

冰川冻土
Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240, CN 62-1072/P

《冰川冻土》网络首发论文

题目: 天山乌鲁木齐河源末次冰期冰川沉积光释光测年
作者: 曾兰华, 欧先交, 陈嵘, 赖忠平
收稿日期: 2019-01-25
网络首发日期: 2019-06-26
引用格式: 曾兰华, 欧先交, 陈嵘, 赖忠平. 天山乌鲁木齐河源末次冰期冰川沉积光释光测年[J/OL]. 冰川冻土.
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190625.1038.002.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.1014

ZENG Lanhua, OU Xianjiao, CHEN Rong, et al. OSL dating on glacial sediments of the Last Glacial in headwater of Urumqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, in press. [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, 待刊.]

天山乌鲁木齐河源末次冰期冰川沉积光释光测年

曾兰华¹, 欧先交^{1,4}, 陈嵘², 赖忠平³

(1.嘉应学院 地理科学与旅游学院, 广东 梅州 514015; 2.中国科学院 南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 3.汕头大学 海洋科学研究院, 广东 汕头 515063; 4.Department of Geography and Earth Sciences, Aberystwyth University, Ceredigion SY23 3DB, UK)

摘要: 乌鲁木齐河源地区是我国冰川遗迹保存最丰富、地貌最典型的区域之一, 是根据冰川遗迹重建第四纪冰川历史的理想地区。大量的研究工作以及技术测年结果也使其成为试验冰川沉积光释光测年可行性的理想地点。共采集了 6 个冰碛及上覆黄土样品用于光释光测年。提取 38~63 μm 的石英颗粒, 运用 SAR-SGC 法测试等效剂量。各种检验表明测试程序是适用的。通过地貌地层关系、重复样品、以及已有年代的对比等方法, 检验该地冰川沉积 OSL 测年的可行性。结果显示 OSL 年代结果与地貌地层新老关系非常吻合, 与已有的其它测年技术的年代结果也具可比性, 表明这些样品的 OSL 信号在沉积之前晒退较好, OSL 年代是可信的。冰川观测站侧碛垄的 OSL 年代为 14.8 ± 1.2 ka; 9 号冰川支谷口附近冰碛的 OSL 年代为 13.5 ± 1.1 ka 和 17.2 ± 1.3 ka; 上望峰冰碛的 OSL 年代为 20.1 ± 1.6 ka。综合 OSL 年代结果与此前其它测年结果, 这几套冰碛垄形成于深海氧同位素 MIS 2 阶段应该是比较统一的认识。上望峰冰碛上覆黄土的 OSL 年代 (10.5 ± 0.8 ka) 也印证了该结论。OSL 年代指示上望峰冰碛对应于末次冰期最盛期, 冰川观测站和 9 号冰川支谷谷口冰碛对应于晚冰期。下望峰冰碛的 OSL 年代为 36.3 ± 2.8 ka, 对应于 MIS 3 阶段。下望峰冰碛的形成时代, 仍有待更多沉积学以及测年工作进一步确定。

关键词: 冰川沉积; 光释光测年; 望峰冰碛; 末次冰期; 晒退

中图分类号: P931.4 **文献标志码:** A

0 引言

绝对年代测定是第四纪冰川研究最为重要的基础之一, 测年技术的可靠性非常关键。光释光 (optically stimulated luminescence, OSL) 作为为数不多的冰川沉积测年技术之一, 应用在冰川沉积上仍存在问题。报道较多的是不完全曝光或者称之为不完全晒退的问题^[1-6], 即释光信号在最后一次沉积之前没有归零, 样品有残留剂量。该问题会导致 OSL 年代被高估, 由此导致年代不可靠。如何检验冰川沉积晒退程度与 OSL 测年的可靠性? 对已知年代样品进行测试, 是比较直接的办法之一。对比 OSL 年代与已知年代, 可以判断残留剂量或年代高估的程度。

天山乌鲁木齐河源是中国第四纪冰川研究最深入的地点。该地保留了清晰可辨的 5 套冰碛垄, 过去 40 年来对这些冰碛垄已做过不少的测年工作^[2,7-20]。对于末次冰期的几套冰

收稿日期: 2019-01-25; **修订日期:** 2019-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40901011; 41371080) 资助

作者简介: 曾兰华 (1980-), 女, 广东揭阳人, 讲师, 2006 年在华南师范大学获硕士学位, 从事自然地理学研究. E-mail: cockroachflower@126.com

通信作者: 欧先交, E-mail: ouxianjiao@163.com; 陈嵘, E-mail: rchen@niglas.ac.cn.

砾, 更是有多种不同技术的测年工作, 包括 ^{14}C ^[9-10], 热释光 (thermoluminescence, TL)^[13], 电子自旋共振 (electron spin resonance, ESR)^[14-16], 以及宇生核素 (in situ terrestrial cosmogenic nuclides, TCN) ^{10}Be 暴露测年^[17-20]等, 但唯独没有 OSL 测年数据。因此, 该地不仅是检验冰川沉积光释光测年可行性的理想地点, 也是系统对比和评价不同测年技术在冰川沉积上的应用的理想地点。对于古冰川演化研究中如何选择测年技术、如何解读不同测年技术的年代, 该地也是一个典范性的研究地点。此外, OSL 年代也可为该地冰川演化研究及争议提供新的支持。

本研究针对已有大量测年数据^[7,9-10,13-19]的末次冰期冰川沉积 (包括冰川观测站冰碛、上望峰冰碛和下望峰冰碛等) 进行 OSL 测试, 并与已有年代对比, 讨论冰川沉积光释光测年的可靠性, 综合不同年代结果讨论天山乌鲁木齐河源末次冰期各期冰碛的形成时代。

1 研究区概况与采样

天山乌鲁木齐河源地区位于新疆境内天山山脉中部喀拉乌成山主脉北坡 (43°7' N, 86°49' E, 图 1)。最高峰天格尔 II 峰海拔 4 486 m, 山脊海拔在 4 100~4 300 m 之间。年平均气温 -5.1 °C, 年平均降水量 450 mm^[21]。现代冰川平衡线高度约 4 000~4 100 m, 冰舌末端海拔高度 3 650~3 700 m。共发育冰川 150 条, 面积约 46 km²。冰川类型主要有悬冰川、冰斗冰川和小型山谷冰川^[15]。

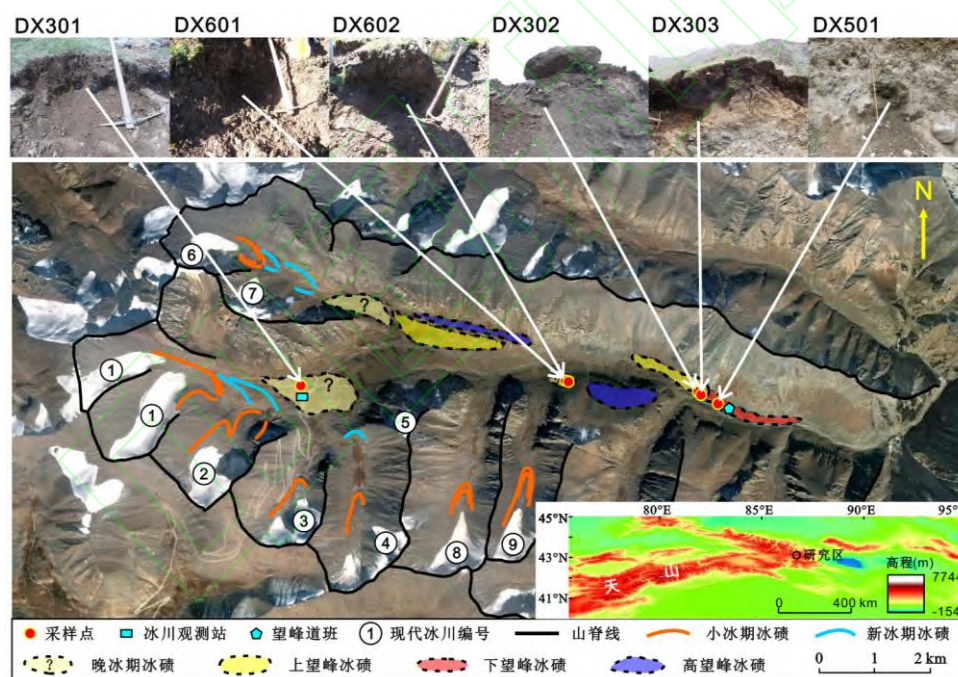


图 1 乌鲁木齐河源地区冰川地貌、采样点位置及剖面照片 (底图为 Google Earth 地图)

Fig. 1 Glacial landforms, sampling sites and photos of sampling sections in headwater of Urumqi River (the base map is from Google Earth)

除了现代冰川外, 乌鲁木齐河源地区还存在多次古冰川作用遗迹。从现代冰川末端到望峰道班向下 1~2 km 范围内, 由新到老依次分布有 5 套冰碛 (图 1)。第一套冰碛分布在现代冰川末端向下数百米到 1 km 的范围内, 一般有 3 道冰碛垄, 对应于小冰期^[10,12,20]。第二套冰碛一般有两道终碛垄, 对应于新冰期^[8,11]。1 号冰川所形成的这套终碛垄分布在从小冰期终碛垄向下 1 km 左右, 在天山气象站和山北道班房附近, 海拔 3 500 m 左右, 被称为

山北组（包括山北组 I 与山北组 II）。近年的测年^[17-19]显示，冰川观测站附近的冰碛垄可能形成于晚冰期。第三套冰碛分布在罗卜道沟沟口以下至海拔 3 000 m 左右的望峰道班之间 6~8 km 的范围内，多呈垄岗状起伏，虽经流水破坏，但轮廓仍清晰完整，可看出终碛垄、侧碛垄的形态。王靖泰^[7]把这套冰碛命名为为上望峰冰碛。上望峰冰碛的末端海拔在 3000 m 左右，顶部覆盖 30~40 cm 厚的类黄土沉积，其上部发育有灰色的土壤层。此前的测年结果显示其形成于末次冰期晚期或 MIS 3^[7,10,13-15,17-19]。第四套冰碛分布在望峰道班周围及其以下至红五月桥附近的冰川谷下槽谷中，磨圆度和胶结程度比上望峰更好，称为下望峰冰碛。上望峰冰碛以明显的推覆不整合覆盖于下望峰冰碛之上^[22]。下望峰冰碛以在海拔约 2 900 m、厚约 80 m 的平坦冰碛平台为代表。其形成年代仍有不同看法^[13-15,18-19]。第五套冰碛为河源区最老的冰碛，被称为高望峰冰碛。它分布在高出河床约 200~300 m 的上槽谷残剩的谷坡上，海拔约 3 300~3 400 m。形成时代在 MIS 12 阶段^[16]。

共采集冰碛及冰碛上覆黄土 OSL 样品 6 个（图 1）。其中 DX301 采自冰川观测站后方约 100 m 的侧碛垄顶部冰碛；DX302 采自望峰道班上游约 500 m 处，为上望峰侧碛垄顶部冰碛物；DX303 采自望峰道班上游约 500 m 处，DX302 附近的上望峰侧碛垄上覆的黄土层中部；DX601 和 DX602 的采样点在望峰道班与冰川站之间的大西沟谷地右侧，9 号冰川支谷谷口附近；DX501 采自望峰道班上游约 200 m 处，下望峰冰碛平台上部冰碛物。采样用不锈钢钢管打入新鲜剖面，然后将其密封。另外，还采集约 100 g 样品密封于自封袋中，用于测定含水量和年剂量率。

2 实验方法

2.1 样品前处理

实验室中用 10% 稀盐酸和 30% 双氧水依次浸泡样品，以去除样品中的碳酸盐和有机质。然后用湿筛法分选出 38~63 μm 粒级颗粒。再用 30% 的氟硅酸浸泡样品约 3 周，目的是去除长石。随后用 10% 的稀盐酸浸泡约 30 分钟，去除样品与氟硅酸反应过程中产生的氟化物沉淀，然后用清水冲洗样品 3~5 次，最后把样品烘干。所得到的石英的纯度可用红外检测其长石的释光信号，若长石的信号比较强，则需要再次用氟硅酸浸泡，直到红外信号消失或达到极低（IRSL/OSL<10%）的水平。最后，将纯石英样品用硅油粘贴在直径为 10 mm 的不锈钢钢片中间直径约为 6 mm 的范围内。

2.2 等效剂量与年剂量测试

等效剂量采用单片再生剂量法（SAR）及标准生长曲线（SGC）相结合的方法，即 SAR-SGC 法^[23]测试。实验在中国科学院青海盐湖研究所释光实验室完成，测试仪器为丹麦 Risø TL/OSL DA-20 全自动释光仪，内置 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 人工 β 辐射源用于辐照。再生剂量预热温度为 260 $^{\circ}\text{C}$ （10 s），试验剂量的预热温度为 220 $^{\circ}\text{C}$ （10s）。试验剂量在 15~50 Gy 之间。测试石英释光信号的激发光源为波长 470 \pm 30 nm 的蓝光二极管（强度 90%），激发温度为 130 $^{\circ}\text{C}$ （40 s）。OSL 信号通过 7.5 mm 的 Hoya U-340 滤光片进入 9235QA 光电倍增管内被接收并记录。每个样品先制备 6 个样片用于 SAR 法测试等效剂量。再根据 SAR 数据对每个样品分别建立一条 SGC 曲线。然后每个样品再制 8~18 个样片，在同样的测试参数下，只测试它们的自然剂量和检验剂量的光释光信号，即 L_N 和 T_N 。将经过实验剂量释光信号校正后的天然光释光信号（ L_N/T_N ）插入 SGC 曲线中便可求得该样片的等效剂量值。最后的等效剂量是 SAR 法和 SGC 法测得的所有等效剂量的平均值。年剂量率计算中的 U，Th 和 K 的含量在中国原子能科学研究院用中子活化分析法（neutron activation analysis, NAA）测定。样品含水量综合采样时的含水量和当地降水量估计。宇宙射线的年剂量贡献根据样品的地理位置、海拔高度和采样深度计算^[24]。 α 系数取 0.035 \pm 0.001^[25]。剂量率根据 Aitken^[26]的公式和参数进行计算。

3 实验结果

3.1 释光特征

图 2 展示了其中一个样品 (DX302) 的释光衰减曲线和生长曲线。从图中可以看出释光信号在 1~2 秒钟之内就快速衰减至背景值, 说明石英以快速组分为主。样品的循环比在 0.94~1.11 之间, 表明试验剂量对感量变化的校正较为理想。IRSL/OSL 比值在 0.8~0.98 之间, 绝大部分在 0.90~0.98 之间, 说明长石含量很少。零剂量与天然剂量即 $(L_0/T_0)/(L_N/T_N)$ 的比值在 0.67%~4.54%, 都低于 5% 的阈值, 表明测试过程中热转移效应对等效剂量的贡献较低, 仅为 0.28~3.22 Gy, 对年代结果产生的影响很小。

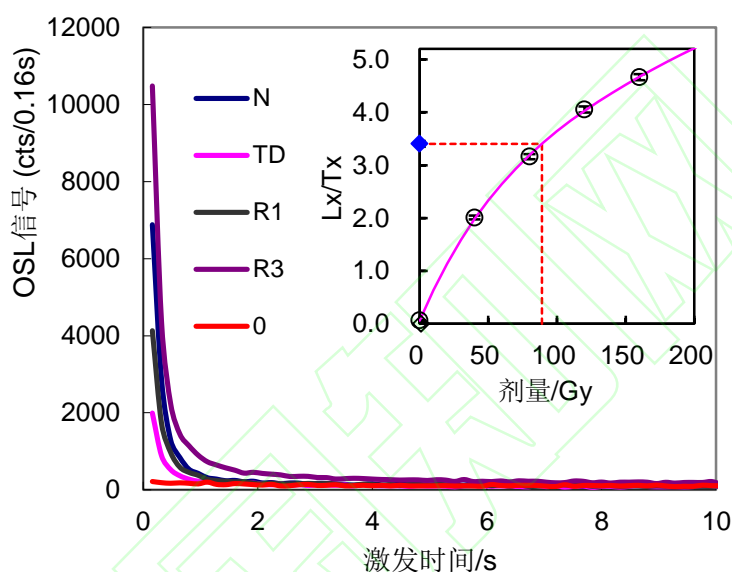


图 2 样品 DX302 的零剂量 (0)、天然剂量 (N)、试验剂量 (TD, 15 Gy)、以及其中两个再生剂量 (R1 和 R3, 剂量分别为 40 Gy 和 120 Gy) 的衰减曲线。小图为该样片的生长曲线

Fig. 2 OSL decay curves of zero dose (0), natural dose (N), test dose (TD, 45 Gy), and regeneration doses (R1 and R3, 12 Gy and 36 Gy, respectively) of sample DX302. Insert shows growth curve of the sample

3.2 预热坪和剂量恢复实验

为选择合适的 SAR 程序的预热温度, 本文选择两个样品 (DX303 和 DX501) 进行预热坪与剂量恢复实验。对于预热坪试验, 每个样品准备 20 个样片, 分为 5 组, 即分别在 220 °C, 240 °C, 260 °C, 280 °C 和 300 °C 条件下对样片预热 10 s, 试验剂量的预热温度为 220 °C 预热 10 s。每个温度点都测量了 4 个样片, 测量各个样片的等效剂量。预热坪结果如图 3 所示, 各个温度的结果差别不大。本文选择 260 °C 为再生剂量预热温度, 试验剂量预热温度为 220 °C, 预热时间均为 10 s。

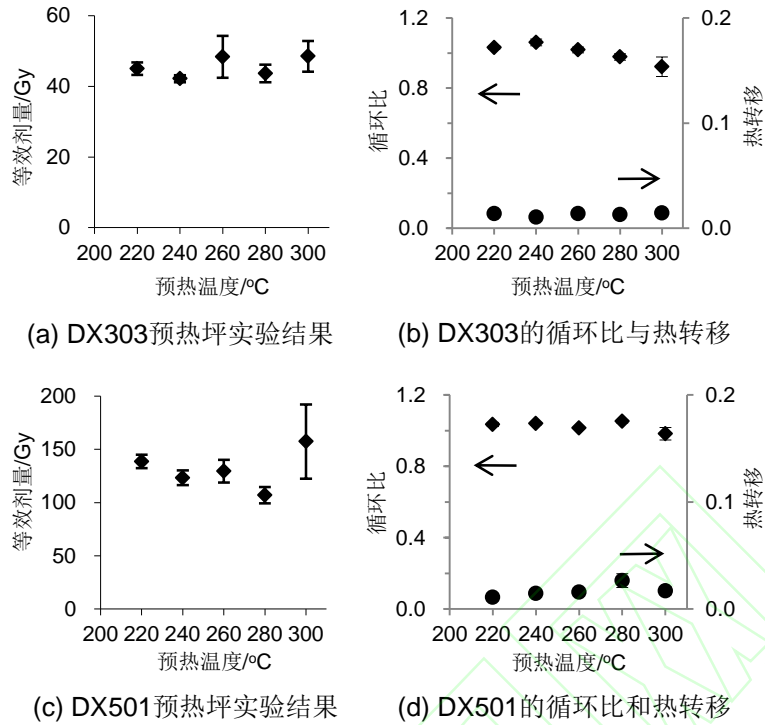


图 3 预热坪实验结果、循环比和热转移

Fig. 3 Results of preheat plateau, recycling ratio, and recuperation

对 DX303 和 DX501 分别制备 6 个样片用于剂量恢复实验。首先在室温下对所有样片用蓝光激发 100 s 以清除释光信号。然后分别对两个样品给定 42.0 Gy 和 127.0 Gy 的已知剂量，再用前述的 SAR 程序进行等效剂量测试。剂量恢复结果显示 DX303 测得的 6 个样片的等效剂量在 40.2~44.0 Gy 之间，平均为 41.4 Gy，与给定剂量的比值均在 0.9~1.1 之间 [图 4(a)]，平均为 0.98。DX501 剂量恢复结果显示实验测得 6 个样片的等效剂量在 115.7~124.52 Gy 之间，平均为 121.7 Gy。测试结果显示与给定剂量 127.0 Gy 所有比值均在 0.9~1.1 之间 [图 4(b)]，平均为 0.96。说明在上述测试条件下 SAR 程序可以成功恢复已知的剂量。

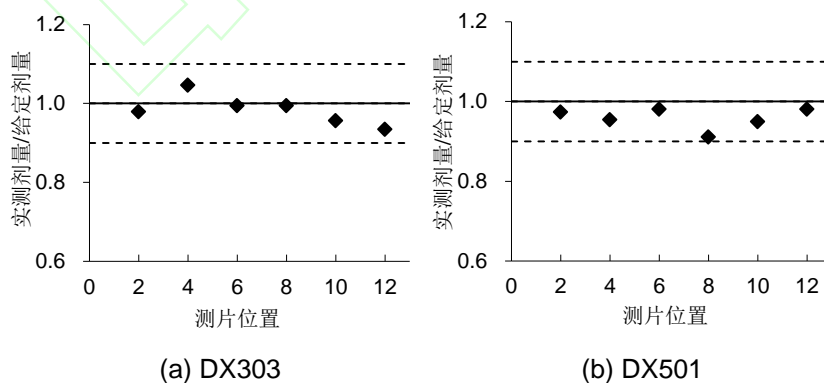


图 4 剂量恢复实验结果

Fig. 4 Results of dose recovery test

4 年代结果

OSL 测试结果见表 1。SGC 法等效剂量和 SAR 法等效剂量非常相近。最后的等效剂量是两种方法测得的所有等效剂量的平均值。

表 1 光释光测年结果

Table 1 OSL dating results

样品号	深度 /m	K/%	Th/ 10^{-6}	U/%	含水量 /%	剂量率 /($Gy\ ka^{-1}$)	样片 ^a	SAR D_e /Gy	SGC D_e /Gy	D_e /(Gy)	年代 /ka
DX301	0.3	2.5±0.1	16.1±0.4	3.8±0.2	10±5	4.8±0.3	24/24	66.4±2.5	75.4±6.4	70.9±2.5	14.8±1.2
DX302	1.5	2.7±0.1	13.0±0.3	2.7±0.2	10±5	4.3±0.3	23/24	93.1±2.7	81.4±5.3	87.2±2.6	20.1±1.6
DX303	0.6	2.1±0.1	12.8±0.4	3.4±0.2	10±5	4.0±0.3	24/24	43.8±1.4	40.2±1.2	42.0±1.1	10.5±0.8
DX501	2.5	2.1±0.1	11.5±0.3	2.1±0.2	10±5	3.5±0.3	24/24	124.1±4.5	129.9±5.8	127.0±3.7	36.3±2.8
DX601	0.8	2.0±0.1	11.8±0.3	3.2±0.2	10±5	3.5±0.3	23/24	49.9±2.2	52.3±4.4	51.1±1.9	13.5±1.1
DX602	0.8	2.3±0.1	15.6±0.4	4.2±0.2	10±5	4.6±0.3	24/24	81.6±3.1	78.2±2.4	79.9±2.4	17.2±1.3

注：a 用于计算等效剂量的样片数量及测试的样片总数量

5 OSL 年代可靠性与末次冰期各期冰碛的形成时代

DX301 采样点距 1 号冰川末端约 3 km，位于冰川观测站北约 100 m 的侧碛垄顶部。最新的研究^[17-19]显示，该套冰碛垄为乌鲁木齐河源末次冰期最新一道侧碛垄。DX302 采自上望峰冰碛垄末端，距离 1 号冰川末端 10 km 左右，在望峰道班上游约 500 m。从年代结果来看，DX302 的 OSL 年代为 20.1±1.6 ka，老于 DX301 的 14.8±1.2 ka，与地貌新老关系吻合。DX303 与 DX302 位于同一道冰碛垄，两个样品的采样点也非常接近，所不同的是 DX302 为冰碛物，而 DX303 采自冰碛物上覆的黄土层。DX303 的 OSL 年代为 10.5±0.8 ka，比其下伏冰碛物 DX302 的 OSL 年代 (20.1±1.6 ka) 年轻，这在地层关系上也是吻合的。DX601 和 DX602 采自 9 号冰川所在支谷与大西沟主谷汇合处附近冰碛，在望峰道班与冰川观测站之间。两个样品采样点相距很近，可作为重复对比样。OSL 结果分别为 13.5±1.1 ka 和 17.2±1.3 ka，相差不是太大。DX501 采自下望峰冰碛，采样点位于望峰道班上游方向约 200 m 处的下望峰冰碛平台上部冰碛物，OSL 年代为 36.3±2.8 ka，比上述上望峰冰碛的所有样品年代都要老，符合我们对上下望峰两套冰碛新老关系的认识。

本文还尝试将这些 OSL 年代与已有的其它测年技术的年代结果进行比较 (图 5)。对于上望峰冰碛，传统 ^{14}C 年代为 14 920±750 a BP^[7]，上覆黄土 ^{14}C 年代为 9 170±400 a BP^[7]。融出碛表层钙膜的 AMS ^{14}C 年代为 19 080±450 a BP 和 23 080±510 a BP^[10]。易朝路等^[14]测得上望峰冰碛 ESR 年代为 27.6 ka 和 37.4 ka。Zhao 等^[15]测得上望峰冰碛 ESR 年龄为 35.3±3.5 ka。Kong 等^[17]和 Li 等^[19]分别运用宇生核素 ^{10}Be 暴露年代技术对上望峰漂砾进行了测年，年代结果分别为 15.2±1.2~20.1±1.7 ka 和 16.9±0.9~19.3±1.0 ka。可见大部分年代结果均指向上望峰冰碛形成于末次冰期晚期 (MIS 2)。我们在上望峰测得的冰碛物 OSL 年代 (20.1±1.6 ka) 与末次冰期最盛期 (LGM) 对应，与上述测年结果也是吻合的并且支持此前的结论。而上望峰冰碛上覆黄土 (DX303) 的 OSL 年代为 10.5±0.8 ka，也与该黄土层的 ^{14}C 年代 9 170±400 a BP^[7]相一致，再次印证下伏冰碛物形成于 MIS 2 的结论。对于冰川观测站附近的冰碛垄，Yi 等^[10]获得的 AMS ^{14}C 年代在 1 860±110~19 590±130 a BP 之间；Kong 等^[17]、Li 等^[19]测得的 ^{10}Be 暴露年代分别为 (9.6±0.9)~(20.9±1.9) ka 和 (11.5±0.9)~(24.3±1.8) ka。我们在冰川观测站上方冰碛垄顶部 DX301 样品的 OSL 年代为 14.8±1.2 ka，与上述 ^{10}Be 暴露年代也是一致的，表明该冰碛与上望峰冰碛同属 MIS 2 时期的产物。OSL 年代指示其可能对应于晚冰期。在望峰道班与冰川观测站之间的 9 号冰川所在支谷与大西沟主谷汇合处附近冰碛，两个样品的 OSL 年代 13.5±1.1 ka 和 17.2±1.3 ka，可能也指示了晚冰期冰进。

众多研究^[19,27-39]表明, 天山及周边地区的 MIS 2 冰川作用是广泛存在的, 但 LGM 和晚冰期冰进在本地区仍很难明确的区分^[28], 确切的晚冰期冰川作用的报道^[30,40]不多。

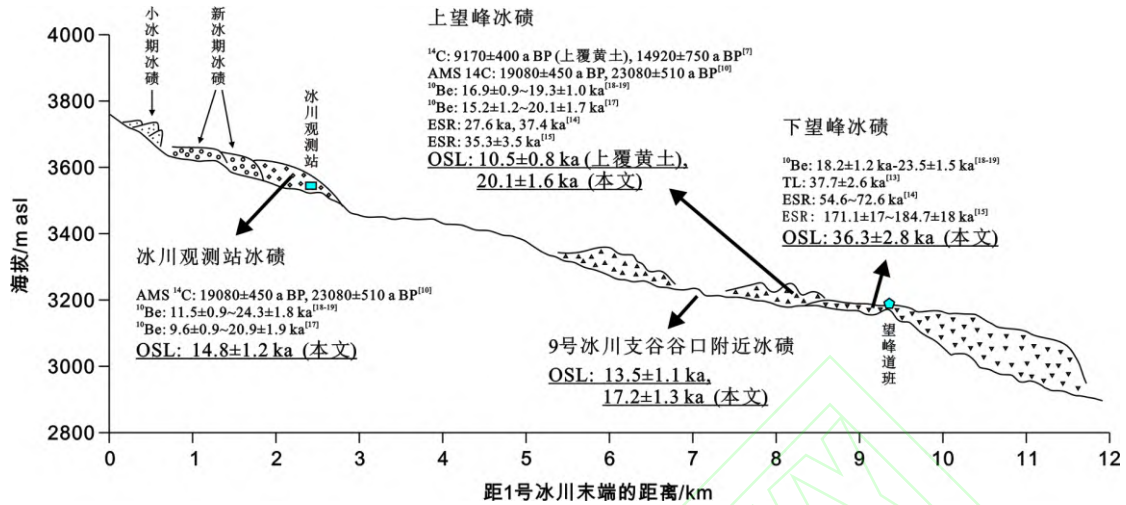


图5 乌鲁木齐河源地区末次冰期 OSL 年代与其它测年技术年代结果的对比示意图 (据文献[18]改绘)
Fig. 5 Comparison of OSL ages and ages of other dating techniques in headwater of Urumqi River (modified from Reference [18])

由此可见, 至少从测年结果的内部对比验证、与地貌地层关系的对比, 以及与其它测年技术结果的对比, 可以反映上述 OSL 年代应该是可信的。冰川沉积较为常见的不完全曝光/晒退导致年代高估的问题^[1-6], 在这些样品中似乎影响不大。其原因可能与样品在沉积前的搬运距离、沉积类型以及采样的地貌部位等因素^[2,5]有关。上述几个样品都采自侧碛垄顶部。根据此前我们对本地区^[2]以及雀儿山地区^[5]年轻冰川沉积 OSL 测年的结果, 侧碛垄顶部样品或上部的样品残余剂量相对较低。推测它们可能以冰面岩屑(表碛)堆积为主, 曝光的几率较大, 因此晒退程度较好^[2,5]。除此之外, 彼时冰川长度较大, 岩屑在冰川中的搬运距离较长, 也有可能增加其曝光的几率。

对于下望峰冰碛的形成时代, 不同的测年结果差异较大。李世杰^[13]根据下望峰冰碛平台下伏河流沉积物的石英砂 TL 年代 (37.7 ± 2.6 ka), 认为上覆的下望峰冰碛是末次冰期晚期的沉积物。易朝路等^[14]在下望峰冰碛平台上部冰碛中获得的 ESR 年代为 54.6~72.6 ka, 下望峰冰碛下伏的河流沉积物 ESR 年代为 40.1 ka。据此推断下望峰冰碛沉积于末次冰期早期 (MIS 4)。施雅风等^[41]对末次冰期冰碛的 ^{14}C 、AMS ^{14}C 和 ESR 测年进行比较, 发现 ESR 测年结果比 ^{14}C 和 AMS ^{14}C 偏老数千年, 因此推断下望峰冰碛可能是末次冰期早期 (MIS 4) 和中阶段中期 (MIS 3b) 冷期冰川前进的复合产物。Zhao 等^[15]对冰碛平台下部冰碛物测年, 获得三个较为一致的 ESR 年龄, 分别为 176 ± 18 ka、 184.7 ± 18 ka 与 171.1 ± 17 ka。他们推断下望峰冰碛是由两次冰川作用形成, 即冰碛平台上部沉积于末次冰期早期 (MIS 4), 冰碛平台下部冰碛为倒数第二次冰川作用的残留物, 可对应于 MIS 6。Li 等^[18-19]在下望峰获得 ^{10}Be 暴露年代在 18.2 ± 1.2 ka~ 23.5 ± 1.5 ka 之间。可见, 不同测年技术的测年结果跨度较大, 从 MIS 6、MIS 4、MIS 3 至 MIS 2 都有报道。总体上, ^{10}Be 暴露年代较年轻, TL 和 OSL 次之, ESR 年代较老。对此现象的几种可能的解释是: ①不同测年技术的年代结果具有不同的指示意义。 ^{10}Be 暴露年代指示漂砾暴露于冰碛垄上的时间; 而 TL、OSL 和 ESR 指示冰碛垄堆积的时间。这两个事件可能存在一定的时间差, 但其长短很难估计。②漂砾有可能受雪盖、侵蚀、翻动、剥露等的影响导致 ^{10}Be 暴露年代偏年轻。TL、OSL 和 ESR 则有可能因为样品不完全晒退/有残余剂量而导致年代高估。③还有一种可能

是, 下望峰沉积比较复杂, 包含有不同时代的冰川堆积。我们的样品 DX501 的 OSL 年代为 36.3 ± 2.8 ka, 对应于 MIS 3, 符合下望峰比上望峰老的地貌新老关系认识。但单一的 OSL 年代仍无法对下望峰形成时代做出定论。且天山及附近地区的测年^[19,27-39,42]也显示, MIS 6、MIS 4、MIS 3 和 MIS 2 的冰川作用在很多地点也都是存在的。下望峰冰川作用的确切对应时代, 看来仍需更多的工作(包括沉积学和年代学)才能最终确定。

OSL 年代结果显示乌鲁木齐河源地区末次冰期冰川作用可细分为 3 期: MIS 3 或更早、LGM 和晚冰期。3 次冰川作用的规模依次减小。在 MIS 3 或更早之前, 望峰道班之上的大西沟各支谷(包括罗卜道沟)冰川合并进入主谷, 延伸至望峰道班之下(即下望峰冰碛位置), 冰川长度比现在的 1 号冰川长 10 km 以上。LGM 时期, 冰川规模比 MIS 3 稍小, 各支谷冰川合并进入主谷后, 末端在望峰道班之上不远(即上望峰冰碛末端)。冰川长度比今天长 9 km 左右。晚冰期时, 冰川规模进一步萎缩。大西沟源头的 1、2、3 号冰川仍合并, 但末端仅达冰川观测站附近, 距离现代冰川末端 3 km 左右。罗卜道沟的 6、7 号冰川合并后其末端在罗卜道沟口附近, 长度也仅比今天长 3 km 左右。而其它支谷冰川(4、5、8、9 号冰川等), 则与主谷冰川脱离, 末端在各支谷口附近。末次冰期早期冰川规模大于晚期, 冰川规模逐渐萎缩, 这与天山末次冰期冰川演化的总体框架^[19,27-39,42-43]是一致的。

6 结论

(1) 天山乌鲁木齐河源末次冰期冰碛物的 OSL 年代符合地貌地层关系。冰川观测站以及上望峰冰碛的 OSL 年代结果与其它测年技术的年代结果具有可比性。两个重复对比样品显示了相近的年代结果。以上证据表明本文涉及的冰川沉积样品可能不存在不完全晒退现象, 本文中的冰川沉积 OSL 测年是可信的。

(2) 综合各种测年结果, 推测鲁木齐河源地区末次冰期可能存在 3 次冰进: MIS 3 或更早、末次冰期最盛期和晚冰期。可以确定的是上望峰冰碛及其上游的冰川观测站冰碛都形成于 MIS 2 阶段。冰川观测站冰碛垄、9 号冰川支谷口冰碛的 OSL 年代为 14.8 ± 1.2 ka、 13.5 ± 1.1 ka 和 17.2 ± 1.3 ka, 对应于晚冰期。上望峰冰碛的 OSL 年代为 20.1 ± 1.6 ka, 对应于 LGM。下望峰冰碛 OSL 年代为 36.3 ± 2.8 ka, 对应于 MIS 3 阶段。但下望峰冰碛仍有待更详细的沉积学和测年研究以进一步确定其形成时代。

致谢: 牛东风、王江龙参与了野外采样, 在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Duller G A T. Single grain optical dating of glacial deposits[J]. *Quaternary Geochronology*, 2006, 1(4): 296-304.
- [2] Ou X J, Lai Z P, Zhou S Z, et al. Optical dating of young glacial sediments from the source area of the Urumqi River in Tianshan Mountains, northwestern China[J]. *Quaternary International*, 2015, 358: 12-20.
- [3] Richards B W M. Luminescence dating of Quaternary sediments in the Himalaya and High Asia: a practical guide to its use and limitations for constraining the timing of glaciation[J]. *Quaternary International*, 2000, 65/66: 49-61.
- [4] Tsukamoto S, Asahi K, Watanabe T, et al. Timing of past glaciations in Kanchenjunga Himal, Nepal by optically stimulated luminescence dating of tills[J]. *Quaternary International*, 2002, 97/98: 57-67.
- [5] Zeng L H, Ou X J, Lai Z P, et al. Optically stimulated luminescence dating of young glacial sediments from the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(7): 1174-1185.
- [6] Bateman M D, Swift D A, Piotrowski J A, et al. Can glacial shearing of sediment reset the signal used for luminescence dating?[J]. *Geomorphology*, 2018, 306: 90-101.
- [7] Wang J T. Ancient glaciers at the head of Urumqi River, Tian Shan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(Suppl 1): 57-63. [王靖泰. 天山乌鲁木齐河源的古冰川[J]. *冰川冻土*, 1981, 3 (增刊 1): 57-63.]

- [8] Zheng Benxing, Zhang Zhenshuan. Fluctuation of glaciers during Neoglaciation in Bogda and the Urumqi River head, Tian Shan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(3): 133-142. [郑本兴, 张振拴. 天山博格达峰地区与乌鲁木齐河源新冰期的冰川变化[J]. *冰川冻土*, 1983, 5(3): 133-142.]
- [9] Yi C L, Liu K X, Cui Z J. AMS dating on glacial tills at the source area of the Urumqi River in the Tianshan Mountains and its implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(20): 1749-1751.
- [10] Yi C L, Liu K X, Cui Z J, et al. AMS radiocarbon dating of late Quaternary glacial landforms, source of the Urumqi River, Tien Shan: a pilot study of C-14 dating on inorganic carbon[J]. *Quaternary International*, 2004, 121: 99-107.
- [11] Chen J Y. Preliminary researches on lichenometric chronology of Holocene glacial fluctuations and on other topics in the headwater of Urumqi River, Tian-Shan Mountains[J]. *Science in China (Series B)*, 1989, 32(12): 1487-1500.
- [12] Wang Zongtai. The glacier and environment in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan since the Little Ice Age[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1991, 46(2): 160-168. [王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来的冰川及环境[J]. *地理学报*, 1991, 46(2): 160-168.]
- [13] Li Shijie. Ancient environment reconstruction in the late Pleistocene at the head of Urumqi Valley, Tianshan[C]//Committee of Geomorphology and Quaternary, Geographical Society of China. *Geomorphology, environment, development*. Beijing: China Environmental Science Press, 1995: 14-18. [李世杰. 天山乌鲁木齐河源更新世晚期的古环境重建[C]//中国地理学会地貌与第四纪专业委员会. *地貌 环境 发展*. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 14-18.]
- [14] Yi Chaolu, Jiao Keqing, Liu Kexin, et al. ESR dating on tills and the Last Glaciation at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains, China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 389-393. [易朝路, 焦克勤, 刘克新, 等. 冰碛物 ESR 测年与天山乌鲁木齐河源末次冰期系列[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 389-393.]
- [15] Zhao J D, Zhou S Z, He Y Q, et al. ESR dating of glacial tills and glaciations in the Urumqi River headwaters, Tianshan Mountains, China[J]. *Quaternary International*, 2006, 144: 61-67.
- [16] Zhou S Z, Wang X L, Wang J, et al. A preliminary study on timing of the oldest Pleistocene glaciation in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary International*, 2006, 154/155: 44-51.
- [17] Kong P, Fink D, Na C G, et al. Late Quaternary glaciation of the Tianshan, Central Asia, using cosmogenic Be-10 surface exposure dating[J]. *Quaternary Research*, 2009, 72(2): 229-233.
- [18] Li Y K, Liu G N, Kong P, et al. Cosmogenic nuclide constraints on glacial chronology in the source area of the Urumqi River, Tian Shan, China[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(3): 297-304.
- [19] Li Y K, Liu G N, Chen Y X, et al. Timing and extent of Quaternary glaciations in the Tianger Range, eastern Tian Shan, China, investigated using ¹⁰Be surface exposure dating[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 98: 7-23.
- [20] Li Y N, Li Y K, Harbor J, et al. Cosmogenic ¹⁰Be constraints on little ice age glacial advances in the eastern Tian Shan, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 138: 105-118.
- [21] Ye B S, Yang D Q, Jiao K Q, et al. The Urumqi River source Glacier No. 1, Tianshan, China: changes over the past 45 years[J/OL]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(21) [2019-04-03]. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2005GL024178>.
- [22] Ma Qihua. Features of Wangfeng glacial moraine at the head water of Urumqi 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.]
- [23] Lai Zhongping, Ou Xianjiao. Basic procedures of optically stimulated luminescence (OSL) dating[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(5): 683-693. [赖忠平, 欧先交. 光释光测年基本流程[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 683-693.]
- [24] Prescott J, Hutton J. 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.
- [25] Lai Z P, Zoller L, Fuchs M, et al. Alpha efficiency determination for OSL of quartz extracted from Chinese loess[J]. *Radiation Measurements*, 2008, 43(2/3/4/5/6): 767-770.
- [26] Aitken M J. *An introduction to optical dating*[M]. Oxford, UK: Oxford University Press, 1998.

- [27] Batbaatar J, Gillespie A R, Fink D, et al. Asynchronous glaciations in arid continental climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 182: 1-19.
- [28] Blomdin R, Stroeven A P, Harbor J M, et al. Evaluating the timing of former glacier culmination in the Tian Shan: a key step towards robust spatial correlations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 153: 78-96.
- [29] Blomdin R, Stroeven A P, Harbor J M, et al. Timing and dynamics of glaciation in the Ikh Turgen Mountains, Altai region, High Asia[J]. *Quaternary Geochronology*, 2018, 47: 54-71.
- [30] Chen Y X, Li Y K, Wang Y Y, et al. Late Quaternary glacial history of the Karlik Range, easternmost Tian Shan, derived from ¹⁰Be surface exposure and optically stimulated luminescence datings[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 17-27.
- [31] Gribenski N, Jansson K N, Preusser F, et al. A re-evaluation of MIS 3 glaciation using cosmogenic radionuclide and single grain luminescence ages, Kanas Valley, Chinese Altai[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2018, 33: 55-67.
- [32] Xu X K, Yang J Q, Dong G C, et al. OSL dating of glacier extent during the Last Glacial and the Kanas Lake basin formation in Kanas River valley, Altai Mountains, China[J]. *Geomorphology*, 2009, 112: 306-317.
- [33] Xu X K, Kleidon A, Miller L, et al. Late Quaternary glaciation in the Tianshan and implications for palaeoclimatic change: a review[J]. *Boreas*, 2010, 39(2): 215-232.
- [34] Yang J Q, Chen Y X, Xu X K, et al. Quaternary glacial history of the Kanas Valley, Chinese Altai, NW China, constrained by electron spin resonance and optically stimulated luminescence datings[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2017, 147: 164-177.
- [35] Zhao J D, Liu S Y, He Y Q, et al. Quaternary glacial chronology of the Ateaoynake River Valley, Tianshan Mountains, China[J]. *Geomorphology*, 2009, 103: 276-284.
- [36] Zhao J D, Song Y G, King J W, et al. Glacial geomorphology and glacial history of the Muzart River valley, Tianshan range, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 1453-1463.
- [37] Zhao J D, Lai Z P, Liu S Y, et al. OSL and ESR dating of glacial deposits and its implications for glacial landform evolution in the Bogeda Peak area, Tianshan range, China[J]. *Quaternary Geochronology*, 2012, 10: 237-243.
- [38] Zhao J D, Yin X F, Harbor J M, et al. Quaternary glacial chronology of the Kanas River valley, Altai Mountains, China[J]. *Quaternary International*, 2013, 311: 44-53.
- [39] Zhao J, Wang J, Harbor J M, et al. Quaternary glaciations and glacial landform evolution in the Tailan River valley, Tianshan Range, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 358: 2-11.
- [40] Zech R. A late Pleistocene glacial chronology from the Kitschi-Kurumdu Valley, Tien Shan (Kyrgyzstan), based on Be-10 surface exposure dating[J]. *Quaternary Research*. 2012, 77: 281-288.
- [41] Shi Yafeng, Yao Tandong. MIS 3b (54-44 ka BP) cold period and glacial advance in middle and low latitudes[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(1): 1-9. [施雅风, 姚檀栋. 中低纬度 3b(54-44 ka BP)冷期与冰川前进[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(1): 1-9.]
- [42] Zhang M, Chen Y X, Li Y K, et al. Late Quaternary glacial history of the Nalati Range, central Tian Shan, China, investigated using ¹⁰Be surface exposure dating[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2016, 31(7): 659-670.
- [43] Xiao Jing, Liu Gengnian, Nie Zhenyu, et al. Glacial evidence of aridification in the Tianshan Mountains since Last Glacial[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(3): 434-447. [肖菁, 刘耕年, 聂振宇, 等. 天山末次冰期以来干旱化过程的冰川证据[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(3): 434-447.]

OSL dating on glacial sediments of the Last Glacial in headwater of Urumqi River, Tianshan

ZENG Lanhua¹, OU Xianjiao^{1,4}, CHEN Rong², LAI Zhongping³

(1.School of Geography and Tourism, Jiaying University, Meizhou 514015, Guangdong, China; 2.State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Institute of Marine Science, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China; 4.Department of Geography and Earth Sciences, Aberystwyth University, Ceredigion SY23 3DB, UK)

Abstract: The headwater of Urumqi River is one of the areas with most abundant glacial relics and most typical glacial landforms in China. It is an ideal site for reconstructing the history of Quaternary glaciation based on glacial relics. Numerous studies and technical dating results make it an ideal site to test the applicability of optically stimulated luminescence (OSL) dating of glacial sediments. Six till and overlying loess samples were collected for OSL dating. The 38-63 μm quartz grains were extracted and the equivalent dose was measured by SAR-SGC method. Various tests show that the procedure is applicable. The reliability of OSL dating of glacial sediments is tested by comparisons with geomorphological and stratigraphical relationship and known ages. The results show that the OSL ages are in good agreement with the geomorphological and stratigraphical relationship, and are comparable with ages of other dating techniques. These indicate that the samples had been well bleached before deposition and the OSL ages are reliable. The OSL age of the lateral moraine near the Glacier Observatory is 14.8 ± 1.2 ka; till samples near the mouth of the branch valley of Glacier No.9 are 13.5 ± 1.1 ka and 17.2 ± 1.3 ka; OSL age of the Upper Wangfeng moraine is 20.1 ± 1.6 ka. Based on the OSL ages and previous dating results, it can be concluded that these sets of moraines were formed during the marine oxygen isotope stage 2 (MIS 2). The OSL age of loess overlying the Upper Wangfeng moraine (10.5 ± 0.8 ka) further confirms this conclusion. OSL ages also indicate that the Upper Wangfeng moraine corresponds to the Last Glacial Maximum (LGM), while moraines near the Glacier Observatory and the mouth of the branch valley of Glacier No.9 correspond to Late Glacial. The OSL age of Lower Wangfeng moraine is 36.3 ± 2.8 ka, which corresponds to the MIS 3 stage. However, the forming time of Lower Wangfeng moraine requires further confirmed by more sedimentology and chronology works.

Key words: glacial sediments; OSL dating; Wangfeng moraines; Last Glacial; bleaching