

天山阿特奥依纳克河流域冰川沉积序列

赵井东^{1,2}, 刘时银¹, 何元庆¹, 邓晓峰¹, 上官冬辉¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈与环境重点实验室, 兰州 730000;

2. 徐州师范大学城市与环境学院, 徐州 221116)

摘要: 阿特奥依纳克河位于我国天山的最西段, 最大现代冰川作用中心托木尔峰的南麓。在第四纪冰期与间冰期的气候旋回中, 该处留下了形态较为完整的 6 套冰川沉积。应用 ESR 测年技术 (辅以 OSL 测年技术) 对冰碛物及其相应的冰水沉积物进行了定年, 测得 6 套冰碛年龄分别为 $7.3 \pm 0.8\text{ka BP}$ (OSL, 冰水沙); $12.3 \pm 1.2\text{ka BP}$ (OSL) 与 $15\text{--}29\text{ka BP}$; $46\text{--}54\text{ka BP}$; $56\text{--}65\text{ka BP}$; $155.8 \pm 15.6\text{ka BP}$ 与 $234.8 \pm 23.5\text{ka BP}$; $453.0 \pm 45.3\text{ka BP}$, 测年结果表明它们分别形成于新冰期、海洋同位素阶段(MIS)2、3b、4、6、12。第三套冰碛测年结果表明该处 MIS3b 冰进规模较大, 其规模基本上与末次盛冰期 (MIS2) 的规模相当。此处最老冰碛测年结果与我国中段天山乌鲁木齐河源高望峰冰碛的测年结果 ($459.7 \pm 46\text{ka BP}$ 与 477.1ka BP) 遥相呼应, 老冰碛的年龄显示我国天山西段与中段至少于 MIS12 进入了冰冻圈, 开始发育冰川。

关键词: ESR 测年; 末次盛冰期; 冰川沉积; 海洋同位素阶段; 天山

1 引言

具有“大陆温度计”之称的冰川对气候变化的反应非常敏感, 在第四纪全球性的气候变化, 即冰期与间冰期的冷暖气候交替中, 冰川作用区留下了丰富的冰川遗迹。这些遗迹是过去冰冻圈变化最直接的证据, 对它们的研究可以恢复古冰川作用的期次与过去冰冻圈的变化情况, 为古环境重建提供基本信息, 而对这些古冰川遗迹进行精确定年又是获得这些信息的基本要求。在早期的第四纪冰川作用研究中, 由于难以在冰川遗迹中找到合适的测年材料或者受到测年技术的限制, 所以研究进展较为缓慢。近年来, 由于测年技术的快速发展, 特别是可对冰川沉积或冰川侵蚀地形进行直接定年的电子自旋共振 (electron spin resonance, ESR) 法、光释光 (optically simulated luminescence, OSL) 法、宇宙射线成因核素 (cosmogenic radionuclide, CRN) 法等测年技术的发展与应用, 推动和加速了第四纪冰川研究的发展, 再次掀起了第四纪冰川作用研究的热潮。目前, 第四纪冰川研究已经进入了一个以技术定年为特征的研究阶段, 国内外学者对第四纪冰川作用进行了新的研究与探讨, 取得了可喜的成就, 在一些研究区发现了从小冰期到 MIS16~18 完整或部分的冰川沉积序列^[1-18]。另外, 第四纪冰川研究中也出现了新的学术理论 - 海洋同位素阶段 (marine isotope stage, MIS) 3 发生了规模较大的冰进事件, 在某些研究区其规模甚至超过了末次冰期最盛期的冰川规模^[15-18]。施雅风院士初步检阅现代有测年资料的末次冰期冰川前进文献, 发现 MIS3b ($54\text{--}44\text{ka BP}$) 冷期导致的山地冰川前进分布在亚洲、欧洲、北美洲、南美洲、大洋洲 12 个地区 23 个地点^[19]。这些研究成果将导致对第四纪冰川作用与第四纪环境演变的再认识。

收稿日期: 2005-07-05; 修订日期: 2006-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40501007; 40571034; 90511007) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40501007; No.40571034; No.90511007]

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

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

托木尔峰地区是我国第四纪冰川作用遗迹比较典型，保存较为完整的地区。自 20 世纪 40 年代起，中外学者就对该地区的第四纪冰川作用开展了研究，提出了数次冰川作用^[20-28]。受当时科学技术发展水平的限制，不能对冰川沉积物或者是冰川侵蚀地形进行定年，故存在一些争议。近年来，我们应用 ESR 测年技术（辅以 OSL 测年技术）对保存在阿特奥依纳克河流域的冰碛物、冰水沉积以及相邻的乌孜科勒苏河东岸冰碛进行了测年。本文在此基础上作出阿特奥依纳克河流域与相邻区域完整的第四纪冰川沉积序列。

2 研究区概况

阿特奥依纳克河 (41°48'~41°43'N, 80°03'~80°21'E) 发源于天山最西段，最大现代冰川作用中心托木尔峰的南坡。河源区山脊线的高度一般介于 4000~5300m，最高峰为科契卡尔峰 (6342m a.s.l)。该流域的雪线高度约 4300m，存在约 2000m 的冰川作用正差，巨大的冰川作用正差使得源头发育了大型的山谷冰川。根据冰川编目统计，该流域共有冰川 13 条 (图 1)，冰川类型有复合型山谷冰川、山谷冰川、冰斗冰川和悬冰川，冰川总面积 106.76km²，冰储量为 17.9374km³^[29]。科契卡尔巴西冰川是该流域最大的复合型山谷冰川，冰川长 26km，平均宽约 3.3km，冰川末端被 2~3.5m 的表碛所覆盖，随着高度上升，表碛逐渐变薄，海拔 3700m 以上为裸冰。阿特奥依纳克河全长约 40km，年径流总量约 1.1×10⁸ m³ (表 1)，冰川融水是该河流主要的补给来源，补给比例高达 80% 以上。自北向南流入温宿县，为温宿县及周边地区经济发展提供了重要的淡水资源。

3 古冰川沉积序列

3.1 现代冰碛与小冰期冰碛

冰川规模的大小影响到冰川对气候变化响应的灵敏度，一般而言，规模大的冰川对气候变化的响应不如规模小的冰川灵敏。根据笔者与课题组成员 2004~2005 年两次较为详细的考察发现：该流域小冰期 (既 17 世纪以来的气候变冷波动导致的冰

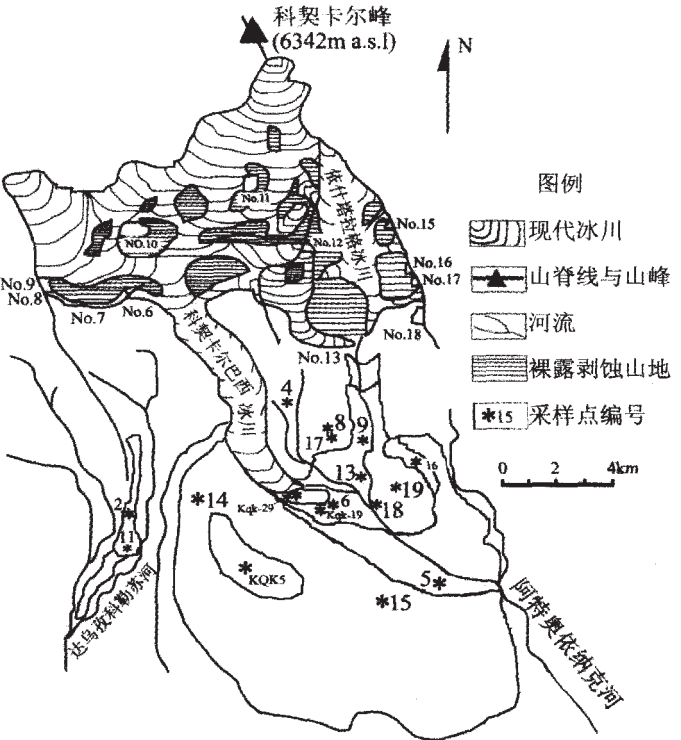


图 1 阿特奥依纳克河流域现代冰川分布图及采样点
Fig. 1 Modern glaciers in the headwaters of the Ateayinake River Valley and sampling sites

表 1 阿特奥依纳克河流域大的山谷冰川及其相关参数

Tab. 1 Basic parameters of the larger valley glaciers in the Ateayinake River Valley

冰川编号或名称	长度 (km)	宽度 (km)	雪线 (m a.s.l)	冰川末端 (m a.s.l)	面积 (km ²)	冰储 (km ³)
科契卡尔巴西冰川	26	3.3	4460	3060	83.56	15.7928
No. 13	6.1	1.0	4160	3460	6.24	0.5054
依什塔拉格冰川	8.2	1.8	4300	3432	14.77	1.5952

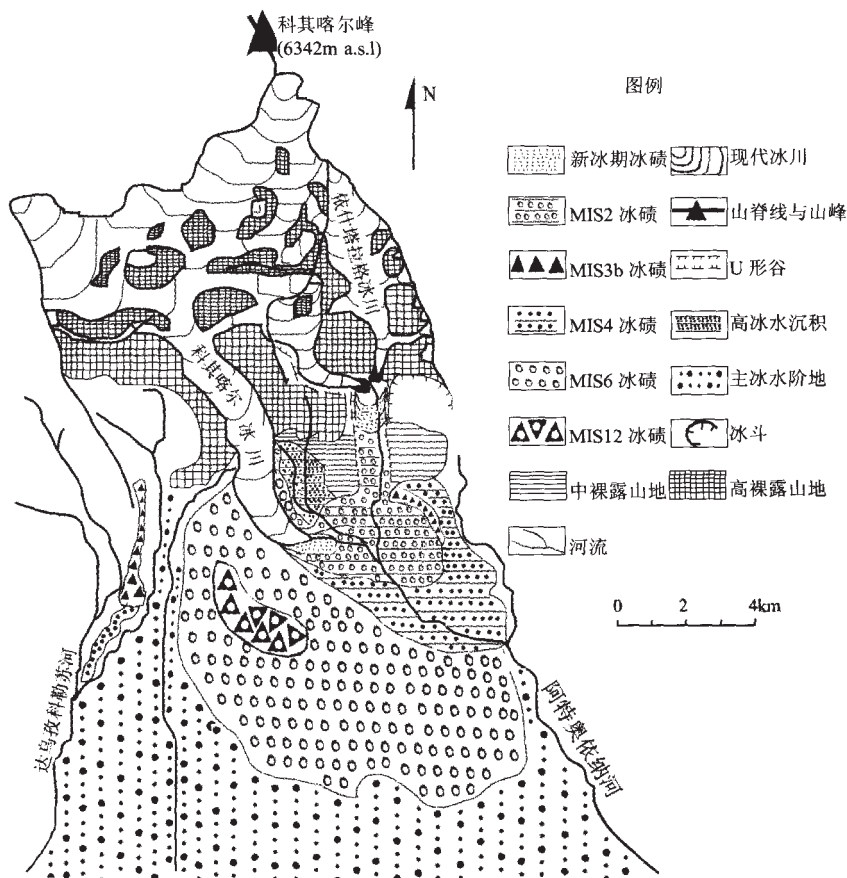


图 2 阿特奥依纳克河流域冰川沉积分布图
Fig. 2 Distribution of the glacial sediments in the Ateayinake River Valley

进事件) 冰碛在规模小的冰斗冰川与悬冰川的末端都有保存, 通常有 1~3 道终碛垅。规模大的山谷冰川的末端保存很差, 基本上难觅其踪迹。如科契卡尔巴西冰川是该流域最大的山谷型冰川, 从末端 3060m 直到 3700m, 长约 8km 基本为表碛所覆盖。其末端现代冰碛沉积较少, 没有保存小冰期冰碛。在冰川两侧各有一道高出冰面 3~6m 的侧碛垅, 其岩性有花岗岩、片麻岩、砂岩、砾岩、石灰岩与页岩。侧碛垅的冰碛表面新鲜, 漂砾表面擦痕清晰, 基本上没有发生风化, 尚无土壤发育与植被覆盖, 只有地衣等先锋性的植物生长其上。在海拔约 3100m 处的侧碛垅上采集到数个灌木样本年轮显示, 它们已经生长了 72~77 年。由此推断冰川两侧的冰碛垅形成于小冰期是合理的。

3.2 河谷到山麓带的 6 套古冰川沉积

从该流域最大的复合型山谷冰川—科契卡尔巴西冰川末端到山麓带, 沉积了 6 套形态较为完整、典型的冰碛物 (图 2)。

第一套冰碛是由数道高 3~10m 终碛垅所组成, 分布在科契卡尔巴西冰川末端向下约 1km 的范围内, 终止于海拔 2990m。在冰川末端, 有一部分终碛被表面新鲜、无风化的冰碛所覆盖, 这些冰碛系 20 个世纪 40~70 年代冰进形成的现代冰碛^[25], 目前, 科契卡尔巴西冰川处于退缩状态。冰碛的性以花岗岩、片麻岩、砂岩、砾岩、红色泥岩为主。与科契卡尔巴西冰川末端第一套冰碛相应的冰碛分布在依什塔拉格冰川和 No.13 冰川共同塑造而成的形态完美的“U”形谷中, 在谷中连绵分布约 1km, 系三列终碛垅组成。最里面一列终碛垅距依什塔拉格冰川末端约 1.2km, 冰碛厚 3~6m。宽约 60m; 中间一道宽约

150m, 高 5~8m。最外一列规模最大, 宽约 400m, 高 6~10m。依什塔拉格河从终碛垅的东侧切穿而过。这三道终碛垅的岩性基本一致, 以花岗岩、片麻岩、石灰岩、叶岩等为主。其上发育一层薄的灰色土壤, 生长有牧草。

第二套冰碛分布在距科契卡尔巴西冰川末端 1~5km 的范围内, 距依什塔拉格冰川末端约 5km。为一地形起伏和缓的冰碛丘陵, 表明当时科契卡尔巴西冰川、依什塔拉格冰川与 No.13 冰川已经连成一体, 为一大型的复合型的山谷冰川, 从海拔 2900m 一直延伸到 2700m。这套冰碛的面积约 12km²。这套冰碛有数道规模较大的终碛垅组成, 冰碛已有一定程度的风化与密实, 冰碛基本上被 20~30cm 黄褐色的土壤层与下覆约 0.5m 厚的类黄土沉积物所覆盖, 巨大的冰川漂砾点缀其上。岩性有花岗岩、片麻岩、砂岩砾岩与石灰岩。

第三套冰碛分布范围与第二套冰碛基本一致, 因为受到第二套冰碛沉积时候冰川作用的改造与第二套冰碛的覆盖, 所以从表面形态特征看, 这两套冰碛难以辨别开来。不过在被河流冲开的剖面中可以清楚的看出双层结构, 下层冰碛层中红色的泥岩与砂岩的比例明显高于上层。下层有挤压扰动现象, 它们之间存在明显的推覆关系。在第二套冰碛东北边缘, 残存了面积约 1km², 相对高度 3~5m, 宽约 200~350m 的终碛垅系这次冰川作用沉积而成。终碛岩性有花岗岩、片麻岩、红色的泥岩、红色的砂岩、页岩等。

第四套冰碛的面积约 20km², 分布在海拔 2700~2250m 的范围内, 相对高差 40~60m。出现了数列呈弧形向东南方向突出的终碛垅, 这套冰碛表面沉积了近 1m 的黄土, 表层黄褐色的土层约 30cm, 生长稀疏的灌丛, 有零星的旱柳与白杨点缀其上。这套冰碛的岩性主要有花岗岩、石英岩、砾岩、砂岩等。2700~2500m 之间冰碛断续分布, 无疑, 这些冰碛是这次冰川作用结束后, 冰川消退留下的, 因为形成时间相对较长, 细颗粒的冰碛已被外营力搬走, 残留下来的只是一些颗粒较大的漂砾。

第五套冰碛规模是本流域最大的, 它与科契卡尔巴西冰川右侧, 从海拔约 3300m 向东南方向延伸的侧碛相连接, 从北向南呈扇形展开, 外围一直分布到海拔 2100m 左右, 面积约 40km²。这套冰碛密实度较高, 有一定程度的胶结, 胶结物质主要是硅质, 中间还含有一定的钙质。冰碛的厚度 3~8m。暴露在表层的漂砾风化较严重, 用手可以轻松地将沙粒剥落, 这些漂砾的粒径多在 1~3m。这套冰碛表层沉积厚约 2m 的黄土—古土壤系列, 在剖面中可以清晰的看到 4~6 个炭屑夹层。较高地方表面长着茂密的草甸, 随着高度的降低, 草类也逐渐变的稀疏, 代之是矮小稀疏的灌木。另外, 科契卡尔巴西冰川左前方从海拔 3250m 到 3000m, 宽 100~300m, 长约 3km 高大的侧碛垅的胶结程度与风化程度都与该套冰碛相一致, 故它们是同一次冰川作用形成的。岩性以花岗岩、红色砂岩、砾岩为主。

第六套冰碛为一个高的冰碛平台, 残留在科契卡尔巴西冰川的右侧。4~7m 厚的冰碛残存在第三系红色基岩上, 最高处海拔 3356m。巨大的, 表面严重风化的花岗岩漂砾点缀其上。最大的一块花岗岩漂砾出露部分是 8×6×2.5 m³。从出露的剖面看, 冰碛大小混杂, 主要组成有花岗岩、片麻岩、砾岩, 红色砂岩等, 胶结严重, 主要胶结物质为硅质。

4 研究方法 & 结果

本研究的测年样品严格按照样品采集要求采自于天然剖面或人工开挖的剖面 (图 1), 获得测年数据 17 个 (表 2)。主要应用的是 ESR 年代测定技术 (辅以 OSL 测年技术)。ESR 样品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, 处理好的样品用 ⁶⁰Co 进行了人工辐照, 测定工作在青岛海洋地质研究所测试中心完成。选用 Ge 心作为测年信号在德国 Bruker 公司 ECS106ESR 谱仪进行。测试的条件是: 室温、X 波段、微波功率为 2mW, 调制振幅为 0.1mT、中心磁场为 348mT、扫描宽度为 5mT、转换时间为

表 2 ESR 与 OSL 测年结果与相关参数及采样地点
Tab. 2 The ESR and OSL dating results as well as the correlated parameters and sampling sites

实验室 编号	采样位置	U (10 ⁻⁶)	Th (10 ⁻⁶)	K ₂ O (%)	含水量 (%)	TD (Gy)	年龄 (ka BP)
2	达乌孜科勒苏河东岸 (海拔 2862m) 冰碛	2.17	29.1	3.44	3.14	124.1	21.5±2.2
4	U 形谷谷口西侧约 2km 冰水沉积	2.41	13.3	2.87	5.01	260.2	64.3±6.4
5	第四套冰碛	1.2	14.8	0.016	7.52	89.5	64.4±6.4
6	第二套冰碛	1.26	18.4	3.96	9.67	72.3	15.0±1.5
8	红山附近对应于第四套冰碛的冰水沉积	1.16	23.4	3.67	11.15	271.2	56.1±5.6
9	依什塔拉格冰川 U 形谷口冰碛	1.98	10.8	2.78	4.31	67.7	18.3±1.8
11	达乌孜科勒苏河东岸冰碛	1.21	5.5	3.58	1.37	112.4	28.7±2.9
13	第三套 (冰碛丘陵剖面底部) 冰碛	1.13	9.39	3.87	1.73	227.5	51.3±5.1
14	第五套冰碛-1	1.16	3.99	1.14	1.04	253.9	155.8±15.6
15	第五套冰碛-2	1.42	12.7	2.94	5.88	887.6	234.8±23.5
16	第三套冰碛 (距 U 形谷谷口东约 1km)	1.94	11.7	3.5	1.03	246.1	54.4±5.4
17	U 形谷谷口西侧约 2km 冰水沉积下覆磨圆度很好的河流相砾石沉积	3.4	10.6	2.7	2.19	525.4	129.1±12.9
18	科契卡尔巴西冰川融水与依什塔拉格冰川融水汇合处 (剖面底部) 冰碛	1.54	16.4	3.46	7.12	207.5	46.5±4.7
19	距科契卡尔巴西冰川末端约 3km 处冰碛	1.87	14.6	3.08	3.47	115.9	27.2±2.7
KQK5	冰碛平台 (青山头) 冰碛	1.59	13.5	3.59	3.2	2061.2	453.0±45.3
Kqk-29#	科契卡尔巴西冰川末端冰碛中冰水沙	1.87	4.87	2.42	2	24.98±2.66	7.3±0.8
Kqk-19#	第二套冰碛 (最里面一道终碛垅的内侧)	2.09	15	2.86	3	52.26±5.07	12.3±1.2

带#号的为 OSL 测年结果与参数

5.12ms、时间常数为 40.96ms、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, 典型的 ESR 波谱如图 3 所示。根据人工辐照剂量与其相应的 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) (图 4)。年剂量 (D) 计算的 U、Th、K₂O 等放射性元素含量用激光荧光法、比色分光光度法和原子吸收技术进行了测定。样品年龄计算公式为:

样品年龄 = TD / D

式中: TD 为累积剂量, D 为年剂量率。冰碛 (冰水沙) 的 OSL 年龄在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所释光实验室中完成。

5 讨论

5.1 石英颗粒中 Ge 心的回零机制

ESR 测年的假设前提是沉积物中的顺磁中心在受热、碰撞、暴光、重结晶或者是其它地质营力作用时可以归零。沉积物沉积后, 在自然界中放射性元素衰败产生的射线与宇宙射线的辐照下, 顺磁中心重新形成, 并随时间不断积累。以前的学者研究表明: 石

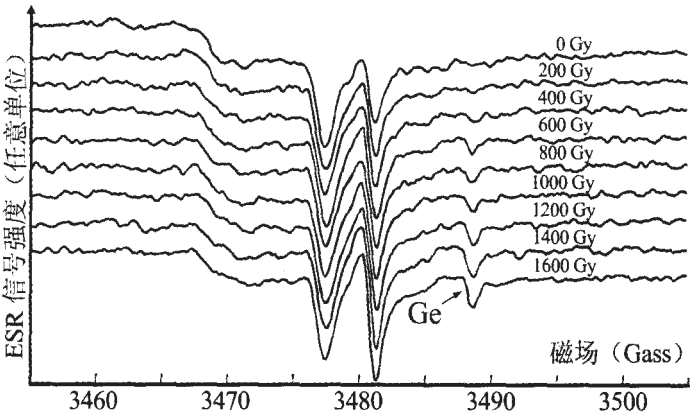


图 3 室温条件下典型的 ESR 波谱图
Fig. 3 Typical ESR spectra at room temperature

英颗粒中的 Ge 心对光照与研磨比较敏感, 这些机制可使它回零^[30-33]。根据冰川运动理论, 冰川携带的物质在冰川运动过程中有暴光的机会, 而且在冰川运动过程中, 所携带的物质也将被研磨, 如冰川沉积中细颗粒物基本上都是这种方式形成的。所以, 冰碛物与冰水沉积物满足 ESR 测年的先决条件。OSL 测年原理与 ESR 测年原理相似, 即沉积物曝光, 测年信号回零, 沉积物沉积后信号重新积累。

5.2 冰川沉积序列与 MIS3b 冰进探讨

科契卡尔巴西冰川末端冰碛中冰水沙的 OSL 年龄为 $7.3 \pm 0.8\text{ka BP}$, 说明科契卡尔巴西冰川末端第一套冰碛形成于新冰期, 当时科契卡尔巴西冰川长 27km。对于其它 5 套冰碛年龄与所对应的冰川作用需深入的探讨。

海洋同位素阶段被认为是全球气候变化的记录者, 同时也能反映陆地上冰量的变化。因此, 不少学者将他们的研究成果与海洋同位素阶段进行对比^[4-19, 34]。第二套冰碛测得了 3 个年龄, 分别是 $15.0 \pm 1.5\text{ka BP}$ (No.6)、 $18.3 \pm 1.8\text{ka BP}$ (No.9) 与 $27.2 \pm 2.7\text{ka BP}$ (No.19), 这些测年结果表明这套冰碛沉积于末次冰期的晚期, 与 MIS2 相对应。该年龄说明当时科契卡尔巴西冰川的长为 31km, 科契卡尔巴西冰川、依什塔拉格冰川与 No.13 冰川当时连成了一复合型的山谷冰川。测得科契卡尔巴西冰川西南约 4km 的达乌孜科勒苏河东岸冰碛的两个年龄, 它们为 $21.5 \pm 2.2\text{ka BP}$ (No.2) 与 $28.7 \pm 2.9\text{ka BP}$ (No.11), 测年结果显示那里的冰碛与该处的第二套冰碛是同期形成的。另外, 我们运用 OSL 测年技术测得该套最里面的终碛垅 (内侧) 年龄为 $12.3 \pm 1.2\text{ka BP}$, 这个年龄对应于新仙女木冷事件, 是否该处沉积了新仙女木冷期冰进的冰碛需要深入的研究。

第三套冰碛共测得 3 个 ESR 年龄, 它们分别为 $51.3 \pm 5.1\text{ka BP}$ (No.13), $54.4 \pm 5.4\text{ka BP}$ (No.16), $46.5 \pm 4.7\text{ka BP}$ (No.18), 年代数据显示这套冰碛沉积于 MIS3b。是否这套冰碛确实沉积在这个时段, 在此需要深入探讨。冰川的发育需要地形、地势与气候三个条件的配合, 其中气候条件最为重要。在气候条件中尤以温度与降水 (指固态降水) 对冰川发育影响为大, 如果温度保持不变, 那么降水的增加必然导致冰川的前进, 即使温度有稍微的上升, 大量的降水也可以弥补冰川的消融而使得冰川出现前进。根据古里雅冰芯中稳定同位素记录, MIS3 阶段中存在一个时间较长的冷事件^[35]。最近的研究提出 MIS3 可以细划成 a, b, c 个亚阶段, 其中 3b ($54\sim44\text{ka BP}$) 为一个冷湿期, 导致冰川前进^[19]。一些学者在喜马拉雅山南坡的研究结果显示, MIS3 冰进规模甚至比末次冰期最盛期的规模还大。他们将这种现象归结为强大的印度季风环流带来大量的降水所致^[15-18]。如果用强大的季风环流来解释本区该套冰碛的形成就显得力不从心, 因研究区位于西风环流带, 受西风环流北支的控制, 基本上不受到亚洲季风环流的影响。虽然古里雅冰芯记录显示, MIS3 存在近 10ka 的低温阶段, 如果没有丰富的降水配合, 仅凭 3 个 ESR 年龄很难让人相信第三套冰碛沉积于 MIS3b。那么研究区在 MIS3, 特别是 MIS3b 是否是一个降水较为丰富的阶段呢? 笔者查阅近几年来关于末次间冰段降水情况的研究资料发现:

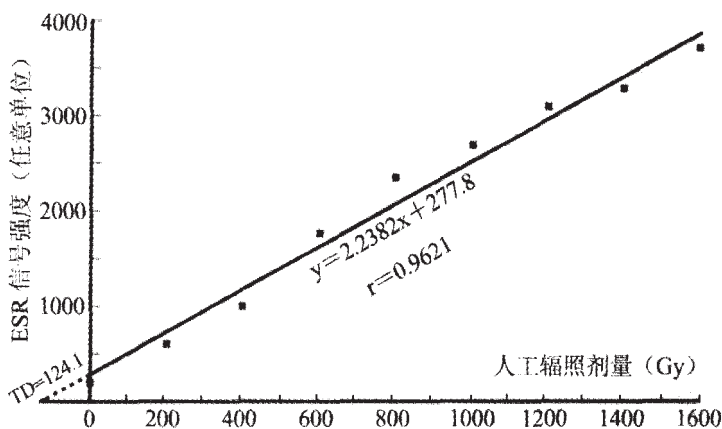


图 4 No.2 样品人工辐照剂量与 ESR 信号强度之间的线性拟合曲线

Fig. 4 The fitting curve between artificial radiation doses and ESR signal intensity of No.2 sample

在青藏高原以及我国西北内陆的河西走廊与新疆地区，在 MIS3 中期与晚期阶段出现了高湖面，大湖期^[36-42]。高湖面、大湖期的出现是降水丰富最直接的证据。关于这个阶段丰富的降水的地质记录目前还没有一个让众多学者都接受的解释，笔者结合现有的研究资料推测 MIS3 丰富的降水事件的可能原因是：巨大的极地冰盖虽然在这个时期处于退缩状态，不过对气候环境影响仍然很大，依然巨大的极地冰盖迫使西风带南移，较强的夏季西风波动有利于青藏高原西部与内陆地区降水的增加，这种现象在 MIS3 的早期与中期应该比中晚期更显著。另外，本段天山又是整个天山山脉的最高峰之所在，地形的配合更有利于降水的增加。丰富的降水导致了研究区冰川的大规模前进，所以，第三套冰碛形成于 MIS3b 是可信的。从现有的遗迹看，MIS3b 冰碛与末次冰期最盛期的规模相当，当时科契卡尔巴西冰川、依什塔拉格冰川与 No.13 冰川共同形成规模巨大的复合型山谷冰川，冰川长约 31km。

第四套冰碛测得了一个 ESR 年龄为 $64.4 \pm 6.4\text{ka BP}$ (No.5)，两个与其对应的冰水沉积的 ESR 年龄为 $64.3 \pm 6.4\text{ka BP}$ (No.4) 与 $56.1 \pm 5.6\text{ka BP}$ (No.8)。在距离“U”形谷谷口约 2km 的剖面中，这个时期的冰水沉积与其下伏磨圆度很好的河流相砾石有很好的沉积接触关系，河流相砾石的年龄为 $129.1 \pm 12.9\text{ka BP}$ (No.17) (图 5)。由此推测这套冰碛沉积于末次冰期的早期，对应于 MIS4。这时候冰川的规模更大，长约 35km，为一宽尾山谷冰川。

第五套冰碛的年龄为 $155.8 \pm 15.6\text{ka BP}$ (No.14) 与 $234.8 \pm 23.5\text{ka BP}$ (No.15)，这两个年龄与我国天山中段乌鲁木齐河源望峰道班房附近冰碛平台下部测得的 $171.1 \pm 17\text{ka BP}$ 、 $176 \pm 18\text{ka BP}$ 与 $184.7 \pm 18\text{ka BP}$ 相对应^[12]。年龄说明这套冰碛形成于 MIS6，当时冰川的长度变化不大，约为 37km，它已经演变为一宽达数十公里，溢出山口的山麓冰川。

第六套冰碛从实地考察即可知它是该处最老的冰碛，残存在第三纪红色的基岩上，获得的测试年龄为 $453.0 \pm 45.3\text{ka BP}$ (KQK5)，对应于 MIS12。这个年龄与天山中段乌鲁木齐河源高望峰的年龄 ($459.7 \pm 46\text{ka BP}$ 和 477.1ka BP) 非常的一致^[6, 11]。这三个年龄说明，我国天山西段与中段至少于 MIS12 抬升到与当时冰期气候相对应的高度，进入冰冻圈，开始发育冰川。

6 结论

(1) 阿特奥依纳克河流域冰川有 6 套冰碛。距离冰川末端 0.2~1km 的第一套冰碛形成于新冰期，当时科契卡尔巴西冰川长 27km。其它五套冰碛分别沉积于 MIS2、3b、4、6、12。MIS3b 冰进的规模与末次盛冰期 (MIS2) 的规模相当，这两个阶段冰川长度都为 31km。

(2) 从阿特奥依纳克河流域现存的古冰川遗迹看，共有冰川类型 3 种。MIS2-3 冰川为大型的复合型山谷冰川；MIS4 冰川为大型的宽尾山谷冰川，冰川长度为 35km；MIS6 冰川为溢出山口的山麓冰川，冰川长度为 37km。

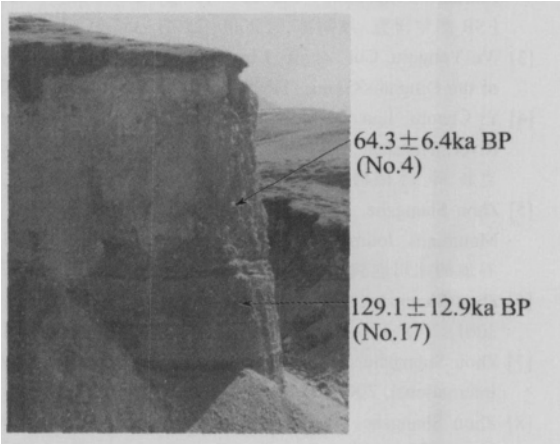


图 5 第四套冰碛测冰水沉积与下伏河流沉积之间的沉积接触关系
Fig. 5 Sedimentation relationship between outwash and underlying fluvial deposits

(3) MIS12 最老冰碛年龄与我国天山中段乌鲁木齐河源高望峰冰碛年龄遥相呼应, 说明我国天山西段与中段至少于 MIS12 抬升到与当时冰期气候相对应的高度, 进入冰冻圈, 开始发育冰川。

致谢: 中科院寒旱所释光实验室赵辉博士对 OSL 样品进行了测试; 青岛海洋地质研究所高级工程师刁少波对 ESR 样品进行了测试; 野外工作组中张勇博士、韩海东博士、王建博士在野外工作中给予了支持与帮助, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

- [1] Kuang Mingsheng, Li Jijun, Zhao Yu et al. A study on the Quaternary glacial relics in the Gongwang mountains in the northeast part of Yunnan Province. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1997, 19(4): 366-372. [况明生, 李吉均, 赵瑜等. 云南东北部拱王山第四纪冰川遗迹研究. *冰川冻土*, 1997, 19(4): 366-372.]
- [2] Shi Zhengtao, Zhang Shiqiang, Zhou Shangzhe et al. Study of ESR dating of Quaternary moraine, Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(4): 353-357. [史正涛, 张世强, 周尚哲等. 祁连山第四纪冰碛物的 ESR 测年研究. *冰川冻土*, 2000, 22(4): 353-357.]
- [3] Wu Yongqiu, Cui Zhijiu, Liu Gengnian et al. Quaternary geomorphological evolution of the Kunlun Pass area and uplift of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Geomorphology*, 2001, 36: 203-216.
- [4] Yi Chaolu, Jiao Keqing, Liu Kexin et al. ESR dating on tills and the last glaciations at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 389-393. [易朝路, 焦克勤, 刘克新等. 冰碛物的 ESR 测年与天山乌鲁木齐河源末次冰期系列. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 389-393.]
- [5] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang et al. Glacial geomorphology and ice age in the Bailang River Basin, Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(2): 131-138. [周尚哲, 李吉均, 张世强等. 祁连山摆浪河谷地的冰川地貌与冰期. *冰川冻土*, 2001, 23(2): 131-138.]
- [6] Zhou Shangzhe, Yi Chaolu, Shi Yafeng et al. Study on the ice age MIS12 in western China. *Journal of Geomechanics*, 2001, 7(4): 321-327. [周尚哲, 易朝路, 施雅风等. 中国西部 MIS12 冰期研究. *地质力学学报*, 2001, 7(4): 321-327.]
- [7] Zhou Shangzhe, Li Jijun, Zhang Shiqiang. Quaternary glaciation of the Bailang River Valley, Qilian Shan. *Quaternary International*, 2002, 97-98: 103-110.
- [8] Zhou Shangzhe, Jiao Keqing, Zhao Jingdong et al. Geomorphology of the Urumqi River Valley and the uplift of the Tianshan Mountains in Quaternary. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(11): 961-968.
- [9] 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. *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. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 2001, 37(4): 110-117.]
- [10] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin et al. ESR chronology of Bailanghe Valley and new understanding of Qilianshan Mountain's Quaternary glaciation. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 481-488. [赵井东, 周尚哲, 崔建新等. 摆浪河流域的 ESR 年代学与祁连山第四纪冰期新认识. *山地学报*, 2001, 19(6): 481-488.]
- [11] Zhao Jingdong, Zhou Shangzhe, He Yuanqing et al. ESR dating of glacial tills and glaciations in the Urumqi River headwaters, Tianshan Mt., China. *Quaternary International*, 2006, 144: 61-67.
- [12] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Li Chang'ai et al. The Quaternary glaciation in Rongbacha and correlation with the loess-paleosol in Garz. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(5): 504-509. [许刘兵, 周尚哲, 李昌爱等. 甘孜绒坝岔古冰川演化与黄土古土壤对比研究. *冰川冻土*, 2003, 25(5): 504-509.]
- [13] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Cui Jianxin et al. Dating of the Pleistocene glaciations around the Daocheng ice cap. *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. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 528-534.]
- [14] J rg M Schafer, Silvio Tschudi, Zhizhong Zhao et al. The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170000 yr. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 194: 287-297.
- [15] 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: 147-157.
- [16] Owen L A, Kamp J, Spencer J Q et al. Timing and style of Late Quaternary glaciation in the eastern Hindu Kush, Chitral, northern Pakistan: a review and revision of the glacial chronology based on new optically stimulated luminescence dating. *Quaternary International*, 2002, 97-98: 41-55.
- [17] Zech W, Glaser B, Abramowski U et al. Reconstruction of the Late Quaternary Glaciation of the Macha Khola valley

- using relative and absolute dating techniques. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 2253-2265.
- [18] Kamp U Jr, Haserodt K, Shroder J F Jr. Quaternary landscape evolution in the eastern Hindu Kush, Pakistan. *Geomorphology*, 2004, 57: 1-27.
- [19] Shi Yafeng, Yao Tandong. MIS 3b (54-44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 21(1): 1-9. [施雅风, 姚檀栋. 中低纬度 MIS 3b (54-44ka BP) 冷期与冰川前进. *冰川冻土*, 2002, 21(1): 1-9.]
- [20] Huang T K. Pleistocene morainic and non-morainic deposits in the Taglag area, North of Agsu, Sinkiang. *Bulletin of Geological Society of China*, 1944, 24(1-2): 125-145.
- [21] Feidaoluoweiqi 巴A, 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 (memoirs)*. Beijing: Science Press, 1959. 14-31. [费道洛维奇 巴A, 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.]
- [22] Feidaoluoweiqi 巴A, 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. [费道洛维奇 巴A, 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.]
- [23] 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.]
- [24] Geomorphology Teaching and Research Section, Geography Department of Nanjing University. *Quaternary Glaciations and Ice Ages in China*. Beijing: Science Press, 1974. 1-9, 28-30, 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. 1-9, 28-30, 125-142.]
- [25] Scientific Expedition Team on Mountaineering of the Chinese Academy of Sciences. *Glacier and Meteorology in Tumur Peak Region, Tianshan Mountains*. Urumqi: 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. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985. 1-31.]
- [26] Zheng Benxing. Glacial geomorphological map (1:200000) of Mt. Tomur region, Tianshan. *Annals of Glaciology*, 1985, 8: 209.
- [27] Shi Yafeng, Zheng Benxing, Su Zhen et al. Study of Quaternary glaciation in Mts. Tomui-Hantengri area, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 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.]
- [28] Shi Yafeng, Zheng Benxing, Su Zhen. Glaciations, glacial-interglacial cycles and environmental changes in the Quaternary. In: Shi Yafeng (ed.), *Glaciers and Their Environments in China: The Present, Past and Future*. Beijing: Science Press, 2000. 320-355. [施雅风, 郑本兴, 苏珍. 第四纪冰川、冰期旋回与环境变化. 见: 施雅风 主编, 中国冰川与环境: 现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000. 320-355.]
- [29] 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, 1985. 69. [中国科学院兰州冰川冻土研究所编. 中国冰川目录: 天山山区 (西南部塔里木内流区). 北京: 科学出版社, 1985. 69.]
- [30] Tanaka T, Sawada S, Ito T. ESR dating of late Pleistocene near-shore and terrace sands. In: Ikeya M, Miki T (eds.), *ESR Dating and Dosimetry*. Tokyo: Ionics, 1986. 275-280.
- [31] 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.
- [32] Ye Yuguang, Diao Shaobo, He Jie et al. ESR dating studies of paleo-debris-flows deposition Dongchuan, Yunnan province, China. *Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology)*, 1998, 17: 1073-1076.
- [33] Ye Yuguang, He Jie, Diao Shaobo et al. ESR dating of the coastal wind sand of late Pleistocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13(3): 85-89. [叶渝光, 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): 85-89.]
- [34] Wang Jingtai. Ancient glaciers at the head of Urumqi River, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3 (suppl.): 55-63. [王靖泰. 天山乌鲁木齐河源的古冰川. *冰川冻土*, 1981, 3(增刊): 55-63.]
- [35] 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, 27(5): 662-668.
- [36] Jia Yulian, Shi Yafeng, Fan Yunqi. Water balance of paleolake Qinghai and its precipitation estimation at three high lake-level stages since 40 ka BP. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12 (3): 211-218. [贾玉连, 施雅风, 范云崎. 四万年以来青海湖的三期高湖面及其降水量研究. *湖泊科学*, 2000, 12(3): 211-218.]
- [37] Jia Yulian, Shi Yafeng, Cao Jianing et al. The precipitation of the interior lakes in the southwestern Tibetan Plateau at

- 40-30ka BP. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 346-351. [贾玉连, 施雅风, 曹建廷 等. 40-30ka BP 期间高湖面稳定存在时期青藏高原西南部封闭流域的古降水量重建. *地球科学进展*, 2001, 16(4): 346-351.]
- [38] Jia Yulian, Shi Yafeng, Wang Sumin et al. Lake expanding events in the Tibetan Plateau since 40ka BP. *Science in China (Series D)*, 2001, 44(suppl.), 301-315.
- [39] Jia Yulian, Shi Yafeng, Ma Chunmei et al. Comparison of paleoclimatic oscillations in Asian and African monsoon areas since 40ka BP and pan-lake period of Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 829-840. [贾玉连, 施雅风, 马春梅 等. 40ka BP 以来季风演化趋势及青藏高原泛湖期. *地理学报*, 2004, 59(6): 829-840.]
- [40] Shi Yafeng, Jia Yulian, Yu Ge et al. Features, impacts and causes of the high temperature and large precipitation event in the Tibetan Plateau and its adjacent area during 40-30 ka BP. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(1): 1-11. [施雅风, 贾玉连, 于革 等. 40-30ka BP 青藏高原及邻区高温大降水事件的特征、影响及原因探讨. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 1-11.]
- [41] Zhang Hucai, Wünnemann B, Ma Yuzhen et al. Lake level and climate changes between 42000 and 18000 ^{14}C yr BP in the Tengger Desert, northwestern China. *Quaternary Research*, 2002, 58(1): 62-72.
- [42] Yang Bao, Shi Yafeng. Warm-humid climate in Northwest China during the period of 40-30ka BP: geological records and origin. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(1): 60-68. [杨保, 施雅风. 40-30ka BP 中国西北地区暖湿气候的地质记录及成因探讨. *第四纪研究*, 2003, 23(1): 60-68.]

The Glacial Sediments Sequences in the Ateayinake River Valley, Tianshan Mountains

ZHAO Jingdong^{1,2}, LIU Shiyin¹, HE Yuanqing¹,
DENG Xiaofeng¹, SHANGGUAN Donghui¹

(1. Key Laboratory of Cryosphere and Environment, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;

2. College of Urban and Environmental Science, Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Ateayinake River, located on the southern slope of the Tumer Peak in the western Tianshan Mountains in China, is the largest modern glaciation center. Six relative integrated sets of glacial tills formed in Quaternary glacial-interglacial cycles were reserved in this area. ESR dating technique (OSL dating technique as a supplementary method) was applied to determine the ages of the glacial tills and outwashes. The dating results of the six glacial groups are 7.3 ± 0.8 ka BP (OSL, outwash sand), 12.3 ± 1.2 ka BP (OSL) and 15-29 ka BP, 46-54 ka BP, 56-65 ka BP, 155.8 ± 15.6 ka BP and 234.8 ± 23.5 ka BP, 453.0 ± 45.3 ka BP respectively, indicating that they deposited in Neoglaciation, MIS2, 3b, 4, 6 and 12. The results of the third set of the glacial tills demonstrate that a larger glacier advance happened in MIS3b in this area, similar with the extent of the Last Glacial Maximum (MIS2). The age of the oldest glacial tills consistent with the ESR ages (459.7 ± 46 ka BP and 477.1 ka BP) of the Gaowangfeng glacial tills at the headwaters of the Urumqi River, demonstrating that the western and the middle sections of Tianshan Mountains entered cryosphere at least in MIS12, resulting in development of the glaciers in that period.

Key words: ESR dating; Last Glacial Maximum; glacial deposit; marine isotope stage; Tianshan Mountains