

天山木扎尔特河流域的冰川地貌与冰期

赵井东¹, 王 杰², 刘时银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, 兰州, 730000

2. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 兰州, 730000)

摘要: 木扎尔特河流域位于天山最大现代冰川作用中心托木尔峰的东南坡, 在第四纪冰期与间冰期气候旋回中, 河谷与山麓带留下了 4 套形态清晰的冰川沉积。冰碛地形包含着丰富的古环境变化信息, 对它们进行研究有助于认识该流域的冰川演化与重建该地区的古环境。应用 ESR 测年技术, 选用石英颗粒中对光照与研磨较敏感的 Ge 心作为测年信号, 对该流域的第三套破城子多列终碛垅及其冰水沉积, 第四套克孜布拉克冰碛剥蚀平原上覆河流相砾石沉积以及一出露完整的沉积剖面进行测年。结合地貌地层学原理以及其他古环境研究资料进行综合分析可得出: 河谷中第一套 3~4 列终碛垅形成于小冰期; 第二套高大的吐盖别里齐终碛垅为新冰期冰进产物; 破城子终碛垅沉积于 MIS2~4; 克孜布拉克冰碛形成于 MIS6。破城子终碛垅地形及测年结果表明末次冰期冰川作用过程中该处至少存在 3 次大的冰进, 可分别对应于 MIS4、MIS3b 与 MIS2。MIS2 与 MIS3b 时冰川为复合山谷冰川, MIS4 与 MIS6 时为山麓冰川。末次冰期冰川作用过程中, 古木扎尔特冰川长约 92~99 km, 克孜布拉克冰期最盛时的古木扎尔特冰川长约 120 km。

关键词: 冰川地貌; ESR 测年; 海洋氧同位素阶段 (MIS); 木扎尔特河流域; 天山

冰川是塑造地貌形态最积极的外营力之一, 在第四纪冰期与间冰期的气候旋回中, 形态多样的冰川侵蚀地形与沉积地形以及与之对应的冰水沉积保留在冰川作用区。这些地形是过去冰冻圈变化最直接的证据, 包含着丰富的古气候变化信息。对它们进行研究可恢复古冰川的规模、期次、类型与性质, 进而恢复过去冰冻圈的演变情况, 为古环境重建提供基本信息。此外, 还可为山体抬升研究提供重要的理论参考。第四纪冰川研究的一个重要领域就是如何对冰川作用遗迹 (冰川侵蚀地形与沉积地形) 进行定年, 这不仅是古冰川研究深入发展的需要, 也是冰冻圈演化与古环境重建的基本要求。在过去十余年间, 光释光 (optically stimulated luminescence, OSL)、宇宙成因核素 (cosmogenic radionuclide, CRN)、电子自旋共振 (electron spin resonance, ESR) 等可对冰川地形进行直接定年的测年技术的发展与应用, 以及与其他测年技术 (地衣法、¹⁴C、热释光 (thermoluminescence, TL)、古地磁等) 的结合推动和加速了第四纪冰川研究的发展。

天山是中亚一条非常重要的、构造活跃的山系, 由许多呈东西走向, 大致平行的山脉与山间盆地组成, 全长 2500 km, 其中 1700 km 位于新疆维吾尔自治区。第四纪期间, 在山地抬升与全球性冰期与间冰期的气候耦合过程中, 多次冰川作用形成的冰川遗迹保存在山谷中、山间盆地与山麓带。托木尔峰 (海拔 7435.3 m) 是整个天山山系的最高峰,

收稿日期: 2009-01-19; 修订日期: 2009-03-28

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); 国家重点基础研究发展计划项目 (2007CB411500); 科技部科技基础性工作专项项目 (2006FY110200) [Foundation: Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-YW-301; National Natural Science Foundation of China, No.40501007; National 973 Project, No.2007CB411500; Program of the Ministry of Science and Technology of China, No.2006FY110200]

作者简介: 赵井东 (1976-), 男, 江苏沐阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事第四纪冰川与全球变化研究。

E-mail: jdzhao@lzb.ac.cn

也是最大现代冰川作用中心之所在,典型的、形态清晰的冰川遗迹保存在该地区,以南坡为最。这些冰川作用遗迹为研究我国境内的西南天山,乃至整个天山山系的第四纪冰川演化提供了理想之所。自20世纪50年代以来,中外学者应用地貌地层学原理对木扎尔特河流域的冰川地貌进行了研究,因缺少绝对定年资料,对冰川作用期次的争议尚未得到最终的解决^[1-6]。本文应用ESR测年技术对保存在河口和山麓带的第三套破城子多列终碛垅与第四套克孜布拉克剥蚀冰碛平原上覆的冰水沉积以及一出露完整的沉积剖面进行测年,结合地貌地层学原理与其他研究资料来探讨该流域的第四纪冰川演化。

1 研究区概况

木扎尔特河源自托木尔—汗腾格里山汇的东南坡、哈尔克山的西坡与哈拉周里哈山的南坡,是渭干河上游一条重要的支流,塔里木河的一条二级支流,基本呈南北走向,自古以来就为南北疆最重要的便捷通道之一^[7]。位于河口的破城子水文观测站的资料显示,观测站控制的流域面积2845 km²,河流长约100 km,多年平均径流量为14.8×10⁸ m³,其中冰雪融水补给占80%以上。河流出山口后折向东流入拜城盆地,为拜城盆地绿洲经济的发展提供了极其宝贵的淡水资源。

本区主要受中纬度西风环流的控制^[8](图1),西风环流带来的大西洋和部分北冰洋的潮湿气流是本区主要的水汽来源。根据南坡阿特奥依纳克流域的观测资料,冰川平衡线附近的年降水约1000 mm,年平均气温约-8.36 °C^[9]。木扎尔特河源区雪线高度4200~4400 m,山脊线的高度介于4000~6700 m,海拔超过6000 m的山峰有19座。超过2000 m的冰川作用正差为冰川发育提供了极为有利的地势条件。高峻地势造成的低温条件与较为丰富的降水组合是该流域冰川极其发育的重要原因。根据冰川编目统计^[10],木扎尔特河源区共发育现代冰川254条,包括悬冰川、冰斗冰川、单一山谷冰川与复合山谷冰川。冰川面积与储量分别约1219 km²与221 km³。长度超过10 km的山谷冰川有8条(表1),最著名的3条为木扎尔特冰川、喀拉古勒冰川与吐盖别里齐冰川。这3条冰川都有支冰川汇入,如吐盖别里齐冰川有9条大的一级支冰川,有些支冰川还存在次一级的支冰川^[6]。本区冰川一个显著的外貌特征是其消融区的大部被厚度不等的表碛所覆盖,从末端向上逐渐变薄。如上述3条冰川被表碛全部或部分覆盖的长度分别为16 km、23 km和21.8 km,其上为裸露冰面。

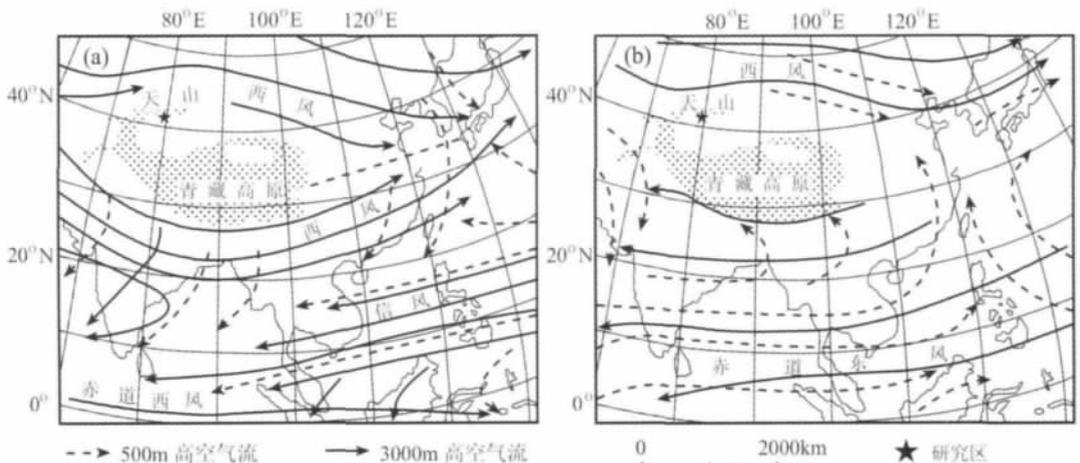


图1 高亚洲1月份(a)与7月份(b)的大气环流图^[8]

Fig. 1 The characteristic of air circulation over High Asia area for (a) winter (January) and (b) summer (July)

表 1 木扎尔特河流域 > 10 km 山谷冰川及相关参数^[10]

Tab. 1 The valley glaciers with length > 10 km and their parameters in the Muzhaerte River valley

冰川名称或编号	长度 /km	均宽 /km	朝向	面积 /km ²	冰储量 /km ³	最高高度 /m asl	末端高度 /m asl	雪线高度 /m asl
克其其冰川	11.2	2.0	E	20.74	2.5095	6124	3250	4200
5Y681B-12	11.5	0.8	NE	8.93	0.8126	6124	3300	4100
吐盖别里齐冰川	36.1	9.3	E	313.69	90.0290	6934	2680	4200
喀拉古勒冰川	32.4	9.1	E	184.95	44.9429	6245	2790	4240
木扎尔特冰川	33.0	4.2	W	137.70	30.5694	6627	2950	4220
塔木格塔什冰川	18.0	1.8	W	32.88	4.6032	6627	3600	4200
喀拉库买冰川	18.0	2.8	SW	51.12	8.2814	6250	3135	4200
色日克冰川	13.0	2.9	W	36.00	5.2200	5458	3550	4300

注: 冰川编目中吐盖别里齐冰川与喀拉古勒冰川的名称为土格别里齐冰川与乌库尔冰川

2 冰川沉积序列

冰川末端现代冰碛不发育, 无明显的终碛垅地形, 仅在 "U" 形谷两侧的谷壁上残留有冰川后退形成的冰碛。从现代冰川末端到山麓带共保存有形态清晰的冰碛 4 套。第一套分布在上述 3 条著名大冰川末端 0.5~7 km 范围内, 由于受冰川融水的侵蚀呈丘状, 形态不很完整, 但仍可分辨出 3~4 列终碛垅。如木扎尔特冰川外缘保存有终碛垅 3 列, 海拔高度介于 2600~2750 m, 从内向外, 最内一列冰碛距冰舌末端约 1 km, 比高 20~30 m; 中间一列距内列 250 m, 比高 20 m; 最外一列距中间一列冰碛 360 m, 比高 15 m, 在冰舌西缘还可以看到与终碛相对应的 3 列侧碛^[6]。吐盖别里齐冰川和喀拉古勒冰川前有 4 列终碛垅, 海拔高度分别介于 2520~2700 m 和 2540~2650 m^[1, 2]。冰碛新鲜, 尚无土壤发育。冰碛物由灰岩及少量的侵入岩块大小混杂组成。第二套为横截木扎尔特河的巨大终碛垅, 称为吐盖别里齐终碛。该终碛垅东西长 1 km, 南北宽 0.7 km, 垅顶海拔 2480 m, 拔河 100~150 m, 木扎尔特河从垅西侧切穿形成 50~70 m 深的峡谷^[5]。吐盖别里齐终碛距上游段 3 条大冰川末端分别为 18 km、24 km 和 12 km。冰碛主要由大理岩、花岗岩和少量的片麻岩块组成。值得注意的是在终碛垅内侧有厚 1~10 m 的河湖相沉积, 这是该终碛垅一度阻塞河谷形成冰水大湖的有力证据。

第三、第四套冰碛分布在木扎尔特河的河口与山麓带(图 2、3)。第三套冰碛为形态高大, 较完整的多列向东南方向突出的弧形终碛垅所组成, 在木扎尔特河口与山麓带呈扇状展开。1958 年, 新疆考察队称之为破城子终碛, 是天山地区第四纪冰期划分中最具代表性的冰期之一^[1]。终碛南北延伸 7 km, 东西最宽 7.5 km。其中形态较完整、相对高大的终碛垅有 10 道, 被宽约 1.5 km 的冰水沉积洼地均分为内外两组(图 3)。内终碛组主要分布在河口, 其高度从河口向外逐渐升高, 海拔介于 1960~2110 m,

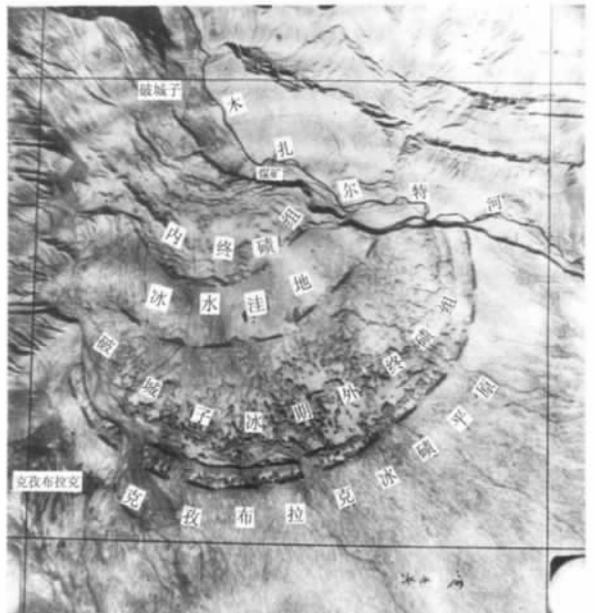


图 2 木扎尔特河河口与山麓带冰川地貌航空图
Fig. 2 Aerial photo of the glacial landforms at the exit of the Muzhaerte River Valley and on the piedmont

各垅间的相对高度 40~100 m; 外终碛组分布在山麓带, 海拔 1940~1860 m, 各垅间的相对高度 20~60 m^[6]。其中接近冰水沉积洼地的第五列终碛垅最为独特, 无论其绝对高度还是相对高度都是这 10 列终碛垅中最高的, 垅最宽处超过 500 m。终碛垅表面散布着粒径 1~2 m 的花岗岩、砾岩漂砾, 最大的漂砾粒径超过 10 m。漂砾表面都存在一定程度的风化, 风化程度从内向外逐渐加深。冰碛的密实度从内向外也逐渐变大, 最外一列终碛垅的局部呈半胶结状态。冰碛呈灰色, 岩性有来自源头的大理岩、高山和中山带的花岗岩、片麻岩以及接近山麓带的砂岩、砾岩、片岩等。

在破城子终碛以外有一片缓倾斜的 (倾角 2~3°) 冰碛剥蚀平原, 为该处分布在山麓带的第四套冰碛, 称为克孜布拉克冰碛。该冰碛已经历了强烈的剥蚀、侵蚀和消散作用, 地面散布着半埋藏的冰碛巨砾, 粒径数米至十多米, 以花岗岩块居多, 其次为砾岩, 与砂子、粘土混杂。现在冰碛分布显著下限在海拔 1750 m 左右^[1], 在海拔更低的位置仍有零星的花岗岩漂砾存在, 当时冰川长度估计在 120 km 左右^[6]。刘泽纯等^[3]认为克孜布拉克冰碛与破城子冰碛之间的接触关系为: 古老冰碛在最下层, 下伏第三纪红色砂砾岩层, 终碛位于其上, 两者之间夹有一层流水相的砾石层, 两种冰碛风化与胶结情况完全不同。2005 年, 我们在该处考察时, 观测位于克孜布拉克村附近修路挖开约 4 m 深的坑, 发现坑中砾石层剖面有一定的分选性, 磨圆度比较好, 系为河流相沉积, 与底部刚出露的次棱角状的砾石有明显的区别。无疑, 河流相砾石沉积于破城子冰期与克孜布拉克冰期之间的间冰期。

3 沉积剖面

出露完整的沉积剖面位于扇形冰碛地形的东北侧、木扎尔特河的南岸、破城子废弃煤矿之东约 200 m 处, 对应于第四列终碛垅的东北翼 (图 3)。整个剖面深 36.5 m, 根据沉积相可分为 I、II、III 三层 (厚度分别为 16.8 m、6.7 m 与 13 m), 下伏基岩为近乎直立的第三系红色粗砂砾岩 (图 4)。I 层是这三层中厚度最大的一层, 系含有大量次棱角状冰碛石的冰川沉积, 由 I₁、I₂、I₃ 三个亚层组成。第 I₁ 层厚 5 m, 密实程度不高, 较疏松, 冰碛石上的擦痕相对清晰, 剖面中漂砾出露部分的粒径可达 2~3 m; 第 I₂ 层为厚度仅为 0.8 m 的冰水沙层, 中间混杂有粒径 1~4 cm 的次圆状的砾石, 有较高的密实度, 呈半胶结状; 第 I₃ 层厚 11 m, 也是含有大量次棱角状砾石的冰碛层, 密实程度与第 I₂ 层相似, 远高于第 II 层, 该亚层也呈半胶结状态。剖面中漂砾出露部分的粒径明显小于第 II 层, 为 1.5~2 m。从密实程度与胶结状况推测: 第 I₁ 层较年轻, I₂ 与 I₃ 两个亚层的形成时间较为接近, 年龄比较老。II 层为含有大量次棱角状、次圆状砾石的冰川与冰水混合沉积层, 可分为两个亚层。第 II₁ 层为厚 0.7 m 的河流相砾石层, 砾石的磨圆度与分选性都比较好,

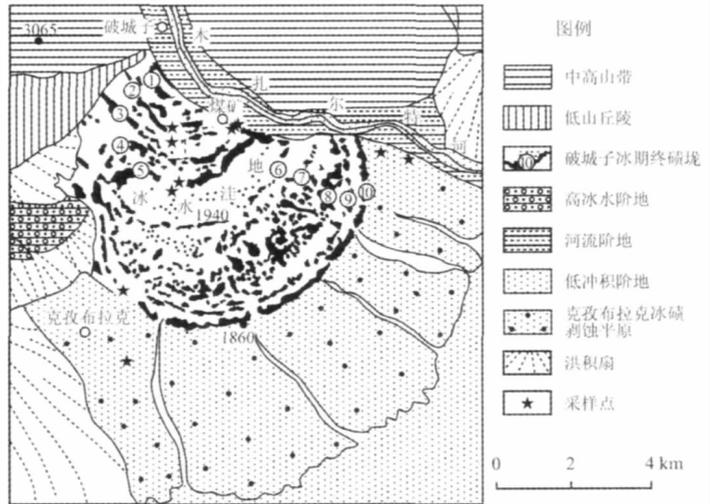


图 3 破城子与克孜布拉克冰期的冰川地貌及样品采集点示意图
Fig. 3 The glacial geomorphology of Pochengzi and Kezibulake glaciations and sampling sites

大部分砾石的粒径介于 20~30 cm; 第 II₂ 层厚 6 m, 为含有大量次棱角状与次圆状砾石的冰川与冰水混合沉积, 胶结程度非常高, 砾石的平均粒径约 15 cm, 最大达 70 cm。III 层为磨圆度较好河流相砾石层, 剖面呈浅红色, 可分为两个亚层。III₁ 层厚 4m, 砾石的平均粒径 5~7 cm, 最大可达 20 cm; III₂ 层厚 9 m, 砾石平均粒径 20~30 cm, 最大可达 2 m。其间有 4 条明显的石线, 反映了暖湿的沉积环境。整个剖面的岩性组成相差不大, 说明沉积物的来源相同。主要有花岗岩、片麻岩、砾岩、砂岩、石灰岩等。

4 研究方法 with 测试结果

本次测试的样品采自天然或人工开挖的剖面(表 2), 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。在室内自然光下观测不到 Ge 心信号减少的现象^[11, 12], 所以本次测试的样品预处理是在室内自然光条件下进行的, 未采取严格的避光措施。样品预处理方法与程序及实验方法参见文献[9, 13]。

测试仪器为德国 Bruker 公司 ECS106ESR 谱仪, 选用 Ge 心作为测年信号, 测试条件是: 室温、X 波段、微波功率 2 mW、调制振幅 0.1 mT、中心磁场 348 mT、扫描宽度 5 mT、转换时间 5.12 毫秒、时间常数 40.96 毫秒、增益 1×10^5 。为了提高信(号)噪(音)比, 每个样品在同一条件下连续测 3 次。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)。样品所在环境中 U、Th 元素的浓度与 K₂O 的百分比用激光荧光法、比色分光光度法和原子吸收技术进行测定。年剂量率(D)由测定的 U、Th 的浓度和 K₂O 的含量、样品的含水量、以及根据宇宙射线的贡献率^[14]来换算。测年结果与相关参数见表 3。年龄(T)可由以下公式得出:

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

表 2 样品采集点的位置参数及其描述 (见图 3、4)

Tab. 2 Sampling sites and the samples' description (shown in Figs. 3 and 4)

样品编号	经度/E	纬度/N	海拔/m	深度/m	位置描述
MZET (P)-3	80°55.521'	41°48.023'	1981	2.3	沉积剖面 I ₁ 层
MZET (P)-2	80°55.521'	41°48.025'	1973	5.4	沉积剖面 I ₂ 层
MZET (P)-1	80°55.521'	41°48.025'	1951	30.6	沉积剖面 III ₂ 层
MZET-1-1	80°54.247'	41°48.242'	1970	2.1	破城子第二列终碛垅
MZET-1-2	80°54.297'	41°48.039'	1997	0.8	破城子第三列终碛垅
MZET-2-1	80°54.408'	41°47.357'	2001	2.9	破城子第五列终碛垅顶部
MZET-2-2	80°54.047'	41°47.297'	1977	2.7	破城子第五列终碛垅外侧
MZET-2-3	80°52.901'	41°47.001'	1950	4.5	破城子第十列终碛垅
MZET-3-1	80°57.845'	41°47.591'	1891	3.2	克孜布拉克冰碛平原上覆冰水沉积-1
MZET-3-2	80°58.078'	41°47.133'	1869	1.4	克孜布拉克冰碛平原上覆冰水沉积-2
MZET-3-3	80°53.461'	41°44.465'	1831	3.7	克孜布拉克冰碛平原上覆河流相砾石沉积

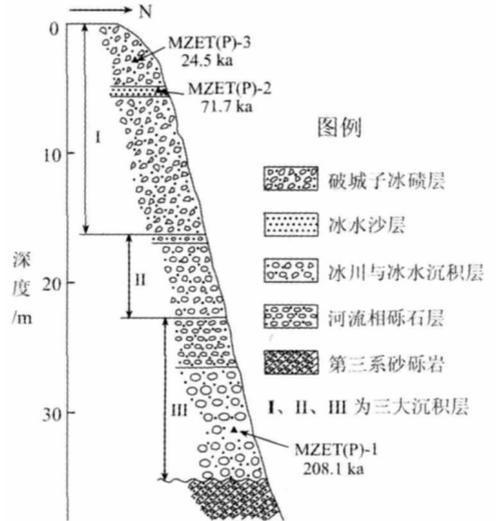


图 4 破城子废弃煤矿东 200 m 处的沉积剖面
Fig. 4 A well-exposed section is located about 200 m to the east of the discarded Pochengzi coal mine

5 讨论

表 3 ESR 年龄及相关参数

Tab. 3 ESR dating results as well as the correlated parameters

5.1 石英颗粒中 Ge 心的回零机制

沉积物 ESR 测年的一个重要前提是：沉积物沉积时，矿物颗粒中用于测年的信号因某种机制已归零。此次选用石英颗粒中的 Ge 心作为测年信号，Ge 心对光照与研磨都比较敏感。早期 Tanaka 等人^[15]的研究

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 (%)	TD (Gy)	年龄/ka (±10%)
MZET (P)-3	1.87	15.5	3.02	0.2050	2.56	110.65	24.5
MZET (P)-2	2.00	12.3	2.43	0.1313	4.47	261.39	71.7
MZET (P)-1	3.20	8.17	1.53	0.0253	3.16	582.32	208.1
MZET-1-1	2.6	10.9	2.99	0.2109	1.26	111.06	25.3
MZET-1-2	2.86	8.22	1.54	0.2598	3.07	40.35	13.6
MZET-2-1	3.12	13.7	2.21	0.1881	2.83	156.58	39.5
MZET-2-2	3.64	12.5	2.42	0.1928	2.98	169.39	40.4
MZET-2-3	3.03	13.6	2.58	0.1479	1.95	300.50	70.6
MZET-3-1	2.73	12.4	2.68	0.1761	1.84	270.00	64.2
MZET-3-2	2.63	9.83	2.84	0.2304	1.96	126.62	30.4
MZET-3-3	2.34	13.1	2.83	0.1618	8.76	345.38	86.7

表明：3 mm 厚的三角洲和海滩沙里石英颗粒中， $g = 1.997$ (Ge 心) 的 ESR 测年信号在太阳照射下，可在 7h 内完全归零，实验还表明现代海滩埋藏深度在 20cm 的沙子中 Ge 心信号处在零水平。Buhay 等人^[16]对断层泥里石英颗粒中 Ge 心的光退效应研究表明：薄层石英颗粒暴露于紫外光下与太阳光下可以在很短时间内归零。Jin 等人^[17]对黄土沉积中的石英进行光照实验表明阳光 4h 可将 Ge 心 ESR 信号晒退。业渝光等人^[18]对海滩风成沙里石英中 Ge 心进行的光退效应研究表明：Ge 心信号经过 1h 的日晒可以完全消失，特别是开始的 15 分钟信号就减少了一半左右。这些研究都证实了早期的研究结果。此外，石英颗粒中 Ge 心对研磨作用也比较敏感，Ye 等人^[19]对从泥石流沉积中提取的石英颗粒的研磨实验表明：1 分钟后 Ge 心信号强度减少了 38%。这些研究都表明光照与研磨等作用可使石英颗粒中的 Ge 心测年信号回零。根据山岳冰川的结构与运动理论，冰川携带的物质在冰川运动过程中有曝光的机会，在冰川运动过程中，所携带的物质也将被研磨，冰川沉积中细颗粒物基本上都是研磨作用形成的^[20, 21]。还有值得注意的是：Ge 心的光吸收带为 4.43eV^[17]，即相当于波长为 280 nm 的紫外光。测试的样品都采自海拔较高的冰川区，阳光中紫外光的残留远比低海拔的地方多。所以，冰川沉积物里石英颗粒中 Ge 心满足 ESR 测年的先决条件。此次测定的年龄中，破城子第三道终碛垅的年代 (MZET-1-2, 13.6 ka) 与克孜布拉克冰碛剥蚀平原上覆冰水沉积的年代 (MZET-3-2, 30.4 ka) 出现了较大的偏差，其可能原因是沉积物沉积后受到了扰动。其中第三道终碛垅的年代可定性的判断该终碛垅沉积于末次冰期晚冰阶。其余年龄均符合地貌学与沉积学上判断的新老关系或对应关系。第五列高大终碛垅的两个样品获得了较为一致的测年结果，显示了该测年方法在年龄测定上具有很好的重现性。

5.2 冰川演化序列与冰期划分

木扎尔特河谷自古以来都是连接南北疆最重要的便捷通道之一，源头冰川变化的记录散见于多个历史文献中^[7]。参阅记述冰川变化的历史文献资料，以及冰碛的新鲜程度、沉积位置、松散的结构、土壤发育与植被覆盖等状况来看，现代冰川末端向下 0.5~7 km 范围内的第一套冰碛形成时间比较短，系新近冰川波动所沉积。参照天山乌鲁木齐河源现代冰川末端 3 道新鲜冰碛垅的研究成果^[22]可以判定它们为 17 世纪以来气候变冷波动，冰川波动性进退的产物，即沉积于小冰期。

第二套高大的吐盖别里齐终碛上游段 3 条大冰川末端分别为 18 km、24 km 和 12 km。该终碛垅的分布位置以及与现代冰川之间的距离是争议产生的主要原因之一^[1-6]。综合分析终碛垅与现代冰川末端之间的高差、不足 200 m 的雪线降低值^[5, 6]、河口与山麓带冰碛的 ESR 年龄以及阿特奥依纳克流域新冰期的年龄^[9]，我们认为该终碛垅形成于新冰

期的推断较为合理。

如果说深海氧同位素记录曲线为陆地上冰期的划分树立了对照标尺, 那么西昆仑山古里雅冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 的气候记录则为青藏高原及其周边山地末次间冰期以来气候变化研究提供了极好的局地参照。破城子多列终碛垅与沉积剖面第 I 层 (第 I_1 层松散冰碛与第 I_2 层半胶结冰水沙的年龄分别为 24.5 ka BP 与 71.7 ka BP) 测得的年龄表明该套冰碛沉积于末次冰期, 年龄可分为三组 (13.6~25.3 ka BP、39.5~40.4 ka BP 与 64.2~71.7 ka BP), 正好与古里雅冰芯中根据 $\delta^{18}\text{O}$ 记录划分的 MIS2 (32~15 ka BP)、MIS3 (58~32 ka BP) 与 MIS4 (75~58 ka BP) 三个阶段相对应^[23]。MIS4 与 MIS2 对应于末次冰期早晚冰阶, 是冰川发育期, 24.5~25.3 ka BP 与 64.2~71.7 ka BP 两组年龄可作为此处末次冰期早晚冰阶的冰川沉积年龄。即内终碛组 1~4 列终碛垅形成于末次冰期晚冰阶, 外终碛组形成于末次冰期早冰阶。第五列终碛垅测得的两个年龄对应于 MIS3, 虽然青藏高原与周边山地多个研究点发现了 MIS3 冰进的地貌学与年代学证据^[24-31], 但若将这两个年龄作为该列终碛垅的沉积年龄, 仍需对其作深入的探讨。

古里雅冰芯气候记录中的 MIS3 是一个特殊阶段, 为早晚两暖峰夹一冷谷, 在 MIS3 中存在不少于 4 次的冷事件, 特别是 47~43 ka BP 的两次冷谷的降温幅度接近 MIS4 与 MIS2^[23]。两个暖峰值相距 23 ka 左右, 与地球绕日轨道变化的岁差周期基本一致^[32]。Shi 等人^[33]根据 Berger^[34]对过去轨道变化导致地球表面日射差别的计算值绘制了 125 ka BP 以来 7 月各纬度入射辐射与现代差别图, 其中 30~60 ka BP 也表现为两个高辐射值暖期夹一个低辐射值冷期的状况。利用湖泊水体氧同位素的演化特征建立起来的诺尔盖盆地 RM 钻孔古温度曲线也清楚的显示, 3 阶段是双峰一谷特征, 内部温度差在 4 °C 以上^[35]。其间 48 ka BP 与 45 ka BP 为明显的降温时段, 其中 48ka BP 左右的降温事件可与 Heinrich5 相对照^[36]。最近研究将古里雅冰芯 MIS3 细分成 a、b 与 c 三个亚阶段, 其中 3b 冷阶段开始于 54 ka BP, 一直持续到 40 ka BP, 其中 45 ka BP 左右降温值最大^[32]。近年来关于青藏高原以及我国西北内陆干旱区末次间冰段气候变化的研究资料显示: 约从 3 阶段中期起, 青藏高原及内陆区为较为湿润的阶段, 大湖开始发育, 湖水开始淡化或出现了淡水湖^[37-41]。如青藏高原西北的甜水海 TS95 钻孔中, 41~45 ka BP (7.67~8.85 m) CaCO_3 含量是整个 3 阶段中最低的, 反映出较为湿润的气候^[37]; 位于河西走廊的古腾格里大湖开始发育的时间约在 42 ka BP^[38, 39]; 青藏高原多个湖泊沉积测年资料与最高湖岸线地貌学证据表明 MIS3 高原环境特别湿润^[40]; 湖泊等古气候记录资料综合分析也得出季风中亚地区湿润环境出现在 MIS3 的中晚期^[41], 这些研究表明从 3 阶段中期开始, 青藏高原及内陆地区为一个较为湿润的气候环境。综上, 3 阶段中期冷湿的气候导致了青藏高原及周边山地的冰进。因此, 39.5 ka 与 40.4 ka 两个测试年龄可作为第五列高大终碛垅的沉积年龄, 可对应于古里雅冰芯记录的 MIS3b。

克孜布拉克冰碛剥蚀平原上覆河流相砾石沉积的年代 (MZET-3-3, 86.7 ka) 表明砾石层形成于末次间冰期。这与早期关于克孜布拉克冰碛与破城子冰碛之间夹有一层流水相的砾石层的沉积接触关系的研究结果相一致^[3]。这个年龄与沉积剖面底部磨圆度较好河流相砾石层的沉积年龄 (MZET (P)-1, 208.1 ka) 可得出剖面中第 一 层冰川与冰水混合沉积层与木扎尔特河流域面积最大的克孜布拉克冰碛剥蚀平原为同期沉积物, 沉积于 MIS6。

木扎尔特河谷内保存下来的冰川谷为嵌套的双层 "U" 形谷, 下槽谷底宽 1~2 km, 高出谷底 200~300 m 处有上槽谷明显的谷肩, 谷肩上面有零星的冰碛残留。根据地形可初步判断它们的对应关系为: 下槽谷形成于破城子冰期, 即末次冰期; 上槽谷可能形成于克孜布拉克冰期或更老冰期。

6 结论

(1) 现代冰川末端 3~4 列终碛垅形成于小冰期冰进；高大的吐盖别里齐终碛垅沉积于新冰期；破城子多列终碛垅为末次冰期的沉积物；面积最大的克孜布拉克冰碛沉积于 MIS6。破城子终碛地形与测年结果表明该处在末次冰期作用过程中至少存在 3 次大的冰进，可分别对应于 MIS4、MIS3b 与 MIS2。

(2) 从木扎尔特河口与山麓带的古冰川遗迹看，MIS2 与 MIS3b 时的冰川为复合山谷冰川，MIS4 与 MIS6 时的冰川为山麓冰川。末次冰期中，古木扎尔特冰川长约 92~99 km；克孜布拉克冰期最盛时的古木扎尔特冰川长约 120 km。

致谢：野外考察工作得到了邓晓峰、柳景峰等协助，托木尔峰自然保护区与破城子水文观测站负责同志的支持；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，在此一并感谢！

参考文献 (References)

- [1] Feidaoluweiqi Б А, Yan Qinshang. New data of the times and features about the Tianshan Mountains' ice ages in China. In: *Memoirs of the Natural Conditions in Xinjiang Province (memoirs)*. Beijing: Science Press, 1959. 14-31. [费道罗维奇 Б А, 严钦尚. 中国境内天山冰期及其性质的新资料. 见: 新疆维吾尔自治区的自然条件(论文集). 北京: 科学出版社, 1959. 14-31.]
- [2] Feidaoluweiqi Б А, Yan Qinshang. Study on the times and features of the Tianshan Mountains' ice ages in the western China. *Quaternary Sciences in China*, 1960, 3(1/2): 9-33. [费道罗维奇 Б А, 严钦尚. 中国西部天山冰期的次数与性质问题. *中国第四纪研究*, 1960, 3(1-2): 9-33.]
- [3] Liu Zechun, Liu Zhenzhong, Wang Fubao. A comparison of the Quaternary glaciers development patterns nearby the Qomolangma Peak, Hantengri Peak and the Tuanjie Peak of Qilianshan Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 1962, 28(1): 19-33. [刘泽纯, 刘振中, 王富葆. 关于珠穆朗玛峰、腾格里峰、祁连山团结峰附近第四纪冰川发展的比较. *地理学报*, 1962, 28(1): 19-33.]
- [4] Geography Department of Nanjing University (Geomorphology Teaching and Research Section). *Quaternary Glaciations and Ice Ages in China*. Beijing: Science Press, 1974. 125-142. [南京大学地理系地貌学教研室. *中国第四纪冰川与冰期问题*. 北京: 科学出版社, 1974. 125-142.]
- [5] Shi Yafeng, Zheng Benxing, Su Zhen et al. Study of Quaternary glaciation in Mts. Tomur-Hantengri area, Tianshan. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 1984, 6(2): 1-14. [施雅风, 郑本兴, 苏珍等. 天山托木尔峰 - 汗腾格里峰第四纪冰期探讨. *冰川冻土*, 1984, 6(2): 1-14.]
- [6] Scientific Expedition Team on Mountaineering of the CAS (ed.). *Glacier and Meteorology in Tumor Peak Region, Tianshan Mountains*. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 1985. 1-43, 85-94. [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*. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 1-43, 85-94.]
- [7] Shi Yafeng, Wang Zongtai. The road in the Muzhaerte glaciated valley in history and the traffic between the East and the West. *Journal of Glaciology and Cryopedology*, 1979, (2): 22-26, 32. [施雅风, 王宗太. 历史上的木扎尔特冰川谷道和中西交通. *冰川冻土*, 1979, (2): 22-26, 32.]
- [8] Benn D I, Owen L A. The role of the Indian summer monsoon and the mid-latitude westerlies in Himalayan glaciation: Review and speculative discussion. *Journal of the Geological Society*, 1998, 155: 353-363.
- [9] Zhao Jingdong, Liu Shiyin, He Yuqing et al. Quaternary glacial chronology of the Ateayinake River Valley, Tianshan Mountains, China. *Geomorphology*, 2009, 103(2): 276-284.
- [10] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS (ed.). *Glacier Inventory of China III: Tianshan Mountains (Interior Drainage Area of Tarim Basin in Southwest)*. Beijing: Science Press, 1987. 82-93. [中国科学院兰州冰川冻土研究所编. *中国冰川目录 III- 天山山区(西南部塔里木内流区)*. 北京: 科学出版社, 1987. 82-93.]
- [11] Walther R, Zilles D. ESR studies on bleached sedimentary quartz. *Quaternary Geochronology (Quaternary Science Reviews)*, 1994, 13(5-7): 611-614.
- [12] Rick W J. Electron Spin Resonance (ESR) dating and ESR applications in Quaternary science and archaeometry. *Radiation Measurements*, 1997, 27: 975-1025.

- [13] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, He Yuanqing et al. ESR dating of glacial tills and glaciations in the Urumqi River headwaters, Tianshan Mountains, China. *Quaternary International*, 2006, 144: 61-67.
- [14] Prescott J R, Hutton J T. Cosmic ray contributions to dose rates for luminescence and ESR dating: large depths and long-term time variations. *Radiation Measurements*, 1994, 23(2/3): 497-500.
- [15] Tanaka T, Sawada S, Ito T. ESR dating of late Pleistocene near-shore and terrace sands in southern Kanto, Japan. In: Ikeya M and Miki T (ed.). *ESR Dating and Dosimetry*. Tokyo: Ionics, 1985. 275-280.
- [16] Buhay W M, Schwarcz H P, Grün R. ESR dating of fault gouge: The effect of grain size. *Quaternary Science Reviews*, 1988, 7: 515-522.
- [17] Jin Sizhao, Deng Zhong, Huang Peihua. Study on optical effects of quartz E' Center in loess. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(22): 1865-1870.
- [18] Ye Yuguang, He Jie, Diao Shaobo et al. Study on ESR ages of late Pleistocene coastal aeolian sands. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13(3): 85-90. [业渝光, 和杰, 刁少波 等. 晚更新世海岸风成沙 ESR 年龄的研究. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13(3): 85-90.]
- [19] Ye Yuguang, Diao Shaobo, He Jie et al. ESR dating studies of paleo-debris-flows deposition Dongchuan, Yunnan Province, China. *Quaternary Geochronology*, 1998, 17: 1073-1076.
- [20] Mahaney W C, Vortisch W, Julig P J. Relative differences between glacially crushed quartz transported by mountain and continental ice: some examples from North America and East Africa. *American Journal of Science* 1988, 288: 810-826.
- [21] Yi Chaolu. Subglacial comminution: Evidence from microfabric studies and grain size analysis. *Journal of Glaciology*, 1997, 43: 174-179.
- [22] Chen Jiyang. Preliminary researches on lichenometric chronology of Holocene glacial fluctuations and on other topics in the headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains. *Science in China (Series B)*, 1989, 32(12): 1487-1500.
- [23] Yao Tandong, Thompson L G, Shi Yafeng et al. Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliya ice core. *Science in China (Series D)*, 1997, 40(6): 662-668.
- [24] Abramowski U, Bergau A, Seebach D et al. Pleistocene glaciations of Central Asia: results from ^{10}Be surface exposure ages of erratic boulders from the Pamir (Tajikistan), and the Alay-Turkestan range (Kyrgyzstan). *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(9/10): 1080-1096.
- [25] Kamp Jr U, Haserodt K and Shroder Jr J F. Quaternary landscape evolution in the eastern Hindu Kush, Pakistan. *Geomorphology*, 2004, 57(1/2): 1-27.
- [26] Owen L A, Finkel R C, Caffee M W. A note on the extent of glaciation throughout the Himalaya during the global Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 147-157.
- [27] Owen L A, Finkel R C, Caffee M W et al. Timing of multiple late Quaternary glaciations in the Hunza Valley, Karakoram Mountains, northern Pakistan: Defined by cosmogenic radionuclide dating of moraines. *Geological Society of America Bulletin*, 2002, 114(5): 593-604.
- [28] Owen L A, Finkel R C, Ma Haizhou et al. Timing and style of late Quaternary glaciation in northeastern Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(11): 1356-1364.
- [29] Zech R, Abramowski U, Glaser B et al. Late Quaternary glacial and climate history of the Pamir Mountains derived from cosmogenic ^{10}Be exposure ages. *Quaternary Research*, 2005, 64(2): 212-220.
- [30] Zech, W., Glaser, B., Abramowski, U., Dittmar, C., Kubik, P.W., 2003. Reconstruction of the Late Quaternary Glaciation of the Macha Khola valley (Gorkha Himal, Nepal) using relative and absolute (^{14}C , ^{10}Be , dendrochronology) dating techniques. *Quaternary Science Reviews*, 22(21/22): 2253-2265.
- [31] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Liu Shiyin et al. A preliminary study of the glacier advance in MIS3b in the western alpine regions of China. *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. *冰川冻土*, 2007, 29(2): 233-241.]
- [32] Shi Yafeng, Yao Tandong. MIS3b (54-44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 1-9. [施雅风, 姚檀栋. 中低纬度 MIS3b(54-44 ka BP)冷期与冰川前进. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 1-9.]
- [33] Shi Yafeng, Liu Xiaodong, Li Bingyuan et al. A very strong summer monsoon event during 30-40 ka BP in the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its relation to precessional cycle. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (20): 1851-1858.
- [34] Berger A. Long-term variations of caloric insolation resulting from the Earth's orbital elements. *Quaternary Research*, 1978, 9: 139-167.
- [35] Wu Jinglu, Wang Sumin, Shi Yafeng et al. Temperature estimation by oxygen-stable record over the past 200ka in Zoige Basin. *Science in china (Series D)*, 2000, 43(6): 577-586.

- [36] Wu Jinglu, Wang Sumin, Pan Hongxi et al. Climatic variations in the past 140ka recorded in core RM, east Qinghai-Xizang Plateau. *Science in china (Series D)*, 1997, 40(4): 443-448.
- [37] Li Shijie, Qu Rongkang, Zhu Zhaoyu et al. A carbonate content record of late Quaternary climate and environment changes from lacustrine core TS95 in Tianshuihai lake basin, northwestern Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 58-65. [李世杰, 区荣康, 朱照宇等. 24 万年来西昆仑山甜水海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 58-65. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 58-65.]
- [38] Zhang Hucai, Peng Jinlan, Ma Yuzhen et al. Late Quaternary palaeolake levels in Tengger Desert, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 211(1/2): 45-58.
- [39] Zhang Hucai, Wünnemann B, Ma Yuzhen et al. Lake level and climate changes between 42000 and 18000 14C yr BP in the Tengger Desert, northwestern China. *Quaternary Research*, 2002, 58(1): 62-72.
- [40] Li Bingyuan. The last greatest lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 174-182. [李炳元. 青藏高原大湖期. *地理学报*, 2000, 55(2): 174-182.]
- [41] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50000 years. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(1/2): 163-178.

Glacial Geomorphology and Glaciations in the Muzhaerte River Valley, Tianshan Mountains

ZHAO Jingdong¹, WANG Jie², LIU Shiyin¹

(1. *State Key laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;*

2. *Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: The Muzhaerte River Valley is located on the southeastern slope of the Tumor Peak, the largest center of modern glaciation in the Tianshan Mountains of China. Four sets of moraines are well-preserved in the valley and on the piedmont. The landforms contain vital information about the variation of the palaeo-environment, and studies on them make it easy to understand the change of ancient glaciers and to reconstruct the palaeo-environment in this region. Electron spin resonance (ESR) dating of a well-exposed section, end moraines and associated outwashes, fluvial sediments on the Kezibulake moraines were carried out using Ge centers in quartz grains, which are sensitive to the sunlight and grinding. Considering the principles of geomorphology and stratigraphy and the available data of the palaeo-environment, some conclusions can be drawn as follows: the first set of moraines, consisting of 3-4 end moraines, were deposited in Little Ice Age; the Tugaibieliqi end moraine was the sediment of the Neo-glacial; the Pochengzi end moraines and the Kezibulake moraines were determined to deposit in the last glaciation and in MIS6. The Pochengzi end moraines and their dates demonstrate that at least three large glacial advances occurred during the last glaciation, corresponding to MIS4, MIS3b and MIS2, respectively. Furthermore the result shows that the glaciers were compound valley ones in MIS2 and MIS3b, while they were piedmont ones in MIS4 and MIS6. The length of the ancient Muzhaerte glacier was about 92~99 km during the Pochengzi glaciation and about 120 km during the Kezibulake glaciation.

Key words: glacial geomorphology; ESR dating; marine oxygen isotope stage; Muzhaerte River; Tianshan Mountains