

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0008

Yin Xiufeng, Zhao Jingdong, Wu Yunfei. OS� dating of glacial deposits and glaciations in the Heigou River valley, eastern Tianshan Range, China
[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 63–70. [殷秀峰, 赵井东, 伍云飞. 东天山黑沟流域冰川沉积序列及 OS� 测年研究 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 63–70.]

东天山黑沟流域冰川沉积序列及 OS� 测年研究

殷秀峰^{1,2}, 赵井东^{1*}, 伍云飞^{1,2}

(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. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 黑沟源于东天山最大现代冰川作用中心博格达峰的南坡。在第四纪冰期与间冰期旋回中, 该流域的冰川均发生过多次规模较大的进退, 在谷中留下了较为完整的冰川沉积序列。这些冰川地形包含有重要的古气候变化信息, 对其研究可重建黑沟流域的冰川演化史。应用 OS� 对该流域的冰川沉积物进行定年, 测定结果表明冰水沉积物(沙质透镜体)比冰碛物更适宜应用单片再生剂量(SAR)测年技术进行测定。基于测得的年龄并结合地貌地层学原理可初步得出: 晚第四纪期间, 黑沟流域共发生了5次规模较大的冰川作用, 分别为全新世期间的小冰期(16世纪以来冷期的冰进)与新冰期(距今3~4 ka 的冰进), 末次冰期晚冰阶(MIS 2)与早冰阶(MIS 4)以及倒数第二次冰期(MIS 6)。

关键词: OS� 测年; 冰川地貌; 第四纪冰川; 天山

中图分类号: P534.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0240(2014)01-0063-08

0 引言

冰期与间冰期旋回是第四纪最基本的气候变化特征, 在气候旋回过程中, 冰川区的冰川均发生了规模较大的进退。冰川在演化过程中, 通过侵蚀、搬运与沉积等作用形成了形态独特的冰川地形, 这些地形包含有重要的古气候变化信息, 对其研究可重建冰川演化史^[1], 为古气候与古环境研究提供基本信息。随着多种可对冰川地形进行直接定年的测年技术的发展与应用, 我国第四纪冰川的研究水平得到进一步提升^[2-3], 近些年我国第四纪冰川研究的丰硕成果多为年代学与地貌地层学相结合取得的^[6-8]。此外, 测年技术的发展与应用还可以细化经典的冰期序列^[9]。

天山是中亚地区最大、构造活跃的山系之一, 在第四纪期间, 天山地区的冰川曾多次发生了规模较大的进退, 众多形态独特的古冰川地形保存在山谷、山间盆地与山麓带, 这些遗迹是重建天山地区第四纪冰川演化的理想素材。近年来, 多位学者运

用多种测年技术对天山的数个山区, 如喀拉乌成山北坡的乌鲁木齐河流域^[10-12]、托木尔峰地区^[13-14]以及吉尔吉斯斯坦与塔吉克斯坦境内天山^[15-18]的第四纪冰川开展了研究, 获得了古冰川的期次、规模、类型与性质等基本信息, 这些成果也可为天山第四纪抬升研究提供重要的参考信息。现代冰川及地貌景观是重要的旅游资源^[19], 对天山地区冰川地貌的研究可为天山冰川旅游资源的保护性开发提供理论支持。

博格达峰地区是东段天山最大的现代冰川作用中心, 第四纪冰川留下的较为清晰的遗迹保存在四周的谷地中。自20世纪50年代起, 多家单位与众多学者对博格达峰地区的冰川地貌展开了研究, 其中1981年中日联合考察取得的资料最为详实, 获得了本区自然地理的基本特征、冰川发育的气候条件、现代冰川的分布及其变化、冰川地貌等多方面的珍贵资料^[20-24]。因受当时技术的限制, 未对冰川地形的年代进行测定, 限制了我们对博格达峰地区第四纪冰川演化的认识。本文在多次对博格达峰

收稿日期: 2013-09-23; 修订日期: 2013-10-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371028; 41230743; 41071010); 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KZCX2-EW-QN304); 中国科学院西部之光项目; 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCSS-ZZ-20120003); 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室开放基金项目资助

作者简介: 殷秀峰(1988-), 男, 江西九江人, 2011年毕业于江西师范大学, 现为硕士研究生, 主要从事第四纪冰川与全球变化研究

* 通讯作者: 赵井东, E-mail: jdzhaol@lzb.ac.cn

南坡冰川地貌进行了考察与采样的基础上,运用光释光(optically stimulated luminescence, OSL)测年技术对冰水沉积物(沙质透镜体)与冰碛物进行了定年,结合前人的研究资料来探讨博格达峰南坡的第四纪冰川演化史.

1 研究区概况

黑沟源于东天山博格达峰南坡,其气候主要受中纬度西风环流控制.基于博格达峰周围气象资料推算,海拔 4 000 m 以上山地的年降水量约为 670 mm,年均温低于 -9°C ^[2d].以最高峰博格达峰(海拔 5 445 m)连同其他高峰为中心形成了东段天山最大的冰川作用区.根据冰川编目统计,黑沟流域共发育现代冰川 21 条,总面积约 21.56 km²,冰储量约 1.2084 km³.冰川类型包括悬冰川、冰斗冰川与山谷冰川等,最大的山谷冰川是黑沟 8 号冰

川(冰川编目编号为 5Y813B8),为雪崩补给型双粒雪盆山谷冰川,长约 7.1 km,总面积约 5.61 km²,冰储量约 0.4376 km³,最高海拔 5 445 m,冰舌末端海拔约 3 380 m,平衡线海拔约 4 050 m^[2d].积累区发育各种雪崩槽 70 余条,雪崩槽平均密度达 19 条·km⁻¹,雪崩系数达 0.69.每年雪崩量约 $3.8 \times 10^6 \text{ m}^3$,占该冰川总补给量近一半^[2i].相关研究资料显示:1962–2006 年间该冰川末端退缩了 230 m,面积减小了 1.3%,20 世纪 80 年代以后,冰川退缩呈加剧状态^[2d].其融水向南流入柴窝铺盆地,为柴窝铺绿洲经济的发展提供了宝贵的淡水资源.

2 冰川沉积序列

黑沟流域多次冰川进退形成的冰碛地形保存较好,包括终碛垄与侧碛垄.从黑沟 8 号冰川向下至

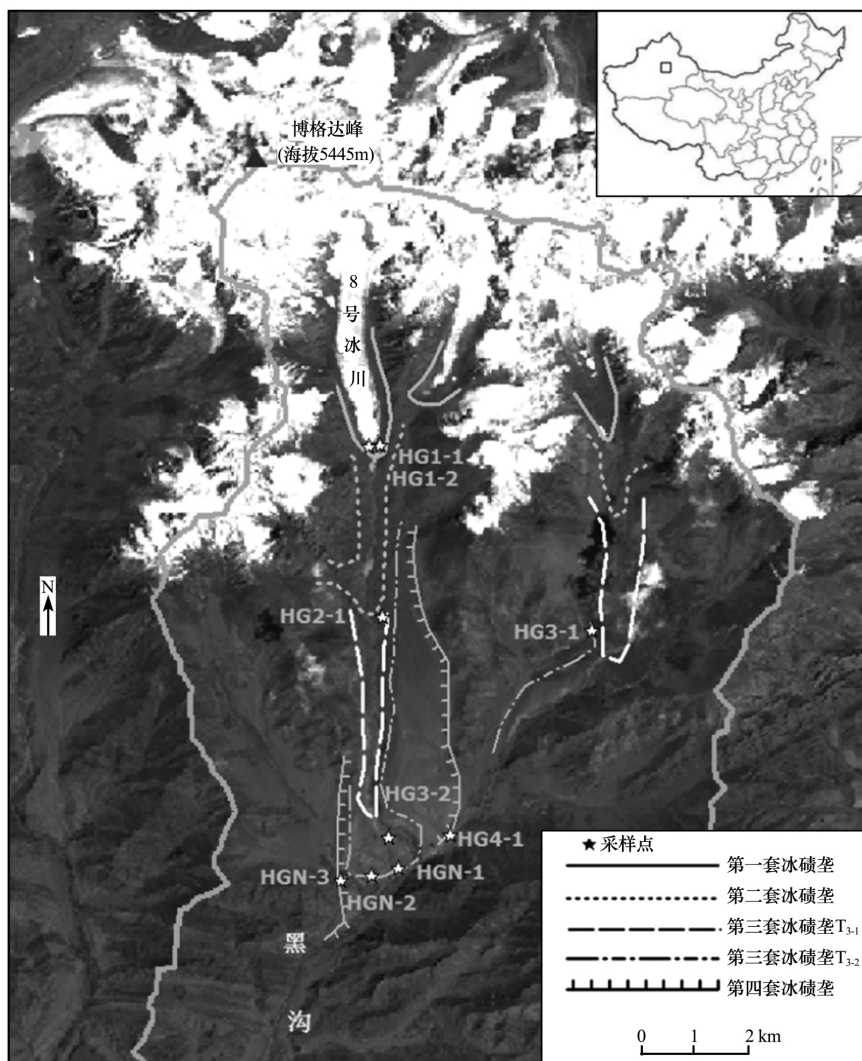


图 1 黑沟流域冰川沉积序列及 OSL 采样点分布图

Fig. 1 Glacial sediment sequences and OSL sampling sites in the Heigou River valley

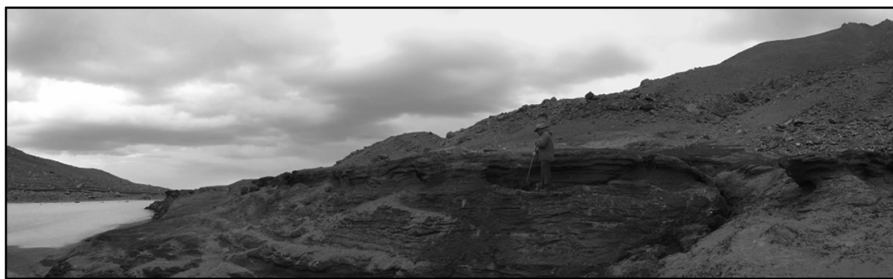


图2 海拔约 3 300 m 的冰碛堰塞湖沉积(43°43'38" N, 88°21'31.2" E)

Fig. 2 Glaciolacustrine sediments at about 3 300 m a s l. (43°43'38" N, 88°21'31.2" E)

海拔 2 400 m 处, 共保存有 4 套冰碛(图 1) .

第一套冰碛距 8 号冰川末端约 500 m, 为一道终碛垄. 垄上无土壤及植被发育, 冰碛石表面新鲜, 主要岩性为辉绿岩. 该终碛垄目前仍阻塞河道, 形成了面积约 0.05 km² 的冰碛堰塞湖. 仅在下流方向上由冰雪融水切开数米深的出水口.

第二套冰碛由数列冰碛垄组成, 分布在 8 号冰川末端向下 0.5 ~ 4 km 范围内, 侧碛垄高出河床约 30 m(东侧比较明显). 最外一列形态清晰的终碛垄已被冰雪融水切入 20 ~ 30 m. 冰碛垄上发育有土壤并生长有稀疏的牧草. 在谷地的西侧, 沿河可见数米厚湖相沉积, 表明在这次冰川作用过程中, 河道曾被冰碛垄阻塞. 从湖相沉积的分布与厚度看(图 2), 该冰碛堰塞湖维持了一段时间, 现该湖已大为萎缩, 面积仅约 0.03 km².

第三套冰碛分布在 8 号冰川向下 4 ~ 9 km 范围内. 由高(T_{3-2}) 和低(T_{3-1}) 两列冰碛台地组成. T_{3-1} 长约 3 km, 宽 100 ~ 150 m, 高出河床 20 ~ 30 m. T_{3-2} 长约 5 km, 宽度从数米到 200 m 不等, 高于河床 50 ~ 70 m. 冰碛垄表面已发育有薄的土层并被覆盖有牧草.

第四套冰碛为本流域面积最大的冰碛地形, 在黑沟的东西两侧均有分布. 在东侧, 从海拔 3 300 m 直至 2 800 m 处, 延伸 3.5 km, 最宽处超过了 1 km. 在西侧, 分布在海拔 3 050 m 至 2 400 m 处, 延伸 4 km. 大量直径 1 ~ 3 m 的漂砾散布在冰碛垄上, 主要岩性为辉绿岩且风化强烈.

东侧支沟(称为东沟) 的冰碛地形分布情形与主沟相似. 第一套冰碛分布在现代冰碛向下约 1 km 的范围里, 系有两道终碛垄组成, 垄间相距约 800 m. 内终碛垄上分布的漂砾表面新鲜无风化, 外终碛垄已有稀疏的牧草生长. 第二套冰碛分布在现代冰川向下 1.2 ~ 3 km 范围, 冰碛已有初步风化. 第三套冰碛也大致可分为两组, 第一组形态较

为完整, 从海拔约 3 350 m 延伸至 3 050 m. 第二组相对残破, 仅保留在东沟的西北侧, 大约从海拔 3 400 m 一直延伸到 2 800 m. 这两组冰碛垄可对应于主沟的 T_{3-1} 与 T_{3-2} 两级冰碛台地.

3 研究方法 with 结果

本次测定的 9 个 OSL 样品采自天然或人工开挖剖面. 样品的处理与测试在中国科学院青海盐湖研究所释光实验室中完成, 实验流程参见文献 [27-28]. 在室内安全红光下, 钢管两端各掏出 2 ~ 3 cm 的样品(去除曝光部分), 备测样品的含水量与环境剂量. 管内样品掏取后进行化学处理, 加入 H_2O_2 , 去除样品中的有机物; 加入稀盐酸, 溶解碳酸盐或能被 HCl 溶解的一些暗色物质; 之后筛选出 38 ~ 63 μm 的中颗粒物, 用 35% 的氟硅酸(H_2SiF_6) 浸泡 2 周, 溶解长石等矿物; 然后用稀盐酸溶解覆盖在石英颗粒表面的氟化物沉淀, 冲洗并烘干. 为了避免样品中残留有长石信号, 取少许样品进行红外光信号检测, 如果残存较强的红外信号, 则使用 H_2SiF_6 对样品进行再处理 [29], 最终制得符合测定要求的样品. 处理好的石英颗粒用硅胶油固定在直径 10 mm 的不锈钢片上制成靶样.

样品测定仪器为丹麦生产的 Risø TL/OSL-DA-20 释光仪. 为了避免残存红外释光信号对等效剂量(D_e) 测定的影响, 我们采用了红外后蓝光释光测试流程, 即 Banerjee 等 [30] 建议的双 SAR 测定流程. 根据已有的成功经验 [27-28], 选用预热温度为 260 $^{\circ}C$. 在进行蓝光激发前, 在 0 $^{\circ}C$ 条件下进行红外激发 100 s, 然后在 130 $^{\circ}C$ 环境下对样品进行 40 s 蓝光($\lambda = 470 \pm 20$ nm) 激发. 用 7.5 mm 厚 Hoya U-340 检波滤波器的 9 235QA 光电倍增管对光释光信号进行探测. 图 3 为样品 HG2-4 在自然剂量(N)、测试剂量($TD = 11.1$ Gy)、再生剂量为 88.8 Gy 和 0 Gy 的信号衰减曲线. 曲线显示: 在激发的第 1 秒内

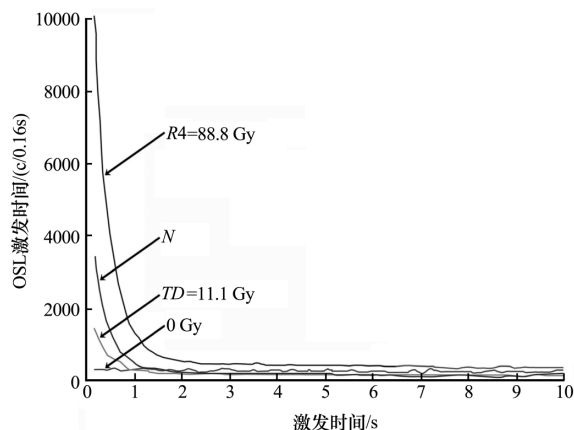


图3 样品 HG2-1 的信号衰减曲线

Fig. 3 OSL decay curves of sample HG2-1

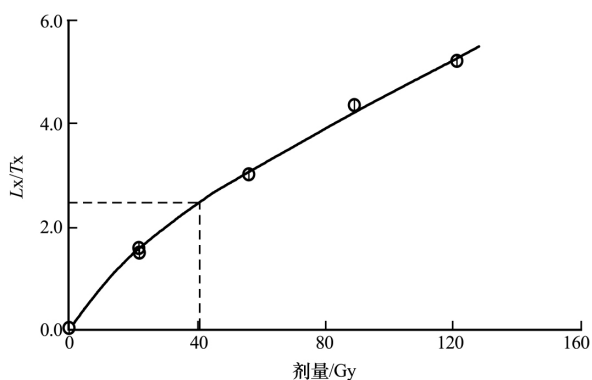


图4 样品 HG2-1 信号增长曲线

Fig. 4 Growth curve of sample HG2-1

信号衰减非常快,表明信号主要为对光照敏感的快组分。此外,多数测片的循环比在可接受的范围内,表明剂量测定灵敏校正是合适的。

应用单片再生剂量(SAR)技术^[31]和标准增长曲线(SGC)^[27-28,32-33]的综合方法获得等效剂量。对于每一个样品,制备6个测片使用SAR测定 D_e 。

(图4)。同时制备16~18个测片在SAR测定相同的条件下测定自然剂量值与测试剂量值的比值(L_N/T_N),利用SAR测定的数据建立的SGCs,代入 L_N/T_N 数值计算出对应的SGC- D_e 值。本研究中,由 L_N/T_N 带入建立的SGCs获得的等效剂量与SAR直接测得的 D_e 值有很好的 consistency。最终的 D_e 是SAR- $D_{e,s}$ 与SGC- $D_{e,s}$ 值的平均值。

样品的年剂量通过测定所在环境U、Th的浓度与K的百分含量、含水量以及样品所受宇宙射线的贡献^[34]等参数计算得出(表1)。

4 讨论

狭义的冰川沉积为冰川的直接沉积,即通常所说的冰碛;广义的冰川沉积包括冰碛、冰水沉积、冰川接触沉积等。不同部位、不同类型的冰川沉积物其曝光的程度与可能性存在差异,根据已有的研究成果^[35-38],结合山地冰川的运动特点^[39]以及冰碛垄的形成模式^[40],冰川沉积物的曝光程度与可能性通常为:表碛>内碛>底碛,冰水沉积>冰碛等^[37-38],但现有的研究资料表明,在某些研究区也存在冰碛完全曝光的报道^[27]。本研究中,样品HG1-1、HG1-2、HG3-2采自冰川直接沉积的冰碛,测得的年龄与地貌关系不符,说明本区的冰碛存在曝光不完全的缺陷。样品HG4-1采自第四套冰碛的边坡,年龄严重偏小可能系后期扰动所致。其余样品为冰水沉积(夹在冰碛中的沙质透镜体),测得的年龄符合地貌地层关系。此外,一些学者认为, D_e 柱状频率分布图可以判别测定样品的曝光程度^[27-28,41-44]。冰水沙样品获得的 D_e 柱状频率分布图都比较集中,如图5所示样品HG2-1的 D_e 柱状频率分布图,符合曝光较完全样品的特征,据此推

表1 OSL 测年结果及其相关参数

Table 1 OSL dating results and relevant parameters

样品	经度/E	纬度/N	海拔/m	深度/m	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	K/%	含水量/%	累积剂量/Gy	年龄/ka
HG1-1	88°21'43.05"	43°44'42.79"	3377	0.6	1.04 ± 0.19	2.09 ± 0.13	0.67 ± 0.05	2.08	51.81 ± 2.90	34.9 ± 2.8
HG1-2	88°21'43.03"	43°44'42.67"	3376	0.8	0.95 ± 0.16	2.15 ± 0.13	0.80 ± 0.06	3.14	192.6 ± 26.20	123.2 ± 18.2
HG2-1	88°21'41.82"	43°43'05.27"	3251	2.9	0.91 ± 0.14	3.31 ± 0.14	0.91 ± 0.06	2.39	40.51 ± 1.57	24.4 ± 1.7
HG3-1	88°25'21.74"	43°43'36.20"	3405	3.1	0.90 ± 0.18	2.43 ± 0.11	0.79 ± 0.06	1.77	111.34 ± 7.78	75.4 ± 7.1
HG3-2	88°21'52.06"	43°40'57.25"	2719	4.2	0.81 ± 0.16	2.19 ± 0.12	0.88 ± 0.06	4.59	265.40 ± 5.10	187.7 ± 12.9
HGN-1	88°22'00.92"	43°40'24.21"	2557	0.4	0.88 ± 0.20	1.97 ± 0.12	0.94 ± 0.07	2.84	127.81 ± 7.39	78.0 ± 6.8
HGN-2	88°21'45.08"	43°40'20.15"	2471	2.9	1.05 ± 0.20	1.88 ± 0.11	0.82 ± 0.06	1.03	126.0 ± 16.40	85.0 ± 12.4
HGN-3	88°21'25.38"	43°40'25.22"	2501	1.5	0.95 ± 0.17	1.98 ± 0.11	0.96 ± 0.06	2.64	211.40 ± 11.30	130.0 ± 10.4
HG4-1	88°22'33.85"	43°40'37.62"	2551	0.8	0.96 ± 0.17	2.61 ± 0.13	0.52 ± 0.04	2.06	14.46 ± 1.55	11.2 ± 1.4

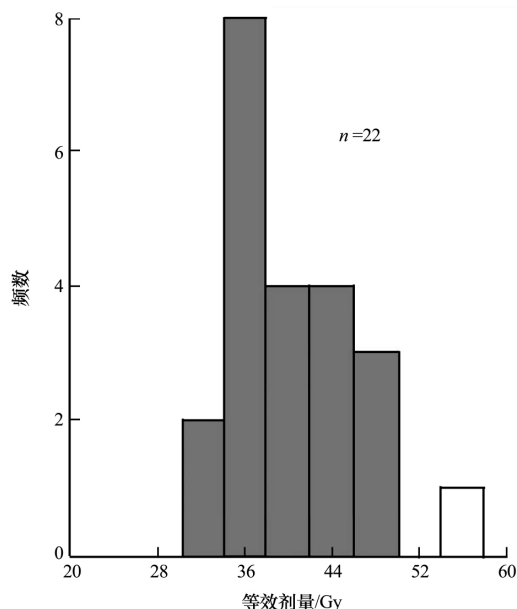


图5 样品 HG2-1D_e值柱状分布图(空柱为异常数据)

Fig. 5 D_es histogram of the sample HG2-1

断本区的冰水沉积符合 OSL 测年的曝光要求。

黑沟流域的冰川地形记录了博格达峰南坡的古冰川变化情况,也为冰川地貌的演化研究提供了可能。郑本兴等^[23]根据博格达峰地区与乌鲁木齐河源区的冰碛风化程度、地貌地层关系、土壤与植被等发育情况得出:这两个相邻区域全新世期间冰川波动模式较为一致。根据乌鲁木齐河源区现代冰碛外围第一套与第二套冰碛的地衣法年代测定结果^[45]、冰碛表面钙膜的 AMS¹⁴C 测定年龄^[46]以及山北组(第二套冰碛)的常规¹⁴C 测定年龄^[23]。可以推断黑沟流域第一套冰碛为小冰期(16 世纪以来冷期)冰川前进所沉积,第二套冰碛形成于新冰期。黑沟 8 号冰川在其规模最大时的长度分别约 7.6 km 与 11 km。

根据第三套冰碛的低冰碛台地(T₃₋₁)中沙质透镜体的年龄(HG2-1, (24.4 ± 1.7) ka)可以得出, T₃₋₁沉积于末次冰期晚冰阶,可与 MIS 2 相对应。高冰碛台地(T₃₋₂)中沙质透镜体的两个年龄分别为(78.0 ± 6.8) ka(HGN-1)与(85.0 ± 12.4) ka(HGN-2),东沟相应地貌部位的样品年龄为(75.4 ± 7.1) ka(HG3-1),测定的年龄可对应于 MIS 4 早期或 MIS 5 末期。根据古里雅冰芯中 δ¹⁸O 记录, MIS 5 末期(MIS 5a)温度比现在大约要高出 3 °C^[47]。据此,笔者认为 T₃₋₂沉积于末次冰期早冰阶,可与 MIS 4 相对应。基于测得的 OSL 年龄与现存的冰川地形,黑沟流域末次冰期冰川最大规模出

现在早冰阶而非具有全球意义的末次冰期最盛期(global Last Glacial Maximum, gLGM)。黑沟 8 号冰川在 MIS 4 规模最大时至少比现代冰川长 7 km,为一个巨大的山谷冰川。

第四套冰碛唯一的年龄为(130.0 ± 10.4) ka(HGN-3),说明这套冰碛形成于倒数第二次冰期,可对应于 MIS 6,冰川地形指示当时冰川比现代冰川至少长 10 km。天山地区目前测得的最老冰期在时间上可对应于 MIS 12^[11,13],而黑沟流域的最老冰碛沉积于倒数第二次冰期,是否为博格达地区的最老冰期还需要结合北坡的研究工作做进一步探讨,这也是目前中国第四纪冰川研究的重点与难点^[48]。此外,笔者还将利用多种平衡线算法^[49],来重建末次冰期时的冰川平衡线。

5 结论

黑沟流域的冰水沉积(沙质透镜体)基本满足 OSL 测年的曝光要求,但冰碛物存在曝光不完全的缺陷。基于地貌地层关系及相应的 OSL 年龄可初步得出如下结论:第一套冰碛可能形成于小冰期(16 世纪以来冷期的冰进);第二套冰碛可能是新冰期(距今 3 ~ 4 ka 的冰进)的产物;第三套冰碛较低(T₃₋₁)和较高(T₃₋₂)冰碛台地分别形成于末次冰期晚冰阶与早冰阶,可分别对应于 MIS 2 和 MIS 4。第四套冰碛最晚沉积于倒数第二冰期,时间上可对应于 MIS 6。小冰期、新冰期与末次冰期的冰碛地形显示,冰川最大规模时的古冰川长度分别为 7.6 km、11 km 与 14 km。

致谢:邓晓峰、上官冬辉、于禄鹏、王飞腾、江合理等在野外工作中的协助;张静然、张彪在 OSL 测年过程中提供的帮助与有益的讨论,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Zhao Jingdong, Wang Jie, Shen Yongping, *et al.* Distribution and features of glacial landforms in the northwest of the Die Shan, West Qinling Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 841–847. 赵井东, 王杰, 沈永平, 等. 西秦岭迭山西北部冰川地貌分布及其特征 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 841–847.]
- [2] Jiang Heli, Zhao Jingdong, Yin Xiufeng, *et al.* New OSL chronology of the Last Glaciation in Kanas River valley, Altay Mountains, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 304–310. 江合理, 赵井东, 殷秀峰, 等. 阿尔泰山喀纳斯河流域末次冰期 OSL 年代学新证 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(2): 304–310.]
- [3] Liu Gengnian, Li Yingkui, Chen Yixin, *et al.* Glacial landform

- chronology and environment reconstruction of Peiku Gangri, Himalayas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 959–970. [刘耕年, Li Yingkui, 陈艺鑫, 等. 喜马拉雅山佩枯岗日冰川地貌的年代学、平衡线高度和气候研究 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 959–970.]
- [6] Chen Yixin, Li Yingkui, Zhang Mei, *et al.* Terrestrial cosmogenic nuclide ^{10}Be exposure ages of the samples from Wangkun till in the Kunlun Pass [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 101–109. [陈艺鑫, 李英奎, 张梅, 等. 昆仑山垭口地区“望昆冰期”冰碛宇宙成因核素 ^{10}Be 测年 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 101–109.]
- [7] Ou Xianjiao, Zeng Lanhua, Long Hao, *et al.* Applicability of OSL dating the quartz from the tills of last glacial in the Hengduan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(1): 110–117. [欧先交, 曾兰华, 隆浩, 等. 横断山区末次冰期冰碛物石英光释光测年的适应性 [J]. *冰川冻土*, 2011, 33(1): 110–117.]
- [8] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen. The Quaternary Glaciations and Environmental Variations in China [M]. Shanghai: Hebei Science and Technology Press, 2006: 1–618. [施雅风, 崔之久, 苏珍. 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: 1–618.]
- [9] Shi Yafeng, Zhao Jingdong, Wang Jie. New Understanding of Quaternary Glaciations in China [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2011: 1–213. [施雅风, 赵井东, 王杰. 中国第四纪冰川新论 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2011: 1–213.]
- [10] Zhao Jingdong, Shi Yafeng, Wang Jie. Comparison between Quaternary glaciations in China and the marine oxygen isotope stage (MIS): An improved schema [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(7): 867–884. [赵井东, 施雅风, 王杰. 中国第四纪冰川演化序列与 MIS 对比研究的新进展 [J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 867–884.]
- [11] Zhou Shangzhe. New advance in study of Alpine glaciations [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1127–1133. [周尚哲. 阿尔卑斯山区第四纪冰川最新研究 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1127–1133.]
- [12] Zhou Shangzhe, Jiao Keqin, Zhao Jingdong, *et al.* The geomorphology of Ürümqi River valley and the uplift of Tianshan Mountain in the Quaternary [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2002, 45(11): 961–968.
- [13] 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.
- [14] Li Yingkui, Liu Gengnian, Kong Ping, *et al.* Cosmogenic nuclide constraints on glacial chronology in the source area of the Ürümqi River, Tian Shan, China [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2011, 26(3): 297–304.
- [15] 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.
- [16] Zhao Jingdong, Song Yougui, 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.
- [17] Koppes M, Gillespie A R, Burke R M, *et al.* Late Quaternary glaciation in the Kyrgyz Tien Shan [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 846–866.
- [18] Narama C, Kondo R, Tsukamoto S, *et al.* Timing of glacier expansion during the Last Glacial in the inner Tien Shan, Kyrgyz Republic by OSL dating [J]. *Quaternary International*, 2009, 199: 147–156.
- [19] Zech R. A late Pleistocene glacial chronology from the Kitschi-Kurumdu Valley, Tien Shan (Kyrgyzstan), based on ^{10}Be surface exposure dating [J]. *Quaternary Research*, 2012, 77: 281–288.
- [20] Zech R, R hringer I, Sosin P, *et al.* Late Pleistocene glaciations in the Gissar Range, Tajikistan, based on ^{10}Be surface exposure dating [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2013, 369: 253–261.
- [21] Wang Shijin, Zhao Jingdong, He Yuanqing. Adaptive strategy of mountain glacier tourism under climate warming background – A case study of Mt. Yulong Snow-Glacier-Geological Park [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(1): 207–213. [汪世金, 赵井东, 何元庆. 气候变化背景下山地冰川旅游适应对策研究——以玉龙雪山冰川地质公园为例 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(1): 207–213.]
- [22] Wu Guanghe, Ageta Y, Qiu Jiaqi. Physical geographic features and climatic conditions of glacial development in Bogda area, Tian Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(3): 5–16. [伍光和, 上田丰, 仇家琪. 天山博格达山脉的自然地理特征及冰川发育的气候条件 [J]. *冰川冻土*, 1983, 5(3): 5–16.]
- [23] Wang Zongtai. A discussion on the questions of development of Heigou Glacier No. 8, Bogda-Peak region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, 13(2): 141–146; 158. [王宗太. 博格达峰黑沟 8 号冰川发育若干问题浅析 [J]. *冰川冻土*, 1991, 13(2): 141–146; 158.]
- [24] Wang Yinsheng, Qiu Jiaqi. Distributive features of the glaciers in Bogda region, Tian Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(3): 17–24. [汪银生, 仇家琪. 天山博格达峰地区现代冰川分布特征 [J]. *冰川冻土*, 1983, 5(3): 17–24.]
- [25] Zheng Benxing, Zhang Zhenshuan. Fluctuation of glaciers during Neoglaciation in Bogda and the Ürümqi 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.]
- [26] Zheng Benxing, Wang Cunian. A discussion on Quaternary glaciation in the Bogda region, Tian Shan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(3): 123–132. [郑本兴, 王存年. 天山博格达峰地区第四纪冰期探讨 [J]. *冰川冻土*, 1983, 5(3): 123–132.]
- [27] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China III: Tian Shan Mountains (Interior Drainage Area of Scattered Flow in East) [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1–72. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录 III: 天山山区(东部散流内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1–72.]
- [28] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, *et al.* Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(33): 3596–3604.
- [29] Ou Xianjiao, Xu Liubing, Lai Zhongping, *et al.* Potential of quartz OSL dating on moraine deposits from eastern Tibetan Plateau using SAR protocol [J]. *Quaternary Geochronology*, 2010, 5: 257–262.
- [30] Zhao Jingdong, Yin Xiufeng, Harbor J M, *et al.* Quaternary glacial chronology of the Kanas River valley, Altai Mountains, Chi-

- na [1]. *Quaternary International*, 2013, **311**: 44–53.
- [29] Lai Zhongping, Brckner H. Effects of feldspar contamination on equivalent dose and the shape of growth curve for OSL of silt-sized quartz extracted from Chinese loess [J]. *Geochronometria*, 2008, **30**: 49–53.
- [30] Banerjee D, Murray A S, Btter-Jensen L. Equivalent dose estimation using a single aliquot of polymineral fine grains [J]. *Radiation Measurements*, 2001, **33**: 73–94.
- [31] Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Radiation Measurements*, 2000, **32**: 57–73.
- [32] Roberts H M, Duller G A T. Standardised growth curves for optical dating of sediment using multiple-grain aliquots [J]. *Radiation Measurements*, 2004, **38**: 241–252.
- [33] Lai Zhongping. Testing the use of an OSL standardised growth curve (SGC) for D_e determination on quartz from the Chinese Loess Plateau [J]. *Radiation Measurements*, 2006, **41**: 9–16.
- [34] 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**: 497–500.
- [35] Duller G A T. Luminescence dating of poorly bleached sediments from Scotland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, **13**: 521–524.
- [36] Duller G A T. Single grain optical dating of glacial deposits [J]. *Quaternary Geochronology*, 2006, **1**(4): 296–304.
- [37] Fuchs M, Owen L A. Luminescence dating of glacial and associated sediments: review, recommendations and future directions [J]. *Boreas*, 2008, **37**(4): 636–659.
- [38] Thrasher I M, Mauz B, Chiverrell R C, *et al.* Luminescence dating of glaciofluvial deposits: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, **97**(1/4): 133–146.
- [39] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li Jijun, *et al.* Problems of Quaternary Glaciations and Environments in East China [M]. Beijing: Science Press, 1989: 11–31. 施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 11–31.]
- [40] Small R J. Lateral moraines of Glacier de Tsidiore Nouve: form, development and implications [J]. *Journal of Glaciology*, 1983, **29**: 250–259.
- [41] Murray A S, Olley J M, Caitcheon G G. Measurement of equivalent doses in quartz from contemporary water-lain sediments using optically stimulated luminescence [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1995, **14**: 365–371.
- [42] Olley J M, Caitcheon G G, Murray A S. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1998, **17**: 1033–1040.
- [43] Olley J M, Caitcheon G G, Roberts R G. The origin of dose distributions in fluvial sediments, and the prospect of dating single grains from fluvial deposits using optically stimulated luminescence [J]. *Radiation Measurements*, 1999, **30**: 207–217.
- [44] B e A-G, Murray A, Dahl S O. Resetting of sediments mobilised by the LGM ice-sheet in southern Norway [J]. *Quaternary Geochronology*, 2007, **2**: 222–228.
- [45] Chen Jiyang. Preliminary researches on lichenometric chronology of Holocene glacial fluctuations and on other topics in the head-water of Ürümqi River, Tianshan Mountains [J]. *Science in China (Series B)*, 1989, **32**(12): 1487–1500.
- [46] 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.
- [47] Yao Tandong, Thompson L G, Shi Yafeng, *et al.* Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliya ice core [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1997, **40**: 662–668.
- [48] Zhao Jingdong, Wang Jie, Yin Xiufeng. Quaternary glaciations research in China: Current status and controversy [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(1): 119–125. 赵井东, 王杰, 殷秀峰. 中国第四纪冰川研究的现状与争议——兼记首届“中国第四纪冰川与环境变化”研讨会 [J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(1): 119–125.]
- [49] Cui Hang, Wang Jie. The methods for estimating the equilibrium line altitudes of a glacier [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(2): 345–354. 崔航, 王杰. 冰川物质平衡线的估算方法 [J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(2): 345–354.]

OSL dating of glacial deposits and glaciations in the Heigou River valley, eastern Tianshan Range, China

YIN Xiufeng^{1,2}, ZHAO Jingdong¹, WU Yunfei^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Heigou River originates on the southern slope of the Mount Bogda, the largest glaciated center in the eastern Tianshan Range. Ancient glaciers advanced and retreated dramatically during the glacial-interglacial cycles in Quaternary, the spectacular glacial depositional landforms were produced and well-preserved in the Heigou River valley, recording a complex history of Quaternary glacial cycles and landform evolution. These glacial landforms are a direct imprint of fluctuation of the ancient glaciers. Dating the glacial landform could determine the temporal and spatial variations of the ancient glaciers in this valley and also provide essential information for reconstructing the paleoenvironment in this region. Optically stimulated luminescence (OSL) dating technique was used to determine the ages of the fluvioglacial deposits (the sand lenses that sandwiched between tills in moraines) and glacial tills in this valley with single aliquot regenerative-dose (SAR) protocol. Based on the dating results, and considered the principle of geomorphology and stratigraphy, the data of palaeoclimate as well as the glacial histories in the other valleys of the Tianshan Range, the following conclusion could be drawn: five glacial advances occurred in the Heigou River valley, they are glacial advances of Little Ice Age (glacial advances in the cold periods since the 16th century) and Neoglaciation (glacial advances during the last 3–4 ka) in Holocene, and other three glacial advances in the late and early period of last glaciation and penultimate glaciation, are equivalent in age to MIS 2, MIS 4 and MIS 6. In addition, the dating results of glacial tills and fluvioglacial deposits show that the SAR protocol was appropriate for equivalent dose (De) determination of fluvioglacial deposits and that OSL did not work to date glacial tills in this study, because the signals in quartz grains in glacial tills was not completely bleached. The glacial landforms indicate that the ancient glaciers at their maximum extensions during the LIA, Neoglaciation and the last glaciation were 7.6 km, 11 km and 14 km long, respectively.

Key words: OSL dating; glacial geomorphology; Quaternary glaciations; Tianshan Range