

文章编号: 1000-0240(2001)04-0389-05

冰碛物 ESR 测年与天山乌鲁木齐河源 末次冰期系列

易朝路^{1,2}, 焦克勤³, 刘克新⁴, 李 玲¹, 业渝光⁵

(1. 中国科学院 测量与地球物理研究所环境与国土研究室, 湖北 武汉 430077; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所
冰芯与寒区环境开放研究实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000;
4. 北京大学 技术物理系, 北京 100871; 5. 地质部 海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘 要: 采用 ESR 方法, 对天山乌鲁木齐河源末次冰期的冰碛石英砂进行了测年。下望峰组冰碛层的年代与前人推测的年代不同, 是 50~70 ka BP 末次冰期早阶段形成的, 分布下限可达海拔 2 300 m 左右的红五月桥附近。与 AMS 的测年结果相比, 末次冰期晚阶段底碛的 ESR 年代与 AMS 的年代相当, 而冰上融出碛 ESR 年代与 AMS 的年代相差较大。认为冰下的压碎和磨蚀作用可能导致冰碛中石英砂的 ESR 信号归零, 从而使底碛的 ESR 测年成为可能。

关键词: 冰碛物 ESR 测年; 末次冰期; 天山; 乌鲁木齐河源

中图分类号: P533 **文献标识码:** A

冰碛物测年是冰川地质环境重建的基本要求。天山乌鲁木齐河源是我国第四纪冰川研究最为详尽的地区之一, 杨怀仁等^[1]早在 20 世纪 60 年代就较详细地研究了这里的第四纪冰川, 王靖泰^[2]用常规质谱计和易朝路等^[3]用加速器质谱计 (AMS) 测定了望峰道班至望峰末次冰期晚冰阶以来的冰碛物的¹⁴C 年代。由于缺乏绝对年代的直接测年数据, 对下望峰冰碛层的年代有不同的推测, 王靖泰认为属于倒数第二冰期^[2], 李世杰认为是末次冰期晚阶段的产物^[4], 崔之久认为下望峰冰碛层以下的槽谷曾被更老的冰期占据过^[5]。许多学者对这里的冰川沉积也进行了详细研究^[6~11]。

自从池谷元伺测定石笋和钟乳石的 ESR (电子自旋共振) 年代以来^[12], ESR 方法在海滩沙^[13]、黄土^[14]和泥石流^[15]沉积物中的石英砂测年中得到大量应用。近年来对冰碛物也开始进行 ESR 年代研究^[16~18]。本文通过对天山乌鲁木齐河源末次冰期系列冰碛物样品进行 ESR 测年, 讨论其可行性, 并确定该地区末次冰期沉积系列。

1 采样点概况和剖面特征

乌鲁木齐河源区 (以下简称乌河源) 位于天山中部天格尔山主脉北坡 (43°7' N, 86°49' E)。区内山脊海拔一般为 4 100~4 300 m。现代雪线海拔 4 000~4 100 m, 发育有冰斗冰川、小型山谷冰川和悬冰川等类型的现代冰川。第四纪冰川遗迹主要分布于红五月桥以上主谷中, 共测量了 8 个样品, 样品采自望峰道班至红五月桥之间的终碛垄和冰碛平台以及哈依萨鼓丘的冰碛中 (图 1)。

样品 W1 和 W2 分别取自上望峰组的上层和下层, 上层的冰碛物结构疏松, 颗粒粗, 有斜层。冰碛石与山坡上的基岩岩性一致。据此, 崔之久^[6]认为上层是冰上融出碛, 而将沉积特征与其相反的下层冰碛物解释为冰下融出碛。下望峰组呈平台状出露于望峰道班至红五月桥以上约 1 km 处的谷地中。W3 和 W4 取自下望峰冰碛平台, W3 采自望峰道班附近的公路边暴露的冰碛剖面底部, W4 取自望峰道班下游约 300 m 公路边暴露的冰碛剖面底

收稿日期: 2001-03-05; 修订日期: 2001-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (49971081); 中国科学院天山冰川观测试验站基金项目 (9901); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室基金资助

作者简介: 易朝路 (1959—), 男, 湖北监利人, 研究员, 1992 年在北京大学获博士学位, 主要从事第四纪冰川和古湖沼学研究。E-mail: clvi@asch.whigg.ac.cn

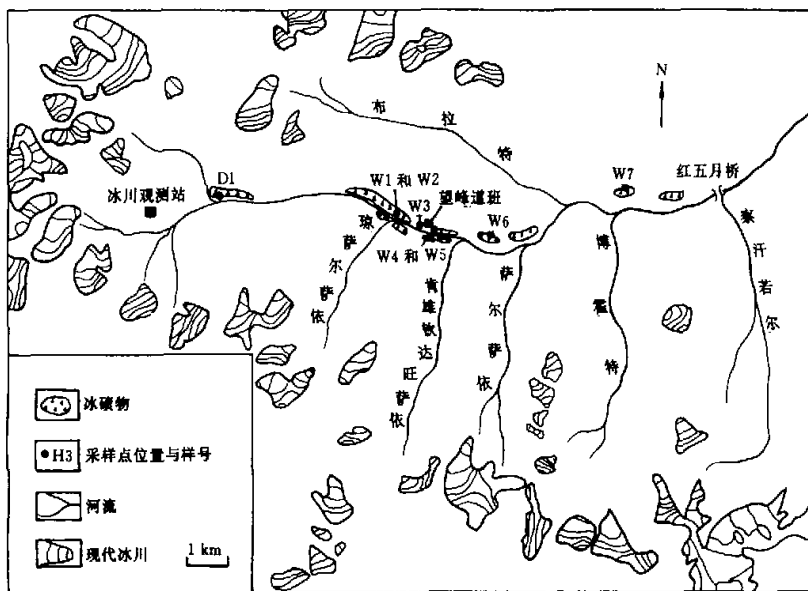


图1 天山乌鲁木齐河源采样点分布图

Fig. 1 Sampling sites in the Ürümqi River Valley

部。平台表层有漂砾，局部为坡积物覆盖。靠河流一侧为河流相砂砾石层，砾石呈圆状和次棱角状，粉沙含量低，W5取自该层的下部，W6采自主谷与支谷肯雄钦达旺萨依谷的交汇处。从这两个采样点出露的剖面上看，冰碛物结构较致密，粉沙含量高，砾石呈次棱角状(图2)。W7采自主谷与博霍特支谷的交汇处，冰碛呈小块平台状产出，高出谷底130 m，冰碛物的特征与W5和W6相同。W6和W7冰碛石成分主要是片岩，与周围的基岩岩性一致。D1采自哈依萨鼓丘的背冰面，哈依萨鼓丘的沉积因其结构致密，粉沙含量高，被认为是滞碛^[6, 10]，曾估计其形成于末次冰期的退缩阶段^[3]。

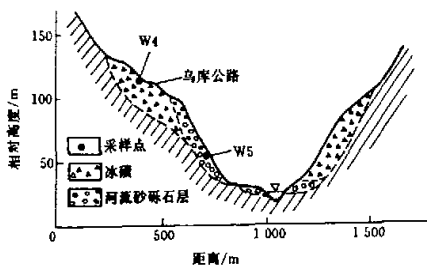


图2 下望峰冰川谷横剖面

Fig. 2 Cross section of Lower Wangfeng glacial valley

2 研究方法

野外采样避免阳光直射，样品在实验室用水淘

洗，过筛，获得0.06~0.25 mm的粒级。用双氧水去除有机质，用6 mol浓度的盐酸溶解碳酸盐，用氢氟酸浸泡1 h去除石英颗粒表层，然后用清水彻底清洗，最后用电磁铁分离磁性矿物。样品分成8等份，每份约250 mg，用⁶⁰Co照射，辐照后的样品放置1个星期后用JES-FEIXG ESR谱仪测试。测试条件是：室温，微波功率谱2 mW，调制幅度0.08 mT，扫场宽度(337±5) mT，用锗心作为ESR信号。选择沉积物中的U、Th和K的含量，用激光荧光法、比色分光光度法和原子吸收分光光度法分别测定。根据Ye *et al.*^[15]以往的ESR测年经验，这种条件下的测年误差约为15%。

3 结果与讨论

3.1 样品的ESR年代

8个样品的ESR测年结果见表1。上望峰组冰碛物下层的ESR年代与AMS测年结果大体相当^[3]，望峰道班下游至红五月桥之间的4个冰碛样品的ESR年代在55~73 ka BP之间。上望峰组的冰上融出碛的ESR年代与AMS¹⁴C年代相差较大，前者比后者大8 ka BP。哈依萨鼓丘背冰面样品的ESR年代为46.2 ka BP，由于鼓丘位于上望峰末次冰期晚阶段的终碛垄和新冰期终碛垄之间，原估计是末次冰期的产物，年代为10~20 ka。因此该

表 1 冰碛物 ESR 年代

Table 1 ESR datings of tills in Ürümqi River valley

样品编号	采样地点	地貌类型	采样部位	冰碛成因	ESR 测年/ka BP	AMS/ ¹⁴ C 年代
W1	上望峰	终碛垄	冰碛物上层	冰上融出碛	37.4	(19 080 ± 510) a BP ^[3]
W2	上望峰	终碛垄	冰碛物下层	底碛/冰下融出碛	27.6	(23 019 ± 450) a BP ^[3]
W3	下望峰	终碛垄		底碛	72.6	
W4	下望峰	冰碛平台		底碛	58.6	
W5	下望峰	冰碛平台	冰碛物下伏地层	河流沉积	40.1	(37.3 ± 2.6) ka BP ^[3]
W6	下望峰	冰碛平台		底碛	54.6	
W7	下望峰	终碛垄		底碛	56.6	
D1	哈依萨谷	鼓丘	背冰面	底碛/滞碛	45.9	未测出

ESR 年代比料想的大得多。

3.2 测年机制

况明生等^[16]和吴永秋等^[17]曾用 ESR 方法分别测定了拱王山(滇东)和昆仑山第四纪冰碛物的 ESR 年代,但冰碛石英砂的测年机理并不清楚。史正涛等^[18]认为冰碛石英砂的 Ge 芯信号的归零是阳光晒褪引起的。Ye *et al.*^[15]曾用经人工辐照的石英砂进行碾磨实验,人工碾磨 1 min 后,破碎的石英砂锺心的 ESR 信号损失 38%。许多学者认为冰碛中的粉砂含量高是冰川压碎和磨蚀的结果^[19~21],在显微镜下的定量观察研究^[22, 23],证明冰下磨蚀和压碎作用是冰碛中的粉砂形成的机制。冰下的压碎和磨蚀作用的时间比手工长,作用的力量也比人工大,冰下的这一过程有可能导致石英砂锺心的 ESR 信息丢失殆尽,当冰碛被掩埋后,ESR 信息开始积累。粉砂含量高基本上可以认为冰碛经受了冰下压碎与磨蚀,乌鲁木齐河源的冰下融出碛和滞碛粉砂含量高^[6, 7, 10],应该受到了冰下的压碎与磨蚀。从实际测年效果来看,5 个终碛垄的底碛或冰下融出碛样品的 ESR 年代结果比较好,W2 的 ESR 年代与 AMS¹⁴C 年代基本相同,其它 4 个样品的 ESR 年代能比较好的解释该区末次冰期早期阶段的冰进。哈依萨鼓丘背冰面样品的 ESR 年代比料想的大得多,这可能是因为鼓丘处的沉积不是一次形成的,至少在末次冰期早阶段就有冰碛沉积,以后又被末次冰期晚阶段的冰进覆盖过。由于冰碛中剪切作用,可将下部老冰碛沿剪切面送到上部冰碛中。我们这个样品距地表约 3 m,可能系末次冰期早晚两个阶段形成的冰碛的混合物。W1 虽为终碛沉积,但为冰上融出碛,细颗粒主要是冻胀作用形成的,缺乏冰下的压碎与磨蚀过程,因此 ESR 年代误差较大。

3.3 下望峰组冰碛层的层位、年代和古冰川规模

以前由于下望峰组无测年数据,仅仅根据地貌形态和沉积物特征进行冰期划分,因此对望峰道班下望峰组年代存在不同的意见。王靖泰^[2]根据上望峰终碛丘陵的上游冰碛物¹⁴C 年代为 14.9 ka BP,推测它们是 140~170 ka BP 的倒数第二冰期时形成的,而终碛丘陵的下游段是末次冰期早阶段的产物。李世杰^[4]根据下望峰冰碛平台下伏河流沉积物的石英砂 TL(热释光)测年年为(37.7 ± 2.6) ka BP 的事实,认为下望峰冰碛平台与河流沉积呈上下覆盖关系,河流沉积物上覆的冰碛平台是末次冰期晚阶段形成的,冰碛物来自南侧支谷的琼萨尔萨依谷。崔之久^[5]认为下望峰组冰碛层分布于望峰道班附近,其下游的谷地曾被更老的高望峰冰期占据过。

我们在下望峰冰碛平台下部河流砂砾石层测得的 ESR 年代为 40 ka BP,与李世杰的 TL 测年结果^[3]相近,应为末次冰期间冰阶的沉积,相当于氧同位素 3 阶段,而位于海拔较高的冰碛物 ESR 年代为 58.6 ka BP,我们认为冰碛与河流沉积是叠置关系(图 2)。末次冰期早阶段的冰碛沉积于谷坡外侧,其内侧沉积了后期的河流相砂砾石层,以后构造抬升,河流下切,形成阶地。

根据 ESR 测年结果,下望峰组冰碛层的年代为 55~73 ka BP,应属于末次冰期早阶段,相当于氧同位素 4 阶段。分布于望峰道班至红五月桥上游 1 km 之间的河谷地带的胶结较紧的冰碛物也是该阶段形成的。下望峰冰碛平台面积较大,其它地点的该阶段冰碛面积较小,零星分布。根据岩相分析^[8],下望峰冰碛平台一部分来自主谷,其余的来自南侧支谷的琼萨尔萨依谷、肯雄钦达旺萨依和萨尔萨依谷等。在末次冰期早阶段,萨尔萨依支谷与

主谷交汇点上游的古冰川已经连为一个整体。古冰川的长度达到 19 km。交汇点以下的冰碛不连续分布, 由于冰碛物的岩性与周围的基岩一致, 可能是支谷冰川下伸到主谷中, 但没有联成一片。在末次冰期晚阶段, 望峰道班以下冰川停留在支谷, 没有下伸到主谷内。采用热释光方法, 徐道明等和 Sakaguchi^[24, 25]报道了末次冰期早阶段的规模比晚阶段的规模大的现象, 与本文的结果相一致。至于本区倒数第二冰期的冰川遗迹保存在何处, 以及冰川规模等问题有待今后进一步深入调查研究。

4 结论

用 ESR 测年方法适合于测定冰碛垄粉砂含量高的冰下融出碛部分, 尽管其机制有待进一步研究, 总的来看这种方法具有可行性。由此得到该地望峰冰期系列, 下望峰组冰碛层为 55~73 ka BP 末次冰期早阶段沉积, 上望峰组冰碛层为末次冰期晚阶段, 测年为 19~23 ka BP, 其间的温暖期沉积了河流相砂砾石层。

致谢: 本文呈施雅风先生指导, 谨致谢诚。

参考文献 (References):

- [1] Yang Huai ren, Qiu Shuzhang. Quaternary glaciation and the postglacial climatic fluctuations in the region of upper Ürümqi valley, Sinkiang[J]. Acta Geographica Sinica, 1965, 31(3): 194-211. [杨怀仁, 邱淑彰. 乌鲁木齐河源上游第四纪冰川与冰后期气候波动[J]. 地理学报, 1965, 31(3): 194-211.]
- [2] Wang Jingtai. Ancient glaciers at the head of Ürümqi River, Tianshan[J]. 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[J]. 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 57-63.]
- [3] Yi Chaolu, Liu Kexin, Cui Zhijiu. AMS dating on glacial tills at the source area of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains and its implications[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(20): 1749-1751. [易朝路, 刘克新, 崔之久. 天山乌鲁木齐河源末次冰期以来冰川沉积物 AMS 测年及其意义[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 655-656.]
- [4] Li Shijie. Ancient environment reconstruction in the late Pleistocene at the source area of the Ürümqi River, Tianshan[A]. Geomorphology and Quaternary Professional Commission of Chinese Geography Association. Geomorphology - Environment - Development [C]. Beijing: Environmental Science Press of China, 1993. 20-34. [李世杰. 天山乌鲁木齐河源更新世晚期的古环境重建[A]. 中国地理学会地貌与第四纪专业委员会. 地貌-环境-发展[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 20-34.]
- [5] Cui Zhijiu. Glacial erosion landforms and development of trough at the head of Ürümqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(Suppl.): 1-15. [崔之久. 天山乌鲁木齐河源冰川侵蚀地貌与槽谷演化[J]. 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 1-15.]
- [6] Cui Zhijiu. Kinds and features of glacial moraine and till at the head of Ürümqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(Suppl.): 36-48. [崔之久. 天山乌鲁木齐河源冰碛垄与冰碛沉积的类型和特征[J]. 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 36-48.]
- [7] Wang Jingtai, Zhang Zhenshuan. Glacial sediment at the head of Ürümqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(Suppl.): 49-56. [王靖泰, 张振栓. 天山乌鲁木齐河源的冰川沉积[J]. 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 49-56.]
- [8] Li Shude, Cui Zhijiu, Wang Jingtai, et al. Lithological and morphological characters of till, glaciofluvial alluvial deposits at the head of Ürümqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(Suppl.): 78-91. [李树德, 崔之久, 王靖泰, 等. 天山乌鲁木齐河源冰碛、冰水及冲积砾石的岩性和形态特征[J]. 冰川冻土, 1981, 3(增刊): 78-91.]
- [9] Feng Zhaodong, Qin Dahe. Glacial environment and sedimentary processes of end moraine since Last Ice-Age at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1984, 6(1): 39-50. [冯兆东, 秦大河. 天山乌鲁木齐河源末次冰期以来终碛的沉积类型和沉积过程[J]. 冰川冻土, 1984, 6(1): 39-50.]
- [10] Cui Zhijiu, Xiong Heigang. Sedimentary facies models and characteristics of mountainous glaciers[J]. Quaternary Sciences, 1989, (3): 254-267. [崔之久, 熊黑钢. 山地冰川沉积相模式 and 沉积特征[J]. 第四纪研究, 1989, (3): 254-267.]
- [11] Ma Qihua. Features of Wangfeng glacial moraine at the headwaters of Ürümqi River in Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1984, 6(2): 61-67. [马秋华. 天山乌鲁木齐河源地区望峰冰碛的结构特征[J]. 冰川冻土, 1984, 6(2): 61-67.]
- [12] Ikeya M. Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance[J]. Nature, 1975, 255(5503): 48-50.
- [13] Ye Yuguang, Diao Shaobo, Gao Juncheng. A study on ESR dating of the coastal wind sand in China[J]. Oceanology and Limnology, 1995, 43(5): 488-493. [业渝光, 刁少波, 高钧成. 中国海岸风成沙 ESR 测年的研究[J]. 海洋与湖泊, 1995, 43(5): 488-493.]
- [14] Jin Sizhao, Peng Zicheng, Huang Peihua, et al. ESR study on Luochuan loess[J]. Chinese Science Bulletin, 1989, 34(6): 491-494.
- [15] Ye Y G, Diao S B, He J, et al. ESR dating studies of palaeo debris-flow deposits in Dongchuan, Yunnan Province, China [J]. Quaternary Geochronology, 1998, 17: 1 073-1 076.
- [16] 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[J]. 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[J]. 冰川冻土, 1997, 19(4): 366-372.]
- [17] Wu Yongqiu, Cui Zhijiu, Lui Gengnian, et al. Glaciation sequences in the Kunlunshan Pass area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 21(1): 71-76. [吴永秋, 崔之久, 刘耕年, 等. 昆仑山垭口地区的冰期系列[J]. 冰川冻土, 1998, 21(1): 71-76.]
- [18] Shi Zhengtan, Zhang Shiqiang, Zhou Shangzhe, et al. Study

- of ESR dating of Quaternary moraine, Qilian Mountains[J]. *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[J]. 冰川冻土, 2000, 22(4): 353–357.]
- [19] Dreimanis A, Vagner U J. Bimodal distribution of rock and mineral fragments in basal tills[A]. Goldthwait R. *Till: a symposium*[C]. Columbus: Ohio State University Press, 1971. 267–250.
- [20] Boulton G S. Boulder—shapes and grain—size distribution as indicators of transport paths through a glacier and till genesis[J]. *Sedimentology*, 1978, 25(6): 773–799.
- [21] Haldorsen S. Grain—size distribution of subglacial till and its relation to glacial crushing and abrasion[J]. *Boreas*, 1981, 10(1): 106.
- [22] Mahaney W C, Vortisch W, Julig—Patrick J. Relative differences between glacially crushed quartz transported by mountain and continental ice; some examples from North America and East Africa[J]. *American Journal of Science*, 1988, 288(8): 810–826.
- [23] Yi C L. Subglacial comminution—evidence from microfabric studies and grain size analysis[J]. *Journal of Glaciology*, 1997, 43(14): 174–179.
- [24] Xu Daoming, Shen Yongping. On ancient ice-sheet and ice age in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(3): 213–229. [徐道明, 沈永平. 青藏高原的泛冰盖遗迹与冰期[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 213–229.]
- [25] Sakaguchi Y. Quaternary glaciation, its appearance and disappearance[J]. *Bulletin of the Department of Geography, University of Tokyo*, 1988, 20: 29–41.
- [22] Mahaney W C, Vortisch W, Julig—Patrick J. Relative differ-

ESR Dating on Tills and the Last Glaciation at the Headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains, China

YI Chao-lu^{1,2}, JIAO Ke-qing³, LIU Ke-xin⁴, LI Ling¹, YE Yu-guang⁵

(1. *Department of Environmental Sciences, Institute of Geodesy and Geophysics, CAS, Wuhan Hubei 430077, China*; 2. *Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China*; 3. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China*; 4. *Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China*; 5. *Institute of Marine Geology, MGMR, Qingdao Shandong 266071, China*)

Abstract: Using Ge center of quartz grains of size 0.06~0.25 mm, ESR (electron spinning resonance) dating on the glacial quartz sands formed in the Last Glaciation was made at the headwaters of the Ürümqi River in the Tianshan Mountains, Northwest China. ESR dating on a basal till (subglacial melt-out one) of an end moraine formed in the late stage of the Last Glaciation is consistent with the dating under AMS ¹⁴C method. But dating on the overlying till (supra-glacial melt-out one) of the same moraine is different from the dating under AMS ¹⁴C method. The underlying till

contains much more silt than the overlying till. High content of silt implies a strong subglacial comminution. Based on an experiment, Ge signal in quartz grains decreases by one third after artificial grinding for ten minutes. The till was formed in 50~70 ka BP, the early stage of the Last Glaciation. It was spread in the main valley as low as 2300 m a. s. l. with a length of more than 19 km. Fluvial sandy gravel deposited in the inter glaciation between the early and late stages of the Last Glaciation.

Key words: ESR dating; glacial till; quartz sands; Last Glaciation; Tianshan Mountains; headwaters of the Ürümqi River