

高冲,董治宝,南维鸽,等.古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘沉积物理化特征及沉积环境[J].中国沙漠,2022,42(2):14-24.

古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘沉积物理化特征及沉积环境

高冲¹,董治宝¹,南维鸽¹,刘铮瑶^{1,2},朱春鸣¹,
王晓枝¹,肖南³,张欣¹

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 2.陕西省地质调查院 陕西省地质环境监测总站,陕西 西安 710054; 3.内蒙古师范大学 地理科学学院,内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 采样分析了古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物的粒度、元素和微形态特征,讨论了其沉积环境。结果表明:(1)古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物以细沙为主;与上部陆壳平均化学组成(UCC)比,常量元素产生亏损,微量元素Co富集明显;化学蚀变指数(CIA)与上部陆壳平均值接近;石英沙颗粒磨圆度适中,微形态特征以碟形坑与不规则撞击坑为主。(2)古尔班通古特沙漠东北部蜂窝状沙丘表层沉积物平均粒径最大,分选性最差,常量元素亏损严重,微形态特征最为复杂;西部CIA值最小。平均粒径从迎风坡坡脚到坡顶增大,在背风坡变小;元素与微形态特征无明显差异。(3)沉积物理化特征说明古尔班通古特沙漠处于大陆风化的早期阶段,干旱的气候条件使沙丘表层组成物质缺乏有效的化学风化,沉积环境复杂,以风成机械作用为主导。

关键词: 蜂窝状沙丘; 沉积物; 粒度; 地球化学元素; 微形态

文章编号: 1000-694X(2022)02-014-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00106

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

沙丘是由气流性质、地表性质等改变产生的风成沉积物的一种堆积体,是高度0.1—100 m的风积地貌,主要分布在干旱、半干旱地区^[1-3]。沙丘表面沉积物是现代沙漠环境特征的重要信息载体^[1]。沉积物粒度特征可以体现风力对沙源物质的搬运、分选作用^[4-5],并反映沙源物质的组成特征^[5-7],是判定沙丘沉积环境的重要依据^[8]。沉积物地球化学元素分异特征可以反映物质来源、沉积过程、古环境变化等方面的重要信息^[9]。沉积物中石英沙分布广泛、硬度较大且化学性质稳定^[10],在不同沉积环境中受到不同的机械磨蚀、化学溶解-沉淀作用,从而在表面留下不同的微形态特征^[11]。因此,依据石英沙表面微形态特征也可以判别沉积物的物质来源、搬运机制和沉积环境^[12-13]。

20世纪50年代以来,学者们对古尔班通古特沙

漠做了一系列的考察和研究。其中有关沉积物的研究包括沙丘表层沉积物粒径^[14],沙漠南部平直树枝状沙丘形态^[15],固定、半固定沙丘剖面^[16],沙垄的侵蚀和堆积^[17],石英沙颗粒、沉积物元素的空间、深度差异^[18]等。动植物研究包括新疆子午沙鼠的发现^[19],东北部牧场鼠害的调查^[20],大沙鼠破坏问题防治策略的提出^[21],植物群落、区系及分布特征的分析^[22],荒漠植被恢复和发展的调查^[23],植物成活和生长情况的影响因子^[24]等。另外,随着地质勘探工程发现准噶尔盆地地下藏储丰富的石油、天然气资源^[25],供水和输油管道铺设的研究也随之开展^[26-27]。然而,学者们对古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘沉积物理化特征研究甚少。同时,古尔班通古特沙漠作为中国最大的固定、半固定沙漠^[28]依旧处于一个脆弱易损的状态中。因此,采集了古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物的

收稿日期:2021-07-01; 改回日期:2021-08-13

资助项目:国家自然科学基金项目(41930641,41871008);第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0403)

作者简介:高冲(1998—),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为风沙地貌。E-mail: 1021789455@qq.com

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@snnu.edu.cn)

样品,研究样品粒度、元素和微形态特征,揭示其指示的沉积环境,旨在丰富蜂窝状沙丘表层沉积物的研究内容以及西北干旱区环境形成与演变的研究内容,并为防止固定、半固定沙丘活化提供科学参考与理论支持。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

古尔班通古特沙漠($44^{\circ}11'N$ — $46^{\circ}20'N$, $84^{\circ}31'E$ — $90^{\circ}00'E$)面积 $51\,130\text{ km}^2$,海拔 $450\text{—}600\text{ m}$,位于中国西北部的准噶尔盆地(图1)。沙漠内部沙丘形态主要为纵向和对称状沙垄,垄间和各坡的植被、生

物结皮覆盖较好,地表呈现固定状态;沙丘和沙垄顶部、两坡上部基本裸露,长时间尺度下表现出摆动特征,呈半固定状态^[29-30]。沙丘在沉积过程中受西风环流的影响远大于东亚季风,冬季北部的蒙古-西伯利亚高压也起到了重要作用。全年主导风向为西北风,多年平均风速 $2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大风速为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[31],年降水量 $50\text{—}150\text{ mm}$,集中在 $5\text{—}9$ 月,降水量和湿度指数由沙漠边缘向中心减少^[32]。春季回暖时,冬、春两季积雪融水垂直入渗,大量植被生长,其中包括了乔、灌、一年生草本植物和多年生草本植物^[33],丰富的植被生长使有机物与土壤颗粒紧密结合,形成广泛分布的生物结皮,部分地区厚度可达 2 cm ^[34]。

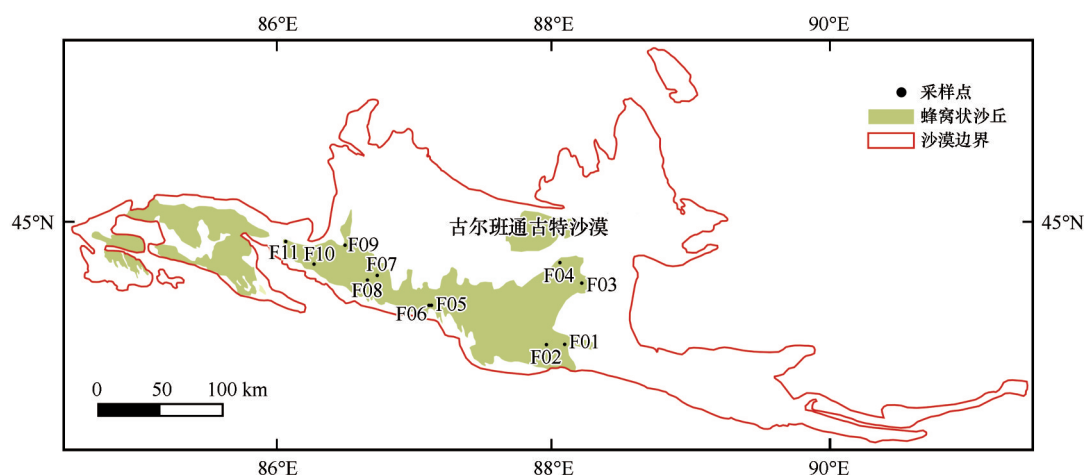


图1 研究区地理位置及采样点分布

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

在额尔齐斯河谷进入准噶尔盆地的西北风、蒙古-西伯利亚高压下形成的东北风、阿拉山口经艾比湖谷地汇入的西风以及南部天山地方性风系南风共同影响下,沙漠主体南部、西南部及西南延伸处形成了由无数小的漩涡组成的涡动抑制区域,进而形成了中间低、四周呈沙堤高起的蜂窝状沙丘地形。不同方向的风相遇之后,往往会沿着合力方向前行。因此,蜂窝状沙丘上仍然可以看到明显的迎风坡与背风坡^[18]。

1.2 研究方法

对古尔班通古特沙漠 11 个蜂窝状沙丘表层沉积物进行样品采集,采样沙丘依次记作 F01、F02、F03、F04、F05、F06、F07、F08、F09、F10、F11(图1)。参考 Lancaster^[35]在纳米布沙漠的采样方法,分别在每个沙丘迎风坡坡脚、迎风坡坡中、坡顶、背风坡坡

中、背风坡坡脚 5 个部位(图2)均匀采集面积 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 、深度 $0\text{—}1\text{ cm}$ 、质量 $500\text{—}1\,000\text{ g}$ 的样品,共 55 个。对采集样品的粒度、元素和扫描电镜分析分别在陕西师范大学激光粒度分析实验室、X 射线荧光光谱仪实验室和扫描电镜实验室完成,采用的仪器分别为 Mastersizer2000 激光粒度仪、PW2403X-Ray 荧光光谱仪和 TM3000 日立台式电子显微镜。

样品粒度分析实验前处理步骤:①用 $2\,000\text{ }\mu\text{m}$ 不锈钢筛对沉积物样品筛除,剔除草根、粪便等杂质;②使用精度为 0.001 g 的电子秤称取样品 5 g 放入烧杯,加入浓度为 10% 的 $10\text{ mL H}_2\text{O}_2$ 溶液,放在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 电加热板上加速反应,反应至无明显气泡出现为止;③取出烧杯冷却后加入浓度为 10% 的 HCl 除去样品中的碳酸盐类,再次加热至无明显气泡冒出且溶液澄清为止;④取下烧杯注满蒸馏水,静置至颗粒充分沉淀,用皮胶管抽取上层清液,加入

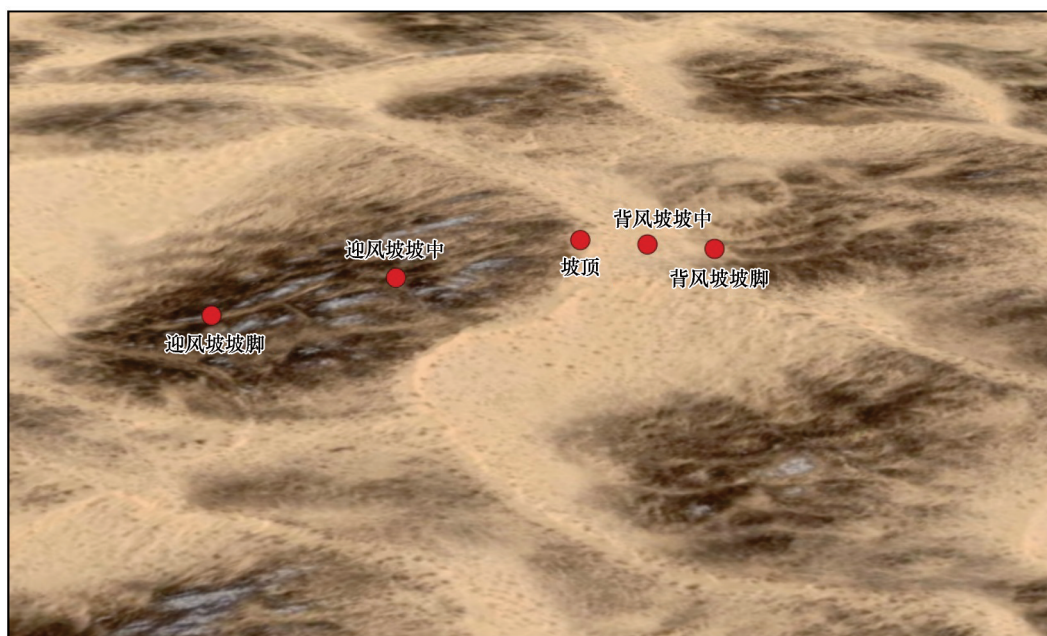


图2 采样点位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of sampling point location

10 mL 浓度 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 $(\text{NaPO}_3)_6$ 溶液摇匀待测。

元素分析实验前处理步骤:①把自然风干的样品放入振动磨机器内磨细至 200 目;②在精度为 0.001 g 的天平秤上称取磨细样品 4—5 g,用硼酸镶边垫底,并在 YY-60 型半自动压样机内压成镶边外径为 32 mm 的样片,放入干燥器中待测。

扫描电镜实验前处理步骤:①取样品过孔径为 2Φ 的不锈钢筛后用精度为 0.001 g 的电子秤称 5 g 备用;②放入 500 mL 的烧杯中加入浓度为 30% 的 HCl 溶液,放置于 200 °C 的加热板上煮沸至充分反应;③将 2.5% 浓度的 SnO 溶液注入烧杯中至充分反应,然后将样品清洗并烘干;④从烘干后的样品中挑选 15—20 颗石英沙,用导电胶将石英沙颗粒固定在金属托上,放入标准真空镀膜机中镀金粉后即可^[1]。

2 结果

2.1 沉积物粒度特征

2.1.1 粒度组成

沙粒粒度百分含量可以直观反映沉积物粒度组成以及不同粒径组沙粒的相对含量^[36]。样品粒度分布在中粉沙到极粗沙之间,细沙含量最大(均值 45.55%),其次是中沙(均值 27.92%)与极细沙(均值 15.32%),粗沙均值 6.57%,极粗沙均值 1.46%,粗

粉沙均值 0.83%,中粉沙均值 2.35%(图 3)。研究区西部细沙含量(50.13%)远高于东部(37.52%),东部粗沙含量较高(12.70%);东北部粗沙含量(22.54%)远高于西部与东南部,细沙含量仅为 28.89%。

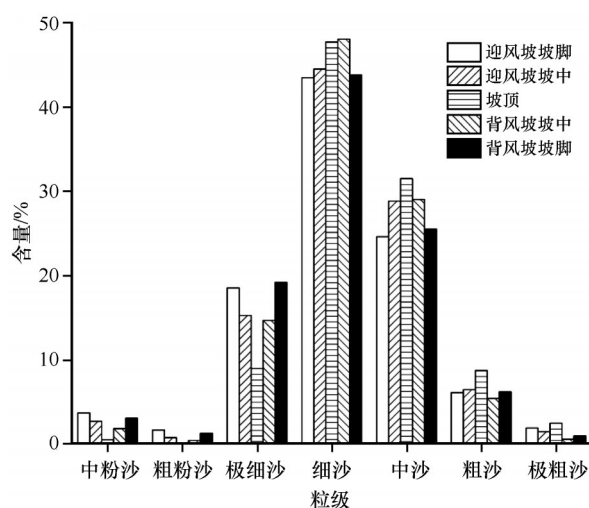


图3 沙丘不同部位沙粒级配

Fig.3 Grain size distribution for different positions of sand dunes

迎风坡坡脚中粉沙、粗粉沙、极粗沙含量高于背风坡坡脚,其余粒径组沙粒含量低于背风坡坡脚,各粒径组沙粒含量相差均不超过 1%;迎风坡坡中细沙和中沙含量低于背风坡坡中,其余粒径组沙粒含量均高于背风坡坡中,除细沙相差 3.55% 外,其余粒径组沙粒含量相差同样不超过 1%;坡顶中粉

沙、粗粉沙、极细沙含量低于沙丘其余部位,中沙、粗沙、极粗沙含量却高于其余部位,细沙比背风坡坡中低。

2.1.2 粒度参数

为了更好地反映沙丘粒度特征与沉积环境的关系,引用沉积物粒度参数平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏度(SK)和峰度(K_g)。平均粒径代表粒度分布的集中趋势,也体现沉积物搬运介质的平均动能,另外平均粒径会受源区物质组成影响;分选系数反映了沙粒粒径分散程度,常用于分析沉积环境的动力条件;偏度和峰度分别反映粒度分布的对称性和峰凸程度^[2],依据 Folk-Ward 粒度参数分级标准^[37]对其划分。

样品平均粒径 1.19—3.02 Φ ,平均值为 2.24 Φ ;分选性介于分选很好至分选较差之间(0.44—1.44);偏度介于极负偏到极正偏之间(-0.20—0.32);峰度介于宽至很窄之间(0.70—1.72)。研究区西部平均粒径(2.33 Φ)小于东部(2.07 Φ),分选性(0.71)比东部(0.96)好;东北部平均粒径最大(1.77 Φ),分选较差;东南部平均粒级最小(2.38 Φ);偏度和峰度无明显差异,处于近对称(-0.1—0.1)和中等(0.9—1.11)。坡顶平均粒级最大(2.03 Φ),分选性最好(0.65);迎风坡坡中与背风坡坡中相比平均粒径大,分选性差,偏向正偏,峰度窄;坡脚各参数分布状况与坡中相似,对应平均粒径小于坡中,且分选性最差(图4)。

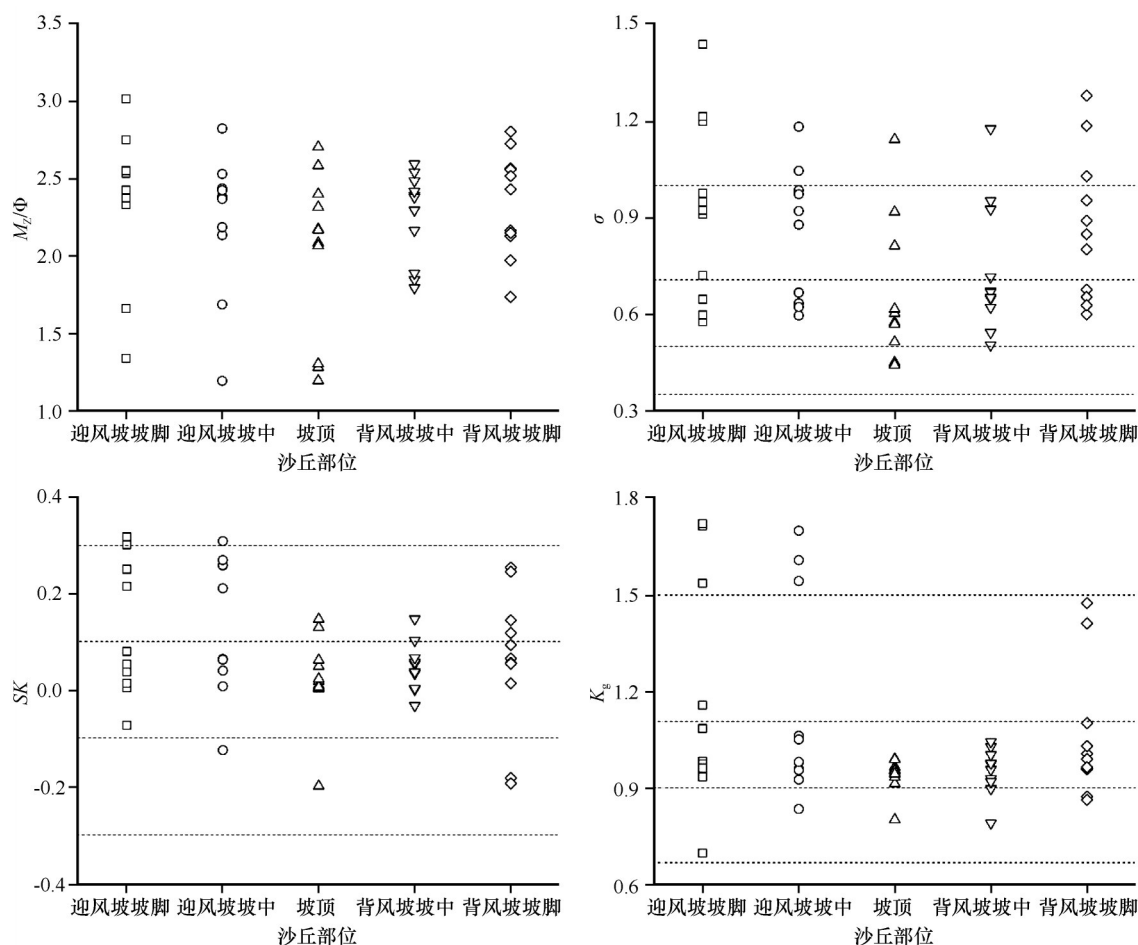


图4 沙丘不同部位粒度参数

Fig.4 Particle size parameters for different positions of sand dunes

2.1.3 沉积环境

单纯依据样品粒度参数的变化难以准确判定古尔班通古特沙漠的沉积环境,但可以初步反映出沙漠在历史进程中所经历的沉积过程。依据 Sahu^[38]的线性多元判别方法对沙丘沉积物进行计

算,得到采样沙丘的沉积环境包括风成沉积、浅海沉积、河流沉积、浊流沉积4类。其中风成沉积分布最广,占50.91%,其余3种沉积环境占比分别是浊流沉积18.18%、浅海沉积16.36%、河流沉积14.55%。

2.2 沉积物元素特征

2.2.1 常量元素特征

在地球化学环境条件下,沉积物中的常量地球化学元素通常以氧化物的形式存在^[39]。由表1可

知,样品常量元素组成均以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, SiO_2 平均含量63.63%, Al_2O_3 含量7.58%。研究区东北部的 SiO_2 含量大于东南部与西部,分别是68.70%、62.72%和62.45%,但 Al_2O_3 的含量(6.24%)低于东南部(7.52%)和西部(7.98%)。

表1 沙丘沉积物常量元素含量(单位:%)

Table 1 Major element content of sediment of sand dunes (unit: %)

元素	迎风坡坡脚		迎风坡坡中		坡顶		背风坡坡中		背风坡坡脚	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
SiO_2	63.53	4.23	63.79	4.46	65.47	6.17	62.78	2.30	62.59	2.96
Al_2O_3	7.45	1.17	7.84	1.09	7.13	1.41	7.59	0.85	7.89	0.85
K_2O	2.06	0.35	2.02	0.24	1.95	0.37	2.00	0.30	2.03	0.26
Na_2O	1.94	0.38	2.11	0.36	2.01	0.51	2.08	0.29	2.12	0.32
CaO	1.89	0.58	1.88	0.62	1.57	0.50	1.71	0.40	1.86	0.47
Fe_2O_3	1.72	0.63	1.78	0.63	1.60	0.71	1.68	0.55	1.77	0.55
MgO	0.85	0.33	0.90	0.35	0.68	0.35	0.83	0.27	0.90	0.28
TiO_2	0.19	0.06	0.19	0.05	0.18	0.07	0.18	0.05	0.19	0.05
P_2O_5	0.10	0.02	0.10	0.02	0.08	0.02	0.10	0.01	0.10	0.01
MnO	0.05	0.01	0.04	0.01	0.05	0.02	0.04	0.01	0.04	0.01

坡顶 SiO_2 含量最高(65.47%),背风坡坡脚 Al_2O_3 含量最高(7.89%)。 SiO_2 含量从迎风坡坡脚到坡顶增加,在背风坡减小,同时背风坡 SiO_2 含量低于迎风坡;迎风坡坡脚 K_2O 含量最高(2.06%),各部位含量变化趋势与 SiO_2 相反,与 CaO 含量变化趋势一致;背风坡坡脚 Na_2O 含量最高(2.12%),与迎风坡坡中 Na_2O 相近;迎风坡坡中 Fe_2O_3 含量最高(1.78%),与背风坡坡脚 Fe_2O_3 相近,坡顶含量最低;样品中 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 的含量均低于1%,迎风坡坡中与背风坡坡脚 MgO 含量最高(0.90%), TiO_2 、 P_2O_5 、 MnO 各部位含量相差小于0.02%,坡顶 MgO 、 TiO_2 、 P_2O_5 3种氧化物含量最低,分别是0.68%、0.18%、0.08%。

2.2.2 微量元素特征

统计的微量元素包括Ba、Sr、Zr、Rb、V、Cr、Co、Zn、Y、Pb、La、Ni、Cu、Nb、Th,共15种。微量元素与常量元素特征相似,不同采样地点主要成分相同,但含量差异更明显(表2)。样品微量元素组成以Ba、Sr、Zr、Rb元素为主,平均值分别是346.42、138.08、113.81、62.48 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其余微量元素含量均低于50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。研究区西部Ba、Sr、Zr、Rb、V、Cr、Zn、Y、La、Ni、Cu、Nb、Th元素均高于东北部与东南部,Co

元素东北部显著高于西部与东南部,Pb元素东南部略高于西部与东北部。

迎风坡坡脚的Ba元素含量最高(361.68 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$);背风坡坡脚的Sr、Rb两种元素含量最高,分别为143.25 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和63.72 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$;迎风坡坡中Zr元素含量最高(123.00 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。均值低于50 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 的元素中,Cr、Y、Pb、La、Ni、Cu等6种元素迎风坡坡中含量最高,Co元素在坡顶含量最高,Zn、Th两种元素在背风坡坡脚含量最高,Nb元素在迎风坡坡脚含量最高。

2.2.3 地球化学元素UCC标准化

样品沉积物地球化学元素经与上部陆壳平均化学组成(UCC)标准化无量纲处理后,可更好地反映组成元素的迁移规律^[40]。常量元素方面:样品与上部陆壳相比均产生了亏损, SiO_2 平均值0.96接近1, MnO 平均值0.74, Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 平均值分别为0.50、0.59、0.53,其余元素均小于0.5。研究区东北部 SiO_2 含量最大(1.04),产生富集,其余元素均亏损且含量最小;西部Al、K、Na、Ca、Fe、Mg、Ti、P、Mn元素含量最高;东南部 SiO_2 、 P_2O_5 含量与西部相同。坡顶 SiO_2 含量最高为0.99,相较于其余部位亏损最少,其余元素除 MnO 外均亏损较大,其中 P_2O_5 含量亏损

表 2 沙丘沉积物微量元素含量(单位:μg·g⁻¹)
Table 2 Trace element content of sediment of sand dunes (unit:μg·g⁻¹)

元素	迎风坡坡脚		迎风坡坡中		坡顶		背风坡坡中		背风坡坡脚	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
Ba	361.68	73.02	347.45	79.27	339.14	101.08	343.50	80.36	340.31	74.58
Sr	137.58	34.57	141.49	33.97	129.77	41.66	138.33	30.41	143.25	28.94
Zr	116.78	30.73	123.00	24.55	105.75	35.86	103.25	19.87	120.26	21.99
Rb	63.29	9.64	62.79	7.21	59.65	8.88	62.97	7.24	63.72	6.64
V	35.73	11.67	36.62	11.82	33.15	14.84	34.00	10.08	36.03	11.07
Cr	34.53	21.07	34.58	20.22	33.95	29.31	32.53	19.29	29.97	23.73
Co	23.37	21.53	27.53	23.45	41.41	30.12	25.00	15.98	25.65	16.22
Zn	21.40	9.70	22.02	9.60	18.55	10.28	20.85	7.91	22.34	8.13
Y	14.11	2.51	14.54	2.57	13.43	2.60	13.53	2.01	14.24	2.25
Pb	14.10	2.36	14.77	2.12	13.76	2.21	13.97	2.15	14.29	1.70
La	11.15	3.87	13.84	4.58	9.96	3.00	10.85	4.19	10.71	3.24
Ni	7.21	2.95	7.72	2.85	6.55	2.88	6.94	2.34	7.66	2.50
Cu	6.95	3.64	7.00	3.62	5.95	4.11	6.29	3.44	6.82	3.45
Nb	4.75	1.34	4.59	0.93	4.47	1.48	3.98	0.99	4.46	0.87
Th	1.47	1.59	1.42	1.47	1.24	0.98	1.08	0.68	1.69	1.66

最大;迎风坡与背风坡状况相似(图 5)。

微量元素方面:与上部陆壳相比 Co 元素有明显的富集(2.86),其余元素均产生了亏损,其中 Cr、Pb 分别为 0.95 和 0.71, Ba、Zr、Rb、V、Y 元素分别为 0.63、0.60、0.56、0.59、0.63,其余元素均低于 0.5,亏损较大。研究区东北部 Co 含量(5.63)远大于东南部和西部;东南部 Pb 含量略大于西部和东南部;其余 13 种元素西部均大于东南部大于东北部。坡顶

Co 元素含量富集显著。与常量元素一样,微量元素在沙丘各个部位并无显著迁徙规律(图 5)。

2.2.4 化学风化特征

2.2.4.1 化学蚀变指数

Nesbitt 等^[41-42]提出用化学蚀变指数 CIA 表征物质风化程度。于是, CIA 被广泛应用于定量判断沉积物在发生沉积过程时的气候环境以及化学风化程度^[43]。沉积物的风化强度与 CIA 值呈正比关系,

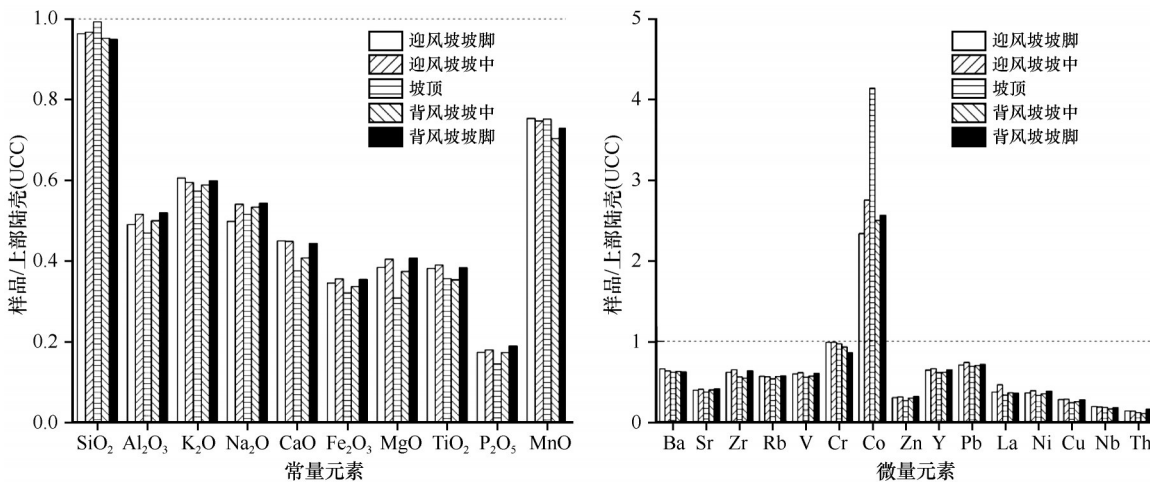


图 5 沙丘不同部位沉积物地球化学元素 UCC 标准化
Fig.5 UCC-standardization of geochemical elements for different positions of sand dunes

当CIA值为50—65时,风化程度表征为寒冷、干燥高纬度气候条件下偏低级的化学风化;当CIA值为65—85时,风化程度表征为温暖、湿润中纬度气候条件下偏中级的化学风化;当CIA值为85—100时,风化程度表征为炎热、潮湿的热带亚热带气候条件下的强烈的化学风化^[2]。

样品CIA值为45.50—50.29,平均47.63与上部陆壳(48.04)接近,远低于中国黄土(61.93)和陆源页岩(70.36)。研究区西部CIA值(47.38)小于东部,东北部CIA值(48.55)小于东南部(49.27),说明研究区西部经历的化学风化程度小于东部,同时东北部略小于东南部。迎风坡坡脚CIA值为45.50—49.78,平均47.39;迎风坡坡中CIA值为45.63—50.29,平均47.99;坡顶CIA值为45.73—49.17,平均47.31;

背风坡坡中CIA值为46.06—50.28,平均47.64;背风坡坡脚CIA值为45.91—50.07,平均47.81。

2.2.4.2 A-CN-K及A-CN-K-FM图

A-CN-K图用于预测地表过程中陆地风化趋势^[44],是依据质量平衡原理通过长石淋溶实验和矿物稳定性热力学计算综合得出的^[9],被运用于陆壳化学风化趋势的判断和直观反映化学风化过程中沉积物矿物学、主成分的变化^[45]。大陆风化早期以斜长石风化为标志,中期以钾长石、伊利石为标志,晚期以高岭石—三水铝石—石英—铁氧化物组成为特征^[45]。研究区西部 Al_2O_3 摩尔含量(46.80%)低于东北部(48.2%)、东南部(49.31%),而西部 $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}$ 、 K_2O 的摩尔含量(45.49%、16.39%)高于东北部与东南部(图6)。沙丘各部位同元素间差距小于1%。

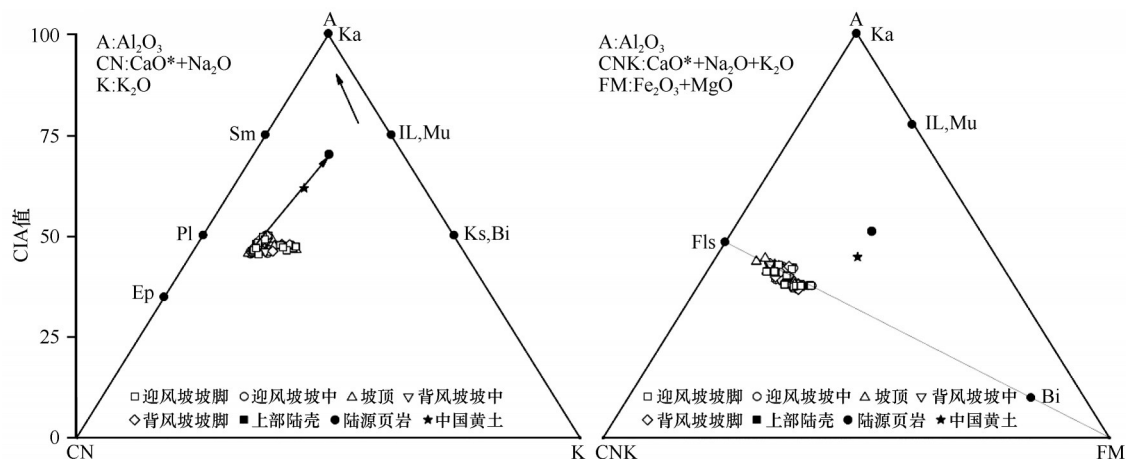


图6 沙丘不同部位沉积物A-CN-K及A-CN-K-FM三角图(长实箭头表示大陆风化趋势;Ka=高岭石、Sm=蒙脱石、PI=斜长石、Ep=绿帘石、IL=伊利石、Mu=白云母、Bi=黑云母、Ks=钾长石、Fls=长石)

Fig.6 A-CN-K and A-CN-K-FM ternary plots of sediments for different positions of sand dunes (The long solid arrows represent the weathering direction of the continent; Ka=kaolinite, Sm=smectites, PI=plagioclase, Ep=epidote, IL=illite, Mu=Muscovite, Bi=biotite, Ks=K-feldspar, Fls=feldspar)

A-CN-K图利用Al元素和碱金属元素含量的变化表征化学风化程度及矿物变化,但是无法反映其他金属元素风化过程和迁移特征。A-CN-K-FM图则可反映Fe、Mg元素组成差异,进一步表征沉积物风化过程中元素的迁移特征与富集过程。研究区西部 $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ 摩尔含量(32.31%)远高于东北部与东南部(11.99%、7.94%)。沙丘各部位同元素间差距小于1%(图6)。

2.3 沉积物表面微形态

2.3.1 磨圆度

石英沙的磨圆度对颗粒搬运动力和搬运距离、沉积环境有一定指示意义,磨圆度好的石英颗粒一

般经历了长距离的搬运或较强水动力的作用,而棱角状的颗粒则一般经历了较短的搬运路程或较弱水动力的作用,或者是经历了冰川作用等^[13]。依据鲍威尔的圆度等级划分原则^[12]将沙丘石英沙样品简单划分为圆状、次圆状、次棱角状和棱角状4个圆度等级。

对样品沉积物颗粒扫描电镜观察发现,圆状、次圆状、次棱角状和棱角状颗粒分别占6.02%、47.22%、40.28%、6.48%,颗粒磨圆度适中,次圆状、次棱角状较多。研究区东北部圆状10.71%、次圆状57.14%、次棱角状26.19%,磨圆度较好;西部圆状1.19%、次圆状41.67%、次棱角状50.00%;东南部圆状6.25%、次圆状39.58%、次棱角状47.92%。就沙

丘各部位而言,坡顶磨圆度最好,其次是迎风坡,背风坡最差。坡顶圆状(14.58%)远大于迎风坡(3.70%)和背风坡(3.33%);同时,坡顶次圆状(47.92%)略小于迎风坡(52.78%),远大于背风坡(36.67%);背风坡次棱角状51.67%。

2.3.2 机械特征成因

石英颗粒在不同的沉积过程中,呈现不同的特征标志,这些标志是搬运动力类型的主要依据,从而用来还原搬运过程和作用力强度^[12]。

气候干旱、风速强劲使得磨圆度较好的石英颗粒在风力搬运过程中撞击到较大颗粒表面会形成碟形坑(图7A);同时,石英沙颗粒在落地时对静止颗粒冲击力作用部位、方向和大小的不同使得一些

颗粒表面会留有各种不规则撞击坑(图7F);当多个坑或断口相交后就形成了蛇曲脊(图7A),蛇曲脊凸起在石英沙颗粒上,相对尖锐,对再次的撞击起重要作用;另一种干旱风成环境下的呈新月状的凹坑被称作新月形撞击坑;当磨圆度较好的颗粒受到大量粒径小的沉积物机械撞击,会形成众多表征沙漠沉积环境的麻坑(图7C);龟裂状片裂纹(图7E)在强烈风化作用和巨大温差交替等因素影响下在干旱沙漠环境中形成;直撞击沟多在水体环境中由尖锐棱角介质受到高速流体动能撞击或者刮擦形成;V形坑同样是流水环境的重要代表(图7B);痕迹较浅的直线型创伤为擦痕(图7D),是冰川运动获得强大的剪切势能形成的。

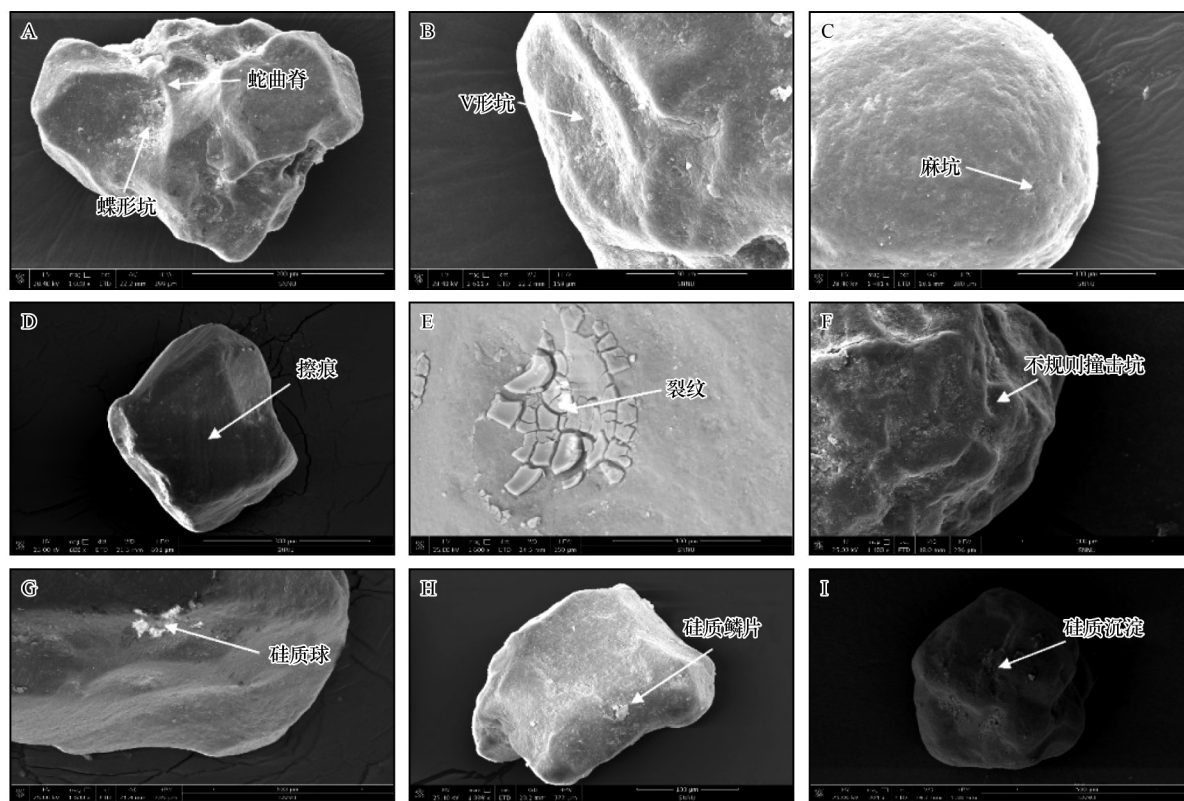


图7 石英沙颗粒表面形态特征

Fig.7 Surface morphological characteristics of quartz sand particles

2.3.3 化学特征成因

石英沙颗粒表面出现次生硅质特征是化学作用强烈的主要标志,一般形成硅质球,硅质鳞片和硅质沉淀等,夏季高温、冬季寒冷以及长时间降雪覆盖使得蜂窝状沙丘沉积物中记录了丰富的化学沉积特征。化学沉积初期, SiO_2 物质溶蚀、沉淀形成圆球形或近圆球形(图G);随着化学反应时间变长、反应强度加剧,大量的硅质球聚集在一起形成硅质

鳞片(图H);当化学反应迅猛,会溶蚀出大量次生硅物质沉淀成一定规模的不定形态,即为硅质沉淀(图I)。

从表3可以看出,样品机械特征平均面积占比为38.16%,其中碟形坑和不规则撞击坑占机械特征面积的62.70%,直撞击坑、V形坑、擦痕均有出现;化学特征面积平均占比为2.99%,硅质球、硅质鳞片和硅沉淀特征均有出现。研究区东北部风成机械

表3 沙丘不同部位石英颗粒表面微形态特征概率(单位:%)

Table 3 Probability of surface morphology of quartz particles for different positions of sand dunes(unit:%)

沉积环境	特征标志	迎风坡	坡顶	背风坡
机械作用	蝶形坑和蛇曲脊	11.12	16.29	18.70
	麻坑	7.78	10.83	2.10
	V形坑	0.96	1.33	2.44
	新月形撞击坑	1.17	1.50	0.00
	不规则撞击坑	12.34	4.96	8.20
	直撞击坑	1.03	0.00	0.00
	裂纹	0.44	1.38	0.30
	擦痕	4.17	3.50	3.60
化学作用	硅质球	0.34	0.00	0.00
	硅质鳞片	0.00	0.00	0.40
	硅沉淀	1.39	9.08	0.00

特征面积占比远小于西部与东南部,化学特征面积占比远高于西部与东南部;冰川作用下形成的擦痕只存在于东北部。单个沙丘迎风坡、坡顶、背风坡机械、化学特征面积占比相差不大,没有明显差异。

3 讨论

3.1 沉积物的理化特征

古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物的优势粒级为细沙,其次是中沙与极细沙,共计87.04%,与古尔班通古特沙漠研究结果(84.27%—100%)基本一致^[18]。这是受物质来源的影响,古尔班通古特沙漠发育于第四纪黏土与细沙层构成的古老冲积平原上,沙基质主要是中细沙^[46]。准噶尔盆地的西北方向风与蒙古-西伯利亚高压下形成的东北方向风相遇形成北风^[16],北风使得研究区东北部蜂窝状沙丘粗沙含量远高于东南部,平均粒径最大(1.77 Φ),分选性最差,而且研究区西部分选性最好,与古尔班通古特沙漠树枝状沙丘研究结果基本一致^[46]。风速从迎风坡坡脚到坡顶不断增大,坡顶细颗粒不断被吹蚀,粗颗粒累积,导致坡顶中沙、粗沙、极粗沙含量高于其他部位,从而形成平均粒径从迎风坡坡脚到坡顶增大的分布状况。沙漠植被主要分布在垅间和各坡坡中,坡顶基本无植被覆盖^[18,29-30],这同样导致坡顶的粗颗粒含量较高,平均粒径最大,分选性最好。

古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物常

量元素组成以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主, SiO_2 平均含量为63.63%,与同类研究结果一致^[18,26]。研究区东北部 SiO_2 含量最大, Al_2O_3 含量最小与沙漠 SiO_2 含量中部高于南部、 Al_2O_3 南部最高一致^[16]。通过UCC标准化可知,研究区东北部 SiO_2 富集(1.04),其余9种元素亏损严重;西部除 SiO_2 外其余元素亏损最少;东南部 SiO_2 、 P_2O_5 与西部相同。同时,研究区西部微量元素含量高于东部,这是因为准噶尔盆地西北山前剥蚀区形成了冲积扇,西北风将洪积物搬运至古尔班通古特沙漠,并就地风化堆积^[47]。 SiO_2 含量从迎风坡坡脚到坡顶逐渐增加,与平均粒径变化趋势一致,与 K_2O 、 CaO 含量变化趋势相反。其余元素在迎风坡坡中含量较大,可能是受到了迎风坡坡中有较高植被覆盖度的影响^[18]。除 SiO_2 、 MnO 外,其余常量元素含量在背风坡增加,与平均粒径变化趋势相反。

3.2 沉积物反映的沉积环境

依据Sahu^[38]的线性多元判别方法对样品粒度参数进行计算,得出古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物的沉积有风成沉积、浅海沉积、河流沉积、浊流沉积4种,以风成沉积为主。由于其分类方式没有区分出湖泊沉积环境,因此有研究认为古尔班通古特沙漠浅海沉积环境与古近纪时期的内陆河流湖泊沉积环境有关^[32]。样品微形态特征以机械作用形成痕迹为主,蝶形坑和不规则撞击坑占比较大,是风成环境良好的标志特征;直撞击坑、V形坑和擦痕的出现,说明古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘沉积过程可能经历了流水与冰川作用;硅质球、硅质鳞片和硅沉淀特征的出现,说明其沉积过程还受到了化学作用的影响。

实验样品的CIA平均值为47.63,与上部陆壳48.04接近,说明古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘处于大陆风化的早期阶段,干旱的气候条件使得沙丘表层组成物质缺乏有效的化学风化,以强烈的物理风化为为主。研究区西部CIA值小于东部,说明研究区西部化学风化程度最差。研究区东北部整体磨圆度较好,西部与东南部较差,可能与其粗颗粒含量较高有关,也可能与其经历了较强的化学作用有关;其风成机械特征面积占比最低,V形坑和直撞击坑面积占比较大,化学风化特征远高于西部与东南部,还存在一定的擦痕,说明研究区东北部石英沙经历的搬运过程最为复杂,包括了风成机械作用、

流水作用、冰川作用以及较强的化学风化作用,以风成机械作用为主。

4 结论

古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物受物质来源影响,整体以细沙为主,其次是中沙和极细沙;分选性主要在分选较好到分选中等之间,偏度主要为近对称,峰度主要为中等。常量元素以 SiO_2 和 Al_2O_3 为主;通过UCC标准化可知,常量元素均产生了亏损,微量元素Co富集明显;CIA平均值为47.63。石英颗粒磨圆度适中;微形态特征标志以蝶形坑和不规则撞击坑为主。

区域角度上,研究区东北部粗沙含量远高于研究区西部与东南部,平均粒径最大,分选性最差;常量元素亏损最严重;磨圆度最好,风成机械特征面积占比最小,化学特征面积占比最大,存在擦痕;研究区西部样品化学风蚀指数CIA最小(47.38)。平均粒径从迎风坡坡脚到坡顶增大,在背风坡变小;坡顶分选性最好。 SiO_2 含量从迎风坡坡脚到坡顶增大, K_2O 、 CaO 含量变化趋势与之相反;除 SiO_2 、 MnO 外,其余常量元素含量在背风坡增大。

古尔班通古特沙漠蜂窝状沙丘表层沉积物理化特征说明古尔班通古特沙漠处于大陆风化的早期阶段,沉积环境复杂,以风成沉积为主,干旱的气候条件使得沙丘表层组成物质缺乏有效的化学风化,以风成机械作用为主。研究区东北部沉积物搬运介质的平均动能较差,石英沙经历的搬运过程复杂;西部的化学风化状况最差。除迎风坡坡中外,沙丘各部位沉积环境无明显差异,基本保持一致。

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: 236-254.
- [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: 177-309.
- [3] Ellwood J M, Evans P D, Wilson I G. Small scale aeolian bed-forms[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, 45: 554-561.
- [4] Livingstone I. Grain-size variation on a 'complex' linear dune in Namib Desert [C]//Frostick L E, Reid I. *Desert Sediments: Ancient and Modern*. Oxford, UK: Blackwell, 1987: 281-291.
- [5] 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: 1-14.
- [6] Friedman G. Distinction between dune, beach, and river sands from their textural characteristics [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1961, 31: 514-529.
- [7] Ahlbrandt T S. Textural parameters of eolian deposits [M]//McKee E. A Study of Global Sand Seas. Honolulu, USA: University Press of the Pacific, 1979: 21-51.
- [8] Visser G S. Grain-size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39(3): 1074-1106.
- [9] 徐志伟, 鹿化煜, 赵存法, 等. 库姆塔格沙漠地表物质组成、来源和风化过程[J]. *地理学报*, 2010, 61(1): 53-59.
- [10] 陈丽华, 缪昕, 魏宝和. 扫描电镜在石油地质上的应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 51-57.
- [11] 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): 20-23.
- [12] Krinsley D H, Doornkamp J C. Atlas of quartz sand surface textures [M]. New York, USA: Cambridge University Press, 1973: 5-102.
- [13] 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: 5-33.
- [14] 王贵勇, 哈斯. 古尔班通古特沙漠蚀余沙丘的发现及其意义 [J]. *第四纪研究*, 2002, 22(3): 294.
- [15] 周宏飞, 肖祖炎, 姚海娇, 等. 古尔班通古特沙漠树枝状沙丘土壤水分时空变异特征[J]. *水科学进展*, 2013, 24(6): 771-777.
- [16] 季方, 叶玮, 魏文寿. 古尔班通古特沙漠固定与半固定沙丘成因初探[J]. *干旱区地理*, 2000, 23(1): 32-36.
- [17] 王雪芹, 雷加强. 古尔班通古特沙漠半固定沙垄面的蚀积特征[J]. *干旱区研究*, 1998, 15(1): 35-39.
- [18] 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: 1-144.
- [19] 王逢桂. 新疆子午沙鼠一新亚种[J]. *动物分类学报*, 1981(1): 104-105.
- [20] 王思博, 范福来, 乔璋, 等. 古尔班通古特沙漠东北部冬牧场鼠害调查[J]. *新疆农业科学*, 1983(3): 39-40.
- [21] 俞家荷. 大沙鼠对库尔班通古特沙漠草地的破坏作用及其防治[J]. *中国草原与牧草*, 1985(1): 54-56.
- [22] 立运, 昌笃. 新疆生物土壤沙漠研究所继续进行准噶尔盆地荒漠植被考察[J]. *植物生态学与地植物学丛刊*, 1982(1): 86.
- [23] 张立运. 古尔班通古特沙漠中的沙生和耐沙植物[J]. *干旱区地理*, 1985, 8(1): 2.
- [24] 魏文寿. 沙漠表层粒度与水热变化的环境效应分析: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. *沉积学报*, 1998(1): 152-156.
- [25] 刘华训, 汤奇成. 开发我国西北干旱地区的前景[J]. *科学*, 1987(3): 210-216.
- [26] 阿扎买提, 于振江. 牧道供水工程及近期内古尔班通古特沙漠草原开发的探讨[J]. *干旱区研究*, 1988, 11(2): 55-57.
- [27] 陈大中. 在古尔班通古特沙漠中敷设管道[J]. *石油工程建设*, 1989(5): 9-12.
- [28] 中国科学院治沙队. 治沙研究第3号[M]. 北京: 科学出版社, 1964: 7-26.
- [29] 钟德才. 中国沙海动态演化[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 1998: 29-67.
- [30] 吴正. 准噶尔盆地沙漠地貌发育的基本特征[M]//中国地理

- 学会.1960年全国地理学术会议论文选集(地貌):北京:科学出版社,1962:16-25.
- [31] 周颖,曹月娥,杨建军,等.古尔班通古特沙漠东缘风沙流结构特征[J].水土保持学报,2016,30(3):78-83.
- [32] 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,2000,20(2):77-83.
- [33] 周宏飞,周宝佳,代琼.古尔班通古特沙漠植物雾凇凝结实验研究[J].水科学进展,2010,21(1):65-71.
- [34] 刘铮瑶,董治宝,赵杰,等.人工固沙措施对沙丘沉积物特征及土壤养分的影响[J].生态学报,2020(4):1-9.
- [35] Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes* [M]. New York, USA: Routledge, 1995: 88-89.
- [36] 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.
- [37] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27: 3-26.
- [38] Sahu B K. Depositional mechanisms from the size analysis of clastic sediments [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1964, 34(1): 73-83.
- [39] 陈国祥.毛乌素沙地风成沉积物沉积学特征[D].西安:陕西师范大学,2019:41-44.
- [40] 郑海飞,郝瑞霞.普通地球化学[M].北京:北京大学出版社,2007:147-149.
- [41] Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299(5885): 715-717.
- [42] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [43] 毛沛妮,庞奖励,黄春长,等.汉江上游黄土常量元素地球化学特征及区域对比[J].地理学报,2017,72(2):279-291.
- [44] 李徐生,韩志勇,杨守业,等.镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J].地理学报,2007(11):1174-1184.
- [45] 罗万银,董治宝,钱广强,等.戈壁表层沉积物地球化学元素组成及其沉积意义[J].中国沙漠,2014,34(6):1-13.
- [46] 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.
- [47] 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.

Physicochemical characteristics and sedimentary environment of honeycomb dunes in Gurbantunggut Desert

Gao Chong¹, Dong Zhibao¹, Nan Weige¹, Liu Zhengyao^{1,2}, Zhu Chunming¹,
Wang Xiaozhi¹, Xiao Nan³, Zhang Xin¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Shaanxi Institute of Geo-Environment Monitoring, Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China; 3. College of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: In this paper, the characteristics of grain size, elements and Micromorphology of surface sediments of honeycomb dunes in Gurbantunggut Desert are sampled and analyzed, and its sedimentary environment is discussed. The results show that: (1) The surface sediments of honeycomb dunes in Gurbantunggut Desert are mainly fine sand; The major elements are depleted, and the trace element Co is enriched obviously; The chemical alteration index (CIA) is close to the average value of the upper continental crust; The roundness of quartz sand particles is moderate, and the micro morphological characteristics are mainly dished pits and irregular impact pits. (2) The northeast of the study area has the largest average particle size and the worst sorting performance; Serious loss of major elements; The micromorphological characteristics are the most complex; The CIA value in the west of the study area is the lowest. The average particle size increases from the toe of the windward slope to the top of the slope and decreases on the leeward slope; There was no significant difference between elements and micro morphological characteristics. (3) The sedimentary physicochemical characteristics show that the desert is in the early stage of continental weathering. The arid climate conditions make the surface components of sand dunes lack effective chemical weathering, and the sedimentary environment is complex, dominated by aeolian machinery.

Key words: honeycomb dunes; sediment; grain size; geochemical elements; micromorphology