



论文

库姆塔格沙漠羽毛状沙垄形态及其在分类系统中的位置

屈建军^①, 廖空太^{①②*}, 董光荣^①, 牛清河^①, 井哲帆^①, 韩庆杰^①^① 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;^② 甘肃省林业科学技术推广总站, 兰州 730046

* 联系人, E-mail: kongtail@163.com

收稿日期: 2010-10-25; 接受日期: 2011-03-07

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2007CB407203)、国家科技基础性工作专项(编号: 2006FY110800)、国家自然科学基金(批准号: 49971013)和甘肃省自然科学基金(批准号: 0710RJZH084)资助

摘要 我国库姆塔格沙漠东北部羽毛状沙垄的分布面积为 4016 km², 由新月形沙垄和垄间舌状沙丘构成. 新月形沙垄与舌状沙丘、舌状沙丘迎风坡与背风坡在粒度、矿物组成以及光照反射率的差异致成航空照片和卫星照片上的羽毛状景色. 对该区输沙势的测量结果表明, 羽毛状沙垄的起沙风可分为北北东、东和东北东三组, 与新月形沙垄的东南、西北和西南落沙坡大致对应. 研究认为, 由新月形沙丘顺主风向连接而成的新月形沙垄不是横向沙垄而是纵向沙垄; 舌状沙丘与近似沙丘形态明显有别, 是一种新的横向沙丘类型. 羽毛状沙垄, 按 McKee 的沙丘形态分类, 不属沙丘变型类型, 而是综合型或复杂型沙丘类型; 按吴正的沙丘形态与成因分类, 不属单向风或两个锐角相交风形成的沙垄或复合型沙垄, 而是三个锐角相交风形成的综合型沙垄.

关键词库姆塔格沙漠
羽毛状沙垄
舌状沙丘
形态特征
风沙地貌分类

库姆塔格沙漠(图 1)西北与罗布泊为邻, 东接甘肃敦煌市, 北抵天山山脉东段北山, 南至阿尔金山北麓, 地理坐标 89°57'49"~94°54'08"E, 39°07'50"~41°00'03"N, 面积约 23000 km²[1]. 沙漠主体覆盖于阿尔金山山前微倾斜的冲洪积平原上, 海拔高度 835~2500 m, 主要沙丘类型有新月形沙丘、新月形沙丘链、金字塔沙丘、羽毛状沙垄和复合型沙垄等[2], 其中以羽毛状沙垄最为独特.

20 世纪 60 年代, 库姆塔格沙漠还是我国风沙地貌研究的空白区. 20 世纪 70 年代初, 朱震达和吴正[3]从航空照片上发现该沙漠东北部存在羽毛状沙丘(垄). 20 世纪 80 年代特别是 2000 年以来, 包括本文

作者在内的我国学者对库姆塔格沙漠进行了多次考察与研究[4-16]. 其结果一致肯定该区新月形沙垄的存在, 但部分学者[11-14]并不赞成羽毛状沙垄的存在. 对库姆塔格沙漠是否存在羽毛状沙垄产生不同看法的主要原因在于遥感影像上显示的羽毛状图案的“羽毛”究竟是由沙垄之间起伏的一系列相互平行的沙埂所致, 还是由无明显高差的明暗相间的沉积物所致. 另外, 国外学者对撒哈拉、也门和西奈的羽毛状沙丘也曾做过报道[17,18], 有的学者还把具有许多分叉的线形沙丘命名为羽毛状沙丘, 并将其归入到沙丘变型类型[19]. 因此, 对羽毛状沙垄在库姆塔格沙漠存在与否、并对其形态和分类特征开展深入研究便显得十分必要.

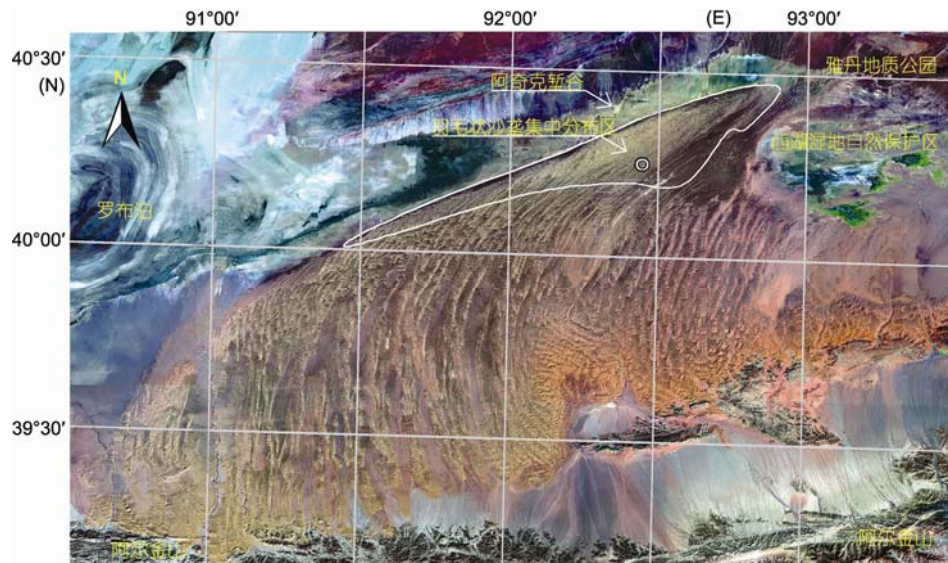


图 1 库姆塔格沙漠 TM 影像及羽毛状沙丘分布区

◎表示自动气象站位置

2004 年起, 作者陆续对库姆塔格沙漠的羽毛状沙丘进行了探讨^[5-8,10]. 近年来, 我们还通过对该区羽毛状沙丘的航空照片和卫星照片解译、实地调查测量(包括光谱测定、近地面风况观测、沙丘探槽观察)、粒度和矿物分析等工作, 确定了羽毛状沙丘的存在并据此撰写成本文.

1 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘的形态特征

库姆塔格沙漠羽毛状沙丘主要分布于 $91^{\circ}24'48''\sim 92^{\circ}48'32''\text{E}$, $40^{\circ}01'12''\sim 40^{\circ}27'48''\text{N}$, 海拔高度 850~1050 m. 其北和东北分别与阿奇克壅谷和雅丹国家地质公园相连, 东南和西南分别过渡为平沙地和多种类型的风沙地貌分布区(新月形沙丘链、纵向沙丘和沙山等), 面积 4016 km^2 , 占该沙漠总面积的 17.5% (见图 1). 从航空照片和卫星照片(图 2)上看, 东北-西南走向的亮色沙丘像羽管(或称羽轴^[20,21]), 沙丘之间明暗相间的起伏沙体像羽毛(或称羽枝^[20,21]). 因此, 按沙丘似物形态及其与风动力关系的命名原则, 将其称为羽毛状沙丘是合宜的.

库姆塔格沙漠羽毛状沙丘由新月形沙丘和垄间舌状沙丘组合而成. 新月形沙丘似羽管, 由一系列新月形沙丘顺主风向相连; 舌状沙丘似羽管两侧的羽毛, 是一系列垂直于主风向的舌状沙丘.

1.1 新月形沙丘

通过航空照片和卫星照片判读并结合实地调查发现, 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘分布区至少有 54 条明显的新月形沙丘, 他们几乎都有不同程度的弯曲或分叉. 在沙丘的西北侧, 往往有许多锯齿突状沙体(图 2). 通过选取的其中 35 条沙丘统计(图 3(a)~(d)), 沙丘为 $\text{NE}(43^{\circ}\sim 58^{\circ})\text{-SW}(223^{\circ}\sim 238^{\circ})$ 走向, 沙丘长 4~22 km (9~18 km 者占 72%), 沙丘宽 27~140 m (30~90 m 者占 74%); 沙丘宽是指组成沙丘的新月形沙丘翼角的水平距离, 沙丘高 3~19 m (10~16 m 者占 81%); 沙丘高是指新月形沙丘丘顶的相对高度, 沙丘纵轴线间距 87~1265 m (100~500 m 者占 73%). 根据低空动力伞和地面观察, 航空照片和卫星照片上显示的亮色沙丘实际为灰黄色, 沙丘西北侧锯齿突状沙体实际上是新月形沙丘的西北翼角, 而东南翼角与下风向的另一个新月形沙丘相连(图 4), 表明沙丘是由一系列新月形沙丘构成的. 根据全站仪对几个有代表性的新月形沙丘的测量结果, 这类沙丘纵轴线与沙丘纵轴线约呈 9° 夹角(图 5). 沙丘两翼不对称, 一般西北翼较长, 东南翼较短. 两翼间距 30~66 m (平均 51 m), 夹角 $44^{\circ}\sim 120^{\circ}$ (平均 80°). 沙丘腰部横断面也不对称, 东南侧(平均坡度为 24.8°)较西北侧(平均坡度为 23.3°)略陡. 沙丘迎风坡坡度最大为 18° , 其中 70%沙丘迎风坡度小于 15° , 背风坡坡度最小为 31.5° . 沙丘迎风

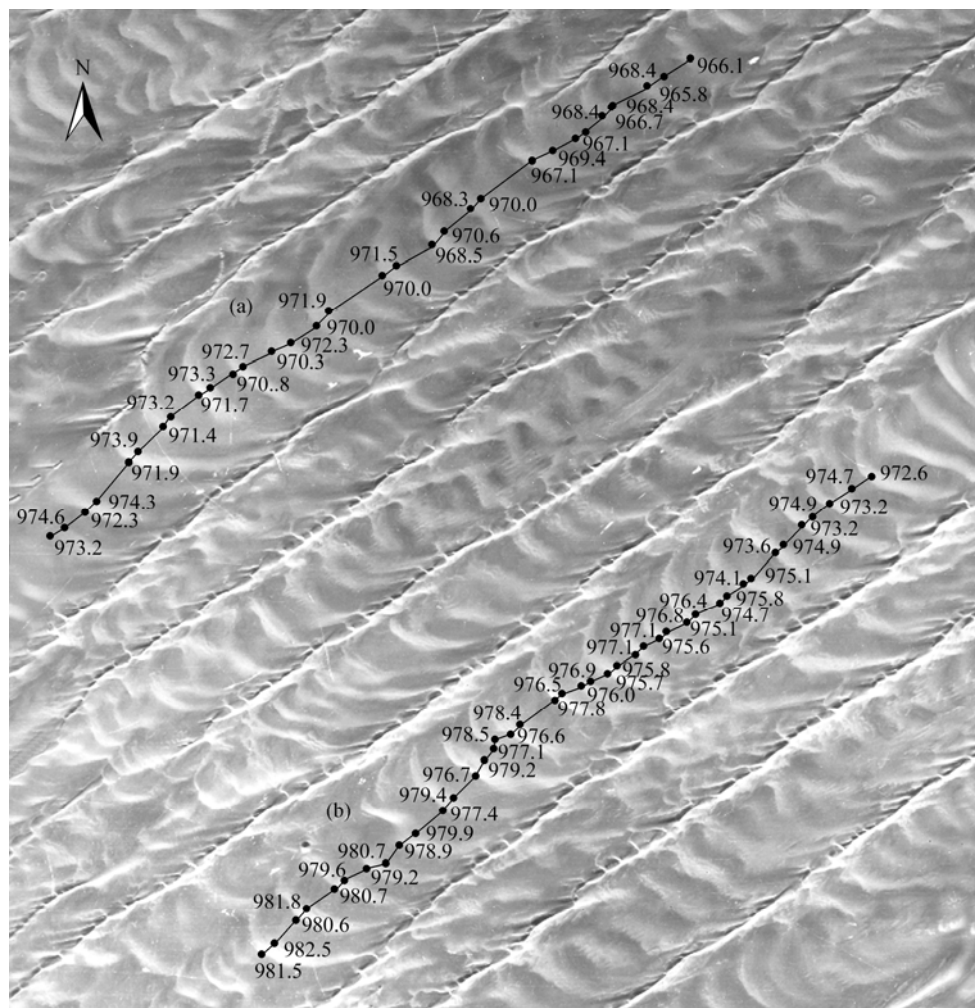


图2 羽毛状沙垄航摄像片^[10]

(a), (b)表示舌状沙丘纵断面测线, 中心点: 40°14'22.33"N, 92°25'12.67"E, 拍摄时间: 1972 年 10 月

坡长约为背风坡的 3~5 倍(表 1). 新月形沙垄的西南落沙坡在地貌形态上是清楚的(图 5), 西北落沙坡可以从沙垄探槽剖面看出(图 5, 6). 图 6 中, 板状交错纹层(倾角 6°~15°)具逆粒序结构, 纹层厚度变化小, 属北北东风作用下迎风坡的爬升波痕纹层; 低-高角度楔状交错层(13°~27°)与下伏、上覆界面相切, 属东风作用下背风坡气流分离区的渐变型交错纹层^[22,23]. 这两组倾向相反的交错层理为新月形沙丘西北坡同时存在落沙坡和迎风坡, 并随时间变化出现落沙坡和迎风坡的交替提供了证据. 由于该区北北东风输沙势最高, 沙丘形态上东南侧又陡于西北侧, 加之西北坡具有背风坡纹层结构, 由此可推断该沙丘东南坡同样具有落沙坡和迎风坡相互交替的过程.

1.2 舌状沙丘

有的学者认为, 库姆塔格沙漠羽毛状图案的“羽毛”是由垄间明暗相间的沉积物的反照率对比形成, 所谓的沙埂与周围地表并无明显高差, 进而认为明暗相间的沉积物的矿物组成才是羽毛状图案存在的主要原因^[11~14]. 作者发现, 垄间暗色粗沙床面上分布的浅色细沙沙片(厚度 2~7 cm, 宽 6~11 m, 间距 15~24 m), 一般在距新月形沙垄 12~15 m 的地方出现, 与沙垄呈 60°~105°夹角(图 7). 这种沙片不仅形态、规模和位置随风力变化而变化, 无明显规律, 而且不与新月形沙垄相连接. 因此, 能形成如图 2 所示的与沙垄相连、相互平行、定常有规律分布的羽毛状图案必然是另外一种较稳定的沙体.

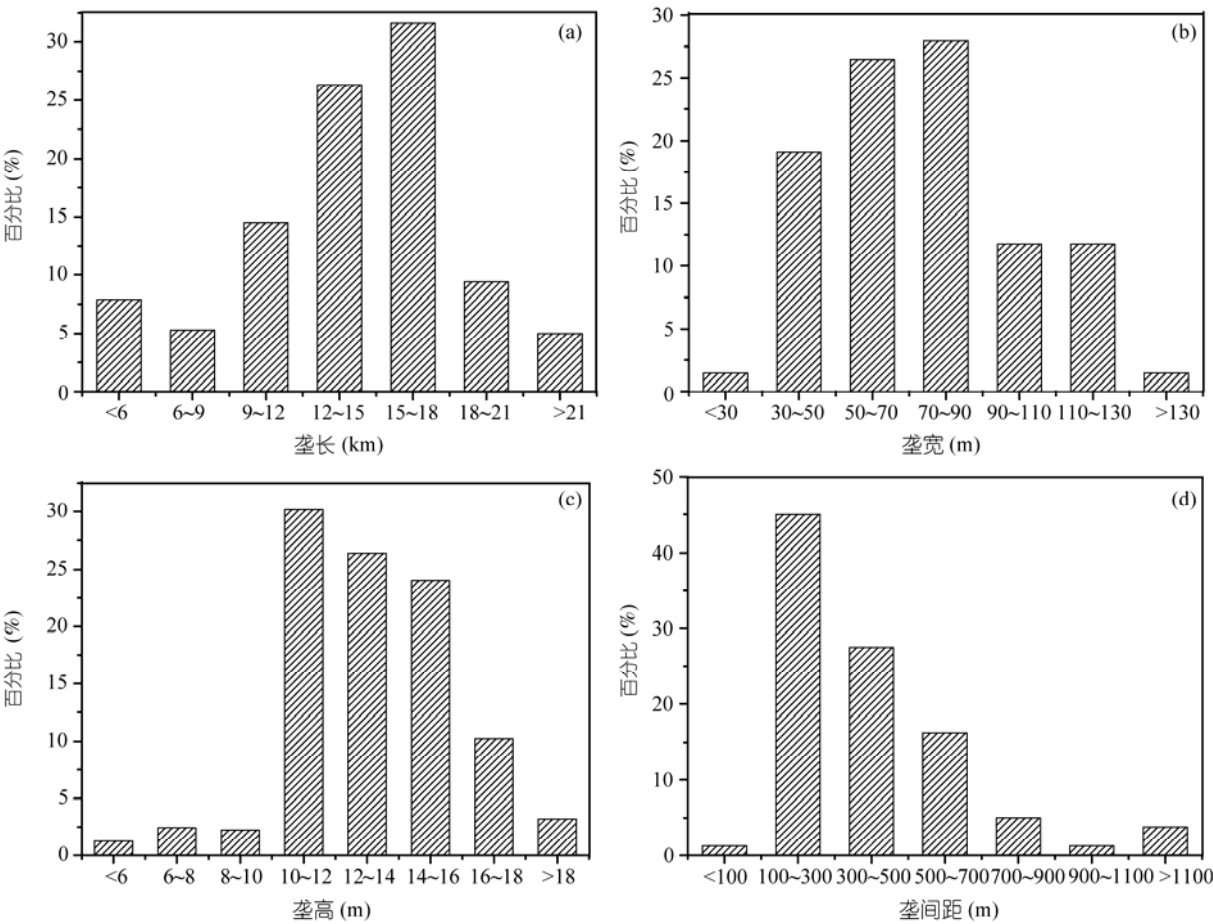


图 3 羽毛状沙垄参数测量统计图

表 1 组成新月形沙垄的新月形沙丘形态参数^[20]

位置	走向(°)	丘间距(m)	丘高(m)	背风坡		迎风坡		翼				备注
				坡长(m)	坡度(°)	坡长(m)	坡度(°)	间距(m)	夹角(°)	翼长(m)		
										E	W	
40°10'17"N 92°20'59"E	232	101	11.0	21	31.5	101	14.0	66	108	28	52	为同一沙垄的沙丘
40°11'39"N 92°16'27"E	238	58	4.4	18	33.5	58	6.0	30	90	14	27	
40°12'08"N 92°16'52"E	246	68	9.8	18	33.0	68	16.5	50	120	23	30	
40°18'46"N 92°27'50"E	240	60	3.8	7	33.0	60	10.5	56	56	42	44	为同一沙垄的沙丘
40°18'04"N 92°26'21"E	230	58	7.7	14	31.5	58	3.0	44	44	37	29	
40°17'15"N 92°24'44"E	223	88	11.1	21	32.0	88	2.5	60	60	35	51	

根据 1972 年航摄资料在数字摄影测量工作站系统(JX4)绘制的 1:10000 舌状沙丘纵断面图(见图 2, 8)并结合实地调查发现, 这种沙体就是垄间存在的一系列舌状沙丘. 其舌尖顺东北主风向朝西南突出, 两

翼逆主风向朝东北弯曲并与沙垄连接, 沙丘相互平行, 绝大多数互不连接, 不如沙垄具整体性. 沙丘翼宽 140~460 m (平均 261 m), 迎风坡平缓(2°~4°), 背风坡稍陡(6°~8°), 丘高 1.6~4.0 m, 间距 70~370 m

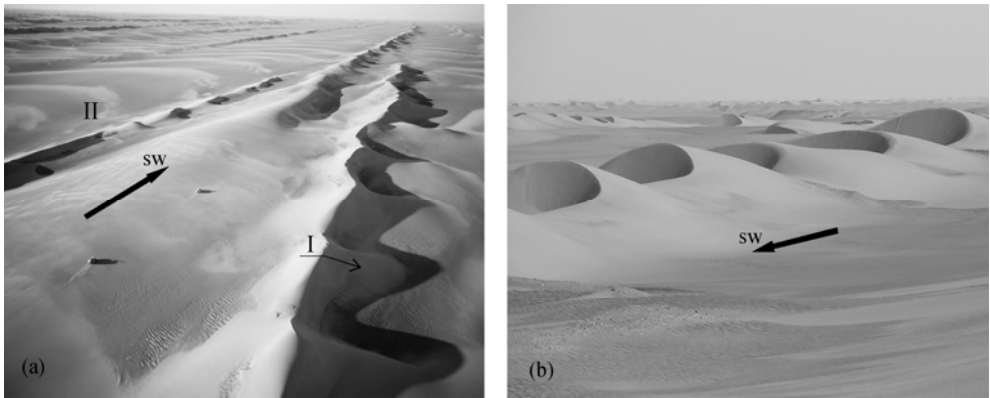


图 4 羽毛状沙垄低空和地面照片

(a) 羽毛状沙垄低空照片, 引自文献[10]. I 表示沙垄残留的新月形沙丘西北翼角, II 表示舌状沙丘. 位置: $40^{\circ}12'40.62''\text{N}$, $92^{\circ}06'25.98''\text{E}$, 拍摄高度 150 m, 拍摄时间 2006 年 10 月. (b) 羽毛状沙垄地面照片, 显示新月形沙丘东南翼角与下风向沙丘连接的情景. 位置: $40^{\circ}15'15.67''\text{N}$, $92^{\circ}19'20.92''\text{E}$, 拍摄时间 2005 年 9 月

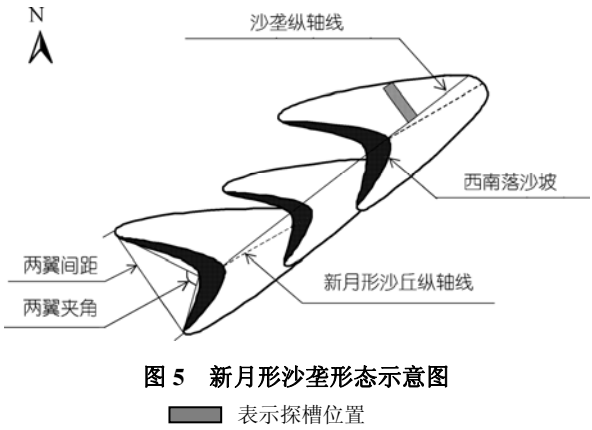


图 5 新月形沙垄形态示意图

表示探槽位置

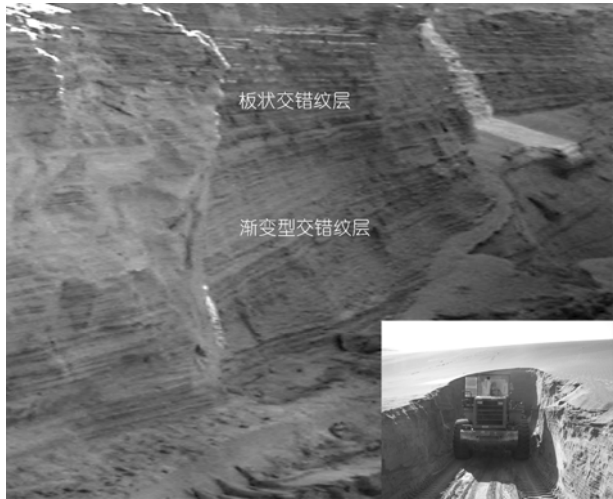


图 6 新月形沙垄西北坡沉积构造(剖面走向 $\text{N}42^{\circ}\text{W}$)

插入小图示新月形沙丘腰部横向探槽, 探槽长 25 m、宽 3 m、最高处深 5.8 m, 位置 $40^{\circ}14'40.65''\text{N}$, $92^{\circ}31'56.00''\text{E}$

(平均 170.4 m). 由于舌状沙丘高度小, 丘间距大, 无明显滑落面, 常常使进入该区的人们不易察觉它的存在.

有的学者虽然承认羽毛状沙垄的存在, 但认为羽毛状图案的“羽毛”是由暗色矿物和浅色矿物相间的波状微起伏地形(即“大沙波”)组成^[20,21]. 按照目前国际风成床面形态体系分级系统^[24], 空气动力沙波和碰撞沙波高度一般为 0.2~100 cm, 波长在 15~2000 cm 之间. 而舌状沙丘的高度和波长远大于空气动力沙波和碰撞沙波. 所以, 能造成遥感影像羽毛状视觉的垄间波状起伏地形不是“大沙波”, 应是舌状沙丘.

2 羽毛状沙垄的粒度、矿物组成和光照反射率

库姆塔格沙漠遥感影像上的羽毛状图案是由不同光照反射率决定的. 为了了解粒度、矿物、反射率及其与地形之间的关系, 我们在羽毛状沙垄的不同部位取沙样进行了相关的分析与测定.

2.1 粒度组成

在新月形沙垄西北坡、东南坡、垄顶和舌状沙丘迎风坡、背风坡和丘顶采集了表面沙样. 采样深度: 新月形沙垄 0~3 cm, 舌状沙丘 0~5 cm. 样品分析由中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室刘玉璋完成. 分析步骤: 先去除样品的有机物和碳酸盐, 然后用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪进行测定. 粒度参数按 Fork 和 Ward^[25]作图法计算. 由于该区

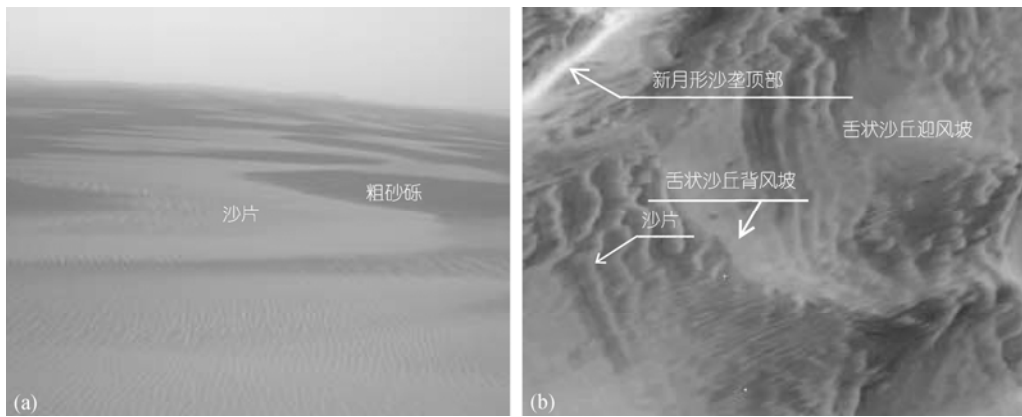


图 7 沙片地面照片和卫星影像

(a) 沙片地面照片, 位置: $40^{\circ}15'36.12''\text{N}$, $92^{\circ}31'18.50''\text{E}$, 拍摄时间 2006 年 10 月; (b) 与图(a)同位置的 Quickbird 卫星照片, 拍摄时间 2005 年 9 月

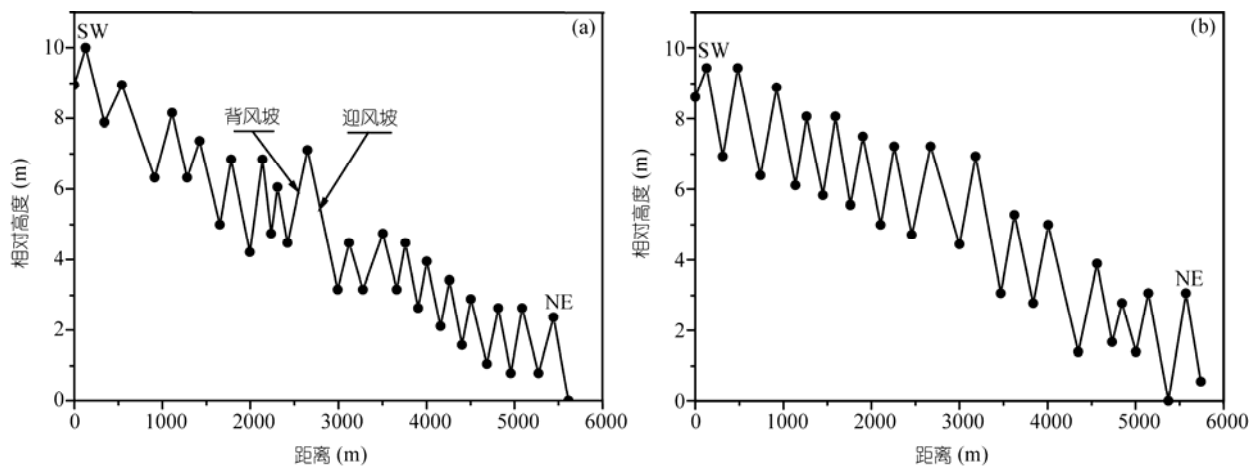


图 8 舌状沙丘纵断面高度变化

沙物质主要由碎屑矿物和岩屑组成, 在进行粒级划分时, 借鉴了中国黄土的基本分类方法^[26,27].

分析结果(表 2)表明, 新月形沙垄极粗沙-粗沙含量为 14.41%~40.94%, 中沙含量为 20.25%~34.21%, 细沙-极细沙含量为 37.97%~50.80%; 平均粒径在西北坡为 0.46 mm, 东南坡和垄顶分别为 0.31 和 0.30 mm; 标准偏差在沙垄两侧为 1.40 左右, 垄顶 0.95. 舌状沙丘极粗沙-粗沙含量 78.53%~87.57%, 中沙含量为 6.80%~15.72%, 细沙-极细沙含量为 4.41%~5.67%; 平均粒径在迎风坡为 0.83 mm, 丘顶和背风坡分别为 0.82, 0.66 mm; 标准偏差在丘顶为 0.55, 迎风坡和背风坡分别为 0.54, 0.53. 羽毛状沙垄表面的粒度变化表现出舌状沙丘粗于新月形沙垄、舌状沙丘迎风坡粗于背风坡, 以及沙垄分选较差至中等、舌状

沙丘分选较好的特点(据 Fork 和 Ward^[25]分级标准).

2.2 矿物组成

在新月形沙垄西北坡、东南坡、垄顶和舌状沙丘迎风坡、背风坡采集表面沙样进行矿物组分分析. 采样深度: 新月形沙垄 0~3 cm, 舌状沙丘 0~5 cm. 样品分析由河北省地质矿产局廊坊实验室李林庆完成. 测试粒径: 0.031~2mm; 仪器型号: D8 Advance 衍射仪; 选用参数: $\text{CuK}\alpha$ 辐射, 管压 40 kV, 管流 40 mA; 样品扫描角度: 3° ~ $45^{\circ}2\theta$, 步长 0.02° .

分析结果(表 3)表明, 新月形沙垄重矿物有 21 种, 其中, 角闪石、绿帘石、不透明矿物(磁铁矿、赤褐铁矿、钛铁矿)和阳起石含量占重矿物总量的 88.83%, 沙垄风成沙的重矿物组合为角闪石-绿帘石-不透明

表 2 羽毛状沙垄不同部位粒级含量与 M_z 和 σ 值^{a)}

取样部位		粒级百分含量(%)							平均粒径 M_z		标准离差 σ
		细砾	极粗砂	粗砂	中砂	细砂	极细砂	粗粉砂			
		4~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1	0.1~0.05	0.05~0.01	(ϕ)	(mm)	
沙垄	西北坡	0.00	18.47	22.47	20.27	28.66	9.31	0.82	1.13	0.46	1.37
	垄顶	0.00	0.09	14.32	34.21	40.67	10.13	0.57	1.75	0.30	0.95
	东南坡	0.00	5.32	24.62	20.25	29.54	18.12	2.17	1.68	0.31	1.43
舌状沙丘	迎风坡	0.24	31.56	56.01	7.79	3.90	0.51	0.00	0.27	0.83	0.54
	丘顶	0.57	28.99	57.97	6.80	3.80	1.87	0.00	0.29	0.82	0.55
	背风坡	0.13	10.73	67.80	15.72	5.13	0.49	0.00	0.61	0.66	0.53

a) 平均粒径 (M_z) = $(\sigma 16 + \sigma 50 + \sigma 84) / 3$; 标准离差 (σ) = $(\phi 84 - \phi 16) / 4 + (\phi 95 - \phi 5) / 6.6$; $\phi = -\log_2 d$, d 为直径(mm)^[28]. 不同粒级的粒径单位: mm

表 3 羽毛状沙垄的矿物成分(单位为重量百分比)^{a)}

矿物分类	矿物成分	取样位置					
		新月形沙垄			舌状沙丘		
		西北坡	垄顶	东南坡	迎风坡	背风坡	
暗色矿物	楣石	0.095	0.044	0.019	0.032	0.177	
	磁铁矿	0.406	0.122	0.041	0.343	0.471	
	赤褐铁矿	0.373	0.133	0.020	0.218	0.564	
	钛铁矿	0.113	0.060	0.027	0.532	1.154	
	电气石	0.012	0.001	0.001	0.001	0.006	
	金红石	0.005	0.002	0.000	0.003	0.007	
	角闪石	3.025	0.299	0.856	0.620	0.876	
	白钛石	0.033	0.007	0.001	0.013	0.014	
	绿帘石	0.831	0.565	0.156	0.668	1.867	
	阳起石	0.936	0.131	0.022	0.000	0.000	
	普通辉石	0.007	0.001	0.000	0.000	0.000	
	黄铁矿	0.000	0.000	△	0.000	0.000	
	锐钛矿	0.000	+	+	0.000	0.000	
	黝帘石	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	
	黑云母	0.000	0.000	0.000	0.001	0.008	
	蚀变矿物	24.711	16.923	8.436	0.000	0.000	
	岩屑	1.552	3.647	12.216	44.036	38.870	
	碳酸盐	0.000	0.000	0.000	1.518	1.646	
浅色矿物	合计	32.10	21.97	21.80	47.99	45.66	
	锆石	0.040	0.012	0.003	0.026	0.034	
	磷灰石	0.064	0.002	0.003	0.006	0.004	
	透闪石	0.259	0.009	0.008	0.007	0.040	
	石榴石	0.275	0.053	0.029	0.095	0.231	
	重晶石	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	
	透辉石	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
	蓝晶石	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	
	石英	40.840	51.321	50.930	28.156	31.210	
	长石	22.926	26.635	25.850	0.000	0.000	
	钾长石	0.000	0.000	0.000	3.598	3.540	
	斜长石	0.000	0.000	0.000	20.130	19.284	
	方解石	3.497	0.000	1.383	0.000	0.000	
	合计	67.90	78.03	78.20	52.01	54.34	

a) +表示 5~10 粒; △表示 21~50 粒

矿物-阳起石; 舌状沙丘重矿物有 15 种, 其中, 不透明矿物、绿帘石和角闪石含量占重矿物总量的 91.21%, 舌状沙丘风成沙的重矿物组合为不透明矿物-绿帘石-角闪石. 暗色矿物含量分布: 舌状沙丘 (45.66%~47.99%) 高于新月形沙垄 (21.80%~32.1%); 舌状沙丘迎风坡 (47.99%) 高于背风坡 (45.66%); 新月形沙垄西北坡 (32.10%) 高于垄顶和东南坡 (21.9% 左右). 可见, 新月形沙垄与舌状沙丘之间、舌状沙丘迎风坡与背风坡之间、新月形沙垄垄顶与两侧之间具有明显的色泽反差.

2.3 光照反射率

根据 FieldSpec Pro 型高光谱数据采集仪对舌状沙丘的测定结果 (图 9), 舌状沙丘的光照反射率背风坡 (8.00%~25.25%, 平均 20.20%) 高于迎风坡 (7.60%~21.20%, 平均 17.10%), 其中, 在波长 600~1050 nm 范围内尤为显著, 背风坡光照反射率为迎风坡的 1.2 倍. 这显然是由于迎风坡沙粒较粗、暗色矿物富集、对可见光的吸收作用高于背风坡引起的.

由于舌状沙丘的暗色矿物含量和平均粒径高于新月形沙垄, 由此推断沙垄比垄间具有更高的光照反射率. 根据光谱测量结果, 沙垄的光照反射率约为垄间的 2 倍^[13], 这为航空照片和卫星照片上沙垄和垄间舌状沙丘背风坡显示亮白色、垄间地和舌状沙丘迎风坡显示暗灰色提供了依据 (见图 2). 至于舌状沙丘迎风面出现的白色条带和斑块 (见图 7(b)), 其实是浮于粗沙表面上的主要由细沙组成的沙片.

可见, 羽毛状沙垄不仅具有独特的新月形沙垄

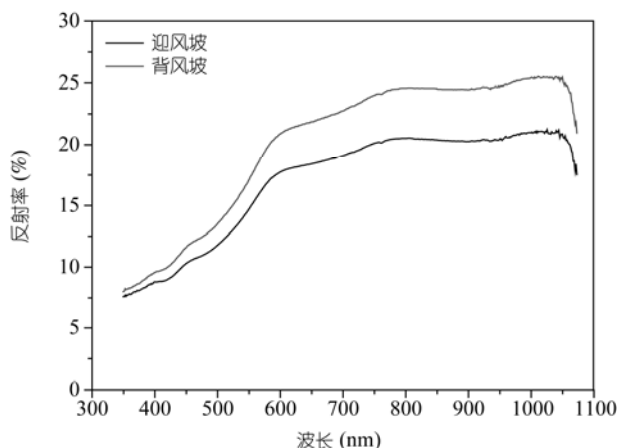


图 9 舌状沙丘不同部位光照反射率

与舌状沙丘的组合形态, 而且其不同部位的粒度、矿物和光照反射率也有明显差异: 新月形沙垄-细颗粒多-浅色矿物富集-反射率高-显亮白色, 垄间地-粗颗粒多-暗色矿物富集-反射率低-显暗灰色; 舌状沙丘背风坡-细颗粒多-浅色矿物富集-反射率高-显亮白色, 舌状沙丘迎风坡-粗颗粒多-暗色矿物富集-反射率低-显暗灰色. 正是羽毛状沙垄各部位粒度、矿物组成不同所引起的光照反射率的差异, 才使得其在航空照片和卫星照片上呈现羽毛状景色.

3 羽毛状沙垄起沙风况

根据羽毛状沙垄区自动气象站 (Huatron CAWS 600 标准型, 位置见图 1) 采集的数据, 应用 Fryberger 公式^[29] $DP = V^2 \times (V - V_t) \times t$ (DP 为输沙势, V 为风速; V_t 为起动风速; t 为起沙风时间数) 计算得出 (图 10): 羽毛状沙垄区年均输沙势为 422, 属高风能环境; 年均方向变率指数 (RDP/DP) 为 0.5, 属中比率; 合成输沙方向 (RDD) 为 213° , 与沙垄走向呈 $10^\circ \sim 25^\circ$ 夹角. 从方向变率指数看, 羽毛状沙垄区起沙风况应为锐双峰, 但由于该区新月形沙垄具备 3 个落沙坡, 用两个斜交风解释其动力因素显然不够. 根据 16 方位输沙势及其与沙垄落沙坡的关系, 羽毛状沙垄的起沙风可分为三组: 北北东风, 与沙垄西北侧正向斜交, 其输沙势占总输沙势的 25.3%; 东北东风, 与沙垄大

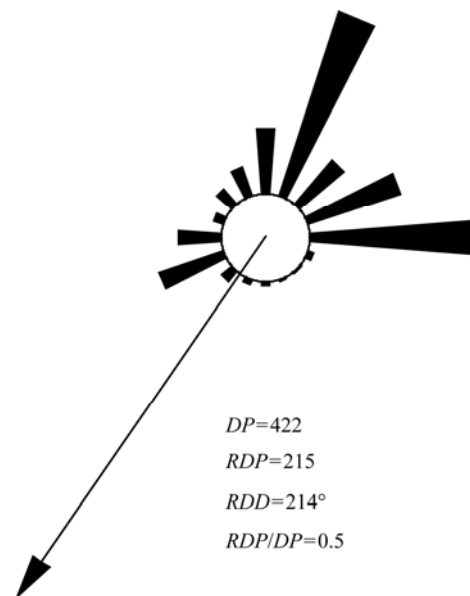


图 10 羽毛状沙垄年均输沙势玫瑰图 (2006~2008 年)

致平行, 占总输沙势的 12.7%; 东风, 与沙垄东南侧正向斜交, 占总输沙势的 21.2%. 三组风的输沙势占总输沙势的 59.2%, 且分别对应于新月形沙垄的东南、西南和西北 3 个落沙坡. 因此, 这三组风是羽毛状沙垄形成发育的主要动力条件.

4 羽毛状沙垄与相近沙丘类型的形态比较

新月形沙垄间存在的类似于圆舌状的沙丘是羽毛状沙垄的独具特色之处(图 2, 11). 其与新月形沙丘、抛物线沙丘及反向沙丘固然有相似之处, 但在翼角的延伸方向、背风坡方位及形成条件等方面却有显著不同: 新月形沙丘的两翼指向下风方向, 迎风坡凸出背风坡凹进, 而舌状沙丘两翼则指向上风向, 迎风坡凹进背风坡凸出; 抛物线沙丘的翼角指向、迎风坡和背风坡凹凸方向与舌状沙丘基本一致, 但前者是受植被控制下形成的沙丘形态, 后者则是无植被影响下的流动沙丘; 反向沙丘是在近乎相反的两个方向的起沙风作用下形成, 有两个背风坡, 而舌状沙丘由于垄间“狭管效应”, 是在相近风向下形成的, 只有一个背风坡. 由于舌状沙丘与这几种相似沙丘类型之间的差别, 加之又具有充分发育的迎风坡和背风坡, 使其高度明显大于一般的沙波、沙片和沙堆, 故作者将垄间羽状沙体命名为舌状沙丘. 舌状沙丘

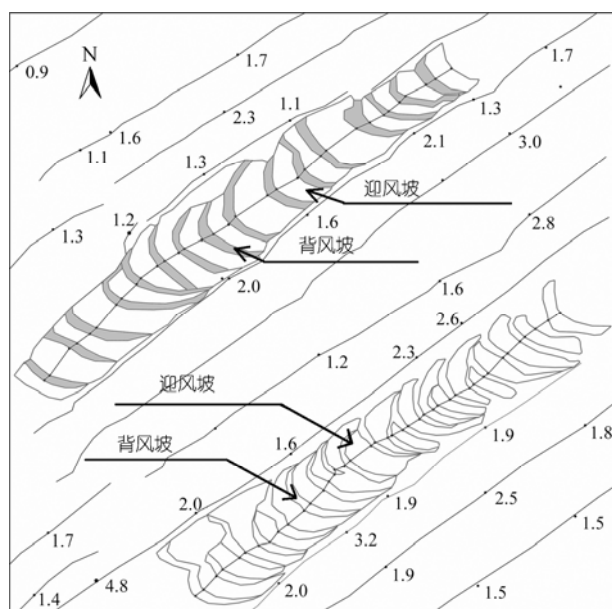


图 11 舌状沙丘平面形态

图中数字示相对高度

虽平行排列并沿下风向呈条带状延伸, 但由于绝大多数互不连接, 故不该是舌状沙丘组成的纵向沙垄, 应是一种新的横向沙丘类型.

羽毛状沙垄的羽管是由新月形沙丘连接而成, 前苏联和国内学者称之为新月形沙垄, 而在撒哈拉地区被称之为赛夫沙丘^[30]. McKee^[19]在进行沙丘分类时, 将与主风向垂直的、弯曲的新月形沙垄和近乎直线平行的新月形沙垄都称为新月形沙垄. 事实上, 这两种沙垄都是新月形沙丘垂直于主风向连接而成的横向沙垄, 此释义显然不符库姆塔格沙漠新月形沙垄的特征. 组成库姆塔格沙漠新月形沙垄的新月形沙丘虽然是横向的, 但它却是在顺着而不是横着主风向连接而成. 据此, 作者赞同将库姆塔格沙漠羽毛状沙垄的羽管称为新月形沙垄(或赛夫沙丘), 但它是纵向沙垄而非横向沙垄.

虽然撒哈拉、也门和西奈沙漠的羽毛沙垄或沙丘(高大沙垄两侧的基座上, 附生一系列与其交叉或斜交的呈雁列状排列的有星状丘峰的沙丘或其他沙垄、沙丘链等次生沙丘^[17,18])与库姆塔格沙漠的羽毛沙垄(新月形沙垄和垄间舌状沙丘与之斜交形成的组合体)有所不同, 但都具有羽毛图案, 为了与一般的新月形沙垄和其他沙垄相区别, 作者倾向于将分布于这些区域的这种特殊的沙丘类型命名为羽毛状沙垄. 而 McKee^[19]提到的“一端具有许多分叉的线性沙丘”, 因为不具羽毛状图案, 应不属于羽毛状沙丘.

5 羽毛状沙垄在风沙地貌分类系统中的位置

McKee^[19]根据沙丘形态、落沙坡位置和数量将沙丘分为基本沙丘类型(basic dune types)、综合沙丘类型(compound dune types)、复合沙丘类型(complex dune types)和沙丘变型(varieties of dunes) 4 种类型, 羽毛状沙丘被归入沙丘变型. 库姆塔格沙漠羽毛状沙垄是由纵向新月形沙垄与横向舌状沙丘相连而成的, 按照 McKee 的定义, 它应归入综合型沙丘类型. 吴正根据形态-成因原则提出了我国沙漠沙丘的三级分类系统^[31]. 首先按沙丘形态和风况之间的关系将沙丘分为横向沙丘、纵向沙丘和多风向作用下的沙丘三大基本类型. 其次, 按沙丘固定程度又将每种基本类型划分为裸露(流动)的和具有植被覆盖(固定和半固定)的两个亚类. 同时根据沙丘形态对每个亚类又

作了细分. 在这三级分类系统中, 纵向沙丘包括由两个锐角相交风作用形成的新月形沙垄和单一风向形成的沙垄和复合型沙垄, 羽毛状沙垄被划入沙垄和复合型沙垄类型. 鉴于库姆塔格沙漠的羽毛状沙垄是由三个锐角相交风作用形成的两种沙丘类型构成

的地貌形态, 作者建议将其归入第一级为纵向沙丘、第二级为流动沙丘、第三级为三个锐角相交风形成的综合型或复杂型沙丘类型, 与由两个锐角相交风作用形成的新月形沙垄以及由单一方向风形成的沙垄和复合型沙垄并列.

致谢 本文最后定稿得益于匿名审稿人严肃、认真、细致的审查和提出的建设性意见及建议, 作者在此深表感谢.

参考文献

- 1 屈建军, 魏文寿, 王雪芹. 干旱荒漠地区的沙漠与沙漠化土地. 见: 王涛, 主编. 中国沙漠与沙漠化. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003. 640–698
- 2 吴正. 各种沙丘的形态特征和分布. 见: 吴正, 主编. 中国沙漠及其治理. 北京: 科学出版社, 2009. 120–133
- 3 朱震达, 吴正. 中国沙漠概论. 北京: 科学出版社, 1974. 20–23
- 4 夏训诚. 库姆塔格沙漠的基本特征. 见: 夏训诚, 主编. 罗布泊科学考察与研究. 北京: 科学出版社, 1987. 78–88
- 5 屈建军, 郑本兴, 俞祁浩, 等. 罗布泊东阿奇克谷地雅丹地貌与库姆塔格沙漠形成的关系. 中国沙漠, 2004, 24: 294–300
- 6 屈建军. 库姆塔格沙漠图 (1:500000). 北京: 中国地图出版社, 2004
- 7 屈建军. 库姆塔格沙漠图(说明书). 北京: 中国地图出版社, 2004
- 8 屈建军, 左国朝, 张克存, 等. 库姆塔格沙漠形成演化与区域新构造运动关系研究. 干旱区地理, 2005, 28: 424–428
- 9 王继和, 廖空太, 俄有浩, 等. 库姆塔格沙漠综合科学考察的初步结果. 甘肃科技, 2005, 21: 6–8
- 10 屈建军, 廖空太, 俎瑞平, 等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙垄形成机理研究. 中国沙漠, 2007, 27: 349–355
- 11 董治宝, 屈建军. 库姆塔格沙漠地貌图. 北京: 科学出版社, 2008
- 12 董治宝, 屈建军. 库姆塔格沙漠地貌图(说明书). 北京: 科学出版社, 2008. 42–43
- 13 董治宝, 屈建军, 卢琦, 等. 关于库姆塔格沙漠“羽毛状”风沙地貌的讨论. 中国沙漠, 2008, 28: 1005–1010
- 14 Dong Z B, Qu J J, Wang X M, et al. Pseudo-feathery dunes in the Kumtagh Desert. *Geomorphology*, 2008, 100: 328–334
- 15 廖空太, 刘虎俊. 羽毛状沙垄的形态与风沙运动. 见: 王继和, 主编. 库姆塔格沙漠综合科学考察. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 2008. 114–137
- 16 董治宝. 羽毛状沙丘辨析. 科技导报, 2009, 27: 69–75
- 17 Breed C S, Grow T. Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing. In: McKee E D, ed. *A Study of Global Sand Seas*. Hawaii: University Press of Pacific, 2004. 253–302
- 18 Tosar H, Moller J T. The role of vegetation in the formation of linear sand dunes. In: Nickling W G, ed. *Aeolian Geomorphology*. Boston: Allen & Unwin, 1986. 75–95
- 19 McKee E D. Introduction to a study of global sand seas. In: McKee E D, ed. *A Study of Global Sand Seas*. Hawaii: University Press of Pacific, 2004. 1–18
- 20 刘虎俊, 王继和, 廖空太, 等. 库姆塔格沙漠“羽毛状沙丘”形态的示量特征. 干旱区地理, 2006, 29: 314–320
- 21 俄有浩, 苏志珠, 王继和, 等. 库姆塔格沙漠综合科学考察成果初报. 中国沙漠, 2006, 26: 693–697
- 22 哈斯, 董光荣, 王贵勇. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘形态-动力学研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1999, 29: 466–471
- 23 哈斯, 王贵勇, 董光荣. 沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义. 沉积学报, 2001, 19: 96–100
- 24 Cooke R U, Warren A. *Geomorphology in Desert*. London: Batsford B T Ltd., 1973. 374
- 25 Fork R L, Ward W C. Brazosriverbar: A studying the significance of grainsize parameters. *J Sediment Petrol*, 1957, 27: 3–26
- 26 刘东生, 等. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985. 191–208
- 27 张宇红, 李保生, 靳鹤龄, 等. 萨拉乌苏河流域 150 ka BP 以来的粒度旋回. 地理学报, 2001, 56: 332–344
- 28 任明达. 沉积结构. 见: 任明达, 王乃梁, 编. 现代沉积环境概论. 北京: 科学出版社, 1981. 8–36
- 29 Fryberger S G. Dune form and wind regime. *US Geol Survey Prof Paper*, 1979, 1052: 137–169
- 30 李治中. 线形沙丘研究进展综述. 干旱区地理, 1995, 18: 87–93
- 31 吴正, 等. 风沙地貌与治沙工程学. 北京: 科学出版社, 2003. 120–125