

# 腾格里沙漠南缘风积物粒度空间分布及物源指示

高文婷<sup>1</sup>, 王 斌<sup>1</sup>, 彭 俊<sup>2</sup>, 梁爱民<sup>1</sup>

(1.陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710062; 2.湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411103)

**摘 要:**为探讨腾格里沙漠南缘风积物物源,基于粒度参数分析其空间分布,采用粒度端元分析与潜在源区对比,结合常量元素法进行了多角度探究。结果表明:黄河北岸沉积物粒度较南岸粗,两岸沉积物粒度存在较明显的空间差异性。粒度空间分布差异结合风沙活动、地形特征,可表明腾格里沙漠南缘的黄河北岸为南岸沉积物的上风向源区之一;就地球化学元素分析表明,沙漠南缘与祁连山区常量元素特征具有一定相似性,与沙漠腹地差异较大。提取 4 个端元,多角度分析表明端元 1(峰值粒径范围是 30~50  $\mu\text{m}$ )为全由祁连山北麓风成沙所组成的沉积体,端元 2(100~120  $\mu\text{m}$ )主要由沿黄北岸风成沙和黄河二次搬运所组成。端元 3(170~250  $\mu\text{m}$  和 15~25  $\mu\text{m}$ )为沿黄以北就地起沙,端元 4(300~600  $\mu\text{m}$  和 10~20  $\mu\text{m}$ )由黄河搬运沉积物所组成。综上,可认为腾格里沙漠南部边缘区沙物质主要是由黄河、沿黄以北和祁连山北麓所提供。

**关键词:**物源; 粒度; 端元分析; 腾格里沙漠南缘

中图分类号:P931.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0129-09

## Spatial Bistribution of Granularity Parameter and Provenance Indication of Aeolian Deposits on the Southern Margin of the Tengger Desert

GAO Wenting<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, PENG Jun<sup>2</sup>, LIANG Aimin<sup>1</sup>

(1.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University School, Xi'an 710062, China; 2.College of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411103, China)

**Abstract:** In order to explore the aeolian material source in the southern margin of the Tengger Desert, the spatial distribution of aeolian material was analysed based on the particle size parameters. The particle size and element analysis was used and compared with the potential source area, the constant element method was used to explore from multiple angles. The results show that: The grain size of sediment on the North of the Yellow River is coarser than that of the South, and there are obvious spatial differences between the two banks. The spatial distribution difference of grain size, combined with sandstorm activities and topographic characteristics indicates that the North of the Yellow River in the southern edge of Tengger desert is one of the upwind source areas of the sediment on the South of the Tengger Desert. The geochemical element analysis shows that the characteristics of major elements in the south of the Yellow River are similar to those in the Qilian mountainous area, and are quite different from those in the desert hinterland. Therefore, it can be considered that the Qilian mountainous area may be one of the provenances south of the Yellow River; four end-members are extracted, and the multi angle analysis shows that end-member 1 is composed of Aeolian sand at the northern foot of the Qilian Mountain, and end-member 2 is mainly composed of Aeolian sand along the North Bank of the Yellow River and the secondary transport of the Yellow River. End-element 3 is composed of sediments transported by the Yellow River. It can be considered that the Yellow River, its banks and the Qilian mountains provide provenance for the southern edge of Tengger Desert. It is of great significance to extract the provenance information of desert sediment from grain size data. However, in order

收稿日期:2021-08-19

修回日期:2021-09-09

资助项目:国家自然科学基金(42072208);陕西省自然科学基金基础面上项目(2018JM4027);中央高校基本科研业务费(GK201803056)

第一作者:高文婷(1997—),女,河南周口人,硕士研究生,研究方向为地表过程与全球变化。E-mail:191984@snnu.edu.cn

通信作者:王斌(1984—),男,陕西商洛人,博士,副教授,主要从事地貌学研究。E-mail:bin.wang@snnu.edu.cn

to accurately determine the source of desert sediment, it is still necessary to make comprehensive analysis from other means such as geochemical elements.

**Keywords:** provenance; grain size; end member analysis; Southern margin of the Tengger Desert

腾格里沙漠作为中国第四大沙漠,地处中国北方沙漠向黄土高原过渡的特殊地带<sup>[1]</sup>,是黄土高原潜在粉尘源区<sup>[2]</sup>,也是我国沙尘暴源区及沙尘输移的重要通道之一<sup>[1]</sup>。来自沙漠的粉尘会对生物地球化学循环、辐射平衡、空气质量与人类健康等产生影响,沙漠甚至会影响整个地球系统。在土地荒漠化乃至全球变化的大背景下,腾格里沙漠作为中国北方重要的沙尘源区,因其对沙尘贡献率较大而日益受到重视<sup>[3]</sup>。沉积物粒度特征可以表征风力对源区物质搬运与分选作用<sup>[1]</sup>,是风沙地貌学研究的基本手段之一,风沙的来源更是沙漠地貌和形成演化研究中必不可少的一部分,研究结果将促进对不同地表过程对构造运动和气候变化响应的认识。

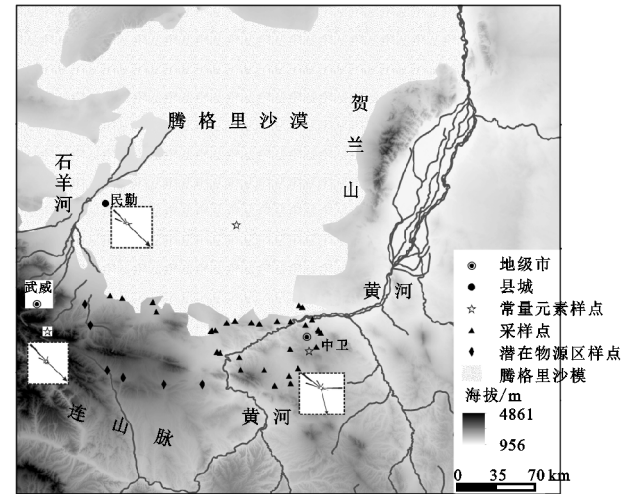
相比于周边的巴丹吉林沙漠的物源研究来说,对腾格里沙漠粒度及物源研究还远远不够,现有的分析仅集中在粒度组成及分布特征、区域变化、沉积构造和地球化学组成等方面<sup>[4]</sup>,且整个沙漠的研究主要集中在东南缘和北缘,对腾格里沙漠南缘的风积物粒度参数空间分布和物源分析研究较少。粒度参数对物源背景有重要的指代意义,沙源物质属性同沙物质粒度分布特征具有直接关系<sup>[4]</sup>。粒度参数的空间差异直接反映沉积物所经历的搬运、堆积过程,对物源分析具有重要意义。但一些研究者指出,沉积物粒度参数的多解性问题,很难将其作为沉积环境解释的证据<sup>[5]</sup>。比如把偏度值作为判别沉积环境的指标时,风成沙不一定都表现为正偏态<sup>[6]</sup>。在自然界中,沉积物的类型多样,成因多变,来源广泛。要准确判断物源成因,需综合应用多种粒度判别方法,如端元分析模型,或者借助粒度之外的方法,如常量元素法、磁化率、扫描电镜、稀土元素法<sup>[7]</sup>。基于此,本文主要是通过粒度参数空间分析,端元分析模型及与潜在源区的对比和常量元素分析法,从多角度多维度多尺度分析研究区沙漠的沉积物来源,以期沙漠形成演化提供借鉴和参考。

# 1 研究区概况及研究方法

## 1.1 研究区概况

腾格里沙漠(37°54′—39°33′N,103°52′—105°36′E)是我国第四大沙漠。位于阿拉善高原东南部,北部以哈拉乌山为界,南部与祁连山山前洪积扇前缘相接,西北隔雅布赖山与巴丹吉林沙漠相连,东抵贺兰山

(图 1)<sup>[8]</sup>。本研究区为腾格里沙漠南部边缘,是中国中部沙漠与黄土高原的过渡地带。区内盛行风向为西北(NW)、西西北(WNW)和北西北(NNW)<sup>[9]</sup>。腾格里沙漠的流动沙丘已经在沙坡头到达黄河<sup>[10]</sup>。沙漠起沙风受局部地形影响存在明显的空间差异,但总体以西北风为主。在沙漠南部多年平均输沙势为 358.7 VU,属于中风能环境,合成输沙方向为 NW 为主,且方向变化小<sup>[11]</sup>。



注:黑虚线内分别为民勤、武威及中卫输沙势玫瑰图。

图 1 腾格里沙漠位置及样点分布

## 1.2 数据采集与分析

沿腾格里沙漠南缘东南—西北走向(武威至中卫,与主风向平行)分别选取沙丘外缘地势平坦区、丘间地与黄河南北两岸低级阶地 3 种地表类型系统采样。为揭示腾格里沙漠南缘粒度空间分布特征,所有粒度样品按与研究区段黄河的相对位置划分为黄河北岸和黄河南岸。共 34 个采样点,依次命名为 TGL<sub>1</sub>—TGL<sub>34</sub>(图 1)。在每种类型地表 0—3 cm 处随机取 1~5 个粒度样品,共记 91 个样品,样品类型分为风成沙和砂质黄土。黄河北岸共取得 26 个风成沙样品、24 个砂质黄土样品,黄河南岸共取得 2 个风成沙样品、39 个砂质黄土样品。风成沙颜色为黄色,结构松散,分选性较好。在野外采样中发现部分风成沙单元呈规则层理。砂质黄土结构紧实,没有明显层理。为保证样品具有一定的代表性,每个样品取样面积为 20 cm×20 cm,且重量均在 100~200 g,样点的地理位置用卫星定位仪(GPS)精确定位,对采集的样品用样品袋密封带回。

此外,根据前人对腾格里沙漠物质来源的研究,

沙漠接受的风力输送的沉积物,主要来自于祁连山,因此在祁连山北麓潜在物源区进行采样<sup>[12]</sup>,共取得样品 17 件(5 个采样点,与前文取样方法一致)。所有样品经过前处理后(方法见参考文献<sup>[13]</sup>)采用英国马尔文公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行测试,测试范围是 0.02~2 000  $\mu\text{m}$ 。粒度分级根据伍登-温德华粒级标准(Udden-Wentworth Scale),粒度参数计算采用 Folk-Ward 图解法,端元分析使用 Paterson 等设计的 Analsize 软件进行<sup>[14]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 粒度参数特征

粒级级配能直观反映风成沉积物的粒径组成,与沙源和风动力环境密切相关<sup>[3]</sup>。研究区不含砾石,极粗砂含量极少。由图 2A 可知,腾格里沙漠南缘砂质黄土粒级级配从大至小依次是粉砂黏土(14.54%~90.78%)、极细砂(9.02%~41.36%)、细砂(0.22%~38.94%)、粗砂(0~9.59%)和中砂(0~13.15%)。由图 2B 可知,腾格里沙漠南缘风成沙粒级级配从大到小依次是细砂(23.63%~60.79%)、极细砂(3.77%~45.69%)、中砂(0.71%~43.61%)、粉砂黏土(0~28.65%)和(0~22%)。

平均粒径  $M_z(\Phi)$  代表粒度分布的集中趋势,可以体现沉积物搬运介质的平均动能<sup>[7]</sup>。由图 2C—D 可知,砂质黄土平均粒径介于 3.084~5.7  $\Phi$ ,为极细砂和粉砂黏土粒级。风成沙平均粒径介于 1.969~3.753  $\Phi$ ,为中砂、细砂和极细砂粒级。与前文结果一致。分选系数  $SD(\Phi)$  反映粒径分布的分散程度<sup>[7]</sup>,砂质黄土分选系数介于 1.229~2.605  $\Phi$ ,分选较差,风成沙分选系数介于 0.524~2.066  $\Phi$ ,分选较好。偏度(SK)可判断粒度分布的非对称性程度<sup>[15]</sup>。砂质黄土偏度的变化范围是 0.09~0.453,样品呈现近对称、正偏、极正偏,这些样品的沉积物颗粒集中在细端部分。风成沙偏度的变化范围是 -0.154~0.536,样品呈现负偏、近对称和正偏,大部分样品颗粒仍然集中在细端部分。砂质黄土峰度(KG)的变化范围是 0.871~2.237,风成沙峰态介于 0.934~2.15,大部分样品峰度等级均为中等。

### 2.2 粒度参数空间分布

由图 3 可知,黄河北岸主要是砂和粉砂质砂组成,黄河南岸主要是砂质粉砂和粉砂组成,表明研究区黄河北岸沙粒组分略粗于黄河南岸。此外,还对比了同一沉积物类型下黄河南岸的粒级组成。

由表 1 可知,黄河北岸风成沙沉积物组分主要为细砂(粒级级配均值为 35.391%,下同),其次为极细

砂(20.388%),中砂(20.340%)次之。南岸风成沙沉积物组分主要为细砂,平均含量 51.115%。黄河北岸砂质黄土沉积物组分主要为粉砂黏土,平均含量为 50.259%。黄河南岸砂质黄土沉积物主要组分与北岸相同,为粉砂黏土,平均含量为 63.413%。对两岸同一沉积物类型组分含量进行对比后发现,即使相同沉积物类型下,黄河北岸沉积物组分仍整体较南岸更粗,两岸沉积物粒级级配存在较明显的空间差异性。

### 2.3 端元粒度特征

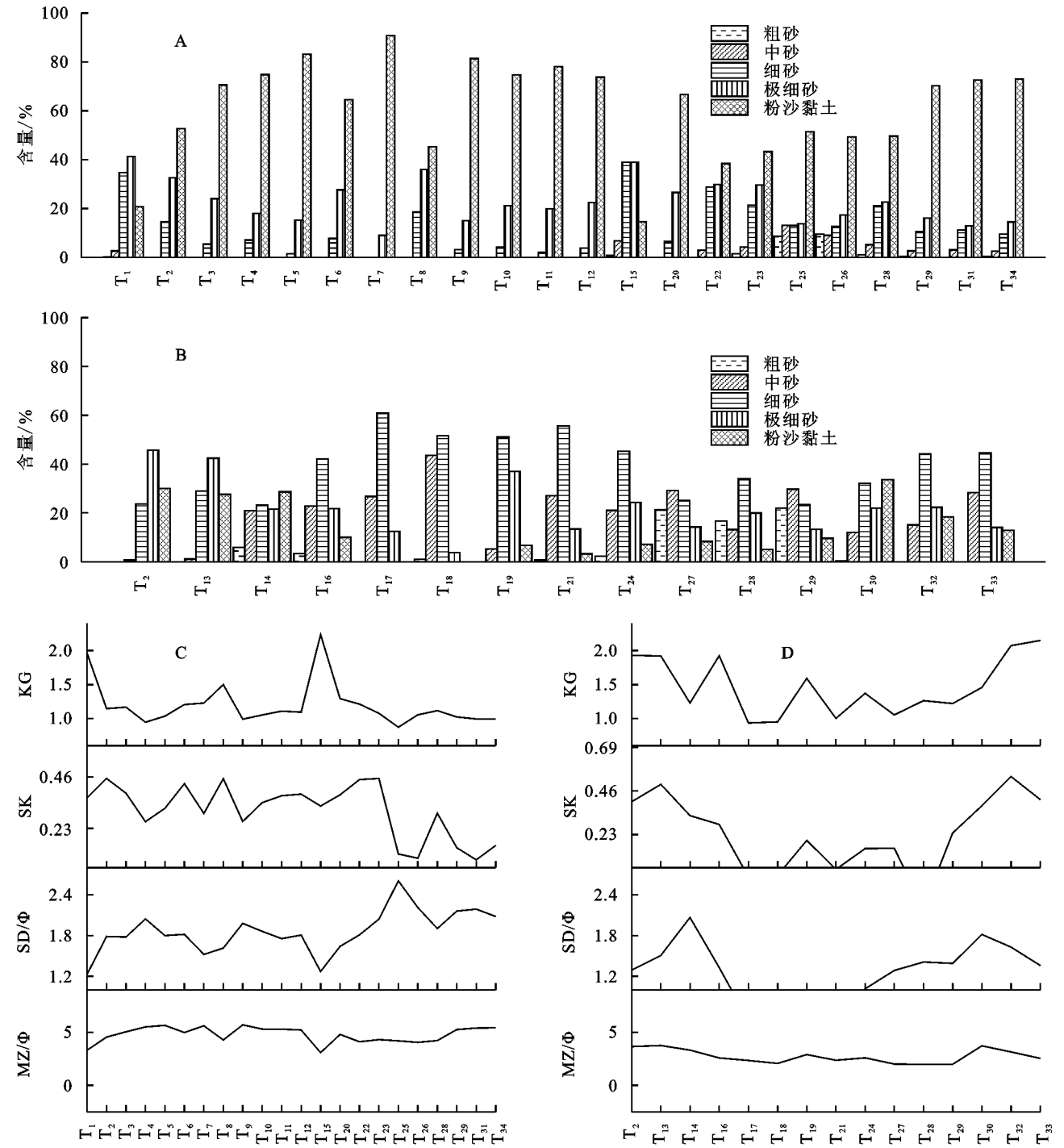
利用 Analsize 软件包<sup>[16]</sup>在 Matlab 2018b 平台上对研究区 91 个粒度数据进行 Nonparametric EMA 计算,当端元数量达到 4 时(图 4A),线性相关系数  $R^2$  在 0.9 以上,角度偏差小,所以本文选择 4 个端元对本组粒度数据进行分析。从分离出来的 4 个端元粒度频率曲线(图 4B)可知,端元 1(EM1)表现为宽缓的单峰,峰值集中在 30~50  $\mu\text{m}$ (粗粉砂),表明沉积物组成较单一或集中。端元 2(EM2)的粒度频率曲线表现为不明显的多峰,主峰峰值集中在 100~120  $\mu\text{m}$ (细砂),两个不明显的宽缓次峰峰值集中在 10~15  $\mu\text{m}$ (细粉砂)和 2~4  $\mu\text{m}$ (黏土),表明该组物源相对复杂。端元 3(EM3)表现为正偏态的双峰,主峰偏粗粒一侧且峰值范围是 170~250  $\mu\text{m}$ (细砂),次峰粒径范围是 15~25  $\mu\text{m}$ (细粉砂),表示沉积物以粗组分为主,细组分含量少。端元 4(EM4)为较平缓的不明显的双峰,EM4 虽然与 EM3 同为双峰态分布,但其平均粒径更大。主峰峰值范围是 300~600  $\mu\text{m}$ (中—粗砂),次峰为 10~20  $\mu\text{m}$ (细粉砂)。结合双峰态的粒级分布可判断,EM3 和 EM4 是粗细颗粒混杂沉积的结果。此外,从这 4 个端元的概率累积曲线(图 4C)中可以判断,端元 1 是由悬移和跃移组分组成。端元 2 和端元 3 都以跃移组分为主,悬移组分次之,含极少的蠕移质。可能端元 2 和端元 3 在蠕移质段粒径上有一定联系。端元 4 以跃移组分为主,悬移组分占比小。

### 2.4 地球化学元素特征

2.4.1 常量元素特征 统计分析了腾格里沙漠南缘不同区域沉积物常量元素丰度(表 2),就沙漠南缘、祁连山区和沙漠腹地 3 个不同区域而言,常量元素均主要有  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  共 7 种元素。由表 2 可得,3 个区域均以  $\text{SiO}_2$  含量最高,沙漠南缘平均含量为 68.54%,祁连山区平均含量为 57.82%,沙漠腹地平均含量为 87.01%,沙漠腹地  $\text{SiO}_2$  含量明显高于其他两区域。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量次之,沙漠南缘均值为 11.23%,祁连山区均值为 11.59%,沙漠腹地均值为 6.75%,沙漠腹地  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量低于其他两区

域。其次是 CaO 和  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ，沙漠南缘均值分别为 7.68%，4.16%，祁连山区均值分别为 7.83%，2.94%，沙漠腹地均

值分别为 0.59%，1.58%。 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  的各区域平均含量均较少，均在 2% 左右。



注：样品编号大写为砂质黄土，小写为风成沙。

图 2 粒级级配和粒度参数

与上陆壳(UCC)平均化学成分相比(图 5A)，沙漠南缘除 CaO 相对富集外， $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  成分基本不变，其余元素均发生不同程度的淋失。祁连山区 CaO 也相对富集， $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$  成分基本保持，但  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  淋失程度更大。沙漠腹地则呈现完全不同的趋势，除  $\text{SiO}_2$  相对富集外，其余成分均存在不同程度亏损。与陆源页岩相比，沙漠南缘和祁连山

区  $\text{SiO}_2$ 、CaO 和  $\text{MgO}$  相对富集， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{K}_2\text{O}$  则相对亏损。沙漠腹地则除了  $\text{SiO}_2$  相对富集，其他元素均亏损。石英的输入增加风成沉积物的  $\text{SiO}_2$  含量。粗粒粉尘颗粒也通常富含石英、长石和碳酸盐，沙漠边缘往往含有较粗颗粒。所以，这可能与沙漠边缘沉积物颗粒偏粗含有较高的石英有关<sup>[10]</sup>。沙漠南缘与祁连山区常量元素特征相似，与沙漠腹地差异较大。



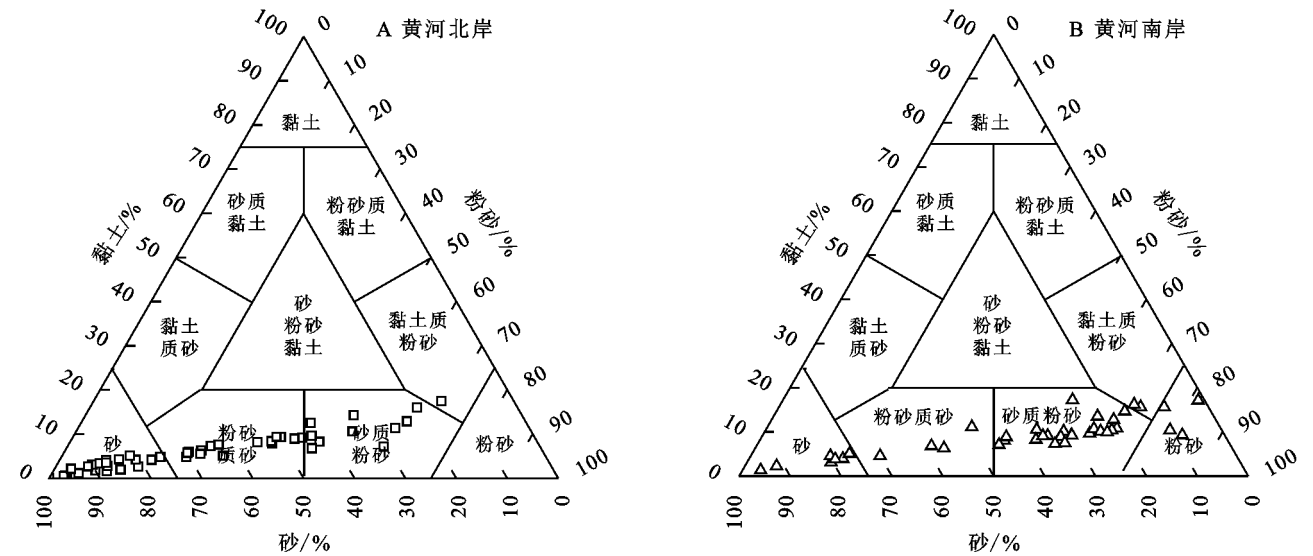


图 3 黄河两岸的 Shepard 沉积物三角形分类图

表 1 腾格里沙漠南缘沿黄两岸不同沉积物类型粒级级配

采样位置 (n=样本数)	沉积物 类型	统计	极粗砂	粗砂	中砂	细砂	极细砂	粉砂 黏土
范围			0~4.065	0~16.548	0.84~14.212	4.07~40.57	9.14~36.23	13.25~80.29
北岸(n=24)	砂质黄土	均值	0.210	2.009	5.012	19.695	22.814	50.259
		变异系数	3.972	1.957	0.819	0.538	0.398	0.401
		范围	0~0.76	0~0.79	0~5.34	0.04~36.87	8.26~46.74	19.59~91.71
南岸(n=39)	砂质黄土	均值	0.019	0.022	0.257	10.177	26.093	63.413
		变异系数	6.245	5.685	3.531	1.056	0.405	0.333
		范围	0~13.203	0~33.378	0.05~43.61	16.126~60.79	3.77~44.93	0~54.38
北岸(n=26)	风成沙	均值	1.326	7.158	20.340	35.391	20.388	15.399
		变异系数	2.348	1.451	0.553	0.371	0.499	0.934
		范围	0.000	0.000	1.36~9.13	45.24~56.99	29~44.91	4.91~8.49
南岸(n=2)	风成沙	均值	0.000	0.000	5.245	51.115	36.955	6.700
		变异系数	0.000	0.000	1.048	0.163	0.304	0.378
		范围	0.000	0.000	1.36~9.13	45.24~56.99	29~44.91	4.91~8.49

2.4.2 化学风化特征 化学蚀变指数 CIA(chemical index of alteration)是用来反映物源区风化程度指标。CIA 值依据 Al,K,Ca,Na 等元素的摩尔数进行计算,可表征长石风化为黏土矿物程度,定量分析硅酸盐矿物的风化强度。沉积物遭受的风化越强,CIA 值越大<sup>[17]</sup>。CIA 值介于 50~65,反映寒冷、干燥的气候条件下低等的化学风化程度。CIA 值介于 65~85,反映温暖、湿润条件下的中等的化学风化程度;CIA 值介于 85~100,反映炎热、潮湿的热带亚热带条件下强烈化学风化程度。腾格里沙漠南缘的 CIA 值在 48.01~60.74 变化,均值为 54.27,与上陆壳的平均值 46.15 更接近,远小于陆源页岩(69.45)。据此可以判定,腾格里沙漠南缘砂物质遭受了低等的化学风化,无明显的黏土矿物的组分。

本文采用了大陆化学风化趋势预测的 A-CN-K 三角图解模型<sup>[18]</sup>。它在描述不同样品 CIA 值在三角图解中的分布情况时,也可以判断样品的风化特征和源岩成分。一般情况下,构造因素控制源岩的供应与剥蚀程度,气候因素影响沉积物的化学风化程度。如果 A-CN-K 图中样点分布分散,表明构造和气候环境均处于非稳定状态;反之,源岩化学风化和剥蚀处于相对稳定状态<sup>[19]</sup>。从图 5B 可以看出,腾格里沙漠南缘各区域数据点集中分布在 UCC 附近,风化趋势线平行于 A-CN 连线。说明腾格里沙漠南缘沉积物与 UCC 化学组成相近,有相似的 SiO<sub>2</sub>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,CaO,Na<sub>2</sub>O,K<sub>2</sub>O,MgO 的相对含量,均处于较弱的去 Na,Ca 阶段即较弱的大陆化学风化初级阶段。

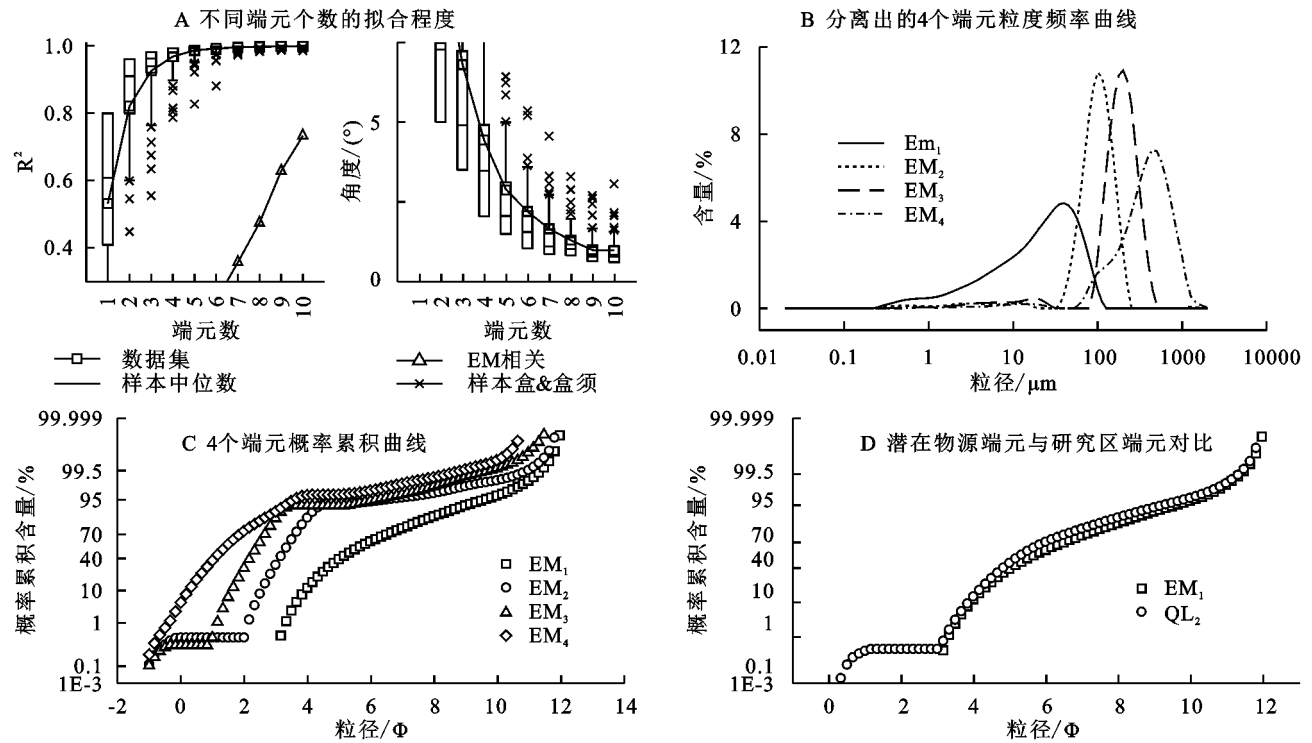


图 4 粒度端元分析结果

表 2 腾格里沙漠南缘常量元素含量

采样位置	编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CIA
沙漠南缘	X-1(平均)	66.74	11.92	4.53	8.38	2.58	2.51	2.44	51.55
	X-2(平均)	67.16	11.41	4.25	8.58	2.65	2.44	2.67	50.11
	X-3(平均)	71.72	10.37	3.70	6.07	2.63	2.38	2.41	48.01
祁连山区	W-1	55.98	11.27	2.47	9.15	1.53	2.08	2.88	60.74
	W-2	59.32	10.85	2.56	7.72	1.84	2.19	2.70	56.29
	W-3	59.40	11.30	2.80	7.59	1.80	2.15	2.98	57.80
	W-4	58.24	11.61	2.63	7.77	1.77	2.19	2.97	58.62
	W-5	57.17	11.24	2.64	8.70	1.71	2.14	3.04	58.60
	W-6	56.42	12.10	3.23	7.92	1.72	2.29	3.12	59.79
	W-7	58.42	10.94	2.78	8.37	1.76	2.08	2.91	57.63
	W-8	57.94	12.65	3.77	6.50	1.90	2.38	2.86	58.90
	W-9	57.52	12.39	3.60	6.75	1.91	2.39	3.10	58.28
沙漠腹地	D-1(平均)	87.01	6.75	1.58	0.59	1.07	2.67	0.57	53.86
	UCC(上陆壳)	66.00	15.20	5.00	4.20	3.90	3.40	2.20	46.15
	PAAS(陆源页岩)	62.80	18.90	7.22	1.30	1.20	3.70	2.20	69.45

注: X-1、X-2、X-3 原始数据源自文献[10], W-1、W-2、W-3、W-4、W-5、W-6、W-7、W-8、W-9 原始数据源自文献[20], D-1 原始数据源自文献[21], 上陆壳(UCC)和陆源页岩(PASS)原始数据源自文献[19]。

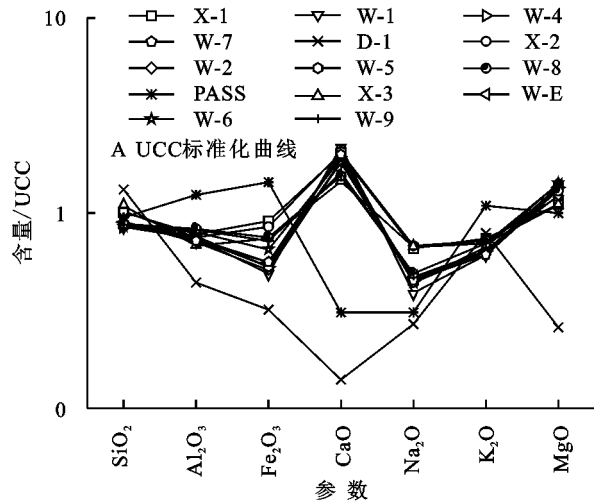
### 3 讨论

#### 3.1 端元沉积类型判定

前文已经初步判断了 4 个端元所代表的沉积学意义,即 EM1 是细粒的跃移质。端元 2 和端元 3 为粗细颗粒混杂堆积。端元 4 为粗粒跃移质。要准确地判断这 4 个端元所代表的沉积类型,还需将它们与粒度空间分布、潜在物源供应和地球化学元素特征结合考虑。

EM<sub>1</sub> 表现为宽缓的单峰,峰值集中在 30~50 μm(粗粉砂)。≥30 μm 的颗粒很难搬运到 100 km 以外的地方<sup>[22]</sup>。中等风暴条件下(风速  $u=15$  m/s), >20 μm 的粉尘颗粒也不大可能被搬运到离源区 30 km 以外的地方<sup>[22]</sup>。雅布赖山距离研究区约 222 km,因搬运距离过远,对该组分几乎没有贡献。EM<sub>1</sub> 频率曲线分布特征(图 4B)与典型的现代风尘粒度分布曲线较一致,均呈单峰且分布众数粒径为中、粗粉砂。因此,端元 1

可能是中远源短期悬浮沉积的风成粗粉砂组分。这点也得到了常量元素数据的支持。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比值处于 4.34~12.89, 明显大于陆源页岩(3.32)和上陆壳(4.34)的比值, 成分成熟度高, 沉积物搬运距离稍

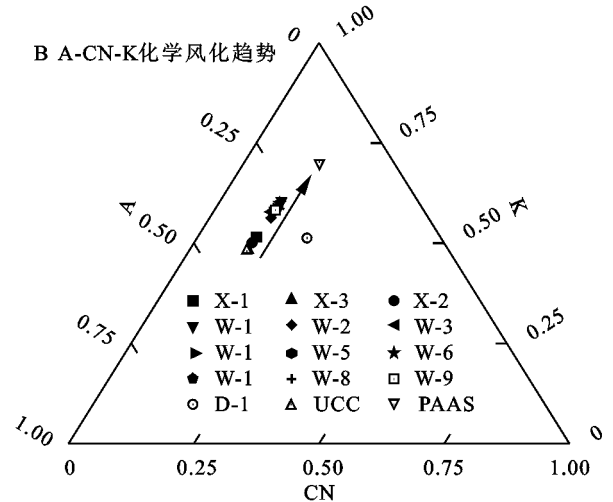


注: B 图中 A =  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , C =  $\text{CaO}$ , N =  $\text{Na}_2\text{O}$ , K =  $\text{K}_2\text{O}$ , CaO-硅酸盐矿物中的摩尔含量。

图5 常量元素的 UCC 标准化曲线和 A-CN-K 化学风化趋势

EM<sub>2</sub> 该组分物源复杂, 呈不明显的多峰, 主峰峰值集中在 100~120  $\mu\text{m}$  (细砂), 两个不明显的宽缓次峰峰值集中在 10~15  $\mu\text{m}$  (细粉砂) 和 2~4  $\mu\text{m}$  (黏土)。100~200  $\mu\text{m}$  的细砂端元主要为近岸沉积, 是由强劲地表风以滚动或跃移方式搬运的风成沙<sup>[23]</sup>。因此估计端元 2 以近源沉积的风成细砂为主。当平均风速为 15 m/s 时, 10~20  $\mu\text{m}$  的颗粒可以搬运至 500 km 至几千千米, <20  $\mu\text{m}$  的颗粒可以长期悬浮被搬运至很远<sup>[24]</sup>。但由于季节性河流对边坡沉积物连同黏土一起进行侵蚀重塑、搬运也可以产生类似的结果。所以端元 2 中的细粉砂组分可能是远源粉尘或附近河流二次侵蚀搬运的产物。有学者认为, 2~4  $\mu\text{m}$  的黏土组分是在沉积后的成壤和风化作用过程中产生。但是 Sun 等<sup>[25]</sup> 认为风化作用很少能影响到风成沉积物中 2~10  $\mu\text{m}$  的粒级组分。风化作用不会对该粒级组分有较大影响, 也排除该粒级组分依附于粗颗粒或者以聚合体的方式传播。因此端元 2 中的 2~4  $\mu\text{m}$  (黏土) 成分只可能是高空传播的远源黏土组分<sup>[7]</sup>。此外, 端元 2 富集样品主要在沿黄南岸, 由粒度空间分布特征初步可知, 研究区黄河北岸沙粒组分略粗于黄河南岸。图 1 (输沙势玫瑰图) 表明, 民勤、武威、中卫主要输沙势方向均为东南方向, 且总体上属于中能风环境。研究区黄河北岸地势偏低 (图 1), 南岸地势明显高于北岸。在西风、西北风的作用下, 腾格里沙漠向南推进, 沙漠粗颗粒在运移过程中易被黄河拦截, 砂物质难以抵达黄河南岸。部

远, 即为中远源组分。为更准确判断端元沉积类型, 我们将其与祁连山潜在物源端元对比分析 (图 4D), 发现 EM<sub>1</sub> 与 QL<sub>2</sub> 重合性极高, 说明粗粉砂组分 EM<sub>1</sub> 很可能是全系祁连山北麓的 QL<sub>2</sub> 组分贡献。



分细砂组分越过黄河, 在南岸受地形影响风速于山前降低, 风携带的细砂组分随风动力减弱在山前沉积<sup>[15]</sup>, 沉降至黄河南岸。研究区风沙活动结合地形地貌, 可表明腾格里沙漠南缘的黄河北岸为南岸沉积物的上风向源区之一。综上所述, 推断端元 2 主要是由沿黄北岸风成沙为主, 通过高空气流的远源粉尘或黄河二次搬运为辅所贡献的组分。

端元 2 和端元 3 均为粗细颗粒混杂堆积 (图 4C)。但 EM<sub>3</sub> 主峰峰值范围是 170~250  $\mu\text{m}$  (细砂), 次峰粒径范围是 15~25  $\mu\text{m}$  (细粉砂), 粗组分含量更多。据前文所述, 估计端元 3 为近源风成沙为主的细砂组分。此外, 端元 3 富集的样品主要集中在沿黄以北, 地球化学元素分析中排除了沙漠腹地的影响, 图 4C—D 也表明 EM<sub>3</sub> 与祁连山潜在物源区无关, 所以推断 EM<sub>3</sub> 可能是就地起沙。

EM<sub>4</sub> 为不明显的双峰, 主峰峰值范围是 300~600  $\mu\text{m}$  (中—粗砂), 次峰为 10~20  $\mu\text{m}$  (细粉砂)。端元 4 表现的是以跃移质为主, 但其粒径较粗, 分选较差, 与风成特征明显不符 (图 4C)。Sun 等<sup>[25]</sup> 认为河流沉积物可以具有多峰的特征, 粗粒组分的峰值在 200~400  $\mu\text{m}$ , 甚至更粗。Dietze 等<sup>[23]</sup> 的研究中发现, 粒径介于 250~600  $\mu\text{m}$  的中—粗砂端元主要在河流沉积物中出现。且端元 4 富集的样品主要在黄河附近, 因此估计端元 4 为黄河搬运沉积物的组分。

### 3.2 沉积物来源

经过对沙漠各沉积类型的判断, EM<sub>1</sub> 为全由祁连

山北麓风成沙所组成的沉积体,  $EM_2$  主要由沿黄北岸风成沙和黄河二次搬运所组成。  $EM_3$  为沿黄以北就地起沙,  $EM_4$  由黄河搬运沉积物所组成。可认为黄河及其两岸, 祁连山均为腾格里沙漠南缘提供了物源。以往对于腾格里沙漠物质来源的研究中, Fan 等<sup>[9]</sup> 认为戈壁阿尔泰山和青藏高原东北部是腾格里沙漠两个相互竞争的沙源区。Yang 等<sup>[26]</sup> 认为腾格里沙漠物质可能最终来源于青藏高原东北部。本文细化了以往对于腾格里沙漠物源的研究。

腾格里沙漠物源复杂, 将研究区粒度端元分析与祁连山北麓潜在物源端元特征对比, 结果表明青藏高原东北部即祁连山很大可能为腾格里沙漠南缘的主要物源。这得到了前人验证即腾格里沙漠接受的风或河流系统输送的沉积物, 主要来自于祁连山<sup>[27]</sup>。此外, 通过粒度端元分析表明黄河河流沉积物可能是腾格里沙漠南缘的主要物源。这与其他研究一致, 即腾格里沙漠西南缘和东南边缘沉积物可能来源于黄河或青藏高原东北部<sup>[10]</sup>。但在对沙漠物质来源分析过程中, 仅粒度分析能否准确厘定物源仍然存在争议。在搬运过程中, 砂粒往往存在不同程度的磨损, 使其粒度特征区别于物源区的沉积物粒度<sup>[28]</sup>。但风对磨圆度较好或颗粒较细的石英砂磨损较小, 对粒径在  $50\ \mu\text{m}$  左右的砂粒磨损几乎为零<sup>[29]</sup>。  $EM_1$  峰值集中在  $30\sim 50\ \mu\text{m}$  (粗粉砂), 其搬运过程中较小的磨蚀是可以在沙漠沉积物中提取物源信息的关键。但是  $EM_2$ ,  $EM_3$ ,  $EM_4$  均存在较粗组分尤其是  $EM_4$ , 因搬运过程中可能受到较大磨损使其与物源区沉积物粒度差异较大, 为准确厘定物源, 还需结合地球化学元素综合分析腾格里沙漠南缘风积物的物质来源。地球化学元素可以指示表层沉积物的组成特征, 对分析风化程度及物源等方面具有积极意义。  $EM_2$  与  $EM_3$  主峰峰值分别集中在  $100\sim 120\ \mu\text{m}$ ,  $170\sim 250\ \mu\text{m}$ , 均以近源沉积的风成细砂为主且富集样品分别在沿黄两岸。从粒度特征上看, 沙漠腹地很有可能是其物质来源之一。但是沙漠腹地与沙漠南缘常量元素特征差异较大。综合分析,  $EM_2$  与  $EM_3$  是近源风成沙为主的组分, 但物质来源与沙漠腹地的贡献无关。从粒度资料中提取沙漠沉积物的物源信息对研究沙漠物源具有重要意义, 但为准确厘定物质来源仍需要借助粒度之外的其他手段如地球化学元素等多角度综合分析。

## 4 结论

(1) 黄河北岸风成沙沉积物组分主要为细砂

(35.391%), 其次为中砂(20.340%)和极细砂(20.388%); 黄河南岸风成沙主要为细砂, 平均含量 51.115%。黄河两岸砂质黄土沉积物主要组分均为粉沙黏土, 北岸平均含量为 50.259%, 南岸平均含量为 63.413%。即使同一沉积物类型(风成沙和砂质黄土)下, 黄河北岸沉积物组分整体比南岸更粗, 两岸沉积物粒级级配空间差异大。由粒度参数空间分布分析可知, 腾格里沙漠南缘的黄河北岸为南岸沉积物的上风向源区之一。

(2) 多角度综合分析表明,  $EM_1$  为全由祁连山北麓风成沙所组成的沉积体,  $EM_2$  主要由沿黄北岸风成沙和黄河二次搬运所组成。  $EM_3$  为沿黄以北就地起沙,  $EM_4$  由黄河搬运沉积物所组成。可认为黄河及沿黄以北, 祁连山均为腾格里沙漠南缘提供了物源。本文相对以往对腾格里沙漠南缘的物源研究更为细化, 但是由于常量元素数据收集有限, 没有消除“粒级依赖”对沉积组分的影响等, 对腾格里沙漠南缘物源研究仍待深究。

(3) 研究结果进一步表明, 沙漠沉积物的粒度信息对确定沙漠物源具有重要指示意义, 但仍需要借助粒度之外的其他手段如地球化学元素等多角度综合分析来准确厘定沙漠风积物物质来源。

## 参考文献:

- [1] 肖洪浪, 张继贤, 李金贵. 腾格里沙漠东南缘降尘粒度特征和沉积速率[J]. 中国沙漠, 1997, 17(2): 127-132.
- [2] 赵万苍, 刘连文, 陈骏, 等. 中国沙漠元素地球化学区域特征及其对黄土物源的指示意义[J]. 中国科学, 2019, 49(9): 1425-1438.
- [3] 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): 10-17.
- [4] 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.
- [5] 曲政. 沉积物粒度数据表征方法的研究[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(4): 24-31.
- [6] 陈渭南. 塔克拉玛干沙漠  $84^\circ\text{E}$  沿线砂物质的粒度特征[J]. 地理学报, 1993, 48(1): 33-46.
- [7] 安福元, 马海州, 樊启顺, 等. 粒度在沉积物物源判别中的运用[J]. 盐湖研究, 2012, 20(1): 49-56.
- [8] 李琼, 潘保田, 高红山, 等. 腾格里沙漠南缘末次冰盛期以来沙漠演化与气候变化[J]. 中国沙漠, 2006, 26(6): 875-879.
- [9] Fan Y, Li Z, Wang F, et al. Provenance variations of the Tengger Desert since 2.35 Ma and its linkage with the Northern Tibetan Plateau: Evidence from U-Pb age spectra of



- detrital zircons[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2019,223. DOI:10.1016/j.quascirev.2019.105916.
- [10] Qiang M, Chen F, Wang Z, et al. Aeolian deposits at the southeastern margin of the Tengger Desert (China): Implications for surface wind strength in the Asian dust source area over the past 20,000 years[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2010, 286(1):66-80.
- [11] 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.
- [12] Li G, Pettke T, Chen J. Increasing Nd isotopic ratio of Asian dust indicates progressive uplift of the north Tibetan Plateau since the middle Miocene[J]. *Geology*, 2011,39(3):199-202.
- [13] 李志忠,凌智永,陈秀玲,等.新疆伊犁河谷晚全新世风砂沉积粒度旋回与气候变化[J].*地理科学*,2010,30(4):613-619.
- [14] Paterson G, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2015,16(12):4494-4506.
- [15] 张登山,田丽慧,鲁瑞洁,等.青海湖湖东砂地风砂沉积物的粒度特征[J].*干旱区地理*,2013,36(2):203-211.
- [16] Paterson G A, Heslop D. New methods for unmixing sediment grain size data [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2015,16(12):4494-4506.
- [17] 王立强,王亲.河西走廊及其毗邻地区地表物沉积元素特征[J].*西北地质*,2013,46(2):69-80.
- [18] 李小妹,严平,吴伟,等.毛布拉格孔兑地表风砂沉积物粒度与地球化学元素分布特征[J].*干旱区地理*,2016,39(3):468-476.
- [19] 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].西安:陕西师范大学,2011.
- [20] 张虎才,李吉均.腾格里沙漠南缘武威黄土沉积元素地球化学特征[J].*沉积学报*,1997,15(4):153-158.
- [21] Li Z, Wang F, Wang X, et al. A multi-proxy climatic record from the central Tengger Desert, southern Mongolian Plateau: Implications for the aridification of inner Asia since the late Pliocene[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018,160:27-37.
- [22] Jiang H, Ding Z. Eolian grain-size signature of the Sikouzi lacustrine sediments (Chinese Loess Plateau): implications for Neogene evolution of the East-Asian winter monsoon[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010,122(5/6):843-854.
- [23] Dietze E, Maussion F, Ahlborn M, et al. Sediment transport processes across the Tibetan Plateau inferred from robust grain-size end members in lake sediments [J]. *Climate of the Past*, 2014,10(1):91-106.
- [24] 牟雪松,马俊,王永达,等.粒度分布的端元建模分析及检验:以“吉兰泰—河套”盆地西部 DK-12 钻孔晚第四纪沉积物为例[J].*古地理学报*,2018,20(3):489-500.
- [25] Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments and numerical partitioning of the sedimentary components[J]. *Sedimentary Geology*, 2002,152(3):263-277.
- [26] Yang J, Li G, Rao W, et al. Isotopic evidences for provenance of East Asian Dust[J]. *Atmospheric Environment*, 2009,43(29):4481-4490.
- [27] Li G, Pettke T, Chen J. Increasing Nd isotopic ratio of Asian dust indicates progressive uplift of the north Tibetan Plateau since the middle Miocene[J]. *Geology*, 2011,39(3):199-202.
- [28] Jerolmack D, Reitz M, Martin R. Sorting out Abrasion in a gyp-sum Dune Field[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011,116(2):1-15.
- [29] Kuenen P H. Experimental abrasion 4: eolian action [J]. *the Journal of Geology*, 1960,68(4):427-449.