

刘倩倩, 杨小平. 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 158-168.

毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因

刘倩倩¹, 杨小平²

(1. 复旦大学 历史地理研究中心, 上海 200433; 2. 浙江大学 地球科学学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 分析了毛乌素沙地东部、西部和库布齐沙漠现代风成沙样品的粒度组成。结果显示: 毛乌素沙地东部和西部风成沙粒度特征具有显著差异, 西部风成沙粒度较小、分选较好; 库布齐沙漠风成沙粒度特征与毛乌素沙地西部相似; 沙源碎屑物质的机械组成是影响毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度特征的主要因素; 就地起沙是毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙的重要来源, 且其贡献比例具有区域差异性; 受复杂沙源和风力-河流混合搬运方式的影响, 平均粒径(M_z)和分选系数(σ)并没有呈现出显著的与盛行风向一致的空间变化规律。

关键词: 地貌学; 沙丘; 粒度参数; 空间分析

文章编号: 1000-694X(2020)05-158-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00088

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风沙沉积是地球表面重要的沉积类型, 约占全球陆地面积的6%^[1]。沙漠和沙地是干旱半干旱地区常见的风沙沉积类型^[2-5], 在中国北部和西北地区广泛分布^[2]。粒度组成是风成沉积物重要的沉积特征, 能够反映沉积物的搬运-沉积过程和沉积环境^[6], 是沙漠研究的重要内容, 对风成沙的沙源也有一定的指示意义^[7-9]。前人针对中国塔克拉玛干沙漠^[7, 10-12]、库姆塔格沙漠^[8-9, 13-14]、巴丹吉林沙漠^[15-16]、古尔班通古特沙漠^[17]、毛乌素沙地^[18-20]等主要沙漠、沙地和特定类型沙丘表面风成沙^[21-24]的粒度组成特征及主要影响因素开展了大量的研究工作。

毛乌素沙地和库布齐沙漠位于农牧交错地带, 是中国干旱半干旱地区古气候、古环境和地貌研究的重要区域。20世纪80年代以来, 围绕毛乌素沙地风成沙的粒度特征问题, 多位研究者从不同角度进行了研究。哈斯等^[25]和刘海霞等^[26]分别对毛乌素沙地南缘横向沙丘和西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度特征进行了研究, 哈斯等^[25]认为采样时间是影响沙丘表面沉积物粒度特征的重要因素。李智佩

等^[27]对毛乌素沙地东南部边缘不同地质成因类型土地沙漠化粒度特征进行了研究, 认为研究区沙漠化物质主要为就地起沙, 主要搬运营力为河流, 并在风力的作用下进一步分选和再沉积。李占宏等^[28]、舒培仙等^[19]均对毛乌素沙地地表风成沙的粒度组成特征进行了分析, 但研究结果存在一定差异。李占宏等^[28]发现毛乌素沙地表层土壤平均粒径存在从东北向西南逐渐变细的变化规律, 而舒培仙等^[19]指出毛乌素沙地现代风成沙存在自西北向东南平均粒径减小的空间分布规律。关于库布齐沙漠风成沙粒度特征的研究比较少, 吴霞等^[29]对库布齐沙漠南缘抛物线型沙丘表面粒度特征进行了分析, 认为沙丘高度和发育历史对沙丘表面粒度及分选系数均有影响。

尽管相关研究者已经对毛乌素沙地表层风成沙的粒度特征展开了较多的研究工作, 但仍存争议, 且没有充分考虑物源差异对毛乌素沙地风成沙粒度特征和空间变化的影响。目前还鲜见从宏观尺度上对库布齐沙漠风成沙粒度参数和分布规律的研究工作。因此, 我们对毛乌素沙地和库布齐沙

收稿日期: 2020-07-16; 改回日期: 2020-08-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41672182); 科技部科技基础资源调查专项(2017FY101000)

作者简介: 刘倩倩(1989—), 女, 山东滨州人, 博士, 研究方向为干旱区地貌与环境演化。E-mail: sttail_qqLiu@126.com

通信作者: 杨小平(E-mail: xpyang@zju.edu.cn)

漠沙丘进行了系统的采样,对其粒度参数和空间分布规律及其影响因素进行了分析和探讨,以期为毛乌素沙地和库布齐沙漠的环境变迁和地貌景观演变等研究提供参考和佐证。

1 研究区概况

毛乌素沙地位于鄂尔多斯高原东南部凹地和

黄土高原北部地区,面积约3.2万 km²。年均气温为6~8℃;年降雨量250~440 mm,自西北向东南递增,集中在夏季。沙地水分条件较好,内部有百余个湖泊。毛乌素沙地以固定-半固定沙丘为主,植被覆盖较好。风成沙下伏有白垩纪和侏罗纪紫红色和灰绿色砂岩。毛乌素沙地整体处于低风能环境,盛行西北风^[30](图1)。

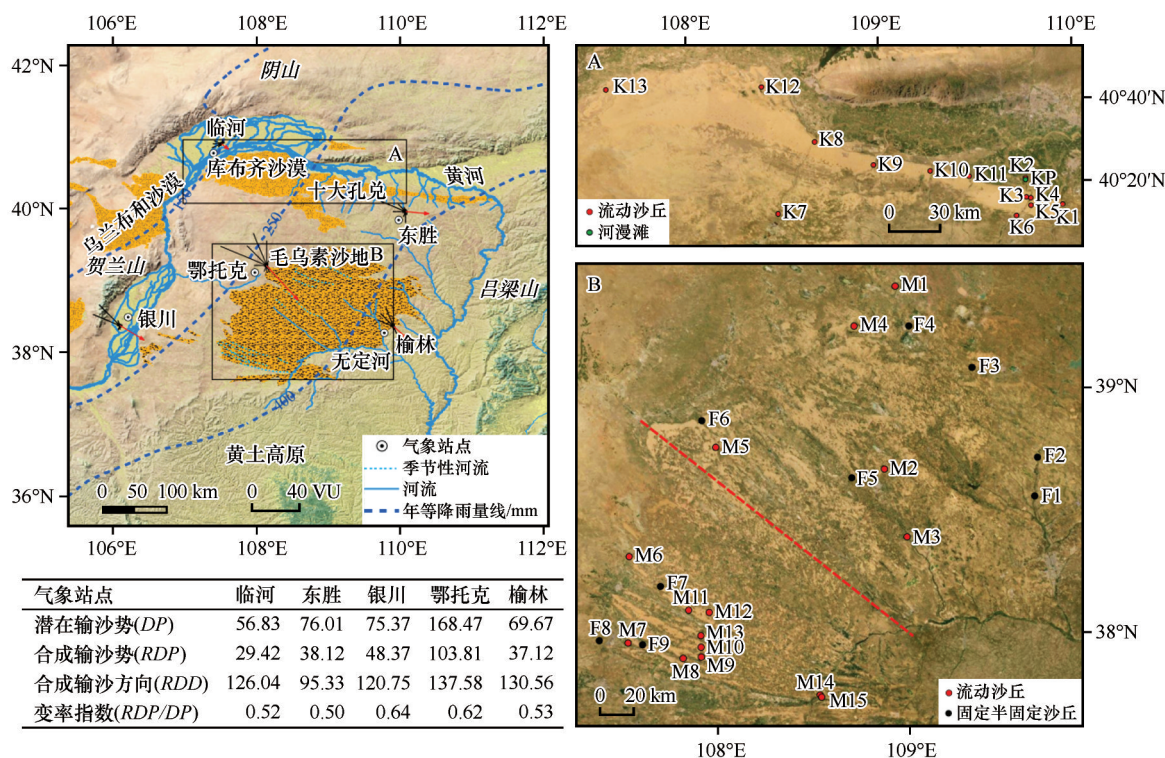


图1 毛乌素沙地、库布齐沙漠概貌及样品位置图(气象站点风况数据来源于1973—2016年的美国国家气候数据中心数据,采样时间间隔为3 h,计算方法引自文献[31])

Fig.1 Location and sampling sites of the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea. Sand roses are calculated following Fryberger et al.^[31] with data from the U.S. National Climatic Data Center (NCDC) from 1973 to 2016, and the measurement interval is 3 h

库布齐沙漠位于鄂尔多斯高原北部边缘黄河阶地上,呈带状分布,总面积约1.6万 km²。沙漠长约400 km,西部宽约100 km,向东部逐渐递减至20~30 km。库布齐沙漠地势由北向南呈阶梯状抬升,有10条河流发源于沙漠南部高地,向北穿越沙漠后汇入黄河,统称为十大孔兑。库布齐沙漠年均气温为7.4℃;年降雨量自东部向西逐渐减少,东部为400 mm,西部为150 mm,降雨集中在夏季。库布齐沙漠以流动沙丘为主^[2],主要分布于黄河河漫滩和阶地之上。其中,河漫滩上分布的沙丘主要为新月形沙丘,高度大多约为3 m;一级阶地上分布的沙丘高约20~25 m;二级阶地向三级阶地过渡区则分布有50~60 m高的复合型沙丘群;三级阶地上主要为缓起伏沙

地,高度≤3 m^[32]。与毛乌素沙地类似,库布齐沙漠也整体处于低风能环境,盛行西风、西北风(图1)。

2 样品采集和研究方法

2.1 样品采集

毛乌素沙地东部(东北部)和西部(西南部)(以图1B中虚线为界)风成沙具有不同的沙源^[33-35],毛乌素沙地东部风成沙主要来源于下伏砂岩和湖相沉积物,毛乌素沙地西部风成沙主要来源于黄河河流沉积物。因此,研究中将毛乌素沙地分成东部和西部两个区域,在毛乌素沙地东部共采集11个风成沙样品,其中6个样品采集自固定-半固定沙丘顶部

(F1~F6),5个样品采集自流动沙丘顶部(M1~M5);在毛乌素沙地西部共采集13个风成沙样品,其中3个样品采集自固定-半固定沙丘顶部(F7~F9),10个样品采集自流动沙丘顶部(M6~M15)。在庫布齐沙漠共采集14个风成沙样品,其中13个样品采集自流动沙丘顶部(K1~K13),1个样品采集自河漫滩(KP)。

2.2 研究方法

粒度分析在中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境重点实验室完成,所用方法为机械振动筛选法,所用仪器为Retsch公司生产的AS 200型机械振筛仪。先将样品自然风干,手工去除有机体;然后称量30~50 g样品放于金属筛上,在振筛仪上振动15 min,静置10 min;待筛选颗粒静止后,在千分之一天平上称量每个筛子上沙颗粒的质量。

沉积物的粒径用Φ值来表示,计算公式^[36]为:
$$D=-\log_2 d$$
式中:D为颗粒直径(单位Φ);d为颗粒直径(单位mm)。实验室中所用金属筛的粒径为-1.25~4.75 Φ,间隔为0.25 Φ。实验中样品的质量回收率大于

99%,测试结果的相对标准差低于2%。
风成沙的粒度参数(M_z, σ, SK, K_g)根据Folk-Ward公式^[37]计算得到。

3 结果

3.1 粒度组成

毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙各粒级沙百分含量如表1所列。毛乌素沙地东部固定-半固定沙丘中沙含量最高,其次为细沙,其余组分含量较低,几乎不含极粗沙、粉沙及黏土。毛乌素沙地东部流动沙丘以细沙和中沙为主,其次为极细沙,几乎不含极粗沙、粉沙及黏土。与固定-半固定沙丘相比,流动沙丘中细沙和极细沙含量较高,而中沙和粗沙含量较低。毛乌素沙地西部风成沙以细沙为主,含量最高可达96%左右,其次为极细沙和中沙,几乎不含粗沙和极粗沙。其中,固定-半固定沙丘极细沙含量高于中沙,且有少部分粉沙及黏土;流动沙丘中沙含量高于极细沙,几乎不含粉沙及黏土。库布齐沙漠流动沙丘以细沙为主,其次为极细沙和

表1 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度组成
Table 1 Grain size composition of aeolian sands in the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea

采样区域	沙丘类型	样品数量	各粒级沙百分含量/%						
				极粗沙 (-1~0 Φ)	粗沙 (0~1 Φ)	中沙 (1~2 Φ)	细沙 (2~3 Φ)	极细沙 (3~4 Φ)	粉沙及黏土 (4~5 Φ)
毛乌素沙地东部	固定-半固定沙丘	6	最大值	0.33	12.73	69.55	50.96	4.83	0.19
			最小值	0.00	0.15	47.06	26.23	0.73	0.03
			平均值	0.05	2.65	57.72	36.52	2.93	0.12
	流动沙丘	5	最大值	0.00	5.89	64.36	72.98	25.72	0.91
			最小值	0.00	0.01	15.35	26.86	2.79	0.05
			平均值	0.00	1.54	42.78	45.69	9.56	0.42
	固定-半固定沙丘	3	最大值	0.23	2.56	12.00	86.03	25.19	6.40
			最小值	0.00	0.00	0.40	53.62	8.48	0.39
			平均值	0.08	0.89	6.99	74.03	15.22	2.79
毛乌素沙地西部	流动沙丘	10	最大值	0.06	0.07	38.00	95.85	8.98	0.25
			最小值	0.00	0.00	0.17	54.90	2.33	0.00
			平均值	0.01	0.01	10.34	84.85	4.71	0.08
	固定-半固定沙丘	13	最大值	0.00	1.46	27.73	93.51	42.34	3.55
			最小值	0.00	0.00	0.20	50.85	3.63	0.02
			平均值	0.00	0.12	5.09	76.83	17.50	0.46
	河漫滩	1		0.00	0.00	0.65	38.11	54.64	6.60
	流动沙丘	13							
	固定-半固定沙丘	3							

中沙,粉沙及黏土、粗沙组分含量极低,不含极粗沙。采集自河漫滩的风成沙样品粒度较细,以极细沙为主,其次为细沙和粉沙及黏土,几乎不含粗颗粒。

毛乌素和库布齐沙漠风成沙的粒度频率分布曲线多呈单峰态,仅少量样品呈双峰态(图2)。毛乌素沙地东部风成沙粒度频率分布曲线主峰对应的粒径值为 2Φ ;样品M2为单峰,峰值对应的粒径值为 2.5Φ ;M3为双峰,主峰对应的粒径值为 2.75Φ ,次峰对应的粒径值为 2Φ 。毛乌素沙地西部风成沙粒度频率分布曲线的峰值对应的粒径值主要介于 $2\sim$

2.75Φ ;样品F8和M12为双峰,F8主峰对应的粒径值为 2.75Φ ,次峰对应的粒径值为 3.75Φ ;样品M12主峰对应的粒径值为 2Φ ,次峰对应的粒径值为 2.75Φ 。库布齐沙漠流动沙丘风成沙粒度频率分布曲线与毛乌素沙地西部风成沙相似,其主峰对应的粒径介于 $2.5\sim 3\Phi$;样品K2和K7是双峰,主峰对应的粒径值均为 2.75Φ ,样品K2次峰对应的粒径值为 2Φ ,样品K7次峰对应的粒径值为 3.75Φ ;采集自河漫滩的风成沙最细,其粒度频率分布曲线也为单峰,峰值对应的粒径值为 3.25Φ 。

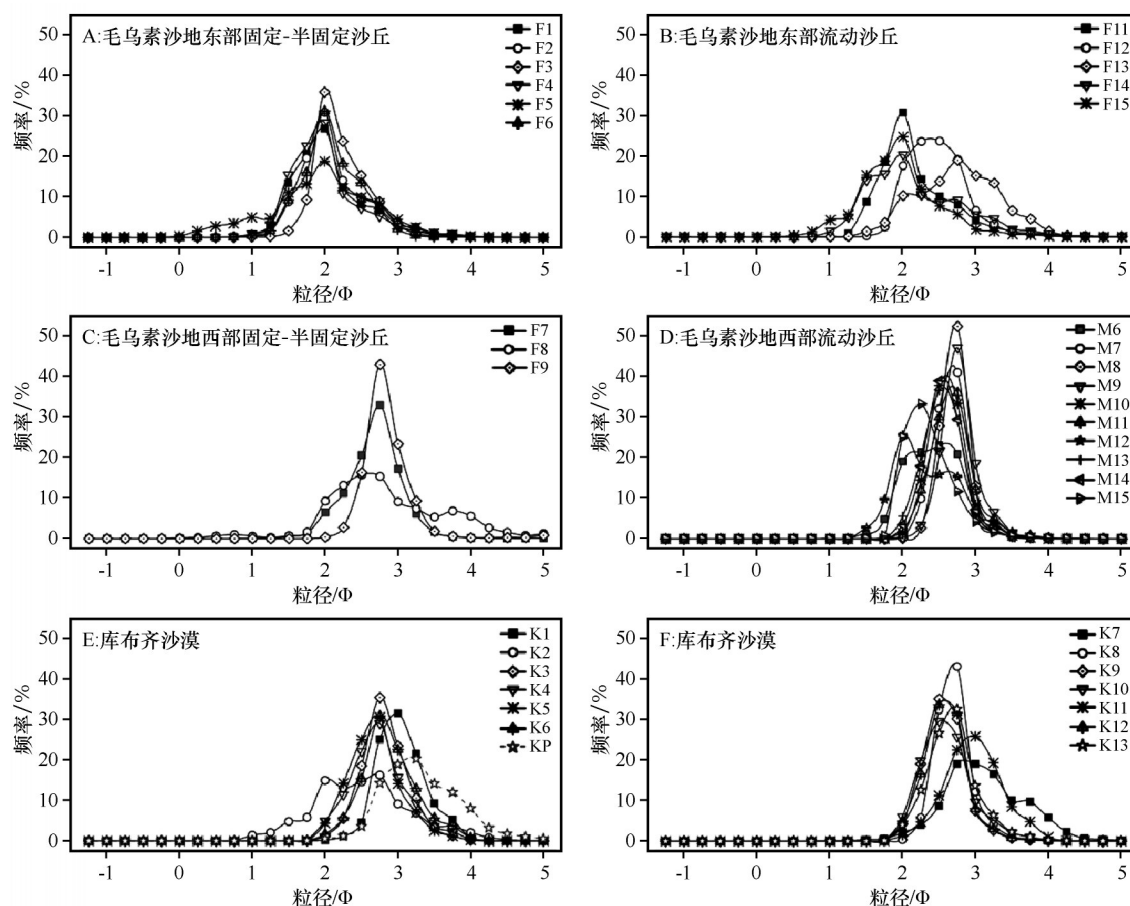


图2 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度频率分布曲线

Fig.2 Grain size frequency curves of aeolian sands in the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea

3.2 粒度概率累积曲线

风成沙颗粒主要有蠕移、跃移、悬移等3种运动方式,以跃移为主。在不同地区,由于沙源碎屑物质的机械组成和沉积物环境不同,3种不同移动模式的颗粒粒径范围也不同。Visher^[6]提出粒度概率累积曲线图能够揭示风成沉积物与搬运营力之间的关系,区分蠕移、跃移、悬移组分。毛乌素沙地东部、西部和库布齐沙漠流动沙丘和固定-半固定沙

丘风成沙的粒度概率累积曲线主要为两段式和三段式(图3),其中两段式缺少蠕移组分或悬移组分。部分样品具有更多分段,主要表现为具有多个蠕移组分或跃移组分。跃移组分和蠕移组分的截点介于 $1\sim 1.75\Phi$,跃移组分和悬移组分截点分布在 $3.25\sim 3.75\Phi$,毛乌素沙地东部和西部以及库布齐沙漠风成沙具有相似的搬运方式和沉积环境。毛乌素沙地东部风成沙蠕移组分线段斜率最大,含量最高可以占到整个样本的近70%;其次为跃移组分,含量

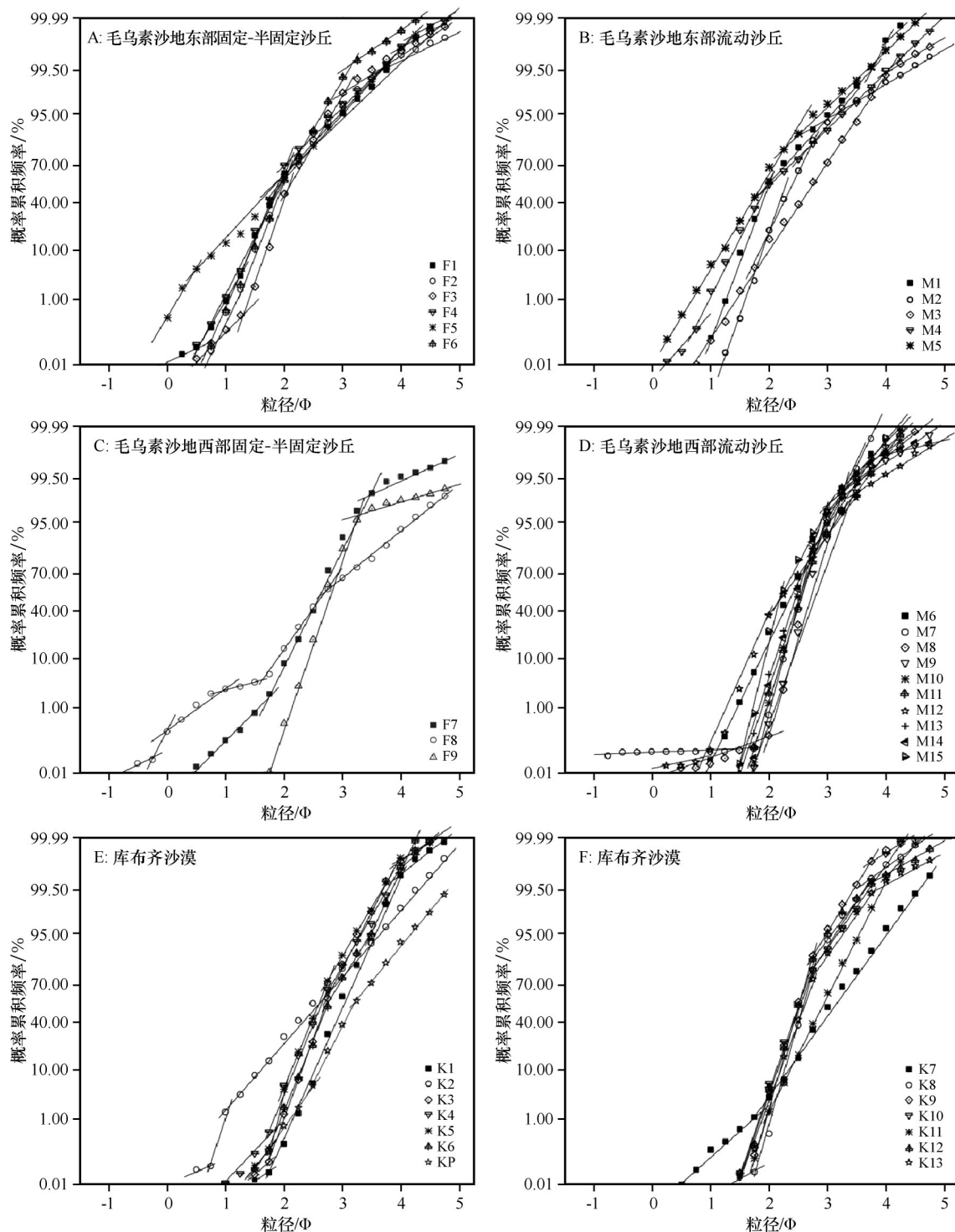


图3 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度概率累计曲线

Fig.3 The log-probability cumulative curves of the grain-size distribution of aeolian sands in the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea

普遍占整个样本的30%~40%;悬移组分线段斜率最小,含量最低。毛乌素沙地西部和库布齐沙漠风成沙跃移组分线段陡直,含量最高,其中流动沙丘风成沙跃移组分含量可高于90%;固定-半固定沙丘风成沙跃移组分含量略低于流动沙丘,而蠕移组分

和悬移组分含量相对较高。

3.3 粒度参数

如图4所示,毛乌素沙地东部风成沙为中沙至细沙,分选中等至良好,近对称至正偏,尖峰至强尖

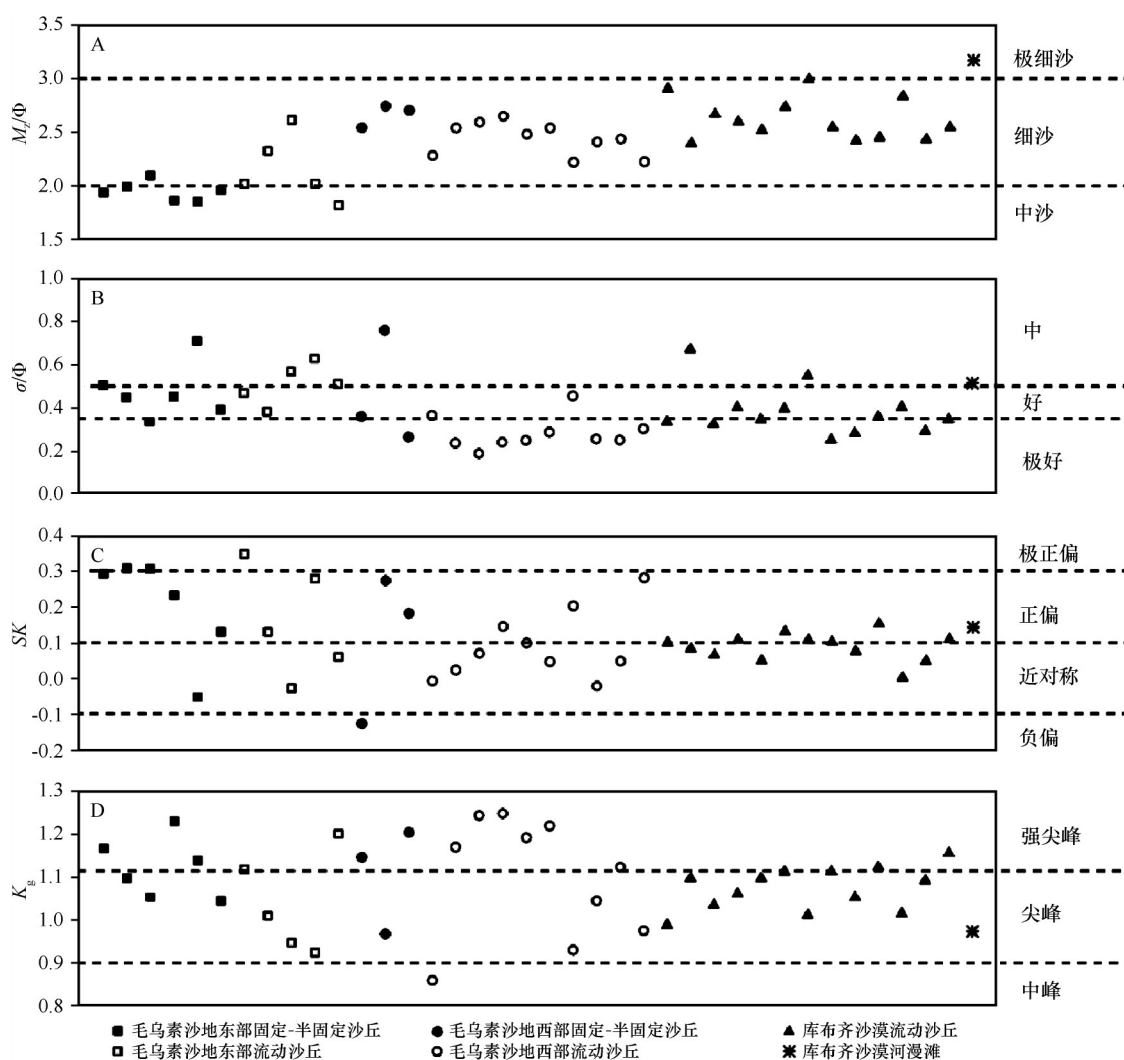


图4 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数

Fig.4 Grain size parameters of aeolian sands in the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea

峰;固定-半固定沙丘与流动沙丘相比, M_z 值相对较低, K_g 值略高。毛乌素沙地西部风成沙为细沙、分选中等至非常好,负偏至正偏,中峰至强尖峰;固定-半固定沙丘样品虽然数量少,但各粒度参数变化范围较大。库布齐沙漠风成沙为细沙至极细沙,近对称至正偏,尖峰至强尖峰;河漫滩风成沙 M_z 值最高,其余粒度参数与流动沙丘相似。

粒度参数的双变量图解可以为沉积环境的辨别提供依据,在沉积物粒度研究中得到广泛的应用^[1, 37]。如图5所示,毛乌素沙地东部和西部风成沙分布范围在 M_z - σ 、 M_z - SK 和 M_z - K_g 图解中具有明显差异, M_z - σ 、 M_z - SK 和 M_z - K_g 图解能够有效区分毛乌素沙地东部和西部风成沙; σ - SK 和 σ - K_g 图解也可以为区分毛乌素沙地东部和西部风成沙提供一些依据; SK - K_g 图解不能有效区分毛乌素沙地东部和西

部风成沙。毛乌素沙地东部和西部流动沙丘和固定-半固定沙丘风成沙之间粒度参数分布范围没有明显差异。

4 讨论

4.1 毛乌素沙地和库布齐沙漠沉积环境

各粒度组分含量(表1)、粒度频率分布曲线(图2)和粒度累积概率曲线(图3)显示,毛乌素沙地东部风成沙粗颗粒含量较高。毛乌素沙地东部流动沙丘和固定-半固定沙丘风成沙相似的粒度频率分布曲线和概率累积曲线,说明植被覆盖并不是导致毛乌素沙地东部风成沙粒度较粗、粗颗粒含量较高的主要原因。毛乌素沙地东部和西部风成沙可能具有不同的沙源;毛乌素沙地东部风成沙物源中粗

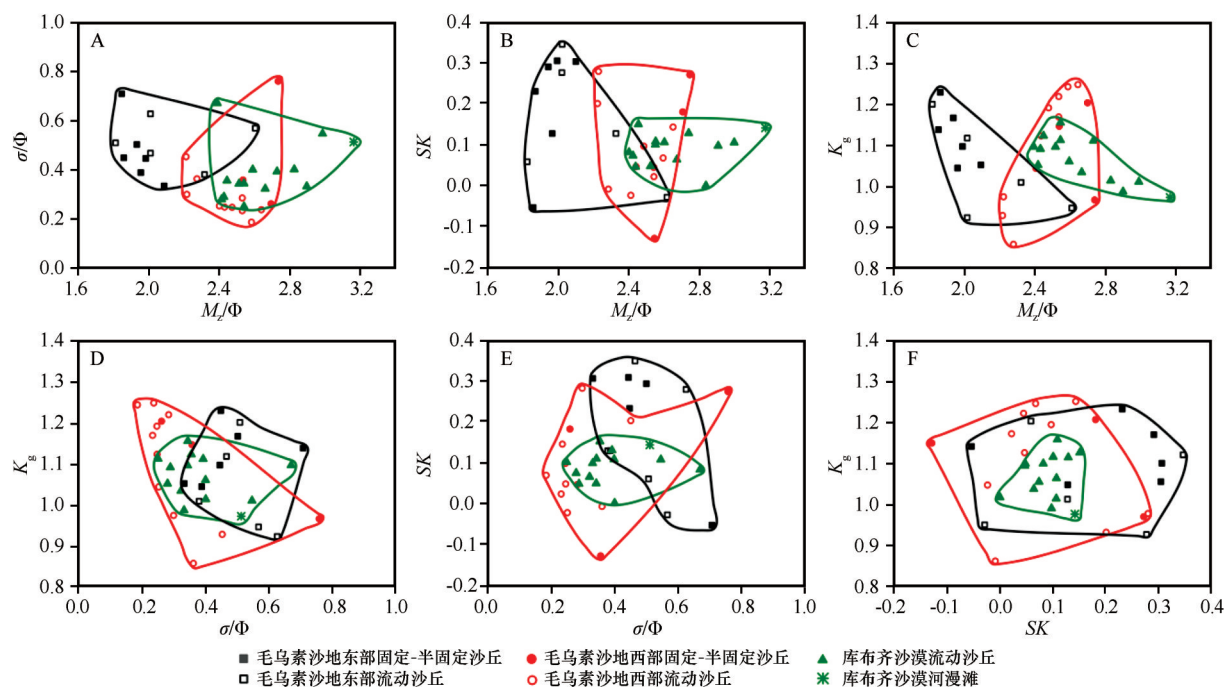


图5 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数双变量图解

Fig.5 Bivariate diagram of grain size parameters of aeolian sands in the Mu Us Sandy Land and Hobq Sand Sea

颗粒的含量更高,主要为就地起沙。毛乌素沙地西部固定-半固定沙丘蠕移组分和悬移组分含量略高于流动沙丘,这是由于植被覆盖阻碍了风成沙粗颗粒的运动,并增加了细颗粒的含量,导致蠕移组分和悬移组分累积而含量增加。库布齐沙漠风成沙粒度累积概率曲线与毛乌素沙地西部流动沙丘相似(图3),其中部分样品(K9~K13)不含有蠕移组分。这说明库布齐沙漠风成沙的物质来源具有区域差异,样品K9~K13没有粗颗粒沙源,而其他样品就地有粗颗粒沙源补充。部分样品具有两个跃移亚组分,可能是不同风向风力共同作用的结果(图1),也可能是由于库布齐沙漠风成沙并不是单一沙源^[38]。

除极个别样品外,毛乌素沙地东部、西部和库布齐沙漠风成沙峰态为尖峰至强尖峰,近对称至正偏(图3),且粒度频率分布曲线主要为单峰(图2),表明其具有稳定的物质来源和搬运-沉积过程,风沙活动强烈,且部分地区有粗颗粒组分的补充,形成正偏的粒度分布特征。这进一步说明毛乌素沙地东部、西部和库布齐沙漠部分风成沙为就地起沙。毛乌素沙地东部风成沙正偏样品所占比例和正偏幅度高于毛乌素沙地西部和库布齐沙漠风成沙,表明就地起沙对毛乌素沙地东部风成沙的贡献较大,而对毛乌素沙地西部和库布齐沙漠风成沙的

贡献较小。库布齐沙漠河漫滩风成沙粒度较小、分选较好、峰态相对较分散,可能是由于其沙源即河漫滩沉积物粒度较小、分选较好,且就地起沙后未经过充分的分选作用。

4.2 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数特征

与毛乌素沙地西部和库布齐沙漠风成沙相比,毛乌素沙地东部风成沙呈现出粒度较粗和分选程度较差的特征。沙源碎屑物质的机械组成可以直接影响风成沙的平均粒径(M_z)和分选程度^[7,39],尤其是就地起源的风成沙可能并没有经过充分的分选,很大程度上保留了原碎屑物质的粒度特征。毛乌素沙地东部和西部风成沙具有不同的物质来源^[33-35],可能导致了毛乌素沙地东部和西部风成沙具有不同的粒度参数特征。

充分的分选过程可以有效提高风成沙的分选程度,降低 σ 值,提高 K_s 值。风成沙的分选过程受到沙丘形态、植被覆盖程度、土壤水分含量、区域风动力条件等多种因素的影响。随着沙丘高度的增加,风成沙的分选程度变高, σ 值降低^[40]。碎屑沉积物的起沙风速随碎屑颗粒粒径的增加而增大^[41],风力条件越强,风蚀作用越强,能侵蚀搬运的碎屑颗粒越粗、粒径范围越大,从而对风成沙的分选程度和分选系数产生影响^[42]。植被覆盖可以有效降低

风速、减弱风对地表风成沙的侵蚀作用^[43-45],削弱风成沙的传输^[45],捕获运动中的风成沙颗粒^[46],并增加细颗粒组分的含量^[47],降低风成沙的分选程度。土壤水分能够显著增加颗粒间的黏着力,增大风成沙的临界起沙风速^[48-51],提高风蚀难度,降低风成沙的分选程度。冬季低温形成冻结和积雪覆盖,显著增加了风成沙的临界起沙风速,减弱风成沙的分选过程^[52]。同时,温度和土壤水分含量还可以通过影响植被生长和植被覆盖程度而影响风成沙的分选过程。

粒度参数的差异主要存在于毛乌素沙地东部和西部风成沙,流动沙丘和固定-半固定沙丘风成沙之间的差异较小,说明植被覆盖程度对毛乌素沙地风成沙粒度分布特征和粒度参数的影响有限。毛乌素沙地处于低风能环境中,搬运营力相似;降雨量和气温并没有明显的突变,说明区域风动力条件、土壤水分含量和温度也不是影响毛乌素沙地粒度参数的主要因素。库布齐沙漠的搬运营力、年均温与毛乌素沙地相似,降雨量较低,植被覆盖程度较差。库布齐沙漠风成沙分选系数(σ)平均值略高于毛乌素沙地西部风成沙,分选程度较差;平均粒径(M_z)较毛乌素沙地西部风成沙更细,说明区域风动力条件、土壤水分含量、温度和植被覆盖程度也不是影响库布齐沙漠粒度参数的主要因素。因此,物源碎屑的机械组成是形成毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度分布特征的主要因素。

风成沙颗粒在向下风向传输的过程中,应呈现出平均粒度变小、分选程度变好的空间变化规律^[53]。我们对毛乌素沙地和库布齐沙漠流动沙丘和固定-半固定沙丘风成沙的平均粒径(M_z)和分选系数(σ)与经度和纬度的线性关系进行了分析(图6)。结果显示,仅毛乌素沙地西部固定-半固定沙丘和流动沙丘风成沙的分选系数(σ)呈现出与盛行风向一致的空间变化规律,仅毛乌素沙地东部流动沙丘风成沙的平均粒径(M_z)呈现出与盛行风向一致的空间变化规律。值得注意的是,只有毛乌素沙地西部固定-半固定沙丘风成沙分选系数(σ)与经度和纬度之间的线性关系较好, R^2 值较大;其他风成沙平均粒径(M_z)和分选系数(σ)与经度和纬度的线性相关关系很弱或甚至没有线性相关性。由于毛乌素沙地西部固定-半固定沙丘风成沙仅有3个样品,可能存在一定误差。李占宏等^[28]发现毛乌素沙

地表层土壤平均粒径存在从东北向西南逐渐变小的变化规律,考虑到毛乌素沙地东部风成沙较粗而西部风成沙较细,物源的差异可能是形成此变化规律的主要原因。舒培仙等^[19]发现毛乌素沙地现代风成沙存在自西北向东南平均粒径减小的空间规律,分选性空间差异不大。因此,毛乌素沙地风成沙的平均粒径(M_z)可能存在与盛行风向相关的空间变化规律,分选系数(σ)没有显著的空间变化规律;库布齐沙漠风成沙的平均粒径(M_z)和分选系数(σ)没有显著的与盛行风向一致的空间变化特征。

其他因素增加了粒度参数空间分布的复杂性。首先,毛乌素沙地东部和西部以及库布齐沙漠风成沙并不是单一物源,就地起沙是其重要来源,且不同区域贡献比例不同。复杂的沙源增加了毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度特征和粒度参数的空间差异。其次,风力并不是毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙唯一的搬运营力,河流在风成沙碎屑物质的搬运过程中也起到重要的作用^[27,54-55]。雨季,河流侵蚀河岸,大量风成沙进入河道,被河水搬运至下游地区;非雨季,河流中的大量碎屑物质沉积下来,在风的作用下于河岸边再次形成沙丘。与风相比,河流搬运能力更强,能够搬运较粗的碎屑颗粒。因此,风和河流的联合搬运作用也增加了风沙活动的复杂性,削弱了现代风沙沉积物粒度参数的空间分异规律。

5 结论

对毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度数据分析结果显示,毛乌素沙地东部和西部风成沙的粒度特征及粒度参数存在差异。毛乌素沙地东部风成沙较粗,中沙含量较高,分选程度较差;而毛乌素沙地西部风成沙颗粒较细,以细沙为主,分选程度较好;库布齐沙漠风成沙与毛乌素沙地西部相似,以细沙为主,分选程度好。就地起沙是毛乌素沙地东部、西部和库布齐沙漠风成沙的重要来源,对毛乌素沙地东部风成沙贡献较大,对毛乌素沙地西部和库布齐沙漠风成沙贡献相对较小,并存在区域差异。粒度参数双变量图解可以为区分毛乌素沙地东部和西部风成沙提供依据。结合前人对毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙物源的研究结果,我们认为沙源碎屑物质的机械组成是影响毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度分布特征的主要因素,其他

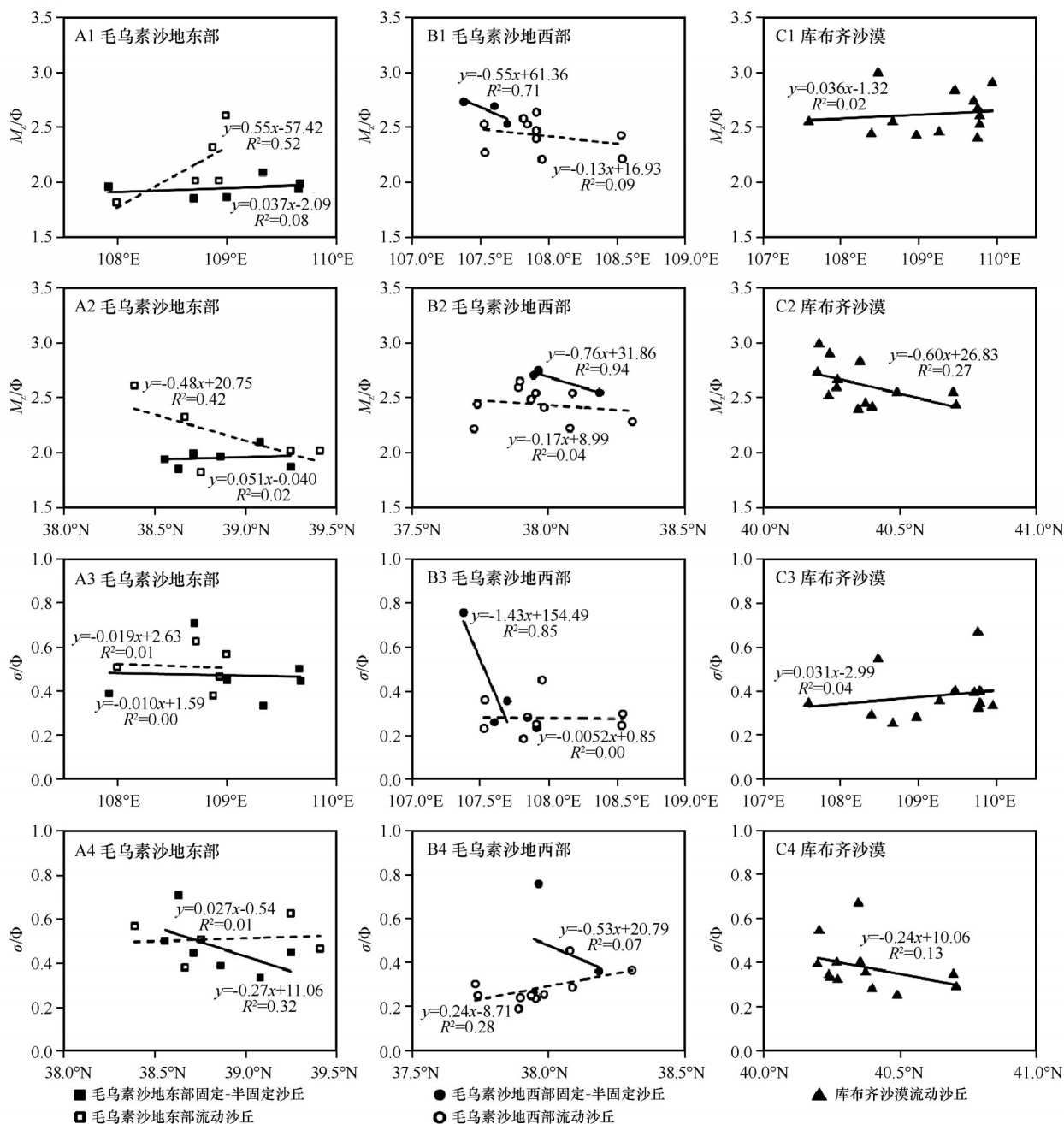


图6 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙平均粒径(M_z)和分选系数(σ)与经度和纬度线性关系图解

Fig.6 Variation of the mean grain size (M_z) and sorting coefficient (σ) of aeolian sands in the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea with longitudes and latitudes.

因素如植被覆盖程度、区域风动力条件、土壤水分含量和温度等对其影响不大。毛乌素沙地平均粒径(M_z)可能存在与盛行风向一致的空间变化规律,分选系数(σ)没有显著的空间变化趋势;库布齐沙漠风成沙的平均粒径(M_z)和分选系数(σ)没有与盛行风向一致的空间变化规律。复杂的沙源以及风和河流的混合搬运作用增加了风沙活动的复杂性,削弱了粒度参数的空间分异规律。

参考文献:

- [1] Pye K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Dunes [M]. Berlin, Germany: Springer, 2002.
- [2] 朱震达, 吴正, 刘恕, 等. 中国沙漠概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [3] Muhs D R, Stafford T W, Cowherd S D, et al. Origin of the late Quaternary dune fields of northeastern Colorado [J]. Geomorphology, 1996, 17(1/3): 129-149.
- [4] Williams M. Climate Change in Deserts [M]. Cambridge, UK:

- Cambridge University Press, 2014.
- [5] Goudie A S. Great Warm Deserts of the World: Landscapes and Evolution[M]. New York, USA: Oxford University Press, 2002.
- [6] Visher G S. Grain-size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39(3): 1074–1106.
- [7] 吉启慧. 粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应用[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(2): 173–179.
- [8] 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[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 589–596.
- [9] 梁爱民, 屈建军, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠沉积物粒度端元特征及其物源启示[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 33–42.
- [10] 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): 1–14.
- [11] 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): 33–46.
- [12] 毕志伟, 杨振京, 徐建明, 等. 塔里木盆地腹地第四纪沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(3): 335–339.
- [13] Liu B L, Qu J J, Ning D H, et al. Grain-size study of aeolian sediments found east of Kumtagh Desert [J]. *Aeolian Research*, 2014, 13: 1–6.
- [14] 何清, 杨兴华, 霍文, 等. 库姆塔格沙漠粒度分布特征及环境意义[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(1): 18–22.
- [15] 钱广强, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠地表沉积物粒度特征及区域差异[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1357–1364.
- [16] 宁凯, 李卓仑, 王乃昂, 等. 巴丹吉林沙漠地表风积砂粒度空间分布及其环境意义[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(3): 642–648.
- [17] 钱亦兵, 周兴佳, 吴兆宁. 准噶尔盆地沙物质粒度特征研究[J]. *干旱区研究*, 2000, 17(2): 34–41.
- [18] 黄杏珍, 潘中海. 应用粒度资料探讨毛乌素沙漠西南部的风砂特征[J]. *地理学报*, 1981, 36(1): 70–78.
- [19] 舒培仙, 牛东风, 李保生, 等. 毛乌素沙地现代沙丘沙的粒度特征及其意义[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(1): 158–166.
- [20] 陈国祥, 董治宝, 崔徐甲, 等. 毛乌素沙地中部风成沙的组成与微形态特征[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 473–483.
- [21] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘粒度特征与成因探讨[J]. *地理研究*, 1998, 17(2): 178–184.
- [22] 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): 271–275.
- [23] 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): 129–135.
- [24] 张正偲, 董治宝, 管梦鸾. 腾格里沙漠东南缘反向沙丘形态演化过程[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(4): 709–715.
- [25] 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): 42–51.
- [26] 刘海霞, 李晋昌, 苏志珠, 等. 毛乌素沙地西南缘灌丛沙丘沉积物的粒度和元素特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(1): 24–31.
- [27] 李智佩, 岳乐平, 薛祥煦, 等. 毛乌素沙地东南部边缘不同地质成因类型土地沙漠化粒度特征及其地质意义[J]. *沉积学报*, 2016, 24(2): 267–275.
- [28] 李占宏, 海春兴, 丛艳静. 毛乌素沙地表土粒度特征及其空间变异[J]. *中国水土保持科学*, 2009, 7(2): 74–79.
- [29] 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[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 937–944.
- [30] 庞营军, 吴波, 贾晓红, 等. 毛乌素沙地风况及输沙势特征[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 62–67.
- [31] Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime [M]// McKee E D. A Study of Global Sand Seas. Washington, USA: Government Printing Office, 1979.
- [32] Yang X P, Li H W, Conache A. Large-scale controls on the development of sand seas in northern China [J]. *Quaternary International*, 2012, 250: 74–83.
- [33] Stevens T, Carter A, Watson T P, et al. Genetic linkage between the Yellow River, the Mu Us Desert and the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 355–368.
- [34] Liu Q Q, Yang X P. Geochemical composition and provenance of aeolian sands in the Ordos Deserts, northern China [J]. *Geomorphology*, 2018, 318: 354–374.
- [35] Wang Z Y, Wu Y Q, Tan L H, et al. Provenance studies of aeolian sand in Mu Us Desert based on heavy-mineral analysis [J]. *Aeolian Research*, 2019, 40: 15–22.
- [36] Krumbein W C. Application of logarithmic moments to size frequency distributions of sediments [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1936, 6(1): 35–41.
- [37] Folk R L, Ward W. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27(1): 3–26.
- [38] 杨利荣, 邹宁, 岳乐平, 等. 库布齐沙漠碎屑锆石 U-Pb 年龄组成及其物源分析[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(3): 560–569.
- [39] Langford R P, Gill T E, Jones S B. Transport and mixing of eolian sand from local sources resulting in variations in grain size in a gypsum dune field, White Sands, New Mexico, USA [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 333(1): 184–197.
- [40] Glennie K W. Desert Sedimentary Environments [M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 1970.
- [41] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1941.
- [42] Lancaster N, Nickling W G, Neuman C M. Particle size and sorting characteristics of sand in transport on the stoss slope of a small reversing dune [J]. *Geomorphology*, 2002, 43(3/4): 233–242.
- [43] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(5): 505–514.
- [44] Wolf S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17(1): 50–68.
- [45] Wiggs G F S, Livingstone I, Thomas D S G, et al. Effect of vegetation removal on airflow patterns and dune dynamics in the southwest Kalahari Desert [J]. *Land Degradation and Rehabilitation*, 1994, 5(1): 13–24.

- [46] Van de Ven T, Frypear D W, Spaan W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 44(4): 347–349.
- [47] Fan D Q, Qin S G, Zhang Y Q, et al. Effects of sand-fixing vegetation on topsoil properties in the Mu Us Desert, northwest China[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2015, 14(4): 749–756.
- [48] Chepil W S. Dynamics of wind erosion; I. Nature of movement of soil by wind[J]. *Soil Science*, 1945, 60(4): 305–320.
- [49] Chepil W S. Influence of moisture on erodibility of soil by wind[J]. *Proceedings of Soil Science Society of America*, 1956, 20(2): 288–292.
- [50] Dong Z B, Liu X P, Wang X M. Wind initiation thresholds of the moistened sands[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(12): GL013128.
- [51] Wiggs G F S, Baird A J, Atherton R J. The dynamic effects of moisture on the entrainment and transport of sand by wind[J]. *Geomorphology*, 2004, 59(1/4): 13–30.
- [52] McKenna-Neuman C, Gilbert R. Aeolian processes and landforms in glaciofluvial environments of southeastern Baffin Island, NWT, Canada[M]//Nickling W G. *Aeolian Geomorphology*. Boston, USA: Allen and Unwin, 1986: 213–235.
- [53] Li Z S, Feng D J, Wu S L, et al. Grain size and transport characteristics of non-uniform sand in aeolian saltation[J]. *Geomorphology*, 2008, 100(3/4): 484–493.
- [54] 管超, 哈斯额尔敦, 周炎广, 等. 库布齐沙漠南缘风水交互特征及其对抛物线形沙丘发育的影响[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(5): 899–908.
- [55] 李小妹, 严平. 干旱区沙漠与河流复合地貌过程研究进展[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 97–104.

Spatial variations of grain size parameters of dune sands in the Mu Us Sandy Land and Hobq Sand Sea, northern China and its potential causes

Liu Qianqian¹, Yang Xiaoping²

(1. *Institute of Chinese Historical Geography, Fudan University, Shanghai 200433, China*; 2. *School of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: We collected and measured aeolian sand samples from the Mu Us Sandy Land and the Hobq Sand Sea of northern China. The data of grain sizes show that aeolian sands in the eastern and western Mu Us Sandy Land are quite different. The aeolian sands in the western Mu Us Sandy Land are much finer and better sorted compared with those in the eastern Mu Us Sandy Land. Aeolian sands in the Hobq Sand Sea show similar grain size characteristics to those of the western Mu Us Sandy Land. We conclude that the initial grain sizes of source materials could be the main factors for the regional variations across these aeolian environments. Local detritus act as an important provenance for aeolian sands of Mu Us Sandy Land and Hobq Sand Sea, and its contribution varies regionally. Influenced by complicated provenances and mixed transportation by winds and rivers, the values of mean grain size (M_z) and sorting coefficient (σ) do not show obviously spatial variations which would be associated with the prevailing wind directions in the study areas.

Key words: geomorphology; dune; grain size parameter; spatial analysis