

新月形沙丘表面粒度特征对沙丘发育规模及风向变化的响应

——以塔克拉玛干沙漠东南缘新月形沙丘为例^{*}

蒋宁 李安琪 赵晓萌 程宏[†] 李慧茹 亢力强

(北京师范大学地理科学学部,北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,
北京师范大学防沙治沙教育部工程研究中心:100875,北京)

摘要 以塔克拉玛干沙漠东南缘新月形沙丘为研究对象,分析3个不同发育规模和相反风向作用后沙丘表面沉积物粒度参数,得出以下结论:1)新月形沙丘表面沉积物以砾石和极粗沙为主,二者总占比79.09%,与之对应的,沉积物概率累积曲线多以蠕移质为主,其次为跃移质,沙丘形态及其表面微地貌变化,使得沉积物粒度特征在沿风向的不同断面呈现3种模式:迎风坡脚最粗、沿迎风坡经丘顶/脊线至背风坡脚逐渐变细,分选丘顶/脊线最好、由此分别至迎/背风坡脚变差;迎风坡上/下部最粗、由此至迎/背风坡脚变细,分选丘顶/脊线最好、由此至迎/背风坡脚变差;迎风坡上/下部最粗、由此至迎/背风坡脚变细,分选迎风坡脚最好、沿迎风坡经丘顶/脊线至背风坡脚变差。2)随沙丘高度增加,迎风坡和背风坡沉积物先变细后变粗,丘顶/脊线逐渐变粗,但分选性均变好;两翼角沉积物粒径差值增大,粒径粗、分选好的短翼角变为长翼角。3)相对于区域主风向(NE),反风向(SW)作用后,迎风坡沉积物变细、分选变差,丘顶变粗、分选变好,背风坡脚变细、分选无明显变化。迎风坡表面和背风坡脚细沙、极细沙和粉沙总占比增加,砾石和极粗沙总占比减少;丘顶正相反。

关键词 塔克拉玛干沙漠;新月形沙丘;粒度特征;沙丘形态;风向

中图分类号 P931.3

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020340

0 引言

新月形沙丘是陆地表面分布最普遍、形态最简单的风积地貌形态^[1],一般形成于供沙量不足和几乎为单向输沙风信的无植被区域^[2]。自19世纪末期以来,科学家展开了广泛而深入的研究,包括发育条件、形成和发展过程、沙丘形态、表面流场分布与蚀积特征、粒度与沉积构造等^[3]。沉积物粒度特征从微观层面代表了沙丘表面沙粒运动方式的差异,在沙丘演变过程中,其形态和表面气流相互作用,控制着沙丘表面的蚀积过程,导致沉积物粒度特征发生相应变化。反之,沉积物粒度特征影响沙丘表面沙粒起动过程^[1,4],进而改变风沙流输移过程,并影响沙丘的形态和演化过程。因此,沙丘形态、沉积物粒度、气流特征相互作用,控制着沙丘的形成演变和迁移过程。此外,新月形沙丘表面沉积物粒度特征,还可以用于反演区域气流强度和方向、沙物质来源以及气流对源区物质的

搬运能力^[5-6]。因此,新月形沙丘表面沉积物的粒度特征,是理解其形态变化和动力学形成过程的重要视角。迄今为止,科学家对区域新月形沙丘和不同类型沙丘表面沉积物粒度特征开展了大量的研究^[5,7-9],但是对沙丘形态参数和风向对沙丘表面沉积物粒度特征影响的研究较少。本文以塔克拉玛干沙漠东南缘新月形沙丘为研究对象,分析3个不同大小和相反风向作用后沙丘表面沉积物粒度参数,揭示了沙丘表面沉积物粒度特征对形态和风向的响应,为理解沙丘形成与演化过程提供了科学数据。

1 研究方法

研究区位于新疆塔克拉玛干沙漠东南缘且末县境内,沙丘形态以新月形沙丘和新月形沙丘链为主,沙丘走向为NE—SW向。研究区属于极端干旱的暖温带大陆性气候,盛行东北风^[10]。通过统计且末气象站观测数据,超过起沙风的风速占全年的42.75%,平

^{*} 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0500800);国家自然科学基金资助项目(41771006)

[†] 通信作者:程宏(1975—),男,博士,教授级高级工程师。研究方向:风沙物理和荒漠化防治方面的教学与研究。E-mail: chengh@bnu.edu.cn
收稿日期:2020-09-20

均为 $5.97 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以 NE 和 ENE 为主, 占比为 88.37%, 其次是 SW, 占比为 5.71%。

选取塔克拉玛干沙漠东南缘 3 个不同发育规模的新月形沙丘(编号为沙丘 I、II、III)(图 1), 各新月形沙丘形态参数如表 1 所示。在东北风(NE)的一次大风事件后, 在每个沙丘表面采集 5 个断面(A~E)以及两侧翼角(F1、F2)沉积物(图 2)。每个断面采集 6 个位置的沉积物, 分别为迎风坡脚、迎风坡下部、迎风坡上部、丘顶/脊线(中轴线最高位置为丘顶, 其余断面最高位置称脊线)、背风坡中部和坡脚, 编号 1~6。其中沙丘 III 迎风坡及两翼角表面分布有沙波纹, 分别在沙波纹波峰和波谷处采集表层样品, 波峰采样编号为 1''~4''、F1''、F2'', 波谷采样编号为 1'~4'、F1'、F2'。在西南风(SW)的一次大风事件后, 采集中轴线(断面 A)上的表面沉积物。样品数量共计 136 个。

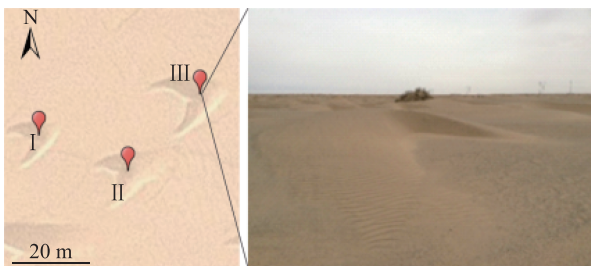


图 1 新月形沙丘相对位置

表 1 新月形沙丘形态参数

沙丘编号	地理坐标	高度(H)	角宽(W)	左翼(L_1)	右翼(L_2)
I	38.193 076°N, 84.926 532°E	0.55	6.3	3.5	3.7
II	38.192 736°N, 84.927 073°E	0.70	10.0	3.3	7.9
III	38.193 437°N, 84.927 554°E	0.94	12.0	6.6	9.0

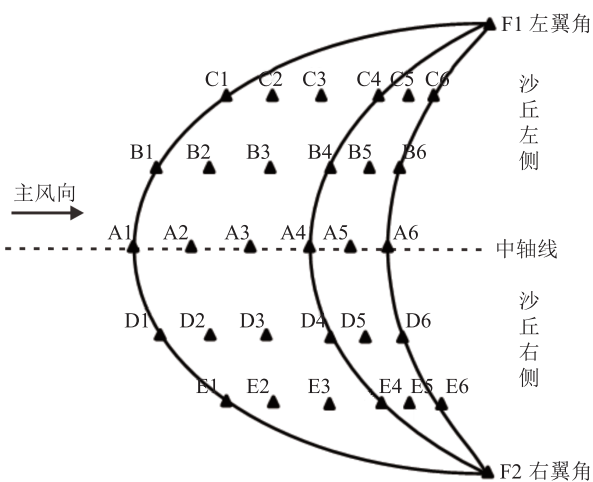


图 2 新月形沙丘采样点位置示意

样品经风干和去除杂质后, 对于粒径 $d > 1 \text{ mm}$ 的沙样采用 1 Φ 间隔套筛振筛, 粒度分析结果以质量分数表示; 对于 $d < 1 \text{ mm}$ 的沙样则采用英国马尔文仪器公司生产的 Malvern MS2000 激光粒度仪进行粒度测定, 分析结果以体积分数表示。根据振筛和马尔文激光粒度仪分析结果绘制粒径累积频率曲线, 运用 TableCurve 2D 软件对曲线进行拟合。粒度参数的计算方法采用目前广泛应用的 Folk 和 Ward 的公式^[11]及其标准, 计算各个样品的平均粒径 M_z 、标准偏差 σ_1 、偏度 S_k 和峰态 K_g 。依据伍登-温德华粒级标准^[12], 统计各粒级占比, 分析各样品的机械组成结果。

2 结果与讨论

2.1 新月形沙丘表面沉积物粒度特征

2.1.1 迎风坡粒度特征 迎风坡表面沉积物平均粒径为 $-1.39 \sim 2.40 \Phi$, 平均为 -0.51Φ , 属于极粗沙范围; 标准偏差 0.48~1.94, 平均为 0.96; 偏度为 0.06~0.87, 平均为 0.51, 表现为正偏; 峰态为 0.86~16.59, 平均为 3.18。从迎风坡脚到丘顶/脊线, 粒径变化有 3 种类型(图 3): 1) “凹型”, 粒径在迎风坡下部或上部最细, 坡脚和丘顶/脊线较粗; 2) “凸型”, 粒径在迎风坡下部或上部最粗, 坡脚和丘顶/脊线较细; 3) “S 型”, 粒径先增大后减小再增大, 或先减小后增大再减小。断面 A、E 为“凹型”; 断面 C、D 为“凸型”; 断面 B 为“S 型”。迎风坡沉积物以极粗沙为主, 砾石、细沙、中沙、极细沙、粗沙、粉沙占比依次减小, 分别为 49.89%、34.83%、8.06%、3.92%、3.07%、0.13%、0.11%。

新月形沙丘表面沙波纹波峰和波谷的平均粒径分别为 -0.97Φ 、 -0.05Φ , 二者的相对大小与风洞实验结果一致^[12]。波峰分选性好于波谷, 对应的标准差依次为 0.80 和 1.19。它们的差异是由于降落颗粒与床面产生碰撞导致跃移距离发生变异的结果^[13-14]。波峰/谷沉积物的偏度值分别为 0.37 和 0.64, 均属于单峰粒径频率曲线, 不过波峰峰态值(2.46)小于波谷(3.75), 波峰峰态较波谷更宽更低平。翼角沉积物粒径呈现出与迎风坡相反的特征, 波谷(-0.88Φ)粗于波峰(0.48Φ); 较长翼角(F2)(-0.60Φ)粗于较短一侧翼角(F1)(1.28Φ), 前者分选好于后者, 分别为 1.14 和 1.94, 前者沉积物粒度频率曲线为正偏、单峰态, 后者为正偏、双峰态。

2.1.2 背风坡粒度特征 背风坡沉积物粒径为 $-0.73 \sim 2.01 \Phi$, 平均为 0.67Φ 。分选性为中等到差, 标准偏差 0.95~1.98。粒径频率曲线大多表现为双峰态, 偏度值和峰态值分别为 0.09~0.72、0.66~2.69。相对于背风坡中部, 坡脚处粒径较细, 分选性较差, 偏度值和峰态值

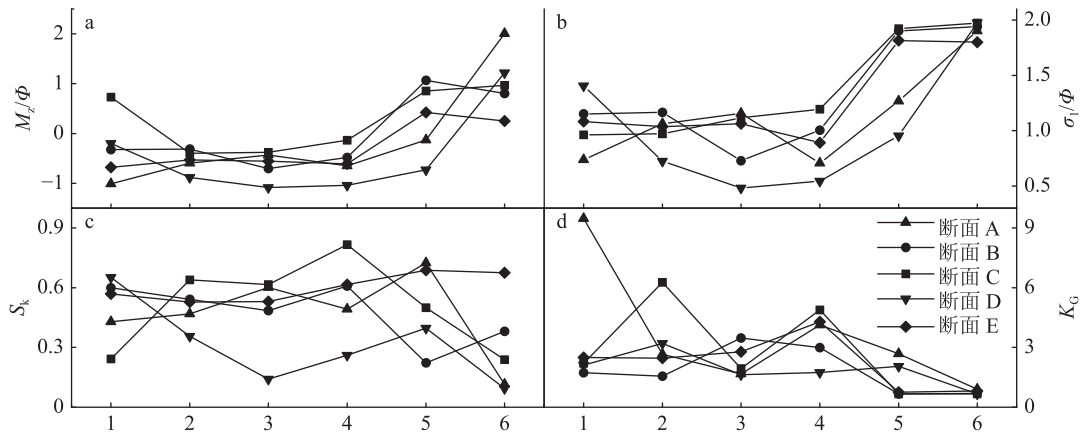


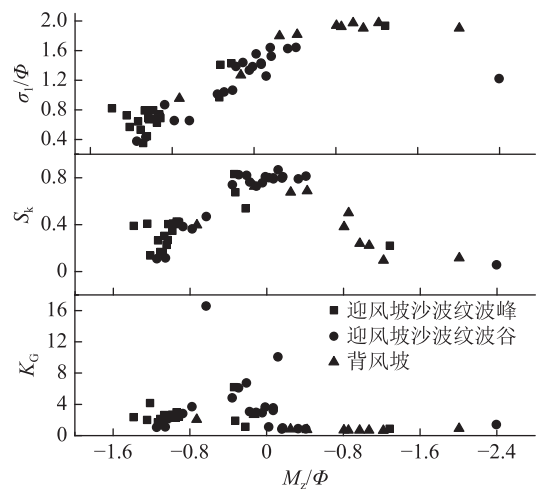
图3 新月形沙丘表面沉积物粒度参数散点图

均较小(图3)。从机械组成来看,极粗沙占比最大,其值为41.61%,其后依次为细沙(21.86%)、砾石(17.20%)、极细沙(12.99%)、中沙(5.77%)、粉沙(0.55%)和粗沙(0.02%),不含黏土。相对于背风坡中部,坡脚砾石和极粗沙占比减小,细沙和极细沙占比明显增大。由于气流在丘顶附近分离,使得风沙流颗粒在重力作用下在背风侧沉积^[15],一般地,较粗颗粒快速发生沉降,较细颗粒则在惯性作用下沿风向迁移较长距离。另一方面,背风侧地表及沿风向传输的细颗粒物在涡旋反向气流作用下沿反风向运动并沉积在背风坡坡角,致使坡脚粒径更细。

2.1.3 新月形沙丘表面粒度特征分异 沙丘表面沉积物粒径为 $-1.39\sim 2.40\phi$,迎风坡沉积物粗于背风坡。它们明显粗于以往研究结果($2.54\sim 3.34\phi$)^[5,16-18]。可能原因包括:1)表层沉积物采样深度的不同。本文为表层0~1 cm,已有研究为0~20 cm不等^[5,16-17]。事实上,已有研究证实表层沉积物粗于下层^[19]。2)研究区域不同。已有研究集中在塔克拉玛干沙漠腹地高大沙垄的垄间地^[5,16,18],其表层物质主要是风成作用的结果,而塔克拉玛干沙漠东南缘,受车尔臣河流域的影响,存在部分河流相的物质。标准偏差为0.35~1.98,由小到大依次为迎风坡沙波纹波峰、迎风坡沙波纹波谷、背风坡。迎风坡粒径频率曲线为单峰尖窄态,背风坡为双峰态,这与分选性变化相对应。偏度值为0.06~0.87,由大到小依次为迎风坡沙波纹波谷、背风坡、迎风坡沙波纹波峰;峰态为0.66~16.59,由大到小依次为迎风坡沙波纹波谷、迎风坡沙波纹波峰、背风坡。

沙丘粒度参数之间呈现一定的相关关系(图4)。平均粒径与标准偏差线性正相关($y = 0.49x + 1.2, R^2 = 0.73, P < 0.0001$),即随平均粒径变细,分选性变差。喀拉库姆沙漠也具有类似特征^[19],但是毛乌素沙地南缘则呈

现完全相反的趋势^[20]。平均粒径与偏度呈二次多项式关系($y = -0.21x^2 + 0.097x + 0.67, R^2 = 0.63, P < 0.0001$)。粒径 $> 0.23\phi$ 的沉积物,随粒径增加,粒径频率曲线由极正偏变为正偏至近对称分布,反之,由近对称分布变为正偏或极正偏。类似研究已有相关报道,只不过分界点不同,譬如 1.72ϕ ^[21]、 1.73ϕ ^[19]、 1.75ϕ ^[22]、 2.6ϕ ^[20]等。平均粒径与峰态无明显关系,但有学者认为二者具有明显正相关关系^[20]。



注:横坐标的数字分别对应图2中截面对应的序号。

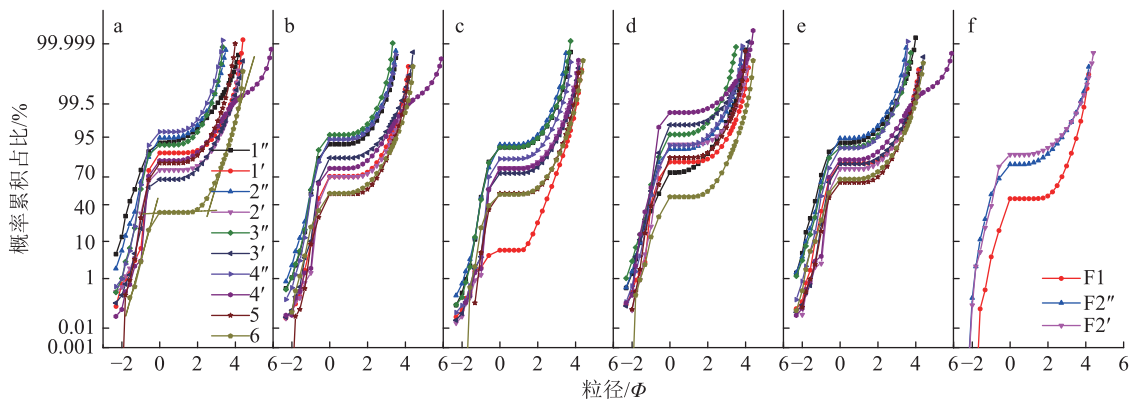
图4 新月形沙丘表面沉积物粒度参数

沙丘表面沉积物粒径在断面A和E为迎风坡脚最粗,沿迎风坡经丘顶/脊线至背风坡脚粒径逐渐变细;断面B、C、D为迎风坡坡上部或下部最粗,由此至迎/背风坡脚变细(图3)。5个断面的粒度特征变化无统一规律,根本原因是沙丘表面的“二次流”改变了气流运动模式,导致不同部位气流挟沙能力的变化,进而改变了沙丘表面蚀积格局^[23]。如:沙丘迎风坡上沙波纹在局部形成了次级迎/背风坡,使得其沉积物粒度发生变化^[24];其次,气流方向在不同断面不同,

中轴线气流方向垂直于沙丘脊线,经丘顶在背风侧产生涡流之后逐渐恢复,其他断面气流方向并不垂直于沙丘脊线,而是沿两翼向翼角方向发生偏转^[25],导致不同部位沉积物粒度不尽相同.沙丘表面沉积物粒径在不同断面的变化与已有研究中的丘顶最粗、丘顶最细以及无明显变化等不一致^[7-8,17,26-28],可能是塔克拉玛干沙漠东南缘沙物质来源的影响,以及已有研究集中于中轴线的原由.此外,断面 C 自迎风坡脚经脊线位置至背风坡脚分选逐渐变好,其余断面迎风坡中上部或丘顶/脊线分选最好、向两侧坡脚变差.

新月形沙丘表面沉积物概率累积曲线多为 3 段式,部分脊线位置的沙波纹波谷为 4 段式(图 5).其中,3 段式包括 1 个蠕移和 2 个跃移组分,4 段式则增

加了占比极小的悬移组分,2 个跃移组分的存在与区域风环境一致^[6,29].迎.迎风坡和丘顶/脊线以蠕移组分为主,占比为 66.48%~98.96%,与跃移组分截点为 $-0.54\sim 0.09\Phi$;跃移组分占比 1.04%~33.52%,2 个跃移组分截点为 1.82~2.88 Φ ;悬移组分占比 0.29%~0.60%,与跃移组与跃移组分截点为 3.90~4.05 Φ .背风坡大多以蠕移组分为主,占比 50.00%~85.11%,与跃移组分截点为 $-0.52\sim -0.34\Phi$;跃移组分占比 14.89%~50.00%.但是断面 A、D 背风坡脚以跃移组分为主,占比分别为 68.80%、52.46%,与蠕移组分截点分别为 -0.31 、 -0.33Φ .短翼角以跃移组分为主,占比 54.06%,蠕移-跃移组分截点为 -0.08Φ ;长翼角以蠕移组分为主,占比 83.60%,蠕移-跃移组分截点为 -0.50Φ .



注: 每条曲线数字分别对应图 2 中断面对应的序号.

图 5 新月形沙丘 A~E 纵断面、翼角 F 沉积物概率累积曲线

2.2 沙丘表面沉积物粒度特征对不同发育规模的响应

新月形沙丘表面沉积物粒径在不同规模沙丘存在明显差异(图 6).随沙丘高度增长,迎风坡和背风坡沉积物先变细后变粗、丘顶/脊线逐渐变粗、翼角粒径差异变大,而且粒径粗的短翼角变为长翼角.具体地,迎风坡变化顺序为 -0.53Φ 、 -0.30Φ 、 -0.49Φ ,背风坡变化顺序为 0.95Φ 、 1.15Φ 、 0.67Φ ,丘顶/脊线变化顺序为 -0.30Φ 、 -0.34Φ 、 -0.58Φ .沙丘左右两侧粒径差异变大,右侧(翼角较长一侧)粒径逐渐变粗,左侧(翼角较短一侧)先变细后变粗.分选性逐渐变好,左右两侧分选性差异变大,且分选较好的左侧过渡到右侧.迎风坡标准偏差变化顺序为 1.23、1.16、0.99,背风坡变化顺序为 1.87、1.72、1.74,丘顶/脊线变化顺序为 1.24、1.20、0.87.偏度值在迎风坡减小、背风坡先减小后增大、丘顶/脊线先增大后减小、翼角差异变大,迎风坡变化顺序为 0.55、0.48、0.49,背风坡变化顺序为 0.31、0.19、0.40,丘顶/脊线变化顺序为 0.64、0.68、0.56.中等高度沙丘左右两侧偏度值差异最大,最矮沙丘次之,最高沙丘最小.峰态值在迎风坡和丘

顶/脊线先减小后增大、背风坡逐渐增大,变化顺序分别为 2.43、1.86、3.04、2.23、2.20、3.60、0.72、0.75、1.06.峰态值最大的位置由迎风坡坡上部变为迎风坡脚,最小值不发生变化,均是背风坡脚.

沙丘表面沉积物优势粒级组与沙丘发育规模无明显关系,迎风坡主要为砾石和极粗沙,背风坡主要为极粗沙和细沙,较矮沙丘 I 短翼角以砾石和极粗沙为主、长翼角以极粗沙和细沙为主,与较高沙丘 II 和 III 相反(图 7).但是,沙丘大小对表面沉积物优势粒级的占比具有一定的影响.随沙丘高度增大,迎风坡沉积物中砾石和极粗沙占比先减少后增加,变化顺序为 81.81%、79.59%、84.71%;背风坡沉积物中极粗沙和细沙占比先增加后减少,变化顺序为 64.48%、67.42%、63.47%.其中:砾石占比最大的位置由较矮沙丘 I 迎风坡坡脚变为中等沙丘 II 的迎风坡下部,再变为高沙丘 III 迎风坡上部;极粗沙占比最大的位置从低矮沙丘 I 背风坡坡中到较高沙丘 II、III 丘顶/脊线,并向两侧坡脚逐渐减少;细沙占比最小的位置由较矮沙丘 I、II 迎风坡上部到高沙丘 III 丘顶/脊线,并向两

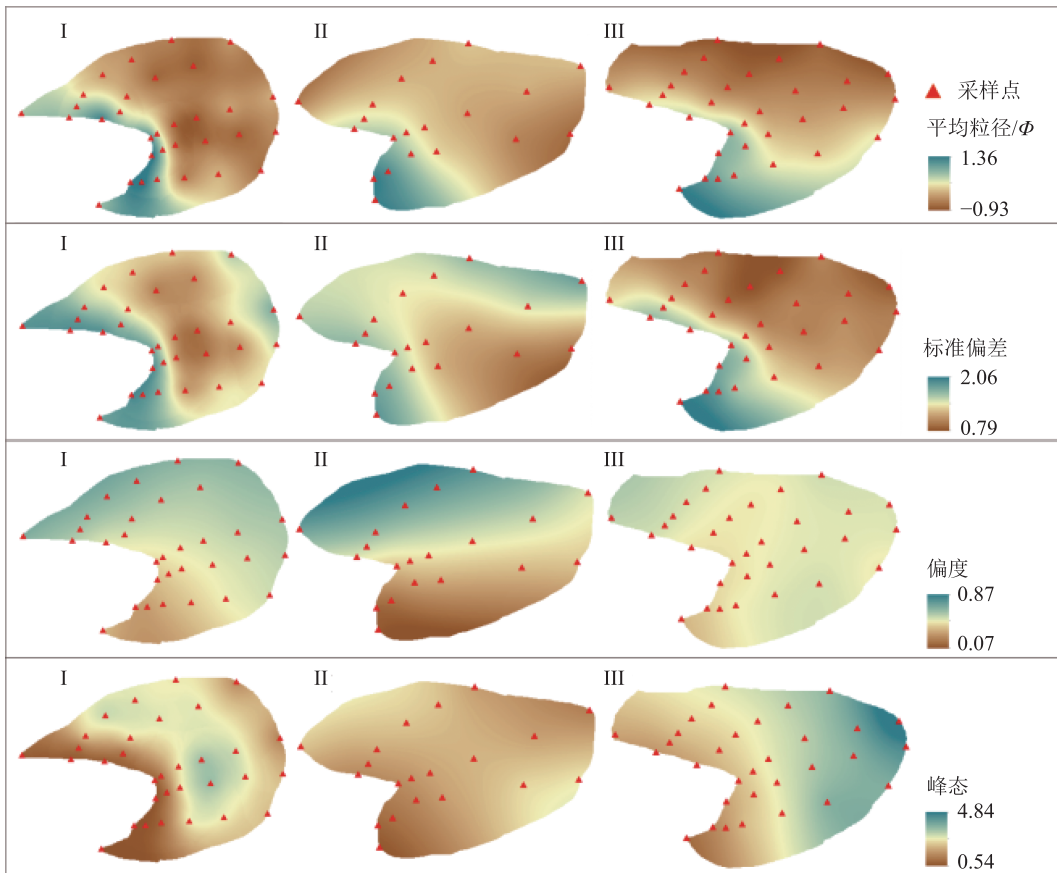


图6 不同规模新月形沙丘表面粒度参数插值

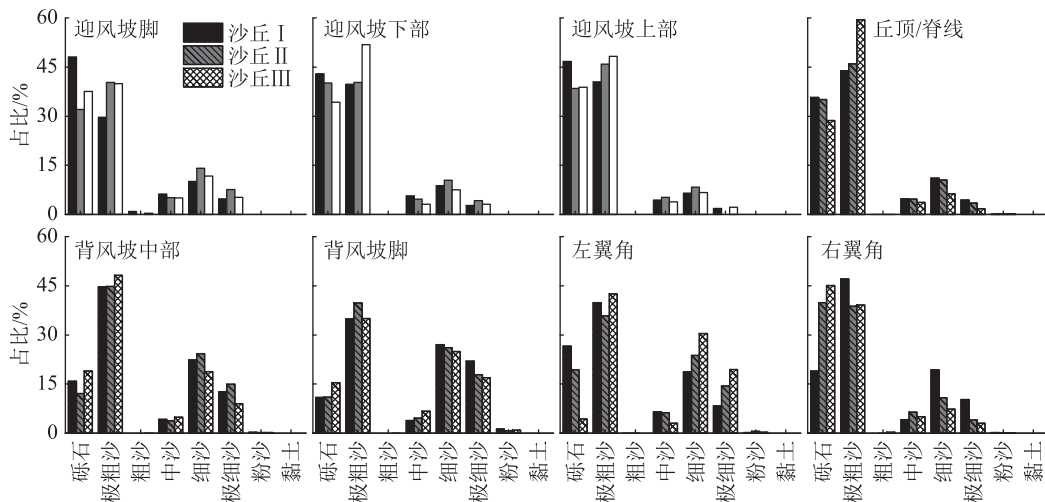


图7 不同规模新月形沙丘表面沉积物机械组成

侧坡脚逐渐增加。

不同发育规模新月形沙丘表面沉积物粒度参数的差异,实质是沙丘表面气流和风沙流结构在同一沙丘不同部位和不同形态参数沙丘表面变异的综合体现.气流流经沙丘时,在迎风坡脚气流速度降低^[25,30],而且随沙丘高度增加降低程度越大^[31],导致迎风坡脚风沙流挟沙能力发生深刻变化,进而影响沉积物粒度

和机械组成.随后,气流在迎风坡加速,而且随沙丘高度增加,气流加速越大^[32].低矮沙丘在弱风能环境下,加速后气流仍不能达到临界起动风速,中等沙丘在丘顶附近达到临界起动风速,高大沙丘在迎风坡中部甚至下部达到临界起动风速,这种不同规模沙丘表面达到沙粒临界起动风速的位置的不同^[33],以及高大沙丘迎风坡表面沙波纹导致不同规模沙丘迎风坡风

沙流挟沙能力的不同,改变了沉积物粒度特征.气流越过沙丘发生分离现象,以及背风侧反向涡旋的存在,使得气流经过一定距离后才重新附着^[34-35],而且随迎风坡坡度增加,气流重附距离先增大后减小^[36].因此不同形态规模沙丘背风侧沉积物机械组成和粒度特征存在明显的差异.

2.3 风向对沙丘表面沉积物粒度的影响 相对于区域主风向(NE),新月形沙丘表面沉积物在反风向(SW)气流作用下,粒度大小在沙丘不同部位变化趋势不同,迎风坡和背风坡脚变细、丘顶变粗,变化顺序分别为 -0.73ϕ 变为 -0.03ϕ 、 1.69ϕ 变为 1.84ϕ 、 -0.73ϕ 变为 -0.93ϕ ;分选性在迎风坡变差(由1.32变为1.73)、丘顶变好(由0.82变为0.56)、背风坡脚无明显变化(1.89变为1.88);偏度和峰态均变小,但沙丘不

同部位变化幅度存在差异,前者在迎风坡、丘顶、背风坡脚变化顺序分别为0.51变为0.38、0.54变为0.35、 -0.11 变为 -0.31 ,后者变化顺序依次为2.73变为1.61、3.19变为2.45、0.70变为0.61.不同规模沙丘表面沉积物粒度特征对风向改变的响应不同(表2),这种差异可能是沙丘形态和沙丘间相对位置与区域气流共同作用的结果.其中:平均粒径和分选性变化最大的部位是最高沙丘的迎风坡脚,变化最小的分别为低矮沙丘的丘顶和中等沙丘的背风坡脚;偏度变化最大的为低矮沙丘的迎风坡脚,由极正偏变为负偏,最小的为中等沙丘迎风坡上部,均是极正偏;峰态变化最大的为最高沙丘迎风坡脚,粒径频率曲线由单峰尖窄态变为双峰宽平态,最小为较小沙丘I和II的背风坡脚,主/反风向作用后均是双峰态.

表 2 主风向与反风向过程沙丘各部位粒度参数

沙丘编号	粒度参数	主风向(NE)					反风向(SW)				
		A1	A2	A3	A4	A6	A1	A2	A3	A4	A6
I	平均粒径/ ϕ	0.02	-0.10	-0.95	-0.79	1.56	1.02	0.66	-0.06	-0.84	1.87
	标准偏差/ ϕ	1.91	1.46	0.80	0.86	2.06	2.72	1.90	1.35	0.73	1.99
	偏度	0.53	0.71	0.44	0.58	-0.10	-0.20	0.58	0.70	0.46	-0.19
	峰态	0.98	2.80	3.26	2.46	0.63	0.78	0.69	2.43	2.94	0.61
II	平均粒径/ ϕ	0.20	0.24	-0.71	-0.76	1.49	-0.30	-0.94	-0.80	-0.94	1.96
	标准偏差/ ϕ	2.01	1.74	0.95	0.91	1.71	2.70	0.79	0.82	0.62	1.67
	偏度	0.37	0.59	0.49	0.56	-0.36	0.52	0.42	0.57	0.43	-0.58
	峰态	0.74	0.69	2.33	2.99	0.58	0.52	3.06	2.66	3.38	0.59
III	平均粒径/ ϕ	-1.01	-0.60	-0.43	-0.65	2.01	1.12	0.04	-1.02	-1.00	1.68
	标准偏差/ ϕ	0.74	1.06	1.16	0.71	1.90	3.06	1.49	0.73	0.34	1.97
	偏度	0.43	0.47	0.60	0.49	0.12	-0.23	0.64	0.40	0.17	-0.14
	峰态	9.47	2.65	1.67	4.13	0.90	0.56	0.85	2.90	1.03	0.62

采样部位: A1.迎风坡脚; A2.迎风坡下部; A3.迎风坡上部; A4.丘顶; A6.背风坡脚.

反风向作用后沙丘表面沉积物中砾石、极粗沙、细沙和极细沙占比变化明显,其余组分变化较小(表3).迎风坡脚沉积物中砾石、极粗沙占比减少,由65.12%~90.85%变为47.55%~59.29%,最高沙丘变化幅度最大、中等沙丘变化最小,细沙、极细沙占比增加,由6.43%~27.00%变为29.24%~42.96%,随沙丘高度增大,变化幅度增加.低矮沙丘I和最高沙丘III迎风坡下部砾石、极粗沙占比降低,由78.07%~85.56%变为55.30%~76.02%,细沙、极细沙占比增加,由11.17%~15.90%增加到18.07%~37.41%;中等沙丘II的中等沙丘II的变化正好相反,砾石、极粗沙占比明显增大,由67.49%变为89.00%,细沙、极细沙占比降低,由25.92%降到6.25%.较高沙丘II和III迎风坡上部砾

石、极粗沙占比增大,由79.90%~84.17%增大到87.78%~91.44%,细沙、极细沙占比降低,由10.46%~13.10%降低为5.16%~7.62%;低矮沙丘I正好相反,砾石、极粗沙占比由88.86%降低为80.23%,细沙、极细沙占比明显增多,由6.25%变为13.79%.丘顶砾石、极粗沙占比增多,由84.28%~90.03%变为88.13%~95.72%,细沙、极细沙占比降低,由6.20%~10.92%变为10.92%变为2.10%~7.60%,且变化幅度在中等沙丘表面最大、低矮沙丘表面最小.较矮沙丘I和II背风坡脚砾石、极粗沙占比由42.18%~45.74%降低为26.33%~28.64%,细沙、极细沙占比由49.01%~54.07%增加为68.18%~70.90%,而最高沙丘III正好相反,砾石、极粗沙占比由31.79%增加为36.46%,细沙、极细沙占

表3 主风向与反风向过程后沙丘各部位沉积物机械组成

沙丘编号	机械组成	主风向(NE)					反风向(SW)				
		A1	A2	A3	A4	A6	A1	A2	A3	A4	A6
I	砾石(>2 000 μm)	36.22	37.31	51.76	44.64	8.44	25.61	12.43	28.04	36.57	1.18
	极粗沙(>1 000~2 000 μm)	33.66	40.76	37.10	42.31	33.74	21.94	42.86	52.19	51.56	27.46
	粗沙(>500~1 000 μm)	1.42	0.01	0.20	0.02	<0.01	0.28	<0.01	0.01	0.01	<0.01
	中沙(>250~500 μm)	7.12	5.95	4.69	4.55	2.32	3.28	7.01	5.62	4.26	1.90
	细沙(>125~250 μm)	13.89	11.59	5.43	6.73	28.39	20.94	24.87	10.48	6.64	36.07
	极细沙(>62.5~125 μm)	7.38	4.31	0.82	1.71	25.68	22.02	12.54	3.31	0.97	32.11
	粉沙(>3.9~62.5 μm)	0.32	0.07	<0.01	0.03	1.43	5.41	0.28	0.35	<0.01	1.28
	黏土(≤3.9 μm)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.52	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
II	砾石(>2 000 μm)	29.74	27.47	39.04	39.61	8.25	51.56	49.33	42.19	45.22	3.35
	极粗沙(>1 000~2 000 μm)	35.39	40.02	45.13	44.67	37.49	7.73	39.67	45.59	48.39	22.98
	粗沙(>500~1 000 μm)	1.32	0.34	0.02	0.01	<0.01	2.10	0.16	0.01	0.01	<0.01
	中沙(>250~500 μm)	6.06	6.09	5.33	4.45	4.10	2.26	4.59	4.58	2.66	0.93
	细沙(>125~250 μm)	16.51	17.54	8.22	8.19	27.72	11.82	5.45	6.38	3.41	34.15
	极细沙(>62.5~125 μm)	10.48	8.38	2.24	2.73	21.29	17.42	0.80	1.24	0.32	36.75
	粉沙(>3.9~62.5 μm)	0.51	0.15	0.02	0.35	1.14	7.11	<0.01	<0.01	<0.01	1.83
	黏土(≤3.9 μm)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
III	砾石(>2 000 μm)	41.69	48.01	37.57	32.67	3.15	40.86	28.29	57.41	56.04	4.24
	极粗沙(>1 000~2000 μm)	49.16	37.55	42.33	57.36	28.65	7.29	47.73	34.02	39.67	32.22
	粗沙(>500~1 000 μm)	0.44	0.12	0.08	0.04	<0.01	1.49	<0.01	0.07	0.02	<0.01
	中沙(>250~500 μm)	2.21	3.07	6.80	3.53	3.08	0.56	5.88	3.29	2.16	3.29
	细沙(>125~250 μm)	4.26	7.77	10.15	4.91	33.04	11.68	13.60	4.22	2.07	31.96
	极细沙(>62.5~125 μm)	2.16	3.40	2.95	1.29	30.17	23.52	4.47	0.94	0.03	26.81
	粉沙(>3.9~62.5 μm)	0.07	0.07	0.11	0.20	1.91	13.56	0.02	0.05	<0.01	1.48
	黏土(≤3.9 μm)	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	1.04	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

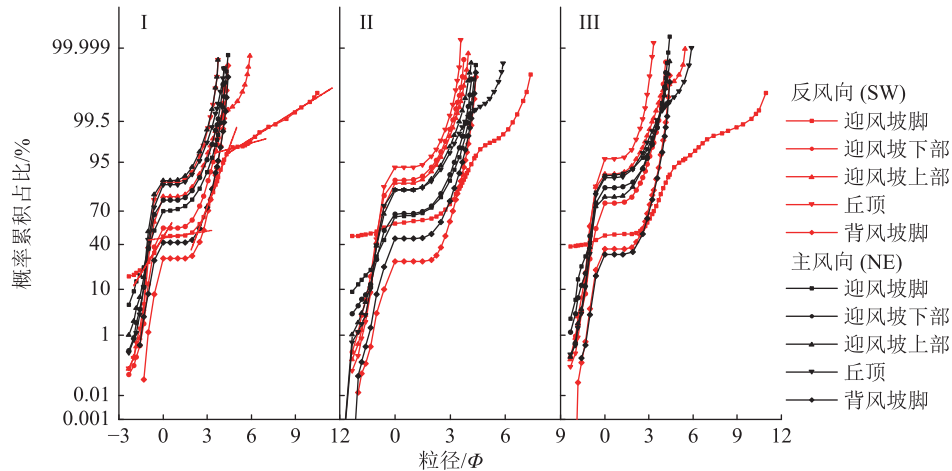
采样部位: A1.迎风坡脚; A2.迎风坡下部; A3.迎风坡上部; A4.丘顶; A6.背风坡脚。

比由 63.22% 降低到 58.76%。

在 2 种相反方向风作用下,沙丘表面沉积物概率累积曲线为 3~4 段式,3 段式包括 1 个蠕移组分和 2 个跃移组分,4 段式则增加了占比极小的悬移组分。由于反方向风作用时,迎风坡由主风向时的侵蚀为主变为堆积为主,所以坡脚和坡上部增加了少量的悬移质,由 3 段式变为 4 段式;而丘顶受到侵蚀导致悬移组分消失,由 4 段式变为 3 段式;其他部位段式不发生变化(图 8)。但是,风向变化没有改变概率累积曲线中的优势组分,反风向作用后迎风坡仍以蠕移组分为主,背风坡以跃移组分为主,仅各组分占比产生略微差异。迎风坡脚和坡下部蠕移组分占比由 65.20%~89.73% 降为 47.73%~88.26%,而跃移组分占比由 10.27%~34.80% 升到 11.74%~49.23%;迎风坡脚悬移组分所占比例为 1.91%~3.52%,与跃移组分截点为 4.30~6.31φ。

迎风坡上部和丘顶蠕移组分占比由 79.27%~89.86% 升到 79.74%~95.57%;跃移组分由 9.90%~20.73% 降为 4.43%~19.91%。背风坡脚蠕移组分由 31.59%~45.16% 降为 25.96%~36.19%;跃移组分由 54.84%~68.41% 升到 63.81%~74.04%。沙丘各采样位置中,迎风坡脚的蠕移-跃移组分截点变化最大,由主风向的 -0.24~0.35φ 变为反风向的 0.29~0.53φ,其他位置该截点大小无明显变化,由 -0.42~-0.19φ 变为 -0.45~-0.09φ。

在相反风向作用下,新月形沙丘表面沉积物的上述变化实际上是沙丘表面不同部位输沙率和蚀积特征发生了深刻变异。在区域反风向作用下,原背风坡处于侵蚀环境,由于地形阻滞作用,在背风坡脚相当一段距离气流速度逐渐降低,使得粗颗粒沉积、细颗粒继续迁移一段距离后逐渐沉积,坡脚处沉积物粒径变细;随后,气流沿坡加速,而丘顶附近坡度大且坡形



迎风坡均指东北坡, 背风坡均指西南坡。

图 8 反风向与主风向过程沙丘表面沉积物概率累积曲线

下凹, 侵蚀作用较强^[32,37], 跃移质和悬移质随气流被输送到原迎风坡下部及坡脚, 导致丘顶附近沉积物变粗。气流越过丘顶后, 由于原迎风坡尤其是丘顶附近坡度较缓^[38], 气流分离作用尚不明显, 侵蚀作用明显, 跃移和悬移组分减少, 蠕移组分相对增多, 使得地表沉积物变粗。随着坡度逐渐增加^[38], 气流分离增强, 细粒物质不断沉积使得粒径逐渐变细。这种沙丘表面沉积物在主风向和与之相反方向的风作用后发生变化的现象, 在已有研究中得到证实^[39]。沉积物、气流和形态作为一个系统, 三者之间相互作用、相互影响, 控制着沙丘的演变过程, 这在以往研究中讨论较少, 在今后的研究中需多加探讨。

3 结论

1) 塔克拉玛干沙漠东南缘新月形沙丘表面沉积物以砾石和极粗沙为主, 二者总占比 79.09%。平均粒径为 $-1.39 \sim 2.40\phi$, 标准偏差为 0.35~1.98, 偏度为 0.06~0.87, 峰态为 0.66~16.59。沙丘表面不同纵断面粒径分布模式有 3 种: 迎风坡脚最粗, 经丘顶/脊线至背风坡脚逐渐变细, 丘顶/脊线分选最好, 由此至迎/背风坡脚变差; 迎风坡坡上/下部粒径最粗, 由此分别至迎/背风坡脚逐渐变细, 分选迎风坡脚最好, 经丘顶/脊线至背风坡脚变差; 迎风坡坡上/下部粒径最粗, 由此分别至迎/背风坡脚逐渐变细, 分选丘顶/脊线最好, 由此至迎/背风坡脚变差。迎风坡、丘顶/脊线和背风坡中部表面沉积物以蠕移质为主, 其次为跃移质, 背风坡脚正相反。沙丘表面沉积物平均粒径与标准偏差线性正相关; 与偏度为二次多项式关系; 与峰态无明显关系。

2) 不同发育规模的沙丘表面沉积物粒度特征存在明显差异。随沙丘高度增加, 迎风坡和背风坡表面

沉积物先变细后变粗, 丘顶/脊线沉积物逐渐变粗, 但分选性均变好; 两翼角沉积物粒径差值不断增大, 沉积物粒径粗、分选好的短翼角变为长翼角。迎风坡和丘顶/脊线沉积物优势粒级砾石和极粗沙总占比先降低后升高, 变化顺序为 81.81%、79.59%、84.71%; 背风坡表面优势粒级极粗沙和细沙总占比先升高后降低, 变化顺序为 64.48%、67.42%、63.47%。

3) 2 种截然相反的风向改变了沙丘表面的蚀积过程, 造成沉积物粒度特征发生明显变化。相对于区域主风向 (NE), 反风向 (SW) 作用后, 迎风坡表面沉积物粒径变细、分选变差, 平均粒径为由主风向作用后 -0.37ϕ 变为反风向后 -0.03ϕ , 标准偏差由 1.32 变为 1.73; 丘顶沉积物变粗, 分选变好, 平均粒径由主风向作用后 -0.73ϕ 变为反风向后 -0.93ϕ , 标准偏差由 0.82 变为 0.56; 背风坡脚处沉积物粒径变细, 由主风向作用后 1.69ϕ 变为反风向作用后 1.84ϕ , 分选无明显变化。沙丘表面机械组成变化表现为迎风坡表面和背风坡脚细沙、极细沙和粉沙总占比增加, 砾石和极粗沙总占比减少; 丘顶部位变化正相反。

致谢 本文中涉及的野外样品采集工作得到河北师范大学张志栋、王培信、邢春燕硕士和北京师范大学杨智诚、孟小楠硕士的帮助, 室内筛分实验为王培信硕士完成, 在此深表感谢!

4 参考文献

- [1] BAGNOLD R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. London: Methuen, 1941
- [2] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 杨岩岩, 刘连友, 屈志强, 等. 新月形沙丘研究进展[J]. 地理科学, 2014, 34(1): 76
- [4] ABOLKHAIR Y M S. The statistical analysis of the sand

- grain size distribution of Al-Ubay-lah barchan dunes, Northwestern Ar-Rub-Alkhali desert, Saudi Arabia[J]. *GeoJournal*, 1986, 13(2): 103
- [5] 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
- [6] 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠84°E沿线沙物质的粒度特征[J]. *地理学报*, 1993, 48(1): 33
- [7] 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
- [8] 董玉祥, 马骏, 黄德全. 海岸新月形沙丘的表面粒度分异: 以河北昌黎黄金海岸为例[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(3): 15
- [9] 魏怀东, 王继和, 徐先英, 等. 库姆塔格沙漠各沙丘类型沙粒粒度分析[J]. *甘肃科技*, 2007, 23(5): 85
- [10] 凌裕泉. 塔克拉玛干沙漠的气候特征及其变化趋势[J]. *中国沙漠*, 1990, 10(2): 9
- [11] 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
- [12] CHENG H, LI H R, FANG Y, et al. Particle size characteristics of aeolian ripple crests and troughs[J]. *Sedimentology*, 2018, 65(6): 1859
- [13] 庄燕美, 哈斯, 岳兴玲. 风成沙纹的研究进展[J]. *干旱区地理*, 2006, 29(4): 490
- [14] ANDERSON R S, BUNAS K L. Grain size segregation and stratigraphy in aeolian ripples modelled with a cellular automaton[J]. *Nature*, 1993, 365(6448): 740
- [15] 哈斯, 王贵勇, 董光荣. 沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义[J]. *沉积学报*, 2001, 19(1): 96
- [16] JIA W R, ZHANG C L, LI S Y, et al. Grain size distribution at four developmental stages of crescent dunes in the hinterland of the Taklimakan Desert, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2016, 8(5): 722
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 田敏, 钱广强, 杨转玲, 等. 柴达木盆地东北部哈勒腾河流域风成沉积物粒度特征与空间差异[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 68
- [22] AHLBRANDT T. Comparison of textures and structures to distinguish eolian environments, Killpecker dunefield, Wyoming[J]. *Mountain Geologist*, 1975, 12(2): 61
- [23] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 横向沙丘背风侧沙粒风蚀起动的风洞模拟[J]. *干旱区地理*, 2007, 30(1): 66
- [24] 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
- [25] 赵景峰, 李崇舜, 周兴佳, 等. 新月形沙丘丘表流场与沙丘蚀积特征[J]. *中国沙漠*, 1993, 13(3): 18
- [26] 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
- [27] 陈新闯, 郭建英, 董智, 等. 绿洲边缘新月形沙丘表层沉积物粒度与重金属分布特征[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(11): 3662
- [28] 潘凯佳, 张正偲, 董治宝, 等. 河西走廊新月形沙丘表层沉积物的理化性质[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 44
- [29] 李振山, 陈广庭, 冯起, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地纵向沙垅表面沙物质粒度特征[J]. *干旱区资源与环境*, 1998, 12(1): 21
- [30] TSOAR H. Profiles analysis of sand dunes and their steady state signification[J]. *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 1985, 67(1/2): 47
- [31] 江丽娟, 马高生. 新月形沙丘表面流场的数值模拟[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(1): 48
- [32] 李恒鹏, 李波, 陈广庭. 新月形沙丘迎风坡气流加速模拟[J]. *中国沙漠*, 2001, 21(1): 24
- [33] 李超, 董治宝, 崔徐甲. 腾格里沙漠东南缘不同发育阶段横向沙丘粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 129
- [34] WALKER I J, NICKLING W G. Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dunes in a wind tunnel[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(10): 1111
- [35] FRANK A, KOCUREK G. Toward a model for airflow on the lee side of aeolian dunes[J]. *Sedimentology*, 1996, 43(3): 451
- [36] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 横向沙丘背风侧气流重附风洞模拟[J]. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 16
- [37] 张春来, 郝青振, 邹学勇, 等. 新月形沙丘迎风坡形态及沉积物对表面气流的响应[J]. *中国沙漠*, 1999, 19(4): 359
- [38] HESP P A, HASTINGS K. Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans[J]. *Geomorphology*, 1998, 22(2): 193
- [39] 常兆丰, 朱淑娟, 段晓峰, 等. 新月形沙丘粒度分布的交替过程: 以甘肃省河西沙区绿洲边缘积沙带为例[J]. *农业工程*, 2019, 9(4): 76

Developmental scale and wind direction influence particle size characteristics of surface sediments over barchan dunes at southeastern edge of the Taklimakan Desert

JIANG Ning LI Anqi ZHAO Xiaomeng CHENG Hong[†] LI Huiru KANG Liqiang

(Faculty of Geographical Science; State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology; Engineering Center of Desertification and Blown-Sand Control of Ministry of Education; Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract Particle size characteristics of surface sediments over Barchan dunes are the result of interactions of dune morphology, regional airflow and sand flux. These are also key parameters to understand dune morphology and dynamic formation. Particle size parameters of surface sediments over dunes were analyzed on three developing scales at southeastern edge of the Taklimakan Desert. Their changes with two opposite wind directions were also investigated. Gravel and very coarse sand were found to be the main components of surface sediments over dunes, accounting for 79.09% of total. Probability cumulative curves of sands were mostly composed of creep component, to a lesser extent of saltation component. Dune morphology and surface microgeomorphology resulted in three modes for grain size characteristics of sediments in different longitudinal axes over dune. First, sediments at the windward slope toe were the coarsest and gradually became finer along windward slope through crest/brink to leeward slope toe, while these in crest/brink had the best sorting and the sorting gradually became worse from the crest/brink to windward slope toe and lee slope toe. Second, sediments at the upper or lower windward slope were the coarsest and gradually became finer along windward slope to the toe and through crest/brink to lee slope toe, while the sorting on the crest/brink was better than other locations and gradually became worse along windward/lee slope to the toe. Third, grain size distributions were similar to the second, while the windward slope toe was the location with best sorting and the sorting gradually became worse along windward slope to the lee slope toe. With the increase in dune height, the sorting of sediments over dune surface became better, while their particle sizes took on different characteristics. Their particle sizes initially became finer and then coarser along windward and leeward slopes, while became coarser at crest/brink. Difference in particle sizes at two horns increased, short horn with the smaller particle size and better sorting converted to long one. Compared with action of airflow with main wind direction (NE), sediments along the windward slope and at the toe of lee slope became finer under action of airflow with wind direction of SW, while the former sorting became worse and the latter had no obvious change. The sediments at the crest became coarser and their sorting became better. The content of fine sand, very fine sand and silty sand along the windward slope and at the toe of lee slope increased, while the content of gravel and very coarse sand decreased. Changes in sediment composition at the crest were opposite to windward slope.

Keywords Taklimakan Desert; barchan dune; grain size characteristics; dune morphology; wind direction

【责任编辑:刘先勤】