

# 柴达木盆地西南缘沙丘沉积物粒度特征及其沉积环境

王萌<sup>1</sup>, 郜学敏<sup>2</sup>, 屈欣<sup>1</sup>, 刘政鑫<sup>1</sup>, 李继彦<sup>1</sup>

(1.太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619; 2.晋中学院 旅游管理系, 山西 晋中 030619)

**摘要:** [目的] 研究柴达木盆地西南缘沙丘沉积物粒度特征及其沉积环境, 为格(尔木)库(尔勒)铁路防沙和安全运行提供基础数据支撑。[方法] 通过粒度分析方法对柴达木盆地西南缘沙丘区沙丘沉积物的粒度特征及沉积环境进行分析。[结果] 柴达木盆地柴西南沙区沙丘表层沉积物以细沙为主, 中沙次之, 平均粒径 $0.14\sim 3.49\Phi$ , 平均值为 $2.02\Phi$ ; 分选系数为 $0.32\sim 1.59$ , 平均值为 $0.69$ , 以分选较好和好的沙粒为主; 偏度主要为近对称分布; 峰度以中等峰态占优。自然频率分布曲线呈单峰和双峰分布模式, 累积频率曲线图式为一阶段式、二阶段式、三阶段式。平均粒径与分选系数呈线性相关关系, 即随平均粒径变细, 分选逐渐变好。当峰度 $< 0.9$ 时, 平均粒径与峰度呈负相关; 当峰度 $> 0.9$ 时呈正相关。[结论] 柴达木盆地西南沙区西北部为风成环境, 以风成沙为主; 而东南部以湖相和河流冲—洪积环境为主, 沙物质受到风力和流水的交互作用。

**关键词:** 柴达木盆地; 沙丘; 粒度; 沉积环境

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0057-08

中图分类号: K903, U418.5+6

**文献参数:** 王萌, 郜学敏, 屈欣, 等. 柴达木盆地西南缘沙丘沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 57-64. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.05.008; Wang Meng, Gao Xuemin, Qu Xin, et al. Particle-size characteristics and sedimentary environment of dune sediments in Southwestern Qaidam Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 57-64.

## Particle-size Characteristics and Sedimentary Environment of Dune Sediments in Southwestern Qaidam Basin

Wang Meng<sup>1</sup>, Gao Xuemin<sup>2</sup>, Qu Xin<sup>1</sup>, Liu Zhengxin<sup>1</sup>, Li Jiyan<sup>1</sup>

(1. School of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619, China;

2. Department of Tourism Management, Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi, 030619, China)

**Abstract:** [Objective] The particle size characteristics and sedimentary environment of dune sediments in the southwest margin of Qaidam Basin were analyzed in order to provide basic data to support sand control and safe operation of the Golmud-Korla Railway. [Methods] We used the particle-size analysis method to determine the particle-size characteristics and sedimentary environment of dunes in the piedmont of the Southwestern Qaidam Basin. [Results] The dunes in the Southwestern Qaidam sand area were mainly composed of fine sand, followed by medium sand. The mean particle-size was between  $0.14\Phi$  and  $3.49\Phi$ , with an average of  $2.02\Phi$ . The sorting parameters varied from  $0.32$  to  $1.59$  (with average of  $0.66$ ). The skewness distribution was nearly symmetric. The kurtosis was dominated by moderate kurtosis. The natural frequency distribution curves were uni-modal and bi-modal. The cumulative frequency curves were one-stage, two-stage, and three-stage. Mean particle-size and sorting showed a linear correlation relationship, i.e., as mean grain-size became finer, sorting gradually became better. Mean particle-size and kurtosis were negatively correlated when the peak kurtosis value was less than  $0.9$ . In contrast, when the peak kurtosis value was greater than  $0.9$ , mean particle-size and kurtosis were positively correlated. [Conclusion] The northwestern part of the Southwestern Qaidam Basin is an aeolian environment dominated by aeolian sands. The southeastern part of the area is dominated by lacustrine and alluvial-fluvial environments, and the dune sands are affected by the interaction of wind and water.

**Keywords:** Qaidam Basin, sand dune, grain-size, sedimentary environment

收稿日期: 2021-11-21

修回日期: 2022-03-24

资助项目: 国家自然科学基金项目“柴达木盆地线形沙丘侧向移动过程研究”(41601005)。

第一作者: 王萌(1996—), 女(汉族), 河北省廊坊市人, 硕士研究生, 研究方向为资源评价与开发。Email: 1163493902@qq.com。

通信作者: 李继彦(1984—), 男(汉族), 山东省曹县人, 博士, 副教授, 主要从事风沙地貌研究。Email: jyli@tynu.edu.cn。

沉积物是风沙地貌形成与发育的物质基础,蕴含着风沙地貌发育演化的重要信息<sup>[1]</sup>。20 世纪以来,国内外学者从不同时空尺度上对沙丘沉积物粒度进行了广泛研究<sup>[2-5]</sup>。沙丘沉积物粒度特征受地形—气流—沙粒三者之间的相互作用。沙丘各部位的粒度特征表现出不同程度的差异<sup>[6-8]</sup>,主要体现在由两侧坡脚至丘顶的多种粒度分布模式。大致可分为 4 种类型:①两侧坡脚到丘顶,粒径逐渐变粗<sup>[9-11]</sup>;②两侧坡脚到丘顶,粒径逐渐变细<sup>[12-15]</sup>;③由迎风坡到背风坡粒径变细<sup>[16]</sup>;④无明显变化。从宏观上来看,沙漠沙物质的粒度特征主要受控于两个因素,即源区物质的粒度组成和风况。沙物质来源相对单一的地区,存在沿主风向粒径变细、分选变好的趋势<sup>[17]</sup>,如纳米布沙漠<sup>[18]</sup>、巴丹吉林沙漠<sup>[4]</sup>;而沙物质来源较多的地区,不存在顺风向的递变规律,如塔克拉玛干沙漠<sup>[19-20]</sup>。

沉积物粒度特征可以反映并有助于反演沙丘形成过程中的沉积环境。因此,利用粒度特征提取沉积环境信息对于恢复风成环境、探究沙漠沙物质来源具有重要意义<sup>[1]</sup>。学者们利用 Sahu 公式<sup>[21]</sup>、端元分析法等<sup>[22]</sup>获得营力条件和沉积环境信息,以揭示它们所蕴含的物源和沉积动力条件。在区域尺度上,对库姆塔格沙漠<sup>[23]</sup>、巴丹吉林沙漠<sup>[24]</sup>、阿联酋迪拜中部沙漠等<sup>[25]</sup>的沉积环境都进行了探究。但对自然条件极端严酷的柴达木盆地沙漠研究还相对匮乏。

柴达木盆地沙漠是中国海拔最高的沙漠,沙丘区集中分布在盆地西南区域、中南部的三湖区、东南部的铁奎沙漠区和东北部的哈勒腾河流域<sup>[26]</sup>。近年来,学者们对盆地中南部、东南部和东北部沙丘分布区粒度特征进行了深入研究,包括沉积物粒度的空间差异、沙物质来源<sup>[16,27]</sup>以及共生沙丘区沉积物粒度特征等<sup>[28]</sup>。而对盆地西南部沙丘的研究较少。2020 年底,格库铁路建成通车,该铁路在青海段贯穿柴达木盆地西南沙漠地区(以下简称“柴西南沙区”)。因此,本文在对柴西南沙区沙丘形态特征有一定认识的基础上<sup>[29]</sup>,通过野外考察和室内试验,采用粒度分析方法并结合 Sahu 公式对柴西南沙区沙丘沉积物粒度特征和沉积环境进行分析,以期丰富区域风沙地貌研究内容,为格库铁路防沙和安全运行提供基础数据支撑。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

柴达木盆地位于青藏高原东北部,四周被祁连山、昆仑山、阿尔金山所环绕,位于 35°00′—39°22′N,

90°16′—99°16′E,沙漠呈零星片状散布于盆地各处。柴西南沙丘区位于盆地西南缘的祁曼塔格山前洪—冲积平原上,呈狭长带状延伸,广泛分布有新月形沙丘及沙丘链、格状沙丘、横向沙垄、线形沙丘等沙丘类型。研究区整体地势北高南低、西高东低。属于高原大陆性荒漠气候,多年平均降水量不足 30 mm,年平均蒸发量约 2 000~3 000 mm,气候极端干旱。该区最大风速出现在春季,最小值出现在冬季,沙区西部主风向为 NNE—NE,次风向为 NW,而东部风向以 NW—WNW 为主。据小灶火国家气象站统计数据显示,该站点在 1981—2020 年的年平均风速为 3.5 m/s,茫崖气象站年平均风速为 2.8 m/s,年平均风速由茫崖向小灶火呈递增趋势,风沙活动强度也表现为由西北向东南递增<sup>[30]</sup>(图 1)。

### 1.2 研究方法

1.2.1 采样方法 2020 年 12 月对柴西南沙区的穿越式考察中,分别对典型沙丘类型进行采样,包括新月形沙丘(barchan dune)、新月形沙丘链(barchanoid dune)、横向沙垄(transverse ridge)、格状沙丘(network dune)及线形沙丘(linear dune),于沙丘迎风坡底部、迎风坡中部、丘顶、背风坡中部和背风坡底部,共 5 个地貌部位进行沉积物样品采集,共采集 60 个有效样品。每个样点采集面积约 20 cm × 20 cm,采集深度 0—1 cm,将样品装入密封袋中,并用 GPS 精确定位。为了方便对比分析,将所采的 12 个典型沙丘分别编号为 B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, BD<sub>1</sub>, BD<sub>2</sub>, T<sub>1</sub>, N<sub>1</sub>, L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>(以沙丘的英文首字母编号,为区分新月形沙丘和新月形沙丘链,分别用 B, BD 表示),采样位置详见图 1。

1.2.2 粒度分析方法 粒度分析常用的方法主要有筛分法、沉降法和激光粒度仪<sup>[1]</sup>。激光粒度仪测定速度快,适合测量较小颗粒的粒径。本文采用激光粒度仪法,测量仪器为英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪。具体试验过程如下:①沙样通过 2 000 μm 的不锈钢筛,并剔除草根等杂质待测。②用天平称取 0.2~0.4 g 的样品放置在 100 ml 的烧杯,加入 10 ml 的过氧化氢(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)溶液,在电热板上加热去除有机质。③取下电热板上的烧杯,待其冷却后加入 10 ml 的盐酸(HCl)溶液煮沸去除碳酸盐。④待烧杯冷却后注满 500 ml 的蒸馏水,静置 24 h,去除 H<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> 等离子。⑤加入 10 ml 的 10% 的六偏磷酸钠(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>,震荡 10 min 后进行测量。

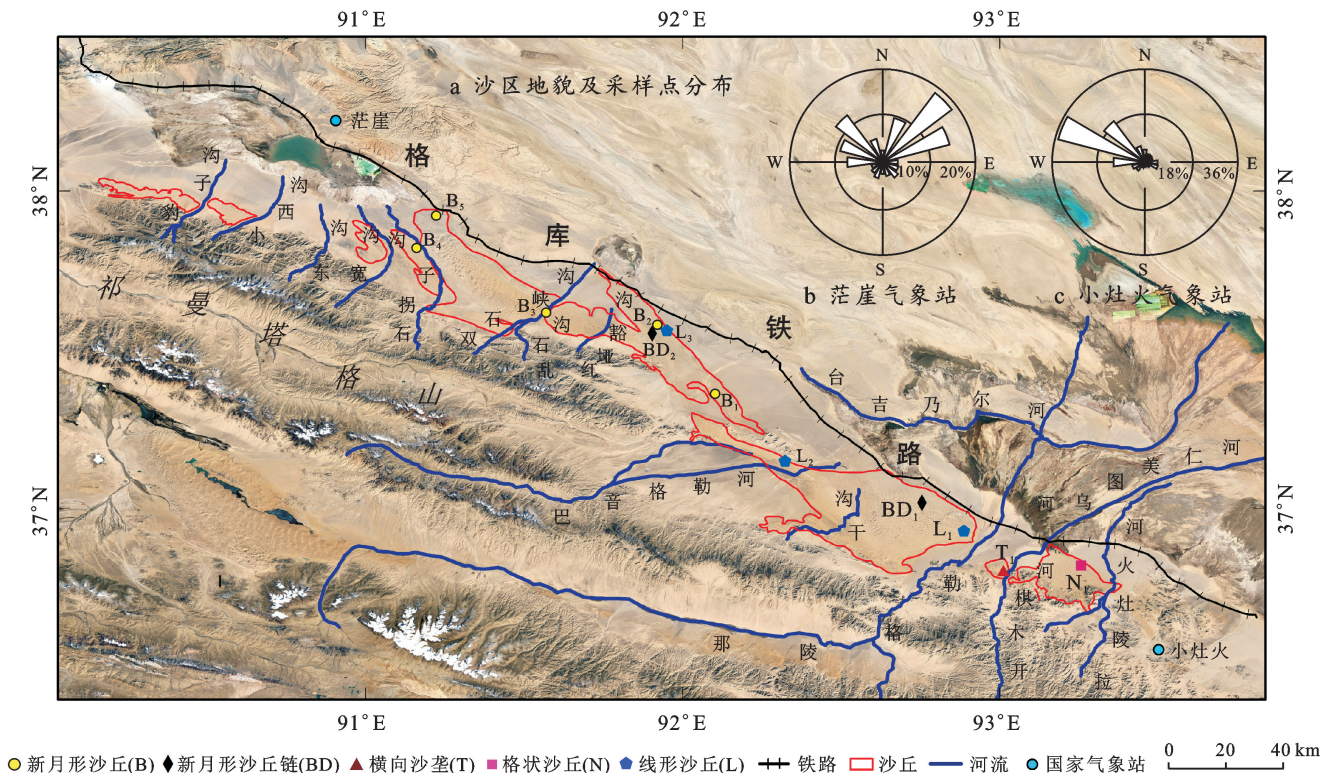


图 1 柴西南沙区地貌及沙丘沉积物样点分布(a)和茫崖(b)及小灶火(c)气象站风玫瑰图

粒度划分采用 Udden-Wentworth (伍登—温特沃斯)<sup>[31]</sup> 粒度标准, 即: 砾石 (< -1 Φ)、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 (4~9 Φ)、黏土 (>9 Φ)。采用 Folk-Ward(福克—沃德)图解法<sup>[32]</sup> 计算粒度参数, 包括平均粒径( $M_z$ )、分选系数( $\sigma_1$ )、偏度( $SK_1$ )和峰度( $K_g$ )。粒度参数计算公式如下:

$$M_z = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{50} + \Phi_{84}}{3} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6.6} \quad (2)$$

$$SK_1 = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{84} - \Phi_{16})} + \frac{\Phi_5 + \Phi_{95} - 2\Phi_{50}}{2(\Phi_{95} - \Phi_5)} \quad (3)$$

$$K_g = \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{2.44(\Phi_{75} - \Phi_{25})} \quad (4)$$

在(1)–(4)式中,  $\Phi_5, \Phi_{16}, \Phi_{25}, \Phi_{50}, \Phi_{75}, \Phi_{84}, \Phi_{95}$  分别表示概率累计曲线上 5%, 16%, 25%, 50%, 75%, 84%, 95% 处所对应的  $\Phi$  值。利用 Folk 和 Ward 提出的粒度参数分级标准<sup>[32]</sup>(表 1), 对沉积物粒度参数进行定性表述。

表 1 沙丘沉积物粒度参数分级标准

分选标准( $\sigma_1$ )		偏度标准( $SK_1$ )		峰度标准( $K_g$ )	
范围	描述	范围	描述	范围	描述
<0.35	分选极好	-1.00~-0.30	极负偏	<0.67	很宽
0.35~0.50	分选好	-0.30~-0.10	负偏	0.67~0.90	宽
0.50~0.71	分选较好	-0.10~0.10	近对称	0.90~1.11	中等
0.71~1.00	分选中等	0.10~0.30	正偏	1.11~1.50	窄
1.00~2.00	分选较差	0.30~1.00	极正偏	1.50~3.00	很窄
2.00~4.00	分选差			>3.00	非常窄
>4.00	分选极差				

1.2.3 沉积环境判别方法 依据 Sahu 判别公式<sup>[21]</sup>, 对沙丘沉积物指示的沉积环境进行分析。Sahu 通过对世界各地大量的现代沉积环境样品的分析, 将线性

多元判别方法引入了沉积物粒度分析, 建立了 4 个判别公式, 用于区分风成、海滩、浅海和河流等沉积环境。判别公式如下:

$$Y_{\text{风成, 海滩}} = -3.568 8M_z + 3.701 6\sigma_1^2 - 2.076 6SK_1 + 3.113 5K_g \quad (5)$$

如果  $Y < -2.741 1$ , 为风成环境,  $Y > -2.741 1$  则为海滩环境。

$$Y_{\text{海滩, 浅海}} = 15.653 4M_z + 65.709 1\sigma_1^2 + 18.107 1SK_1 + 18.504 3K_g \quad (6)$$

如果  $Y < 65.365 0$  为海滩环境,  $Y > 65.365 0$  则为浅海环境。

$$Y_{\text{浅海, 河流}} = 0.285 2M_z - 8.706 4\sigma_1^2 - 4.893 2SK_1 + 0.048 2K_g \quad (7)$$

如果  $Y < -7.419 0$ , 为河流环境,  $Y > -7.419 0$  则为浅海环境。

利用上面公式讨论沉积环境时, 应按照公式

(5)–(7)的顺序逐级讨论分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒级级配

粒级级配是沉积物各粒级组成和不同粒级沙粒含量百分比的体现<sup>[33]</sup>。沙粒级配不仅与沙源有关, 还与风沙活动中的搬运与堆积过程密切相关<sup>[1]</sup>。由表 2 可知柴西南沙区沙丘表层沉积物的粒径分布范围较宽, 从极粗沙到粉沙均有分布。从各粒级含量来看, 由沙丘两侧底部至顶部以细沙为主, 含量变化范围 6.74%~73.41%, 均值为 41.34%; 中沙次之, 含量变化范围 5.09%~74.35%, 均值为 31.60%; 其次是极细沙、粗沙和极粗沙, 粉沙含量极少, 无黏土组分。

表 2 柴达木盆地西南缘沙丘颗粒级配

沙丘类型	项目	颗粒级配/%						
		黏土	粉沙	极细沙	细沙	中沙	粗沙	极粗沙
新月形沙丘	最小值	0	0	0	6.74	11.45	0	1.00
	最大值	0	3.39	20.02	73.41	74.34	30.05	31.05
	平均值	0	0.30	8.27	46.06	39.85	5.42	0.09
新月形沙丘链	最小值	0	0	1.40	25.10	22.46	0.01	0
	最大值	0	4.28	25.27	64.67	48.50	26.27	4.02
	平均值	0	0.86	12.50	47.52	31.04	7.20	0.87
横向沙垄	最小值	0	0	4.44	20.36	20.49	1.10	0
	最大值	0	0.58	24.01	54.61	52.83	26.04	0.94
	平均值	0	0.31	12.72	40.91	36.63	9.17	0.26
格状沙丘	最小值	0	1.02	16.78	18.78	5.09	4.24	0
	最大值	0	2.70	37.31	50.94	25.79	29.30	18.87
	平均值	0	1.83	26.01	32.46	15.70	16.66	7.34
线形沙丘	最小值	0	0	2.92	12.76	8.27	2.67	0
	最大值	0	14.75	70.79	65.66	74.35	50.41	65.47
	平均值	0	1.79	17.52	32.47	21.84	11.76	14.62
总计	最小值	0	0	0	6.74	5.09	0	0
	最大值	0	14.75	70.79	73.41	74.35	50.41	65.47
	平均值	0	0.89	13.14	41.34	31.60	8.55	4.47

从不同沙丘类型来看, 新月形沙丘、新月形沙丘链、横向沙垄表层沉积物均以细沙为主, 平均含量分别为 46.06%, 47.52% 和 40.91%; 中沙次之, 平均含量分别为 39.85%, 31.04% 和 36.63%。粉沙和极粗沙的含量很低, 总和不超过 2%, 无黏土组分。格状沙丘与线形沙丘表面沙粒仍以细沙为主, 平均含量分别为 32.46% 和 32.47%。但相对前 3 种沙丘类型细沙和中沙含量下降, 粗沙、极粗沙、粉沙、极细沙含量上升, 且粗沙和极粗沙最为显著。

### 2.2 频率曲线

#### 2.2.1 自然频率曲线 粒度频率分布曲线可辨识

颗粒的运移模式, 蕴含丰富的沉积环境信息<sup>[34]</sup>。由图 2 可知, 自然频率分布曲线呈单峰和双峰分布模式, 其中新月形沙丘、新月形沙丘链、横向沙垄为单峰分布, 曲线呈尖窄型。新月形沙丘与新月形沙丘链表面沙粒的频率分布较为接近, 峰值粒径介于 200~300  $\mu\text{m}$ , 横向沙垄的峰值粒径介于 300~400  $\mu\text{m}$ 。格状沙丘表层沙物质呈双峰分布模式, 主峰峰值介于 100~200  $\mu\text{m}$ , 次峰出现于 700~800  $\mu\text{m}$  之间。线形沙丘表面沉积物一般呈单峰分布, 少数样品出现双峰分布, 主峰峰值介于 300~400  $\mu\text{m}$ , 次峰介于 1 100~1 200  $\mu\text{m}$ 。

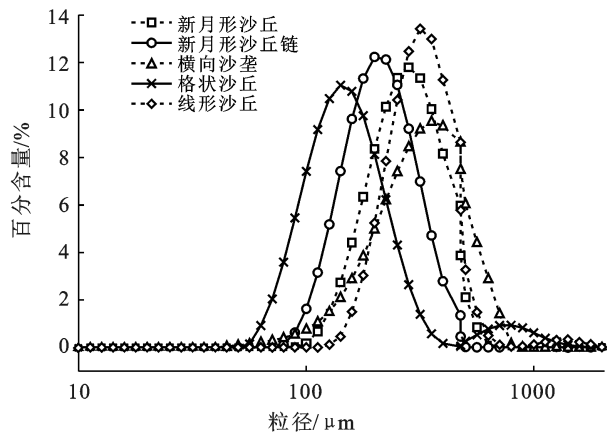


图 2 柴达木盆地西南缘不同类型沙丘表层沉积物粒度频率曲线

2.2.2 累积频率曲线 累积频率曲线揭示了沉积物搬运方式与粒度分布之间的关系<sup>[34]</sup>。针对每一种类型的沉积物各选取 3 条具有代表性的频率累积曲线

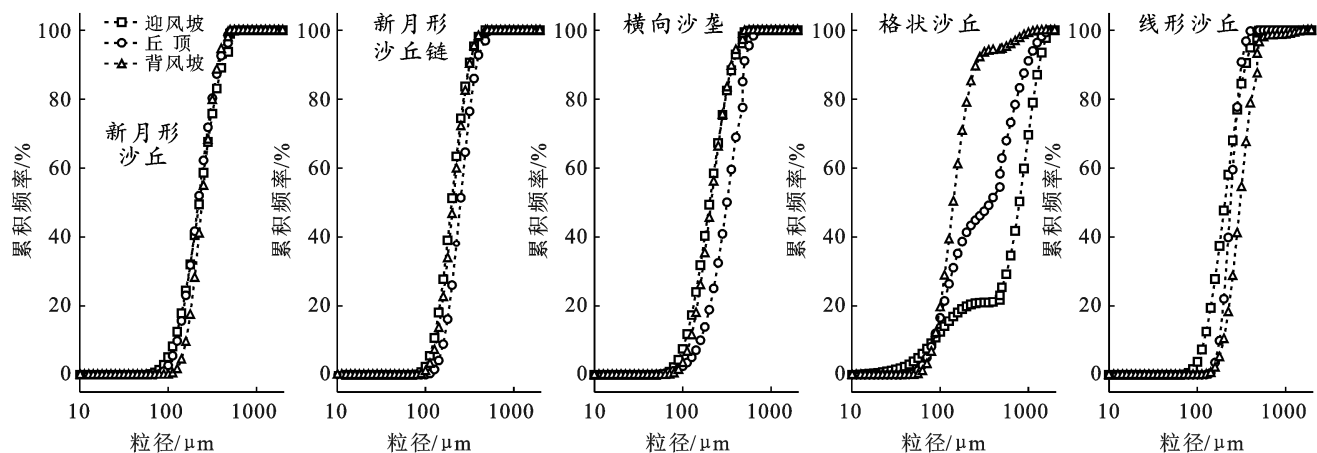


图 3 柴达木盆地西南缘不同类型沙丘沉积物粒度累积频率曲线

### 2.3 粒度参数及其相互之间的关系

2.3.1 粒度参数 平均粒径体现沉积物颗粒的大小,说明粒度分布的集中趋势<sup>[1]</sup>。柴西南沙区沙丘表层沉积物的平均粒径介于 $-0.14 \sim 3.49 \Phi$ ,属于极细沙到极粗沙粒级,平均值为 $2.02 \Phi$ 。从不同沙丘类型来看,线形沙丘表面沙物质最粗,平均粒径为 $1.80 \Phi$ ,其次为新月形沙丘 $2.02 \Phi$ ,新月形沙丘链表面沙物质最

(图 3)。由图 3 可知,沙丘沉积物的累积频率曲线以一段式为主,两段式出现在线形沙丘的背风坡、格状沙丘的丘顶及背风坡,三段式仅出现在格状沙丘的迎风坡。其中,新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙垄累积曲线均为一段式,指示跃移组分。

线形沙丘迎风坡和丘顶累积频率曲线为一段式,指示跃移组分;而背风坡为二段式,指示跃移组分和蠕移组分,以跃移质为主,跃移质和蠕移质的分段节点介于 $500 \sim 600 \mu\text{m}$ 。格状沙丘最为复杂,其中丘顶和背风坡累积曲线为两段式,指示跃移组分和蠕移组分,以跃移质为主,分段节点介于 $600 \sim 700 \mu\text{m}$ 。迎风坡累积曲线表现为三段式,分别指示悬移组分、跃移组分和蠕移组分,悬移质和蠕移质的分段节点介于 $50 \sim 70 \mu\text{m}$ ,跃移质和蠕移质的分段节点介于 $600 \sim 700 \mu\text{m}$ 。

细为 $2.16 \Phi$ 。与柴达木盆地其他区域相比(表 3,图 4),平均粒径粗于盆地中部的察尔汗盐湖沙漠沙( $2.38 \Phi$ )<sup>[28]</sup>和盆地东北部的哈勒腾河流域沙漠沙( $2.28 \Phi$ )<sup>[16]</sup>。与其他沙漠相比,平均粒径细于巴丹吉林沙漠( $1.78 \Phi$ )<sup>[3]</sup>和腾格里沙漠( $1.96 \Phi$ )<sup>[3]</sup>,但粗于库姆塔格沙漠( $2.14 \Phi$ )<sup>[23,35]</sup>和纳米布沙漠( $2.15 \Phi$ )<sup>[6]</sup>。在世界沙海中,属于中等粒级。

表 3 不同沙漠沙丘粒度参数比较

沙漠名称	平均粒径 $M_z$	分选系数 $\sigma_1$	偏度 $SK_1$	峰度 $K_g$	参考文献
柴西南沙区	$2.02\Phi(-0.14 \sim 3.49\Phi)$	$0.66(0.32 \sim 1.59)$	$0.02(-0.23 \sim 0.68)$	$0.94(0.58 \sim 1.53)$	本研究
察尔汗盐湖	$2.38\Phi(0.26 \sim 7.10\Phi)$	$0.76(0.38 \sim 2.32)$	$0.11(-0.19 \sim 0.55)$	$1.25(0.77 \sim 2.85)$	[28]
哈勒腾河流域	$2.28\Phi(1.01 \sim 2.90\Phi)$	$0.60(0.28 \sim 1.74)$	$(-0.62 \sim 0.58)$	$(0.58 \sim 1.72)$	[16]
巴丹吉林沙漠	$1.78\Phi(0.06 \sim 2.65\Phi)$	$0.61(0.35 \sim 1.36)$	$0.05(-0.37 \sim 0.47)$	$0.97(0.67 \sim 1.63)$	[3]
腾格里沙漠	$1.96\Phi(0.45 \sim 3.03\Phi)$	$0.53(0.36 \sim 1.13)$	$0.02(-0.32 \sim 0.47)$	$0.96(0.91 \sim 1.25)$	[3]
库姆塔格沙漠	$2.14\Phi(1.55 \sim 2.92\Phi)$	$0.69(0.41 \sim 1.11)$	$0.06(-0.11 \sim 0.31)$	$0.96(0.77 \sim 1.23)$	[23,35]
塔克拉玛干沙漠	$3.53\Phi(3.15 \sim 3.6\Phi)$	$0.35(0.27 \sim 0.39)$	$-0.15(-0.67 \sim 0.47)$	$1.22(0.76 \sim 2.96)$	[19]
纳米布沙漠	$(2.10 \sim 2.20\Phi)$	$(0.55 \sim 0.84)$			[6]

分选系数( $\sigma_1$ )指示颗粒的分选程度,即颗粒大小均匀程度,分选系数数值越小,分选性越好,反之,分选性越差<sup>[1]</sup>。柴西南沙区沙丘沉积物分选系数介于 0.32~1.59 之间,平均值为 0.66,分选性自极好到较差均有表现,以分选较好和好为主,分别占测试样品的 33%和 30%。从平均结果来看,线形沙丘分选最好,分选系数平均为 0.54;其次为新月形沙丘,分选系数平均为 0.61;格状沙丘分选最差,分选系数平均为 1.15。与柴达木盆地其他区域相比,分选好于察尔汗盐湖沙漠沙(0.76)<sup>[28]</sup>,但差于哈勒腾河流域沙漠沙(0.60)<sup>[16]</sup>。与其他沙漠相比,分选与库姆塔格沙漠相近(0.69)<sup>[23,35]</sup>,而差于其他沙漠。

偏度( $SK_1$ )体现了粒度分布的对称性,同时也表明了平均值与中位数的相对位置<sup>[31]</sup>。柴西南沙区沙丘沉积物偏度介于-0.23~0.68,从负偏到极正偏均有出现,平均值为 0.02,总体上呈近对称分布,占有测试样品的 75%。但就某一类型沙丘而言,各种偏度出现的频率差异较大。新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙垄近对称出现的频率为 60%~80%,正偏 10%~40%,负偏 4%~20%,均未出现极负偏和极正偏。线形沙丘近对称分布达 86%,其余 14%的沙样表现为正偏和极正偏。格状沙丘负偏占 60%,近对称和正偏各占 20%。各沙丘类型偏度分布特征表明,除格状沙丘表现为负偏外,其他沙丘类型均以近对称为主。

峰度( $K_g$ )是频率分布曲线尖锐程度的直观反映,体现了分布中心与尾端的关系<sup>[31]</sup>。区内沙丘沉积物峰度值介于 0.58~1.53,表现为极窄至很宽分布,平均值为 0.94,以中等峰态占优,占比 85%。不同沙丘类型均以中等峰态为主,其偏度值和峰度值与腾格里沙漠最为接近。

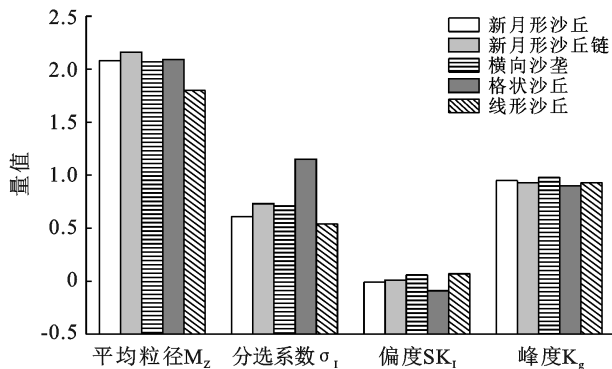


图 4 柴达木盆地西南缘不同类型沙丘的粒度参数

2.3.2 参数之间的相关关系 在粒度分析中,研究者们通常用平均粒径与其他 3 个参数做散点图,以发现

不同类型、不同沉积环境下的物质分选差异<sup>[31]</sup>。通过对柴西南沙区 60 个样本沙丘的平均粒径与其他 3 个参数的相关关系进行分析(图 5),发现平均粒径与分选系数成正相关关系,即随平均粒径变细,分选逐渐变好,尤以格状沙丘最为显著。当峰度 $<0.9$ 时,平均粒径与峰度呈负相关;当峰度 $>0.9$ ,呈正相关。平均粒径与偏度无明显的相关性。

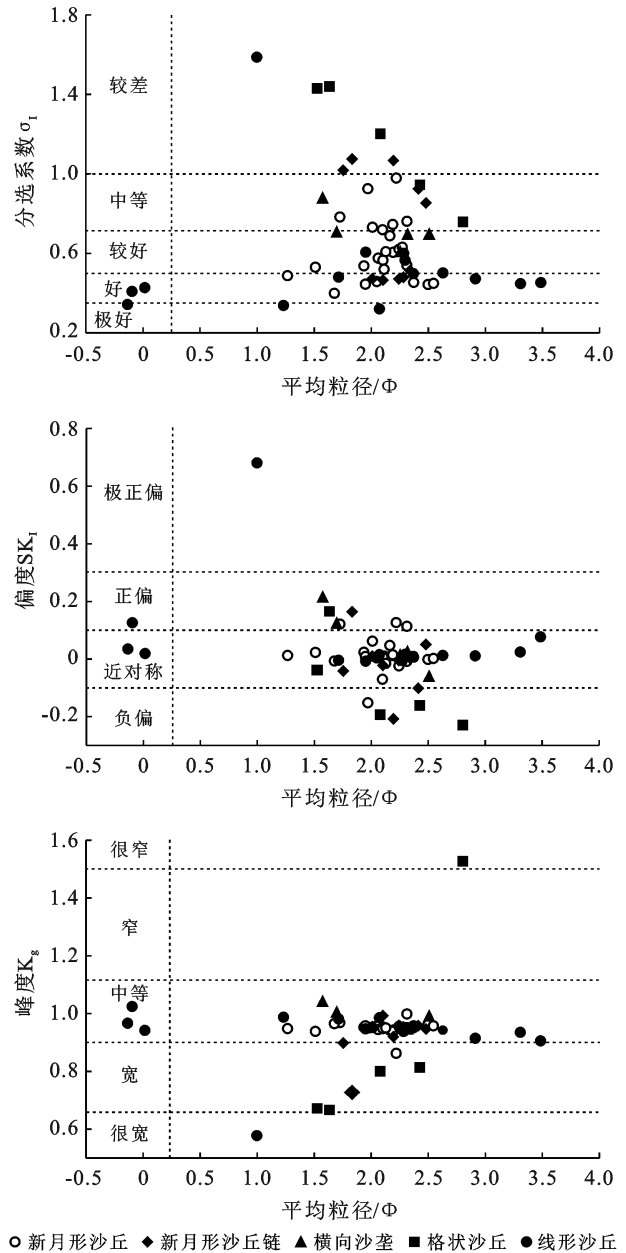


图 5 柴达木盆地西南缘不同类型沙丘粒度参数之间的关系

## 2.4 粒度特征所反映的沉积环境

粒度数据和粒度参数特征可以反映沉积物的形成环境<sup>[1]</sup>。将粒度参数带入到 Sahu 公式<sup>[21]</sup>中,由判别结果可知柴西南沙区的沉积环境较复杂。其中, $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, BD_2, L_1, L_3$  为风成环境, $L_2$  为海滩环境, $BD_1, T_1$  为浅海环境, $N_1$  为河流环境。根据地

貌格局和沉积环境来看,  $BD_1, T_1, L_2$  并不具备海洋沉积条件, 据其地理位置及地貌环境推测可能是湖泊沉积环境,  $BD_1, T_1$  两侧分布有巴音格勒河、那陵格勒河和开木棋河, 北部分布着甘森湖和台吉乃尔河, 河湖较为集中。

## 3 讨论

### 3.1 沙丘沉积物粒度特征差异

对柴西南沙区不同类型沙丘的粒度分析表明, 线形沙丘粒径最粗且分选最好, 而格状沙丘分选最差。新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙垄的粒度参数相近, 无明显差异。分选系数与风力作用、沙丘发育时间以及距离沙源地远近等因素相关, 一般沉积物所受风力作用时间越长、强度越大, 沙丘发育时间越长、距离沙源地越远, 分选越好<sup>[17]</sup>。柴西南沙区沙丘输沙时间和距离整体较短, 故在柴西南沙区沙源地远近并不是影响沙丘粒度差异的主要原因<sup>[36]</sup>。因此, 可以认为柴西南沙区沙丘沉积物粒度参数的差异主要受控于风况特征。从风力作用来看, 新月形沙丘、新月形沙丘链和横向沙垄都受单一风向作用形成, 且在空间分布上相互连接, 沙丘沉积物的粒径集中, 粒度参数相近。线形沙丘是在 NW, WNW 双向风的作用下, 沿合成输沙风方向延伸形成的, 沙物质经双向风的作用, 分选稍好于其他类型沙丘。

相比之下, 格状沙丘是目前研究程度比较低的沙丘类型, 并且关于其成因有较大的争议。以 Cooper<sup>[37]</sup> 为代表的研究者认为, 格状沙丘是单向风作用下横向沙丘或新月形沙丘的背风侧顺风向延伸形成。吴正等<sup>[38]</sup> 认为格状沙丘受两个近乎垂直方向风的作用, 主导起沙风形成主梁, 次级起沙风形成副梁。哈斯<sup>[2]</sup>、刘英姿<sup>[39]</sup> 提出格状沙丘是由主风向作用形成的横向沙丘和主次风交替作用形成的纵向沙丘叠置而成。根据小灶火风玫瑰图可知, 柴西南沙区东部格状沙丘是在沙源供应较为丰富的情况下, 受主风向 WNW 风影响, 由新月形沙丘两翼延伸, 前后连接形成。格状沙丘东西两侧各分布拉陵灶火河和开木棋河, 沙物质来源多样。同时, 沙丘南部、东部有山体环绕形成地形障碍, 导致风沙流在其周围减速堆积, 捕获固定一定量的细粒物质, 使得分选较差。综上所述, 沙物质来源、风况、地形是影响柴西南沙区沙丘沉积物粒度特征差异的主要原因。

从宏观来看, 柴西南沙区与其他沙漠沙丘粒度特征相比, 沙丘沉积物的平均粒径为  $2.02 \Phi$ , 在世界沙海中属于中等粒级。分选系数与库姆塔格沙漠相近<sup>[23, 35]</sup>, 差于其他沙漠, 偏度和峰态与腾格里沙漠最

为接近。这可能与沙丘发育环境、风况等因素有关。于禄鹏等<sup>[36]</sup> 通过光释光测年法推断出柴西南沙区沙丘堆积始于约  $4 \sim 3 \text{ ka}$ , 沙丘年代较为年轻, 沙物质未经过风力的长距离搬运, 因而分选较差。库姆塔格沙漠与柴西南沙区两沙漠都深居内陆, 地理位置相近, 风沙地貌均发育在山前冲洪积平原上, 山间发育众多沟谷, 周边山脉岩石遭受风化后产生的碎屑被风、流水等外营力输送到山前堆积成为沙物质的主要来源之一<sup>[1, 29]</sup>, 相似的发育环境使得库姆塔格沙漠与柴西南沙区的分选系数相近。而腾格里沙漠内部湖盆广布, 沙物质主要来自内陆湖泊沉积和一些洪积—冲积物<sup>[40]</sup>。其在西风环流的控制下, 以 NW 风为主, 沙漠东南部为双风向, 主风为 NW 风, 次风为 NE 风, 年平均风速  $2.9 \sim 3.7 \text{ m/s}$ <sup>[3]</sup>, 与柴西南沙区的风况条件相近。风力对沙物质的搬运和分选是影响沉积物粒度特征的主要因素<sup>[1]</sup>, 故腾格里沙漠与柴西南沙区的粒度参数最为接近。

### 3.2 沙丘沉积环境及沉积物来源

利用粒度特征提取沉积环境信息对于恢复古环境、探究沙物质来源具有重要意义。由上述分析可知, 柴西南沙区沉积环境较复杂, 且区域差异明显, 西北部(即巴音格勒河以西区域)为风成环境, 东南部为洪积—冲积环境、湖泊沉积环境、风成环境兼有。结合区域环境进行分析, 这可能受河流水动力条件的影响。沙区西北部海拔较高, 区内季节性河流冲蚀形成的沟谷, 受季节性冰雪融水的影响, 流程较短, 河水均在出山口不远即全部流失殆尽, 水动力弱, 挟沙能力弱。东南部分布有巴音格勒河、那陵格勒河、开木棋河、拉陵灶火河等常年性河流, 水量丰富, 挟沙能力强, 带来了丰富的洪积—冲积物。北部分布甘森湖和台吉乃尔河, 河湖较为集中, 提供了湖相沉积物。因此, 沙区西北部受流水作用小, 受风力作用显著, 以风成沙为主。东南部受风力和流水交互作用, 河流冲积沙、河湖沉积沙、风成沙兼有。最后, 结合风况信息和沉积环境可推断柴西南沙区沙丘沉积物的主要来源有: ①祁曼塔格山岩石风化产生的碎屑物, 被风、流水等外营力输送到山前地区; ②山前流水作用二次搬运并堆积的洪积—冲积物和湖相沉积物。

## 4 结论

(1) 柴西南沙区沙丘表层沉积物以细沙为主, 中沙次之, 含量分别为  $63\%$  和  $27\%$ ; 平均粒径介于  $-0.14 \sim 3.49 \Phi$ , 平均值为  $2.02 \Phi$ ; 分选系数介于  $0.32 \sim 1.59$ , 平均值为  $0.69$ , 以分选较好和好为主; 偏度值介于  $-0.23 \sim 0.68$ , 平均值为  $0.02$ , 总体呈现近对

称分布;峰度值介于 0.58~1.53,平均值为 0.94,以中等峰态占优。

(2) 线形沙丘粒径最粗且分选最好,而格状沙丘分选最差。粒径与分选系数成正相关关系,即随平均粒径变细,分选逐渐变好,尤以格状沙丘最为显著。当峰度 $<0.9$ 时,平均粒径与峰度呈负相关;当峰度 $>0.9$ ,呈正相关。平均粒径与偏度无明显的相关性。

(3) 自然频率分布曲线呈单峰和双峰分布模式。新月形沙丘、新月形沙丘链、横向沙垄为单峰分布,粒径集中、沉积环境简单。线形沙丘表面沉积物一般为单峰分布,少数样品出现双峰分布,格状沙丘表层沙粒呈双峰分布。累积频率曲线图式为一阶段式、二阶段式、三阶段式,近地表风沙运动以跃移为主。

(4) 柴西南沙区沉积环境较复杂,且区域差异明显,西北部(即巴音格勒河以西区域)为风成环境,以风成沙为主。东南部受风力和流水交互作用,为洪积—冲积和湖相沉积环境,河流冲积沙、河湖沉积沙、风成沙兼有。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 董治宝,苏志珠,钱广强.库姆塔格沙漠风沙地貌[M].北京:科学出版社,2011.

[2] 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.

[3] 李恩菊.巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠沉积物特征的对比研究[D].陕西 西安:陕西师范大学,2011.

[4] 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.

[5] Lancaster N. The geomorphology of desert dunes [M]. London: Routledge, 1995.

[6] Lancaster N. The Namib Sand Sea: Dune forms, processes and sediments [M]. Rotterdam: Balkema, 1989.

[7] H J, Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes [J]. The Geographical Journal, 1941,98(2):109.

[8] Folk R L. Longitudinal dunes of the northwestern edge of the Simpson desert, northern territory, Australia ( I ): Geomorphology and grain size relationships [J]. Sedimentology, 1971,16(1/2):5-54.

[9] 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):1629-1635.

[10] 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.

[11] Barndorff-nielsen O, Dalsgaard K, Halgreen C, et al. Variation in particle size distribution over a small dune [J]. Sedimentology, 1982,29(1):53-65.

[12] 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.

[13] 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):471-478.

[14] 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.

[15] Li Jiyan, Dong Zhibao, Zhang Zhengcai, et al. Grain-size characteristics of linear dunes on the northern margin of Qarhan Salt Lake, Northwestern China [J]. Journal of Arid Land, 2015,7(4):438-449.

[16] 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):68-78.

[17] Ahlbrandt T. Comparison of textures and structures to distinguish eolian environments, Killpecker dunefield, Wyoming [J]. The Mountain Geologist, 1975.

[18] Lancaster N. Grain size characteristics of Namib Desert linear dunes [J]. Sedimentology, 1981,28(1):115-122.

[19] 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.

[20] 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):22-29.

[21] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments [J]. SEPM Journal of Sedimentary Research, 1964,34:73-83.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 焦原磊.巴丹吉林沙漠周边沉积物特征[D].陕西 西安:陕西师范大学,2015.

[25] 马茜茜,谢小松,肖建华,等.阿联酋迪拜中部沙漠沉积物粒度特征及其沉积环境分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(11):104-109.

[26] 曾永年,冯兆东,曹广超.末次冰期以来柴达木盆地沙漠形成与演化[J].地理学报,2003,58(3):452-457.

[27] 郭岐山,丁小军.柴达木盆地耙状线形沙丘沉积物粒度特征及其对沙丘形成的意义[J].干旱区资源与环境,2020,34(3):196-203.

[28] 鲍锋,董治宝.察尔汗盐湖沙漠沙丘沉积物粒度特征分析[J].水土保持通报,2014,34(6):355-359.

[29] 王萌,郜学敏,屈欣,等.柴达木盆地西南缘山前沙丘区沙丘地貌形态特征[J].中国沙漠,2021,41(5):166-174.

[30] 郑玲,孙芙蓉,雷春苗,等.格库铁路青海段沿线大风特征统计分析[J].青海环境,2021,31(4):181-184.

[31] 成都地质学院陕北队.沉积岩(物)粒度分析及其应用[M].北京:地质出版社,1978.



- [16] 董雪, 迟悦春, 许德浩, 等. 西鄂尔多斯荒漠灌丛土壤粒径分形特征与养分的耦合关系[J]. 草业科学, 2020, 37(12): 2403-2413.
- [17] 李艳龙, 孙虎, 王贵平. 近 34 年来内蒙古杭锦旗气候变化的主要特点分析[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(12): 71-76.
- [18] 厉静文, 郭浩, 吕永军, 等. 磴口县引种胡杨的生长规律及其评价[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(1): 97-104.
- [19] 于强, 岳德鹏, 张启斌, 等. 磴口县景观格局演变特征及生态网络构建[J]. 中国沙漠, 2017, 37(3): 601-609.
- [20] 曲艳, 李青丰. 磴口县不同生境条件下的群落结构及多样性变化[J]. 草原与草业, 2019, 31(3): 18-27.
- [21] 赵一之, 赵利清, 曹瑞. 内蒙古植物志[M]. 3 版. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 2019.
- [22] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 15-17.
- [23] 赵丽娅, 钟韩珊, 赵美玉, 等. 围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1783-1790.
- [24] 张锦春, 刘长仲, 姚拓, 等. 乌兰布和沙漠天然植物区系特征及地理成分分析[J]. 草原与草坪, 2013, 33(1): 29-33.
- [25] 包萨如拉, 赵利清, 朴顺姬, 等. 西鄂尔多斯维管植物区系特征分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2): 428-436.
- [26] 张瑞, 刘芳, 郝玉光, 等. 乌兰布和东北部荒漠—绿洲生态交错带植被特征及其群落多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 196-200.
- [27] 许冬梅, 刘彩凤, 谢应忠, 等. 毛乌素沙地南缘生态过渡带植物多样性的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(3): 153-157.
- [28] 何明珠, 张志山, 李小军, 等. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释(II):  $C_4$  植物组成、分布特征与环境的关系[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 57-62.
- [29] 何明珠. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释(III): 植物功能群多样性对环境因素的响应[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 278-286.
- [30] 张景光, 王新平, 李新荣, 等. 荒漠植物生活史对策研究进展与展望[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 306-314.
- [31] Li Xinrong, Zhang Zhishan, Zhang J G, et al. Association between vegetation patterns and soil properties in the southeastern tengger desert, China [J]. Arid Land Research and Management, 2004, 18(4): 369-383.
- [32] El-Ghani M M A, Amer W M. Soil-vegetation relationships in a coastal desert plain of Southern Sinai, Egypt [J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(4): 607-628.
- [33] Parker K C. Topography, substrate, and vegetation patterns in the Northern Sonoran desert [J]. Journal of Biogeography, 1991, 18(2): 151.
- [34] 董雪, 辛智鸣, 鲍芳, 等. 模拟降雨格局变化下白刺 (*Nitraria tangutorum*) 表型变异[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 127-134.
- [35] 周资行, 李真, 焦健, 等. 腾格里沙漠南缘唐古特白刺克隆分株生长格局及枝系构型分析[J]. 草业学报, 2014, 23(1): 12-21.
- [36] Grime J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: Immediate, filter and founder effects [J]. Journal of Ecology, 1998, 86(6): 902-910.
- [37] 黄元, 岳德鹏, 于强, 等. 磴口县地表水与地下水时空变化特征及交互作用[J]. 中国沙漠, 2019, 39(1): 161-170.
- [38] 周洪华, 陈亚宁, 李卫红. 塔里木河下游绿洲—荒漠过渡带植物多样性特征及优势种群分布格局[J]. 中国沙漠, 2009, 29(4): 688-696.
- [39] 何明珠, 张志山, 李小军, 等. 阿拉善高原荒漠植被组成分布特征及其环境解释(I): 典型荒漠植被分布格局的环境解释[J]. 中国沙漠, 2010, 30(1): 46-56.
- [40] 闫建成. 阿拉善荒漠植被空间格局及其形成机制[D]. 内蒙古呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
- [41] 杨光, 郝玉光, 包斯琴, 等. 乌兰布和沙漠绿洲东缘植被群落结构及物种多样性研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 257-261.
- [42] 李清河, 高婷婷, 李慧卿, 等. 乌兰布和沙漠东北部几种白刺群落植物多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(7): 137-141.

(上接第 64 页)

- [32] 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): 3-26.
- [33] 苏志珠, 梁爱民, 马义娟, 等. 库姆塔格沙漠典型线形沙丘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(4): 877-884.
- [34] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. Journal of Sedimentary Research, 1969, 39: 1074-1106.
- [35] 魏怀东, 徐先英, 王继和, 等. 库姆塔格沙漠沙丘的粒度特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 6-9.
- [36] 于禄鹏, 赖忠平, 安萍. 柴达木盆地中部与西南部古沙丘的光释光年代学研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 453-462.
- [37] Cooper W S. Coastal sand dunes of Oregon and Washington [J]. Geological Society of America, 1958.
- [38] 吴正. 塔克拉玛干沙漠成因的探讨[J]. 地理学报, 1981, 36(3): 280-291.
- [39] 刘英姿. 腾格里沙漠中格状沙丘形态及成因研究[D]. 陕西 西安: 陕西师范大学, 2013.
- [40] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.