

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0012

ZHANG Yanguang, FANG Xiaomin, MAO Ziqiang, et al. Grain-size characteristics of tills and glaciofluvial deposits in the Guliya ice cap, Tibetan Plateau and its implication[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(3):701-713. [张延广, 方小敏, 毛子强, 等. 青藏高原古里雅冰帽冰碛和冰水沉积物粒度特征及其意义[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3):701-713.]

青藏高原古里雅冰帽冰碛和冰水沉积物 粒度特征及其意义

张延广^{1,3}, 方小敏¹, 毛子强¹, 申茂华¹, 张涛², 咎金波¹, 杨胜利³

(1. 中国科学院 青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 甘肃 兰州 730000;

3. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冰冻圈演化不仅与青藏高原水塔变化、地表侵蚀风化及荒漠化密切相关, 还深刻影响着亚洲季风系统和全球气候, 冰碛物的粒度组成可以为冰冻圈演化提供重要信息, 但高原冰碛物的特征粒度组成及其形成机理仍不清楚, 高原冰碛物与高原冷黄土及河湖沉积物的关系也不明确。为此, 选择青藏高原最大的冰帽——古里雅冰帽的冰碛物及系列冰水沉积物, 开展系统粒度组成研究。研究发现: 自终碛到冰川前端冰水扇及下游河流冰水沉积均表现出特征的双峰模态, 即 1~3 Φ (500~125 μm) 的中细砂峰和 6~8 Φ (16~4 μm) 的细粉砂峰, 前者可能由冰川压碎、寒冻风化崩裂作用造成, 后者由冰川研磨作用形成, 并受到源区基岩岩性软弱和组成颗粒大小的影响。冰川磨蚀的细粉砂组分含量, 从冰碛物经冰水扇、河流到湖滩沉积物整体呈现减小趋势, 粗粉砂在湖滩沉积中几乎完全被风吹走, 粗粉砂直接成为下游黄土的物源并富集其中成为黄土特征组分, 水流分选在开口湖泊中产生粗、细粉砂的明显富集, 这些证据揭示出, 无论是与冰川发育相关的尾间湖沉积还是近源、远源的青藏高原及周边黄土沉积, 其粉砂组成和来源, 均可作为高原冰冻圈的形成演化提供重要信息。

关键词: 青藏高原; 古里雅冰帽; 冰川沉积; 粒度; 黄土与河湖相沉积; 冰冻圈

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)03-0701-13

0 引言

青藏高原号称“亚洲水塔”, 是十多条亚洲河流的发源地, 冰冻圈要素如冰川、冻土、积雪等是“亚洲水塔”的重要组成部分^[1], 高原冰冻圈的形成和演化不仅对高原地表侵蚀风化、寒漠化和地貌塑造产生深刻影响, 而且可通过下垫面过程对大气环流和亚洲季风、干旱乃至全球气候产生重要影响^[2-7]。因此, 高原何时进入冰冻圈及其演化过程对于研究亚洲季风和全球气候变化均具有重要意义。由于冰碛物的保存有限所造成的冰冻圈演化记录的不连续性, 直接通过冰碛物记录反演高原冰川作用普遍只能追溯到倒数第二次冰期, 个别地区可追溯到约

50~80 万年前的倒三或倒四冰期^[8-15], 冰芯记录也最多只能追溯到约 76 万年前^[16-17]。因此, 只能通过其他相关途径才能更有效地开展冰冻圈形成演化记录研究。青藏高原的黄土被证明主要是来自高原本身冰碛物的冷黄土或冰缘黄土^[18-20], 高原上冰川补给湖盆还直接接受了来自冰碛物的再沉积。因此, 高原黄土和高原湖盆河湖相沉积物的连续记录可以用来反演高原冰冻圈的形成演化。然而, 这项研究的前提是必须建立可靠的冰碛物的识别标志, 并且证明这些标志可以在黄土和河湖相沉积物中得到有效保存, 才能利用这些沉积物记录获得可靠的冰川演化信息。冰碛物粒度被证明是重要的鉴定指标, 它可以反映出冰川特征作用过程——冰川

收稿日期: 2021-05-11; 修订日期: 2021-06-02

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0707)资助

作者简介: 张延广, 硕士研究生, 主要从事气候环境变化研究. E-mail: zhangyg17@lzu.edu.cn

通信作者: 方小敏, 研究员, 主要从事青藏高原隆起与环境变化研究. E-mail: fangxm@itpcas.ac.cn

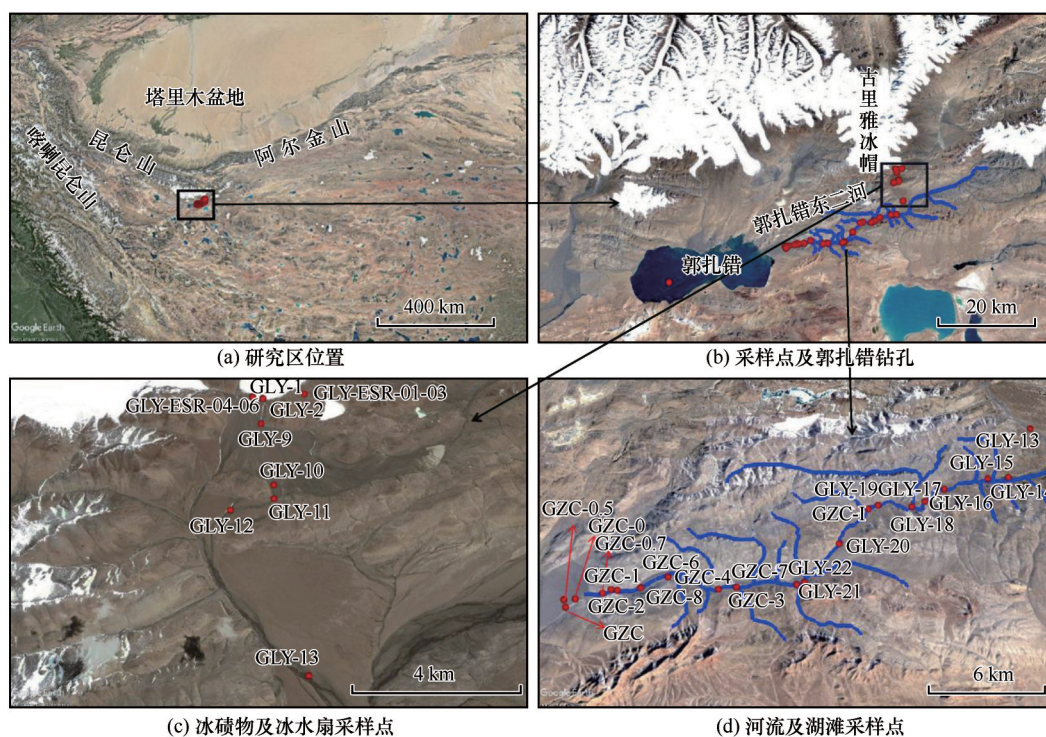
磨蚀作用,形成 4~7 Φ (63~8 μm) 的特征粉砂峰^[21-22]。青藏高原冰碛物的粒度也有类似的特征^[23-27],并且发现海洋性冰川比大陆性冰川冰碛物的粉砂含量高,终碛的粉砂和黏土含量较侧碛和表碛高^[23,25]。然而青藏高原冰碛物粒度组成的这些研究均只关注了冰碛物本身,没有关注源区岩性组成对冰碛物粒度的影响,更没有关注冰川研磨特征粉砂在冰碛物被搬运后,形成的冰水扇、河流、湖滩、湖泊等系列冰水沉积物分选改造过程中的变化,而这是考察高原冷黄土和河湖相沉积物是否可以可靠反映出高原冰川作用演化的关键。

为此,本文选择青藏高原西北部现存的典型大陆性冰川古里雅冰帽,也是青藏高原上最大的冰帽,对其下伏基岩和冰碛物及其系列冰水沉积物(冰水扇、河流、三角洲湖滩、湖泊)进行系统粒度组

成研究,分析它们之间的特征粒径变化规律与差异以及源区岩石岩性对冰碛物粒度的影响。此外,根据冰川研磨产生的特征粉砂峰,结合冰缘黄土的粒度特征对冰碛物与冰缘黄土粒度组成之间的关系进行了探讨。

1 研究区域概况

古里雅冰帽地处青藏高原的西昆仑山南坡,位于 35.2° N, 81.5° E (图 1),是一个极地型冰川^[28],也是目前亚洲中部发现的面积最大、海拔最高和气温最低的冰帽,总面积 376.1 km²,顶部面积约 131.1 km²,冰帽高度为 6 700 m,平均厚度大于 200 m,最大厚度可达 350 m^[28],冰帽 6 700 m 处 10 m 深冰温接近 -19 °C^[29]。该区年降水量 200 多毫米,冰帽附近以西风为主,其物质积累主要发生在夏季^[28,30]。



81. 5285° E)至郭扎错(35. 065° N, 81. 2678° E), 沿冰川末端融出碛、终碛垄、冰水扇及下游郭扎错东二河河流和湖滩中的冰水沉积物分别进行采样, 共采集 40 个样品(图 1~2)。此外, 搜集了郭扎错湖心 (GZHC2014-1) 最上部 5. 25 cm 的湖相沉积样品粒度数据^[31][图 1(b)], 并在藏东南林芝然乌湖附近 (29. 439° N, 96. 8075° E) 采集 15 个典型的冰缘黄土样品^[32]进行对比。

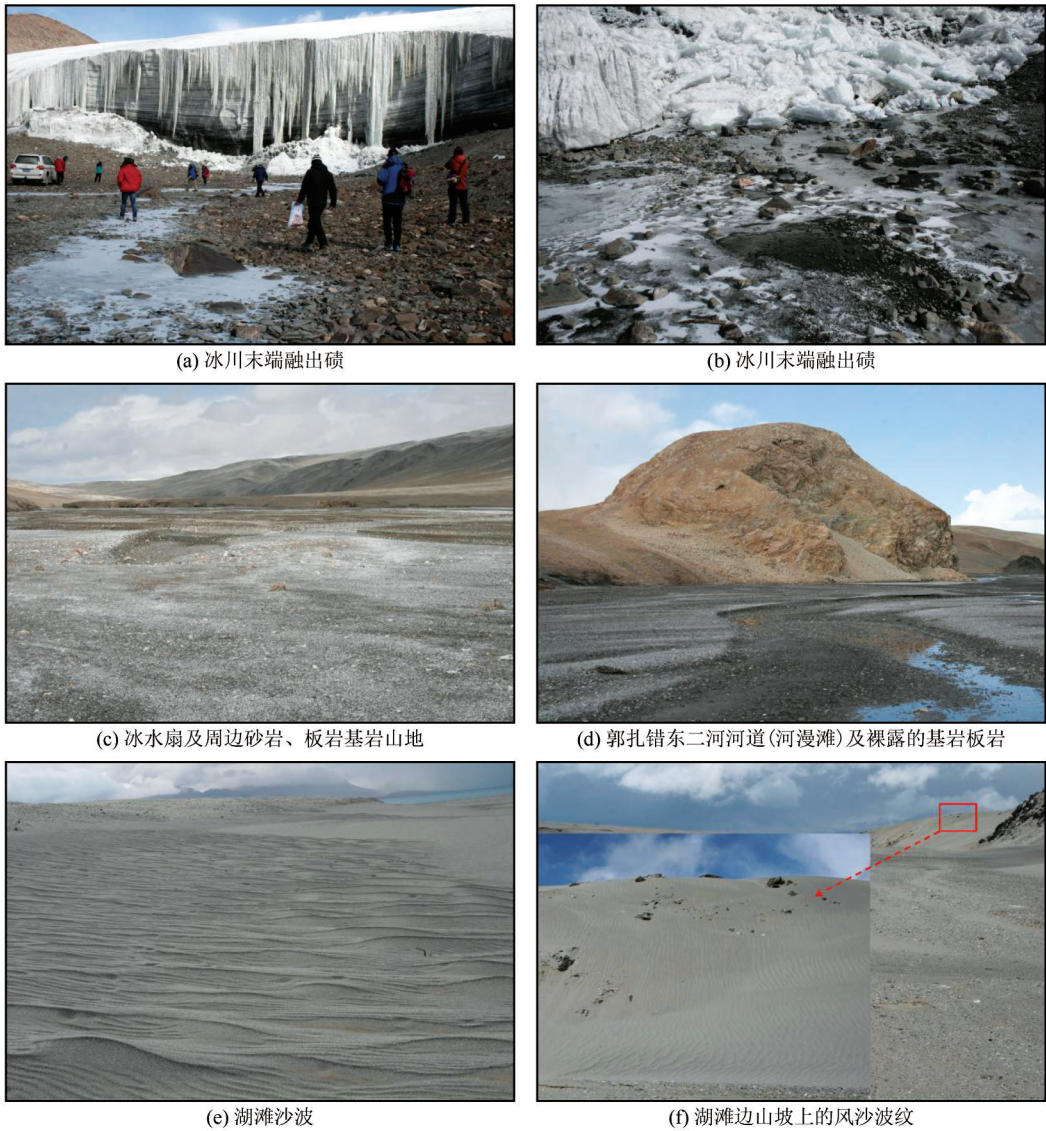


图2 研究区概况

Fig. 2 Overview of the research area [Glacier end meltmoraine (a); Glacier end melt moraine (b); Glacial outwash fan and its nearby bedrocks of sandstones and slates (c); Channel and overbank of Dongerhe(River)and the exposed bedrock of slates (d); Beach sandwave (e); Wind-sand ripple on the slope beside the beach (f)]

所有采集的样品先在烘箱中低温(40 ℃)烘干, 然后将烘干的样品混合均匀后过 10 目(2 mm)筛。将筛分出的<2 mm 样品混合均匀, 用于粒度分析。为满足粒度仪遮光度要求, 根据不同样品粒度特征称取 0. 05~0. 11 g, 将混合均匀的干燥样品加入 140 mL 烧杯中, 向烧杯中加入过量(>20 mL)10% 过氧化氢去除有机质, 并在 150 ℃加热板上加热, 以加速反应

速率。待无明显气泡产生时, 反应完全, 再向烧杯中加入稍过量(10~15 mL)10% 盐酸溶液去除碳酸盐胶结物, 在 150 ℃加热板上加快反应速率, 并不时晃动烧杯, 反应完全后, 继续加热将剩余酸蒸发。从加热板上取下烧杯, 待烧杯冷却后加满超纯水。静置 12 h 后用虹吸管抽去上层清液, 然后向剩余液体中加入 10 mL 浓度为 36 g·L⁻¹ 的六偏磷酸钠分散

剂,超声振荡 20 min 后,利用中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升实验室的 Microtrac S3500 激光粒度仪进行粒度分析测试,仪器测试粒径范围为 0.02~2 000 μm 。

粒度组成按 Wentworth 分类标准进行分级^[33],并对所得数据的微米(μm)单位经 Krumbein^[34]转换成 Φ 值,公式为 $\Phi = -\log_2 D$ (D 为沉积物以毫米为单位的粒度值),即砾、砂、粉砂和黏土之间的界线分别为 2 mm (-1Φ)、0.063 mm (4Φ) 和 0.004 mm (8Φ)。同时利用 Folk 等^[35]公式计算样品的分选系数。

3 结果与分析

粒度分析是碎屑沉积物研究中常用的方法,粒度特征是沉积物重要的物理性质,可以指示沉积物搬运过程及其形成环境^[34-40]。古里雅冰帽冰碛物和冰水沉积物粒度分布曲线总体表现为双峰特征,全部样品在峰值(众数)粒径 $1\sim 3 \Phi$ 和 $6\sim 8 \Phi$ 处存在砂峰和细粉砂峰(图 3)。整体上所有样品在砂峰处峰较尖而窄,峰值相对较高, $6\sim 8 \Phi$ 处的峰宽而缓,指

示样品以砂为主,粉砂和黏土含量相对较低。但是不同的样品随沉积环境的不同仍然表现出粒度的相应变化特征,据采样沉积环境将样品分为以下几组:冰碛物样品 (GLY-1~8 及 GLY-ESR-01~06),冰水扇样品 (GLY-9~13),河流沉积物样品 (GLY-14~GZC-0.7),河流入湖口湖滩样品 (GZC、GZC-0、GZC-0.5) 以及湖泊(湖心上部 1.05、2.10、3.15、4.20、5.25 cm)样品。冰碛物样品平均曲线(红色粗实线)宽缓,砂峰值较低,其细粒组分 ($5\sim 10 \Phi$) 含量相对较高,平均曲线位于冰水扇、河流和湖滩平均曲线的上方[图 3、图 4(a)];冰水扇样品平均曲线较冰碛物样品砂含量升高,粗粉砂和细粉砂含量降低,尤其在粗粉砂 ($4\sim 6 \Phi$) 处形成低谷[图 3、图 4(b)];河流样品砂峰值进一步升高,同样在 $4\sim 6 \Phi$ 处存在明显的低谷[图 3、图 4(c)];湖滩样品平均值的粗粉砂含量进一步降低,细粉砂含量较河流样品同样有微弱减少[图 3、图 4(d)];湖泊样品以粉砂为主,砂含量明显偏少,且粒径变小,峰值粒径位于 3Φ 附近[图 3、图 4(d)]。

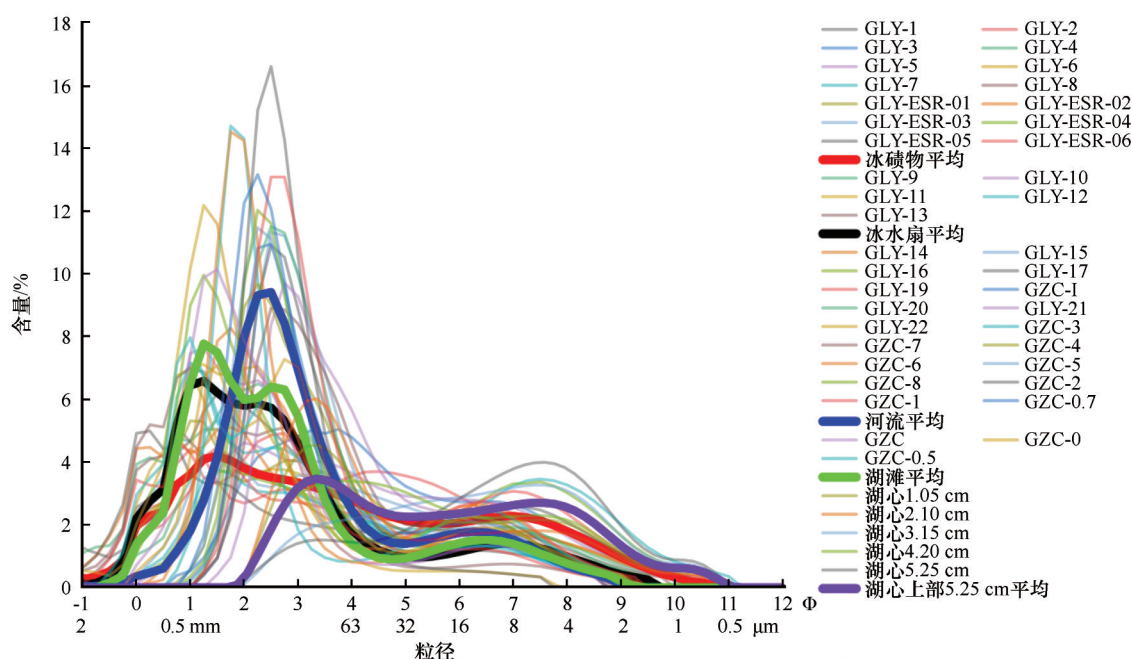


图 3 古里雅冰碛物和冰水沉积物 <2 mm 组分粒度频率曲线

Fig. 3 Comparison of grain-size frequency curves of <2 mm fractions of tills and glaciofluvial deposits from the Guliya ice cap

沉积物的粒度组成一般由服从正态分布的各种单模态组合而成,反映了不同的动力学过程^[40-41]。为进一步分析沉积物粒度组成,利用 Qin 等^[41]的粒度对数正态分布曲线分离软件进行拟合。根据 Lu 等^[40]分析认为拟合结果中与其他峰不重叠部分 $>1/2$ 且含量大于 10% 的峰是沉积物的特征粒度组分,不

重叠部分在 $1/3$ 到 $1/2$ 之间或不重叠部分 $>1/2$ 但含量 $<10\%$ 可能反映了特殊的沉积过程,而不重叠部分在 $0\sim 1/3$ 间可以被称为附加粒度组分,可以提高对特征粒度组分的拟合精度,不同粒度组分间还可以形成不同的组合特征。

冰碛物样品粒度平均曲线拟合出四个峰[图 5

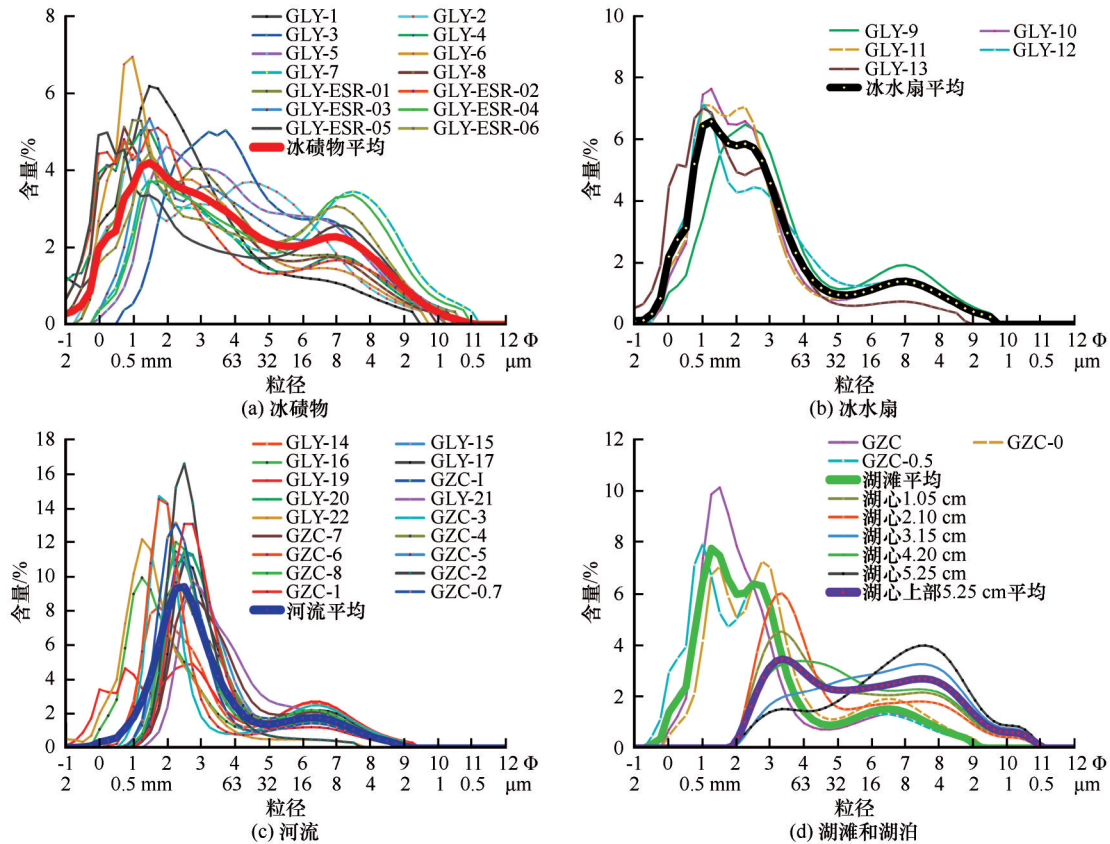


图4 古里雅冰帽冰碛物(a)和冰水沉积物(b~d)样品粒度频率曲线
Fig. 4 Guliya ice cap moraine and ice water sediment sample size frequency curve
[Moraines (a); Ice fans (b); Rivers (c); Beaches and lakes (d)]

(a)], 主要为1~3 Φ处的两个粗颗粒砂峰 C_2 、 C_3 , 众数粒径分别位于1.19 Φ(437 μm)和2.93 Φ(131 μm)处, 含量分别为15.6%和50.9%, 其次为众数粒径7.14 Φ(7.1 μm)的细颗粒峰(细粉砂) C_4 , 含量为31.7%, 拟合含量最小的辅助峰在0 Φ附近, 含量仅占1.8%, 不能有效反映特定的沉积动力学过程。

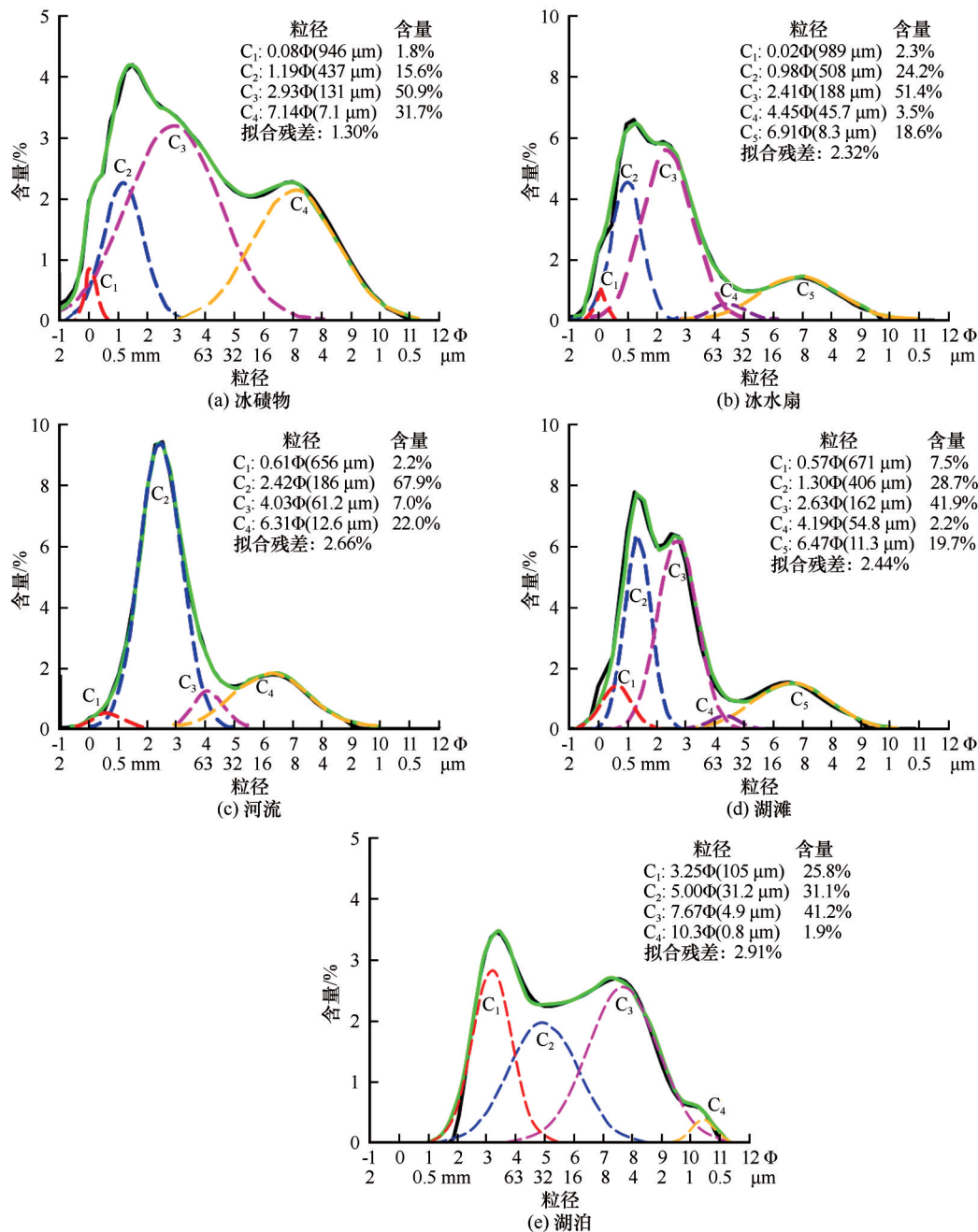
冰水扇样品平均曲线拟合出五个峰, 有三个峰 C_1 ~ C_3 位于砂组分, 众数粒径分别在0 Φ、1 Φ和2.4 Φ附近, 总量达到77.9%, 其中2.4 Φ附近的细砂峰含量占51.4%, 众数粒径 C_5 位于6.91 Φ处的细粉砂, 含量占18.6%。与冰碛物粒度4~5 Φ含量10.08%相比, 粗粉砂表现为一个众数粒径4.45 Φ(45.7 μm)的 C_4 辅助峰, 但是含量较低(3.5%), 其实是流失的[图5(b)]。

冰水河流沉积样品平均曲线拟合结果显示两个最主要的峰[图5(c)], 即众数粒径在2.42 Φ(186 μm)处的 C_2 , 含量最高, 可达67.9%; 另一个为众数粒径6.31 Φ(12.6 μm)的细粉砂峰, 含量达22%。与冰水扇样品相比, 粗粉砂峰进一步富集并变粗, 指示出4 Φ附近的一个小峰, 含量已达7%[图5(c)]。

湖滩样品粒度平均值的拟合结果如图5(d), 表现一组显著的砂组分 C_1 ~ C_3 峰, 众数粒径分别在0.6 Φ附近(671 μm)、1.3 Φ(406 μm)和2.63 Φ(162 μm), C_3 含量最高, 为41.9%, C_1 和 C_2 含量分别为7.5%和28.7%。与之相对应的是一个众数粒径位于6.47 Φ(11.3 μm)的细粉砂组分峰, 含量达19.7%。与前面样品对比, 最大不同是粗粉砂峰(4.2 Φ附近)含量降到2.2%。

郭扎错湖心样品上部5.25 cm样品平均曲线拟合结果显示三个明显的峰 C_1 ~ C_3 , C_1 为众数粒径3.25 Φ(105 μm)处的一个细砂峰, 含量为25.8%, C_2 为明显富集的粗粉砂峰(众数粒径31.2 μm, 即5 Φ附近), 含量达到31.1%, C_3 为众数粒径更小(4.9 μm, 即7.7 Φ附近)、含量更显著增加(高达41.2%)的细粉砂峰。另外, 湖心样品拟合出一个黏土峰, 位于10.3 Φ(0.8 μm), 但含量很低, 为1.9%。

总之, 概括起来, 上述冰碛物及其冰水系列沉积物的各组分含量变化, 除了共同的砂组分和细粉砂组分形成的两个明显的峰值特征外, 还可以看出



注: 黑色实线为样品测量的粒度曲线, 绿色实线为拟合的粒度曲线, 不同颜色的虚线为分解出的粒度分量, 并给出了各分量的众数粒径、含量和每个样本的拟合残差

Note: The black solid line is the particle size curve measured by the sample, and the green solid line is the fitted particle size curve. The dotted lines in different colors are the decomposed particle size components, and the mode particle size and content of each component and the fitting residual of each sample are given

图5 古里雅冰帽和冰水沉积物不同粒度样品平均曲线的正态分布拟合

Fig. 5 Normal distribution fitting of average grain-size curves of different sediment samples from the Guliya glacial region

随着冰水沉积物向下游的变化,细粉砂组分含量和众数粒径整体增加,在湖心沉积物中细粉砂含量最高且粒径最细,以及冰碛物和冰水沉积物粗粉砂含量呈现出整体减少趋势,在湖滩样品中粗粉砂含量最低(表1)。从平均状况来看,冰碛物的砂组分占68.3%,细粉砂峰总含量约为31.7%,未拟合出粗粉

砂峰,但4~5 Φ含量达10.08%;冰川末端融水携带冰碛物沉积形成的冰水扇同样以砂组分含量为主,且砂组分含量较冰碛物升高,但粉砂峰含量明显下降,细粉砂峰含量下降到18.6%;下游河流沉积物样品粉砂峰含量较冰水扇样品升高,细粉砂峰含量为22%,粗粉砂峰含量因分选有所升高,为7%,但粉

表1 古里雅地区不同沉积物拟合组分峰值及含量

Table 1 Contents of fitting components of different sediments from the Guliya glacial region

拟合		冰碛物	冰水扇	河流	湖滩	湖心
拟合细粉砂峰	含量	31.7%	18.6%	22.0%	19.7%	41.2%
	粒径	7.1 μm	8.3 μm	12.6 μm	11.3 μm	4.9 μm
拟合粗粉砂峰	含量	无峰,但4~5 Φ 含量10.08%	3.5%	7.0%	2.2%	31.1%
	粒径		45.7 μm	61.2 μm	54.8 μm	31.2 μm
拟合砂峰总含量		68.3%	77.9%	70.1%	78.1%	25.8%

砂总含量仍比冰碛物粉砂含量低;湖滩样品中砂含量较河流沉积物样品升高,而细颗粒的粉砂组分降低,尤其粗粉砂(4~6 Φ)组分降低幅度大,降低至2.2%;郭扎错湖心样品表现出以粉砂组分为主的特征,细粉砂峰位于4.9 μm ,含量约为41.2%,粗粉砂峰含量为31.1%,位于31.2 μm 处。

4 讨论

4.1 冰碛物和冰水沉积物粉砂峰成因

古里雅冰帽冰碛物和冰水扇、河流及湖泊冰水沉积物普遍存在一个6~8 Φ (16~4 μm)的细粉砂峰(图3~5)。早期研究者对不同软硬岩石和矿物(碳酸盐和硅酸盐矿物、石英)的机械粉碎和磨蚀实验就已得出,岩石和矿物的破碎和磨蚀会形成特征的破碎细砾-粗砂组分峰(-4~1 Φ ,即32~0.5 mm)和磨蚀粗粉砂组分峰(4~5 Φ ,即63~32 μm)的双模态粒度分布,其中4~5 Φ 是多数矿物的磨蚀极限,少量较软的矿物(如方解石)或原岩粒度组成比较细小的矿物,其磨蚀极限可达6~8 Φ ^[21,42]。对加拿大基岩为白云岩^[21]的海洋性冰川冰碛物粒度的系统量测证实了上述机械粉碎和磨蚀作用的结果,不仅说明冰川运动中冰内碎屑物相互间以及与冰川谷壁基岩间会产生强烈挤压和剪切破碎及磨蚀粉碎,而且还发现随着冰川搬运距离的增长,破碎的细砾-粗砂组分含量和众数粒径会逐步降低,而磨蚀粗粉砂组分含量则逐步增加,但峰值粒径没有太大变化^[21]。Haldorsen^[22]详细地研究了挪威砂岩基底上发育的海洋性冰川150个冰碛样品的粒度与冰川磨蚀作用的关系,同样证实了冰碛物上述粒度双模态的存在,但磨蚀的粉砂组分比加拿大冰川偏细,主要在5~7 Φ (32~8 μm)。我国西部不同基岩上发育的海洋性和大陆性冰川的冰碛物,其粒度组成也基本证实了上述冰碛物粒度特征和变化规律的存在。如贡嘎山海螺沟以花岗岩、石英片岩为主的冰下融出碛^[27]、南迦巴瓦峰地区以片麻岩为主的冰碛物的粒度组成^[25]均表现出了4~5 Φ 的峰,两者均为海洋

性冰川冰碛物;而天山敦德萨拉沟大陆性冰川冰碛物细颗粒峰位于7 Φ 附近^[43],螺髻山、哈巴雪山、白马雪山、千湖山的海洋性冰川冰碛物粒度细颗粒的峰也都位于7 Φ 附近^[44],这几个地区下伏基岩主要以砂岩、泥岩、灰岩为主;天山博格达峰地区大陆性冰川下基岩为火山岩与灰岩、砂岩、粉砂岩的混合组成,其细颗粒峰则位于4.5~7.5 Φ 之间,但是含量比上述挪威的海洋性冰川冰碛物小一倍^[23]。这些变化说明冰川发育区的基岩岩性的软硬和粒度组成对最终的磨蚀组分的众数粒径有明显影响,而与冰川类型关系不大,岩性越硬、组成越粗,导致终极磨蚀下限越粗,反之则细;但冰川类型可以对终极磨蚀组分的含量产生显著影响,总体而言,该组分在海洋性冰川冰碛物中的含量约为大陆性冰川的两倍^[25]。

古里雅冰帽南侧主要发育在以砂岩、板岩为主的基岩上,其粒度组成较细,岩性较软(图6),其上形成的冰碛物为细粉砂模态(6~8 Φ),众数在7 Φ 附近,其含量占31.7%,为冰川磨蚀组分,而且反映了较软、较细的基岩岩性对终极磨蚀粉砂下限的影响[图4(a)、图5(a)]。

4.2 冰川磨蚀组分的含量变化及意义

前面的粒度分析已经揭示出古里雅冰帽系列冰碛和冰水沉积物都存在一个细粉砂峰,仅仅是不同沉积环境下的细粉砂峰位置和含量略有不同(图3~5,表1),从冰碛物、冰水扇、河流到湖滩,细粉砂含量整体呈现下降趋势,但众数粒径变化不大,直到湖泊中,细粉砂含量显著增加,几近冰碛物的一倍,但众数粒径也明显减小到4.9 μm ;砂组分含量在冰碛物、冰水扇和河流中变化不大,但在湖滩和湖泊沉积中分别有明显增加和显著减少;与冰碛物相比,一个明显的变化是除湖滩外,从冰水扇经河流到湖泊,都出现一个新的粗粉砂峰值,其含量从冰水扇的3.5%、河流的7%猛增到湖泊的31.1%(图3~5,表1),指示了冰川研磨粉砂对冰水系列搬运和沉积过程的动力分选作用与沉积环境的响应。

冰碛物的分选非常差(表2),冰水扇由于搬运

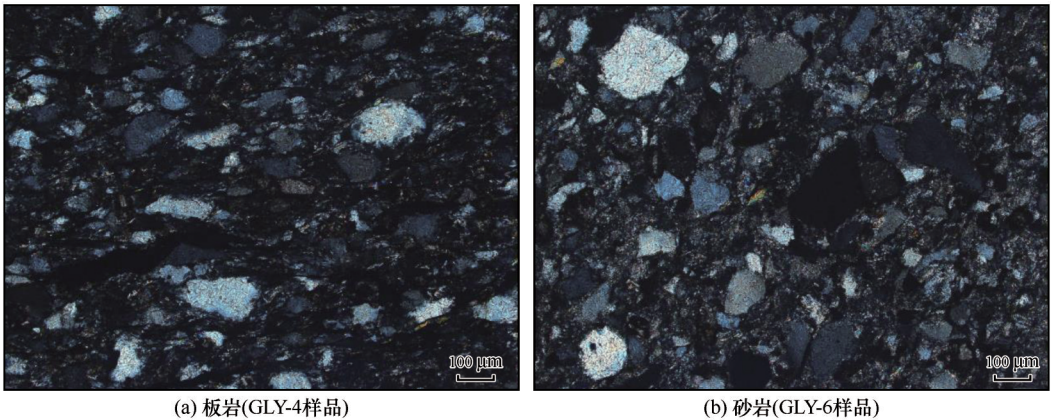


图6 古里雅冰帽区基岩薄片

Fig. 6 Thin section of bedrocks from the Guliya glaciated region: slate (GLY-4) (a); sandstone (GLY-6) (b)

表2 不同沉积物分选系数及类型

Table 2 Sorting coefficient and types of different sediments

样品	样品数	分选系数	分选类型
冰碛物平均值	14	2.66	很差
冰水扇平均值	5	2.21	很差
河流沉积平均值	18	1.72	较差
湖滩平均值	3	2.01	很差
湖心上部5.25 cm 平均值	5	2.12	很差

距离近和快速水流作用与沉积,仅对冰碛物进行了初步分选,分选系数略微提高,一部分细粉砂被流水带走,导致砂组分含量尤其中细砂含量相对升高,同时形成水体中下层悬浮的粗粉砂的一定富集,开始出现一个粗粉砂峰[图5(b)],反映了冰水扇整体水流强度很大,在缺乏固定河道的情况下,细粉砂物质在水流冲洗作用下易被带入下游河道,而中细砂物质则经水流作用进一步分选聚集,同时分选富集一定粗粉砂。

河流对经过冰水扇的冰碛物进行了进一步水流作用分选改造,从冰水扇流出的细粉砂在河漫滩上形成明显富集,同时适应较大流水洪峰的粗粉砂峰含量也有很大提高,而反映跳跃组分的砂组分含量相对下降,分选较好,分选系数明显提高(表2),粒度表现为典型的河流双峰特征,平均曲线拟合的两个主峰分别位于 2.42Φ 和 6.31Φ ,含量分别为67.3%和21.3%[图5(c)]。

河流入湖口湖滩对河流沉积物进行了进一步改造,因河流入湖口处地势平坦,河流携带的粗颗粒物易在这里沉积,但湖岸风力分选过程强盛,湖滩沉积物多被改造成不同大小的风沙沙波和沙丘[图2(e)、2(f)],导致一部分细粉砂被吹走,含量明显下降(10.59%),较河流样品下降了5.7%,而粗粉

砂几乎完全被吹走,砂组分含量相对明显增加(78.07%),分选程度随之提高[图5(d),表2]。其中最有意义的信号是粗粉砂几乎完全被风吹走,说明粗粉砂是最适应沙尘暴风力的粒径范围,这也许是黄土中以此组分为主的原因(见后面详述)。

尽管郭扎错是开口湖,但是湖泊仍然对入湖河流沉积物进行了显著的分选改造,将砂组分大量的堆积于湖岸和浅湖地带,而湖中主要堆积细粒的物质,导致细粉砂含量成倍增加,众数粒径变小,粗粉砂含量更是增加4倍多,达到31.1%,成为冰川和冰水沉积物系列中的最高值。郭扎错有多条河流汇入,导致沉积物分选很差(表2),峰形较宽,沉积物粒度范围从细砂($2\sim4\Phi$)到 $0.5\mu\text{m}$ (11Φ)的黏土。对郭扎错湖心上部样品的拟合结果[图5(e)]显示包含一个砂峰和两个粉砂峰,分别位于 3.25Φ 、 5Φ 和 7.67Φ 附近,含量为25.8%、31.1%和41.2%。由于郭扎错东二河距离钻孔位置最远,可能贡献了更多的细粉砂($6\sim8\Phi$)组分,这与古里雅冰碛物中的研磨产生的粉砂峰粒径一致,可能代表了该粉砂在此处被保存,但砂与粗粉砂组分,可能还指示钻孔附近物源的加入经湖岸和浅湖过程的动力学影响。

综上,冰碛物及下游冰水沉积物的粒度组成主要受冰川压碎、研磨作用及基岩本身粒度组成的影响,但经过流水和风力作用改造,不同环境下呈现出差异。其中,冰水扇和河流沉积主要受到水流作用的影响,而湖滩主要受到风力分选作用的影响。冰川压碎的粗砂($-1\sim1\Phi$)在河流中不再成为优势组分,湖岸风的影响将原本不占优势的中砂($1\sim2\Phi$)再次分选出来形成风沙沙波和沙丘,而冰川研磨的粉砂则主要被悬浮搬运至水动力弱的湖相沉

积中保存下来。

4.3 冰碛物和冰水沉积物粉砂组分与黄土物源

黄土最重要和特征的物质组成是4~6 Φ (63~16 μm)粗粉砂^[45],它是由风力造成的短期悬浮作用携带,而大于或小于这一组分的颗粒,要么只能做短距离悬跃、跳跃或局地滚动而形成近源黄土或风沙堆积,要么形成高空长期悬浮,被带到遥远的下

游地区缓慢降落沉积^[46][图7(a)],这也是为什么中国黄土主体都是围绕沙漠外围分布的原因^[45]。我们推测古里雅冰碛物中的粗、细粉砂组分可能对青藏高原及其周边黄土提供了重要物源。古里雅的冰碛物不仅在冰川附近通过冰水湖滩和河滩沉积物的沙尘暴过程直接给下游地区的黄土输送粉砂物源(图8),而且也可以通过流入塔里木盆地的河

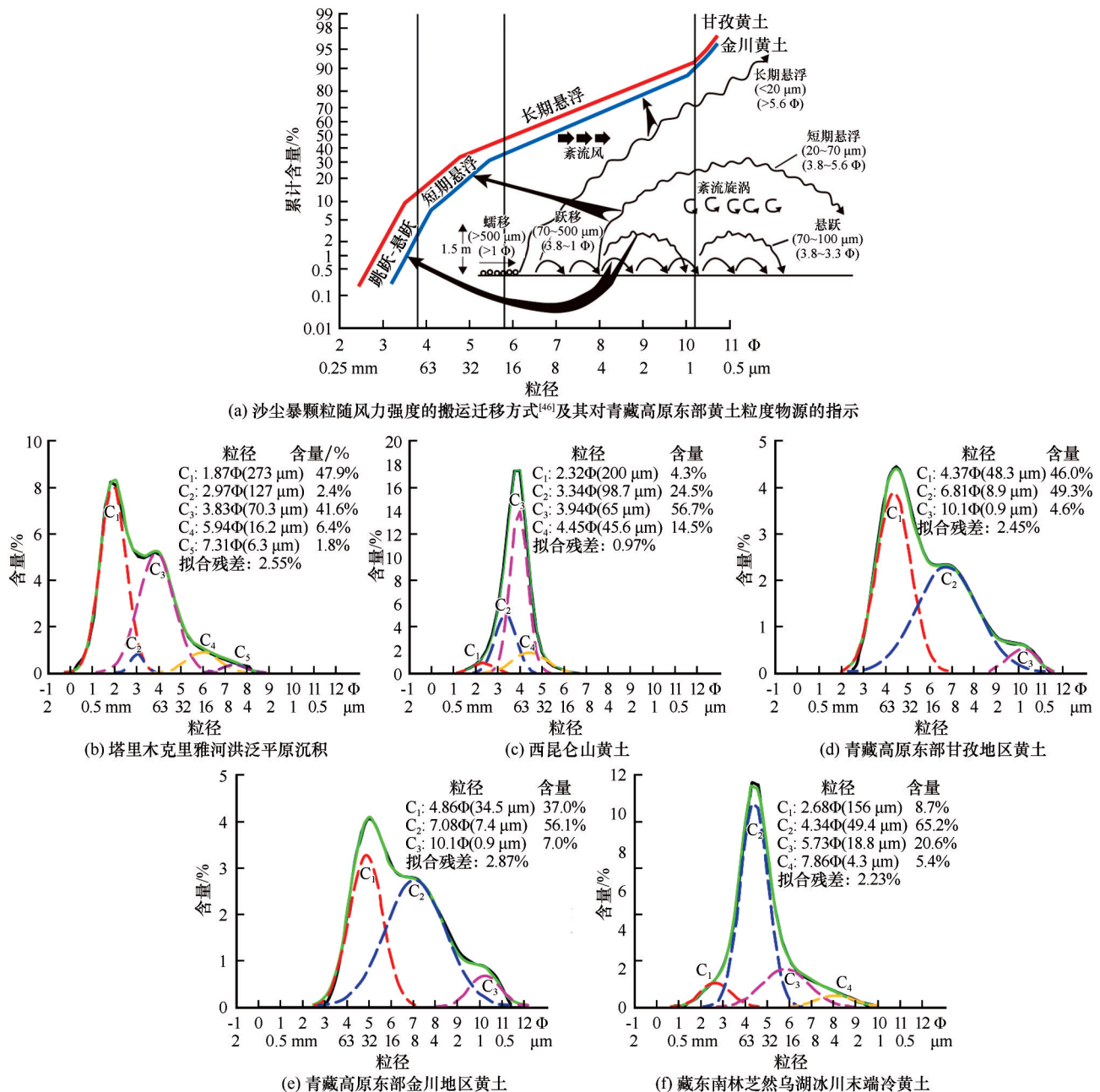


图7 青藏高原东部黄土粒度物源的指示和不同地区沉积物粒度组成及其模式分解

Fig. 7 Indication to loess provenance in eastern Tibetan Plateau and grain-size composition and model decomposition of sediment from different regions [The transport mechanisms and modes of dust storm particles with wind intensity^[46] and its indication to loess provenance in eastern Tibetan Plateau (a); Sediment of the Keriya River floodplain (b); Loess of the West Kunlun Mountains in Tarim (c); Ganzi loess from the eastern Tibetan Plateau (d); Jinchuan loess from the eastern Tibetan Plateau (e); Cold loess from Ran Wu Lake in Nyingchi, southeast Tibet (f)]

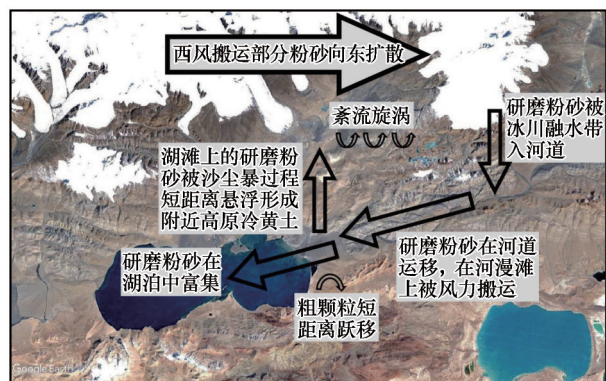


图8 古里雅冰帽细粒沉积扩散图

Fig. 8 Fine sediment diffusion map in the Guliya glaciated region

流,把粉砂带入盆地中堆积起来,然后通过沙尘暴过程带入到西昆仑山北坡沉积,形成那里巨厚的砂黄土^[47-48]。另外,冰川研磨砂可能对冰川粒雪盆中沉积物有部分贡献,同样位于高原西部的慕士塔格冰心微粒研究中体积众数粒径位于 $3\sim 9\ \mu\text{m}$ 附近^[49],慕士塔格雪坑和西昆仑崇测冰川雪坑微粒质量浓度-粒径分布峰值出现于 $3\sim 8\ \mu\text{m}$ 间^[50],古里雅冰帽冰心微粒粒径分布也基本相似(郭光剑等研究成果,暂未发表),可能代表了冰川粒雪盆中沉积物部分来自于冰川研磨粉砂的局地循环,更细的黏土颗粒可能来自其稍远源区风力的搬运。对从古里雅冰帽流出河流的洪泛平原沉积物粒度分析揭示出明显的粗砂和 $6\sim 7\ \Phi$ 细粉砂组分,尽管砂组分含量明显占据主导地位,显示地表沉积物已经或多或少经历了一定程度风沙改造[图7(b)],西昆仑山黄土也明显展示出粗粉砂组分的富集,而细粉砂组分几乎被强大的对流风带入高空被高空西风带出盆地[图7(c)]^[48,51]。对青藏高原东部的马兰黄土粒度分析,发现它们基本由 $4\sim 5\ \Phi$ 的粗粉砂和约 $7\ \Phi$ 的细粉砂组成,两者大致各占一半[图7(d)、7(e)],投影到Pye的实验沙尘粒度搬运机制和方式图^[46]中,指示它们分别代表了近源和远源粉尘的沉积[图7(a)],远源的细粉砂组分很可能就是从包括古里雅冰碛物在内的青藏高原西部物源提供,近源粗粉砂组分可能由就近的金沙江、雅砻江和大渡河等高原东南部各河流源区冰碛物及其冰水系列沉积物提供。对青藏高原东南林芝然乌湖冰川末端下游直接堆积的冰缘黄土的粒度分析,更直接的展示黄土完全以 $4\sim 6\ \Phi$ 的近源粗粉砂为主[图7(f)],也与高原东北部黄河源区冰缘黄土粒度以 $4\sim 5\ \Phi$ 粗粉砂(占比接近2/3)和 $7\ \Phi$ (约占1/3)的细粉砂组成相

似^[52]。因此,冰碛物和冰缘黄土粒度所提供的物源分析组分信息,为进一步从元素和同位素等其他方法追踪和验证粉尘物源来源提供了重要渠道。

5 结论

(1)对古里雅冰碛物及其系列冰水沉积物粒度组成分析,发现自终碛到冰川前端冰水扇及下游河流和湖滩冰水沉积均表现出 $1\sim 3\ \Phi$ 的中细砂峰和 $6\sim 8\ \Phi$ 的细粉砂峰,与世界各地和青藏高原冰碛物粒度组成的双峰模态特征相似,分别指示了冰川的破碎和磨蚀作用的结果,但是古里雅冰川磨蚀的粉砂以细粉砂为主,含量较高,可能受到该区基岩较软的岩性和较细的颗粒组成的影响有关。

(2)从古里雅冰碛物到其系列冰水沉积物,粒度组分的变化反映了不同沉积环境中流水和风力的动力分选过程,从冰碛物,经冰水扇、河流到入湖口河湖滩,冰川磨蚀的特征细粉砂组分整体呈现减小趋势,尤其水流分选中形成的粗粉砂组分,在河湖滩沉积中几乎完全被风吹走,与明显减少的细粉砂一起,直接成为下游黄土的物源。而开口湖泊中则明显富集了粗、细粉砂组分。

(3)青藏高原冰缘冷黄土及古里雅周边西昆仑山黄土粒度分析,进一步揭示黄土物质来源于近源的冰碛物粗粉砂和远源的细粉砂,因此,无论是与冰川发育相关的尾间湖沉积还是近源、远源的青藏高原及周边黄土沉积,湖水和风的动力学过程对冰川磨蚀的 $4\sim 5\ \Phi$ 粗粉砂都有显著的选择性富集作用,而且粗、细粉砂组成和来源,均可对揭示高原冰冻圈的形成演化提供重要信息。

谨以此文,纪念恩师李吉均院士!感念他的栽培和起步于冰川地貌与沉积的教育。

致谢:感谢姚檀栋院士、郭光剑研究员、栗兵帅博士等在古里雅地区样品采集过程中提供的诸多指导与帮助,感谢易朝路、侯居峙和冯金良研究员提供了一些古里雅冰碛物、郭扎错湖心钻孔粒度数据和然乌湖冰缘黄土样品,感谢奥地利因斯布鲁克大学卢银博士的讨论与建议。

参考文献(References):

- [1] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian water tower change and its impacts[J]. Journal of the Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(11): 1203-1209. [姚檀栋, 郭光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.]
- [2] Shi Yafeng. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau,

- China, and its relationship with the global change in the Mid Quaternary[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(3): 197-208. [施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(3): 197-208.]
- [3] Shi Yafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(1): 12-22. [施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J]. *地理学报*, 1999, 54(1): 12-22.]
- [4] Li Jijun. Studies on the geomorphological evolution of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Asian monsoon[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(1): 1-12. [李吉均. 青藏高原的地貌演化与亚洲季风[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 1-12.]
- [5] Zheng Du, Lin Zhenyao, Zhang Xueqin. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environmental change[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 95-102. [郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. *地学前缘*, 2002, 9(1): 95-102.]
- [6] Wang Yong, pan Baotian, Cui Ming. Interaction between the Qinghai-Tibet Plateau uplift and the East Asian environment from 1.2 to 0.6 Ma BP[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2006, 42(3): 1-7. [王勇, 潘保田, 崔明. 1.2~0.6 Ma BP青藏高原的隆升与东亚地表各圈层的相互作用[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2006, 42(3): 1-7.]
- [7] Wang Kang, Zhang Tingjun, Mu Cuicui, et al. From the Third Pole to the Arctic: changes and impacts of the climate and cryosphere[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(1): 104-123. [王康, 张廷军, 牟翠翠, 等. 从第三极到北极: 气候与冰冻圈变化及其影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(1): 104-123.]
- [8] Zeng Lanhua, Ou Xianjiao, Chen Rong, et al. OSL dating on glacial sediments of the Last Glacial in headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 761-769. [曾兰华, 欧先交, 陈嵘, 等. 天山乌鲁木齐河源末次冰期冰川沉积光释光测年[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 761-769.]
- [9] Shi Yafeng, Zheng Benxing. Studies on altitude and climatic environment in the middle and east parts of Tibetan Plateau during Quaternary Maximum Glaciation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(2): 97-97. [施雅风, 郑本兴. 青藏高原中东部最大冰期时代高度与气候环境探讨[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(2): 97-97.]
- [10] Li Bingyuan, Pan Baotian. Progress in paleogeographic study of the Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 61-70. [李炳元, 潘保田. 青藏高原古地理环境研究[J]. *地理研究*, 2002, 21(1): 61-70.]
- [11] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin, et al. Dating of the Pleistocene glaciations around the Daocheng ice cap[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 528-534. [许刘兵, 周尚哲, 崔建新, 等. 稻城冰帽区更新世冰川测年研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 528-534.]
- [12] Yi Chaolu, Cui Zhijiu, Xiong Heigang. Numerical periods of Quaternary glaciations in China[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(5): 609-619. [易朝路, 崔之久, 熊黑钢. 中国第四纪冰期数值年表初步划分[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(5): 609-619.]
- [13] Seong Y B, Owen L A, Bishop M P, et al. Quaternary glacial history of the Central Karakoram[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(25/26/27/28): 3384-3405.
- [14] Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Mei, et al. Much late onset of Quaternary glaciations on the Tibetan Plateau: determining the age of the Shishapangma Glaciation using cosmogenic ^{26}Al and ^{10}Be dating[J]. *Science Bulletin*, 2018, 63(5): 306-313.
- [15] Zhou Shangzhe, Xie Jinming, Ou Xianjiao, et al. Evidence for glaciation predating MIS-6 in the eastern Nyainqentanglha Range, southeastern Tibet[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 51(6): 982-993. [周尚哲, 谢金明, 欧先交, 等. 西藏东南部更早冰川作用新发现[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(6): 982-993.]
- [16] Yao Tandong, Oxygen isotope stratigraphy of the Guliya ice core[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(2): 165-170. [姚檀栋. 古里雅冰芯氧同位素地层学[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(2): 165-170.]
- [17] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: the last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core[J]. *Science*, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [18] Fang Xiaomin. The origin and provenance of Malan loess along the eastern margin of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its adjacent area[J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 24(5): 539-546. [方小敏. 青藏高原东部边缘及邻区马兰黄土成因与来源的初步研究[J]. *中国科学(B辑)*, 1994, 24(5): 539-546.]
- [19] Fang Xiaomin, Chen Fubin, Shi Yafeng, et al. Garze loess and the evolution of the cryosphere on the Tibet an Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(20): 1865-1867. [方小敏, 陈富斌, 施雅风, 等. 甘孜黄土与青藏高原冰冻圈演化[J]. *科学通报*, 1996, 41(20): 1865-1867.]
- [20] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, et al. About the Kunlun-Yellow river tectonic[J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(1): 53-59. [崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等. 关于“昆仑-黄河运动”[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(1): 53-59.]
- [21] Dreimanis A, Vagners U. The dependence of the composition of till upon the rule of bimodal composition[C]//VII International Conference, Études sur le Quaternaire dans le Monde. 1971, 2: 787-789.
- [22] Haldorsen S. Grain-size distribution of subglacial till and its relation to glacial scrushing and abrasion[J]. *Boreas*, 1981, 10(1): 91-105.
- [23] Zhang Zhenshuan. Grain-size characteristics of moraines in the region of Mt. Bogda, Tian Shan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(3): 191-200. [张振拴. 天山博格达峰地区冰碛物的粒度特征[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(3): 191-200.]
- [24] Gao Shunli. Particle size characteristics of till and glaciofluvial deposits at the head of Wulumuqi Riuet, Tian Shan[J]. *Journal of Xinjiang University*, 1984, 10(4): 77-85. [高顺利. 天山乌鲁木齐河源冰碛物与冰水沉积物的粒度特征[J]. *新疆大学学报*, 1984, 10(4): 77-85.]
- [25] Chen Yaning, Wang Zhichao, Gao Shunli. A preliminary analysis on grain-size characteristics of glacial deposit in the region of the Mt. Namjagbarwa[J]. *Arid Land Geography*, 1986, 9(3): 32-40. [陈亚宁, 王志超, 高顺利. 西藏南迦巴瓦峰地区冰川沉积物粒度特征的初步分析[J]. *干旱区地理*, 1986, 9(3): 32-40.]
- [26] Kang Jiancheng. Grain-size characteristics of glacial debris, and explanation of the processes of glacial Transports and sediments at the Gongba Glaciers in Mt. Gongga[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1987, 9(1): 65-72. [康建成.

- 贡嘎山贡巴冰川冰川岩屑的粒度特征及意义[J]. 冰川冻土, 1987, 9(1): 65-72.]
- [27] Liu Gengnian, Zhang Yue, Fu Hairong, et al. Sedimentary characteristics and subglacial processes of the glacial deposits in Hailuoguo Glacier, Gongga Mountain[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 68-74. [刘耕年, 张跃, 傅海荣, 等. 贡嘎山海螺沟冰川沉积特征与冰下过程研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 68-74.]
- [28] Yao Tandong, Jiao Keqin, Zhang Xinping, et al. Glaciologic studies on Guliya ice cap[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 14(3): 233-241. [姚檀栋, 焦克勤, 章新平, 等. 古里雅冰帽冰川学研究[J]. 冰川冻土, 2012, 14(3): 233-241.]
- [29] Yao Tandong, Jiao Keqin, Li Zhongqin, et al. Climatic and environmental records of the guriya ice cap[J]. Science in China (Series B), 1994, 24(7): 766-773. [姚檀栋, 焦克勤, 李忠勤, 等. 古里雅冰帽气候环境记录[J]. 中国科学(B辑), 1994, 24(7): 766-773.]
- [30] Yao Tandong, Jiao Keqin, Yang Zhihong, et al. Climate change since the Little Ice Age in the Guliya Ice Core[J]. Science in China (Series B), 1995, 25(10): 1108-1114. [姚檀栋, 焦克勤, 杨志红, 等. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(10): 1108-1114.]
- [31] Li Cange, Wang Mingda, Liu Weiguo, et al. Quantitative estimates of Holocene glacier meltwater variations on the Western Tibetan Plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 559: 116766.
- [32] Zhang Jifeng, Feng Jinliang, Hu Gang, et al. Holocene proglacial loess in the Ranwu valley, southeastern Tibet, and its paleoclimatic implications[J]. Quaternary International, 2015, 372: 9-22.
- [33] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. The Journal of Geology, 1922, 30(5): 377-392.
- [34] Krumbein W C. Size frequency distributions of sediments[J]. Journal of Sedimentary Research, 1934, 4(2): 65-77.
- [35] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [36] Lu Yin, Fang Xiaomin, Erwin A, et al. A 7.3-1.6 Ma grain size record of interaction between anticline uplift and climate change in the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology, 2015, 319: 40-51.
- [37] Lu Yin, Nico D, Andreas K, et al. Sedimentological evidence for pronounced glacial-interglacial climate fluctuations in NE Tibet in the latest Pliocene to early Pleistocene[J]. Paleogeography and Paleoclimatology, 2020, 35(5): e2020PA003864.
- [38] Wu Anbin. The characteristics of grain-size parameters of till and their relation to sedimentary environments[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(2): 47-53. [武安斌. 冰碛物的粒度参数特征及其与沉积环境的关系[J]. 冰川冻土, 1983, 5(2): 47-53.]
- [39] Reading H G. Sedimentary environments and facies[M]. Oxford-Boston: Blackwell, 1978.
- [40] Lu Yin, Fang Xiaomin, Oliver F, et al. Characteristic grain-size component-A useful process-related parameter for grain-size analysis of lacustrine clastics?[J]. Quaternary International, 2018, 479: 90-99.
- [41] Qin Xiaoguang, Cai Binggui, Liu Tungsheng. Loess record of the aerodynamic environment in the east Asia monsoon area since 60 000 years before present[J]. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 2005, 110(1): 1-16.
- [42] Gaudin A M. An investigation of crushing phenomena[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1926, 73: 253-316.
- [43] Pan Renyi, Li Chuanchuan, Zhang Mei, et al. Analysis particle characteristics and differentiation processes of glacial sediment in Tianshan and eolian sediment in the Taklimakan desert[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(5): 744-756. [潘仁义, 李川川, 张梅, 等. 天山冰川与塔克拉玛干风沙沉积的颗粒特征和分异过程分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(5): 744-756.]
- [44] Dong Yingwei. Comparison and analysis of glacier sediment grain size experiment[D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2014. [董应巍. 冰川沉积物粒度实验的对比与分析[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2014.]
- [45] Liu Dongsheng. Loess and environment[M]. Beijing: Science Press, 1985. [刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.]
- [46] Pye K. Aeolian dust and dust deposits[M]. Netherlands: Elsevier, 1987.
- [47] Zan Jinbo, Fang Xiaomin, Yang Shengli, et al. Evolution of the arid climate in High Asia since 1 Ma: evidence from loess deposits on the surface and rims of the Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2013, 313/314(4): 210-217.
- [48] Fang Xiaomin, An Zhisheng, Steven C, et al. The 3.6-Ma aridity and westerlies history over midlatitude Asia linked with global climatic cooling[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(40): 24729-24734.
- [49] Wu Guangjian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Grain size record of microparticles in the Muztagata ice core[J]. Science in China (Series D), 2006, 49(1): 10-17. [邬光剑, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 慕士塔格冰芯中微粒的粒度记录[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(1): 9-16.]
- [50] Xu Jianzhong, Sun Junying, Ren Jiawen, et al. Advances in the study of insoluble microparticle in ice-snow on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(3): 299-304. [徐建中, 孙俊英, 任贾文, 等. 青藏高原冰雪不溶微粒研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 299-304.]
- [51] Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China[J]. Quaternary Sciences, 2004, 24(2): 175-183. [孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程[J]. 第四纪研究, 2004, 24(2): 175-183.]
- [52] Stauch G, Ilmker J, Pötsch S, et al. Aeolian sediments on the north-eastern Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 57(60): 71-84.

Grain-size characteristics of tills and glaciofluvial deposits in the Guliya ice cap, Tibetan Plateau and its implication

ZHANG Yanguang^{1,3}, FANG Xiaomin¹, MAO Ziqiang¹, SHEN Maohua¹,
ZHANG Tao², ZAN Jinbo¹, YANG Shengli³

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The evolution of cryosphere in the Tibetan Plateau (TP), which is closely related to the changes of water cycle, surface erosion, weathering and desertification, has exerted a profound influence on the Asian monsoon system and global climate. The grain size distribution of glacial deposits can provide important information on the formation and development of cryosphere in the TP. Up to date, however, the grain size composition and formation mechanism of moraines in the TP and their relationship with periglacial loess and fluvio-lacustrine sediments remain unclear. For this reason, a detailed grain-size analysis of the tills and glaciofluvial deposits in the Guliya ice cap, the largest ice cap on the TP, was carried out. It was found that the samples from the terminal moraine to the glacial outwash fan and a set of glaciofluvial deposits in the downstream rivers all show a characteristic bimodal size distribution, i. e. a 1~3 Φ medium-fine sand peak (500~125 μm) and a 6~8 Φ (16~4 μm) fine silt peak. The former may be produced by glacial crushing, frost weathering and breaking; the latter is mainly due to glacial abrasion. The lithology and grain size of the bedrocks in the source area exert also unignored influence. The contents of fine silt component of sediments from the moraine, outwash fan to the river beach generally show a decreasing trend. From the moraine, through glacial outwash fan, river to the lake beach at the entrance of the lake, the characteristic fine silt component of glacial abrasion shows a general decreasing trend. The lake dynamic sorting produces obvious enrichment of coarse and fine silts in the open lake, but they are almost completely blown away by the wind in the lake beach sediments, which directly become the dust source of the downstream loess and become the characteristic component of loess. The composition and source of silt, whether it is from the glacier-related tail lake deposits or from the near- or far-source loess deposits in the TP and its surrounding areas, can provide important information for revealing the formation and evolution of the plateau cryosphere.

Key words: Tibetan Plateau; Guliya ice cap; glacial deposition; grain-size; loess and fluvial lacustrine deposits; cryosphere

(责任编辑: 王杰; 编辑: 庞瑜, 周成林)