

雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘 粒度分异特征研究

周 娜, 张春来*, 刘永刚

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
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: 雅鲁藏布江米林宽谷段爬升沙丘分布广泛。选择卧龙镇西侧雅鲁藏布江右岸典型爬升沙丘, 根据沙丘爬升高度和叠置沙丘地貌部位对其表面沉积物进行了系统采样。作为河谷风沙地貌的重要组成部分, 相应采集了河漫滩、阶地沙丘沙样品。粒度分析表明, 爬升沙丘对河漫滩沙丘、阶地沙丘在物源和形成过程方面具有继承性, 其表面沉积物以细沙和极细沙为主 ($2.07 \sim 3.71\Phi$), 分选中等或较好 ($0.20 \sim 1.41\Phi$), 细偏, 多峰。由坡脚向丘顶的沉积物粒径变细, 分选变好, 偏度和峰度降低。爬升沙丘表面叠置沙丘的粒度向丘顶变粗、分选变好。细沙、极细沙等粒级组分与高度相关, 反映颗粒爬升能力不同。叠置条带状沙丘脊部和槽部的粒度存在分异。

关键词: 米林宽谷; 爬升沙丘; 沉积物; 粒度分异

文章编号: 1000-0585(2012)01-0082-13

1 引言

表面沉积物粒度特征是沙丘地貌研究的主要内容^[1], 也是反映风沙动力过程的关键因素之一^[2]。在沙漠、戈壁等干旱和半干旱地区的山麓或谷地, 地形与风沙流作用常形成各种“地形控制的沙丘”^[3], 包括形成于山体迎风坡前、具有明显丘脊线和落沙坡的“反射沙丘”, 攀附在山体迎风坡的“爬升沙丘(片)”及沿山体背风坡发育的“下落沙丘”^[4], 统称为“山体覆沙”^[5]。针对这一特殊的风沙地貌类型, 以往研究主要集中在沙丘形态特征描述^[3,4,6~9]、形成时间、环境及物质来源^[10~12]等方面, 并开始采用风洞模拟实验解释地形与风沙流的相互作用^[5,8,13~15]。然而上述研究多集中在沙漠内部干旱河谷或丘陵山地区, 此类“地形控制的沙丘”发生发展、沉积物粒度与周围沙漠环境存在严重的依赖关系和继承性。雅鲁藏布江河谷作为独立的地貌系统, 风沙地貌发育普遍且典型, 尤以谷坡爬升沙丘最具特色^[16~18]。在辫状或乱流状水系发育的中游下段米林宽谷区, 尽管半湿润季风气候较为优越, 仍广泛发育了规模高大、形态复杂的爬升沙丘, 而且爬升沙丘周围为植被覆盖良好的山地灌木或乔木林, 沙丘形成、发育过程显著不同于沙漠腹地发育的爬升沙丘。因此, 本文选取雅鲁藏布江米林宽谷段卧龙镇附近形态典型的爬升沙丘, 探讨高原亚

收稿日期: 2011-04-21; 修订日期: 2011-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(40871015); 教育部新世纪人才计划(NCET-08-0059)

作者简介: 周娜(1982-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生, 研究方向风沙地貌与风沙工程。

E-mail: zhouna@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 张春来(1972-), 男, 宁夏海原人, 教授, 从事风沙地貌与工程及土壤风蚀研究。

E-mail: clzhang@bnu.edu.cn

湿润河谷地带爬升沙丘表面沉积物粒度分布规律, 为揭示青藏高原亚湿润河谷地带山体覆沙形成机理、建立河谷风沙地貌理论提供研究积累。

2 研究方法

2.1 研究区概况

雅鲁藏布江米林宽谷地处西藏高原东南部, 属雅鲁藏布江河谷中游下段。受高原温带半湿润季风气候影响, 年平均气温 8.2°C , 年降水量 641mm , 85% 的雨水集中在 $6\sim 9$ 月。利用区内林芝机场 2008 年风速观测资料统计表明, 该段河谷大风日数多、风速大、持续时间长, 且多发生在午后, 当年 $\geq 5\text{m/s}$ 的起沙风累积时间达 2075h , 全年各月都有超过 120h 的起沙风累积时间, 年输沙势合计 592V , 属于高风能环境。

河谷风沙地貌自朗县 ($29^{\circ}02' \text{N}$, $93^{\circ}04' \text{E}$) 至米林县派乡 ($29^{\circ}31' \text{N}$, $94^{\circ}53' \text{E}$) 总体上沿河流走向呈不连续带状分布, 以宽谷段、支流汇入处及山体转向处最为集中。从河谷风沙地貌综合剖面来看, 自江心洲、河岸阶地向谷坡, 地形由低到高, 沙丘形态愈趋复杂。河漫滩以平沙地、简单新月沙丘和纵向沙丘等流动沙丘为主, 高度 $1\sim 3\text{m}$; 阶地面上发育风蚀凹槽, 槽壁 $3\sim 5\text{m}$, 内部以新月沙丘、格状沙丘、纵向沙垄为主, 高度 $3\sim 5\text{m}$, 植被零星分布于丘间地, 盖度小于 1% 。向阶地后缘, 风蚀槽壁逐渐变浅并最终与原始阶地面高程一致, 受后续沙源的增多及山体阻挡, 大量沙物质就地堆积, 以各种复合沙丘、沙丘链为主, 高度 $5\sim 20\text{m}$; 阶地后缘沙丘在风季不断向谷坡前移、爬坡而形成爬升沙丘(片), 其发育规模受限于沙源供给及风力强度, 高度多在 100m 以上。阶地风蚀凹槽之间未侵蚀部分植被良好, 盖度大于 30% , 爬升沙丘周围林地盖度在 45% 以上。

2.2 样品采集与测试

所选爬升沙丘位于米林宽谷段卧龙镇西侧“几”字形河流弯道内侧、河道右岸向北突出的山嘴西侧坡(图 1A), 经纬坐标 $29^{\circ}09' \text{N}$, $93^{\circ}41' \text{E}$ 。该沙丘始于高河漫滩, 依附凹形坡沿 NE-SW 方向爬升, 高差大于 200m 。如图 1B、1C 所示, 在爬升沙丘相对高度 30m 以下, 表面叠置新月形沙丘并向东南方向爬升; 自此以上, 爬升沙丘表面叠置槽、脊相间分布并沿谷坡上、下延伸的条带状沙丘, 槽、脊相对高差 $0\sim 4\text{m}$, 自上而下高差先增后减, 以 $3/4$ 高度处高差最大, 相邻脊部间距平均为 30m 。向东南方向, 条带状沙丘西北侧坡坡度变得缓而长, 槽、脊间距增至 50m 左右; 爬升沙丘自迎风坡脚向山体上部扩散, 整体形态呈“勺状”, 下部坡度 20° , 中上部 30° , 沙丘最高点与林带交界处, 具有 $2\sim 4\text{m}$ 高的明显落沙坡。

对该爬升沙丘沿两条样线进行系统采样。其中样线-I 沿 NE-SW 方向自迎风坡脚斜向上延伸至沙丘与林地的交界处(图 1B), 对样线下部叠置爬升的新月形沙丘, 分别在其迎风坡(1~4 样点, 7~9 样点, 11 样点, 12 样点)和背风坡(5 样点, 6 样点, 10 样点, 13 样点, 14 号样点)连续采样; 样线中部叠置新月形沙丘消失, 对叠置条带状沙丘脊部采样(15~20 号样点); 样线上部, 叠置条带状沙丘起伏和缓样点, 按沙丘迎风坡(21 样点, 23 样点, 26~28 样点)和背风坡(24 样点, 25 样点, 29 样点, 30 样点)布点采样(图 1C), 采集样品 30 个。样线-II 自山体坡脚向爬升沙丘顶部沿叠置条带状沙丘走向布设, 分别对样线沿途脊部和槽部以 20m 长度间隔采样(图 1B), 采集样品 46 个。

为客观反映雅鲁藏布江河谷米林段爬升沙丘、阶地和河漫滩沙丘粒度分布的一般规律和粒度特征, 在临近的雅鲁藏布江右岸阶地选取新月形沙丘采集表层样 23 个, 采样部位

包括迎风坡和背风坡；在位于河漫滩、发育良好的新月沙丘，采集表层样 10 个。采样深度均为 0~5cm，面积 20cm×20cm，包含沙波纹的槽、脊，每个样品 300~500g。采样工作于 2007 年 5 月 26 日完成。室内采用振筛与沉降结合的方法对沉积物进行粒度分析，根据福克—沃德公式计算各粒度参数。

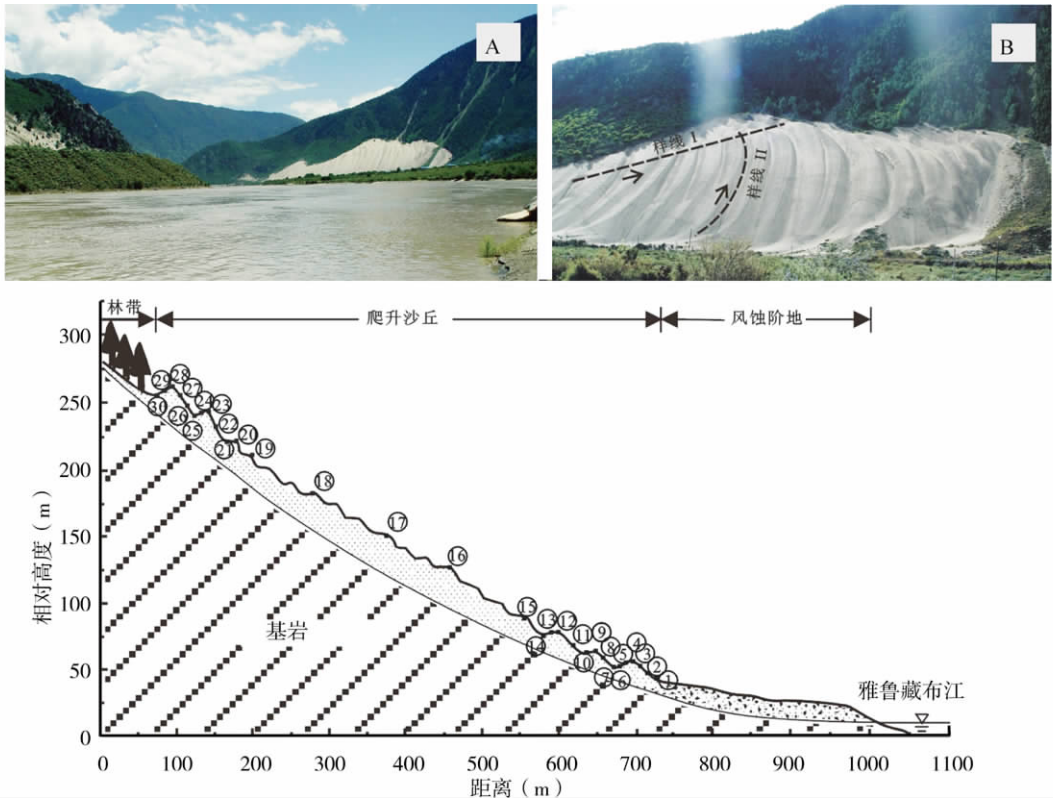


图 1 爬升沙丘所处河谷部位 (A)、表面沉积物采样样线 (B) 和样线 I 样点分布 (C)

Fig 1 Location of the studied climbing dune (A), sediments sampling lines (B) and distribution of sampling points on the climbing dune along sampling line-I (C)

3 结果分析

3.1 爬升沙丘表面沉积物粒度总体特征

粒度级配结果表明 (表 1)，该爬升沙丘以细沙 (48.23%) 和极细沙 (43.66%) 为主，其次为粉沙 (5.27%)，中沙 (1.16%)、粗沙 (0.04%) 和粘土 (1.54%) 含量少，不含极粗沙。

粒度参数统计结果表明 (表 2)，平均粒径分布范围为 2.07~3.71 Φ ，平均 3.11 Φ ，属于最易发生跃移的粒径范围^[19]；标准偏差 0.20~1.41 Φ ，平均 0.65 Φ ，为中等较好分选；偏度 -0.33~0.61，平均 0.22，属细偏，表明粒度分布中存在显著细尾；峰度值 0.66~3.09，平均 1.54，为窄峰态，细沙和极细沙集中分布，在粒度分布上表现为双峰或三峰。

表 1 爬升沙丘表面沉积物粒度组成及其与河漫滩、阶地沙丘对比

Tab 1 Grain size composition of sediments on the climbing dune, point bar and terrace-dune

粒级 (Φ)	百分含量 (%)		
	典型爬升沙丘 ($n=76$)	阶地沙丘 ($n=23$)	河漫滩沙丘 ($n=10$)
-1.00~0.00	0.00	0.01	0.00
0.00~1.00	0.04	0.34	0.21
1.00~2.00	1.16	4.68	2.36
2.00~2.32	10.73	19.49	6.42
2.32~2.64	1.46	8.01	2.11
2.64~3.00	36.04	37.34	19.85
3.00~3.32	11.75	11.34	12.59
3.32~3.64	20.80	4.48	8.43
3.64~4.00	11.11	5.94	23.51
4.00~4.32	2.07	1.72	11.16
4.32~5.64	1.21	1.73	6.18
5.64~9.00	2.09	2.92	4.52
>9.00	1.54	2.00	2.66

注: n 为采样个数。

表 2 爬升沙丘表面沉积物粒度参数特征及其与河漫滩、阶地沙丘对比

Tab 2 Grain size parameters of sediments on the climbing dune, point bar and terrace-dune

地貌部位	平均粒径 (M_z, Φ)			标准偏差 (δ_1, Φ)			偏度 (Sk_1)			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
爬升沙丘	3.11	3.71	2.07	0.65	1.41	0.20	0.22	0.61	-0.33	1.54	3.09	0.66
河漫滩沙丘	3.48	3.75	2.91	1.08	1.34	0.96	0.26	0.15	0.36	1.79	2.21	1.14
阶地沙丘	2.84	3.27	2.46	0.85	1.29	0.51	0.29	0.50	-0.17	2.06	2.73	1.29

3.2 爬升沙丘表层沉积物粒度分异

3.2.1 沿 NE-SW 风向沙丘表层沉积物粒度空间分异 由图 2 可见, 爬升沙丘迎风坡脚 (1 样点) 的平均粒径为 3.02Φ , 标准偏差为 1.01Φ , 偏度 0.46 , 峰度值为 3.05 。爬升沙丘丘顶 (28 样点), 平均粒径为 3.47Φ , 标准偏差为 0.59Φ , 偏度 0.20 , 峰度值为 1.48 。爬升沙丘下部叠置沙丘背风坡 (5、6 样点) 的平均粒径为 3.02Φ , 标准偏差为 1.02Φ , 偏度为 0.45 , 峰度为 2.27 。爬升沙丘上部叠置沙丘背风坡 (29、30 样点) 的平均粒径为 3.41Φ 、标准偏差为 0.79Φ , 偏度 0.38 , 峰度为 2.13Φ 。

叠置新月形沙丘迎风坡 3~4、11~12 样点的平均粒径分别为 $3.11\sim 3.05\Phi$ 、 $3.32\sim 2.88\Phi$, 标准偏差为 $1.41\sim 1.20\Phi$ 、 $1.32\sim 1.07\Phi$, 偏度 $0.50\sim 0.51$ 、 $0.57\sim 0.42$, 峰度 $2.31\sim 3.05$ 、 $2.55\sim 2.43$ 。叠置条带状沙丘的迎风坡, 21~23、26~28 样点的平均粒径分别为 $3.37\sim 3.27\Phi$ 、 $3.55\sim 3.47\Phi$, 标准偏差为 $0.94\sim 0.89\Phi$ 和 $0.64\sim 0.59\Phi$, 偏度为 $0.47\sim 0.52$ 、 $0.10\sim 0.20$, 峰度为 $2.50\sim 2.53$ 、 $1.64\sim 1.48$ 。

表 3 显示, 叠置新月沙丘—I 背风坡 4~6 样点的平均粒径分别为 3.05Φ 、 3.13Φ 和 2.90Φ , 标准偏差为 1.20Φ 、 0.85Φ 和 1.20Φ , 偏度为 0.51 、 0.55 、 0.35 , 峰度为 3.05 、 2.36 和 2.18 。叠置沙丘背风坡样点 9~10、12~14、23~25 的平均粒径分别为 $3.17\sim$

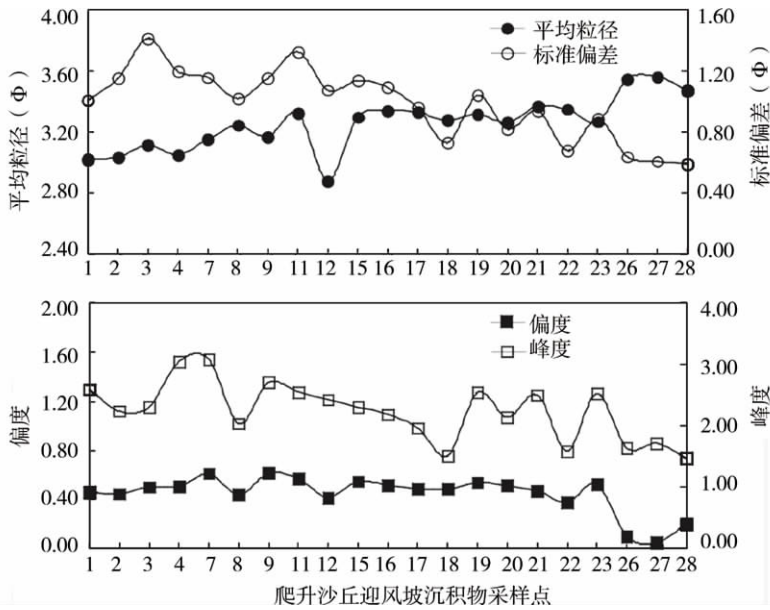


图 2 爬升沙丘表面迎风坡采样点沉积物粒度参数沿主风向 (NE-SW) 的空间分布
 Fig 2 Grain size characteristics of sediments on the windward slope of the climbing dune in NE-SW direction

3. 27 Φ 、2. 88~3. 25 Φ 、3. 27~3. 32 Φ ，标准偏差为 1. 15~1. 07 Φ 、1. 07~0. 85 Φ 、0. 89~0. 85 Φ ，偏度为 0. 61~0. 54、0. 42~0. 42、0. 52~0. 47，峰度 2. 71~2. 42、2. 43~1. 90、2. 53~2. 31。叠置条带沙丘一 II，自丘顶向背风坡脚的平均粒径分别为 3. 47~3. 37 Φ ，标准偏差为 0. 59~0. 62 Φ ，偏度为 0. 20~0. 35，峰度为 1. 48~1. 50。

表 3 爬升沙丘表面叠置沙丘背风坡沉积物粒度分布特征

Tab. 3 Grain size characteristics of sediments on the leeward slope of dunes super-imposed on the climbing dune

叠置沙丘类型	背风坡部位	采样点	落沙坡长度 (m)	平均粒径 (Mz, Φ)	标准偏差 (δ_1 , Φ)	偏度 (Sk ₁)	峰度 (K _G)
叠置新月形沙丘一 I	落沙坡顶	4	2.6	3.05	1.20	0.51	3.05
	背风坡中	5		3.13	0.85	0.55	2.36
	背风坡脚	6		2.90	1.20	0.35	2.18
叠置新月形沙丘一 II	落沙坡顶	9	1	3.17	1.15	0.61	2.71
	背风坡中	10		3.27	1.07	0.54	2.42
叠置新月形沙丘一 III	落沙坡顶	12	2	2.88	1.07	0.42	2.43
	背风坡中	13		3.15	0.85	0.53	2.28
	背风坡脚	14		3.25	0.92	0.42	1.90
叠置条带沙丘一 I	落沙坡顶	23	2	3.27	0.89	0.52	2.53
	背风坡中	24		3.32	0.79	0.45	2.17
	背风坡脚	25		3.32	0.85	0.47	2.31
叠置条带沙丘一 II	落沙坡顶	28	3	3.47	0.59	0.20	1.48
	背风坡中	29		3.44	0.97	0.40	2.76
	背风坡脚	30		3.37	0.62	0.35	1.50

3.2.2 沿 NE-SW 风向爬升沙丘表层沙粒运动特征 在爬升沙丘下部、中部和上部的叠置沙丘顶部选取 3 个样点，相对高度分别约为 2m、100m 和 200m。粒度分布显示（图 3），爬升沙丘下部， $<2.00\Phi$ 的粗沙含量为 1.47%， $2.00\sim 2.64\Phi$ 的沙粒占总含量的 20.47%， $2.64\sim 3.00\Phi$ 的沙粒含量为 39.33%， $3\sim 4\Phi$ 的极细沙含量为 25.97%， $4\Phi\sim 9\Phi$ 的粉沙含量为 9.43%， $>9\Phi$ 的粘土占 3.34%；爬升沙丘中部， $<2.00\Phi$ 、 $2.00\sim 2.64\Phi$ 的沙粒含量分别降低为 0.07% 和 2.83%， $2.64\sim 3.00\Phi$ 的细沙含量降为 32.17%， $3\sim 4\Phi$ 的沙粒含量增至 50.57%， $4\Phi\sim 9\Phi$ 、 $>9\Phi$ 的沙粒含量分别为 11.12% 和 3.24%；爬升沙丘顶部，粗沙含量为 0.07%， $2.00\sim 2.64\Phi$ 、 $2.64\sim 3.00\Phi$ 的细沙含量均有所降低，分别为总含量的 0.17%、13.63%， $3\sim 4\Phi$ 的沙粒含量增加为 76.63%， $4\Phi\sim 9\Phi$ 、 $>9\Phi$ 的沙粒含量略有降低，分别为 7.72% 和 1.78%。

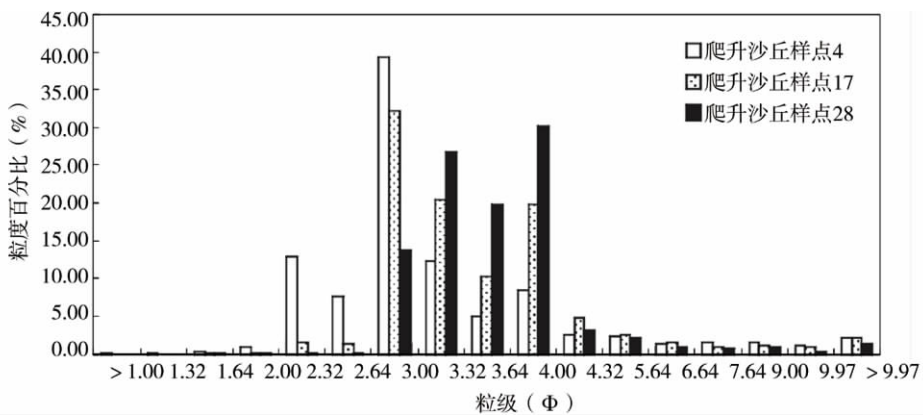


图 3 爬升沙丘坡脚、中部及上部样点粒度分布特征

Fig. 3 Grain size distribution of three samples located at toe, middle and top of the climbing dune

3.2.3 叠置条带状沙丘脊部与槽部表层沉积物粒度分布特征 叠置条带状沙丘脊部和槽部表层沉积物粒度分布具有一定特征（图 4）。爬升沙丘坡脚、叠置条带状沙丘脊部和槽部（1 样点）的平均粒径为 $2.08\sim 2.07\Phi$ ，标准偏差为 $0.20\sim 0.27\Phi$ ，偏度和峰度分别为 $-0.29\sim -0.04$ 、 $1.12\sim 1.68$ ；爬升沙丘下部条带沙丘（3 样点），丘脊及其间槽部的粒径平均为 $2.81\sim 2.83\Phi$ ，标准偏差为 $0.58\sim 0.60\Phi$ ，偏度 $0.08\sim 0.10$ ，峰度 $1.04\sim 1.16$ ；爬升沙丘上部条带沙丘（23 样点）的平均粒径为 3.71Φ ，标准偏差为 0.28Φ ，偏度 $0.00\sim 0.01$ ，峰度为 $1.03\sim 1.00$ 。以 9、17 样点为界，下段（3~9 样点）脊、槽的偏度平均值为 0.06，中段（10~17 样点）平均值为 0.20，上段（18~23 样点）平均值为 -0.08 ；槽、脊的峰度值，在坡下部（3~12 样点）平均为 1.26，坡上部（13~23 样点）平均为 0.93。

以爬升沙丘 3/4 高度（样点 16、样点 17 之间，相对高度 159m）为界，下段，脊和槽的平均粒径分别为 2.87 、 2.92Φ ，标准偏差为 0.47 、 0.51Φ 。上段，脊和槽的平均粒径分别为 3.31 、 3.44Φ ，标准偏差为 0.37 、 0.34Φ 。爬升沙丘表面，自下向上的槽、脊偏度或峰度对比不存在分段性。叠置条带状沙丘脊部的偏度平均值为 0.11，槽部为 0.04。脊部和槽部的峰度值无显著差异，个别样点（6~9 样点，11 样点）表现出极高峰态，峰度

值分别为 1.76、1.99、1.39、1.79 和 2.02。

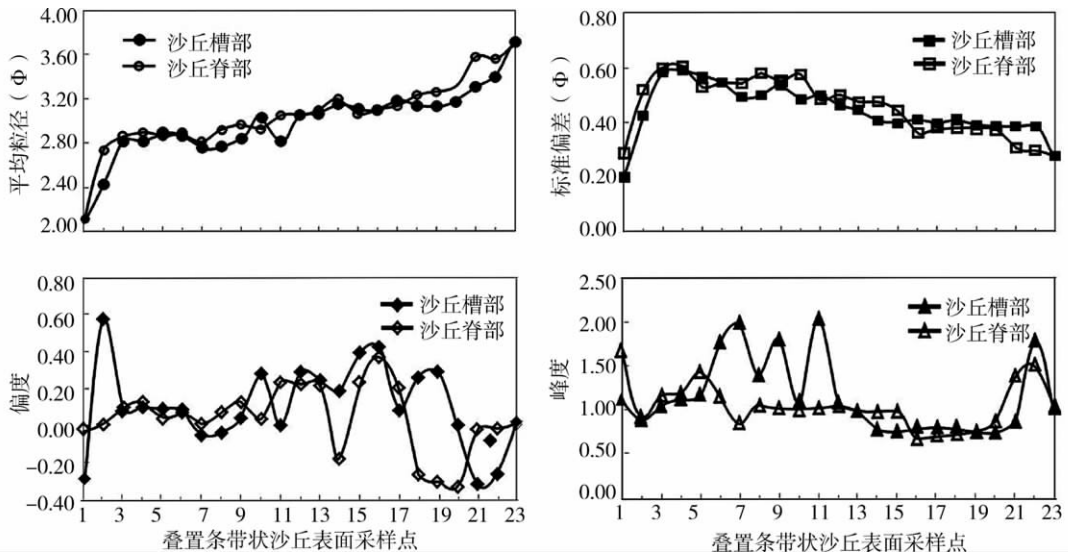


图 4 叠置条带状沙丘脊部及其间槽部粒度参数随高度的空间分布特征及其对比

Fig. 4 Spatial distributions of grain size parameters of sediments on ridges and inter-ridge troughs of strip-shaped dunes super-imposed on the climbing dune

4 分析与讨论

4.1 河漫滩沙丘、阶地沙丘与爬升沙丘表面沉积物的继承性与差异性

李森等将雅鲁藏布江河谷河漫滩、阶地和爬坡沙丘按发育过程划分为初生带、主体带和消退带^[17]。三个地貌部位的沙丘沙粒度特征显示一定的继承性。河漫滩沙丘主要由被风力改造的河漫滩相泥沙组成，2.00~2.32 Φ (6.42%)、2.64~3.32 Φ (32.44%) 和 3.64~4.32 Φ (36.47%) 的细沙、极细沙和部分粉沙形成粒径三峰 (表 1)，大于 4.32 Φ 的粉沙和粘土部分形成粒度分布的细尾 (表 2)。因此，由于河漫滩沙丘沉积物的淤泥质高含量特征使该部位沙丘表面沉积物最细，粒度分布范围相对较宽，分选较差。阶地沙丘主要由河漫滩物质和阶地风蚀物提供沙源，峰值粒径集中在 2.00~4.00 Φ (86.60%) 范围内的跃移沙粒，以 2.00~2.32 Φ (19.49%) 和 2.64~3.32 Φ (48.68%) 组成粒径双峰，粉沙和粘土仅占 8.37%。对比河漫滩沉积物，该地貌部位发育的沙丘沙粒径变粗、分选变好，粒径向粗颗粒的转移使细尾增长，偏度值升高，峰态由三峰转为双峰使峰度值略有升高。爬升沙丘是阶地沙丘前移过程中受山体影响而不断爬升的结果，受风力分选作用，粒径组成向细颗粒转移，以 2.00~2.32 Φ (10.73%)、2.64~3.00 Φ (36.04%) 和 3.32~3.64 Φ (20.80%) 组成粒径三峰，其中 2.00~4.00 Φ (91.89%) 粒径分布更加集中，因而平均粒径变细、分选变好、粒度分布的细尾有所变短，阶地粒径双峰向三峰转换使粒径分布较阶地略宽而使峰度值有所降低。

4.2 沿 NE-SW 风向沙丘表层沉积物粒度分布规律

由表 4 可见，沿爬升沙丘的延伸方向 NE-SW，自迎风坡脚沿谷坡向上的叠置沙丘迎风坡，平均粒径与相对高度呈显著正相关 ($R=0.756$)，由 3.02 Φ 降低至 3.47 Φ 。标准

偏差与相对高度为显著负相关 ($R=-0.835$), 平均由 1.01Φ 减小为 0.59Φ , 沉积物粒度变细、分选变好, 反映风沙流携沙能力随高度增加而降低使细颗粒不断被分选和爬升; 偏度与相对高度呈显著负相关 ($R=-0.560$), 粒度分布由极细偏 (0.46) 转变为细偏 (0.20), 沉积物粒度分布曲线的对称性增强; 峰度值与相对高度显著负相关 ($R=-0.596$), 由 3.05 降低为 1.48 , 表明粒度分布由三峰中主峰尖窄向双峰低平转变。自迎风坡脚沿谷坡向上的叠置沙丘背风坡, 平均粒径与样点相对高度呈显著正相关 ($R=0.763$), 由 3.02Φ 降低为 3.41Φ , 显示粒径变细; 标准偏差与样点高度显著负相关 ($R=-0.652$), 平均由 1.02Φ 降低为 0.79Φ , 分选性变好; 偏度、峰度与样点相对高度不存在显著相关, 总体趋势显示, 随高度增加、偏度与峰度值略有降低。

表 4 爬升沙丘表面、沿 NE-SW 风向的叠置沙丘迎风坡样点高差、背风坡高差与粒度参数的相关关系

Tah 4 Correlations between grain size parameters and relative height of samples on the windward slope of super-imposed dunes and of samples on the leeward of such dunes in NE-SW wind direction

测点相对高度 相关分析	叠置沙丘迎风坡样点相对高度		叠置沙丘背风坡样点相对高度	
	相关系数 (R)	显著性检验 (p)	相关系数 (R)	显著性检验 (p)
平均粒径 (Φ)	0.756	<0.01	0.763	<0.05
标准偏差 (Φ)	-0.835	<0.01	-0.562	<0.01
偏度	-0.560	<0.01	-0.462	-
峰度	-0.596	<0.01	-0.082	-

叠置沙丘迎风坡向丘顶 (3~4 样点、11~12 样点、21~23 样点、26~28 样点) 的沉积物粒径变粗、分选变好, 是丘顶长期遭受风力吹蚀和分选作用, 极细沙、粉沙等细颗粒被吹蚀而细沙等粗颗粒相对集中分布的结果。叠置沙丘迎风坡的偏度值向丘顶增大, 如叠置条带状沙丘的迎风坡 21~23 样点、26~28 样点的偏度值分别由 0.47 增至 0.52 和 0.10 增至 0.20 , 表明粒度分布中由于沙粒级向粗颗粒集中、细尾变长。沙丘表面沉积物的标准偏差与峰度相关系数达 0.754 (图 5), 显示分选性变好则峰度值降低, 粒度分布将由多峰中单峰尖窄向近对称双峰转换。

叠置沙丘背风坡粒度分布主要受背风坡分离气流及重力滑塌作用影响而具有自身特点 (表 3)。研究表明, 在沙丘背风坡分离气流作用下, 大量极细沙在距丘顶 2m 内跃移沉降^[19~21], 如样点 4~5、样点 9~10、样点 12~14、样点 23~25 表现为落沙坡丘顶向背风坡中部或背风坡脚 (背风坡长度 $\leq 2\text{m}$) 变细, 分选变好。叠置条带沙丘-II, 位于爬升沙丘前缘、与林带交界, 自丘顶 (样点 28) 向背风坡脚 (样点 30) 的平均粒径由 3.47Φ 增至 3.37Φ , 标准偏差由

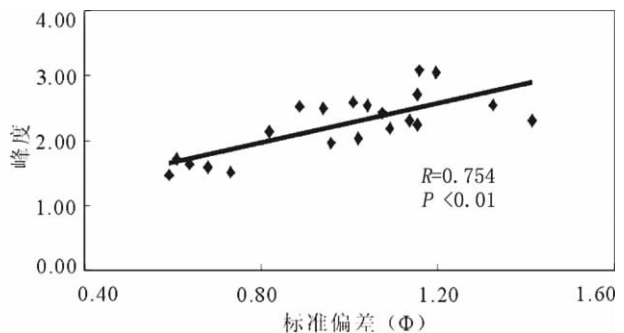


图 5 爬升沙丘表面标准偏差与峰度相关关系

Fig 5 Relationship between standard deviation and kurtosis

0.59 Φ 增至 0.97 Φ , 显示分选变差。分析认为, 在落沙坡发育良好的背风坡 (坡长 $>2\text{m}$), 由于重力分选作用使粗颗粒在背风坡脚积累, 粒度有所变粗, 分选变差。位于爬升沙丘下部、叠置新月沙丘-I 背风坡 (坡长 $>2\text{m}$) 的沉积物粒度同样表现为向坡脚变粗、分选变差。沙丘背风坡沉积物分选变好则峰度值降低, 反之则相反。偏度值在沙丘背风坡无显著变化趋势。

4.3 沿 NE-SW 风向爬升沙丘表层沙粒运动特征

由爬升沙丘表面、不同粒级沙粒的空间分布来看 (图 3), $<2.00\Phi$ 的粗沙多以蠕移形式运动, 受山体坡度抑制而终止于坡脚, 含量小于 1.50%; 2.00~2.64 Φ 沙粒以跃移形式向山体上部爬升而终止于爬升沙丘中部, 该部位含量仅为 2.83%; 2.64~3.00 Φ 是爬升沙丘主要颗粒组成部分, 在爬升沙丘上部含量可达 13.63%, 可见该粒级沙物质仍可向相对高程 200m 以上爬升; 3~4 Φ 的沙粒也是爬升沙丘的主要组成部分, 其运动方式介于跃移与悬移之间, 在风力携带下向山体上方运动过程中, 风力逐渐减弱, 这些极细沙颗粒则随之沉降并累积, 形成以极细沙为主的粒径组成, 含量高达 76% 以上, 可见该粒级爬升能力最强; 4 Φ 以上的粉沙主要以悬移形式运移, 含量随距离、高度的增加而略有减少, 其中 4 Φ ~9 Φ 的粉沙输送距离较近^[22], 可达 45~450km。小于 9.97 Φ 的粘土部分不易被吹蚀, 而一旦进入大气中, 输送距离更远^[23]。

Tsoar 曾对 Negev 沙漠高 20m、坡度 20° 的爬升沙丘表层沉积物粒度进行分析^[13], 结果表明, 该沙丘主要由 1.50~2.50 Φ 和 2.50~3.00 Φ 组成粒径双峰, 在爬升沙丘中上部即 15~20m 处粗峰消失, 转变为以 3 Φ 为主的单峰, 分选性自坡下向上变好。本文研究的爬升沙丘下部以 2.00~2.32 Φ (12.87%)、2.64~3.00 Φ (39.33%) 和 3.64 Φ ~4.00 Φ (8.5%) 组成粒径三峰 (图 3), 在爬升沙丘最高部位以 3.00 Φ ~3.32 Φ (26.63%) 和 3.64~4.00 Φ (30.20%) 组成粒径双峰, 较 Negev 沙漠的爬升沙丘整体粒度为细。这种差别首先取决于二者沙源物质不同, Negev 沙漠为被风力充分改造的沙漠沙, 而米林河谷爬升沙丘更为复杂, 既有河漫滩或江心洲的泥沙沉积, 也有阶地较粗的沉积物。其次为风力强度和山体坡度的差异, Tsoar 等进一步对该沙丘进行风洞实验与数值模拟, 得出在当地常见摩阻风速 $30\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和山体坡度 20° 条件下, 1.60 Φ 沙粒在坡脚停止爬升, 2.12 Φ 沙粒则在沙丘下部 1/3 处停止爬升, 只有 2.94 Φ 粒级能跃移至丘顶。本文中, 2.00 Φ 的跃移沙粒在坡脚停止运动, 2.00~2.64 Φ 的沙粒终止于爬升沙丘中部 100m 处, 而小于 2.64 Φ 的跃移沙粒则可以爬升 200m 高度。对比发现, 尽管米林河谷爬升沙丘爬升坡度近 30°, 但相同粒径的沙粒爬升能力更强, 由此可以推断本文研究区河谷局部风力强度大于 Negev 沙漠爬升沙丘所处的风力环境。

爬升沙丘表面沉积物大小与高度密切相关 (图 6)。相关分析表明, 粗沙集中分布于爬升沙丘相对高度 25m (12 样点) 以下, 随高度增大含量略有减小, 最高含量不超过 1.5%。中沙的空间分布特征同粗沙, 含量略高于粗沙, 平均 2.0%, 高值出现在叠置新月沙丘背风坡脚 (6 样点) 和丘顶 (4 样点、12 样点), 与平均粒径在相应地貌部位的分布一致。粗沙和中沙在山体坡脚的残留及含量随高度减少, 反映粗颗粒爬坡能力有限。粉沙含量随高度增加略有降低, 山体下部含量为 6.15%~14.84% (样点 1~12), 平均 9.98%, 上部含量 7.73%。粘土是风沙活动中地表最不活跃的粒径组分, 其含量随高度增加略有降低, 平均由 3% 降低至 2%。调查认为, 沿 NE-SW 风向的山体下部, 分布稀疏矮灌木, 抑制了地表粉沙等细颗粒的吹蚀并使之残留、累积。细沙和极细沙是爬升沙丘

的主要粒级组分，二者总含量高达 80% 以上。其中，细沙含量和爬升高度呈显著负相关，相关系数达 -0.89 ，极细沙含量与高度显著正相关，相关系数达 0.92 。可见，爬升沙丘沉积物粒度组成随高度变化的最大特点是粒径峰值在细沙和极细沙之间的转移。

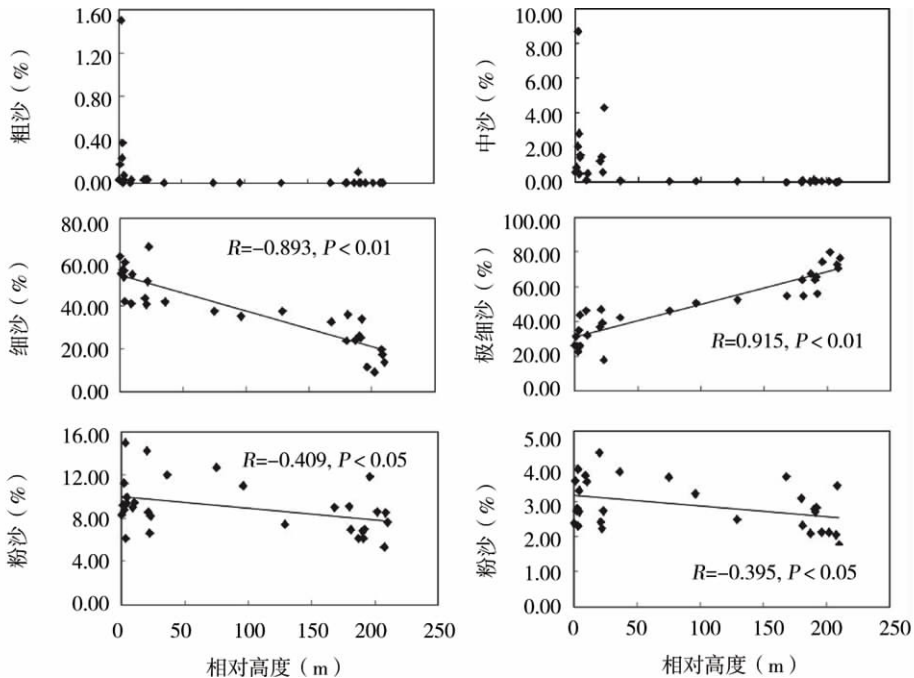


图 6 沿 NE-SW 方向爬升沙丘表面沉积物粒径随相对高度的变化

Fig. 6 Changes of grain sizes with increasing height on the climbing in NE-SW direction

4.4 叠置条带状沙丘脊部与槽部表层沉积物粒度分异原因

自爬升沙丘下部坡脚沿条带状沙丘脊线向爬升沙丘顶部，丘脊及其间槽部的粒径平均由 2.08Φ 减小为 3.71Φ 。标准偏差显示分选变好，平均由 0.60Φ 降低为 0.28Φ 。偏度值波动较大，自坡脚向上先增大后减小，平均由 0.06 增至 0.20 而后降至 -0.08 ，显示粒径分布随高度增加由基本对称变为细偏而后逐渐转为粗偏的过程。峰度值随高度略有降低（图 4），在坡下部平均为 1.26 ，属高峰态，而在爬升沙丘上部平均值为 0.93 ，属中等或低峰态。这种变化趋势与 NE-SW 风向爬升沙丘表面沉积物变化规律一致。值得注意的是，爬升沙丘坡脚、叠置条带沙丘表面的粒度最粗、分选却最好。认为，当谷风以近似垂直的角度向谷坡爬升时，随谷坡坡度的增大，将会产生反向回流^[5]，促进地表细沙粒吹蚀、分选变好。

叠置条带状沙丘脊及其间槽部的粒度参数存在差异（图 4）。以爬升沙丘 $3/4$ 高度（相对高度 159m ）为界，下段脊部的平均粒径（ 2.87Φ ）略粗于槽部（ 2.92Φ ），分选性（ 0.47Φ ）好于槽部（ 0.51Φ ），上段二者粒径差值有所增加、脊部分选性（ 0.38Φ ）差于槽部（ 0.34Φ ）。除个别样点外，叠置沙丘脊部的偏度值（ 0.11 ）总体略大于槽部（ 0.04 ）。脊部和槽部的峰度值无显著差异。

各选取叠置带状沙丘下段和上段的槽、脊样点（图 7），根据采样点粒度级配特征来

分析二者粒度差异产生的原因。带状沙丘下段脊部由 $2.00\sim 2.32\Phi$ (54.83%) 组成粒径主峰, $2.64\sim 3.00\Phi$ (32.97%) 为次峰, $3.00\sim 4.00\Phi$ (5.40%) 为一细尾。槽部主要由 $2.64\sim 3.00\Phi$ (44.87%) 组成粒径主峰, $2.00\sim 2.32\Phi$ (33.30%) 和 $3.00\sim 4.00\Phi$ (16.47%) 为次峰。在叠置沙丘上段, 脊、槽沉积物均以 $3.00\sim 4.32\Phi$ 的粒度为主, 含量分别为 80.22% 和 87.94%, $2.64\sim 3.00\Phi$ 组成粒径次峰, 含量分别为 16.50% 和 9.57%。可见, 带状脊部为 NE-SW 风向的沙丘顶部, 槽部为背风坡, 丘顶较细的沙粒受风力分选作用跃移至背风坡沉降, 槽部粒径变细, 这一现象与落沙坡的发育程度密切相关。调查表明 (图 1), 叠置条带状沙丘在爬升沙丘上部一般发育 1m 左右的落沙坡, 而落沙坡中、下部的背风坡长而缓, 槽部主要以细沙粒的跃移沉降为主; 脊、槽的分选差异受风力大小、叠置沙丘微地貌的影响。在爬升沙丘中、下部风力大且不稳定, 自丘顶向背风坡跃移沉降的颗粒大小不一、分选变差。至爬升沙丘上部, 风力减小, 叠置带状沙丘脊部的细沙粒在局部风力作用下被进一步分选并向背风坡沉降, 因而槽内颗粒的分选性变好; 因槽部颗粒细于脊部, 粒度分布曲线中, 细颗粒含量增加, 曲线对称性增强而细尾变短、细偏程度降低; 峰度值主要受制于峰值粒径分布模式, 对于相同高度的槽、脊具有几乎相同的多峰分布模式, 因而峰度值差异不显著。

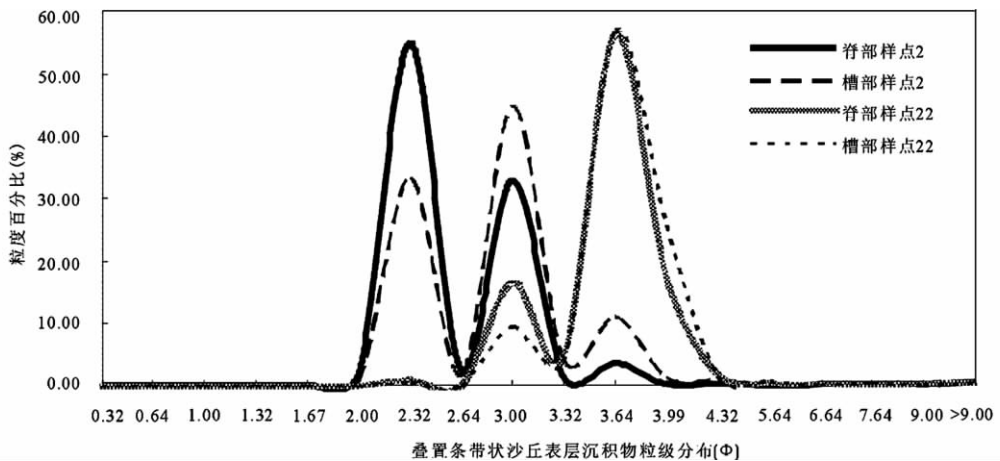


图 7 不同高度的叠置条带状沙丘脊部与槽部沉积物粒度分布特征对比

Fig. 7 Comparison of grain size distributions on the ridges and inter-ridge troughs of strip-shaped dunes

5 结论

(1) 雅鲁藏布江米林河谷段典型爬升沙丘表面粒度特征总体表现为以细沙和极细沙为主、中等分选、细偏、高峰态。河漫滩、阶地和爬升沙丘三类沙丘的发育过程具有继承性和差异性, 河漫滩沙丘为被风力改造的河流相泥沙, 以极细沙为主, 分选性较差, 细偏, 三峰。阶地沉积物以河漫滩和阶地风蚀物为主要补给, 沙丘沙被风力充分改造, 细沙为主, 分选变好, 双峰为主, 细尾变长。随阶地沙丘顺风向向谷坡的前移和爬升, 峰值粒径转为极细沙为主, 分选极好, 细偏程度有所降低, 粒度分布表现为二峰或三峰。

(2) 沿 NE-SW 风向, 爬升沙丘表面沉积物粒度参数随高度和距离增大呈现显著变化趋势, 平均粒径减小, 分选变好, 偏度和峰度降低, 这是粗颗粒不断沉降而细颗粒随高

