

文章编号: 1000-0240(2009)04-0628-06

天山托木尔河流域第四纪冰川沉积 序列及其初步年代学

赵井东¹, 王 杰², 上官冬辉¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 托木尔河源于天山最大现代冰川作用中心托木尔峰西南坡的托木尔冰川, 在第四纪冰期与间冰期的气候旋回中, 遗留下了 5 套形态较为完整的冰川沉积。应用 ESR 测年技术对第一与第二级冰碛阶地(对应于第三套冰碛中地形较完整部分的冰碛, 分布在托木尔河大桥与古库瓦河汇合口之间)以及第五套最高冰碛平台进行测年, 依据初步的测试结果并结合地貌地层学原理可得出: 5 套冰碛分别形成于小冰期、新冰期、末次冰期、MIS6 和 MIS12, 每次冰川作用过程中还包含着若干次级的冰川波动。根据现存的冰碛地形可推得: 新冰期、末次冰期与 MIS6 时的冰川为山谷冰川, 规模最盛时冰川长分别为 47 km、60 km、≥70 km。

关键词: 冰川地貌; 冰期与间冰期旋回; 海洋氧同位素阶段(MIS); 天山

中图分类号: P534.63 **文献标识码:** A

0 引言

冰川是塑造地表形态最重要、最积极的外营力之一。在冰川区留下了形态独特的冰川作用遗迹(冰川侵蚀地形与沉积地形)。冰川区的冰川地形是过去冰冻圈变化最直接的证据, 记录着重要的古气候变化信息, 对它们进行研究可获得古冰川的规模、期次、类型与性质等变化信息, 进而获得古冰川的时空变化规律与冰冻圈的演化情况, 为古环境重建提供可靠的气候变化信息, 在构造活跃的山区还可为山体抬升研究提供重要的理论支持。冰川遗迹的定年是冰冻圈演化研究的基本要求, 也是古环境重建的关键。宇宙成因核素(Cosmogenic Radionuclide, CRN)、光释光(Optically Stimulated Luminescence, OSL)以及电子自旋共振(Electron Spin Resonance, ESR)等可对冰川作用遗迹进行直接定年的测年技术的发展与应用, 极大地提高了我

国第四纪冰川的研究水平, 取得了一批可喜的研究成果^[1-13]。天山是中亚地区最为重要、构造活跃的山系之一, 在第四纪冰期与间冰期气候旋回中, 在山间盆地、山谷与山麓带保存了丰富的古冰川遗迹, 其中以最大现代冰川作用中心——托木尔峰南坡的古冰川遗迹最典型、形态最清晰。这些冰川作用遗迹是研究本区乃至整个天山第四纪冰川演化的理想素材。托木尔河源于托木尔峰西南坡的托木尔冰川, 河谷中保存了多套古冰川沉积。1977—1978 年, 中国科学院登山科学考察队对该流域进行了考察, 划分三次更新世冰期以及全新世的新冰期和小冰期冰进^[14]。因缺少绝对年代的约束, 限制了我们对该流域冰川演化的认识。笔者在 2006 年夏季考察的基础上, 利用 ESR 测年技术对最老冰碛平台以及第三套冰碛地形较完整部分的冰碛(第一与第二级冰碛阶地)进行测年, 结合相邻流域的研究成果来探讨该流域的第四纪冰川演化。

收稿日期: 2009-02-25; 修订日期: 2009-04-02

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-YW-301); 国家自然科学基金项目(40501007; 40601022); 科技部科技基础性工作专项项目(2006FY110200)资助

作者简介: 赵井东(1976—), 男, 江苏沭阳人, 助理研究员, 2007 年在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所获博士学位, 主要从事第四纪冰川与全球变化研究。E-mail: jdzhaod@zb.ac.cn

1 研究区概况

托木尔河源于托木尔峰西南坡的托木尔冰川，长约 30 km，自东北流向西南注入阿克苏河支流的库马里克河。全流域位于 79°33′~80°08′E，41°42′~42°02′N，河源区山脊线介于海拔 4 000~6 000 m，现代冰川平衡线海拔约为 4 500 m，托木尔峰（海拔 7 435.3 m）为其最高峰。高峻地势造成的低温与西风环流带来较丰富的降水是维系该流域冰川发育的重要原因。根据相邻阿特奥依纳克流域的观测资料推算，冰川平衡线高度附近的年降水约为 1 000 mm，年平均气温约 - 8.36^[2]。根据冰川编目统计，托木尔河流域共有现代冰川 98 条，冰川总面积与储量分别约 532 km² 与 118 km³，冰川类型包括悬冰川、冰斗冰川、单一山谷冰川与复合山谷冰川。托木尔冰川（长 41.5 km，面积 337.85 km²，冰储量 99 km³）是该流域面积最大的巨型山

谷冰川，冰舌末端下伸到海拔 2 780 m，由西托木尔冰川、东托木尔冰川与南托木尔冰川 3 条大的一级支流冰川和若干条小的二级支流冰川组成。从冰舌向上约 25 km 的冰面被厚度不一表碛所覆盖，海拔 3 900 m 以上基本为裸露的冰面，其它几条大的山谷冰川的消融区也不同程度的被表碛所覆盖。

2 第四纪冰川遗迹

2.1 冰川沉积序列

在全球气候变暖背景下，该流域的冰川都有不同程度的退缩。虽然在托木尔冰川末端现代冰碛不发育，但两侧可见高出冰面数米的侧碛垄，它们是冰川近几十年退缩留下的印记。从冰舌向下在河谷中共分布冰碛 5 套（图 1）。

第一套冰碛距离托木尔冰川末端约 0.5~1 km。该套冰碛表面新鲜、擦痕清晰、结构松散，尚无土壤发育与植被覆盖，只有地衣和苔藓等先锋性

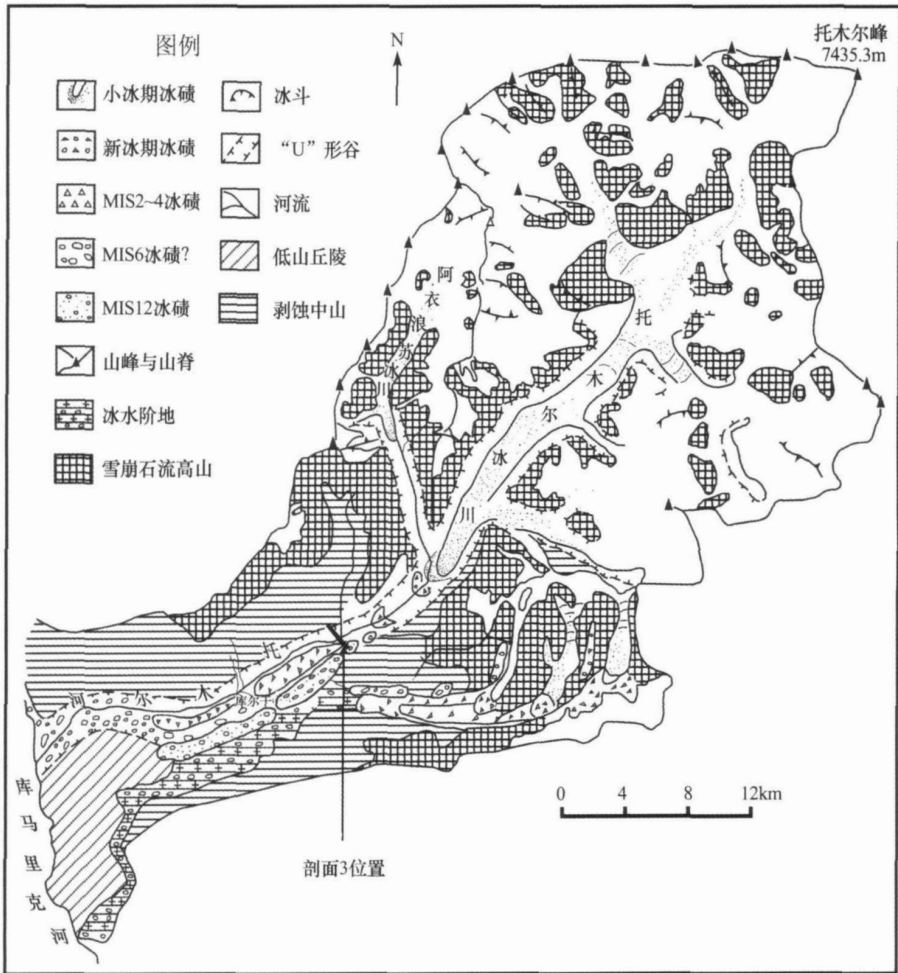


图 1 托木尔河第四纪冰川遗迹分布图(据文献[14]，略改)

Fig. 1 The distribution of the Quaternary glacial deposits in the Tomur River Valley

植物生长其上,主要岩性是花岗岩。根据我国西部现代山岳冰川末端的沉积规律与冰碛的新鲜程度,初步判断这些冰碛是 17 世纪以来气候变冷波动,冰川波动性进退的产物,该套冰碛推定为小冰期冰碛是可信的。

第二套冰碛距托木尔冰川末端 4~5 km,海拔约 2 500 m,为丘陵状起伏的终碛垄,横截托木尔河河谷。该终碛垄宽约 200~300 m,拔河 20~30 m。岩性有花岗岩、石灰岩、砂岩与片麻岩等,其上发育有近 30 cm 的土层,生长有带刺的灌丛与牧草。在其东南古库瓦河源头的青冰滩冰川与冰滩冰川等末端向下约 1 km 范围的冰碛与之类似,应为同期的沉积物。

第三套冰碛主要分布在距托木尔冰川末端 8~18 km 的“U”形谷中。从托木尔跨河大桥向下直到古库瓦河汇入处,冰碛地形由数列侧碛垄组成,为形态较完好的冰碛阶地。阶地面宽约 1 km,拔河 100~200 m。从古库瓦河汇入处向下直到海拔约 2 200 m,阶地面仅宽 100~200 m。冰碛密实程度稍高于汇合口以上的冰碛。该冰碛阶地上发育有 30 cm 厚的土层,牧草稀疏。冰碛物有了一定程度的风化与密实,阶地面漂砾出露部分的粒径在 1 m 左右,最大可达 3~5 m。冰碛组成有花岗岩、片麻岩、灰岩和砂砾岩等。根据风化与密实程度,青冰滩冰川与冰滩冰川向下约 3~5 km 内的数道向西呈弧形突出的终碛垄与冰碛阶地应为同一次冰川作用的产物。

第四套冰碛为本流域规模最大的一套冰碛,地形是冰碛平台,从海拔 2 500 m 左右沿东岸延伸直达库马里克河,长近 20 km。海拔 2 500~2 200 m 仅分布在东岸,库尔干边防连队就驻扎在这段平台位置较高的地方。从海拔 2 200 m 直到托木尔河与库马里克河的汇合口,两岸均有分布。台面宽 100~1 000 m,高出托木尔河 300~400 m,冰碛平台下伏基岩为紫红色的砂砾岩。冰碛平台被厚度不一的黄土所覆盖,裸露台面大的漂砾粒径达到 3~5 m,风化较深,位置稍低的漂砾表面存在很多风蚀孔穴。岩性有花岗岩、片麻岩、灰岩和砂砾岩等。

第五套冰碛为本流域最老的冰碛,拔河 450~500 m,仅分布在托木尔河东岸,台面宽 200~600 m,长约 13 km,中间被古库瓦河切穿。基座也为紫红色的砂砾岩,密实胶结程度较高,冰碛平台上裸露的漂砾表面深度风化,其中较大漂砾出露部分达到 4 m×5 m×3 m,风化层可徒手剥落,冰碛岩

性也为花岗岩、片麻岩、灰岩和砂砾岩等。坡面上有含煤层的浅红色粉砂岩、砂砾岩露头(图 2)。

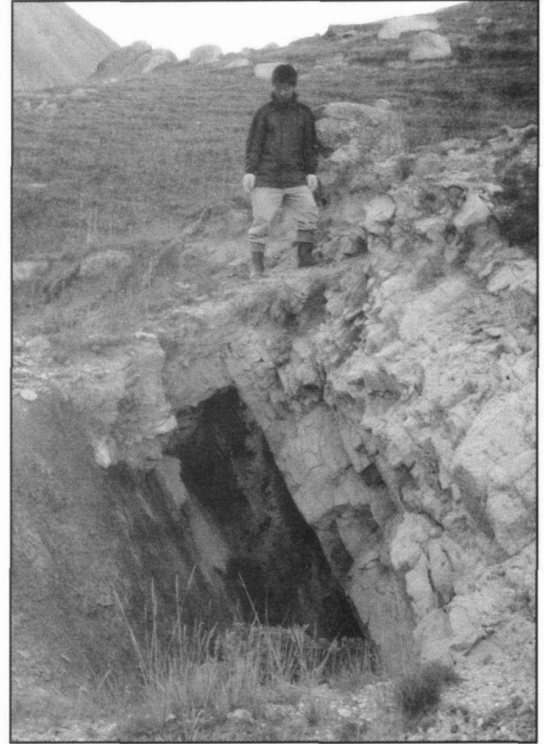


图 2 最高冰碛台地散布的冰川漂砾及含煤基岩露头

Fig. 2 Erratics on the highest glaciated plateau and the outcrop of bedrock

2.2 冰碛阶地

在托木尔河大桥东岸共有 5 级宽度不一,沿河分布的冰碛阶地(图 3)。第一级(海拔 (2454 ± 4.5) m)与第二级(海拔 (2571 ± 4.3) m)冰碛阶地上散布的冰碛风化较弱。第一级宽 30~50 m,第二级宽 150~200 m,它们沿河向下阶地面逐渐展宽,一直延伸到古库瓦河与托木尔河的汇合口,即这两级冰碛阶地对应于第三套冰碛中形态较为完整的那部分冰碛。第三级冰碛阶地(海拔 (2662 ± 4.4) m)上端最窄处 50 m,最宽处 300 m,向下逐渐变宽,与本流域规模最大的第四套冰碛相对应。冰碛阶地表面大漂砾较多,且多为花岗岩,直径 2~3 m。第四级冰碛阶地(海拔 (2703 ± 4.4) m)与第三级之间相差约 40 m,只向下延伸数公里,前端尖灭,阶地面最宽处 200~300 m,有零星漂砾散布。这四级冰碛阶地上都发育有 20~30 cm 的土壤层,生长着较好的牧草。最高一级(海拔 (2834 ± 4.9) m)冰碛阶地上土层较薄,细物质比较少,散布着表面深度风化的砾岩、花岗岩漂砾,基岩为浅红色粉砂岩、砂砾岩。

这 5 级冰碛阶地的拔河分别约为 120 m、240 m、330 m、370 m 与 500 m.

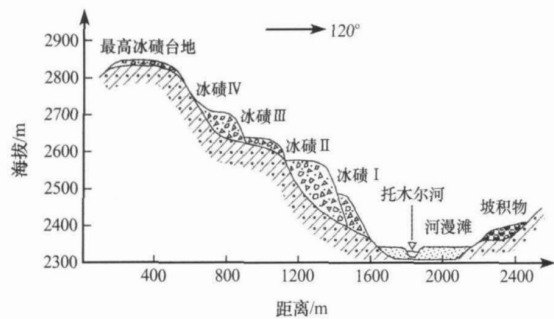


图 3 托木尔河大桥东岸冰碛阶地
Fig. 3 Moraine terraces in the east side of the Tomur River near the Tomur Bridge

3 研究方法 with 测试结果

测试样品采自第一级与第二级冰碛阶地以及最高一级冰碛台地(样品采集参数详见表 1)，采集时避免太阳光的直接照射，采集的样品装在黑色塑料袋与金属盒中密封运送到实验室里，在运输过程中避免剧烈摩擦碰撞或受热。样品的预处理在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所释光实验室中进行。样品预处理方法与程序、实验方法、测试参数参见文献^[1-2]。

根据人工辐照剂量与其对应的 ESR 信号强度，用最小二乘法对所测得的数据进行线性拟合并用外推法将拟合的直线外推到信号强度为零的横坐标得

出累积剂量(*TD*)。根据样品所在环境中 U、Th 元素的浓度与 K₂O 的百分比、样品的含水量、以及根据宇宙射线的贡献率^[15]来推算年剂量率(*D*)。样品年龄(*T*)可由以下公式得出：

$$T = \frac{TD}{D}$$

测年结果与相关参数见表 2.

4 讨论

精确的年代学约束是研究冰川时空变化与冰川地形演化的关键，也是古环境重建的基本要求。ESR 测年结果是可靠与可信的(详细论述参照文献[1-2])，而且可与其它独立测年方法的测试结果进行对比^[2,16]。基于测得的年龄，依据地貌地层学原理并结合相邻阿特奥依纳克流域较为完整的冰川沉积序列^[2]来探讨托木尔河流域的冰川演化。

第一与第二级冰碛阶地的测试年龄((20.1 ± 1.5) ka BP, (18.7 ± 1.3) ka BP, (20.8 ± 1.7) ka BP)表明，第三套冰碛中地形较完整部分(分布在托木尔河大桥到古库瓦河汇入处)的冰碛沉积于末次冰盛期(Last Glacial Maximun, LGM)，对应于 MIS(Marine Oxygen Isotope Stage)2。分布在古库瓦河汇入口到海拔约 2 200 m 的冰碛密实程度稍高于汇合口以上的冰碛，密实度表明汇合口向下的冰碛应是稍老一次冰川作用的沉积物。根据测得的年龄与地貌地层学原理得出第三套冰碛与古库瓦河源头青冰滩冰川与冰滩冰川向下约 3 ~ 5 km 内的数

表 1 样品采集点的位置参数及其描述

Table 1 Sampling sites and description of the samples

样品编号	经度/ E	纬度/ N	海拔/ m	深度/ m	位置描述
TME-1-1	79°45.697'	41°45.980'	2 395	5.9	冰碛阶地 1-1
TME-1-2	79°45.659'	41°45.985'	2 398	6.4	冰碛阶地 1-2
TME-2-1	79°45.376'	41°45.751'	2 494	4.7	冰碛阶地 2-1
TME-4-1	79°42.654'	41°44.166'	2 484	11.6	最高冰碛台地

表 2 ESR 年龄及相关参数

Table 2 ESR dating results and the correlated parameters

样品编号	U / 10 ⁻⁶	Th / 10 ⁻⁶	K ₂ O / %	宇宙射线贡献率 / (mGy · a ⁻¹)	含水量 / %	<i>TD</i> / Gy	年龄 / ka BP(±10 %)
TME-1-1	2.67	12.1	2.93	0.1338	0.89	87.97	20.1
TME-1-2	3.39	15.5	3.32	0.1254	1.92	96.03	18.7
TME-2-1	4.60	13.8	3.90	0.1605	5.06	118.16	20.8
TME-4-1	3.59	13.4	2.72	0.0653	4.91	1798.82	418.9

道向西呈弧形突出的终碛垅形成于末次冰期是合理的,即对应于 MIS2~4。末次冰期期间托木尔冰川的长度介于 50~60 km。据此判定小冰期与末次冰期冰碛之间,横截托木尔河的第二套冰碛以及与之对应的青冰滩冰川与冰滩冰川等末端向下约 1 km 范围的冰碛为新冰期冰碛是合理的。

第五套冰碛分布、残存的冰碛地形以及平台表面深度风化的漂砾说明,这次冰川作用距今时间较久远。测试年龄((418.9 ±40.2) ka BP)与相邻阿特奥依纳克流域最老的冰碛平台,“青山头”冰碛平台的测试年龄((440.6 ±41.7) ka BP)相一致^[2],说明这两个流域最老冰碛形成于同一次冰川作用。此外,这两个流域最老冰碛的测年结果与乌鲁木齐河源区最老的高望峰冰碛测年结果((459.7 ±46) ka BP, 471.1 ka BP)遥相呼应^[1]。这几个测年结果共同表明,我国境内天山的西段与中段至少在 MIS12 上升到与当时冰期气候相耦合的高度,进入冰冻圈并开始发育冰川。残存的冰碛地形难以得知当时的规模与冰川性质,若考虑托木尔峰地区海拔 4 000~5 000 m 存在一级高山夷平面^[14],或许这次冰川作用期间的冰川为平顶冰帽。本区是否存在着更老的冰川作用有待进一步深入研究。

本流域规模最大的第四套冰碛的地形也为冰碛平台。根据最老冰碛与第三套冰碛的形成时间,以及相邻阿特奥依纳克流域第五套规模最大冰碛的沉积年龄((134.4 ±12.6) ka BP 与 (219.7 ±20.5) ka BP)^[2],推断该套冰碛沉积于 MIS6 是合理的。根据冰碛阶地第四级沿河延伸长度有限以及与第三级阶地之间仅有 40 m 的高差,可以推断这次冰川作用过程中还存在次一级的冰川波动。这次冰川作用时的古托木尔冰川为巨型山谷冰川,长度 > 70 km。这套冰碛与阿特奥依纳克流域第五套冰碛虽同为规模最大的冰碛地形,不过其分布形态存在着差异。可能原因是:在这次冰川作用过程中,古托木尔冰川受古托木尔河河谷的约束,故现存冰碛地形为沿河分布的冰碛平台;阿特奥依纳克流域的古科契喀尔巴西冰川为大型的宽尾山麓冰川,所以现存冰碛地形由北向南呈扇形展开^[2]。

5 结论

(1) 河谷中第一套终碛形成于小冰期的冰川波动变化;第二套横截托木尔河河谷冰碛为新冰期冰川前进的沉积物;第三套冰碛沉积于末次冰期;沿河分布,长达 20 km 的第四套冰碛形成于 MIS6。

最老冰碛沉积于 MIS12

(2) 现存的冰川遗迹表明,新冰期、末次冰期与 MIS6 时的冰川皆为复合型山谷冰川,冰川规模最盛时长度分别为 47 km、60 km、> 70 km。

致谢:野外考察工作得到了托木尔峰自然保护区与库尔干边防连队同志的支持;样品预处理得到了中国科学院寒区旱区环境与工程研究所释光实验室范育新博士的帮助;国土资源部青岛海洋地质研究所刁少波研究员对样品进行了测试与分析,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, He Yuanqing, *et al.* ESR dating of glacial tills and glaciations in the Ürümqi River headwaters, Tianshan Mountains, China [J]. *Quaternary International*, 2006, **144**: 61 - 67.
- [2] Zhao Jingdong, Liu Shiyin, He Yuanqing, *et al.* Quaternary - glacial chronology of the Ateayinake River Valley, Tianshan Mountains, China [J]. *Geomorphology*, 2009, **103**: 276 - 284.
- [3] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Liu Shiyin, *et al.* A preliminary study of the glacial advances in MIS3b in the western regions of China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(2): 233 - 241. [赵井东, 周尚哲, 刘时银, 等. 中国西部山岳冰川 MIS3b 冰进的初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2007, **29**(2): 233 - 241.]
- [4] Xu Liubing, Zhou Shangzhe. Quaternary glaciations recorded by glacial and fluvial landforms in the Shaluli Mountains, southeastern Tibetan Plateau [J]. *Geomorphology*, 2009, **103**: 268 - 275.
- [5] Yi Chaolu, Li Xiaozhe, Qu Jianjun. Quaternary glaciation of Puruogangri—the largest modern ice field in Tibet [J]. *Quaternary International*, 2002, **97/98**: 111 - 121.
- [6] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang. Quaternary glaciation of the Bailang River Valley, Qilianshan [J]. *Quaternary International*, 2002, **97/98**: 103 - 110.
- [7] Zhou Shangzhe, Wang Xiaoli, Wang Jie, *et al.* A preliminary study on timing of the oldest Pleistocene glaciation in Qinghai - Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2006, **154/155**: 44 - 51.
- [8] Zhou Shangzhe, Xu Liubing, Colgan P M, *et al.* Cosmogenic ¹⁰Be dating of Guxing and Baiyu glaciations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, **52**(10): 1387 - 1393.
- [9] Schärer J M, Tschudi S, Zhao Zhizhong, *et al.* The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170000 yr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, **194**: 287 - 297.
- [10] Owen L A, Finkel R C, Ma Haizhou, *et al.* Timing and style of late Quaternary glaciation in northeastern Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, **115**(11): 1356 - 1364.
- [11] Owen L A, Finkel R C, Barnard P L, *et al.* Climatic and topographic controls on the style and timing of Late Quaternary

- glaciation throughout Tibet and the Himalaya defined by ^{10}Be cosmogenic radionuclide surface exposure dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, **24**(12 - 13): 1391 - 1411.
- [12] Wang Jian, Raisbeck G, Xu Xiaobin, *et al.* In situ cosmogenic ^{10}Be dating of the Quaternary glaciations in the southern Shaluli Mountain on the southeastern Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2006, **49**(12): 1291 - 1298.
- [13] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen, *et al.* The Quaternary glaciations and environmental variations in China [M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2006. [施雅风, 崔之久, 苏珍, 等. 中国第四纪冰川与环境变化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2006.]
- [14] Scientific Expedition Team on Mountaineering of the Chinese Academy of Sciences. Glacier and Meteorology in Tumor Peak region, Tianshan Mountains [M]. Ürümqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985: 1 - 31. [中国科学院登山科学考察队编. 天山托木尔峰地区的冰川与气候[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 1 - 31.]
- [15] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: Large depths and long - term time variations [J]. *Radiation Measurements*, 1994, **23**(2/3): 497 - 500.
- [16] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Shi Zhengtao, *et al.* ESR dating of glacial tills of Baishuihe River on the southern slope of Lenglongling in the eastern part of Qilian Mountains [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2001, **37**(4): 110 - 117. [赵井东, 周尚哲, 史正涛, 等. 祁连山东段冷龙岭南麓白水河冰碛物 ESR 测年研究[J]. 兰州大学学报(自然版), 2001, **37**(4): 110 - 117.]

Sequences of the Quaternary Glacial Sediments and Their Preparatory Chronology in the Tomur River Valley, Tianshan Mountains

ZHAO Jing-dong¹, WANG Jie², SHANGGUAN Dong-hui¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Key Laboratory of Western Chind's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The Tomur River originates on the southwestern slopes of the Tomur Peak, the largest modern glaciation centre in the whole Tianshan Mountains. Five sets of moraines are well-preserved in this valley during the Glacial-interglacial cycles in Quaternary, recording a complex history of Quaternary glacial landscape evolution. ESR dating technique was applied to determine the first and the second glacial terraces (The tills distribute from the Tomur Bridge to the confluence of the Guwar River and the Tomur River) and the oldest glaciated plateau of this valley. The ages of the first and the second glacial terraces and the glacial

plateau are 18.7 ~ 20.1 ka BP, 20.8 ka BP and 418.9 ka BP, respectively. Considering the principles of geomorphology and stratigraphy and these preliminary dating results, the following conclusions could be drawn: the tills deposited in Little Ice Age, Neoglaciation, Last Glaciation, MIS 6 and MIS 12, respectively. The glacial landforms indicate the ancient glacier was about 47 km, 60 km, ≥70 km in length at their maximum extent in Neoglaciation, Last glaciation and MIS 6. The age of the oldest glaciated plateau demonstrates that at least this segment of Tianshan Mountains began to develop glacier in MIS 12.

Key words: glacial geomorphology; glacial-interglacial cycles; marine oxygen isotope stage; Tianshan Mountains