

胡菁菁, 胡光印, 董治宝. 黄河源区玛多盆地沙漠化土地粒度特征[J]. 中国沙漠, 2022, 42(4): 242–252.

黄河源区玛多盆地沙漠化土地粒度特征

胡菁菁, 胡光印, 董治宝

(陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119)

摘要: 为探讨黄河源区玛多盆地风沙沉积物分异特征, 采集玛多盆地不同沙漠化程度、不同地貌部位、不同动力条件的沉积物样品进行粒度分析。结果表明: (1) 玛多盆地沉积物随沙漠化程度增加, 平均粒径增大, 粗颗粒组分增多, 分选性变好, 偏度向负偏靠拢, 峰态逐渐转向平坦, 频率分布曲线也由双峰态转变为单峰态。 (2) 流动沙丘以中沙和细沙组分为主, 分选性好, 偏度近对称, 峰度为中等尖锐。各个沙丘不同地貌部位沉积物粒度参数分异受风向改变的影响, 变化规律不明显。流动沙丘沉积物相较于流动沙地沉积物的粒径更粗, 分选性更好, 可能是沙丘形成过程中风对沉积物颗粒的再次分选所致。 (3) 河流阶地剖面沉积物的主要粒级为中沙和细沙, 分选中等偏差, 偏度为正偏, 峰尖锐, 河流阶地沉积物的粒度组成与周围风成作用形成的流动沙丘(地)的粒度组成高度相似, 极有可能是当地风沙活动的主要物源。

关键词: 沙漠化; 粒度; 玛多盆地; 黄河源; 青藏高原

文章编号: 1000-694X(2022)04-242-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00068

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

当前, 沙漠化已成为国际社会面临的重要环境-社会-经济问题, 影响程度与范围已远超其他类型的土地退化。近2.5亿人口和1/3的陆地表面受其影响^[1-2]。中国受沙漠化危害最严重, 沙漠化土地面积大, 分布广, 类型复杂。中国的沙漠化土地主要分布在北方干旱、半干旱地区和部分半湿润地区, 自20世纪50年代以来, 人口的迅速增加和经济活动致使沙漠化土地呈现扩张的趋势, 直至2000年初开始逐渐好转^[3]。在进行沙漠化防治前, 我们应对其形成过程与机理有一个全面客观的认识。沉积物的粒度特征与其形成环境关系密切, 在判断其物源、形成机理与搬运方式等问题中有着良好的指示作用^[4-6]。

玛多盆地位于青藏高原的东北部、黄河的发源地。近年来, 受气候变化与人类活动双重影响, 黄河源区的生态环境受到破坏, 土壤侵蚀、植被退化、土地荒漠化等问题突出^[7-9]。玛多盆地湖泊众多, 是黄河重要的水源涵养地, 该地区土地的沙漠化,

不仅影响着本区域的发展, 同时对黄河的中下游也产生着重要影响。关于黄河源区土地沙漠化的研究工作已开展很多, 朱刚等^[10]对黄河源区沙质荒漠化土地的景观格局变化及原因进行了分析; 徐文印等^[11]、贺慧丹等^[12]关注了黄河源区高寒草地退化下的土壤养分变化; 胡光印等^[8, 13]探讨了黄河源区沙漠化的驱动力以及空间格局分异; 而针对该区沙漠化土地的粒度特征空间分异研究开展较少。运用沉积物粒度特征开展土地的沙漠化过程及其空间异质性的研究方法已比较成熟, 在中国的青海湖流域^[14-15]、毛乌素沙地^[16-17]、巴丹吉林沙漠^[18-19]、河西走廊^[20-21]等区域的研究中均有报道。基于上述背景, 选择黄河源区玛多盆地为研究对象, 选取不同沙漠化程度、不同地貌部位、不同动力条件的沉积物进行粒度分析, 讨论区域尺度下沙漠化土地的演化特征与空间异质性, 完善玛多盆地沙漠化土地的研究, 深化对黄河源区风沙活动演变的认识, 旨在为区域沙漠化治理与水土保持提供科学依据。

收稿日期: 2022-05-10; 改回日期: 2022-06-05

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071004); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0403)

作者简介: 胡菁菁(1999—), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事沙漠化与风沙活动相关研究。E-mail: revive0622@163.com

通信作者: 胡光印(E-mail: guangyinhu@snnu.edu.cn)

1 研究区概况

玛多盆地位于黄河源区,地处青藏高原东北部(图1)。在本研究中,我们将玛多盆地的范围界定为特和土乡以上黄河及其支流所涵盖的流域范围,该区域处于青藏高原相对平坦的高原面上,面积为40 114 km²。该范围北抵布青山,南至巴颜喀拉山,东至阿尼玛卿山,可将黄河流域在高原面上绝大部分沙漠化土地涵盖其中^[8](图1)。玛多盆地海拔4 000—5 000 m,地势相对平坦,地形起伏不大。

属于高寒气候,冬季漫长而干冷多风,夏季短促而温凉多雨,年平均气温-4.1℃,气温日较差较大。年降水量303.9 mm,年际变化大。玛多盆地多大风,多年平均风速可达3.2 m·s⁻¹。玛多盆地大风多发生在冬春季节,夏秋季相对较少,11月至来年4月大风最为频繁,且风速大,持续时间长;玛多盛行风为偏东风和东北风,年均大风日数55 d,大风连续日数最长可达8—10 d;起沙风日数高达324 d,各月均有很高的发生频率,各月差异不明显^[22]。

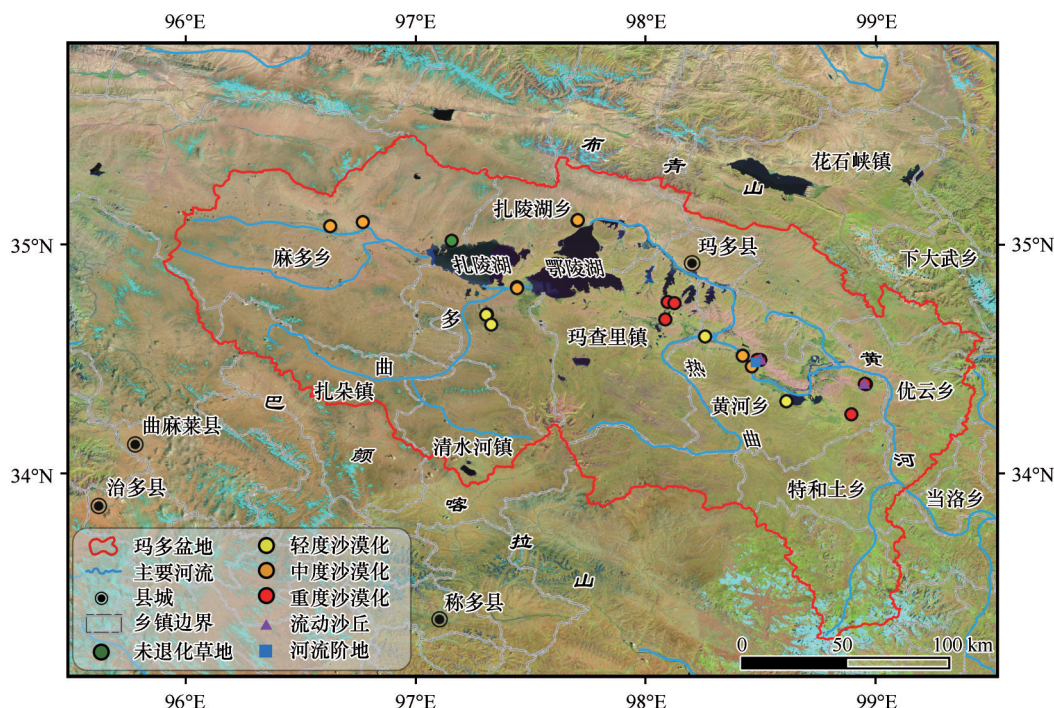


图1 采样点分布示意图

Fig.1 The distribution of the sampling sites

2 研究方法

2.1 样品采集

玛多盆地的沙漠化土地主要分布于黄河宽谷和湖滨地带,沿黄河宽谷采集样品共56个(图1),样品具体地理坐标如表1所示。本研究的样品采集主要关注以下3个层面的问题:

第一个层面:采用空间代替时间序列的研究方法,对不同沙漠化程度地表进行采样,以揭示该地区草地在沙漠化发展过程中的粒度变化特征。沿黄河两岸分别采集不同沙漠化程度的地表样27个,依次命名为BT1—BT27(表1),按照沙漠化程度划分为轻度、中度、重度沙漠化3类,划分依据参考董

治宝等^[22]所采用指标。

第二个层面:对玛多盆地内流动沙地与流动沙丘间地表沉积物粒度特征进行对比分析,同时关注流动沙丘不同采样位置对粒度特征的影响。在以往的沙漠化研究中,人们基本将流动沙地和流动沙丘作为同一个类别(重度或极重度沙漠化土地)来进行研究,并将其统称为流动沙(丘)地。本研究试图将两者分别进行研究,比较它们之间的粒度特征是否存在一定差异。据此,本研究中重度沙漠化样品主要采集于流动沙地(没有沙丘形态出现),对应样品编号BT18—BT27(表1),为与之进行对比,我们选取了3个具有代表性的新月形流动沙丘(SQ1、SQ2、SQ3)进行采样。那么,就流动沙丘而言,采集

表 1 玛多盆地采样点位置
Table 1 Location of sampling sites in Madoi Basin

编号	沙漠化程度	经度(E)	纬度(N)
BT1	未退化草地	97°09′24″	35°01′11″
BT2	未退化草地	97°18′39″	34°41′49″
BT3	未退化草地	97°42′30″	35°06′37″
BT4	轻度沙漠化	97°18′28″	34°41′40″
BT5	轻度沙漠化	97°19′48″	34°39′07″
BT6	轻度沙漠化	97°42′25″	35°06′28″
BT7	轻度沙漠化	98°15′53″	34°35′59″
BT8	轻度沙漠化	98°25′47″	34°30′58″
BT9	轻度沙漠化	98°37′16″	34°18′54″
BT10	轻度沙漠化	98°58′05″	34°23′27″
BT11	中度沙漠化	96°37′33″	35°05′01″
BT12	中度沙漠化	96°46′06″	35°06′06″
BT13	中度沙漠化	97°26′31″	34°48′58″
BT14	中度沙漠化	97°26′34″	34°48′43″
BT15	中度沙漠化	97°42′30″	35°06′36″
BT16	中度沙漠化	98°25′48″	34°30′56″
BT17	中度沙漠化	98°28′11″	34°28′05″
BT18	重度沙漠化	98°06′06″	34°45′03″
BT19	重度沙漠化	98°07′52″	34°44′45″
BT20	重度沙漠化	98°05′28″	34°40′31″
BT21	重度沙漠化	98°30′25″	34°29′50″
BT22	重度沙漠化	98°29′35″	34°29′50″
BT23	重度沙漠化	98°54′16″	34°15′31″
BT24	重度沙漠化	98°57′49″	34°23′34″
BT25	重度沙漠化	98°29′59″	34°30′00″
BT26	重度沙漠化	98°29′59″	34°30′00″
BT27	重度沙漠化	98°30′29″	34°30′08″
SQ1	流动沙丘	98°29′59″	34°30′00″
SQ2	流动沙丘	98°30′28″	34°30′09″
SQ3	流动沙丘	98°57′37″	34°23′41″
T1	河流阶地	98°29′08″	34°29′10″

自不同部位的样品的粒度特征差异如何？是否会对沙漠化研究结果造成影响？为此，我们对 3 个沙丘表面不同部位进行了采样，探讨沙丘尺度上的粒度分异特征。3 个流动沙丘中，前两个沙丘位于玛多县雅娘镇附近，SQ1(雅娘沙丘 1)沙源来自河岸阶地上的风蚀劣地，沙丘周边地势开阔，为粗砾石覆

盖，植被稀疏，有风蚀坑和风蚀劣地出现。分别在迎风坡坡脚、迎风坡下部、迎风坡上部、丘顶、背风坡上部、背风坡中部和背风坡坡脚采集 7 个样品，命名为 SQ1-1—SQ1-7。SQ2(雅娘沙丘 2)为两山中间的沙丘，对迎风坡中部、沙丘顶，以及背风坡中部和坡脚进行采样，分别命名为 SQ2-1—SQ2-4。SQ3(斗江沙丘)位于玛多县黄河乡的斗江村，该沙丘为河流阶地上发育的新月形沙丘，分别在迎风坡坡脚、迎风坡中下部、迎风坡中部、迎风坡中上部、丘顶、背风坡中上部、背风坡中下部和背风坡底部共采集 8 个样品，依次命名为 SQ3-1—SQ3-8。

第三个层面：从粒度特征的角度对玛多盆地的河流相沉积物与风沙沉积物进行对比分析。通过遥感影像和野外考察我们发现，玛多盆地的沙漠化土地主要分布于黄河沿岸的阶地和湖滨地带，其中宽阔的河流阶地也是该地区重度沙漠化土地的主要分布区域。随着沙漠化的发展，这些广泛分布于河流阶地的河流相沉积物是否会成为风沙活动的物源？为回答该问题，我们在黄河的一级阶地处挖取了一个典型的河流相沉积剖面，样品命名为 T1(表 1)，自上而下以 10 cm 为等间距连续采样，编号依次为 T1-1—T1-13。

2.2 分析方法

将野外采集的样品经过前处理后，在实验室进行粒度分析。其中 BT25—BT27 由于样品粒径较大，采用筛分法进行测量，套筛的间隔为 $1/3 \Phi$ ，套筛孔径 0.032—4 mm。其余样品皆采用马尔文 2000 激光粒度仪测量，首先称取 0.5 g 的样品，放入 500 mL 的烧杯中，加入 10 mL 过氧化氢溶液，用玻璃棒搅拌，使其与样品中有机物反应完全。加入 10 mL 浓度为 10% 的盐酸，并将其放到电加热板上加热，使用玻璃棒不断搅拌，以去除样品中的次生碳酸盐类杂质。待上清液加热至呈金黄色后取下，每个烧杯中加入纯水至 500 mL，静置 12 h 后，用虹吸管吸取上层清液，加入 1 mL 分散剂(六偏磷酸钠)并于超声震荡仪震荡 10 min 后，放入激光粒度仪进行粒度分析。每个样品重复测量两遍，取平均值作为最后输出结果。测试结果中的粒级划分采用 Udden-Wentworth 方法^[23-24]；采用 GRADISTAT 软件^[25]对平均粒径(M_z)、分选系数(σ)、偏态(SK)、峰度(K_g)等粒度参数进行计算。

3 结果与分析

3.1 粒级组成

由于各种沙漠化程度样品的数量较多(表 1), 相同沙漠化程度样品的粒级组成特征比较相似, 我们对各沙漠化程度沉积物粒级求平均值, 获得不同沙漠化程度样品粒级组成的总体特征(图 2A)。对 3 个沙丘不同地貌部位和剖面不同层位样品分别绘制粒级组成柱状图(图 2B—图 2E)。玛多盆地各组分含量随沙漠化程度不同发生明显变化。其中, 未

退化草地样品中, 极细沙、粗粉沙、粉沙-黏土最多, 分别占比为 33.0%、26.0%、23.5%, 三者之和超过 82%, 占绝对优势, 其他粒级组分较少。轻度沙漠化土地以细沙、极细沙为主, 两者约占总组分的 57.0%, 其次是粉沙-黏土(18.5%), 中沙、粗粉沙较少, 分别占 11.6%、11.5%, 几乎不含其他组分。中度沙漠化土地中的细沙组分高达 48.8%, 其次是中沙(22.4%)和极细沙(20.3%), 其余组分含量均未超过 10%。重度沙漠化土地细沙最多(46.3%), 其次为中沙(27.7%), 再次为极细沙(11.0%), 此外含有 6.6%

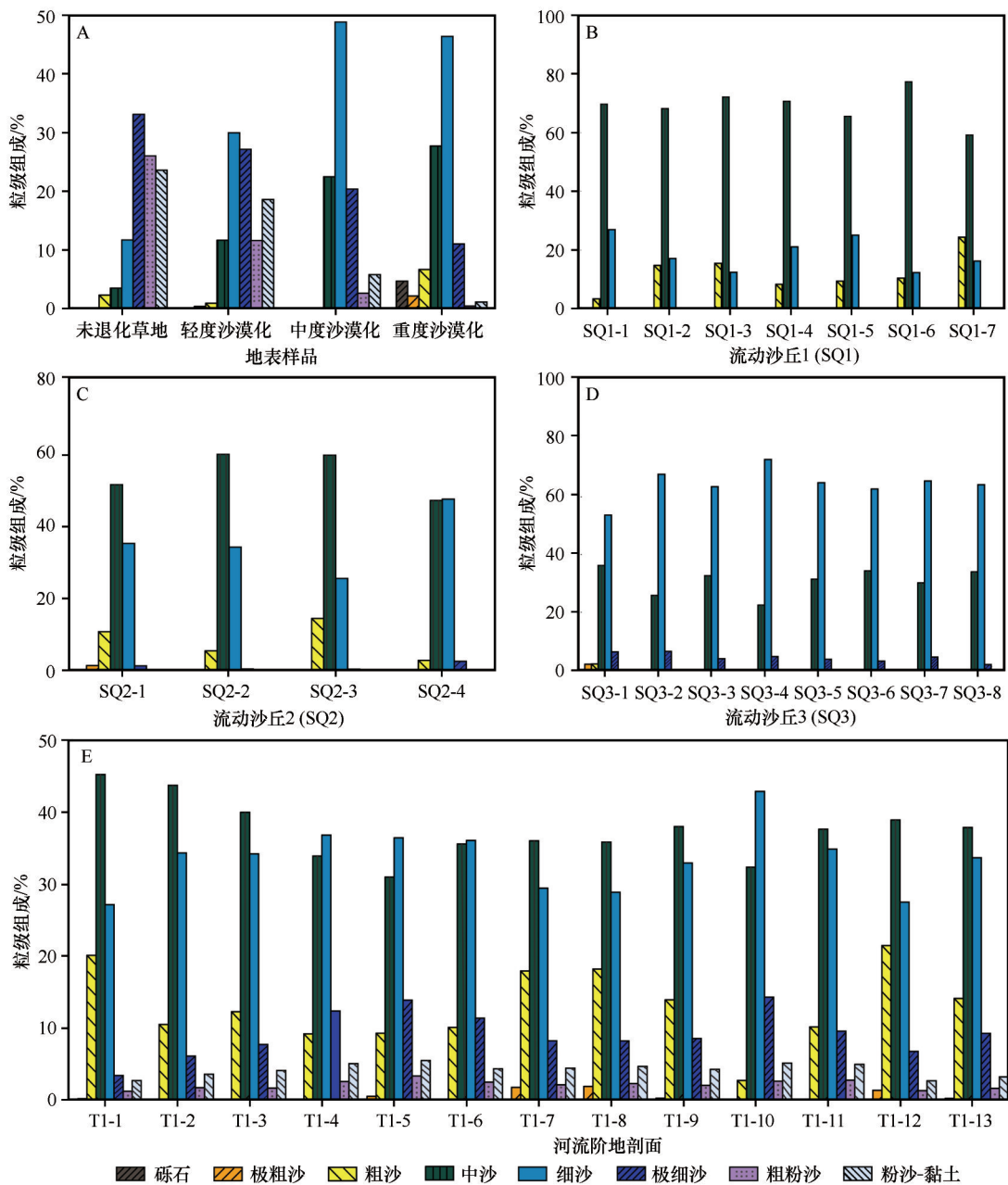


图2 玛多盆地沉积物粒级分布
Fig.2 Grain size distribution in Madoi Basin

的粗沙和4.6%的砾石组分。

随着沙漠化程度的加重,土壤中的极细沙、粗粉沙和粉沙-黏土含量均呈逐渐减小趋势(图2A)。未退化草地至重度沙漠化,极细沙从33.0%减少到11.0%;粗粉沙从26.0%减少至0.4%;粉沙-黏土从23.5%减少至1.1%。与此同时,中沙和细沙的含量则随着沙漠化程度的加重逐渐增加(图2A)。中沙含量从未退化草地的3.5%逐渐增加到重度沙漠化的27.7%,细沙从未退化草地的11.6%增加到42.3%。

3个沙丘不同地貌部位的表面沉积物粒级差异不大(图2B—图2D),中沙和细沙组分含量占绝对优势。SQ1以中沙为主,高达68.9%,细沙和粗沙的含量分别占18.7%和12.3%,其余组分均小于0.1%。SQ2的中沙和细沙含量都很高,分别占54.8%和35.7%,粗沙和极细沙的占比分别为2.7%和2.4%,不含有其他组分。SQ3表面沉积物粒径相比SQ1、SQ2更细,以细沙组分为主,含量占比为64.4%,此外,还含有35.7%的中沙和4.2%的极细沙,其余组分含量不足1%。

河流阶地剖面沉积物的粒级组成如图2E所示,各层深度间的差异较小,与沙丘和沙地样品相似,中沙和细沙在各层沉积物中的含量均为最高,

分别占31.0%—45.2%和27.1%—42.9%。粗沙和极细沙组分在各层均有分布,含量分别为2.73%—21.4%与3.14%—14.3%,其他组分含量很少,均少于10%。

3.2 粒度参数

沉积物的粒度参数对其所处的沉积环境有良好的指示作用^[26]。平均粒径(M_z)可以体现沉积物粒径大小的分布趋势;分选系数(σ)反映了沉积物颗粒大小的均匀程度;偏度(SK)表示沉积物粒度频率曲线分布的对称性;峰度(K_g)是衡量曲线峰凸程度的重要指标^[27-30]。

玛多盆地地表沉积物样品平均粒径1.20—4.62 Φ 。未退化草地、轻度沙漠化土地、中度沙漠化土地、重度沙漠化土地的平均粒径分别为4.00—4.40、2.64—4.62、2.33—2.86、3.75—1.72 Φ ,随沙漠化程度加剧,平均粒径呈现出不断增大的趋势(图3A)。地表样品分选性基本介于中等至差之间(0.45—2.43)。随着沙漠化程度增加,分选性逐渐好转(图3B),其中,未退化草地分选性最差,平均值为1.78,重度沙漠化土地的分选性最好,平均值为0.94。样品的偏度整体介于近对称到极正偏之间(图3C),未

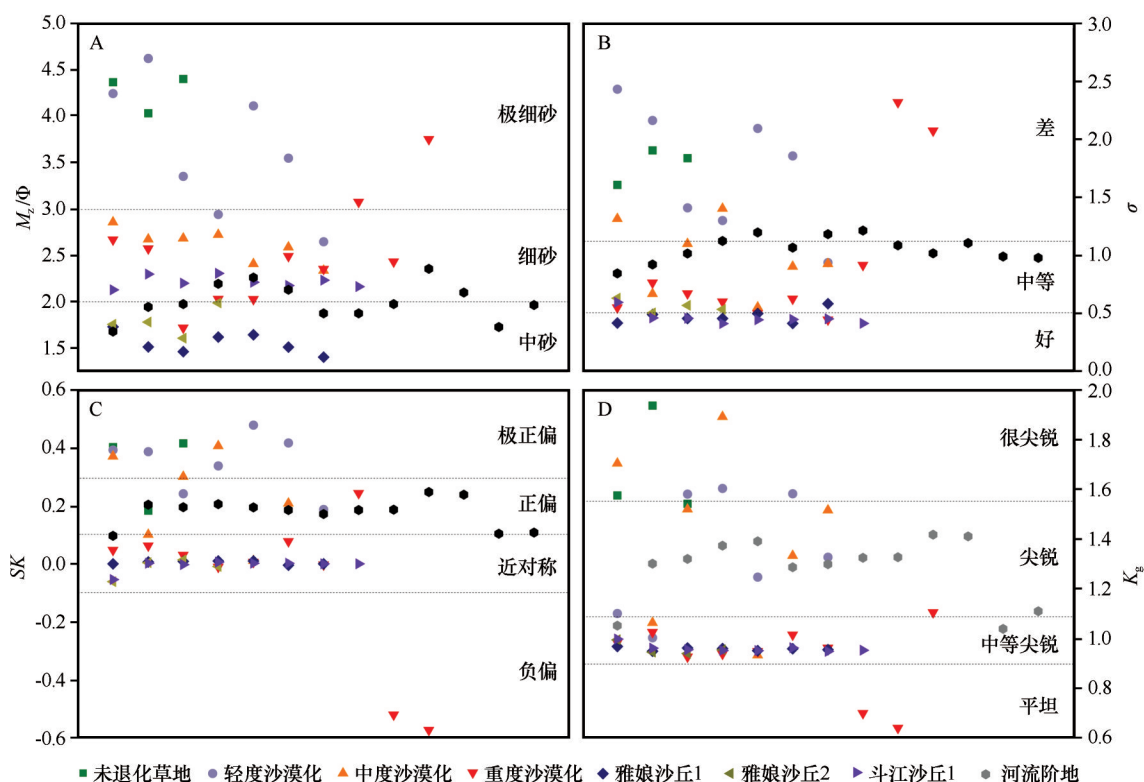


图3 玛多盆地沉积物平均粒径(A)、分选系数(B)、偏度(C)、峰度(D)

Fig.3 Average particle size (A), sorting coefficient (B), skewness (C), and kurtosis (D) of sediments in Madoi Basin

退化草地与轻度沙漠化土地样品偏度位于极正偏,随着沙漠化程度增大偏度逐渐向近对称靠拢,重度沙漠化土地样品的偏度呈现近对称,个别样品偏度呈负偏。沉积物样品的峰度有着相似的趋势(图3D),未退化草地样品的峰度很尖锐,在1.54—1.93,轻度沙漠化与中度沙漠化样品的峰度相对和缓,分别为1.00—1.58与0.93—1.70,重度沙漠化土地的峰度处于中等尖锐到平坦之间,为0.70—1.10。

流动沙丘样品的各粒度参数与流动沙地(重度沙漠化土地)样品粒度参数相似性很高(图3)。SQ1平均粒径1.51—1.72 Φ , SQ2平均粒径1.61—1.99 Φ ,位于下风向的SQ3平均粒径较小,为2.13—2.31 Φ (图3A)。沙丘样品的分选性整体良好,各沙丘样品

的分选性差异不大,为0.41—0.63(图3B);偏度为近对称型,为0.05—0.15(图3C);峰度位于中等尖锐范围内(图3D)。

河流阶地剖面的平均粒径为1.68—2.35 Φ ,分选性中等偏差,偏度为正偏,正偏幅度大于重度沙漠化土地沉积物和沙丘沉积物而小于未退化草地、轻度沙漠化、中度沙漠化沉积物,峰度位于尖锐范围内(图3)。

3.3 频率分布曲线与概率累积曲线

频率分布曲线可以直观展示沉积物的粒度分布。从图4可以看出,未退化草地、轻度沙漠化土地呈双峰分布,其中未退化草地样品主峰峰值粒径均

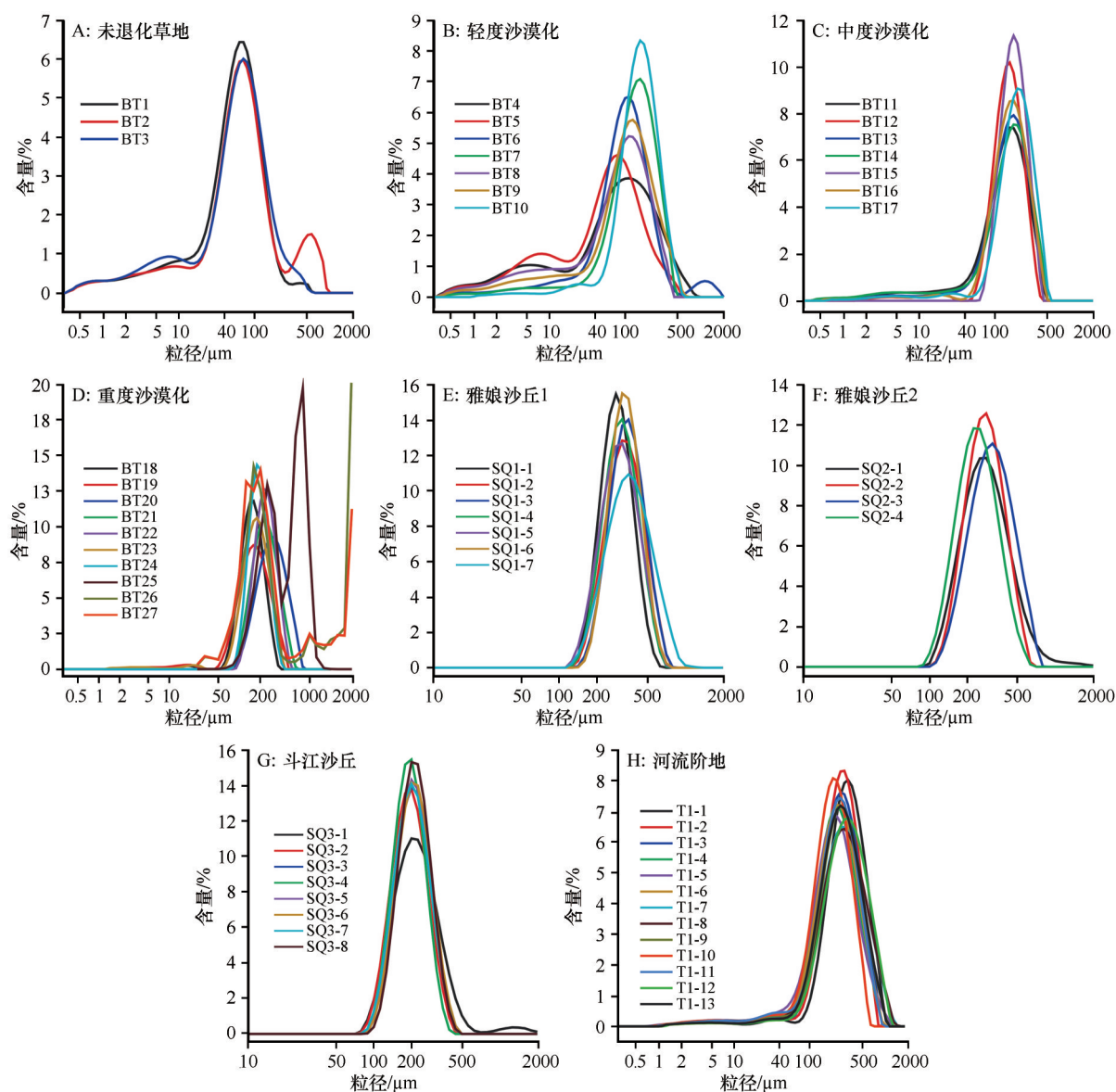


图4 玛多盆地沉积物粒度频率分布曲线

Fig.4 Grain size frequency distribution curves of Madoi Basin.

为 $71.0\ \mu\text{m}$, BT1、BT2、BT3 的次峰值粒径分别为 6.32 、 563.6 、 $8.93\ \mu\text{m}$ (图 4A)。轻度沙漠化土地频率分布曲线较为宽平, 主峰值粒径 79.6 — $158.6\ \mu\text{m}$, 次峰值粒径 5.02 — $7.96\ \mu\text{m}$ (图 4B); 中度沙漠化土地、沙丘、河流阶地沉积物样品则呈明显的单峰分布; 中度沙漠化土地峰值粒径为 158.9 — $200.0\ \mu\text{m}$ (图 4C); 重度沙漠化土地样品的频率分布曲线多为单峰分布, 峰值粒径为 160.0 — $316.9\ \mu\text{m}$, BT26 与 BT27 样品含有较多砾石组分, 致使其频率分布曲线除了主峰外, 在 800 — $4\ 000\ \mu\text{m}$ 内还存在一个高值 (图 4D)。沙丘样品的频率分布曲线相较于地表沉积物样品更为细窄, 粒径比较集中 (图 4E、4F、4G), SQ1、SQ2 的峰值粒径分别为 282.5 — 355.6 、 224.4 — $317.0\ \mu\text{m}$; SQ3 所有样品的峰值粒径皆位于 $200.0\ \mu\text{m}$ 处。河流阶地剖面各深度的频率累积曲线差异较小, 表现出较好的一致性, 峰值粒径为 200.0 — $316.9\ \mu\text{m}$ (图 4H)。

概率累积曲线常用于推断沉积物的搬运方式及其与粒度分布之间的关系, 从而揭示沉积环境。通常风成沉积物的累积曲线存在 2—4 个独立的线段, 不同的线段指示了沉积物的不同搬运方式。累

积曲线的斜率反映了沉积物的分选性, 概率累积曲线的斜率越大, 表明沉积物的分选性越好, 指示风沙活动越强烈^[31-32]。玛多盆地沉积物样品的概率累积曲线如图 5 所示: 未退化草地沉积物概率累积曲线呈四段式 (图 5A), 曲线含有一个蠕移组分, 一个跃移组分与两个悬移组分, 蠕移与跃移组分的截点位于 1.0 — $1.9\ \Phi$, 跃移与悬移组分的截点位于 4.7 — $5.3\ \Phi$, 两个悬移组分的截点位于 9.8 — $10.9\ \Phi$ 。轻度沙漠化土地累积曲线呈三段式 (一组跃移组分, 两组悬移组分, 图 5B), 跃移与悬移的截点位于 3.8 — $4.4\ \Phi$, 两个悬移组分的截点位于 8.9 — $10.5\ \Phi$, 部分样品含有少量的蠕移组分。中度沙漠化土地累积曲线多为两段式 (图 5C), 存在跃移与悬移两个组分, 截点位于 3.7 — $3.9\ \Phi$; 重度沙漠化土地同样多以“跃移—悬移”两段式为主 (图 5D), 二者截点位于 3.4 — $3.7\ \Phi$, 其中, BT25、BT26、BT27 样品中含有少量蠕移成分。

整体来看, 该区域沉积物跃移组分最多, 其次是悬移组分, 部分样品中含有少量的蠕移组分。随着沙漠化程度的加剧, 沉积物的概率累积曲线呈现由 4 段式向两段式转化的规律, 沉积物跃移组分逐

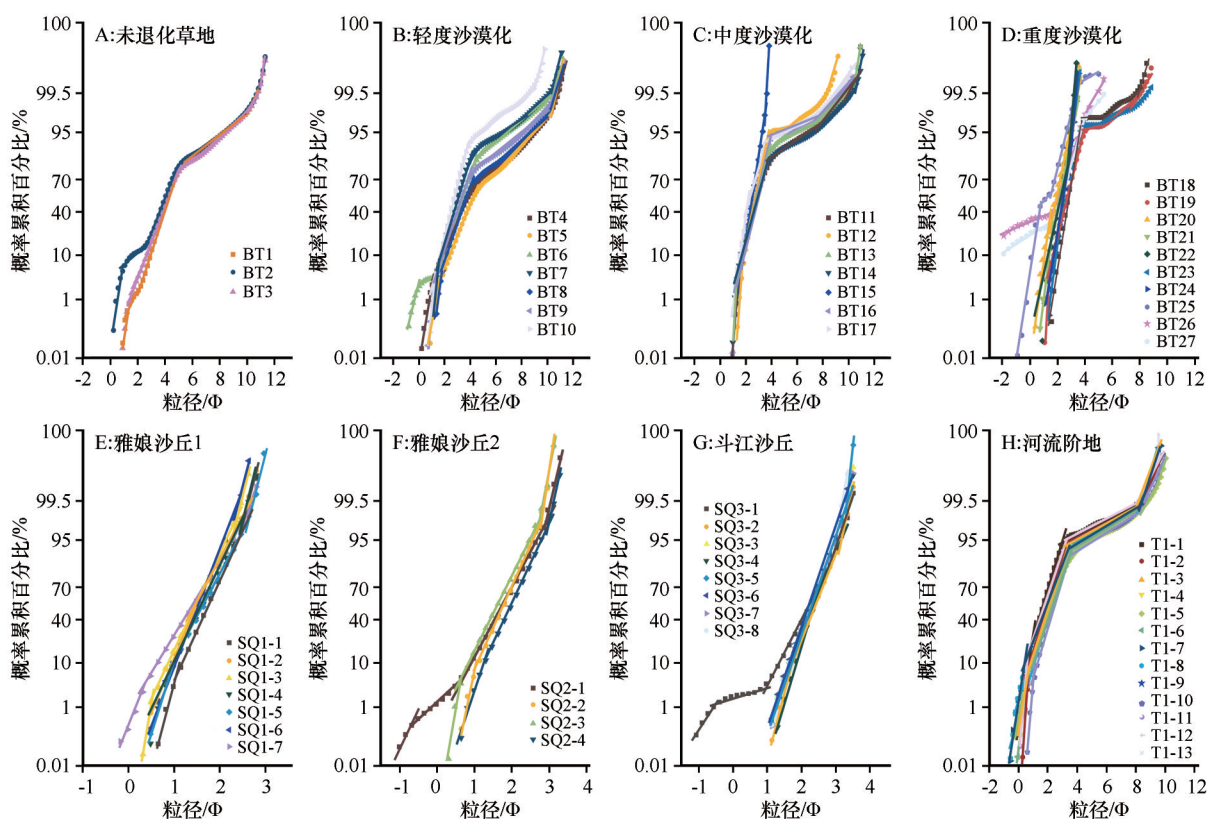


图5 玛多盆地沉积物粒度概率累积曲线

Fig.5 The log-probability cumulative curves of Madoi Basin

渐增多,悬移组分逐渐减少。

同一沙丘各地貌部位的概率累积曲线差异不大。3个沙丘的沉积物概率累积曲线多为“跃移-悬移”两段式(图5E—图5G),以跃移组分占据绝对优势,悬移成分累计含量不足5%,部分样品存在蠕移组分。SQ1与SQ2跃移与悬移的节点均出现在2.5—3.0 Φ , SQ3跃移与悬移的节点在3.0—3.5 Φ 。靠近沙丘坡脚的沉积物的概率累积曲线多为三段式,除跃移与悬移组分外,还含有少量蠕移组分。

雅娘剖面各层位的概率累积曲线一致性很好,呈三段式分布(图5H),跃移与悬移的截点集中在3.0—3.7 Φ ,两个悬移组分的截点集中在8.4—8.7 Φ 。

4 讨论

4.1 沙漠化过程中粒度变化特征及影响因素

沙漠化发展过程中,土壤粒级组成存在逐渐粗化的趋势,分选性、偏度、峰度也会相应发生变化。本研究结果表明,玛多盆地草地未发生沙漠化时,土地整体粒径偏小,主要粒级组成为极细沙与粉沙,粒度分选性很差,偏度为极正偏,峰态很尖锐,频率分布曲线多呈双峰分布;沙漠化初期,土地的优势粒级转变为细沙与极细沙,分选性好转,但仍然很差,偏度介于正偏与极正偏之间,峰态介于尖锐与很尖锐之间,频率分布曲线呈双峰态;沙漠化的中期,细颗粒组分进一步流失,土地粒级以细沙占据绝对优势,其次为中沙和极细沙,分选性介于差到中等之间,偏度更近于正偏,峰态介于尖锐与很尖锐之间,频率分布曲线转变为单峰曲线;土地发展至重度沙漠化时,主要粒级组成转变为细沙和中沙,分选性中等,偏度近对称到负偏,峰度中等尖锐到平坦,频率分布曲线呈单峰分布。

随着沙漠化程度的加重,土地中粉沙、黏土等细颗粒组分损失严重,粒径逐渐变大,这与Zhou等^[33]在塔克拉玛干沙漠、Jin等^[34]在鄂尔多斯高原、Liu等^[35]在毛乌素沙地、Su等^[36]在科尔沁沙地所发现的规律一致。植被的覆盖可以降低地表风速、阻挡输沙从而改变近地表流场^[33]。未退化草地植被覆盖较高,近地层气流运动时受植被的阻碍,风速降低,风蚀能力减弱,随着沙漠化程度增大,地表植被覆盖减少,风蚀作用也随之增强^[37-38]。研究表明,粒径在0.075—0.4 mm的颗粒易被风侵蚀^[39-40],强劲的起沙风将地表细颗粒物质带走,较粗颗粒的物质

则被留在原地,致使土地粗化。此外,在本研究中,随着沙漠化程度加深沉积物的分选性逐渐变好,较高的分选性通常指示着更强的风能环境,这也反映了近地面风蚀强度是导致沙漠化土地粒度变化的主导因素。

土壤粒度组成的变化不仅会直接影响土壤的持水性、吸附性、松紧度等理化性质,而且会影响土地对养分的涵养能力,从而大大削弱土地的潜在生产力^[41]。研究表明,土壤的全氮含量与土壤有机碳含量均与土壤粒径呈负相关^[42],粉沙和黏土、极细沙等细颗粒组分中大量的铁铝化合物和碱性元素使其吸附营养的能力远高于粗颗粒组分^[43-44],风蚀作用对土壤的选择性吹蚀将不利于土壤有机物的存留。此外,随着荒漠化加剧,地表枯落物减少导致有机碳和土壤氮含量的输入,植被覆盖的降低将进一步影响土壤微生物的生物量与活性,减少土壤矿物与土壤有机物的固结能力^[45]。据以上分析可以推测,玛多盆地沙漠化的发展将会导致土壤颗粒在粗化的同时也发生贫瘠化,使土地可利用性进一步降低。

4.2 流动沙丘与流动沙地粒度特征

沙丘不同部位沉积物的粒度特征分异是沙丘表面气流、沙丘形态、物质来源、植被覆盖综合作用的结果^[46-47]。玛多盆地同一沙丘不同地貌部位的粒度特征很相似(图3)。SQ1表面沉积物粒径有从丘顶至两侧逐渐变粗的趋势,而SQ2、SQ3则无明显规律。3个沙丘不同地貌部位的分选性均集中在0.5 Φ 左右。偏度方面,3个沙丘沉积物偏度均为近对称,各地貌部位偏度区别不大。峰度整体位于中等尖锐范围, SQ2、SQ3由丘顶至两坡峰度逐渐尖锐, SQ1峰度无明显规律。

前人将沙丘不同部位沉积物粒度分布模式总结为两种,一种是自坡底至坡顶沉积物粒径逐渐变粗,分选性逐渐变好,称为“粗顶型”,一种是从坡顶至坡脚沉积物粒径逐渐变粗,分选性同样逐渐变好,称为“细顶型”^[48-49]。本研究中玛多盆地的3个沙丘平均粒径曲线和分选性曲线形态各异,既不符合“粗顶型”也不符合“细顶型”模式。这可能是由于近地面气流的变化影响了沉积物的分布。黄河源区主导风向为偏东风和东北风,10月至次年5月以偏西风为主,6—9月以偏东风为主^[50]。3个沙丘样品采集于9月底至10月中下旬,风向的转变使得

沙丘顶部的沙粒沿反方向吹蚀,使沙丘表层沙粒混合,从而导致沙丘不同地貌部位粒度特征不清晰。这说明采样的时间也是研究沙丘不同地貌部位粒度特征不可忽视的因素,仅凭数个沙丘样品难以代表一个区域沙丘的整体情况。

对比流动沙地(重度沙漠化土地)与流动沙丘的粒度特征参数(图3)发现,相比流动沙地,流动沙丘的沉积物颗粒更粗,分选性更好。流动沙地与流动沙丘均以中沙和细沙为优势粒级(图2),流动沙地中沙组分的平均含量占比27.6%,细沙平均含量占比46.4%,流动沙丘中沙平均含量占比50.0%,细沙平均含量占比29.0%。此外,流动沙地中含有12.5%的极细沙、粉沙、黏土等细颗粒物,而流动沙丘中仅含有1.9%的极细沙组分,几乎不含粉沙、黏土等成分。由此可见,细颗粒组分的减少是致使流动沙丘平均粒径大于流动沙地的主要原因。流动沙地与流动沙丘的概率累积曲线整体均呈两段式分布(图5),流动沙地跃移与悬移的临界粒径位于 $3.4\sim 3.7\Phi$,粗于流动沙丘的临界粒径($2.5\sim 3.5\Phi$)。流动沙丘样品悬移组分的累积曲线斜率明显大于跃移组分,而在流动沙地样品的累积曲线中则呈现跃移组分斜率大于悬移组分的特征。这表明在流动沙丘样品中,细颗粒组分的分选性要好于粗颗粒组分,而在流动沙地中则呈现相反趋势。这可能是由于流动沙地沉积物经起沙风的吹蚀形成沙丘的过程中,风对地表颗粒进一步地分选,且对细颗粒组分的分选作用更强。粉沙、黏土等细颗粒物被风吹走,而细沙、中沙、粗沙等较粗的物质则随风运动进行差异性侵蚀和堆积进而形成沙丘。

4.3 河流阶地剖面的粒度特征

风水的交互作用是干旱与半干旱区常见的地表过程^[51-52],河流通常为沙漠的发育提供了物源和场所,风沙活动则影响着流水地貌与泥沙输移过程^[53-55]。玛多盆地沙漠化土地广泛分布于黄河宽谷与湖滨地带,是风水交互作用发生的典型地带。雅娘剖面的采样地点位于黄河一级阶地,该剖面沉积为河流相沉积物。通过剖面的粒度组成可以看出(图2),玛多盆地一级河流阶地各个层位均含有大量粗沙、中沙、细沙等粗颗粒物,表现出与周围风成作用形成的流动沙丘(地)粒度组成高度相似性。另一方面,与风成沉积物相比,河流阶地剖面各层粗粉沙、粉沙与黏土的含量更高,分选性更差,偏度

更偏正偏(图2—3)。这可能由于河流阶地沉积物未受到风力作用再次的机械改造,细颗粒组分尚未被风吹蚀。该河流阶地由地表至1 m左右的深度均含有大量的沙物质,这些沉积物与周围风成沉积物粒度组成相似。若该地受到人为破坏或者大风侵蚀,粉沙黏土等细颗粒物将随着气流被吹拂到空中,粗颗粒物则会在风的作用下侵蚀和堆积留在地表形成一定规模的沙丘(地)。因此,可以认为,广泛分布于黄河两岸河流阶地的河流相沉积物极有可能成为该地区风沙活动的物源。

5 结论

玛多盆地表层沉积物平均粒径范围为 $1.20\sim 4.62\Phi$,中沙和细沙组分含量最多,频率分布曲线具有单峰和双峰分布。玛多盆地沉积物粒度参数与沙漠化程度相关,随着沙漠化的加深,沉积物的平均粒径增大,粗颗粒组分增多,分选性变好,偏度由极正偏向负偏靠拢,峰态由尖锐转向平坦,频率分布曲线也从双峰态转变为单峰态。呈现这种趋势的原因是随着沙漠化程度增大,近地面气流强度增大,风蚀作用增强,导致沉积物中细颗粒物损失,颗粒分选性增强。

流动沙丘粒级组成以中沙和细沙为主,分选性好,偏度呈近对称,峰度为中等尖锐。3个沙丘不同地貌部位的粒度参数变化各异,规律不明显,这可能是由于风向的改变使坡顶沙粒吹拂混合,导致沙丘不同地貌部位粒度差异不明显。相比于流动沙地,流动沙丘沉积物粒径更粗,分选性更好。造成这种现象的原因是沙地形成沙丘的过程中,风对沉积物的再次分选。

河流阶地剖面的主要粒级为中沙和细沙,分选中等偏差,偏度为正偏,峰度尖锐,概率累积曲线为三段式,以跃移组分为主,含有部分悬移组分。河流阶地剖面沉积物的粒度组成表现出与周围风成作用形成的流动沙丘(地)的粒度组成高度相似性,极有可能为当地的风沙活动提供物源。

参考文献:

- [1] Wang T, Yan C, Song X, et al. Landsat images reveal trends in the aeolian desertification in a source area for sand and dust storms in China's Alashan Plateau (1975–2007) [J]. Land Degradation & Development, 2013, 24(5): 422–429.
- [2] 万炜, 颜长珍, 肖生春, 等. 1975–2015年阿拉善高原沙漠化过程、格局与驱动机制[J]. 中国沙漠, 2018, 38(1): 17–29.

- [3] Wang T, Xue X, Zhou L, et al. Combating aeolian desertification in northern China[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(2): 118–132.
- [4] 王涛, 朱震达. 中国北方沙漠化的若干问题[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(1): 56–65.
- [5] 李富强, 高红山, 张连科, 等. 基于粒度参数特征对黄河后套平原段岩芯沉积环境的分析[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1234–1243.
- [6] 王兆夺, 于东生, 汪卫国, 等. 泉州湾表层沉积物粒度分形特征与沉积学关系研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(5): 82–88.
- [7] 封建民, 王涛, 齐善忠, 等. 黄河源区土地沙漠化的动态变化及成因分析: 以玛多县为例[J]. *水土保持学报*, 2004(3): 141–145.
- [8] 胡光印, 董治宝, 逯军峰, 等. 黄河流域沙漠化空间格局与成因[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 213–224.
- [9] 侯春梅, 张志强, 刘小伟, 等. 黄河源区生态环境问题与可持续发展对策[J]. *中国人口资源与环境*, 2001(增刊1): 52–54.
- [10] 朱刚, 高会军, 曾光. 近45 a来黄河源区沙质荒漠化土地景观格局变化[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(12): 79–85.
- [11] 徐文印, 张宇鹏, 段成伟, 等. 黄河源不同区域退化高寒草甸土壤养分空间变异研究[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(10): 1968–1975.
- [12] 贺慧丹, 李红琴, 祝景彬, 等. 黄河源高寒草甸封育条件下的土壤持水能力[J]. *中国草地学报*, 2017, 39(5): 62–67.
- [13] Hu G, Jin H, Dong Z, et al. Driving forces of aeolian desertification in the source region of the Yellow River: 1975–2005[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7): 3245–3254.
- [14] 胡梦珩, 李森, 高尚玉, 等. 风成沉积物粒度特征及其反映的青海湖周边近32 ka以来土地沙漠化演变过程[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(5): 1240–1247.
- [15] 赵超, 鲁瑞洁, 李金凤. 青海湖流域土地沙漠化及表土粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 276–283.
- [16] 毛丽. 毛乌素沙地不同地类土壤粒度与有机质及其相关性研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [17] 刘倩倩, 杨小平. 毛乌素沙地和库布齐沙漠风成沙粒度参数的空间变化及其成因[J]. *中国沙漠*, 2020, 40(5): 158–168.
- [18] 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.
- [19] 崔徐甲, 董治宝, 罗万银, 等. 巴丹吉林沙漠高大沙山沉积物粒度特征及其与植被、地貌关系[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(4): 857–864.
- [20] 郭峰, 孙东怀, 王飞, 等. 巴丹吉林沙漠地层序列的粒度分布及其组成成因分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(1): 165–173.
- [21] 朱秉启. 中纬度荒漠区河西走廊沙丘地貌的演化特征及其环境指示[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2710–2729.
- [22] 董治宝, 胡光印, 颜长珍, 等. 江河源区沙漠化[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [23] Udden J. Mechanical composition of clastic sediments[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 1914, 25(1): 655–744.
- [24] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. *The Journal of Geology*, 1922, 30(5): 377–392.
- [25] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237–1248.
- [26] 吴昕. 内蒙古锡林郭勒草原沙质荒漠化的沙源及其地质学成因分析[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2018.
- [27] 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1978: 90–100.
- [28] 黄文敏, 伍永秋, 潘美慧, 等. 西藏安多剖面沉积物粒度特征及环境意义[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(2): 349–357.
- [29] 白敏, 鲁瑞洁, 丁之勇, 等. 青海湖湖东沙地粒度端元分析及其指示意义[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(5): 1203–1215.
- [30] 刘树林, 王涛, 郭坚, 等. 浑善达克沙地春季风沙活动特征观测研究[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 356–361.
- [31] 杨转玲, 钱广强, 董治宝, 等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2016, 36(3): 589–596.
- [32] 唐进年, 王继和, 苏志珠, 等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙丘表面沙粒度分布特征[J]. *干旱区地理*, 2008, 31(6): 918–925.
- [33] Zhou Y, Yang X, Zhang D, et al. Sedimentological and geochemical characteristics of sediments and their potential correlations to the processes of desertification along the Keriya River in the Taklamakan Desert, western China[J]. *Geomorphology*, 2021, 375: 107560.
- [34] Jin Z, Dong Y, Qi Y, et al. Characterizing variations in soil particle-size distribution along a grass-desert shrub transition in the Ordos plateau of Inner Mongolia, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(2): 141–146.
- [35] Liu B, Jin H, Sun L, et al. Grain size and geochemical study of the surface deposits of the sand dunes in the Mu Us Desert, northern China[J]. *Geological Journal*, 2017, 52(6): 1009–1019.
- [36] Su Y, Zhao H, Zhao W, et al. Fractal features of soil particle size distribution and the implication for indicating desertification[J]. *Geoderma*, 2004, 122(1): 43–49.
- [37] 董治宝, 陈渭南, 董光荣, 等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. *环境科学学报*, 1996(4): 437–443.
- [38] 尚润阳. 地表覆盖对土壤风蚀影响机理及效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [39] Cullers R L, Podkovyrov V N. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic U group, southeastern Russia[J]. *Precambrian Research*, 2002, 117(3/4): 157–183.
- [40] 董治宝, 李振山. 风成沙粒度特征对其风蚀可蚀性的影响[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998(4): 2–6.
- [41] 包晨曦, 左合君, 王海兵, 等. 乌兰布和沙漠梭梭-甘草人工治沙植被群落表土粒度特征研究[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2020, 43(3): 96–104.
- [42] Chen X, Duan Z, Tan M. Restoration affect soil organic carbon and nutrients in different particle-size fractions[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(3): 561–572.
- [43] Xu G, Li Z, Li P. Fractal features of soil particle-size distribu-

- tion and total soil nitrogen distribution in a typical watershed in the source area of the middle Dan River, China [J]. *Catena*, 2013, 101: 17–23.
- [44] Percival H, Parfitt R, Scott N, et al. Factors controlling soil carbon levels in New Zealand grasslands is clay content important? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1623–1630.
- [45] 阎欣, 安慧, 刘任涛. 荒漠草原沙漠化对土壤物理和化学特性的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(5): 1006–1012.
- [46] 殷志强, 秦小光, 吴金水, 等. 中国北方部分地区黄土、沙漠沙、湖泊、河流细粒沉积物粒度多组分分布特征研究[J]. *沉积学报*, 2009, 27(2): 343–351.
- [47] 吉启慧. 粒度分析在塔克拉玛干沙漠研究中的应用[J]. *中国沙漠*, 1996, 16(2): 173–179.
- [48] 于海云, 张正偲, 王志军, 等. 阿拉善高原东南部干涸湖盆沉积物粒度特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4): 177–184.
- [49] Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes* [M]. London, UK: Routledge, 2013.
- [50] 洪卓华. 近10年青海南部地区风的气候特征分析[J]. *科技与创新*, 2018(15): 40–43.
- [51] 李小妹, 严平, 吴伟, 等. 克里雅河中下游流域地表沉积物的粒度与化学元素空间分布[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1269–1276.
- [52] 马玉凤, 严平, 宋阳, 等. 青海共和盆地多石在沟河道沙丘现代风水交互过程[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 695–701.
- [53] Bullard J E, Mctainsh G H. Aeolianfluvial interactions in dry-land environments: examples, concepts and Australia case study [J]. *Progress in Physical Geography*, 2003, 27: 471–501.
- [54] Ping Y, Li X, Ma Y, et al. Morphological characteristics of interactions between deserts and rivers in northern China [J]. *Aeolian Research*, 2015, 19: 225–233.
- [55] 李小妹, 严平. 干旱区沙漠与河流复合地貌过程研究进展[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(5): 97–104.

Particle size characteristics of aeolian desertified land in Madoi Basin of the source region of Yellow River

Hu Jingjing, Hu Guangyin, Dong Zhibao

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: To explore the differentiation rule of aeolian sediment characteristics in Madoi Basin of the source region of Yellow River, the sediments with different degrees of aeolian desertification, different geomorphic parts and different dynamic conditions in the Madoi Basin were sampled for particle size analysis. The results show that: (1) With the development of aeolian desertification, the mean grain size of sediments in the Madoi Basin increases, the proportion of coarse particle fraction grows, the sorting coefficient becomes better, the skewness approaches to negative skewness, the kurtosis gradually shifts to flat, and the frequency distribution curve also changes from bimodal to unimodal. (2) Sand dunes are all dominated by medium sand and fine sand fractions, with good sorting coefficient, nearly symmetric skewness and moderately sharp kurtosis. There is no obvious change rule of sediment particle size parameters in different landform parts of each dune due to the change of wind direction. The coarser particle size and better sorting of aeolian sand dune sediments compared with the active aeolian sandy land sediments may be due to the re-sorting of the sediments by the wind during the formation of the dunes. (3) Medium sand and fine sand are the main grain fractions of the river terrace profile, with medium deviation in sorting, positive deviation in skewness and sharp kurtosis. The grain size composition of the river terrace sediment is highly similar to the active aeolian sand dunes and sandy land formed by the surrounding wind-forming action, which is most likely to provide source material for the local aeolian activities.

Key words: aeolian desertification; particle size; Madoi Basin; the source region of Yellow River; Tibetan Plateau