

**Preliminary Study on Dynamic Characteristics of Grain Size Distribution in  
Surface Sediments of Tengger Desert**

**Wu Jun-fei<sup>1</sup>, Li Zai-jun<sup>1</sup>, Gu Guo-qiang<sup>1</sup>, Chen Ji-long<sup>1</sup>, Cao Xi-yu<sup>1</sup>, Wang  
Jing-jing<sup>1</sup>**

1.College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou  
730000, China

**Abstract:** In order to understand the relationship between grain-size characteristic of surface sediment and wind system in the Tengger Desert. Surface layer samples of desert were collected. After careful particle size measurement, the particle size was interpolated by IDW spatial interpolation. Based on modern wind observations and Google images, the spatial distribution of surface sediment grain size of Tengger Desert is preliminarily understood. There is a clear consistency between the distribution of sand dune surface grain size and the prevailing wind direction in the desert. The east and west of the desert show the trend of decreasing from NE to SW and from NW to SE, and the low value areas of NE, SW and NW margin areas are caused by wind fields, vegetation and regional topography respectively. Although the analysis result is limited by the sampling density, it generally reflects the control of the wind system on the surface sediment grain size of the dunes, and also indirectly reflects the main source of the Tengger Desert material, the alluvial fan of Shiyang River and the alluvial and diluvial fan of Helan Mountain.

**Key words:** Tengger Desert; aeolian environment; partial-size distribution; inverse distance weighted(IDW) interpolation

## 腾格里沙漠表层沉积物粒度空间分布的动力学特征初探

**摘要:** 为了解沙漠现代沙丘表层粒度空间分布特征与风力系统关系,在腾格里沙漠采集了沙丘表层样品,经过细致的粒度测量,运用 IDW 空间插值法对粒度进行空间插值。结合现代风力观测和沙丘走向结果,对腾格里沙漠沙丘表层沉积物粒度空间分布特征有了初步认识:沙丘表层粒度空间分布与沙漠盛行风向具有明显的一致性,沙漠东、西部分别表现出由东北向西南和由西北向东南逐渐变小的趋势,沙漠东北、西南和西北边缘区域低值区分别是由多风场、地表植被和区域地形影响导致。虽然分析结果受采样密度的限制,但是总体反映了风力系统对沙丘表层沉积物粒度的控制,也间接反映了腾格里沙漠物质主要来源沙漠上风向石羊河冲积扇和贺兰山冲洪积扇。

**关键词:** 腾格里沙漠; 风力系统; 粒度分布; IDW 插值;

**中图分类号:** P931.3

粒度作为沉积物的最基本特征之一,是搬运动力大小、搬运距离以及沉积介质类型的综合反映 (Pye et al., 2009; 钱广强等, 2011; 宋洁等, 2016)<sup>[1-3]</sup>。沙漠沉积物作为风力对源区物质搬运、堆积和再分配的产物,其空间分布理论上记录了风力的强度和方向 (Fitzsimmons et al., 2009; Liu et al., 2014)<sup>[4-5]</sup>,同时还体现了区域地形、植被等障碍物对沙粒运移过程的改变。从风沙动力学角度来看,沙粒的起动、搬运和沉降与风速的大小有着明显的正相关关系,即风速越大,能吹起、搬运的沙粒的粒径越大,数量也越多,搬运距离也越远 (Liu et al., 2014)<sup>[5]</sup>。Sun et al. (2008) 研究表明<sup>[6]</sup>,黄土粉尘粒度大小 ( $d$ ) 与粉尘物质来源区域的距离 ( $D$ ) 成正态分布,对于粉尘源区的沙漠而言,表层沉积物的粒度空间分布是否也存在这种情况,仍有待考证。目前对于腾格里沙漠表层沉积物的粒度研究主要集中在区域尺度,如李超等 (2015)<sup>[7]</sup>通过研究同一风能环境下沙漠东南缘新生和原始横向沙丘表层沉积物的粒度,结果显示其研究区沙丘类型及部位的不同能导致其表层砂粒平均粒径差值最大能达到  $50\mu\text{m}$ ,但沙丘顶部与落

沙坡表层砂粒粒径差值在 10-30 $\mu\text{m}$  范围左右, 对于本实验插值结果而言, 影响较小; 李恩菊 (2011) <sup>[8]</sup>对腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠表层沉积物的粒度研究表明, 两沙漠表层砂粒粒径大小和分选性均存在空间差异, 认为与受区域沙山高度影响而形成的不同强度的风能环境有关; 庞红丽等 (2015) <sup>[9]</sup>对腾格里沙漠北缘不同类型沙丘表层沙粒粒度研究, 得出沙漠北缘沙粒的粒度在空间上表现出从物源区向沉积区粒径逐渐变细、分选变好的规律。刘陶等 (2011) <sup>[11]</sup>通过遥感解译获得的巴丹吉林沙漠沙丘走向结果显示, 在宏观尺度上, 巴丹吉林沙漠高大沙山的发育过程受风力影响显著, 主体受西北季风控制, 而在沙漠东南部受东南风的影响权重则有所增大。综上所述, 当前对腾格里沙漠表层沉积物粒度研究局限于区域尺度, 研究手段较为单一, 故本研究将利用遥感影像解译法、IDW 插值法和粒度分析法, 得到整个腾格里沙漠表层沉积物的粒度空间分布特征, 并对其动力学特征做出解释, 为研究区的沙漠形成演变机理、物源探讨等研究提供参考。

## 1.研究区概况与采样

腾格里沙漠位于阿拉善高平原的东南部, 介于贺兰山、祁连山与雅布赖山之间, 面积约为  $4.27\times 10^4\text{km}^2$ , 是中国第四大沙漠 (朱震达等, 1980) <sup>[12]</sup>。腾格里沙漠介于北纬  $37^{\circ}30'$ 至  $40^{\circ}$ , 东经  $102^{\circ}20'$ 至  $106^{\circ}$ 之间, 海拔位于 1200 ~ 1400 米之间。在行政区划上, 腾格里沙漠东部属内蒙古自治区的阿拉善左旗, 西部属甘肃省白银市和武威地区, 东南部边缘还有小部分属宁夏回族自治区的中卫市。腾格里沙漠位于中国西部干旱荒漠区、东部半干旱草原区与西南部高山高原寒冷区交合部位, 受西风环流和蒙古—西伯利亚高压的控制, 冬季盛行西北风, 夏季短时期盛行东北风, 年平均风速为 2.9 ~ 3.7m/s, 大风日数 20 ~ 50 天, 属于典型大陆性干燥气候, 以冷热剧变、干旱多风为特征 (张克存, 2008; 庞红丽等, 2

015) [13-14]。腾格里沙漠内部沙丘以流动沙丘为主，占 93%，其余为固定沙丘和半固定沙丘，一般高 10~20m，主要为格状沙丘和格状沙丘链，新月形沙丘分布在边缘地区（吴正，2009）[15]。

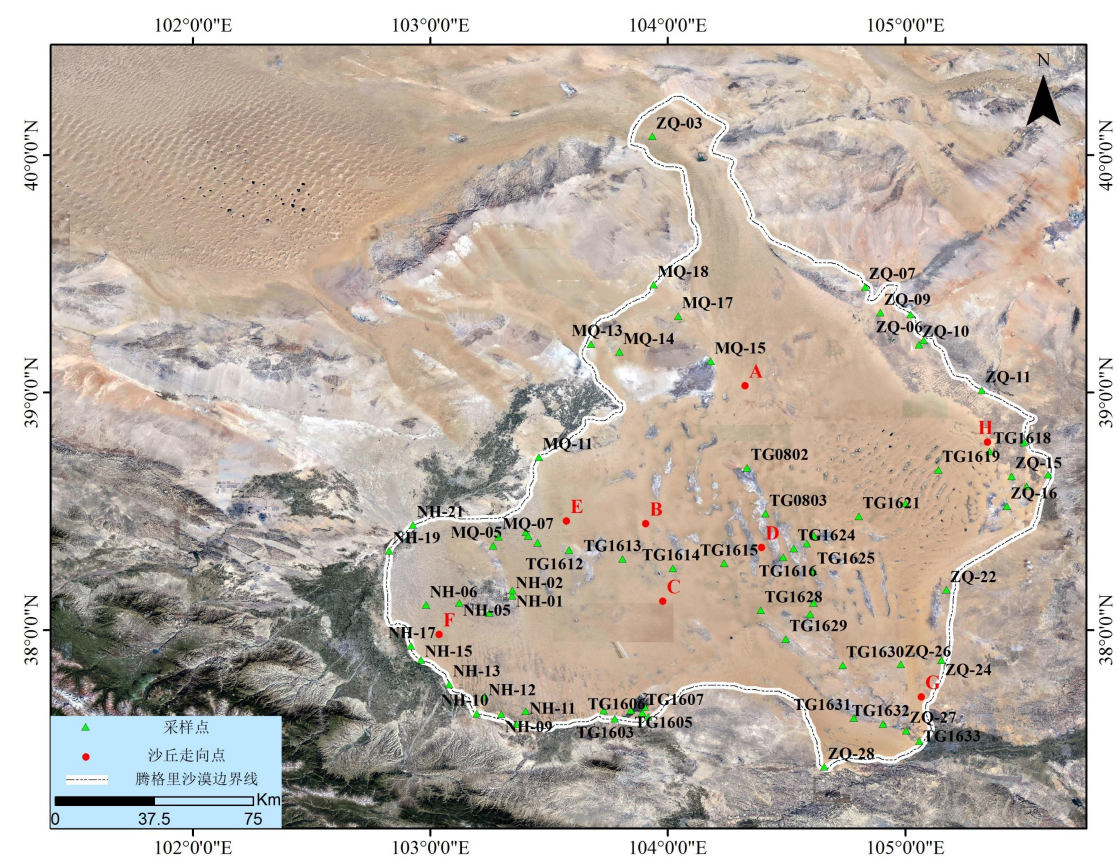


图 1 腾格里沙漠沙样样点分布图

Fig.1 Locations of samples in Tengger Desert

2008 年、2015 年和 2016 年，在腾格里沙漠共采集 72 个样品，采样点空间分布以求尽量覆盖整个腾格里沙漠，但由于交通原因，沙漠西南和东北部流动沙丘地区存在较大的空白区，但沙漠的东西和南北两个方向基本贯通。样品采样点都选择在人为活动干扰较少的自然地带，采样方法与 N. Lancaster (1989) [16]在纳米布沙漠采样方法类似：样品均匀采集于面积大约 0.2m×0.2m 的沙丘表层，采样深度为 0~1cm，样品重量为 300~500g，采样完成后对样品进行密封编号储存，然后记录周围地形环境。

样品	经度	纬度	高程/m	样点描述	样品	经度	纬度	高程/m	样点描述
NH-01	103°20′	38°09′	1474	固定沙丘顶	MQ-05	103°15′	38°21′	1496	移动沙丘顶
NH-02	103°20′	38°08′	1479	移动沙丘顶	MQ-07	103°17′	38°23′	1433	移动沙丘顶
NH-04	103°14′	38°43′	1497	固定沙丘顶	MQ-11	103°27′	38°43′	1353	固定沙丘顶
NH-06	102°59′	38°06′	1503	移动沙丘顶	MQ-13	103°40′	39°12′	1294	半固定沙丘顶
NH-08	103°21′	37°36′	1783	固定沙丘顶	MQ-14	103°47′	39°10′	1340	移动沙丘落沙坡
NH-09	103°17′	37°38′	1767	固定沙丘顶	MQ-15	104°10′	39°07′	1281	移动沙丘落沙坡
NH-10	103°11′	37°38′	1748	固定沙丘顶	MQ-17	104°26′	39°19′	1321	移动沙丘落沙坡
NH-11	103°24′	37°39′	1751	固定沙丘顶	MQ-18	103°56′	39°27′	1251	固定沙丘落沙坡
NH-12	103°13′	37°43′	1734	固定沙丘顶	NH-05	103°07′	38°06′	1494	半固定沙丘顶
NH-13	103°47′	37°46′	1611	固定沙丘顶	NH-15	102°57′	37°52′	1557	固定沙丘顶
TG1603	103°46′	37°37′	1651	移动沙丘顶	NH-17	102°55′	37°55′	1546	半固定沙丘顶
TG1604	103°54′	37°40′	1578	移动沙丘顶	NH-19	102°49′	38°19′	1423	固定沙丘顶
TG1605	103°50′	37°39′	1611	移动沙丘顶	NH-21	102°55′	38°26′	1396	移动沙丘顶
TG1606	103°55′	37°37′	1594	固定沙丘顶	TG0802	104°20′	38°41′	1320	移动沙丘顶
TG1607	103°53′	37°39′	1601	移动沙丘顶	TG0803	104°25′	38°29′	1336	移动沙丘顶
TG1608	103°24′	38°24′	1420	移动沙丘顶	TG1601	103°43′	37°39′	1648	移动沙丘落沙坡
TG1610	103°25′	38°24′	1465	移动沙丘顶	TG1614	104°01′	38°15′	1399	半固定沙丘顶
TG1611	103°27′	38°22′	1415	移动沙丘顶	TG1617	105°30′	38°47′	1381	固定活化沙丘顶
TG1612	103°35′	38°20′	1426	固定沙丘顶	TG1623	104°35′	38°21′	1340	半固定沙丘顶
TG1613	103°48′	38°17′	1425	移动沙丘顶	TG1629	104°29′	37°57′	1454	半固定沙丘顶
TG1615	104°14′	38°16′	1387	移动沙丘顶	ZQ-03	103°56′	40°04′	1391	移动沙丘落沙坡
TG1616	104°29′	38°18′	1353	移动沙丘顶	ZQ-05	105°01′	39°19′	1201	固定沙丘顶
TG1618	105°21′	38°45′	1310	移动沙丘顶	ZQ-06	105°04′	39°13′	1228	固定沙丘顶
TG1619	105°08′	38°40′	1319	移动沙丘顶	ZQ-07	104°49′	39°26′	1173	半固定沙丘落沙坡
TG1620	105°00′	38°32′	1361	移动沙丘顶	ZQ-09	104°53′	39°20′	1231	固定沙丘顶
TG1621	104°48′	38°28′	1340	移动沙丘顶	ZQ-10	105°03′	39°12′	1237	固定沙丘顶
TG1622	104°37′	38°23′	1338	移动沙丘顶	ZQ-11	105°19′	39°00′	1255	固定沙丘顶
TG1624	104°32′	38°20′	1341	固定沙丘顶	ZQ-13	105°36′	38°39′	1348	固定沙丘顶
TG1625	104°37′	38°14′	1358	移动沙丘顶	ZQ-14	105°30′	38°36′	1292	固定沙丘顶
TG1626	104°36′	38°06′	1313	移动沙丘顶	ZQ-15	105°26′	38°38′	1294	固定沙丘顶
TG1627	104°36′	38°03′	1429	移动沙丘顶	ZQ-16	105°25′	38°31′	1280	移动沙丘落沙坡
TG1628	104°23′	38°05′	1480	移动沙丘顶	ZQ-22	105°05′	38°10′	1370	移动沙丘落沙坡
TG1630	104°44′	37°51′	1476	固定沙丘顶	ZQ-24	105°09′	37°52′	1485	半固定沙丘顶
TG1631	104°46′	37°37′	1430	移动沙丘顶	ZQ-26	104°58′	37°51′	1460	移动沙丘顶
TG1632	104°54′	37°36′	1317	移动沙丘顶	ZQ-27	105°00′	37°34′	1272	移动沙丘落沙坡
TG1633	105°03′	37°31′	1271	移动沙丘顶	ZQ-28	104°39′	37°25′	1702	固定沙丘顶

表 1 采样点经纬度及采样部位

Tab.1 Latitude and longitude of samples and sampling position

## 2.方法

### 2.1 粒度测量

为了除去样品中的有机质、碳酸盐,在测量前对粒度样品进行较彻底的前处理(鹿比煜等,1997;郭峰等,2014)<sup>[17-18]</sup>,首先从每个样品中称取0.3g~0.5g放入150ml烧杯,加入10ml10%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>在加热板上煮沸以除去有机质,再加入10ml 10%的HCl直到不再产生气泡为止,以除去碳酸盐,然后停止加热,将烧杯注满蒸馏水。静置24小时后,用橡皮管抽掉上层清水,加入10ml浓度为0.05mol/L的六偏磷酸钠((NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>)分散剂,在超声波震荡仪上震荡5min,随即在英国Malvern公司生产的Master-size2000激光粒度仪上进行粒度测试,测试范围为0.02~2000μm,误差小于1%,所有测试实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

### 2.2 粒度空间插值

为重建腾格里沙漠表层沉积物的粒度空间分布,对沙样粒径进行空间插值分析,插值方法选取空间分析软件Arc-GIS中的Inverse Distance Weighted (IDW)插值法(严立文等,2010)<sup>[19]</sup>,IDW插值法具有空间表达能力强、类型过渡真实和较好体现带状分布规律的特点,其基本原理:插值点与样本之间越近,性质相似,反之则越不相似(杜鹤强等,2011)<sup>[20]</sup>。它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点所赋予的权重越大,其插值公式一般为(Bartier et al., 1996;张锦明等,2012)<sup>[21-22]</sup>:

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i^{-u} \times z_i)}{\sum_{i=1}^n d_i^{-u}}$$

式中,  $z_p$  为插值点的粒径;  $d_i$  为第  $i$  个采样点到插值点的距离,  $n$  为预测计算

中要使用的预测点周围样点的数量,  $d_i^{-u}$  为距离衰减函数, 权指数  $u$  往往为某一定值, 表示距离对插值点的影响模式。当  $u=0$  时, 距离没有影响; 当  $u=1$  时, 距离的影响是线性的; 当  $u \gg 1$  时, 快速减少了遥远位置的影响。Arcgis10.1 操作系统给出的合理权重值区间为 0.5-3, 因平均粒径在反演沙漠表层粒度空间分布中表现良好, 故选取剔除“孤点”后样品的平均粒径进行 IDW 插值, 选取 0.5、1、2、3 四个权重值进行对比实验, 结果显示随着权指数  $u$  的增加, 极值分布区的“牛眼”效应越明显 (见图 3), 权指数为 2 的实验结果最合理, 当前大部分学者也认为权指数为 2 时插值结果最好 (Declercq, 1996) [23], 故本插值实验中权指数  $u$  默认为 2。

### 2.3 沙丘走向与风向

为了探究风动力对于沙丘发育走向的影响, 从谷歌影像中下载了四幅沙漠内部沙丘影像 A、B、C、D 以及四幅距离气象站 50km 内的沙漠边缘影像 E、F、G、H, 并利用空间分析软件 Arc-gis 对其进行投影变换, 所采用的投影坐标系为 WGS 1984 UTM Zone 48N, 利用人工解译手段, 得到影像中沙丘走向。

由于实验条件限制, 风向数据引自张克存等 (2008) [13] 获取的民勤、武威、沙坡头以及阿拉善左旗气象站 1951 ~ 1980 年的多年平均起沙风数据, 整理后得到沙漠周边气象站多年起沙风风向图, 其中沙坡头和阿拉善左旗风向图显示沙漠东南缘、东北部区域还分别存在低风能的东北风、东南风, 这在当前学者 (Lv et al., 2009; 张正偲等, 2012) [24-25] 对于腾格里沙漠东部风向研究中得到验证, 说明风向数据资料准确性较高。

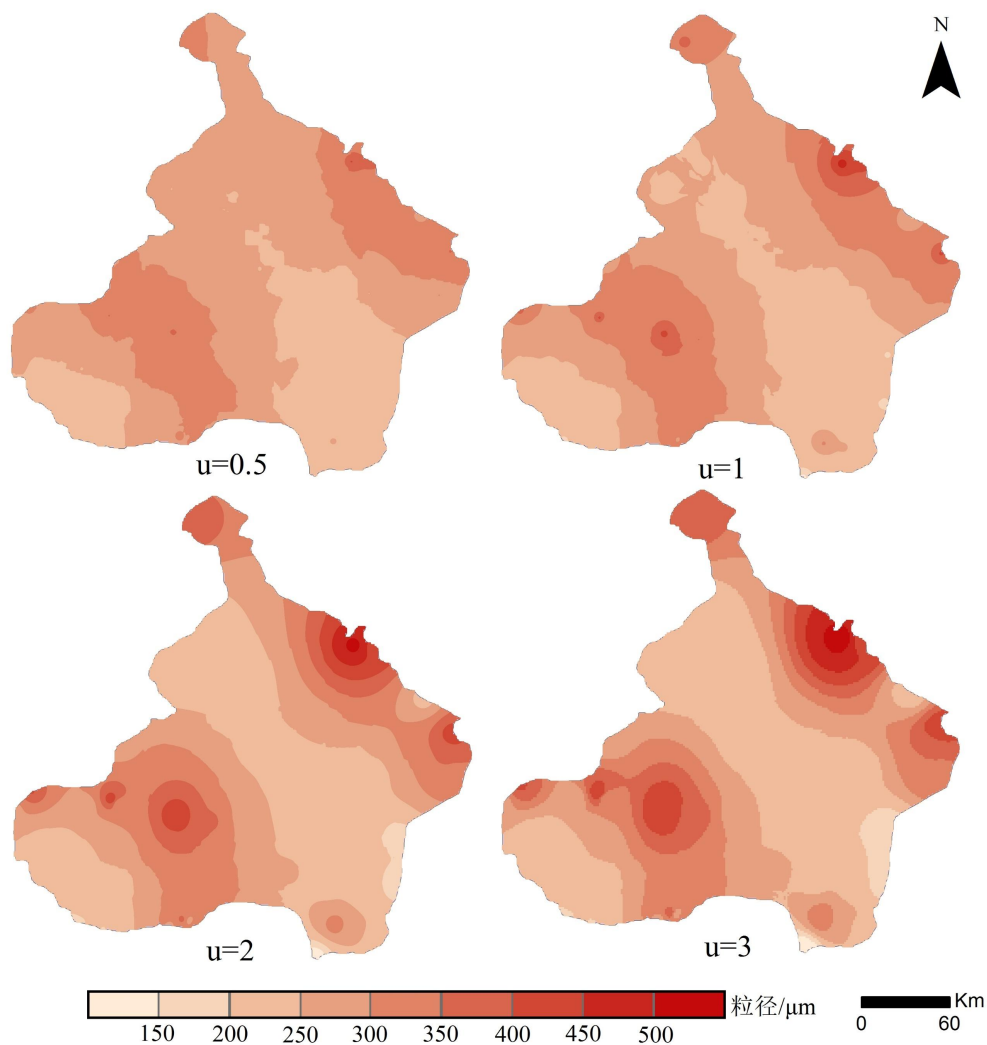


图 2 筛选“孤点”后样点平均粒径的多权重 IDW 插值对比图

Fig.2 Multi-Weight IDW Interpolation Comparison Chart of Average Particle Size of Sample Points after Screening "Soliton"

### 3.结果与讨论

#### 3.1 沉积物粒度频率分布曲线

孙东怀等 (2000) <sup>[26]</sup>对黄土的研究表明, 对于同一搬运物质而言, 具有一定动力分布的流体所搬运的沉积物的粒度总体的数学特征服从自然界的某种分布函数, 而在沙漠风成砂沉积物粒度研究领域中学者一般以 Weibull 分布函数作为基础拟合函数 (孙东怀等, 2001) <sup>[27]</sup>, 当搬运方式不同产生多成因组分时, 其粒



度频率曲线往往具有多峰特征, 因此沙漠表层沉积物的粒度频率分布曲线特征对于揭示样品砂的沉积环境具有重要意义。腾格里沙漠地表砂粒的平均粒径为  $261.6\mu\text{m}$  ( $1.93\phi$ ) , 介于  $104.7\text{--}513.3\mu\text{m}$  ( $0.93\text{--}3.26\phi$ ) 之间。依据粒度频率分布曲线特征, 将样品划分为单峰、双峰、不对称和平顶四类沙丘样品。

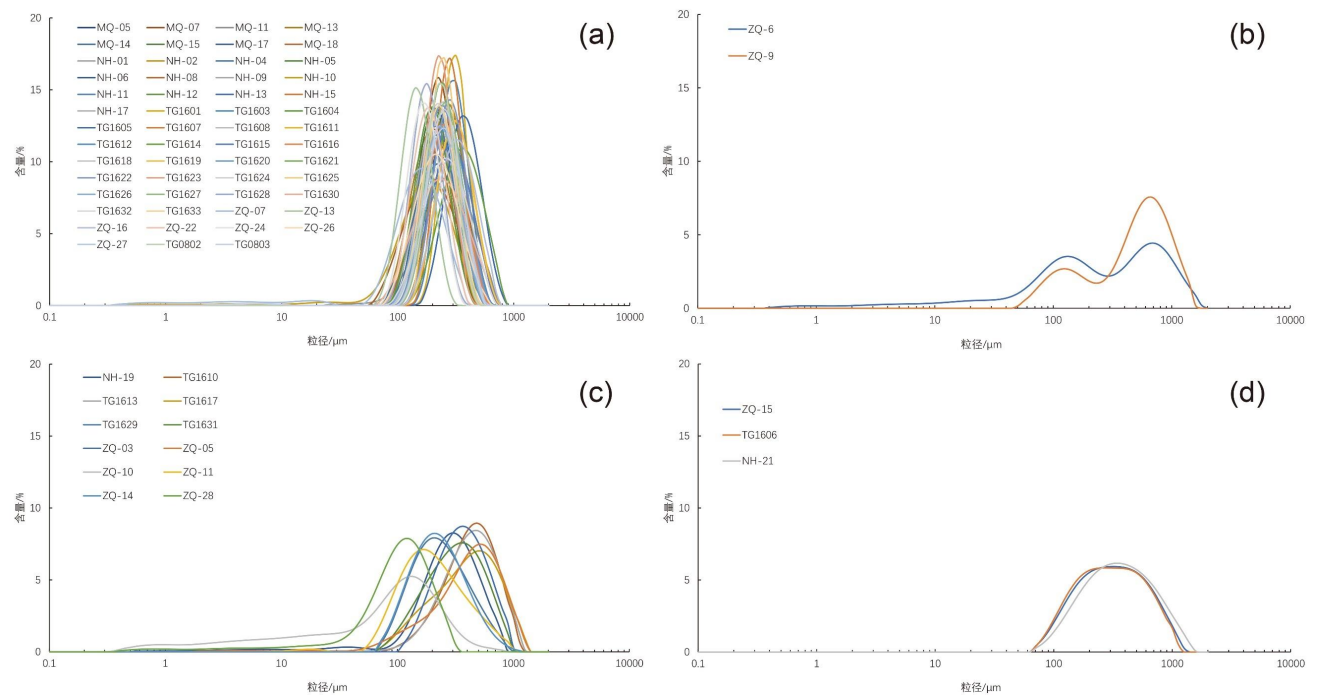


图3 单峰 (a) 、双峰 (b) 、不对称 (c) 和平顶 (d) 样品粒度频率分布曲线

Fig.3 The frequency distribution curves of grain size of single peak (a), double peak (b), asymmetric (c) and top (d) samples

单峰样品平均众数粒径为  $248.9\mu\text{m}$  ( $2.01\phi$ ) , 众数粒径范围为  $141.6\text{--}363.1\mu\text{m}$  ( $1.46\text{--}2.82\phi$ ) ; 平均粒径为  $238.1\mu\text{m}$  ( $2.07\phi$ ) , 平均粒径范围为  $142.2\text{--}358.1\mu\text{m}$  ( $1.48\text{--}2.81\phi$ ) , 平均中值粒径为  $225.6\mu\text{m}$  ( $2.15\phi$ ) , 平均中值粒径范围为  $136.5\text{--}347.7\mu\text{m}$  ( $1.52\text{--}2.87\phi$ ) , 属风沙运动中的跃移组分, 单峰样品的频率分布曲线峰度最窄, 反映出样品砂的分选性最好和采样点稳定的风能环境, 单峰砂样多采集于移动沙丘和固定活化沙丘。

双峰样品为 ZQ-6 和 ZQ-9, 众数粒径分别为  $709.6\mu\text{m}$  ( $0.49\phi$ ) 、  $632.5\mu\text{m}$  ( $0.$

66 $\phi$ )，平均粒径分别为 376.5 $\mu\text{m}$  (1.41 $\phi$ )、513.3 $\mu\text{m}$  (0.96 $\phi$ )，中值粒径分别为 230.9 $\mu\text{m}$  (2.11 $\phi$ )、491.1 $\mu\text{m}$  (1.03 $\phi$ )，属风沙运动中的蠕移组分，频率分布曲线中存在一个跃移组分峰，表现出双峰特征。ZQ-6 与 ZQ-9 样品位于沙漠东北部山麓区域，可以初步推测山地风可能是频率分布曲线双峰的成因，而这还需要对区域开展更为细致的研究。

不对称样品平均众数粒径为 316.9 $\mu\text{m}$  (1.66 $\phi$ )，众数粒径范围为 126.2–502.4 $\mu\text{m}$ (0.99–2.99 $\phi$ )，含量在 5.2–8.9%，平均粒径为 308.1 $\mu\text{m}$  (1.70 $\phi$ )，平均粒径范围为 104.7–446.5 $\mu\text{m}$  (1.16–3.26 $\phi$ )，平均中值粒径为 275.2 $\mu\text{m}$  (1.86 $\phi$ )，平均中值粒径范围为 84.5–411.8 $\mu\text{m}$  (1.28–3.56 $\phi$ )，频率分布曲线细组分尾峰为悬移组分，表现出不对称分布的双峰特征。有研究表明(杨宁宁等, 2011; 殷志强等, 2009) [28-29]，在沙漠沙搬运过程中，植被对大气中悬浮组分存在吸附作用，导致沉积物中细粒悬浮组分含量的增加。分析发现，不对称样品采样点主要位于沙漠边缘区域，处在绿洲与沙漠的过渡地带，植被较为茂盛，因此可以初步认为植被是影响频率分布曲线不对称的成因。

平顶样品平均众数粒径为 318.4 $\mu\text{m}$  (1.65 $\phi$ )，众数粒径范围为 282.5–355.7 $\mu\text{m}$ (1.49–1.82 $\phi$ )，含量在 5.8–6.2%，平均粒径为 366.8 $\mu\text{m}$  (1.45 $\phi$ )，平均粒径范围为 341.8–402.6 $\mu\text{m}$  (1.31–1.55 $\phi$ )，平均中值粒径为 301.6 $\mu\text{m}$  (1.73 $\phi$ )，平均中值粒径范围为 282.1–329.6 $\mu\text{m}$  (1.60–1.83 $\phi$ )，属风沙运动中的跃移组分和蠕移组分，粒度频率分布曲线的峰度较宽，粒度分布范围大，是跃移组分和蠕移组分部分重叠的结果，使得频率分布曲线表现出平顶的特征。

在搬运过程中，沙粒样品粒度分选性的好坏指示了沙粒沉积过程中风能环境的改变 (Breed et al., 1980) [30]，当风能环境增强时，粒径小的沙粒会在风场中

被搬运更远的距离,被搬运的沙粒的粒径也会变大,反之砂粒的粒径大小也体现了沉积风能环境的改变,因此同类型沙样样品的峰值粒径由细变粗的过程指示了样点风能环境逐渐增强,而频率分布曲线反映出的粉沙和粘土等极细组分,可能与环境中的背景浓度有关 (Vandenberghe, 2013) <sup>[31]</sup>。

### 3.2 沉积物粒度空间分布特征

为了进一步探究沙漠表层沉积物粒度空间分布特征,通过 IDW 插值法对样品平均粒径、中值粒径和众数粒径分别进行出图,针对沙漠出现的明显“牛眼”现象,进一步剔除“孤点”后得到沙漠整体的粒度空间分布图。从宏观尺度来看,腾格里沙漠东部表层沙粒粒径整体呈现由东北自西南逐渐变小趋势,沙漠西部表层沙粒粒径整体呈现出西北向东南逐渐变小趋势(见图 4-b、d、f),这与地表多年起沙风风向是一致的,沙漠东部、西部分别受到东北、西北风影响较大,这符合沙粒被搬运过程中从上风向至下风向沙粒的粒径会逐渐变细、分选变好的规律 (Pye et al., 2009) <sup>[1]</sup>。就平均粒径、中值粒径和众数粒径对沙漠粒度空间分布反演结果规律性而言,平均粒径最好,众数粒径次之,中值粒径最差,笔者认为可能是由于风动力在吹蚀搬运下垫面砂粒时,形成的风沙流包含不同粒级的粒度组分,而中值粒径和众数粒径在反映沙样粒度时存在较大偏差,导致反演结果不太理想,而平均粒径则能综合反映样品中如双峰、不对称和平顶等特征。

从微观尺度来看,区域的粒度分布特征不仅能反映区域风能环境,还可以反映区域地形、植被等要素对沉积物搬运的影响 (Mao et al.,2014) <sup>[32]</sup>。沙漠粒度空间分布中西北部、东北部以及西南区域出现的低值区(见图 4-a、c、e)具有不同成因。笔者试着对低值区成因做出解释,认为沙漠西北部低值区可能具有多种成因,首先由于位于西部边界雅布赖山地区,太阳辐射的不均匀分配,易形成

东南向山地风，影响沉积物的粒度分布；风沙在搬运过程中，气流风速沿迎风坡逐渐增大，并在坡顶达到最大，气流在坡顶和背风侧出现分离，形成过饱和风沙流，在重力作用下细颗粒物质在背风坡堆积，粗颗粒物质滚落至背风坡坡脚，这样就会出现落沙坡沙粒粒度较低的现象，而西北部大部分样品采集于落沙坡，导致样品粒度偏小，这与钱广强 (2011)、邵天杰 (2013) 等人的研究结果一致<sup>[2,33]</sup>。

沙漠东北部低值区位于北部高值区和东部高值区间，北部主导风向为西北风，东部主导风向为东北风，因此可以推测东北部低值通道是东北风和西北风共同作用的结果，同时东北部贺兰山山前沙漠采样点出现的低值“孤点”，是受贺兰山地形影响导致。沙漠西南区域低值区由于处于绿洲-沙漠的过渡带，地表植被覆盖度较高，地表植被对大气中悬移组分存在吸附作用，同时会阻挡粗颗粒物质向过渡带的搬运，导致沙粒粒径偏小。

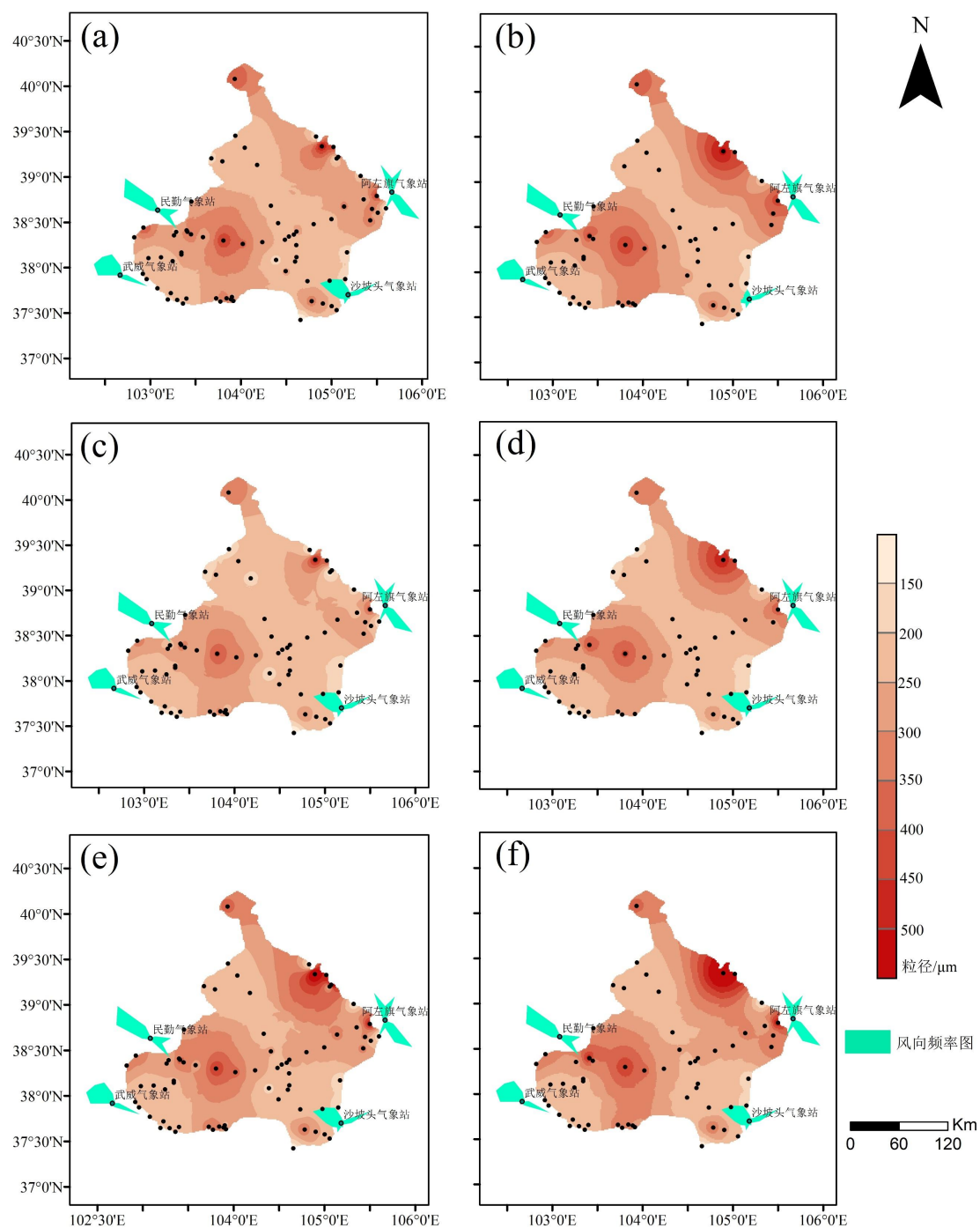


图 4 平均粒径 (a、b) 、中值粒径 (c、d) 及众数粒径 (e、f) 的粒度空间分布图，其中 b、d、f 滤去“孤点”

Fig.4 Grain size spatial-distribution of average particle size ( a, b), median particle size ( c, d), and mode size ( e, f), where b, d, f filter "solitaries"

### 3.3 沙丘走向与风向

八幅影像图中, 红色、黑色线条分别代表沙丘主梁和副梁, A 为新月型沙丘, B、H 为线性沙丘, C 为横向沙垄, D 为蜂窝状沙丘, E、F、G 为格状沙丘。B、C、D、E、F、G 中沙丘整体走向基本为 NE-SW 向, H 中沙丘走向为 ENE-WSW 向, A 中沙丘走向更接近 NNE-SSW 向, E、F、G 和 H 区域处于气象站周边 50km 距离内, 因此可以近似认为气象站风向为当地多年起沙风向, 通过对比分析影像 E、F、G、H 中沙丘走向与多年起沙风走向, 可以看出沙丘走向与当地主导风向有着明显的相关性, 沙丘主副梁走向与主次风向有着近乎垂直的关系, 主次风向的变化能够在沙丘走向中体现, 刘英姿 (2013) <sup>[34]</sup>和哈斯 (1998) <sup>[35]</sup>就曾对格状沙丘开展过相关研究, 揭示了沙丘主梁和副梁在横、纵气流作用下的形成机制, 影像 H 中线性沙丘受到了东南风为主, 北西北风为次的风向作用, 这与 Tsoar (1983) <sup>[36]</sup>提出的线性沙丘双风向理论基本一致。因此可以认为, 沙漠风动力条件是影响沙丘走向的重要因素; 反之, 沙丘走向也能够反映当地的风向特征, 那么依据 A、B、C、D 沙丘走向及坡向, 可以初步推断其主导风向为西北风, 影像 D 中复合沙丘主副梁走向还说明 D 地存在多种次风向。

沙粒搬运过程不仅受沉积物风能环境影响, 还与沙源区的物质级配有关, 有研究表明 (陈新闻等, 2016) <sup>[37]</sup>, 沙粒中粒径大于 70 $\mu\text{m}$  组分属于局地物质, 而整个沙漠粒径总体处于 100-500 $\mu\text{m}$  的跃移组分中, 因此可以认为沙漠中沙粒主要以跃移搬运作为局地搬运的主要形式。建立在对沙漠风动力及粒度分布特征理解的基础上, 笔者认为腾格里沙漠主要沙源区是西北部石羊河流域以及北部山体。



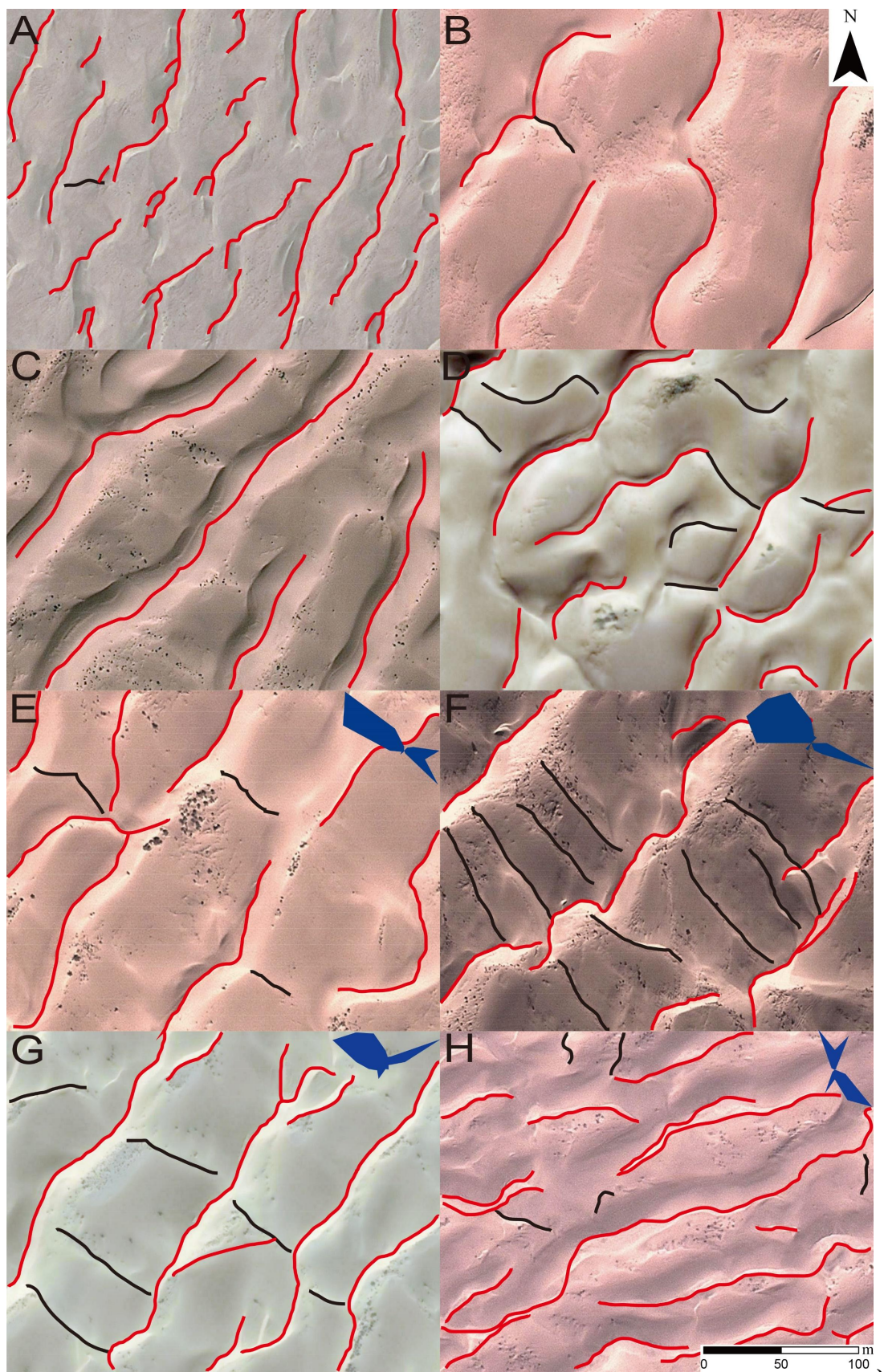


图 5 腾格里沙漠沙丘影像图

Fig.5 Google images of sand dunes in the Tengger Desert

#### 4.结论与展望

通过对谷歌影像解译、沙漠表层沉积物粒度分析以及空间插值处理,得出沙丘走向与局地主导风向具有相关性,沙漠表层沉积物粒度整体呈西北至东南向逐渐减小趋势,与整个沙漠的主导风向具有高度吻合关系。在粒度空间插值实验中,平均粒径规律性表现最好,众数粒径次之,中值粒径最差。沙漠西北部、东北部和西南区域低值区成因分别是由区域地形、多风场和地表植被导致的。依据沙漠沙粒粒度分布特征对沙漠物源进行探讨,认为沙漠物源来自于石羊河流域和沙漠北部山体,而实际上风沙地貌是一个十分复杂的系统,仅从风动力的角度去探究粒度成因是较片面的,沙漠表层沉积物的粒度成因还需要更进一步的研究来探究。本文中沙丘样品的采样由于交通限制,没有完全覆盖整个沙漠,在沙漠内部还有大片的空白区,影响了更精确的插值;并且采样的时候没有考虑沙丘迎风坡、落沙坡和沙丘顶不同位置粒度分布的差异,得到的结果难免存在误差。



## 参考文献

- [1]Pye K, Tsoar H. Aeolian Sand and Sand Dunes[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [2]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.
- [3]宋洁, 春喜, 白雪梅,等. 中国沙漠粒度分析研究综述[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3):597-603.
- [4]Fitzsimmons K E, Magee J W, Amos K J. Characterisation of aeolian sediments from the Strzelecki and Tirari Deserts, Australia: Implications for reconstructing palaeoenvironmental conditions[J]. Sedimentary Geology, 2009, 218(1-4):61-73.
- [5]Liu B, Qu J, Ning D, et al. Grain-size study of aeolian sediments found east of Kumtagh Desert[J]. Aeolian Research, 2014, 13(1-6):1-6.
- [6]Sun D, Su R, Bloemendal J, et al. Grain-size and accumulation rate records from Late Cenozoic aeolian sequences in northern China: Implications for variations in the East Asian winter monsoon and westerly atmospheric circulation[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2008, 264(s 1-2):39-53.
- [7]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.
- [8]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]. 陕西师范大学, 2011.
- [9]庞红丽, 程捷, 丛殿阁,等. 腾格里沙漠北缘沙丘粒度特征及区域差异分析[J]. 宁夏大学学报(自然版), 2015, 36(3):267-273.
- [10]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.
- [11]刘陶, 杨小平, 董巨峰,等. 巴丹吉林沙漠沙丘形态与风动力关系的初步研究[C]// 中国科学院地质与地球物理研究所. 2011:1285-1291.
- [12]朱震达, 吴正, 刘恕等. 中国沙漠概论[M]. 科学出版社, 1980: 71-73.
- [13]张克存, 屈建军, 俎瑞平,等. 腾格里沙漠东南缘风沙活动动力条件分析——以沙坡头地区为例[J]. 干旱区地理(中文版), 2008, 31(5):643-649.
- [14]庞红丽, 程捷, 丛殿阁,等. 腾格里沙漠北缘沙丘粒度特征及区域差异分析[J].

宁夏大学学报(自然科学版), 2015, 36(3):267-273.

[15]吴正. 中国沙漠及其治理[M]. 科学出版社, 2009: 562-568.

[16]Lancaster N. The Namib Sand Sea: Dune Forms, and Sediments [M]. Balkema: Rotterdam, 1989.

[17]鹿比煜, 安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究[J]. 科学通报, 1997, 42(23):2535-2538.

[18]郭峰, 孙东怀, 王飞,等. 巴丹吉林沙漠地层序列的粒度分布及其组分成因分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2014, 34(1):165-173.

[19]严立文, 黄海军, 刘艳霞. 基于 GIS 空间分析的海底表层沉积物粒度分布特征插值研究[J]. 海洋科学, 2010, 34(1):58-64.

[20]杜鹤强, 韩致文, 邓晓红,等. 基于 GIS 空间分析技术的新月形沙丘表面输沙率模型研究[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4):815-823.

[21]Bartier P M, Keller C P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW)[J]. Computers & Geosciences, 1996, 22(7):795-799.

[22]张锦明, 郭丽萍, 张小丹. 反距离加权插值算法中插值参数对 DEM 插值误差的影响[J]. 测绘科学技术学报, 2012, 29(1):51-56.

[23]Declercq F A N. Interpolation methods for scattered sample data: accuracy, spatial patterns, processing time[J]. Cartography and Geographic Information Systems, 1996, 23(3): 128-144.

[24]Lv P, Dong Z B, Zhang Z C. Characteristics of wind velocity, temperature and humidity profiles of near-surface layer in Tengger desert[J]. Journal of Desert Research, 2009, 29(5):977-981.

[25]张正偲, 董治宝, 钱广强,等. 腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J]. 中国沙漠, 2012, 32(6):1528-1533.

[26]孙东怀, 鹿化煜, David Rea,等. 中国黄土粒度的双峰分布及其古气候意义[J]. 沉积学报, 2000, 18(3):327-335.

[27]孙东怀, 安芷生, 苏瑞侠,等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及其应用[J]. 自然科学进展, 2001, 11(3):269-276.

- [28]杨宁宁, 董治宝, 李恩菊,等. 民勤县固定与半固定沙丘粒度特征分析[J]. 水土保持通报, 2011, 31(6):11-14.
- [29]殷志强, 秦小光, 吴金水,等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. 沉积学报, 2009, 27(2):343-351.
- [30]Breed C S, Embabi N S, El-Etr H A, et al. Wind Deposits in the Western Desert[J]. Geographical Journal, 1980, 146(1):88-90.
- [31]Vandenberghe J. Grain size of fine-grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification[J]. Earth-science Reviews, 2013, 121(6):18-30.
- [32]Mao D, Lei J, Zeng F, et al. Characteristics of Wind Erosion and Deposition in Oasis-desert Ecotone in Southern Margin of Tarim Basin,China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(6):658-673.
- [33]邵天杰, 赵景波, 董治宝. 巴丹吉林沙漠沙山粒度组成与沙山地貌分带[J]. 山地学报, 2013, 31(4):434-441.
- [34]刘英姿. 腾格里沙漠中格状沙丘形态及成因研究[D]. 陕西师范大学, 2013.
- [35]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.
- [36]Tsoar H. Dynamic processes acting on a longitudinal sand dune[J]. Sedimentology, 1983, 30:567 ~ 578.
- [37]陈新闯, 郭建英, 董智,等. 乌兰布和沙漠流动沙丘下风向降尘粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2):295-301.

