

金秉福,于健,吴波,等.库姆塔格沙漠南北两侧中砂至粗粉砂矿物特征及其物源指示[J].中国沙漠,2025,45(2):236-251.

库姆塔格沙漠南北两侧中砂至粗粉砂矿物特征及其物源指示

金秉福¹, 于 健^{1,2}, 吴 波^{3,4}, 张云吉¹, 哈斯 额尔敦⁵,
苏志珠⁶, 孔德庸⁷, 韩旭娇⁵

(1. 鲁东大学 资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 3. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所 荒漠生态系统与全球变化国家林业和草原局重点实验室, 北京 100091; 4. 三北工程研究院, 北京 100091; 5. 北京师范大学 地理科学学部 自然资源学院, 北京 100875; 6. 山西大学 历史文化学院, 山西 太原 030006; 7. 韶关学院, 广东 韶关 512005)

摘要: 对采自库姆塔格沙漠核心区南北两侧的51个点位、73个风沙样品(表层、次表层和浅剖面)进行了粒度分析、密度测试以及1~5 Φ 宽粒径多粒级碎屑矿物重液分离和显微鉴定。结果显示:库姆塔格沙漠中的流动沙丘主要成分是中细砂,沉积物的平均密度为 $2.63 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,暗色颗粒约30%是重组分,以岩屑为主,含有少量重矿物。沉积物中的重组分含量、矿物种类数,石英、碳酸盐类、闪石族、帘石族、稳定重矿物类和铁质金属矿物类等的矿物含量以及 Q/F 、 $Q/(F+L)$ 、 ZTR 和 UM/SM 矿物指数随着粒径变小而增大;而轻、重组分中的岩屑、斜长石和钾长石等含量以及重矿物指数 GZi 随粒径变小而减小。1~5 Φ 碎屑中轻矿物有10种,以石英和斜长石为主;重矿物有35种,以绿帘石、角闪石和褐铁矿为主,石榴子石为特征矿物;轻、重组分中岩屑均占据很高至较高的含量。研究区沉积物成熟度很低,沙漠北部略高于南部。矿物特征和矿物指标皆表明沙漠沙北部比南部经历更为强烈的风化磨蚀和沉积分选,风沙碎屑可能主要来源于沙漠南部毗邻的阿尔金山,是古今冲洪积物和古湖相沉积物由风力驱动活化而成的近地转沙再沉积。

关键词: 重矿物; 轻矿物; 矿物成熟度; 物源; 库姆塔格沙漠

文章编号: 1000-694X(2025)02-236-16

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00008

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

沙漠沙丘沉积物的物质组成和物源一直受到广泛关注。中国沙漠广布,沙漠地表沉积物物源研究主要采用沙丘沉积物粒度分析及重矿物分析方法^[1],并结合自然地理环境调查进行推断。近年来,开始尝试运用地球化学、环境磁学和单颗粒锆石定年的方法探讨沙漠物源。对毛乌素沙地风积沙、河流相沉积物以及冲洪积物进行的重矿物分析表明,毛乌素沙地内部不同区域的风积沙物质来源不同^[2];对柴达木盆地沙漠不同地貌类型表层沉积物的分析表明,高山风化剥蚀产物经河流搬运沉积到

盆地腹地的冲洪积物是风积沙的主要来源^[3];对呼伦贝尔、浑善达克沙地和科尔沁沙地与蒙古国中南部和塔里木盆地中部地表沉积物对比分析表明,中国东部地区沙地地表沉积物并非来自于中国西部沙漠,更多可能是由周围基岩风化形成^[4]。库姆塔格沙漠的物源问题最早由夏训诚^[5]提出,认为库姆塔格沙漠的物源包括沙漠北部的雅丹、疏勒河冲积物、北山洪冲积戈壁以及基岩风化物;但后续的研究多显示主要来自南部的阿尔金山,也有部分来自北山的基岩风化和冲洪积相^[6-7]。唐进年^[8]依据粒度、元素和矿物学资料,认为库姆塔格沙漠沉积物属于就地起沙,即沙漠沉积物来自下伏阿尔金山冲

收稿日期:2024-12-07; 改回日期:2025-01-10

资助项目:国家自然科学基金项目(41471151);国家科技基础性工作专项项目(2012FY111700)

作者简介:金秉福(1963—),男,辽宁大连人,博士,教授,研究方向为沉积地质学与碎屑矿物学。E-mail: bingfu_jin@163.com。

通信作者:吴波(E-mail: wubo@caf.ac.cn)

洪积物。梁爱民^[9]通过对沙漠地表沉积物粒度和搬运动力的分析,认为河流系统先将沉积物从阿尔金山搬运到沙漠南部,随后盛行的北风将沉积物改造并输送到下风区^[10],这些认识为库姆塔格沙漠物源研究积累了宝贵经验并奠定了基本框架。然而,物源来自北部的判断多基于风动力系统和地貌特征的推断,南部物源为阿尔金山冲洪积物的判断来源于沙漠野外调查的基本认识^[6,11],但也缺乏系统性碎屑矿物和岩石学上的源汇对比分析。

沙漠沉积物是重矿物、轻矿物和岩屑的集合体,岩矿种类与含量、矿物组合以及特征矿物指数,记录了沙漠沙物源区的母岩类型及风化过程、沙物质堆积区气候特征等丰富信息。重矿物对物源变化有着相当敏感的指示意义,母岩风化后聚集的重矿物往往有几十种,包含特种或特征矿物以及特征重矿物组合,据此可恢复母岩类型并判别物质来源^[12-13]。轻矿物是陆源碎屑的主体,通常可占碎屑总量的99%^[14],石英和长石含量高且稳定,能够反映源岩的基本物质组成和风化程度;岩屑是母岩经机械破碎而形成的碎块,保留着原岩的成分和结构,是判别母岩性质直接和可靠的证据^[15]。库姆塔格沙漠紧邻青藏高原最北侧,其物质组分和形成过程对揭示青藏高原隆升引发亚洲大陆内部气候和环境变化具有重要指示意义。由于该区自然环境恶劣、人迹罕至,岩矿调查很少,基于矿物数据对风沙物源的直接论证相当匮乏。此外,库姆塔格沙漠北侧覆盖着深暗色沙面以及特有的羽毛状沙丘上明暗交替的色斑景观,有学者认为深暗色沙粒是重矿物,浅颜色沙粒是轻矿物,明暗交替色斑是重矿物与轻矿物聚集分布差异造成的^[6,16]。鉴于该沙漠独特的地质地理环境,本研究基于沉积物粒度分析、多种颜色颗粒和不同粒度的密度测试、宽粒径多粒级轻重矿物的显微鉴定,对研究区南北两侧中砂至粗粉砂1~5 Φ 碎屑沉积物进行碎屑矿物定性和定量系统分析,以此揭示沙漠沙细粒部分的物质组分,探讨其物源问题。

1 研究区概况

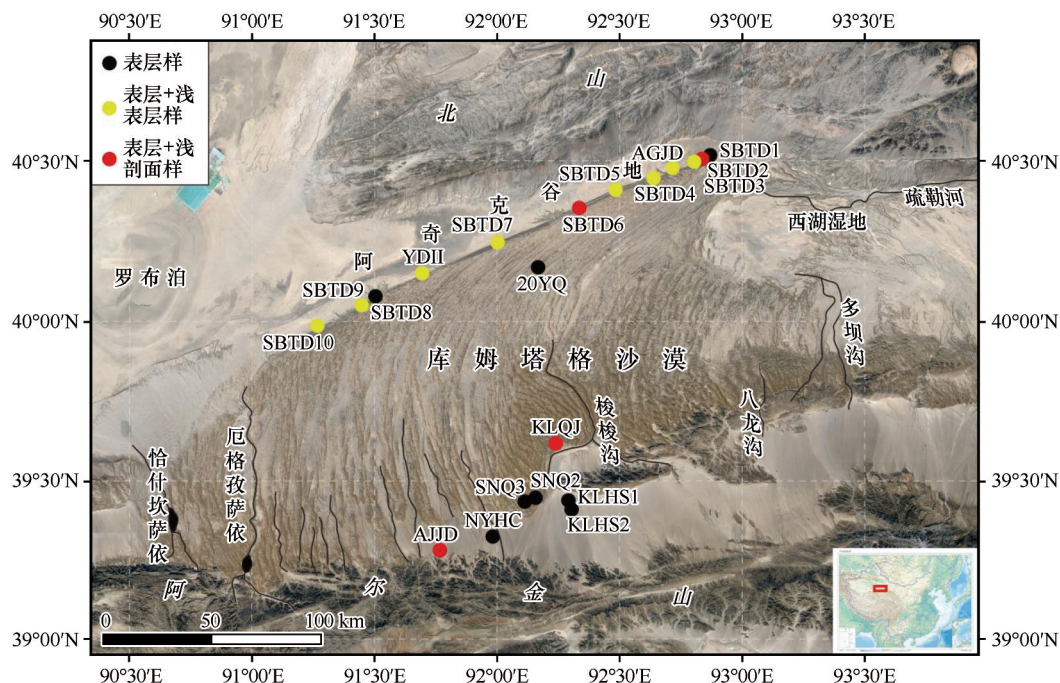
库姆塔格沙漠地跨甘肃省西部、新疆维吾尔自治区东南部,地理区域为39°07′50″—41°00′03″N、89°57′49″—94°54′08″E。位于阿尔金山北麓,西北与罗布泊洼地毗邻,北隔阿奇克谷地与北山相望,

面积约 $2.28\times 10^4\text{ km}^2$ ^[17]。库姆塔格沙漠大地构造位于塔里木板块东南部,处于北阿尔金构造带和北山构造带之间的走滑断陷盆地部位^[18],是近代地壳强烈活动的构造带,新构造运动造就了区域地形整体呈南高北低的盆山格局^[19]。沙漠南缘剥蚀洪积台地海拔约2 000 m,沙漠北缘阿奇克谷地海拔仅约850 m,区域内地形起伏较大,地貌类型以沙漠景观和洪积、冲积戈壁为主。沙漠北部的北山属准平原化干燥剥蚀低山与残丘区和坡积洪积戈壁荒漠区。库姆塔格沙漠地处极端干旱区,多年平均气温9~15℃,多年平均降水量24~38 mm,沙漠中心不足10 mm,且集中在夏季^[6,20]。受局部地形影响,起沙风存在明显的空间差异,但总体以东北风为主^[21],风况格局与库姆塔格沙漠风沙地貌类型具有良好的对应关系^[22]。在沙漠东北部,年输沙势达到690 VU,属于高风能环境^[23],多发育雅丹、风棱石、风蚀坑等风蚀地貌。沙漠北部新月形沙丘普遍,沙丘的移动方向与风向一致,线性沙丘(羽毛状沙丘)形成与风向的稳定性和风力强度密切相关,而格状沙丘与风向的多变性(两个近垂直风向)有关,其他复合与复杂沙山和沙垄与风况之间则存在复杂的相互作用^[17]。发源于阿尔金山的水系自南向北流入库姆塔格沙漠,除东部的多坝沟等常年有流水外,其他水系多为季节性,多呈现干谷景观。

2 研究方法

2.1 样品采集

样品点的位置设定,以区域地貌为基本出发点,采用样线和样点相结合的方式。沿北东-南西方向在沙漠北部边缘台地上设置一条长样线,约间隔20 km设一个样点,获取表层样10组,标记为SBTD1~SBTD10,在SBTD2(0~10 cm, 6个)和SBTD6(0~30 cm, 11个)样点进行浅剖面样采取;在SBTD7和SBTD8样点之间偏南位置沙席处设一样点(标为YDII)。短样线样点有阿奇克谷南缘阶地表层样(AGJD1~8, 8个)和沙丘20YQ表层样(图1)。样区20YQ位于沙漠中北部,是库姆塔格沙漠中典型的羽毛状沙丘之一,该区样群为短样距(约20 m间隔)样品采集,按照沙丘的迎风坡坡脚、坡中、坡顶、背风坡坡中、坡脚,下一个沙丘迎风坡坡脚的顺序依次采样,共采集样品18个(图2)。在沙漠南部边缘选择两个沙丘样区,分别为SNQ2、



注:基于自然资源部标准地图服务网站标准地图(审图号:GS(2016)1609号)制作,底图边界无修改

图1 库姆塔格沙漠遥感影像和各采样点位置示意图

Fig.1 Remote sensing image of the Kumtagh Desert and diagram indicating sample location

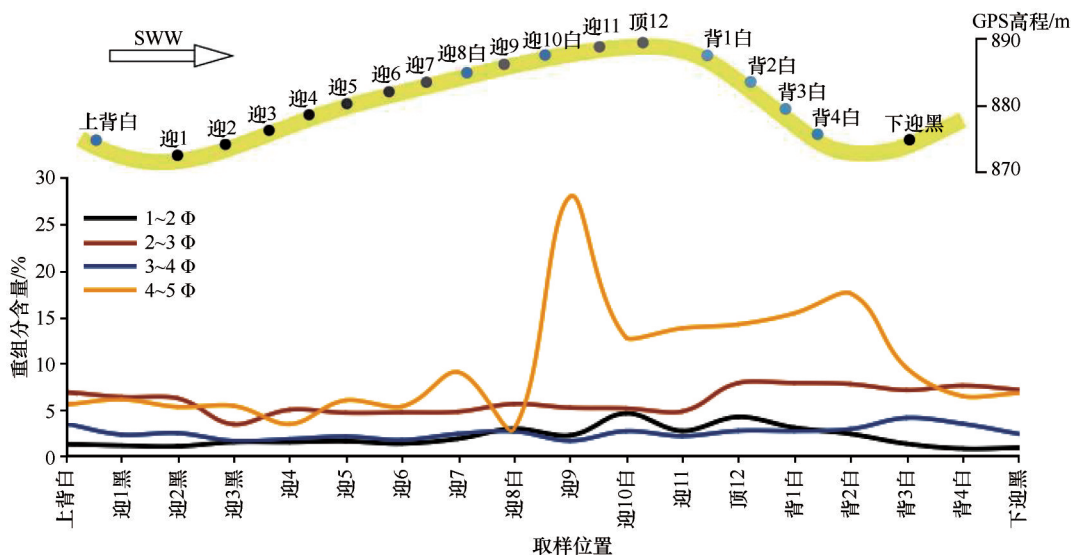


图2 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘(20YQ)4种粒度重组分含量在样品点间的变化

Fig.2 The variation of heavy component particle sizes in the feathery dune (20YQ) in the Kumtagh Desert between sampling points

SNQ3;样品分别取自迎风坡下部、迎风坡中部、迎风坡上部和迎风坡顶部以及背风坡下部等位置,共计9个样品。在沙漠南缘洪积平原与流动沙丘的边缘地带的丘间地取剖面样KLQJ(0~4 cm,3个)、喀拉喀什塔格南部河床和洪积平地表层样NYHC、KLHS1、KLHS2和阿尔金山二级河流阶地剖面样AJJD(0~4 cm,3个),共计5个点位,9个样品。所有

样品来自2020年9月22日至10月7日和2021年9月29日至10月15日中国林业科学研究院荒漠化研究所组织的两次库姆塔格沙漠综合科学考察,本研究样品表层取样深度0~1 cm,取样窗口为20 cm×20 cm。剖面样依层理状况分层逐层连续取样,每层厚约1 cm或1~2 cm。沙粒样品平铲收集,装自封塑料袋,标记样号、经纬度、时间和地貌部位。

2.2 方法

沉积物的粒度分选采用筛析法。对野外采集的沙样,在实验室中均匀取样 120~200 g(视粗细均匀程度),烘干并称重。将样品倒入孔径间隔为 0.5 Φ 的标准套筛中,使用手动方式进行筛分,先整体振动后再单筛筛动,每个粒度以筛下几无落出物为止,累积实验误差 $<0.5\%$ (100% -筛分后各分样之和/筛分前样重 $\times 100\%$,实际平均值为 0.39%),之后将各粒度分样进行称重并记录质量,本文涉及的粒度分析样品共 75 个。

在双目显微镜下按照黑色(含灰黑色、褐黑色)、灰色(深灰-褐灰色)、褐色(灰褐色-黄褐色)、黄色-浅黄色、白色(含淡黄和淡灰色)5种色级进行分类挑选,以 YDII 样品为对象,选择的粒度级别为 -1~-0.5 Φ 、-0.5~0.0 Φ 、0.0~0.5 Φ 和 0.5~1.0 Φ ,将选好的样品在密封袋上标记样品编号、粒度、质量和颜色,共细分为 20 个不同颜色+粒度分样。

采用比重液测量颗粒密度。首先,配置不同密度的比重液,采用三溴甲烷($\rho=2.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)和无水酒精($\rho=0.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)混合配比形成密度为 2.50、2.60、2.70、2.80 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的比重液;用三溴甲烷和二碘甲烷($\rho=3.32\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)混合配置成密度为 2.90、3.00、3.10、3.20、3.30 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的比重液。然后,将待测的样品依次倒入从大到小不同密度梯度的比重液中,搅拌后静置。如果颗粒下沉表示样品密度大于比重液密度,若颗粒浮在比重液上则表示密度小于比重液密度,分离后用酒精冲洗并烘干,称取重量,测试的样品是上述 20 个颜色+粒度分样,并对羽毛状沙丘 20YQ 系列样品的迎 2、迎 6、背 2 和背 4 等 4 组不细分的原始样品(表层样)进行密度测试。

将样品按照 1~2 Φ 、2~3 Φ 、3~4 Φ 、4~5 Φ 粒度进行称重,称取质量 2~5 g。向分液漏斗中加入 2/3 倍漏斗体积的三溴甲烷($\rho=2.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$),将各粒度样品倒入分液漏斗中,然后进行充分搅拌,每 10 min 一次,共 3 次;搅拌完成后,利用沉降法静置 8 h,完成轻重碎屑分离。挑选阿奇克谷地边缘样品(AGJD)6 个、20YQ 迎风坡至背风坡样品 18 个,沙漠北部边缘台地面上 SBTD1~SBTD10 平沙地样 10 个表层和次表层样 8 个,SBTD2 与 SBTD6 剖面样 6 个与 11 个,沙漠南缘非沙丘样品 9 个(KLQJ、NY-HC、KLHS1、KLHS2 和 AJJD),沙丘(SNQ2+SNQ3)

样品 9 个,共选样品 73 个,细分 299 个分样,其中阿奇克谷地南缘样品每组分样 ≥ 4 个(4~7 个,粒度含量高的再间隔 0.5 Φ 筛分)。

将碎屑矿物盛置于双目体视显微镜(OLYMPUS-SZX16)下,排列成线状观察,在了解矿物的颜色、形态、条痕、磁性和表面特征的基础上,用偏光显微镜(OLYMPUS-BX51)油浸法测定透明矿物的光学性质和参数,鉴定矿物类别。对不易鉴定的疑难矿物配合微化试验来定名。粗粒矿物鉴定 300~400 颗粒,细粒矿物鉴定 400~500 颗,以此获得不同矿物的体积百分含量。

2.3 矿物指数及意义

成分成熟度 Q/F 和 $Q/(F+L)$ 指数

$$Q/F = \text{石英}\% / (\text{斜长石}\% + \text{钾长石}\%) \quad (1)$$

$$Q/(F+L) = \text{石英}\% / (\text{斜长石}\% + \text{钾长石}\% + \text{岩屑}\%) \quad (2)$$

Q/F 和 $Q/(F+L)$ 指数能够反映碎屑组分所经历的地质作用的时间和强度^[24],主要受气候和大地构造条件影响,耐风化的石英与易风化的长石及岩屑相对值高低可以表征沉积物所经历的累积搬运距离、遭受的改造程度。

UM/SM 重矿物风化指数

$$UM/SM = \text{不稳定重矿物含量之和}\% / \text{稳定重矿物含量之和}\% \quad (3)$$

矿物在外生条件下重矿物中的普通角闪石、阳起石、黑云母、水黑云母、普通辉石、透辉石、紫苏辉石等由于化学性质不稳定,易发生物理和化学风化,属于不稳定矿物(UM);而石榴子石、榍石、磷灰石、电气石、锆石和金红石等抗风化的性能强,属于稳定矿物(SM)。两者的比值表征沉积物中重矿物的风化程度^[25]。

ZTR 指数

$$ZTR = \text{锆石}\% + \text{电气石}\% + \text{金红石}\% \quad (4)$$

ZTR 指数为极稳定矿物锆石、电气石和金红石在全部重组分中含量之和(本文未采用“在透明重矿物中的含量之和”的算法),在物源区一致的情况下其数值大小显示着重矿物成熟度的高低^[26-27]。

GZi 指数

$$GZi = \text{石榴子石}\% / (\text{石榴子石}\% + \text{锆石}\%) \times 100\% \quad (5)$$

GZi 指数代表石榴子石含量的稳定性,指示沉

积物物源特征,反映含有石榴子石的母岩(通常是高级变质岩)分布区域和主要副矿物从岩石中分离成单矿物的程度^[28]。

3 结果与分析

3.1 碎屑沉积物的密度区间

不同碎屑主要受成分影响,其密度会在一定范围内变化,通常以三溴甲烷的密度为分选重液,密

度超过 $2.89\pm 0.02\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)的重矿物,连同非单矿物组分(主要为岩屑)统称为重组分,小于此密度为轻组分,轻组分往往是各种沉积物的主体,占绝对优势含量。轻重组分密度分布区间是各种组分不同比例混合的结果,是反映沉积物分选和搬运信息的指标。而沉积碎屑即使是同一岩石或矿物种类,因有着不同的风化程度、颗粒形态、包裹体或附着物,其密度也相应在一定范围内变化。碎屑沉积物密度测试结果见表1。

表1 库姆塔格沙漠代表性样品碎屑颜色和粒度的密度区间、占比(%)及加权密度

Table 1 The density range, percentage and weighted density of colored clastics and granularity in representative samples from the Kumtagh Desert

密度区间/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	YDII(沙漠北部台地平沙地样品)						20YQ(羽毛状沙丘样品)			
	粒度/ Φ	黑色	灰色	褐色	黄色	白色	迎2	迎6	背2白	背4白
<2.50	0.5~1.0	—	0.02	0.11	0.32	3.31	0.22	0.53	0.17	0.70
2.50~2.60		1.02	4.17	20.38	20.05	4.30	31.20	37.61	26.51	22.41
2.60~2.70		34.44	63.69	73.33	72.04	89.95	62.90	55.58	68.27	72.15
2.70~2.80		28.65	17.00	4.49	3.20	1.73	3.14	3.72	3.70	2.50
2.80~2.90		15.10	5.68	0.83	1.70	0.71	1.23	0.92	0.76	0.68
2.90~3.00		10.39	4.58	0.75	1.20	—	1.31	0.70	0.53	0.80
3.00~3.10		0.01	3.98	0.11	1.49	—	—	0.80	0.06	0.75
3.10~3.20		7.39	0.88	—	—	—	—	0.01	—	—
3.20~3.30		3.00	—	—	—	—	—	0.14	—	—
加权密度 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	0.5~1.0	2.79	2.71	2.64	2.65	2.64	2.63	2.62	2.63	2.64
	0.0~0.5	2.71	2.67	2.60	2.63	2.65				
	-0.5~0.0	2.66	2.64	2.62	2.63	2.65				
	-1.0~-0.5	2.67	2.64	2.61	2.63	2.55				

注:YDII样后3个粒度仅列加权密度值,20YQ系列4个样是没分粒度的全沙样,一代表未检出。

密度测试结果显示,从碎屑颜色论,黑色和灰色碎屑密度分布相对分散,从 $>3.10\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 至 $<2.50\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。其中,黑色碎屑 $>2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 密度区间的比例超过20%,密度加权平均值为 $2.79\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;灰色集中在 $2.60\sim 2.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (约占64%),密度 $>2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的不到10%;所有碎屑中,褐色碎屑加权密度最小($2.62\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), $>2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的重组分占比不到1%。因此,沙漠北部的深暗色碎屑,仅有约30%是重组分(以岩屑为主,含有少量重矿物)。白色碎屑密度分布集中,密度变幅仅为 $0.40\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,密度 $2.60\sim 2.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的碎屑占80%~90%,加权密度为 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。从全沙样(未分粒度)沉积物密度组成看, $>2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的

重碎屑含量较低,一般只有约1%~2%;密度分布主要在 $2.60\sim 2.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $2.50\sim 2.60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 两个区间,羽毛状沙丘全沙样加权平均密度为 $2.63\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (表1)。因此,从密度分析角度看,库姆塔格沙漠羽毛状沙丘明暗交替色斑与重矿物和轻矿物密度差异引起的色度差异关系较小,主要的原因是粒度差异导致粗粒高色度碎屑和细粒低色度碎屑与风力适配而形成的粒度分布差异^[29]。

3.2 轻重矿物成分和特征

库姆塔格沙漠中轻矿物本研究鉴定出10种,含石英、斜长石、钾长石、白云母、风化(黑)云母、方解

石、白云石、石膏、绿泥石和明矾石。其中,优势矿物为石英、斜长石以及钾长石,石英含量最高,这 3 种矿物含量之和在轻矿物总量中超过 80%。石膏、绿泥石和明矾石仅在沙漠北部平沙地个别点位出现。石英多数呈粒状,无色透明,一部分被铁染呈深浅不一的红褐色、黄色—浅黄色等,磨圆度从次棱角状至圆状,在沙漠北部以粗砂磨圆最好,为次圆状—圆状,少部分为极圆状。斜长石多为粒状、灰白色,以次棱角状—圆状为主。钾长石多呈肉红色、浅黄色,以次棱角状—圆状为主,表面浑浊。矿物特征与沉积物遭受的风化程度有关,轻矿物特征显示研究区物理磨蚀较为强烈。

库姆塔格沙漠中重矿物共有 35 种,包括普通角闪石、透闪石、阳起石、矽线石、绿帘石、黝帘石、斜黝帘石、褐帘石、黑云母、白云母、水黑云母、石榴子石、榍石、磷灰石、电气石、锆石、金红石、独居石、尖晶石、磷钇矿、符山石、普通辉石、透辉石、紫苏辉石、重晶石、白云石、菱镁矿、文石、萤石、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿、赤铁矿、黄铁矿和白钛石。其中,普通角闪石、阳起石、绿帘石、石榴子石、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿和赤铁矿居多,出现率高(>90%)。

普通角闪石多数呈柱状、粒状、颜色多呈绿色,次棱角状—圆状,也有部分呈圆状。绿帘石多数呈粒状,颜色呈黄绿色、浅黄色、淡黄色,次棱角状—圆状。石榴子石以粒状多见,仅个别呈晶形完整的五角十二面体,粉红色、浅褐红色,次棱角—圆状,自粗粒级至细粒级都稳定出现。钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿和赤铁矿统称铁质金属矿物,它们颜色深暗,除特征晶形外,多为粒状。重矿物中其他

矿物出现率和含量均较低,其中重晶石、文石为自生矿物,仅在沙漠北部个别样点出现,白云石和菱镁矿既有原生也有自生。锆石、电气石、金红石等稳定矿物,一般晶粒较小,在细颗粒分样中时有出现,但在整个沉积物中含量较低。

在中细砂及粗粉砂的轻重组分中皆出现大量各式种类的岩屑,一般呈粒状,无特征形状,颜色多样。在重组分中,岩屑可分深色和浅色两类,色差明显。深色组以绿色为主,有少部分黑色、灰色和褐色;浅色组以黄绿色为主,含有浅绿色、黄色和浅灰色等。轻组分中,岩屑也可分颜色较深的灰绿色组和颜色更浅的黄白色组。岩屑与碎屑矿物一样,部分磨圆较好(次圆状—圆状),沙漠北部好于沙漠南部,粗粒好于细粒,沙漠南部岩屑磨圆较差,以次棱角状为主。

3.3 轻重组分的含量和粒级分布

3.3.1 重组分的含量及其在粒级中的分布

重组分含量是重组分(重矿物+大比重岩屑 $\rho>2.89\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)在全沉积物样中的质量百分含量,与轻组分含量之和为 100%,二者此消彼长,在此只阐述重组分含量。对 73 组样品,299 个粒度分样所做的重液分离数据(表 2)显示,库姆塔格沙漠中砂至粉砂中重组分含量中等,少数样品较高或较低。1~2 Φ 的中砂沙漠北部重组分含量较低、变幅为 0.58%~4.09%,去掉一个最大值和一个最小值的 trimmean 平均值为 1.65%,沙漠南部含量较高,平均约 5.78%;2~3 Φ 细砂北部平均为 2.13%,样品间相对偏差较小,南部平均为 4.54%;3~4 Φ 极细砂北部平均为

表 2 库姆塔格沙漠南北各系列样品重组分在 4 种粒级中的质量百分含量 trimmean 平均值(%)
Table 2 Average trimmean wt%contents of heavy components in four grain grades
of samples from northern and southern of the Kumtagh Desert (%)

样品系列/样数	1~2 Φ	2~3 Φ	3~4 Φ	4~5 Φ
阿奇克谷地南缘阶地 AGJD 表层/ $n=6$	0.95	1.76	4.54	4.25
北部台地 SBTD 表层/ $n=10$	2.12	2.18	5.51	12.91
北部台地 SBTD 次表层/ $n=8$	1.83	2.07	5.46	11.76
北部台地 SBTD2 剖面/ $n=6$	1.25	2.05	5.13	4.24
北部台地 SBTD6 剖面/ $n=11$	1.78	2.18	5.30	12.83
羽毛状沙丘 20YQ 表层/ $n=18$	1.99	2.54	6.10	8.94
南缘冲洪积物表层+阶地剖面/ $n=9$	4.86	5.13	7.07	9.46
南缘沙丘 SNQ2+SNQ3 表层/ $n=9$	6.69	3.95	8.26	10.27

5.34%,南部平均为 7.67%;4~5 Φ 的粗粉砂,重组分含量变化较大,北部 4.24%~28.09%,trimmean 值为 9.16%,南部 4.72%~14.75%,trimmean 值为 9.87%。总的来看,随粒度变细,重组分含量增加;沙漠北部和南部同粒级比较,南部的中砂、细砂和极细砂重组分含量明显高于北部,而粗粉砂重组分平均含量南北较为接近,南部略高于北部。

从次表层(1~2 cm, 8 组)和浅剖面 SBTD2(0~10 cm, 6 组)与 SBTD6(0~30 cm, 11 组)样品分析来看,每组重组分在不同粒级中的含量和分布状况与表层样品基本趋势一致,含量数值在较小范围内波动。在沙漠北缘台地长样线上,重组分在 SBTD8 样品中含量最高,向西南逐渐变低,向东北方向波动性降低,SBTD1 的 4 个粒级重组分含量为最低值或次低值。在羽毛状沙丘的系统样点中(图 2),中砂、细砂和极细砂 3 个粒级重组分含量各自变化较小,平均值约为 2.0%、2.5% 和 6.1%(表 2),只有粗粉砂有较大的变幅,重组分含量高值分布在沙丘近顶部至背风坡中部,含量超过 12%,最高值接近 28%。

3.3.2 轻矿物的含量及其在粒级中的分布

库姆塔格沙漠沙中的轻矿物总量并不像其他地区那样占 99% 左右的绝对优势^[30],而是随沉积物粒度不同,由粗到细轻矿物含量逐渐增加,从中砂至粗粉砂,沙漠北部为 70%~90%,沙漠南部为 60%~90%,其中的差值由岩屑分摊。但石英、斜长石和钾长石依然是沙漠沙的主要组成矿物,平均含量分别为石英 33%~43%、斜长石 21%~24%、钾长石 11%~17%,而方解石和白云石为次要矿物,2%~5%,其他矿物含量之和不足 1%,包括比较常见的白云母和风化黑云母。随沉积物粒度减小,石英和碳酸盐矿物含量随之增加,而斜长石、钾长石和轻岩屑含量随之减少(图 3A~D),成分成熟度 Q/F 和 $Q/(F+L)$ 指数也随之增大,至粒度 4~5 Φ 石英含量高于或接近斜长石+钾长石+轻岩屑含量之和(表 3)。

3.3.3 重矿物的含量及其在粒级中的分布

库姆塔格沙漠中重矿物种类较多(35 种),各种类体积百分含量相差较大,可划分为主要常见矿物(8 种)、次要常见矿物(16 种)、不常见矿物(7 种)和偶见矿物(4 种)。后两类矿物含量一般很低,小于总量 1%,而且它们对于沙漠重矿物分布影响甚微,虽有一定物源和环境指示意义,但不能成为定量分析的依据,因此,这里重点分析主要和次要常见重矿物特征。

重矿物主要矿物和部分次要矿物可归类为闪石族(普通角闪石+阳起石+透闪石)、帘石族(绿帘石+黝帘石+斜黝帘石+褐帘石)、稳定矿物类(石榴子石+榍石+磷灰石+锆石+电气石+金红石)和铁质金属矿物类(钛铁矿+磁铁矿+赤铁矿+褐铁矿)4 族类矿物,它们各自具有相近的矿物属性、化学性质、风化特征以及成因类型,合并归类有利于对不同类型重矿物分布形成的过程分析。为了进一步探究粒度对重矿物种类和含量的影响,本研究对阿奇克谷地南缘阶地样(共 6 组)进行了粒度间隔 0.5 Φ 的详细的矿物鉴定(其余采样点矿物分选粒度间隔皆为 1 Φ),表 4 为代表性样品 AGJD6 样的重矿物种类和含量数据。

全部重矿物分析数据反映出的矿物含量和分布趋势为:①矿物种类并不丰富,在粒度 1.0~2.5 Φ ,矿物种类不到 10 种,2.5~5.0 Φ 的细粒级碎屑,矿物种类增多,在粗粉砂粒级矿物种类最多。②在极细砂和粗粉砂中含量>10% 的单矿物种,只有普通角闪石、绿帘石和褐铁矿,以及部分样品中的磁铁矿,其他矿物种含量较低,一般小于 5%,很多矿物种含量不足 1%。③阳起石和石榴子石稳定出现,有些样品阳起石含量 5%~10%;石榴子石在中砂粒级中高频出现,在细砂粒级中含量最高,是各个粒级中最常见、含量变化最小的稳定矿物,含量多为 2%~5%。④榍石也是出现率较高仅次于石榴子石的稳定矿物,其含量比石榴子石略低;而极稳定矿物锆石、电气石和金红石在重矿物中含量很低,锆石和金红石矿物颗粒细小,只在极细砂以下的细粒级中出现,出现率和含量在粗粉砂粒级中最高。⑤合并归类后的闪石族、帘石族、稳定矿物类和铁质金属矿物类,均有从粗至细含量增多的趋势(图 3E~H),其中,闪石族和帘石族矿物含量在 3~4 Φ 达到高值,在 4~5 Φ 粒级稍有降低。不同样品区之间矿物含量和在不同粒度中的分布既有相似性又有差异性,其相似性更显著一些。

3.3.4 岩屑的含量及其在粒级中的分布

库姆塔格沙漠沙最为显著的成分标志是高含量岩屑,在砾和粗砂中岩屑占绝对优势^[31],中细砂直至粉砂,无论是在轻组分还是在重组分中,岩屑皆具有相当高的含量(表 3~4)。在轻组分中,随粒度由粗至细,岩屑含量由高变低,相邻粒级相差几个至十几个百分含量。中砂至粗粉砂(1~5 Φ)粒度

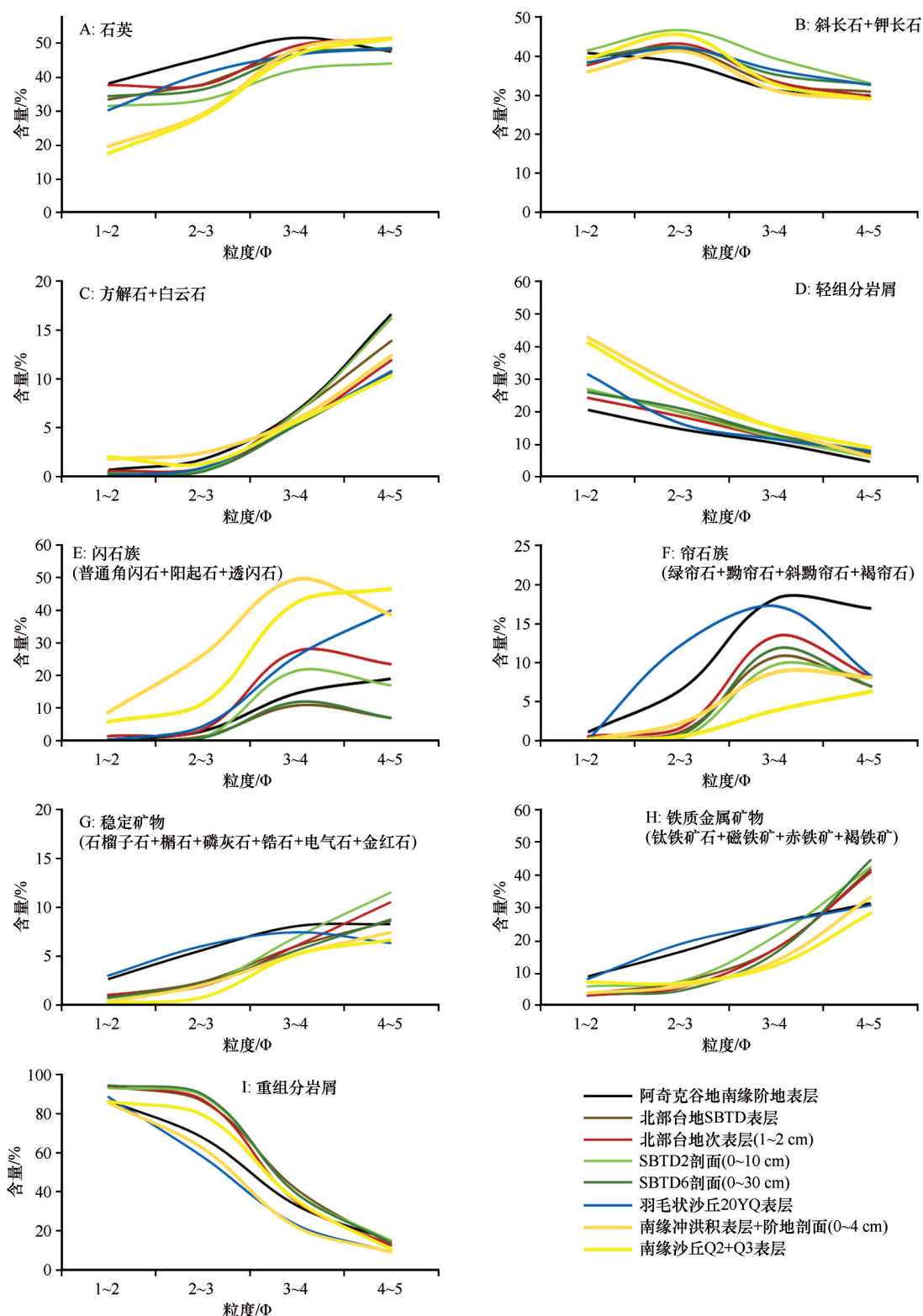


图3 库姆塔格沙漠主要轻、重矿物和岩屑在不同粒级中的含量分布(轻矿物与重矿物分开各自计量体积百分含量)

Fig.3 The content distribution of major light and heavy minerals and lithic fragments in different grain sizes in the Kumtag Desert (light minerals and heavy minerals are measured separately by v%)

区段总体岩屑加权平均值由30%减至14%,多数在20%左右,沙漠南部大都>20%(图3D)。密度大的重岩屑在重组分中的占比更高(图3I),由90%±(1~

2 Φ)至>10%(4~5 Φ),其中,深色岩屑随粒度由粗变细含量逐渐变低,0.5 Φ的粒度间隔差异十分明显,而浅色大比重岩屑在细砂中2.0~2.5 Φ含量最

表 3 库姆塔格沙漠主要轻矿物的粒级平均体积百分含量和矿物指数

Table 3 Average v% content of particle size and mineral index of major light minerals in the Kumtagh Desert

样品(样数)	鉴定粒级	石英 /%	斜长石 /%	钾长石 /%	方解石 /%	白云石 /%	常见轻矿物 合计/%	轻岩屑 /%	Q/F	Q/(F+L)
阿奇克谷地 南缘阶地+ 台地表层 /次表层 (n=24)	1~2 Φ	34.98	22.95	16.83	0.13	0.29	75.18	24.83	0.88	0.54
	2~3 Φ	38.09	24.09	18.35	0.44	0.44	81.41	18.57	0.90	0.62
	3~4 Φ	47.52	19.69	14.72	4.51	1.58	88.02	11.84	1.38	1.03
	4~5 Φ	47.86	20.20	11.02	9.87	3.93	92.88	6.34	1.53	1.27
	加权平均值	42.66	21.06	16.93	1.93	1.23	83.81	16.48	1.18	0.83
羽毛状沙丘 20YQ (n=18)	1~2 Φ	30.22	24.21	14.16	0.01	0.04	68.64	31.36	0.79	0.43
	2~3 Φ	40.93	24.88	17.11	0.58	0.30	83.80	16.15	0.97	0.70
	3~4 Φ	46.62	23.07	13.29	4.69	0.78	88.45	11.45	1.28	0.98
	4~5 Φ	48.34	22.17	10.44	8.88	1.85	91.68	7.85	1.48	1.19
	加权平均值	38.57	24.27	14.81	1.61	0.35	79.61	20.34	1.00	0.69
南缘沙丘 Q2+Q3 (n=9)	1~2 Φ	17.49	23.87	15.51	1.30	0.69	58.86	41.12	0.44	0.22
	2~3 Φ	28.49	26.22	19.25	0.72	0.55	75.23	24.77	0.63	0.41
	3~4 Φ	46.67	19.42	13.32	4.36	1.21	84.98	15.02	1.43	0.98
	4~5 Φ	51.24	21.94	7.07	8.30	1.97	90.52	8.90	1.77	1.35
	加权平均值	32.61	24.13	17.13	1.89	0.80	76.56	23.43	0.85	0.56
沙漠南缘冲 洪积物 (n=3)	1~2 Φ	14.24	25.04	9.05	1.22	2.44	51.99	48.01	0.43	0.17
	2~3 Φ	26.50	28.27	10.96	2.41	2.00	70.14	29.77	0.68	0.40
	3~4 Φ	49.46	18.53	11.73	4.08	2.58	86.38	13.55	1.64	1.13
	4~5 Φ	49.35	21.34	7.33	10.70	2.79	91.51	7.56	1.75	1.36
	加权平均值	33.90	23.10	10.96	3.03	2.42	73.41	26.51	1.06	0.69

高,向粗或向细粒级含量变低(表4)。

4 讨论

4.1 沙漠沉积物的成熟度

4.1.1 沉积物的结构成熟度

结构成熟度是指沉积物在风化、搬运、沉积作用过程中接近最稳定的终极结构的程度,磨圆度、分选性及黏土含量最能反映沉积物结构成熟度的状况^[24]。本研究对矿物鉴定过程进行了磨圆度的描述和记录,可总结为:碎屑颗粒在粗砂粒级磨圆度最好,大多数轻矿物、重矿物以及岩屑皆为次圆状至圆状,并且一部分石英、长石和岩屑接近球状,该粒级磨圆度好颗粒含量沙漠北部样品明显高于南部样品;其他粒级碎屑磨圆度为次棱角状至次圆

状,沙丘要好于非沙丘,沙漠北部要好于南部。这说明风沙在运移过程中,粗砂是底移最活跃组分,遭受的磨蚀最为强烈,中细砂大都作为跃移组分,遭受的磨蚀程度相对低一些,因而它们的磨圆度不如粗砂;沙丘沙由风沙中流动性强的沉积物构成,其磨圆状况要好于搬运距离较短的非沙丘沙颗粒。沙漠北部受强劲的东北风驱动,风沙移动频率和累积搬运距离要明显大于沙漠南部。

表5表明,库姆塔格沙漠不同区域沉积物分选较好,以粗砂(20YQ)或细砂(南缘沙丘(Q2+Q3))为主要组分,呈偏正态粒度分布;而其他非沙丘样区的分选性相对较差,在粗粒端和细粒端均有两个含量较高的粒度段,处于粒度中段的中砂含量却较低,反映其分选性较低。沙漠北部所有样区和沙漠南部沙丘样区,普遍缺乏黏土组分,仅在沙漠南部

表 4 阿奇克谷地南缘阶地 AGJD6 样品不同粒级常见重矿物和岩屑的体积百分含量(%)

Table 4 v% contents of heavy minerals and lithic fragment of different grain sizes in terrace AGJD6 samples of the southern edge of the Aqik Valley (%)

矿物名称及 指标	鉴定粒级/ Φ						
	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0~5.0
普通角闪石	—	—	—	1.59	9.89	16.31	16.55
透闪石	—	—	—	0.20	0.43	0.42	0.34
阳起石	—	—	0.79	0.99	1.08	3.81	7.00
绿帘石	—	0.68	2.65	13.72	22.80	20.55	18.60
黝帘石	—	—	—	—	—	0.21	0.68
斜黝帘石	—	—	—	—	—	—	0.51
褐帘石	—	—	—	0.20	—	—	—
黑云母	—	—	—	0.20	—	0.21	0.34
白云母	—	—	—	—	—	—	0.17
水黑云母	—	—	—	0.20	—	—	0.17
符山石	—	—	—	0.20	—	—	—
石榴子石	2.03	3.72	5.29	5.17	4.73	2.33	3.24
楣石	0.51	0.34	—	1.59	3.23	2.75	3.58
磷灰石	—	—	—	—	—	0.64	0.17
电气石	—	—	0.26	0.60	0.22	0.42	0.17
锆石	—	—	—	0.40	1.08	1.06	1.19
金红石	—	—	—	—	—	0.21	0.34
透辉石	—	—	—	—	—	—	0.17
紫苏辉石	—	—	—	—	—	0.21	—
重晶石	—	—	—	0.80	1.08	1.69	6.66
白云石	—	—	—	—	—	—	1.37
钛铁矿	—	—	—	0.99	1.29	2.75	2.22
磁铁矿	—	0.34	1.06	4.57	6.02	7.42	6.14
赤铁矿	—	—	0.79	0.99	1.94	1.91	1.71
褐铁矿	8.12	9.12	10.32	13.92	12.04	14.83	13.31
主要和次要常见 重矿物含量合计	10.66	14.20	21.16	46.33	65.83	77.73	84.63
浅色岩屑	16.24	23.99	39.42	35.59	22.80	13.35	12.97
深色岩屑	73.10	61.82	39.42	18.09	11.40	8.90	2.39
闪石族	—	—	0.79	2.78	11.40	20.55	23.89
帘石族	—	0.68	2.65	13.92	22.80	20.76	19.80
稳定矿物	2.54	4.05	5.56	7.75	9.25	7.42	8.70
铁质金属矿物	8.12	9.46	12.17	20.48	21.29	26.91	23.38
UM/SM	—	—	0.14	0.38	1.19	2.77	2.78
ZTR	—	—	0.26	0.99	1.29	1.69	1.71
GZi	100	100	100	92.86	81.48	68.75	73.08
重组分体积百分含量	1.38	1.61	1.77	2.61	3.68	6.22	4.96

表 5 库姆塔格沙漠不同区域沉积物粒度(含量)平均值(%)

Table 5 Average grain size of sediments in different regions of the Kumtagh Desert (%)

样品系列/样数	沉积物粒度/ Φ							平均 粒径 / Φ
	砾 <-1.0	极粗砂 -1.0~0.0	粗砂 0.0~1.0	中砂 1.0~2.0	细砂 2.0~3.0	极细砂 3.0~4.0	粉砂 >4.0	
阿奇克谷地南缘阶地/ $n=8$	40.17	13.84	12.99	11.09	15.66	5.74	0.52	0.12
北部台地表层/ $n=10$	21.33	19.25	12.39	8.50	20.51	17.01	1.00	0.93
北部台地次表层/ $n=8$	11.42	15.29	10.72	8.80	27.67	24.72	1.38	1.58
SBTD2剖面/ $n=5^*$	15.08	0.71	4.93	17.36	48.87	12.48	0.57	1.77
SBTD6剖面/ $n=10^*$	2.30	26.15	7.36	8.68	21.62	32.28	1.61	1.72
20YQ沙丘表层/ $n=18$	—	5.54	43.46	20.75	16.96	12.52	1.09	1.48
南缘沙丘(Q2+Q3)/ $n=9$	—	3.26	15.07	8.27	48.95	23.55	0.67	2.31
南缘丘间地/ $n=3$	7.94	3.55	1.75	2.32	30.48	38.46	15.49	2.77
阿尔金山前二级阶地/ $n=3$	4.32	15.60	3.63	3.15	26.08	37.01	10.22	2.38
南缘冲洪积物/ $n=3$	9.01	20.34	23.09	11.63	14.25	19.56	2.12	1.15

注: *为不计表层值。

非沙丘样点有少量粉砂(>4.0 Φ)和黏土成分。因而从磨圆度上、黏土含量上看,风沙颗粒经历的化学风化较弱,搬运频繁所导致的物理磨蚀作用强烈,风力强劲致使粉砂和黏土难以沉积,沙漠北部沉积物的结构成熟度相对较高。

4.1.2 沉积物的成分成熟度

矿物成熟度是以碎屑岩中最稳定组分的相对含量来标志其成分的成熟度。轻矿物中的 Q/F 和 $Q/(F+L)$ 、重矿物中的 UM/SM 、 ZTR 和 GZi 等指标被认为是碎屑矿物成熟度的几个重要标志^[32]。矿物成熟度能够反映该地区沉积物搬运和磨蚀的历

史^[12,33]。对采集样品的矿物鉴定和成熟度指数计算, Q/F 和 $Q/(F+L)$ 值所有样品为 0.26~3.35 和 0.12~2.24, 不同样区 3~4 Φ 粒级平均值为 1.09~1.67 和 0.83~1.25(表 6), 低值出现在 1~2 Φ 粒级, 高值出现在 4~5 Φ 粒级。总体上, 轻矿物成熟度很低, 但随粒级由粗到细, 各区域的轻矿物成熟度逐渐增高, 沙漠最北部的阿奇克谷地南缘阶地最高, 而沙漠北部台地浅剖面中最低; 占沙漠主体的流动沙丘, 沙漠南北对比轻矿物成熟度在 3~4 Φ 粒级十分相近(通常重矿物分析只做 3~4 Φ 粒级, 这个粒级重矿物种类多含量高, 且有利于相似研究对比), 但加权平均

表 6 库姆塔格沙漠极细砂(3~4 Φ)粒级矿物成熟度指标不同样区平均值

Table 6 Average values of mineral maturity indexes in different regions of very fine sand (3~4 Φ) in the Kumtagh Desert

样品系列/样数	Q/F	$Q/(F+L)$	UM/SM	ZTR	GZi
阿奇克谷地南缘阶地/ $n=8$	1.67	1.25	1.85	0.72	86.49
北部台地表层/ $n=10$	1.49	1.07	4.52	0.38	95.19
北部台地次表层/ $n=8$	1.51	1.11	4.62	0.42	96.24
SBTD2剖面/ $n=6$	1.09	0.83	3.21	0.39	89.16
SBTD6剖面/ $n=11$	1.35	0.98	5.00	0.17	96.40
20YQ沙丘表层/ $n=18$	1.32	1.01	3.58	0.64	88.30
南缘沙丘(Q2+Q3)/ $n=9$	1.45	0.98	8.44	0.28	96.68
南缘丘间地/ $n=3$	1.64	1.12	7.34	0.52	98.33
阿尔金山前二级阶地/ $n=3$	1.43	0.96	9.36	0.27	100.00
南缘冲洪积物/ $n=3$	1.64	1.13	13.31	0.29	100.00

值沙漠北部要高于南部(表3)。

库姆塔格沙漠各样区的重矿物指标差别较大,不稳定矿物与稳定矿物的 UM/SM 值在 3~4 Φ 粒级变化显著,比值由沙漠北部到沙漠南部逐渐增大,最大相差 7.2 倍,说明沙漠北部稳定矿物占比有较大幅度提高。 ZTR 指数在所有样区都很低,锆石、电气石和金红石仅在 3~4 Φ 和 4~5 Φ 粒级中少量出现,三者之和不足 1%,甚至一些样品中没有出现,即便 ZTR 指数较小,但也大体反映出沙漠北部重矿物成熟度高于沙漠南部。相对而言, GZi 指数数值在沙漠南北部相差不大,北部略低。这说明沙漠南北区域含石榴子石和锆石作为副矿物的岩石,虽受到相同气候条件的影响,它们的物理风化程度相近,但风化历史北部长于南部,沙漠北部样品锆石从原岩中离解出来多于南部,促使 GZi 指数分母增大,石榴子石%/(石榴子石%+锆石%)变小。

4.2 沙漠物质来源和运移方向

4.2.1 沙漠物质来源

进入库姆塔格沙漠核心区的沉积物,从地质、地貌环境和气象气候状况分析,推测主要来自沙漠南部毗邻的阿尔金山所形成的风化碎屑,不管是最早期的新近纪还是后期更新世乃至现代^[34],主要以冲洪积方式源源不断进入沙漠所在的区域,形成冲洪积台地(平原)以及湖相沉积物;次要来源是沙漠底部基岩风化的残坡积物,以及来源于沙漠北部的北山残坡积风化碎屑、沙漠西部的塔克拉玛干沙漠的风尘。受阿奇克谷地和罗布泊低地所限,北山和塔克拉玛干沙漠物质如果要沉积在库姆塔格沙漠中,只能通过空气输运悬浮方式,或有少量跃移方式,冲洪积方式几乎没有可能,而风沙悬浮搬运颗粒的粒径相对较小^[21]。因此推断沙漠北部的砾石和粗砂,主要来自阿尔金山冲洪积物和基岩的残坡积物,前期对该沙漠岩屑的研究部分证实了这种推断^[31]。本研究的沙颗粒沉积物是中细砂至粗粉砂,通过轻重矿物和岩屑分析,判断这些沉积物也主要来自阿尔金山,主要证据讨论如下:

沉积物成熟度在研究区普遍较低,矿物指标显示沙漠北部要略高于沙漠南部,这暗示沙漠物质风化程度低、来源近,相比而言,北部沉积物经历的磨蚀等风化改造要强于南部,意味着搬运距离要大于沙漠南部,而研究区主风向是东北风^[23],因此沙漠

不可能主要来自上风向的北部。岩屑作为成熟度的重要变量,其含量变化同样反映沉积碎屑来源于沙漠南部。通过对比,岩屑的岩性与阿尔金山山体母岩有高度的一致性,尤其是中酸性喷出岩与黝帘石和绿帘石化岩,以及高度帘石化产生的黝帘石和绿帘石岩,显示极大的渊源关系。阿尔金山复杂而独特的地质发展史,深刻影响母岩区岩体和地层中的岩石特征,带给沙漠的风化碎屑继承了其他沙漠罕见的矿物和岩石特征。与沙漠主体对应的北阿尔金山区段是红柳沟—拉配泉—安南坝段,近 W-E 走向,跨越经度 90.5°—93.5°E。区域地质调查表明,阿尔金山母岩区出露的主要岩石类型为:太古界的米兰岩群——主要岩性为麻粒岩、变粒岩、片麻岩、斜长角闪岩、条带状混合岩和大理岩等;中—上元古界的索尔库里群——为碎屑岩建造—碳酸盐岩建造;寒武—奥陶系的拉配泉群——原岩为滨海—浅海沉积碎屑岩—火山岩—碳酸盐岩建造的浅变质岩系;各个构造期包括吕梁期、加里东期、海西期和印支—燕山期的中酸性火成岩,主要为各种类型的花岗岩、花岗闪长岩和闪长岩等^[35-36]。

由于母岩风化碎屑处于低成熟期,加之岩屑含量高,作为岩体和岩层中副矿物的重矿物还没有完全从岩屑中摆脱出来成为碎屑矿物,沉积物又没有经过较强的沉积分异作用,所以重矿物种类较少、含量较低。虽然粗粉砂粒级在一定程度上可以反映未来沉积物成熟度提高以后的矿物的存在状况,但与黄土高原的粉砂相比^[37],其矿物种类和成熟度特征相差较远。而恰恰是这种低成熟度的矿物特征,在与物源区成分对比时具有更好的溯源性。沙漠区主要重矿物产出状态^[38-39]与阿尔金山赋存岩石存在状况比较,可揭示它们之间的亲缘性(表7)。

4.2.2 沉积物运移方向

上述矿物与岩屑特征显示库姆塔格沙漠沉积物极有可能大部分来源于阿尔金山北部山体,沉积物搬运距离不远,沙漠南北最宽不足 200 km,狭窄处不到 100 km,而阿尔金山山麓与阿奇克谷地约有 1 300~1 900 m 不等的海拔高差,这种山前倾斜冲洪积台地,落差大、沉积物快速搬运、风化程度较低。基本符合前人提出的就地起沙的论断。岩屑岩石学特征显示沙漠中的砾石和粗砂与阿尔金山母岩极为接近^[25],即沙漠中粗碎屑(<1 Φ)来源于阿尔金山异议较小,而细粒级部分(>1 Φ)物质本研究显示

表 7 研究区主要重矿物的产出状态

Table 7 The output state of major heavy minerals in the study area

沙漠产出的 主要重矿物	重矿物产状和主要赋存的岩类 ^[38-39]	阿尔金山赋存重矿物岩石存量 ^[35-36]
普通 角闪石	火成岩重要的造岩矿物,在各类岩性中均有较高含量;在变质岩的斜 长角闪岩、角闪斜长片麻岩、角闪岩中含量高	存在广泛:米兰群、达肯达坂群、各期次中酸性 侵入岩
绿帘石	在低级变质岩、晚期矽卡岩及热液蚀变岩中分布广泛,是辉石、角闪 石、斜长石、黑云母、石榴子石等的次生蚀变矿物	存在较广:拉配泉群浅变质岩和红柳沟-拉配泉 蛇绿岩、海西期岩浆岩及各种活动热液蚀变岩
黝帘石/ 斜黝帘石	典型岩浆期后矿物,常见于区域变质岩、接触变质岩和结晶片岩中,热 液蚀变时交代中基性斜长石、辉石和角闪石形成钠黝帘石化蚀变岩	存在较广:拉配泉群浅变质岩和红柳沟-拉配泉 蛇绿岩、海西期岩浆岩及各种活动热液蚀变岩
阳起石	常赋存在低级变质的绿片岩或结晶片岩中,也是晚期矽卡岩和热液蚀 变矿物	局部较多:巴什库尔干群中变质岩、拉配泉群 浅变质岩
石榴子石	钙铝榴石和钙铁榴石多分布于矽卡岩和结晶灰岩中,铝质石榴石分布 于结晶片岩、片麻岩、榴辉岩、斜长角闪岩、斜长辉岩和麻粒岩中,也产 于伟晶岩和火成岩中	局部较多:米兰群深变质岩、巴什库尔干群中 变质岩、碳酸盐岩与中酸性侵入岩接触带矽 卡岩
榍石	在酸性岩、碱性岩如花岗岩、正长岩、闪长岩、粗面岩、安山岩中分布较 广,还见于矽卡岩或混染岩、片麻岩、变质灰岩、结晶片岩	分布较多:从吕梁山—加里东期—海西期—印 支至燕山期分布较广的中酸性火成岩
电气石	为气成矿物,产于花岗伟晶岩、高温热液石英脉、云英岩和花岗岩中, 变质岩中作为交代或重结晶作用的产物	分布一般:各期次酸性侵入岩派生出岩墙或 岩脉
锆石	为重要副矿物存在于火成岩中,特别与富钠的深成岩有关,在花岗岩、 正长岩、花岗闪长岩及霞石正长岩中多见,片麻岩也常见	分布较多:从吕梁山—加里东期—海西期—印 支至燕山期分布较广的酸性火成岩
金红石	广泛产于各种变质岩,如角闪岩、榴辉岩、片岩、片麻岩及变质灰岩,也 常产于酸性火成岩,粗大晶体则见于花岗伟晶岩	分布较广,但含量很低
磁铁矿	分布广泛,是火成岩常见副矿物,在碧玉铁质岩、磁铁矿及矽卡岩、磁 铁石英岩作为主要矿物,在高温热液矿脉中也常见	广泛存在:太古界、元古界和下古生界变质岩、 各期次火成岩
钛铁矿	在铁镁质岩石中,特别是在辉绿岩、粗玄岩、碱性岩中常见,也见于片 麻岩、云母片岩、角闪岩等	分布一般:拉配泉群浅变质岩和红柳沟-拉配 泉蛇绿岩
赤铁矿	成因复杂,可形成于内生、外生和变质作用下,在三大岩类分布较广, 也常产于各种铁质矿脉以及不同类型的矿床中	分布较多:无特殊岩性或岩类
褐铁矿	是针铁矿、纤铁矿、水针铁矿以及黏土物质的混合物,为常见的次生矿 物,由各种铁矿及含铁矿物风化分解而成	广泛存在:无特殊岩性或岩类

与阿尔金山母岩也有较大的相似性^[40]。沙漠区沉积物虽然成熟度低,但沉积过程却很复杂,可简单归纳为:研究区早期主要由冲积和洪积作用将阿尔金山母岩风化碎屑由南向北输运,经过数百万年乃至上千万年(新生代中晚期至今)的快速堆积,形成阿尔金山山前冲洪积台地(平原),陆续在沙漠北部阿奇克谷地、罗布泊以及沙漠内部洼地形成湖相沉积^[41],即大部分沉积物经历自南至北的水力搬运^[42],以及个别地质时期的冰水搬运甚至冰川搬运。随着青藏高原的不断隆升,伴随气候的日趋干旱和风力的加大,第四纪以来风力侵蚀和搬运成为该地区的主要外动力,来源于阿尔金山的冲洪积物和干旱导致湖水消失后的湖相沉积物(不完全来

源于阿尔金山),在风力侵蚀下,再次进入地表物质循环,由风力驱动自北向南迁移^[40,43-44],流动沙丘以每年数米至数十米的速度不断向南移动,部分先期到达阿尔金山坡麓的风沙沉积物,或者沉积在冲洪积通道上的风沙,经不定期洪水作用可能再次从南向北被搬运回到沙漠中,然后重新经历下一个回次的沙漠沉积与搬运。就库姆塔格沙漠内部多样性地貌而言,即使到了气候极端干旱的现代,洪水对沙漠地貌的塑造依然比较强烈,即早先形成的洪积台地面被后期洪积流水冲刷形成洪积冲沟^[11,45],沙漠北部南北向雅丹垄槽更主要是通过洪水冲刷而成^[46-47]。在水力和风力的共同作用下,表层冲洪积

物和地层中风成砂被重新塑造造成现代地表沙丘沙,成为该区沙漠沙来源“就地起沙”认识的基础。库姆塔格沙漠数百米厚的碎屑沉积层,除少量来源于基岩风化,大多数来源于近源异地(如阿尔金山),是埋藏至此的物质后来再次活化,形成数米、数十米乃至一二百米厚的风沙层。这些风成沙虽然源区不远,但总归不是“土著”(原地碎屑),更贴切的定义应为“近地转沙”。囿于库姆塔格沙漠独特的地貌和气候状况,沙漠碎屑除少量粉砂和黏土可通过空气悬浮离开沉积盆地以外,其他物质目前只能停留在沙漠区,或在沙漠内狭窄区域进行上表层内循环。

5 结论

库姆塔格沙漠沙粒密度大多在 $2.50\sim 2.70\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,羽毛状沙丘平均密度为 $2.63\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,暗深色颗粒密度稍大、主要分布于 $2.60\sim 2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,仅有30%左右密度超过 $2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 成为重组分(包括重矿物),其中黑色颗粒密度最大,平均值为 $2.79\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。重组分在不同粒度中含量差异较大,颗粒越细重组分含量越高,多数样品其相对含量在1%~10%,相同粒级沙漠南部比北部含量高。

沙漠碎屑中含轻矿物10种,重矿物35种。轻矿物中石英占33%~43%,斜长石占21%~24%,钾长石占11%~17%,方解石和白云石为次要矿物;重矿物中普通角闪石、阳起石、绿帘石、石榴子石、钛铁矿、磁铁矿、褐铁矿和赤铁矿出现率高、含量多,在极细砂和粗粉砂中含量>10%的单矿物种为普通角闪石、绿帘石和褐铁矿,石榴子石是在各个粒级中稳定出现(2%~5%)的特征重矿物,闪石族、帘石族、稳定矿物类、铁质金属矿物类以及岩屑含量,随粒度由粗至细(1~5 Φ),均有增多的趋势。其中岩屑在轻组分中占14%~30%,在重组分中占10%~90%,相同粒级和加权平均值沙漠南部高于北部。

矿物特征和矿物指标皆表明研究区沉积物成熟度很低,沙漠北部略高于南部,显示北部沙漠沙要比南部经历更为强烈的风化磨蚀和沉积分选。库姆塔格沙漠1~5 Φ 细粒级碎屑可能主要来源于沙漠南部毗邻的阿尔金山,是古今冲洪积和古湖相沉积物由风力驱动活化而成的近地转沙再沉积,水力和风力对库姆塔格沙漠沙物质的塑造起着几乎同等份量的作用。

参考文献:

- [1] 张新毅,范小露,田明中.巴丹吉林沙漠晚更新世沉积物矿物学特征及其指示意义[J].干旱区地理,2022,45(6):1773-1783.
- [2] Wang Z Y, Wu Y Q, Tan L H. Provenance studies of aeolian sand in Mu Us Desert based on heavy-mineral analysis[J]. Aeolian Research, 2019, 40: 15-22.
- [3] 鲍锋,董治宝.柴达木盆地沙漠地表沉积物矿物构成特征[J].西北大学学报(自然科学版),2015,45(1):90-96.
- [4] 谢静,丁仲礼.中国东北部沙地重矿物组成及沙源分析[J].中国科学(D辑:地球科学),2007,37(8):1065-1072.
- [5] 夏训诚.库姆塔格沙漠的基本特征[M]//夏训诚.罗布泊科学考察与研究.北京:科学出版社,1987:78-94.
- [6] 王继和.库姆塔格沙漠综合科学考察[M].兰州:甘肃科学技术出版社,2008:18-38.
- [7] 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,2010,65(1):53-64.
- [8] 唐进年.库姆塔格沙漠沉积物特征与沉积环境研究[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [9] 梁爱民.库姆塔格沙漠沉积物来源、搬运过程及贡献量化研究[D].兰州:中国科学院西北生态环境资源研究院,2020.
- [10] Liang A M, Dong Z B, Su Z Z, et al. Provenance and transport process for interdune sands in the Kumtagh Sand Sea, Northwest China[J]. Geomorphology, 2020, 367: 107310.
- [11] 库姆塔格沙漠综合科学考察队.库姆塔格沙漠研究[M].北京:科学出版社,2012:1-306.
- [12] Morton A C, Hallsworth C R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones[J]. Sedimentary Geology, 1999, 124(1): 3-29.
- [13] 徐杰,姜在兴.碎屑岩物源研究进展与展望[J].古地理学报,2019,21(3):379-396.
- [14] Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks[M]. Austin, USA: Hemphill Publishing Company, 1980: 1-182.
- [15] Garzanti E. Petrographic classification of sand and sandstone[J]. Earth Science Reviews, 2019, 192: 545-563.
- [16] 刘虎俊,王继和,廖空太,等.库姆塔格沙漠“羽毛状沙丘”形态的示量特征[J].干旱区地理,2006,29(3):314-320.
- [17] 董治宝,屈建军.《库姆塔格沙漠地貌图》说明书[M].北京:科学出版社,2009:13-43.
- [18] 郭召杰,张志诚.阿尔金盆地群构造类型与演化[J].地质论评,1998,44(4):357-364.
- [19] 屈建军,左国朝,张克存,等.库姆塔格沙漠形成演化与区域新构造运动关系研究[J].干旱区地理,2005,28(4):424-428.
- [20] 康延臻,陈世红,张莹,等.2008-2013年库姆塔格沙漠及阿尔金山降水特征[J].中国沙漠,2015,35(1):203-210.
- [21] 廖空太,李耀辉,刘虎俊,等.库姆塔格沙漠羽毛状沙垄风沙活动强度特征[J].中国沙漠,2008,28(3):399-404.
- [22] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Dune types and their distribution in the Kumtagh Sand Sea, northwestern China [J]. Zeitschrift Für Geomorphologie, 2013, 57(2): 207-224.

- [23] Yang Z L, Qian G Q, Han Z W, et al. Variation in grain-size characteristics as a function of wind direction and height in the Sanlongsha dune field of the northern Kumtagh Desert, China [J]. *Aeolian Research*, 2019, 40: 53–64.
- [24] 佩蒂庄 F J. 沉积岩 [M]. 李汉瑜等, 译. 北京: 石油工业出版社, 1981: 166–199.
- [25] Jin B F, Wang M Y, Yue W. Comparative analysis of heavy mineral characteristics of sediments from the Huanghe River and the Changjiang River based on the multiple-window grain size strategy [J]. *Continental Shelf Research*, 2021, 216: 104326.
- [26] Hubert J F. A zircon-tourmaline-rutile maturity index and the interdependence of the composition of heavy mineral assemblages with the gross composition and texture of sandstones [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1962, 32(3): 440–450.
- [27] 操应长, 宋玲, 王健, 等. 重矿物资料在沉积物物源分析中的应用: 以涪西南凹陷古近系流三段下亚段为例 [J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 835–841.
- [28] 张鑫茹, 谢远云, 迟云平, 等. 东北沙地重矿物组成及其对物源的指示 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2023, 43(6): 181–190.
- [29] 金秉福, 张云吉, 哈斯额尔敦, 等. 库姆塔格沙漠北部沉积物色度特征与沙丘表面明暗色斑成因分析 [J]. *地理学报*, 2024, 79(9): 2297–2311.
- [30] 马收先, 孟庆任, 曲永强. 轻矿物物源分析研究进展 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(2): 597–608.
- [31] 金秉福, 吴波, 张云吉, 等. 库姆塔格沙漠岩屑的岩石学分析及其物源指示 [J]. *地质论评*, 2024, 70(5): 1998–2014.
- [32] 方世虎, 郭召杰, 贾承造, 等. 准噶尔盆地南缘中-新生界沉积物重矿物分析与盆地格局演化 [J]. *地质科学*, 2006, 41(4): 648–662.
- [33] 刘宝珺. 沉积岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 1980: 18–26, 286–294.
- [34] 唐进年, 苏志珠, 丁峰, 等. 库姆塔格沙漠的形成时代与演化 [J]. *干旱区地理*, 2010, 33(3): 325–332.
- [35] 王小凤, 陈宣华, 陈正乐, 等. 阿尔金地区成矿地质条件与远景预测 [M]. 北京: 地质出版社, 2004: 1–23.
- [36] 刘永顺, 辛后田, 周世军, 等. 阿尔金山东段拉配泉地区前寒武纪及古生代构造演化 [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 136–148.
- [37] 刘东生. 黄土与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 191–365.
- [38] 常丽华, 陈曼云, 金巍, 等. 透明矿物薄片鉴定手册 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–224.
- [39] 武汉地质学院矿物教研室. 结晶学与矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 1979: 1–266.
- [40] Pang Y J, Wu B, Gao J L, et al. Provenance of aeolian sand in the Kumtag Desert, northwestern China, inferred from geochemical data [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15: 1415.
- [41] 王永, 赵振宏. 罗布泊东部阿奇克谷地第四纪古地理 [J]. *古地理学报*, 2001, 3(2): 23–28.
- [42] 俄有浩, 王继和, 严平, 等. 库姆塔格沙漠古水系变迁与沙漠地貌的形成 [J]. *地理学报*, 2008, 63(7): 725–734.
- [43] 吕萍, 董治宝. 库姆塔格沙漠春季近地面风场、温度场特征 [J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 442–446.
- [44] 曾晓青, 王式功, 尚可政, 等. 库姆塔格沙漠大尺度风场特征分析 [J]. *中国沙漠*, 2009, 29(3): 391–396.
- [45] 严平, 李文赞, 俄有浩, 等. 库姆塔格沙漠水文调查初步结果 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 242–246.
- [46] 屈建军, 郑本兴, 俞祁浩, 等. 罗布泊东阿奇克谷地雅丹地貌与库姆塔格沙漠形成的关系 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 294–300.
- [47] 宋昊泽, 杨小平, 穆桂金, 等. 罗布泊地区雅丹形态特征及演化过程 [J]. *地理学报*, 2021, 76(9): 2187–2202.

Mineral characteristics and provenance indicators of medium to coarse silt from the northern and southern regions of the Kumtagh Desert

Jin Bingfu¹, Yu Jian^{1,2}, Wu Bo^{3,4}, Zhang Yunji¹, Hasi Eerdun⁵, Su Zhizhu⁶,
Kong Deyong⁷, Han Xujiao⁵

(1.School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China; 2.School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3.National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Desert Ecosystem and Global Change, Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 4.Institute of Great Green Wall, Beijing 100091, China; 5.School of Natural Resources Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 6.School and History and Culture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 7.Shaoguan University, Shaoguan 512005, Guangdong, China)

Abstract: Identification of detrital heavy minerals was carried out using a multiple-window grain size strategy range of 1–5 Φ wide on 73 aeolian sand samples (surface, subsurface, and shallow sections) from 51 sites in the core area of the Kumtagh Desert located in the north and south regions. The samples were consequently subjected to particle size analysis and density testing for certain specimens. The findings indicate that the dominant constituent of the shifting dune in the Kumtagh Desert is medium-fine sand, exhibiting an average sediment density of $2.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, approximately 30% of the dark particles comprise heavy components, primarily composed of rock debris and containing a minor proportion of heavy minerals. The number of mineral species, the contents of heavy components, quartz, carbonates, amphibole group, epidote group, stable heavy minerals and ferric metal minerals, as well as the mineral indices of Q/F , $Q/(F+L)$, ZTR and UM/SM in sediments exhibit an increase with decreasing particle size. Conversely, the content of rock debris, plagioclase, potassium feldspar, and the heavy mineral index GZi in light and heavy fractions exhibited respectively a decrease corresponding to the reduction in particle size. The 1–5 Φ detrites contain a total of 10 light minerals, predominantly quartz and plagioclase. Among the heavy minerals, there are 35 different types, with epidote, hornblende, and limonite being the most abundant, while garnet stands out as the characteristic mineral. The concentration of both light and heavy rock debris is significantly high. The sediment maturity in the study area is significantly low, with a slightly higher level observed in the northern part of the desert compared to the southern part. Both mineral characteristics and mineral indexes indicate that the sand in the northern region has undergone more intense weathering and sedimentary sorting than its counterpart in the south. The aeolian sand debris primarily originates from the Altyn Tagh, which is adjacent to the southern part of the desert. This sand can be considered as "turn into desert sand near the source" redeposited through wind-driven activation of ancient and modern alluvial and palaeo-lacustrine sediments.

Key words: heavy minerals; light minerals; mineral maturity; provenance; Kumtagh Desert