

朱春鸣,董治宝,刘铮瑶,等.古尔班通古特沙漠树枝状沙丘沉积物粒度和微形态特征的空间分异[J].中国沙漠,2021,41(2): 9-18.

# 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘沉积物粒度和微形态特征的空间分异

朱春鸣<sup>1</sup>,董治宝<sup>1</sup>,刘铮瑶<sup>1</sup>,肖 南<sup>1</sup>,杨军怀<sup>2</sup>,冯森彦<sup>1</sup>

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 2.兰州大学 资源环境学院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**树枝状沙丘是古尔班通古特沙漠独特的沙丘地貌类型。分析了古尔班通古特沙漠树枝状沙丘表层沉积物的粒度和微形态特征。结果表明:(1)树枝状沙丘以中砂为主,其次是细砂和粗砂;平均粒径与分选系数有较好的线性关系,平均粒径越小,分选系数越好;沉积环境以河流湖泊环境为主;石英颗粒形态以圆形和长形为主,磨圆度适中,碟形坑分布广泛,同时伴有硅沉淀现象,表明沉积作用以机械作用为主,同时还伴有化学作用。(2)整体上,粗砂和极粗砂含量西部最多,细砂含量南部最多,受风力分选作用的影响明显。西部的分选较其他区域好,东部分选较差;西部磨圆度最好,南部磨圆度最差。坡顶的中砂含量最多,迎风坡丘间地粗砂含量高于背风坡丘间地;迎风坡坡脚的细砂和中砂含量远远高于背风坡坡脚;沙丘的两翼部位粒级占比相对一致。(3)粒度和微形态特征都表明树枝状沙丘沉积物特征主要受风力分选作用的影响,同时受物源和植被的影响,共同揭示出河流湖泊的沉积环境。

**关键词:**古尔班通古特沙漠;树枝状沙丘;粒度;微形态;沉积环境

**文章编号:** 1000-694X(2021)02-009-10

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00118

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

沙丘是风力作用下形成的形态各异的堆积体,主要分布在干旱、半干旱地区<sup>[1-2]</sup>。在西北偏北风和东北偏北风的作用下,古尔班通古特沙漠北部沙丘多呈南北走向,长达数十千米<sup>[3]</sup>。除了显著的巨大线性主体外,还出现交汇的小沙丘,具有树枝状的外在特征,是该沙漠独有的风沙地貌类型<sup>[2]</sup>。独特地理位置使得该区气候干旱,而四周高山对降水的汇集作用又使得区域环境不同于其他干旱荒漠区<sup>[4]</sup>。

沉积物粒度特征可以用来反映地表风成过程及其形成环境,被广泛应用于沙丘形态-动力学过程及土壤风蚀等研究<sup>[5-6]</sup>。沙丘沉积物特征是反映沉积环境、沙丘形态、风沙动力过程的重要因素,风沙的物源以及风况的不同导致沉积物特征的明显差异<sup>[7-8]</sup>。在不同的沉积环境下,石英砂粒受不同的

机械磨蚀和化学溶蚀-沉淀作用,在表面留下了不同的痕迹,构成了独特的表面微结构形态<sup>[9]</sup>。因此,石英砂表面结构特征是判别沉积物的物质来源、搬运机制和沉积环境的重要参数<sup>[10-11]</sup>。钱亦兵等<sup>[3]</sup>统计古尔班通古特沙漠钻井沉积物的石英砂表面形态和结构特征,发现沉积物受风力和流水等多种沉积环境的影响。然而,古尔班通古特沙漠的各沙丘类型研究,尤其是关于树枝状沙丘的沉积物特征研究甚少,前人对研究区树枝状沙丘的土壤水分空间分异特征进行了探讨,而缺乏对其沉积物特征的深入研究,这在很大程度上限制了我们对其形成原因的深入理解。因此,作者采集了古尔班通古特沙漠中部典型树枝状沙丘的表层沉积物样品,对其进行沉积物粒度和微形态特征研究,分析沉积物特征的空间分选,进一步探讨其反映的沉积环境及控制因素。

收稿日期:2020-06-19; 改回日期:2020-11-07

资助项目:国家自然科学基金重点项目(41930641);国家自然科学基金面上项目(41871008)

作者简介:朱春鸣(1995—),女,内蒙古呼伦贝尔人,硕士研究生,研究方向为风沙地貌。E-mail: zhucm@snnu.edu.cn

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@snnu.edu.cn)

## 1 研究区概况

古尔班通古特沙漠(44°11'—46°20'N, 84°31'—90°00'E)位于准噶尔盆地中央(图1),南缘与天山冲积、洪积扇缘相接,构成了天山北坡至盆地自然垂直带,是中国第二大沙漠,也是中国最大的固定半固定沙漠<sup>[12]</sup>。沙漠景观丰富多样,北部分布着大量的纵向沙丘及蜂窝状沙丘、新月形沙丘链等。该区域气候干旱,年蒸发量2 000 mm以上,年降水量70—150 mm,其中5—9月降水量占全年降水量的70%—80%,年平均气温5~5.7℃,极端最高气温40℃以上,极端最低气温小于-40℃,为典型的温带大陆性荒漠气候<sup>[13]</sup>。植被比其他沙漠生长茂盛,短命植物为沙漠优势生活型<sup>[14-15,3]</sup>。常见尖喙牻牛儿苗(*Erodium oxyrrhynchum*)、齿稈草(*Schismus arabicus*)、倒披针叶虫实(*Corispermum lehmannianum*)、早熟猪毛菜(*Salsola praecox*)、狭果鹤虱(*Lappula semiglabra*)、弯曲四齿芥(*Tetracme recurvata*)等<sup>[16]</sup>。

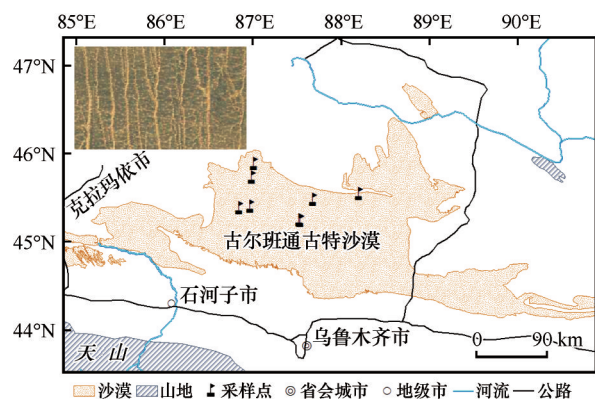


图1 研究区地理位置及树枝状沙丘采样点位置

Fig.1 Geographic location of dendrimer sand dunes sampling sites in the study area

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集

对古尔班通古特沙漠中部树枝状沙丘的表层样品进行了采集,采样位置为树枝状沙丘主副-梁交汇处的两侧丘间地、坡中、坡顶。采样方法与Lancaster<sup>[5]</sup>在纳米布沙漠采样标准类似,均匀采集每个样地中面积为0.2 m×0.2 m、深度为0—1 cm、质量为500—1 000 g的砂样,共56个样品(表1)。为避免特殊性,在每个方位选取两个沙丘分别采样,将几处不同样地沙样特征值做均值化处理;同时对

比不同沙丘相同部位,得出不同沙丘沉积物的特征与分异规律,同时对其石英砂粒微表面做对比。

### 2.2 分析与计算方法

沙丘沉积物粒度测定使用英国马尔文公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪进行。具体前处理步骤为:①砂样品通过2 000 μm的不锈钢筛并剔除草根、动物粪便等杂质待测;②使用规格为0.001 g的电子秤称取5 g待测样品放入烧杯中,加入10 mL的浓度为10%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液,置于200℃电加热板上加速反应,以无明显气泡冒出为界;③将浓度为10%的HCl,以无明显气泡冒出且溶液澄清为界;④取下烧杯并注满蒸馏水,静置不少于24 h,用皮胶管抽取上层清液后加入10 mL浓度为0.05 mol·L<sup>-1</sup>的(NaPO<sub>3</sub>)<sub>6</sub>溶液摇匀待测。

扫描电镜的图像测定前处理具体步骤如下:①取适量砂样品过孔径为2Φ的不锈钢筛后用称量纸和0.001 g的电子秤称取5 g待用;②放入500 mL玻璃烧杯中,加入浓度为30%的HCl溶液后置于200℃加热板上煮沸,直至充分反应;③将浓度为2.5%的氧化亚锡溶液注入烧杯中,直至充分反应;④将清洗后的样品放入烘箱中烘干。前处理全部完成后利用美国FEI公司生产的Quantas 2000发射扫描电子显微镜拍摄,其探头为德国Bruker的双探头EDS,共在56个样品中选取600个石英颗粒,进行微形态研究<sup>[14]</sup>。

粒度划分依据Udden-Wentworth方法<sup>[17]</sup>进行,单位用Φ值表示;粒度参数采用Folk等<sup>[18]</sup>提出的计算方法求解。实验在陕西师范大学激光粒度实验室和扫描电镜实验室进行。

## 3 结果与分析

### 3.1 粒度特征

#### 3.1.1 粒级组成

粒度级配反映的是沉积物各粒度组成的粒径大小及其含量百分比<sup>[19]</sup>。古尔班通古特沙漠树枝状沙丘的粒径分布范围较广,从极粗砂到粉砂、黏土均有分布。从各个粒级的含量看,中砂含量最大(31.98%),这与古尔班通古特沙漠粒径研究结果基本一致<sup>[18]</sup>,其范围是5.74%—58.04%,其次粗砂和细砂含量较大,平均值分别为24.21%和21.47%,粉

表 1 树枝状沙丘的采样点位置

Table 1 Location of sampling sites of dendrimer sand dunes

采样点		经度(E)	纬度(N)	采样点		经度(E)	纬度(N)
G1	西北翼丘间地	86°54'26"	45°44'26"	G5	西北翼丘间地	87°31'45"	45°15'14"
	西北翼坡脚	86°54'26"	45°44'26"		西北翼坡脚	87°31'55"	45°15'14"
	西北翼坡中	86°54'26"	45°44'36"		西北翼坡中	87°31'55"	45°15'14"
	坡顶	86°54'27"	45°44'26"		坡顶	87°31'56"	45°15'14"
	东南翼坡中	86°54'29"	45°44'26"		东南翼坡中	87°31'57"	45°16'14"
	东南翼坡脚	86°54'30"	45°44'26"		东南翼坡脚	87°31'57"	45°16'14"
	东南丘间地	86°54'31"	45°44'26"		东南丘间地	87°31'58"	45°15'14"
G2	西北翼丘间地	87°01'02"	45°53'40"	G6	西北翼丘间地	45°14'59"	87°32'21"
	西北翼坡脚	87°01'06"	45°53'39"		西北翼坡脚	45°14'59"	87°32'22"
	西北翼坡中	87°01'03"	45°53'39"		西北翼坡中	45°15'00"	87°32'22"
	坡顶	87°01'04"	45°53'38"		坡顶	45°14'57"	87°32'24"
	东南翼坡中	87°01'07"	45°53'40"		东南翼坡中	45°14'58"	87°32'24"
	东南翼坡脚	87°01'04"	45°53'34"		东南翼坡脚	45°14'59"	87°32'24"
	东南丘间地	87°01'01"	45°53'33"		东南丘间地	45°14'59"	87°32'25"
G3	西北翼丘间地	86°58'34"	45°24'39"	G7	西北翼丘间地	88°12'17"	45°33'33"
	西北翼坡脚	86°58'36"	45°24'38"		西北翼坡脚	88°12'24"	45°33'17"
	西北翼坡中	86°58'36"	45°24'39"		西北翼坡中	88°12'24"	45°33'10"
	坡顶	86°58'37"	45°24'39"		坡顶	88°12'31"	45°33'01"
	东南翼坡中	86°58'39"	45°24'34"		东南翼坡中	88°12'22"	45°33'06"
	东南翼坡脚	86°58'39"	45°24'39"		东南翼坡脚	88°12'22"	45°33'04"
	东南丘间地	86°58'41"	45°24'38"		东南丘间地	88°12'22"	45°33'03"
G4	西北翼丘间地	86°50'40"	45°23'42"	G8	北翼丘间地	45°29'40"	87°41'06"
	西北翼坡脚	86°50'41"	45°23'42"		北翼坡脚	45°29'39"	87°41'06"
	西北翼坡中	86°50'42"	45°23'41"		北翼坡中	45°29'39"	87°41'05"
	坡顶	86°50'44"	45°23'41"		坡顶	45°29'39"	87°41'05"
	东南翼坡中	86°50'45"	45°23'41"		南翼坡中	45°29'38"	87°41'04"
	东南翼坡脚	86°50'47"	45°23'41"		南翼坡脚	45°29'38"	87°41'02"
	东南丘间地	86°50'48"	45°23'41"		南翼丘间地	45°29'38"	87°41'02"

砂、黏土的均值为 5.09%,粗粉砂的均值为 2.44%,极细砂的均值为 8.82%,极粗砂的均值为 5.99%。可见,树枝状沙丘的优势粒级是中砂(31.98%),其次是粗砂(24.21%)和细砂(21.47%)。从区域角度看,中砂含量在各个区域占绝对优势,其中东部地区中砂含量最高,为 34.28%,西部粗砂和极粗砂含量远远高于其他区域(31.02%、10.59%),南部细砂和极细砂的含量远高于其他地区(28.31%、11.61%)。

树枝状沙丘沉积物优势粒级是中砂,其次是粗

砂和细砂。坡顶的中砂含量远远高于其他地貌部位(48.33%,图 2),迎风坡丘间地的中砂、粗砂和极粗砂的含量高于背风坡丘间地;迎风坡坡脚的细砂和中砂含量远远高于背风坡坡脚;沙丘的两翼部位粒级占比相对一致。这种粒级分布特征表明:在树枝状沙丘的相同地貌部位,风力作用和物源的不同使得沉积物粒级分布特征不同。

3.1.2 粒度参数

沉积物粒度参数平均粒径( $M_z$ )、分选系数( $\sigma$ )、



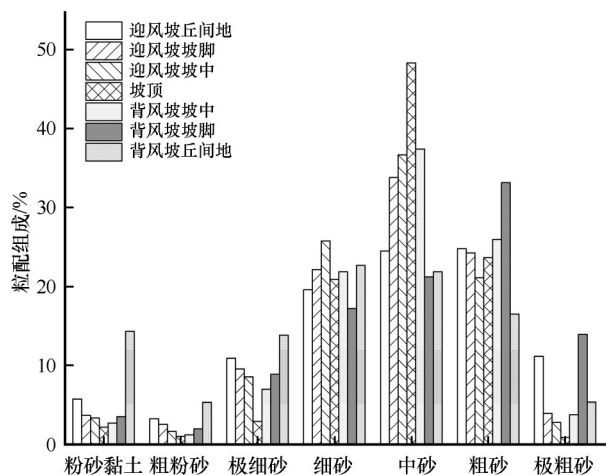


图2 树枝状沙丘不同部位沙粒级配

Fig.2 Grain size distribution at different positions of dendrimer sand dunes

偏度( $SK$ )及峰度( $K_g$ ),分别代表了粒度分布的集中趋势、分散程度、对称性以及峰凸程度<sup>[2]</sup>。整体上,平均粒径 $0.55—5.433\Phi$ ,平均值为 $1.87\Phi$ ,表明其介于分选较好至分选较差之间( $0.59—2.67\Phi$ )。偏度介于负偏和极正偏之间( $-0.103—0.45\Phi$ )。峰度从宽到很窄均有分布( $0.79—2.27\Phi$ )。区域角度上,北部的平均粒径较高( $2.21\Phi$ ),西部较低( $1.34\Phi$ ),西部的分选较其他区域好,东部分选较差,东部偏度最大,属于极正偏,其他地区属于正偏,西部峰度值最低( $1.04\Phi$ ),属于中等,其他地区均属于窄,东部地区细尾现象明显(图3)。

根据树枝状沙丘的横断面和粒度参数特征,发现大部分树枝状沙丘有相同的变化趋势,但仍有一定区别。大部分树枝状沙丘随着坡顶的粒径变粗,分选系数变好,这与哈斯等<sup>[20]</sup>、Barndorff-Nielsen<sup>[21]</sup>对新月形沙丘表面沉积物粒度变化的研究结果相类似。其中G2、G3、G7、G8此特征比较明显,随粒径变小分选系数随之变差,但此现象发生在地貌位置。其中,G2分选最差出现在迎风坡坡脚,G1、G7和G8则出现在背风坡丘间地;G4平均粒径颗粒最细在迎风坡坡中,分选逐渐变差,其背风坡坡脚颗粒最粗,分选最好却出现在坡顶,这可能是受东南坡物质来源的影响;偏度两侧大致对称,“负偏”出现在坡顶,“正偏”出现在迎风坡丘间地,峰度的变化趋势与偏度基本一致。然而,G6却随着粒径颗粒变粗,分选系数变差,两侧平均粒径和分选系数无明显相关关系,偏度和峰度也没有统一的变化规律。以上单个沙丘参数的相关关系表明了树枝

状沙丘形成发育的复杂性。

### 3.1.3 参数关系

树枝状沙丘的平均粒径与分选系数有良好的线性关系( $R^2=0.64$ ),随平均粒径变小,分选系数逐渐变好。偏度、峰度与平均粒径没有明显的相关关系。区域上,平均粒径与分选系数北部的相关性最强( $R^2=0.806$ ),西部的相关性较低,南部和东部的相关性中等。整体上,偏度与平均粒径相关性较低。北部及东部峰度与平均粒径有较好的线性关系 $R^2$ 大于0.5,然而,西部和东部相关度较低,表明地区沙物质的峰度随着沙粒变粗而向宽峰态发展(图4)。

### 3.1.4 沉积环境

仅仅依据粒度参数的空间变化难以判定古尔班通古特沙漠的物质来源,但可以根据沉积物的搬运历史和分选过程反映出沙漠沙粒在漫长的历史进程中所经历的沉积环境。依据Sahu<sup>[22]</sup>的线性多元判别方法对古尔班通古特沙漠各类沙丘沉积物进行计算统计和分类。

树枝状沙丘的沉积环境复杂,海滩沉积、浅海沉积、河流沉积、浊流沉积均有分布,唯独没有风成环境。其中,浅海沉积分布最广,占整体的85.59%,其次河流沉积为11.21%,海滩沉积为9.53%,浊流沉积为3.08%,浅海沉积占比较大。但是,古海沉积环境太过久远,湖泊沉积环境还未被区分出来,所以有研究推测古尔班通古特沙漠浅海环境主要是古近纪时期的内陆河流湖泊沉积环境<sup>[23]</sup>。

## 3.2 微形态特征

### 3.2.1 形态

地球上石英分布广泛,在沙漠中占比较大,化学性质稳定<sup>[24]</sup>。在沙丘发育过程中,受机械和化学溶蚀两种不同作用力的影响,在其表面留下了不同的痕迹,这为研究沉积物特征提供了重要参考。石英颗粒扫描电镜结果显示,砂粒的形态以圆形(44.35%)和长形(28.75%)为主,同时有长方形(10.88%)和三角形(17.57%)分布,研究区内沉积物形态分布均匀,未见明显分异性(图5)。

### 3.2.2 磨圆度

石英颗粒在搬运的过程中,逐渐被磨圆,磨圆的程度是一种重要沉积环境指示。搬运时间长或者受到了较强的流水侵蚀,一般来讲磨圆度较好,反之搬运距离较短,或受到冰川作用影响,则磨圆度较差<sup>[25]</sup>。根据鲍威尔的圆度等级划分标准<sup>[26-27]</sup>,

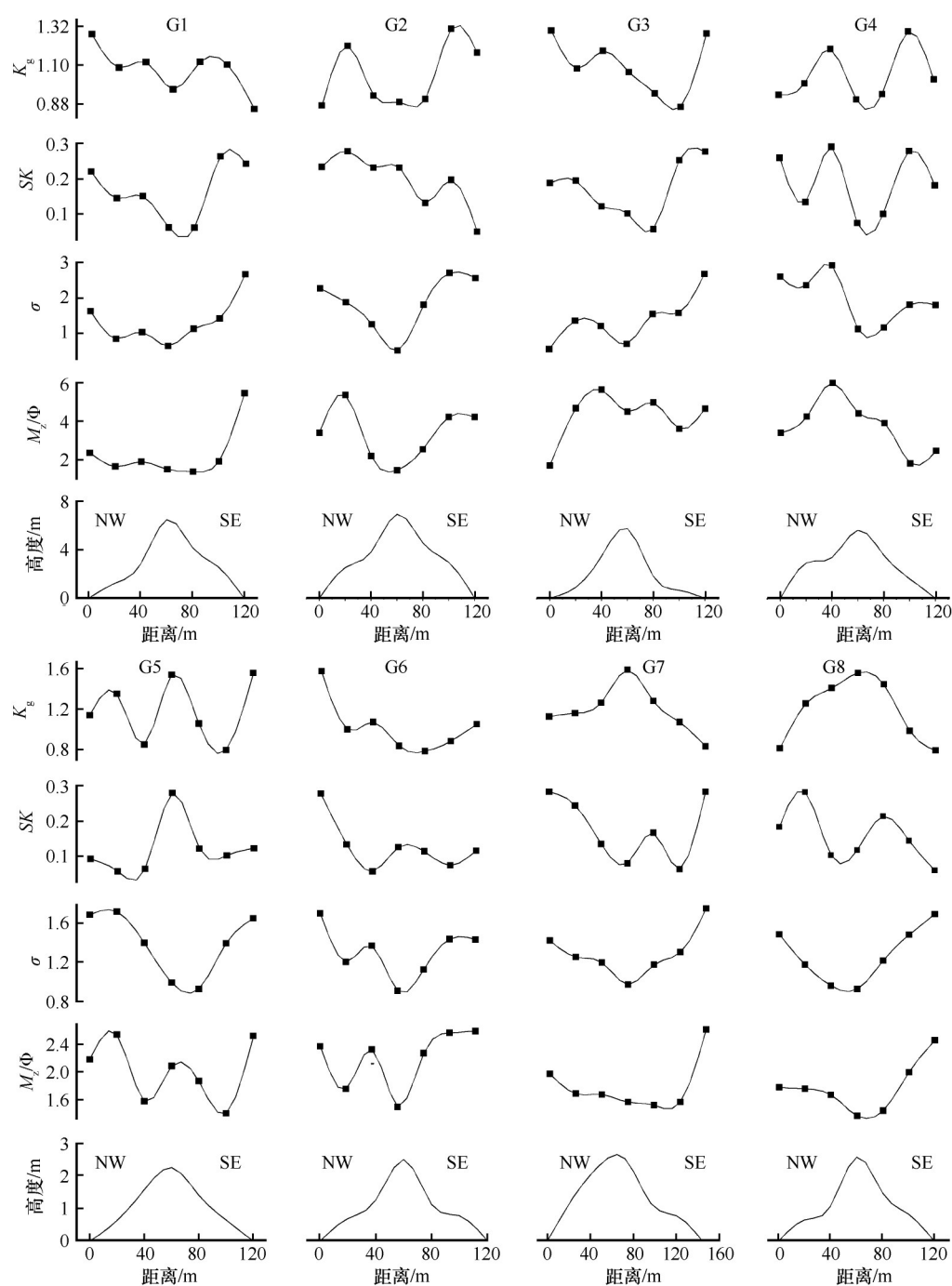


图3 各沙丘不同部位粒度参数

Fig.3 Particle size parameters of different parts of sand dunes

可将砂粒分为次圆(28.75%)、圆(20.83%)、次棱(37.50%)和棱(12.92%)4种,其中典型区域电镜照片如图6所示。整体上,沉积物石英砂颗粒磨圆度适中,次圆较多,真正浑圆的石英颗粒并不多。其中西部磨圆程度最好(圆27.08%,次圆29.17%),其次为北部(圆12.50%,次圆33.33%),东部(圆25%,次圆20.83%);磨圆度差的依次有南部(次棱50%,棱10.42%),北部(次棱39.58%,棱14.58%),东部

(次棱37.50%,棱16.67%),西部(次棱29.17%,棱14.58%),其中南部的磨圆度最差。

### 3.2.3 特征标志

石英颗粒经历搬运后会有不同的特征标志,是搬运动力类型的主要依据,可以用来还原搬运过程和作用力的强度<sup>[28]</sup>。磨圆度较好的石英颗粒在风力搬运的过程中撞击到较大的颗粒表面上,从而形成了碟形坑;砂粒在落地时对静止砂粒的冲击力作

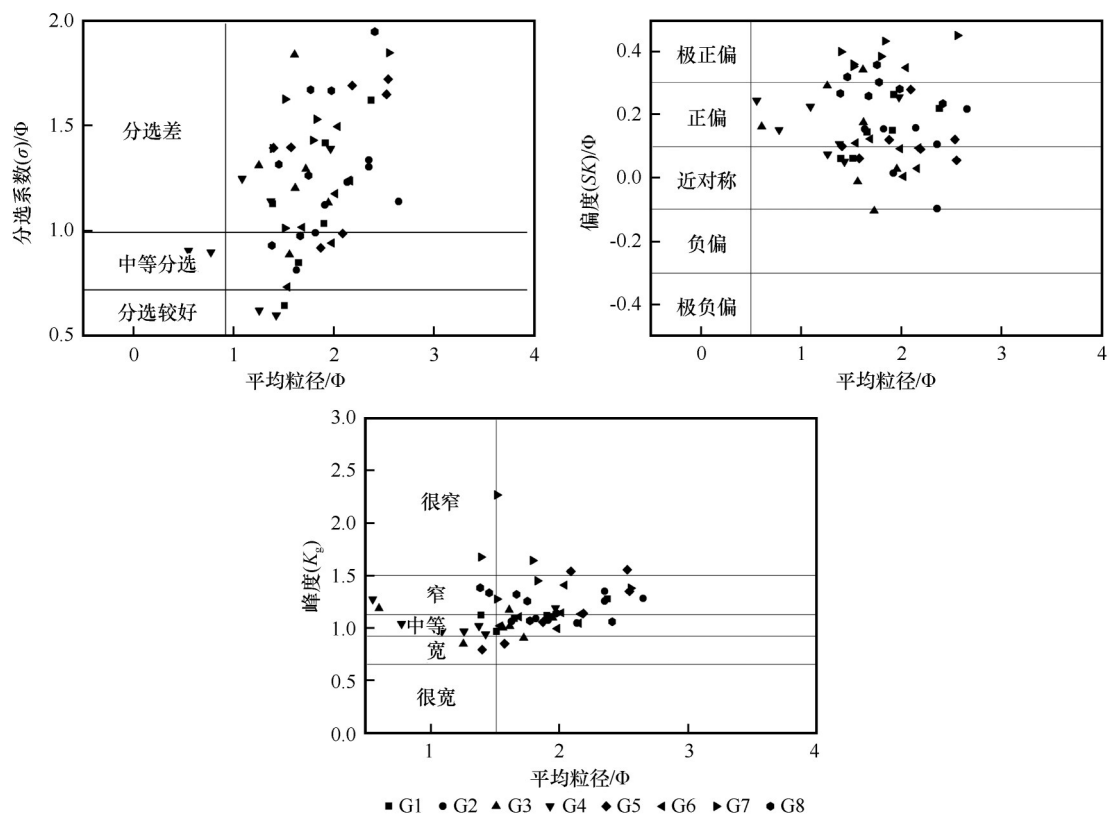


图4 粒度参数之间的关系

Fig.4 Relationship between grain size parameters

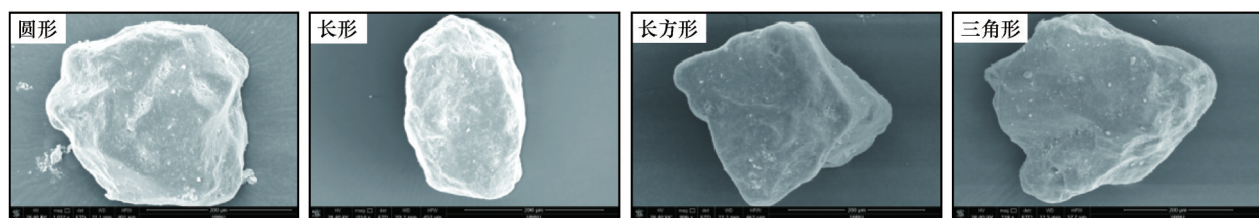


图5 石英砂颗粒形态

Fig.5 Shape of quartz sand particles

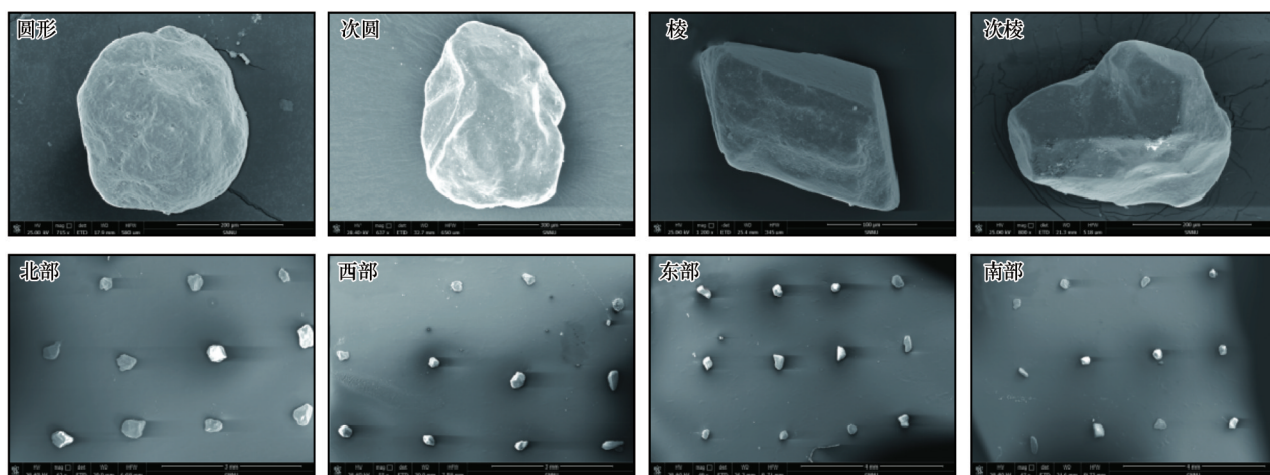


图6 石英砂颗粒磨圆度

Fig.6 The roundness characteristics of quartz sand particles



用部位、方向和大小都不固定,所以在某些颗粒表面还留有各种不规则的撞击坑;磨圆度较好的颗粒受到大量粒径较小沉积物的机械撞击,形成众多表征着沙漠沉积环境的小麻坑;某些石英砂粒上出现比较平行的擦痕,这可能是颗粒较大的沉积物剧烈撞击后发生滑动形成的;V形坑是流水环境的重要代表;石英颗粒在机械压应力作用下破碎形成贝壳状断口,贝纹清晰是典型的冰川产物,只有大概轮廓是风成和水成的结果,同时石英砂颗粒上出现大量硅质鳞片和硅沉淀。由于沙漠深居内陆,气候干旱,昼夜温差大,石英砂颗粒上出现大量硅质球聚集形成硅质沉淀,这种硅质特征是化学作用强烈的主要标志<sup>[29-30]</sup>。

整体上,碟形坑面积占比最大,不规则撞击坑也分布广泛,说明在沙漠干旱环境的强烈风沙作用

下,机械作用是影响沉积物粒径及表面微形态的主要原因(图7)。这与巴丹吉林沙漠、毛乌素沙地的研究结果基本一致<sup>[31-32]</sup>,同时硅质鳞片和硅沉淀也均有分布,说明树枝状沙丘是风成机械作用和化学作用共同影响的结果;V形坑、贝壳状断口以及裂痕也均有出现,说明石英砂沉积搬运过程复杂,这与粒度沉积环境计算结果一致。区域上,南部的石英砂磨圆度较差,麻坑占表面的比重高于其他区域,同时硅质鳞片仅出现在此区域,说明南部的化学作用较强,东部砂粒表面V形坑也有分布,其凹槽内有一定的 $\text{SiO}_2$ 沉淀分布,说明其可能经历过流水作用(表2)。表明这类石英砂既保留着冰川作用的痕迹,又表现出后期水与风作用的特征,由于所经历的搬运介质、搬运时间长短、营力作用大小不同,故样品表面微结构存在一定差异。

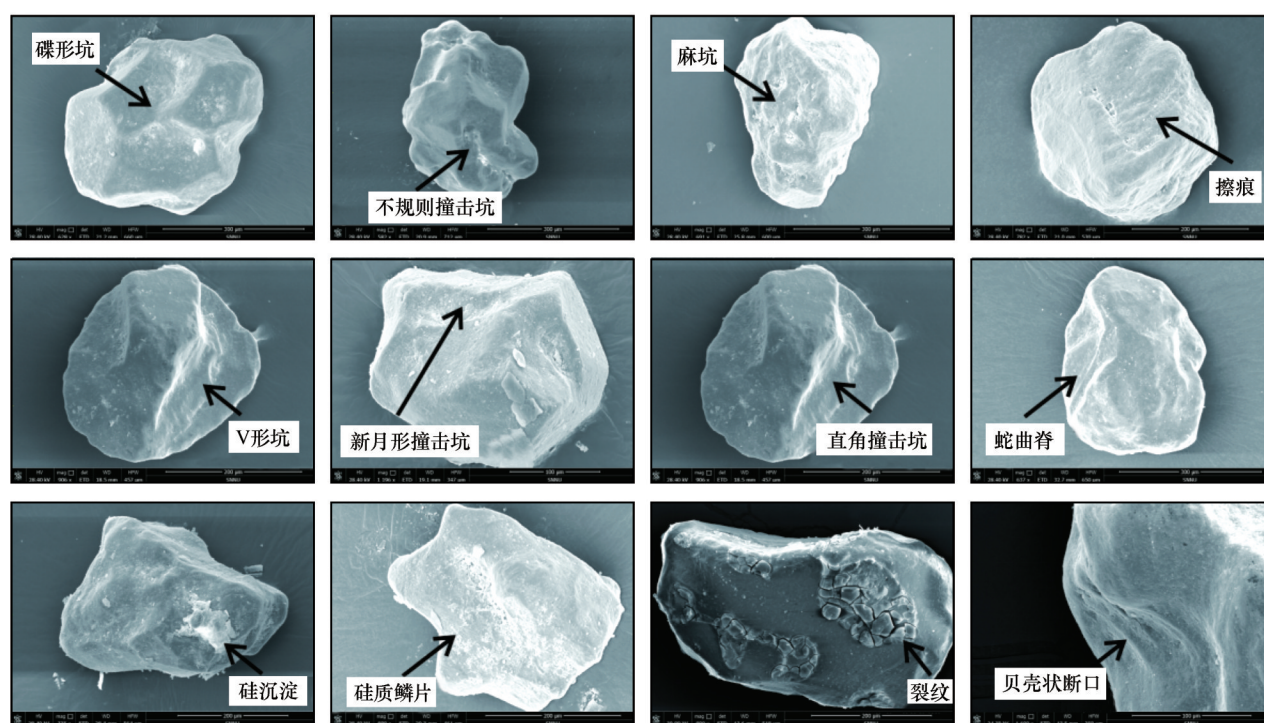


图7 石英砂颗粒表面形态特征

Fig.7 Surface morphological characteristics of quartz sand particles

## 4 讨论

### 4.1 沙丘粒度特征空间分异原因

沙丘的粒度特征空间分异规律比较复杂。整体上,粒级集中在中砂,这主要是受物质来源的影响。古尔班通古特沙漠发育于第四纪的黏土与细砂层构成的古老冲积平原上,砂基质主要由中细

砂组成<sup>[33]</sup>。准噶尔盆地西北山前剥蚀区形成的冲积扇,将洪积物搬运至此,并就地风化,风沙流携带粗细混杂的颗粒物质不断堆积。长期的西北方向风和东北方向风促进了整体南北走向的树枝状沙丘主干,同时导致了西部粗砂和极粗砂含量远远高于其他区域,而且西部的分选较其他区域好。迎风坡中部粒径最小,原因可能是迎风坡坡脚粒径较大,坡底风速无法运移较大颗粒,沿着迎风坡风

表 2 不同区域石英沙颗粒沉积作用结构形态  
Table 2 Microtexture of quartz sand particles in different regions

沉积作用	特征标志	分布位置(表面结构面积概率/%)
机械作用	蝶形坑和蛇曲脊	北部(20.8%),西部(46.4%),南部(36%),东部(29%)
	贝壳状断口	南部(11%),东部(17%)
	麻坑	北部(19.3%),西部(5.7%),南部(0.18%)
	V形坑	西部(11.7%),南部(16%),东部(45.5%)
	新月形撞击坑	北部(6%),西部(13%),南部(10%)
	不规则撞击坑	北部(32%),西部(13.3%),南部(16.25%)
	直撞击坑	北部(4%),西部(15%),南部(20%),东部(18.7%)
	裂纹	西部(9%),南部(18%),东部(21.3%)
	擦痕	北部(7%),西部(24.5%),东部(20%)
化学作用	硅质球	
	硅质鳞片	南部(23%)
	硅沉淀	西部(29%),南部(16%),东部(21%)

速逐渐变大,较细颗粒物的沉积,使得迎风坡中部粒径较其他位置比相对较小。坡顶的中砂含量远远大于其他地貌部位,可能是因为从迎风坡坡脚到坡顶,风速不断增大,坡顶的细颗粒被不断吹蚀而在另一侧堆积,导致坡顶的中砂不断累积。根据前人研究及野外考察的结果,梭梭群落是该沙漠旱生群落的代表<sup>[34]</sup>,几乎占据了所有的半固定和半流动沙丘、沙地,形成大面积连片的荒漠植被景观,成为古尔班通古特沙漠最具景观意义和代表性的植物群落类型。植被主要分布于外部沙漠的固定沙丘、丘间平沙地及迎风坡中部,坡顶几乎没有分布,这导致两翼粒径分布规律不同,坡顶的细颗粒被风蚀,留下较粗的颗粒。同样原因使得迎风坡丘间地的中砂、粗砂和极粗砂的含量高于背风坡丘间地。野外观测和风洞实验都表明,风速自沙丘迎风坡中下部开始加强,至坡顶达到最大,且依入射角的不同而在背风侧形成横向涡流和傍侧气流<sup>[35-38]</sup>,这可能是其分布不同的原因之一。

4.2 沙丘沉积环境

研究树枝状沙丘的粒度特征和微形态特征的空间分异规律,对于了解此类型沙丘的沉积特征、沉积过程有重要的参考价值。前人对其沉积环境和沉积特征进行了研究,普遍认为三叠纪早期发育以砂砾岩为主的粗碎屑沉积,晚期沉积物粒度变细,沉积环境由冲积扇、扇三角洲沉积过渡到以扇三角洲和湖泊为主的沉积,曾为微咸水的淡水环

境<sup>[39-40]</sup>。这与结论得出的沉积环境结果基本一致。准噶尔盆地西北部山区冰川营力作用产生的砂物质,随流水搬运后,成为冲积、洪积物,又遭受到风的改造作用堆积下来。所以,这类石英砂既保留着冰川作用的痕迹,又表现出后期水与风作用的特征。砂粒所经历的搬运介质、搬运时间长短、营力作用大小不同,故样品表面微结构存在一定差异<sup>[28-29]</sup>。这些砂粒带着原有的形貌,进入了现代沙漠之后,经历了长时间的风蚀搬运,磨擦撞击。区域内石英砂整体磨圆度较好,碟形坑和不规则撞击坑在表面占比较大,说明在沙漠干旱环境影响下,风力的机械作用是影响沉积物粒径及表面微形态的主要原因,标志研究区风沙作用强烈。东部石英砂表面V形坑也有所分布,凹槽内还有一定的硅沉淀分布,说明其可能经历过流水作用。东部和南部砂粒均有贝壳状断口出现,为明显的冰川作用标志,后又被风力作用将边缘磨圆。南部砂粒出现大量的硅质鳞片,硅沉淀也在各个区域广泛分布,这种硅质特征是化学作用强烈的主要标志,说明树枝状沙丘砂源丰富,经历复杂。整体以机械作用为主,仍伴有化学作用。但是仅研究树枝状沙丘的主梁的沉积粒度特征及微表面形态远远不够,其他研究还有待补充。

5 结论

古尔班通古特沙漠树枝状沙丘整体以中砂为



主,其次是细砂和粗砂;偏度主要为“正偏”,峰度主要为“很窄”,平均粒径与分选系数有较好的线性关系,大部分沙丘参数随粒径变粗分选变好,而沙丘两翼砂物质粒径变化规律不同;石英颗粒形态以圆形和长形为主,整体磨圆度适中,特征标志以机械作用为主,同时伴有化学作用。

从区域角度讲,西部粗砂和极粗砂含量最多,南部细砂含量最多,这是受风力分选作用影响的结果,西部的分选较其他区域好,东部分选较差,沉积环境以河流湖泊沉积环境为主。西部磨圆度最好,南部磨圆度最差,这与粒径结果一致。迎风坡丘间地粒径明显大于背风坡,迎风坡坡脚细砂含量明显高于背风坡,坡中粒径含量基本一致,坡顶中砂占比较大,这可能与风力分选和沙丘植被分布有关。

粒度和微形态特征都表明树枝状沙丘整体上受风力分选作用的结果(主风向是西北风),同时也受到物源和植被的影响;微形态特征和沉积环境结果说明沉积物的搬运沉积过程复杂,是机械作用和化学作用共同影响的结果。

## 参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 448.
- [2] 董治宝, 苏志珠, 钱广强, 等. 库姆塔格沙漠风沙地貌[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 69-74.
- [3] 钱亦兵, 吴兆宁. 古尔班通古特沙漠环境研究[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] 陈昌笃, 张立运, 胡文康. 古尔班通古特沙漠的沙地植物群落、区系及其分布的基本特征[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983(2): 89-99.
- [5] Lancaster N. Geomorphology of Desert Dunes[M]. New York, USA: Routledge, 1995: 88-89.
- [6] Hugenholtz C H, Wolfe S A, Walker I J, et al. Spatial and temporal patterns of aeolian sediment transport on an inland parabolic dune, Bigstick Sand Hills, Saskatchewan, Canada[J]. Geomorphology, 2009, 105(1): 158-170.
- [7] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Grain size characteristics of sand dunes in the central Taklimakan sand sea[J]. Sedimentary Geology, 2003, 161: 1-14.
- [8] Wang X M, Dong Z B, Zhang J W, et al. Relations between morphology, air flow, sand flux and particle size on traverse dunes, Taklimakan sand sea, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27: 515-526.
- [9] 戴枫年. 石英砂粒表面微结构特征的研究[J]. 中国沙漠, 1986, 6(3): 23-31.
- [10] Krinsley D H, Doornkamp J C. Atlas of quartz sand surface textures[M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1973: 5-102.
- [11] 谢又予, 崔之久, 李洪云, 等. 中国石英砂表面结构特征图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1984.
- [12] 季方, 叶玮, 魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘形成原因初探[J]. 干旱区地理, 2000, 23(1): 32-35.
- [13] 钱亦兵, 吴兆宁, 张立运, 等. 古尔班通古特沙漠植被与环境的关系[J]. 生态学报, 2007(7): 2802-2811.
- [14] 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.
- [15] 钱亦兵, 周兴佳, 吴兆宁. 准噶尔盆地沙漠沙物质的多源性[J]. 中国沙漠, 2001, 21(2): 182-187.
- [16] 张立运. 新疆莫索湾地区短命植物的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1985, 9(3): 213-222.
- [17] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [18] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentology Petrology, 1957, 27(1): 3-26.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1964, 34(1): 73-83.
- [23] 魏文寿, 刘明哲. 古尔班通古特沙漠现代沙漠环境与气候变化[J]. 中国沙漠, 2000, 22(2): 77-83.
- [24] 陈丽华. 扫描电镜在石油地质上的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [25] Mahaney W C, Dirzowsky R W, Milner M W, et al. Quartz microtextures and microstructures owing to deformation of glaciolacustrine sediments in the northern Venezuelan Andes [J]. Journal of Quaternary Science, 2004, 19(1): 23-33.
- [26] Cardona J P M, Gutierrez Mas J M, Bellocn A S, et al. Surface textures of heavy-mineral grains: a new contribution to provenance studies[J]. Sedimentary Geology, 2005, 174: 223-235.
- [27] Strand K, Psachier S, Nasi J. Implications of quartz grain microtextures for onset Eocene/Oligocene glaciation in Prydz Bay, ODP Site 1166 Antarctica [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, 2003, 198: 101-111.
- [28] 克林斯雷 D H, 杜尔坎普 J C. 石英颗粒表面结构图册[M]. 陈瑞君, 译. 石油工业出版社, 1980.
- [29] 高存海, 穆桂金, 闫顺, 等. 塔克拉玛干沙漠深部石英砂微结构特征及其环境意义[J]. 地质论评, 1995, 41(2): 152-158.
- [30] 吴正. 我国内陆沙漠与海岸沙丘石英颗粒表面结构的对比研究[J]. 中国沙漠, 1995, 5(3): 201-206.
- [31] 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.

- [32] 刘铮瑶,董治宝,萨日娜,等.巴丹吉林沙漠边缘沉积物粒度和微形态特征空间分异[J].中国沙漠,2018,38(5):945-953.
- [33] 张正偲,董治宝,赵爱国.人工模拟戈壁风沙流与风程效应观测[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1505-1510.
- [34] 张立运,陈昌笃.论古尔班通古特沙漠植物多样性的一般特点[J].生态学报,2002(11):1923-1932.
- [35] 肖锋军,董治宝,郭烈锦,等.风沙流中跃移沙粒冲击速度和角度联合概率分布风洞实验[J].中国沙漠,2020,40(3):127-134.
- [36] 李志忠,关有志.纵向沙丘和横向沙丘模拟流场的实验研究[J].中国沙漠,1996,16(4):360-363.
- [37] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. New York, USA: Willian Morrow & Company, 1941:222-247.
- [38] 黄云飞,张昌民,朱锐,等.准噶尔盆地玛湖凹陷晚二叠世至中三叠世古气候、物源及构造背景[J].地球科学,2017,42(10):1736-1749.
- [39] 李兴,张立强,施辉,等.准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组沉积古环境分析:以玛18井为例[J].岩性油气藏,2016,28(2):80-85.
- [40] 何苗,张利伟,刘勇,等.准噶尔盆地西北缘三叠纪沉积体系与环境[J].地质通报,2017,36(6):1032-1042.

## Grain size and micro-morphology characteristics of the surface ediments of dendritic sand dunes in the Gurbantunggut Desert

Zhu Chunming<sup>1</sup>, Dong Zhibao<sup>1</sup>, Liu Zhengyao<sup>1</sup>, Xiao Nan<sup>1</sup>, Yang Junhuai<sup>2</sup>, Feng Miaoyan<sup>1</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Dendritic dune is a unique type of dune landform in Gurbantunggut desert. This paper analyzes the grain size and micromorphological characteristics of the surface sediments of the dendritic dunes in the Gurbantunggut Desert. The results show that: (1) The dendritic dunes are dominated by medium sand, followed by fine sand and coarse sand. There is a good linear relationship between the average particle size and the separation coefficient. The smaller the average particle size, the better the sorting coefficient. The sedimentary environment is dominated by rivers and lakes. The shape of quartz grains is mainly round and long and the roundness is moderate. Dished pits are widely distributed and accompanied by the phenomenon of silicon precipitation, indicating that the deposition is mainly mechanical and accompanied by chemical action. (2) On the whole, the coarse sand and extremely coarse sand account for the most in the west while fine sand in the south, which is the result of wind separation. The sorting in the west is better than that in other regions while the sorting in the east is worse. The roundness in the west is the best while the roundness in the south is the worst. The medium sand at the top of the slope accounts for a large proportion. The content of coarse sand on the windward slope is higher than that of the leeward slope while the fine sand and medium sand content at the foot of the windward slope is much higher than that on the leeward slope. The proportion of grain size in the two wings of sand dune is relatively consistent. (3) The characteristics of grain size and micromorphology indicate that the dendritic sand dunes are mainly affected by wind separation as well as by material sources and vegetation, which jointly reveal the sedimentary environment of rivers and lakes.

**Key words:** Gurbantunggut Desert; dendritic sand dunes; grain size; micro-morphology; depositional environment