XYSQ2和XYSQ3相对高大，地形阻挡导致较多的粗颗粒在此处沉降，细砂等较细颗粒物则可以越过高大的沙丘，因此XYSQ4的粗砂含量骤降，而细砂含量大幅增加。

值得注意的是，岗派公路的沙样粒度特征与XYSQ4极为相似，粗砂含量极少而细砂含量突增，表现出明显的继承性。由此可知佛掌沙丘的沙粒经风力输送已蔓延至公路并造成了一定程度的公路沙害，威胁行车安全。研究表明^[17]，河谷风沙地貌的发育是由于冬春季节大风不断向下风向输沙，破坏植被，为风力侵蚀提供条件，侵蚀区发育为丘间地，为下风向沙丘提供沙源，进一步破坏植被生长，发育为新的沙丘，导致沙丘不断蔓延，因此该区域应重视沙丘向下风向蔓延，造成严重沙害的现象。

4 结论

(1) 研究区内佛掌沙丘表面沉积物粒度的总体特征为中砂、分选较差、极正偏、尖窄峰态。叠置新月形沙丘的粒度分布模式表现为坡顶最粗，分选最好。是由于风速剪切力自迎风坡坡脚至坡顶不断变大，粗颗粒被吹至坡顶，坡度变缓，风速骤降，粗颗粒迅

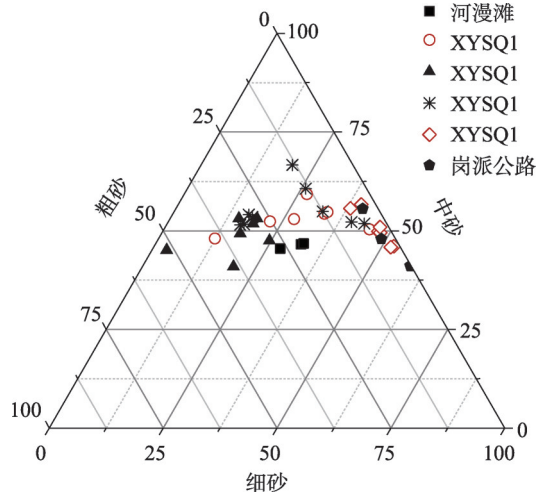


图5 主要组分三角图

Fig. 5 Triangulation of major components

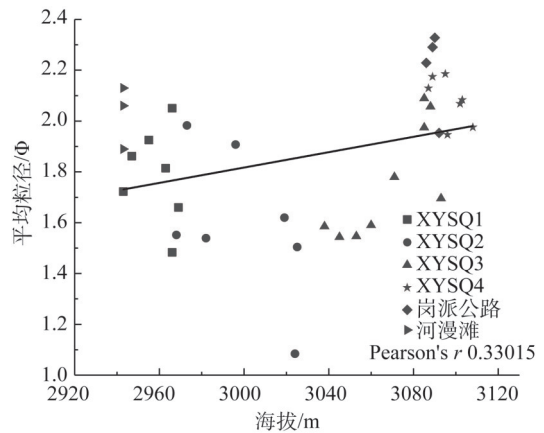


图6 海拔高度与平均粒径散点图

Fig. 6 Scatter plot of altitude and mean particle size

速沉降堆积,较细颗粒大量损失,因此坡顶粒径最粗,风选最好;迎风坡下部由于风速剪切力较小,细颗粒损失量减少而表现为粒径较细,粗细颗粒混合导致分选较差。

(2) 利用萨胡判别式判断该沙丘的沉积环境为河流沉积,但将本文的粒度数据与前人的研究结果进行对比后发现佛掌沙丘为典型的河谷风成沙丘。佛掌沙丘的沙源以河漫滩物质为主,汛期河流大量输沙,枯水期出露在河漫滩堆积,被高频大风输送至岸边成为沙丘的主要沙源,但风力仍然为沙丘形成的主要外动力。可能是由于河谷狭窄,沙丘距离物源较近,萨胡判别式在区分沉积环境时出现偏差。自河漫滩至佛掌沙丘顶部沉积物粒径整体变细,分选变好,主要是因为不同粒径的颗粒物随风移动的距离不同,较细的颗粒物可以随风爬升至较高位置,而粗颗粒则不断沉降堆积。

(3) 佛掌沙丘顶部的岗派公路位于盛行风下风向,遭受一定程度的公路沙害,影响行车安全。根据前人的经验,在治理沙害时需结合当地条件因地制宜,尽量采用植被与工程相结合的措施,以达到有效防风治沙的效果。

参考文献(References):

- [1] WANG X M, DONG Z B, ZHANG J W, et al. Grain size characteristics of sand dunes in the Central Taklimakan Sand Sea. *Sedimentary Geology*, 2003, 161(1-2): 1-14.
- [2] WANG X M, DONG Z B, ZHANG J W, et al. Relations between morphology, air flow, sand flux and particle size on traverse dunes, Taklimakan Sand Sea, China. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2002, 27(5): 515-526.
- [3] LANCASTER N. *Geomorphology of Desert Dunes*. New York: Routledge, 1995: 525-530.
- [4] 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. *干旱区资源与环境*, 1992, (2): 101-108. [CHEN W N, LEI J Q. Grain size characteristics of barchan dunes in Taklamakan Desert. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1992, (2): 101-108.]
- [5] 杨东亮,王雪芹,胡永锋,等.风沙流输沙通量垂向分布研究:以塔克拉玛干沙漠南缘流沙地表风沙流观测为例. *中国沙漠*, 2012, 32(3): 631-639. [YANG D L, WANG X Q, HU Y F, et al. Study on vertical distribution of wind-sand flow flux: A case study of wind-sand flow on the surface of quicksand in the south margin of Taklimakan Desert. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(3): 631-639.]
- [6] 哈斯,董光荣,王贵勇,等.腾格里沙漠东南缘沙丘表面气流与坡面形态的关系. *中国沙漠*, 1999, 19(1): 1-5. [HA S, DONG G R, WANG G Y, et al. Relationship between surface airflow and slope morphology of dune in southeastern margin of Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(1): 1-5.]
- [7] 哈斯,王贵勇,董光荣.腾格里沙漠东南缘格状沙丘表面气流及其地貌学意义. *中国沙漠*, 2000, 20(1): 30-34. [HA S, WANF G T, DONG G R. Surface airflow and geomorphological significance of trellis dune in southeastern margin of Tengger Desert. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(1): 30-34.]
- [8] 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. *中国沙漠*, 2013, 33(6): 1629-1635. [YU S Q, ABDU M J T, ZHOU X L, et al. Grain size characteristics of different parts of the crescent dunes in Karakum Desert, Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(6): 1629-1635.]
- [9] 吴正. *风沙地貌与治沙工程学*.北京:科学出版社,2003:196-201. [WU Z. *Aeolian Sand Geomorphology and Sand Control Engineering*. Beijing: Science Press, 2003: 196-201.]
- [10] PYE K, TSOAR H. *Aeolian Sand and Sand Dune*. London, UK: Unwin Hyma, 1990: 465.
- [11] 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. *地理科学*, 2011, 31(8): 958-963. [ZHOU N, ZHANG C L, LIU Y G. Variation of grain size on surface of barchans in mainling great valley, Yarlung Zangbo River. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 958-963.]
- [12] 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. *沉积学报*, 2012, 30(5): 937-944. [WU X, HA S, DU H S, et al. Grain size distribution on parabolic dune on the southern fringe of Hobo Desert. *Acta Sedimentologica*

- Sinica, 2012, 30(5): 937-944.]
- [13] 凌智永,李志忠,李廷伟.塔克尔莫乎尔沙漠抛物线形沙丘的粒度分布模式.中国沙漠,2014,34(2): 325-331. [LING Z Y, LI Z Z, LI T W, et al. Grain size distribution of parabolic dune at the Takermohuer Desert in Yili, Xinjiang, China. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 325-331.]
- [14] 董玉祥,马骏,黄德全.福建长乐海岸横向前丘表面粒度分异研究.沉积学报,2008,26(5): 813-819. [DONG Y X, MA J, HUANG D Q. Distribution model of grain size on coastal transverse foredune at changle in Fujian province. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(5): 813-819.]
- [15] 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.地理科学进展,2006,25(6): 42-51. [HA S, ZHUANG Y M, WANG L, et al. Grain size variation on a transverse dune and response to wind direction changes on southern edge of Mu Us Desert. Progress in Geography, 2006, 25(6): 42-51.]
- [16] 张伟民.金字塔沙丘粒度变化及表面过程的初步研究.中国沙漠,2013,33(6): 1615-1621. [ZHANG W M. Grain size and surface processes of the pyramid dune in the Mogao Grottoes of China. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1615-1621.]
- [17] 王勇,韩广,杨林,等.河岸沙丘粒度分布特征.干旱区研究,2016,33(1): 210-214. [WANG Y, HAN G, YANG L, et al. Grain size distribution of sand dunes at river banks. Arid Zone Reserch, 2016, 33(1): 210-214.]
- [18] YAACOB R, MUSTAPAU M Z. Grain size distribution and subsurface mapping at the Setiu Wetlands, Setiu, Terengganu. Environmental Earth Sciences, 2010, 60(5): 975-984.
- [19] 胡凡根,李志忠,靳建辉,等.基于释光测年的福建晋江海岸沙丘粒度记录的风沙活动.地理学报,2013,68(3): 343-356. [HU F G, LI Z Z, JIN J H, et al. Coastal environment evolution record from anshan coastal aeolian sand of Jinjiang, Fujian province based on the OSL dating. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(3): 343-356.]
- [20] LIU W M, HU K H, CARLING P A, et al. The establishment and influence of Baimakou paleo-dam in an upstream reach of the Yangtze River, southeastern margin of the Tibetan Plateau. Geomorphology, 2018, 321: 167-173.
- [21] LIU W M, LAI Z P, HU K H, et al. Age and extent of a giant glacial-dammed lake at YarLung Tsangpo Gorge in the Tibetan Plateau. Geomorphology, 2015, 246: 370-376.
- [22] 张信宝, DAVID H, 刘维明, 等.金沙江下游金塘古滑坡堰塞湖阶地.山地学报,2013,31(1): 127. [ZHANG X B, DAVID H, LIU W M, et al. Terraces of ancient giant jintang landslide-dammed lake in Jinsha River. Journal of Mountain Science, 2013, 31(1): 127.]
- [23] 陈赟.沙漠公路防风固沙技术应用研究.内蒙古公路与运输,2007,(2): 7-11. [CHEN B. Study on application of wind-proof and sand-fixing technology on desert highway. Highways & Transportation in Inner Mongolia, 2007, (2): 7-11.]
- [24] 郭玉起.塔里木沙漠公路堤式横断面的设计研究.石油工程建设,2007,33(5): 23-25. [GUO Y Q. Study on design of cross section of highway embankment in Tarim Desert. Petroleum Engineering Construction, 2007, 33(5): 23-25.]
- [25] 王世杰.阿拉尔——和田沙漠公路工程防沙体系防护效益监测与评价.北京:中国科学院大学,2013. [WANG S J. Alar-hetian Sesert highway engineering sand control system protection benefit monitoring and evaluation. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.]
- [26] 张彪,李庆旭,王爽,等.京津风沙源区防风固沙功能的时空变化及其区域差异.自然资源学报,2019,34(5): 1041-1053. [ZHANG B, LI Q X, WANG S, et al. Spatial-temporal changes and regional differences of the sand-fixing service in the Beijing-Tianjin sandstorm source region. Journal of Natural Resources, 2019, 34(5): 1041-1053.]
- [27] 段利民,童新,吕扬,等.固沙植被黄柳、小叶锦鸡儿蒸腾耗水尺度提升研究.自然资源学报,2018,33(1): 52-62. [DUAN L M, TONG X, LYU Y, et al. Upscaling of the transpiration and water consumption of sand-fixing vegetation salix gordejvii and caragana microphylla. Journal of Natural Resources, 2018, 33(1): 52-62.]
- [28] 栗忠飞,高吉喜,王亚萍.内蒙古呼伦贝尔南部沙带植被恢复进程中土壤理化特性变化.自然资源学报,2016,31(10): 1739-1751. [LI Z F, GAO J X, WANG Y P. Changes of soil physical and chemical properties with the development of artificial planted and natural invaded vegetation in Southern Hulunbeir Sandy Land. Journal of Natural Resources, 2016, 31(10): 1739-1751.]
- [29] 任远际,陈静,龚杰昌.林芝机场风场特征及对飞机起降的影响.科技视界,2012,(27): 41-43. [REN Y J, CHEN J,

- GONG J C. Wind field characteristics of Linzhi airport and its influence on aircraft takeoff and landing. *Science & Technology Vision*, 2012, (27): 41-43.]
- [30] 周娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘粒度分异特征研究. *地理研究*, 2012, 31(1): 82-94. [ZHOU N, ZHANG C L, LIU Y G. Variation of grain sizes on a mountain climbing dune in mainling wide valley, Yarlung Zangbo River. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 82-94.]
- [31] 吴正. 风沙地貌学. 北京: 科学出版社, 1987. [WU Z. *Aeolian Sand Geomorphology*. Beijing: Science Press, 1987.]
- [32] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(4): 2-6, 13. [DONG Z B, LI Z S. The influence of aeolian sand grain size on its erodibility. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(4): 2-6, 13.]
- [33] GUAN Q Y, ZHANG J D, WANG L J, et al. Discussion of the relationship between dustfall grain size and the desert border, taking the southern border of the Tengger Desert and the southern dust deposit area as an example. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2013, 386(17): 1-7.
- [34] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌. 北京: 科学出版社, 2011: 67-124. [DONG Z B, SU Z Z, QIAN G Q, et al. *The Wind-sand Landform of the Kumtag Desert*. Beijing: Science Press, 2011: 67-124.]
- [35] 周娜, 尤源, 雷加强, 等. 毛里塔尼亚努瓦克肖特沙丘粒度分布特征及其环境意义. *中国沙漠*, 2018, 38(2): 252-261. [ZHOU N, YOU Y, LEI J Q, et al. Characteristics of sand granularity and its environmental significance in Nouakchott, Mauritania. *Journal of Desert Research*, 2018, 38(2): 252-261.]
- [36] 潘美慧. 西藏定结地区全新世风沙活动研究. 北京: 北京师范大学, 2012. [PAN M H. *Study on holocene aeolian sand movement in Dingjie region, Tibet*. Beijing: Beijing Normal University, 2012.]
- [37] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 589-596. [YANG Z L, QIAN G Q, DONG Z B, et al. Grain size characteristics of the aeolian sediments from sanlongsha area of the Northern Kumtagh Desert. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(3): 589-596.]
- [38] 代亚亚, 何清, 陆辉, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地复合型纵向沙垄区近地层沙尘水平通量及粒度特征. *中国沙漠*, 2016, 36(4): 918-924. [DAI Y Y, HE Q, LU H, et al. Horizontal flux and particle size characteristics of near-stratum sand and dust in a composite vertical sand ridge region in the hinterland of Taklimakan Desert. *Journal of Desert Research*, 2016, 36(4): 918-924.]
- [39] 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠 84°E 沿线沙物质的粒度特征. *地理学报*, 1993, 48(1): 33-46. [CHEN W N. The Taklamakan Desert sand material granularity characteristic along the 84°E. *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(1): 33-46.]
- [40] SA H, B.K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 1964, 34(1): 73-78.
- [41] 王勇, 韩广, 杨林, 等. 响水河中游右岸沙丘群粒度分布特征. *中国沙漠*, 2017, 37(1): 26-32. [WANG Y, HAN G, YANG L, et al. Grain size characteristics of sand dunes on the right bank of the Middle Xiangshui River. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(1): 26-32.]
- [42] 王勇. 科尔沁沙地西部响水河中游右岸沙丘群的沙源分析. 湖南: 湖南师范大学, 2016. [WANG Y. *Analysis of sand source about sand dunes on the right bank of the Middle Xiangshui River in the west of the Horqin Sandy Land*. Hunan: Hunan Normal University, 2016.]
- [43] LIU B, QU J, NING D, et al. Grain size study of aeolian sediments found east of Kumtagh Desert. *Aeolian Research*, 2014, 13: 1-6.

Variation of grain sizes for surface sediments of Fozhang dune in Yarlung Zangbo River Valley

PAN Mei-hui¹, YANG An-na¹, WU Yong-qiu², MA Jian-jun¹, XUE Wen-xuan¹

(1. Collage of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Ministry of Education Engineering Center of Desertification and Blown-sand Control, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Mountain rivers are generally featured by deep-cut river valley and steep side slopes, which is prone to landslide-dammed lake and outburst floods. Taking 2018.10.10 Baige landslide-dammed lake in Jinsha river as an example, wind reworked the outburst flood sediments and developed a plenty of sand dunes at the bank of Jinsha river. This studies about aeolian dunes in the Yarlung Zangbo River, to some extent, could provide some implication for the sedimentary distinction of aeolian sand and original flood deposit, and has some significance for engineering control of aeolian dune in this region. In this paper, a slope climbing dune in the floodplain of the middle and lower reaches of Yarlung Zangbo River, we analyzed the grain size characteristics and spatial differentiation of surface sediments on four overlapping crescent-shaped dunes of a climbing dune, named Fozhang dune in the lower Yarlung Zangbo. The results of particle size analysis show that frequency distribution curves of the surface sediment of Fozhang dune, dominated by poorly sorted medium sand, is extremely positive biased and narrowly peaked. In the case of four individual superimposed crescent-shaped dune, the coarsest and best sorted particle fraction emerges at the top of the slope. On the whole, the surface sediment of Fozhang dune has become finer and better sorted towards the crest, which results from the combined sorting of wind and gravity. The grain size characteristics of Fozhang dune is comparable to other aeolian dunes of similar genesis. However, Sahu criterion indicates that the Fozhang dune is fluvial-originated. Maybe Sahu criterion cannot identify aeolian sand of very proximal material source from river floodplain. The comparison of grain size characteristics of sand samples with those of floodplain suggests that Fozhang dune is mainly provided with sand source by materials carried by rivers.

Keywords: Yarlung Zangbo River; Fozhang dune; surface sediment; grain size characteristics