

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0103

ZHAO Jingdong, QIU Jinkun, JI Huihan, et al. ^{10}Be surface exposure dating of Little Ice Age glacial events on the southern slope of Bujia Gangri, eastern Tanggula Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1109–1118. [赵井东, 邱锦坤, 季卉晗, 等. 唐古拉山东段布加岗日南坡小冰期冰进的 ^{10}Be 暴露测年研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1109–1118.]

唐古拉山东段布加岗日南坡小冰期冰进的 ^{10}Be 暴露测年研究

赵井东¹, 邱锦坤², 季卉晗², 郭万钦¹, 刘瑞连¹, 麻浩男³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: 高寒地区形态独特的冰川侵蚀与沉积地形是过去冰川变化最直接的证据, 包含有重要的古气候环境变化信息。根据山地冰川沉积序列, 通常将分布在现代冰碛地形外围形态较完好的多列冰碛垄的形成时间推定为小冰期。小冰期冰进的时间与规模是理解与重建近千年以来古气候环境变化的基础及较准确预测未来气候环境变化的关键。本研究应用 ^{10}Be 暴露测年技术对唐古拉山东段布加岗日南坡拥曲河源区西(主)谷与东(悬)谷中基于地貌关系与沉积序列推定为小冰期的第一套冰碛垄 M_{w1} 与 M_{e1} 进行定年。测得 M_{w1} 冰碛垄4个样品的 ^{10}Be 年龄分别为 (155 ± 23) a、 (197 ± 27) a、 (218 ± 26) a和 (273 ± 31) a; M_{e1} 冰碛垄3个样品的 ^{10}Be 年龄分别为 (262 ± 30) a、 (186 ± 28) a和 (131 ± 25) a。使用P-CAAT法分析得出它们的年龄为 (203 ± 52) a($n=4$)和 (162 ± 58) a($n=3$)。地貌关系、沉积序列、冰碛垄的形态特征、土壤发育与植被覆盖以及测年结果等共同表明拥曲河源区西谷与东谷中的第一套冰碛垄形成于小冰期。结合周边地区的研究成果及古气候环境代用指标可以推断降温是这次冰进的主因。

关键词: 小冰期; ^{10}Be 暴露测年; 唐古拉山

中图分类号: P534.63; P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1109-10

0 引言

在全球变暖背景下, 对气候变化响应灵敏的山地冰川多呈现出以减薄退缩为主要特征的变化。越来越多的证据显示, 人类活动过程中的温室气体排放对全球变暖的速率和贡献越来越大^[1]。多数学者认可的事实是: 人类活动引起的气候变暖叠加在自然气候变率的背景之上。因此, 为了较为精准地预测未来的气候变化, 需要对过去气候变化及其原因有正确且较为全面的认知。气候变化的器测记录一般时间较短, 对于此前较长时间序列的气候变化重建则需依赖从各种自然载体中研究获取的信息。在世界各个冰川区, 小冰期(Little Ice Age, LIA)冰川波动留下了丰富的侵蚀与沉积地形^[2]。这些形态较为完整的冰川地形是重建过去几百年乃

至近千年气候环境变化的优选信息载体之一。

LIA一词最早是由Matthes^[3]于1939年引入其研究中, 他论述道: “我们正生活在一个冰川期重新开始但变化不大, 一个已经持续了4 000年的LIA时代”, 故最初的LIA时间界定与我们现在的认知有较大出入。随后的研究将距今3~4 ka的冰川作用时段称之为新冰期, 分布在新冰期冰川地形内更年轻且保存更完好的冰碛地形被推定为LIA遗迹。参照IPCC^[1]对LIA的时间划分方案, 其时间跨度大约从公元1450年延续至公元1850年。随着多种测年技术在第四纪冰川研究中的应用, 世界各地的LIA冰进研究均得到了发展^[4]。在众多测年方法中, 原地宇宙成因核素(terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides, TCN)测年技术既可测定冰川侵蚀与沉积地形的暴露年龄, 也可测定冰碛的埋藏年龄, 对第四

收稿日期: 2022-07-12; 修订日期: 2022-08-12

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0201); 国家自然科学基金项目(41830644; 42071013; 42041006)资助

作者简介: 赵井东, 研究员, 主要从事第四纪冰川与全球变化研究. E-mail: jdzhaod@lzb.ac.cn

纪冰川研究的发展起到了革命性的推动作用。青藏高原及周边山地LIA冰进事件及其驱动机制的新近研究成果就是在此背景下取得的^[5-13]。但青藏高原及周边山地地域广阔,研究仍亟待加强。

位于青海省和西藏自治区之间的唐古拉山全长约500 km,呈NWW走向,地理位置十分重要。亚洲两条大江——长江和怒江发源于此,又因长江流入太平洋,怒江流入印度洋而使其成为太平洋流域和印度洋流域的分水岭。在气候上,唐古拉山夏季受印度季风的影响,冬季受中纬度西风环流的影响。同时,唐古拉山还是印度夏季风北上的第二大屏障,高峻地势使得季风难以翻越。综合来看,唐古拉山是一条重要的地理气候分界线。据统计^[14],唐古拉山共发育有1 530条现代冰川,面积约2 213 km²,冰量约184 km³。山区丰富的冰川遗迹表明第四纪期间这些冰川均发生了规模较大的进退变化。20世纪70年代,第一次青藏高原综合科学考察中对唐古拉山的第四纪冰川进行了研究,并对冰川地形进行了形态描述和制图^[15]。随后结合测年技术对冰川地形进行直接与间接定年的相关研究多集中在其中西段,特别是青藏公路通过的唐古拉山垭口地区^[16-20],在强调技术定年研究为主要特征的现阶段,唐古拉山东段的第四纪冰川研究几近空白。本研究采用野外考察与室内¹⁰Be暴露测年相结合的方式,对布加岗日南坡拥曲源区的西(主)谷与东(悬)谷中的第一套,从地貌关系与沉积序列上推断其形成时间为LIA的多列冰碛垄 M_{w1} 与 M_{e1} 进行了研究,并探讨这次冰进可能的驱动因素。

1 研究区概况

布加岗日是唐古拉山东段突然高起的陡峻地块。在20 km短的主山脊线上分布有16座海拔超过6 000 m的山峰,其最高峰为海拔6 328 m的强拉日峰,它同时也是唐古拉山东段的最高峰。本区夏季受印度季风的控制,冬季受中纬度西风环流的影响。据中国气象局公布的气象观测资料,位于布加岗日以南的丁青县与索县1971—2000年的年平均气温1.7~3.4℃,年降水量570~640 mm。第一次青藏高原综合科学考察期间,结合布加岗日周边的气象观测资料和气温垂直递减率,推算现代冰川平衡线高度(equilibrium-line altitude, ELA)处的年平均温度为-6~-7℃,年降水量为800~900 mm^[15]。

高峻地势与印度季风带来的较为丰富的降水

相结合,使布加岗日成为唐古拉山东段最大的现代冰川作用中心。根据中国冰川编目统计^[21],本区共发育有现代冰川124条,其类型包括复式山谷冰川、单一山谷冰川、冰斗冰川、悬冰川等。冰川面积约184.30 km²,冰储量约16.6697 km³。其南坡ELA约为5 450 m,北坡约为5 300 m。布加岗日地区共有6条长度超过5 km的复式山谷冰川(图1)。分布在南坡的足学会冰川是本区最大的复式山谷冰川,其消融区的一部分悬挂在陡峭的斜坡上,呈冰瀑布状。足学会冰川末端海拔约4 200 m,即从其ELA下伸达1 200 m之多。

2 冰碛垄形态特征

在大多数山地冰川以减薄退缩为主要特征变化的当下,冰川末端一般都沉积有新鲜无风化的现代冰碛地形,在其外围几百米至上千米范围内的1~3道冰碛垄的形成时间被认为对应于LIA^[22]。研究区布加岗日南坡拥曲源区的冰川沉积序列稍异于其他地区,在西(主)谷足学会冰川末端与东(悬)谷坡戈冰川末端均发育有冰碛阻塞湖且冰舌伸入湖中(图2),故没有观察到明显的现代冰碛地形。

在西(主)谷,因足学会冰川末端消融退缩等原因,新近形成了一个长约1.2 km,面积约0.7 km²的冰碛阻塞湖,阻塞该冰湖是本次测年研究的第一套多列冰碛垄 M_{w1} 。该套冰碛由宽200~700 m,垄高5~15 m的3道终碛垄组成,其间部分洼地已沼泽化。直径1~3 m的漂砾分布在冰碛垄上,漂砾表面着生点缀有地衣和苔藓,几无风化,在一些漂砾上可以观察到磨光面与擦痕。冰碛垄被草皮所覆盖并伴有稀疏矮小的灌木,最外列冰碛垄上已有小树生长。

东(悬)谷与西(主)谷情况相似,坡戈冰川的末端也发育一冰碛湖,不过其形成时间较早^[15]。该冰碛湖长约1.4 km,面积约0.9 km²。充当冰湖坝体的冰碛垄 M_{e1} 宽300~600 m,高5~35 m。同样也是由3列终碛垄组成。最内一列规模较小且部分被湖水淹没。中间一列与最外一列贴得比较近,宽100~150 m,高15~35 m,是这三列冰碛垄中垄脊最高的。最外列冰碛垄宽200~300 m,高10~25 m。直径1~4 m的漂砾散布在冰碛垄上,大多数漂砾表面也着生点缀有地衣与苔藓。最外一列冰碛垄表面甚至已发育有非常薄的土壤,茂密的灌木,甚至高大的柏树生长其上。 M_{w1} 与 M_{e1} 冰碛垄的岩性相似,主要

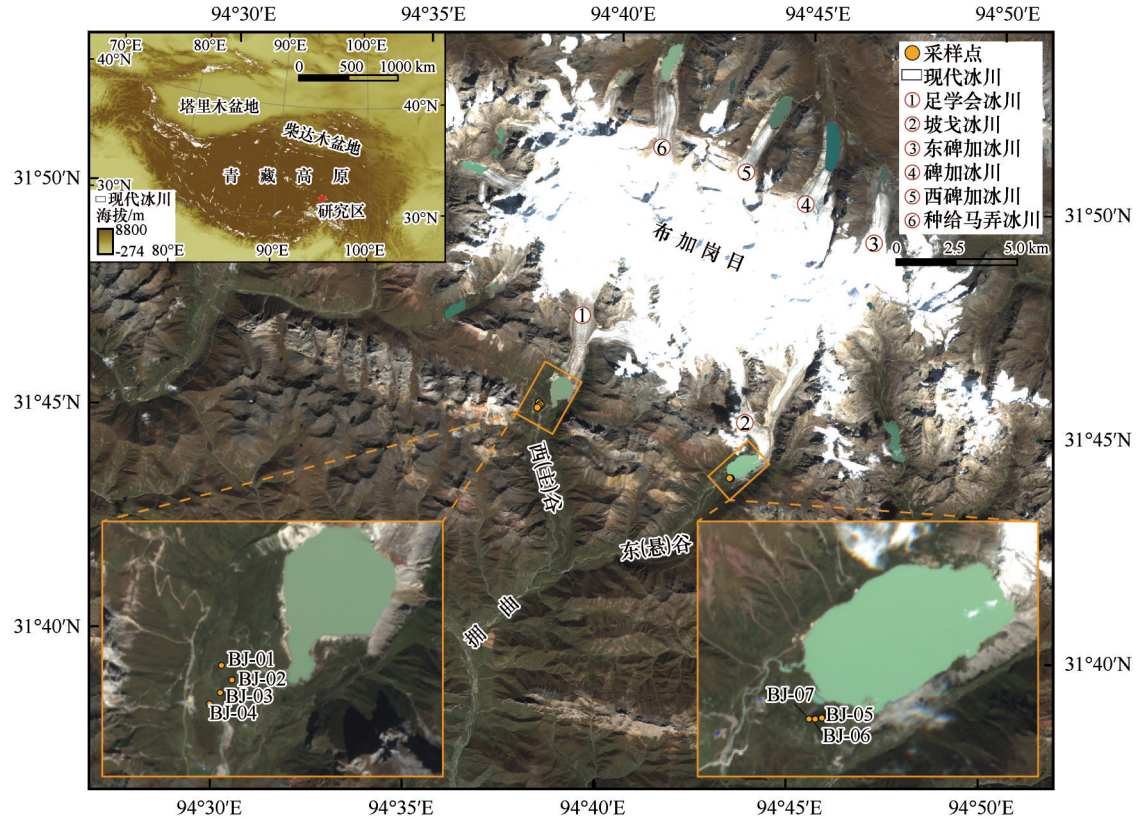


图1 唐古拉山东段布加岗日地区现代冰川与¹⁰Be测年样品采集位置图(哨兵2号2020-10-10卫星影像)
Fig. 1 Modern glaciers and ¹⁰Be sampling sites in the Bujia Gangri, eastern Tanggula Mountains (Sentinel-2A, 2020-10-10 imagery)



图2 捆曲河流域源区西谷(a)与东谷(b)的现代冰川、冰碛湖和第一套LIA多列冰碛垄
Fig. 2 Modern glaciers, glacial lakes and LIA moraines in the west (main) valley (a) and east (hanging) valley (b) at the headwater of the Yongqu River valley

由花岗岩、板岩、片岩、红砂岩等组成。

3 研究方法

2019年夏季考察期间,我们在西(主)谷M_{w1}冰碛垄与东(悬)谷M_{e1}冰碛垄上共采集了7个¹⁰Be暴露测年样品。考虑到前期暴露(核素继承)与沉积后地表过程等对测试结果的潜在影响,在样品选择上首选冰碛垄脊上嵌入的大块、稳定且富含石英的

花岗岩漂砾。同时避免表面劈裂、破裂或风化等迹象比较明显的漂砾。根据 Heyman 等^[23]的统计分析,高大漂砾的年龄集聚性优于矮小的,而且还可以避免漂砾因后期冰碛地形剥露造成的不完全暴露等的影响,故在采样中避免选择出露高度不足50 cm的漂砾。在所选漂砾顶面平坦处凿取厚度小于3 cm的表层,使用手持GPS定位并记录采样点纬度、经度和海拔等信息。为获得采集样品所处的环

境背景,从不同方位对漂砾进行拍照(图3)。同时,为了讨论测试年龄受到各种因素的潜在影响,还需详细记录冰碛垄与漂砾的形态特征,包括大小、风化程度、漂砾表面是否有磨光面或擦痕等。样品采集面的倾角是否需要量测视其倾斜程度而定。详细的样品采集信息见表1。

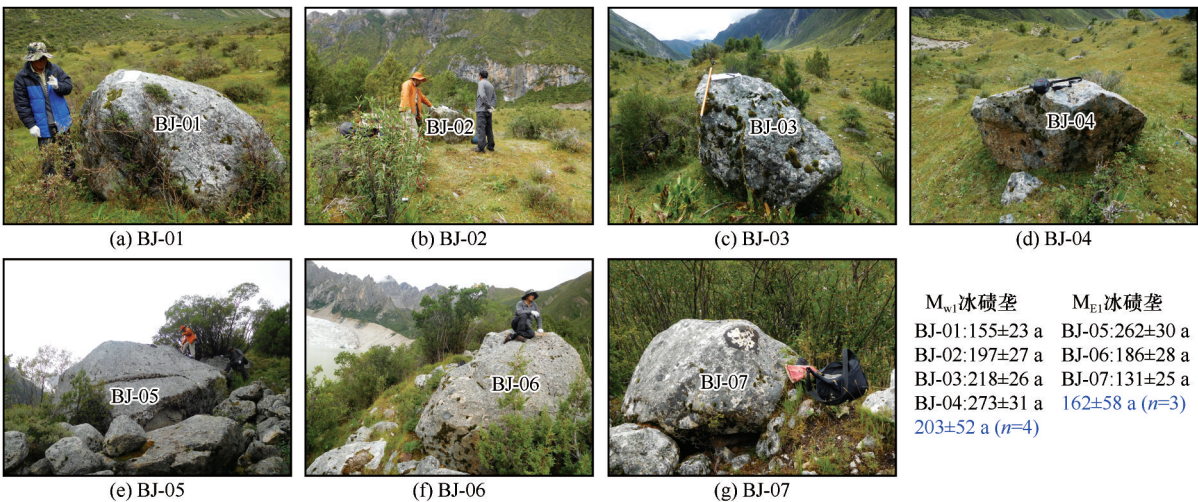


图3 ¹⁰Be表面暴露测年样品采集照片及其年龄

Fig. 3 Photographs of boulders sampled for ¹⁰Be surface exposure dating and their ages

表1 唐古拉山东段布加岗日南坡拥曲河源区¹⁰Be测年样品采集信息

Table 1 ¹⁰Be dating sample collection information at the headwater of the Yongqu River valley on the southern slope of Bujia Gangri, eastern Tanggula Mountains

冰碛垄	样品编号	岩性	纬度/N	经度/E	海拔/m a. s. l.	漂砾尺寸(长/宽/高)/cm	采样厚度/cm	地形遮蔽度
M _{w1}	BJ-01	花岗岩	31. 75621°	94. 63611°	4 204	240/180/140	2. 3	0. 96557
	BJ-02	花岗岩	31. 75515°	94. 63706°	4 204	170/60/80	2. 0	0. 97003
	BJ-03	花岗岩	31. 75424°	94. 63613°	4 201	120/70/110	3. 0	0. 96691
	BJ-04	花岗岩	31. 75340°	94. 63527°	4 202	170/160/70	2. 0	0. 96214
M _{E1}	BJ-05	花岗岩	31. 73096°	94. 72024°	4 363	600/350/300	2. 0	0. 98029
	BJ-06	花岗岩	31. 73091°	94. 71983°	4 360	310/180/150	2. 5	0. 97984
	BJ-07	花岗岩	31. 73088°	94. 71947°	4 356	140/125/95	2. 5	0. 97963

样品测试靶标制备是在中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室的TCN测年靶标制备实验室中完成的。实验流程^[24]是在文献[25]的基础上改进的,简要步骤如下:①对样品进行物理粉碎与研磨,筛选粒径为250~500 μm的颗粒。②用H₂O₂浸泡以去除有机质,用稀HCl浸泡以溶解碳酸盐或其他可溶矿物。③用Frantz公司LB-1磁选仪去除铁磁性乃至部分顺磁性矿物。④用浓度为5%的HF/HNO₃混合酸液在加热情况下对已磁选样品处理2次后,使用重液去除密度大于和小于石英的耐酸性矿物。之后再用1%~2%的HF/HNO₃混合酸液加热处理2~3次。⑤用ICP-OES测定纯化后石英中的铝含量。对于¹⁰Be单核素测年靶标,铝含量≤200 μg·g⁻¹即达标。

在称取的纯度达标样品中添加约0.3 g已知浓度的⁹Be载体(855.7 μg·g⁻¹)并使用浓HF消解,每批次6个样品中加入1个流程空白。赶氟后使样品溶液通过大的阴离子和阳离子层析交换柱(20 mL)分离出Be,加入NH₄OH并将PH值调为~8.5沉淀析出Be(OH)₃胶体。用纯水将胶体清洗三遍后转至石英坩埚,放入马弗炉在950℃高温下分解得到BeO,将其与铌粉按一定比例混合压入加速器测量专用靶托即完成了测年靶标的制备。¹⁰Be/⁹Be比值测量是在美国普渡大学PRIME实验室中完成的,其标准为07KNSTD^[26]。用每批次样品处理加入的流程空白测试值校正样品测量的¹⁰Be/⁹Be比值并转换为¹⁰Be浓度进行最终的年龄计算。使用CRONUS 3.0版在线计算器^[27](<http://hess.ess.washington.edu/math/v3/>)

v3_age_in. html)计算得出的年龄见表2。表中给出了三种模式计算的¹⁰Be年龄,文中仅对LSDn的模式年龄进行了分析讨论。石英重量、⁹Be载体质量、¹⁰Be/⁹Be测试值以及相关的计算参数如表1与表2。其中地形遮蔽度使用Li^[28]基于Python语言开发且可在ArcGIS环境下运行的程序计算获得。

表2 ¹⁰Be暴露年龄及其计算参数
Table 2 ¹⁰Be apparent exposure ages and the related calculation parameters

样品 编号	石英质量/g	⁹ Be载体 质量/g	¹⁰ Be/ ⁹ Be/(10 ⁻¹⁵)	¹⁰ Be浓度/ (10 ³ atoms·g ⁻¹)	St			Lm			LSDn		
					年龄/a	内部 误差/a	外部 误差/a	年龄/a	内部 误差/a	外部 误差/a	年龄/a	内部 误差/a	外部 误差/a
BJ-01	50.1031	0.3016	16.7845±1.8624	5.381±0.747	107	15	17	144	20	23	155	22	23
BJ-02	50.0811	0.2998	21.1705±2.1679	6.850±0.837	136	17	20	185	23	27	197	24	27
BJ-03	50.0925	0.3021	22.8228±1.9882	7.474±0.788	150	16	20	205	22	27	218	23	26
BJ-04	50.1375	0.3011	28.5272±2.3492	9.400±0.897	188	18	23	261	25	32	273	26	31
BJ-05	50.1631	0.3012	30.0851±2.6034	9.933±0.976	180	18	23	251	25	31	262	26	30
BJ-06	50.0826	0.3003	21.6553±2.5697	7.028±0.923	128	18	20	175	24	27	186	25	28
BJ-blank1		0.3046	1.1404±1.0919										
BJ-07	50.0837	0.3054	15.8482±2.5178	4.978±0.962	91	17	18	121	23	24	131	24	25
BJ-blank2		0.3037	1.6088±0.8048										

4 结果与讨论

影响宇宙成因核素测年结果的因素很多,其中较大的影响因素有核素产率以及样品沉积前后经历的地质地貌过程等。通常,样品沉积前后经历的地质地貌过程对测年结果的影响要远大于核素产率,也更为复杂,对较为年轻或非常古老的地貌体尤甚。在第四纪冰川研究中,采集样品(漂砾或磨光面)的不完全暴露,如风化、后期剥露、倾斜翻转、冰碛地形形变、积雪和(或)植被和(或)沉积物等的遮挡等比核素继承影响更大^[29]。考虑到核素继承(前期暴露)和漂砾沉积后不完全暴露等对测试结果的潜在影响,本文使用Dortch等^[30]最新

提出的概率宇宙成因年龄分析工具(P-CAAT)对我们的测试数据进行了处理。从图1可以清楚地看出,采自M_{w1}冰碛垄的样品BJ-01~04由内到外分布,它们的¹⁰Be年龄分别为(155±23) a、(197±27) a、(218±26) a和(273±31) a,展示了由内到外逐渐增大的情形,这也与冰碛垄分布及沉积地貌关系相一致。样品BJ-05~07主要采自M_{E1}冰碛垄的中间列,¹⁰Be年龄分别为(262±30) a、(186±28) a和(131±25) a,相对分散些。P-CAAT数据处理结果显示,这两处冰碛垄的测试年龄中没有明显应被剔除的异常值(图4),可用(203±52) a(*n*=4)和(162±58) a(*n*=3)作为冰碛垄M_{w1}与M_{E1}的形成时间。

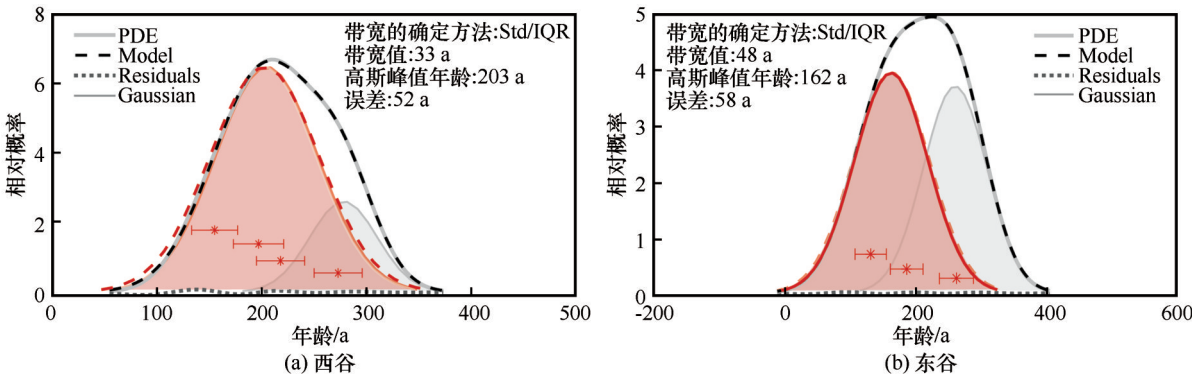
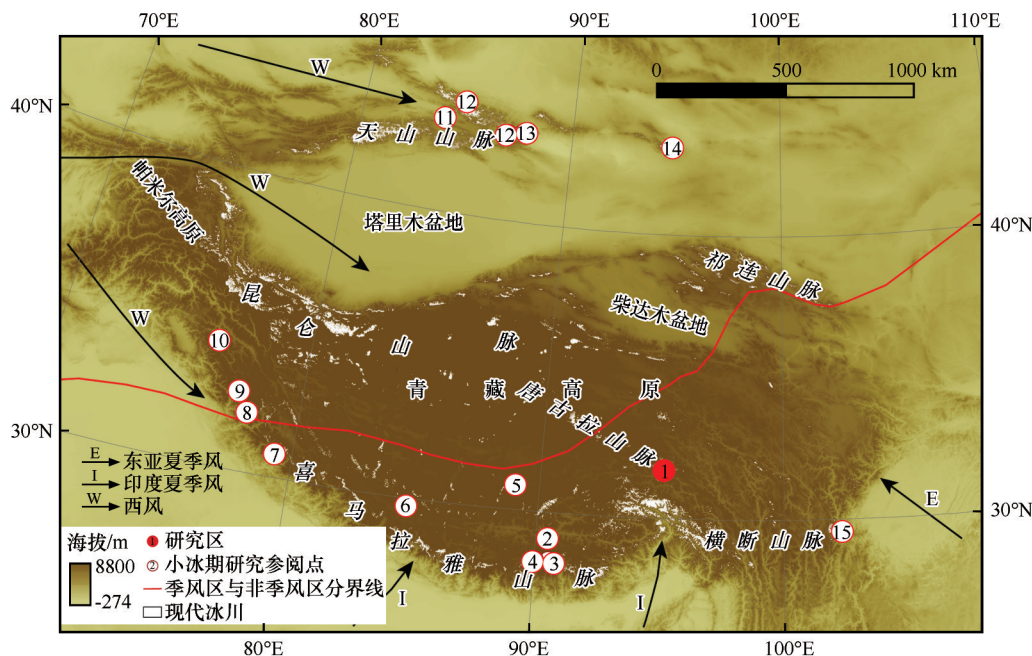


图4 拥曲河源区西谷(a)与东谷(b)M_{w1}与M_{E1}冰碛垄年龄的P-CAAT数据处理结果
Fig. 4 Gauss peak ¹⁰Be ages and their uncertainties of the M_{w1} and M_{E1} moraines were analyzed by P-CAAT in two glaciated valleys at the headwater of the Yongqu River valley

年轻冰川地形测试年龄受核素继承(前期暴露)的影响可能远大于后期地质地貌过程造成的不完全暴露等的影响。然而,Putkonen等^[31]经过研究后得出,冰川地形测试结果受核素继承影响的占比很小,而且还可以通过在确定年代的地貌体上采集多个样品的办法来减少其潜在的影响。我们的¹⁰Be年龄似乎表明核素继承和后期地质地貌过程均没有对测试结果造成显著的影响,但采自 M_{Ei} 冰碛垄中列得的较为分散的¹⁰Be年龄似乎表明这些因素的潜在影响。另外,在年龄计算中假设漂砾表面侵蚀为零,也没有考虑本区季节性积雪等的影响,故这些年龄应为冰碛垄 M_{w1} 和 M_{Ei} 的最小年龄。本文测得的年龄均处在IPCC^[1]界定的LIA时间范围内,其中东(悬)谷的测试年龄与早期的地衣测年结果^[15]可相互印证。这些证据共同表明西(主)谷与东(悬)谷的多列冰碛垄 M_{w1} 与 M_{Ei} 形成于LIA。

对于青藏高原及其周边地区的LIA冰进,已有多位学者展开了综合探讨^[32-34]。基于¹⁰Be、¹⁴C和地衣测年资料,Xu等^[32]对青藏高原及其周边地区LIA冰进的最大规模、区域退缩的开始时间以及可能的驱动因素进行了尝试性探讨。基于¹⁰Be年代学资料,Dortch等^[33]对喜马拉雅—青藏高原造山带西端半干旱地区的LIA冰进进行了分析和归纳,将其时段定为SWHTS 1A,数值年龄为 (0.4 ± 0.1) ka。随后,Murari等^[10]对受季风影响的喜马拉雅—青藏高原地区的LIA冰进进行了相似的综合探讨,将其时段定为MOHITS 1A,数值年龄同样也为 (0.4 ± 0.1) ka。近年来,应用¹⁰Be暴露测年技术,青藏高原及周边山地^[5-13,19]、天山^[35-38]等地涌现出一批与LIA冰进有关联且可供本文参阅的研究成果(图5),这些新涌现的与此前的研究成果以及我们新测得的¹⁰Be年龄共同表明:LIA冰进普遍存在于青藏高原及周边山地。



注: ①唐古拉山东段布加岗日南坡(本文)、②喜马拉雅山卡若拉垭口地区^[5]、③不丹喜马拉雅山北坡Cogarbu流域^[6]、④不丹喜马拉雅山北坡Shimo冰川区^[7]、⑤冈底斯山脉的申扎杰岗日地区^[8]、⑥冈底斯山冷布岗日地区^[9]、⑦印度北部Garhwal中部山区^[10]、⑧喜马拉雅—西藏造山带西北端Hamtah和Karzok流域^[11]、⑨印度西北部Kulti与Parkachik流域^[12]、⑩印度西北部Nun-Kun山区^[13]、⑪天山那拉提山地区^[35]、⑫天山乌鲁木齐河源区与哈希勒根达坂^[36]、⑬天山乌鲁木齐河源区^[37]、⑭天山哈尔里克山地区^[38]、⑮贡嘎山海螺沟^[19]。红线为季风与非季风区分界线^[39]

Note: ① This study; ② Karola Pass area, the Himalayas^[5]; ③ Cogarbu valley, Bhutanese Himalaya^[6]; ④ Shimo Glacier valley, Bhutanese Himalaya^[7]; ⑤ Mount Jaggang area, Gangdise Mountains^[8]; ⑥ Lopu Kangri area, Gangdise Mountains^[9]; ⑦ Central Garhwal Mountains, northern India^[10]; ⑧ Hamtah and Karzok valleys at the northwestern end of the Himalayan-Tibetan orogen^[11]; ⑨ Kulti and Parkachik valleys, northwestern India^[12]; ⑩ Nun-Kun mountainous area, northwestern India^[13]; ⑪ Nalati Mountains, Tianshan range^[35]; ⑫ Headwater of the Urumqi River and Haxilegen Pass area, Tianshan range^[36]; ⑬ Headwater of the Urumqi River, Tianshan range^[37]; ⑭ Karlik Mountain, Tianshan range^[38]; ⑮ Hailuogou valley, Mount Gongga^[19]. Red line is the boundary of modern summer monsoon^[39]

图5 青藏高原及周边山地新近获得LIA测年结果的研究参阅点

Fig. 5 LIA glacial advance dated by ¹⁰Be dating techniques recently on the Tibetan Plateau and its surroundings

理论上,¹⁰Be 暴露测年法可以测得冰川地形形成至今的确切年龄。实践中,测试结果受到诸多潜在因素的影响^[29]。一般而言,年轻冰碛地形密实度低,冰碛地形在密实化过程中可引起漂砾倾斜等几何形态的变化,样品采集点季节性积雪的厚度与覆盖时间等确切信息也无法获得。诸多潜在的影响因素都可能造成冰川地形测试结果偏离它们的实际年龄,进而对 LIA 冰进区域时空差异的探讨造成影响。为了将本文的年龄放在青藏高原及周边山

地已有年龄的大背景中,我们使用 P-CAAT 对青藏高原及周边山地 2014 年以来测得的 LIA 冰川地形的 ¹⁰Be 年龄进行了重新计算(表 3)。虽然绝对数值存在较大差异,但它们基本都位于 IPCC^[1]界定的 LIA 时间范围内。这些年龄也进一步展示了青藏高原及周边山地 LIA 冰进是普遍存在的。随着测年数据的进一步增多,可利用同一种测年资料(如 ¹⁰Be)进行区域综合分析,探究 LIA 冰进的区域差异及其气候驱动机制。

表 3 基于 P-CAAT 法重新计算的青藏高原及其周边山地参阅点 LIA 冰碛的 ¹⁰Be 年龄
Table 3 Recalculated ¹⁰Be ages of LIA moraines using P-CAAT in the referred study areas on the TP and its surroundings

研究区及相应的地貌位置	样品数量	确定带宽的方法	带宽值/a	高斯峰值年龄/a	误差/(1-Sigma, a)	参考文献
唐古拉山布加岗日拥曲源区西谷 M _{w1} 冰碛	4	Std/IQR	33	203	52	本研究
唐古拉山布加岗日拥曲源区东谷 M _{el} 冰碛	3	Std/IQR	48	162	58	
喜马拉雅山卡若拉垭口地区 M1A 冰碛	3	Std/IQR	49	148	50	[5]
喜马拉雅山卡若拉垭口地区 M1B 冰碛	3	Std/IQR	66	345	93	
不丹喜马拉雅山北坡 Cogarbu 流域 M1 冰碛	5	Std/IQR	188	579	281	[6]
不丹喜马拉雅山北坡 Shimo 冰川区 M1 冰碛	7	Std/IQR	264	379	347	
冈底斯山申扎杰岗日甲岗峰 M1 冰碛	4	Std/IQR	110	352	121	[8]
冈底斯山申扎杰岗日甲岗峰 M2 冰碛	4	Std/IQR	93	319	97	
冈底斯山冷布岗日嘎尔琼流域 M2 冰碛	5	Std/IQR	8	273	11	[9]
冈底斯山冷布岗日嘎尔琼流域 M3 冰碛	4	Std/IQR	13	392	24	
印度北部 Garhwal 中部山区 mbd3 冰碛	5	MADD	290	190	316	[10]
印度北部 Garhwal 中部山区 mbd2 冰碛	5	Std/IQR	130	91	129	
印度北部 Garhwal 中部山区 mk3 冰碛	3	Std/IQR	230	113	235	
印度北部 Garhwal 中部山区 mk2 冰碛	5	MADD	1740	343	1744	
喜马拉雅西端 Hamtah 流域 mH1a 冰碛	5	MADD	189	268	214	[11]
喜马拉雅西端 Karzok 流域 mM1 冰碛	4	Std/IQR	154	766	175	
印度西北部 Kulti 流域 MK2 冰碛*	2	/	/	580	130	[12]
印度西北部 Parkachik 流域 MP1	4	Std/IQR	45	243	51	
印度西北部 Tarangoz 流域 TG3 冰碛*	2	/	/	620	50	[13]
天山那拉提山区 Sairenwuxunsala 流域 SR1	6	MADD	340	418	411	
天山那拉提山区 Takelekete 流域 TK1 冰碛	3	Std/IQR	52	360	54	[35]
天山哈希勒根达坂 HDBA 内冰碛	5	MADD	65	299	76	
天山哈希勒根达坂 HDBA 外冰碛	5	Std/IQR	798	543	826	[36]
天山哈希勒根达坂 HDBB 冰碛	5	MADD	18	320	24	
天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川区冰碛	3	Std/IQR	121	289	130	
天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川区冰碛	4	Std/IQR	18	460	28	[37]
天山哈尔里克山北坡吐尔干流域 M1 冰碛	11	Mean	414	827	447	
						[38]

注: *表示测年年龄数量不满足 P-CAAT 数据处理要求,采用算术平均年龄来表示该冰碛的年龄。

青藏高原及周边山地的古气候记录为探讨 LIA 冰进成因提供了理论支持。在 Thompson 等^[40]集成的青藏高原与南美冰芯记录曲线上,约从公元 1600 年至 1870 年为显著的冷期。随后, Mischke 等^[41]对青藏高原东缘西门错的湖泊沉积记录及其对高原上湖泊沉积、泥炭沉积与冰芯记录等的综合分析也

得出 LIA 时期为明显的冷期。我国各个区域的古气候环境记录综合分析也表明,公元 1321 年至 1920 年为冷期^[42],可对应于 LIA。降水方面,晚全新世对应于印度季风降水相对减少的时期^[43],LIA 正好位于其间。基于青藏高原古里雅、敦德、普若岗冰芯记录重建的年积累量(水当量)显示,约从 1800 年至

1920年为降水量显著减少时段^[40]。这些研究共同说明LIA气候寒冷且降水减少。Rowan^[44]在研究喜马拉雅山地区LIA冰进问题时,也认为这个时段的冰进事件均与降温有关,不过受季风与西风环流位置和强弱等的影响,这次冰进在喜马拉雅山东中西段存在明显的差异。Peng等^[7]根据不丹喜马拉雅山北坡Shimo冰川区M1冰碛垄的年龄可对应于北大西洋地区的Bond事件0的事实,认为研究区的LIA冰进可通过中纬度西风环流与北大西洋地区的气候建立联系。考虑到研究区夏季受印度季风的控制,冬季受西风环流的影响,结合上述的古气候环境记录以及现有的研究进展,我们认为降温是本区LIA冰进的主因。

5 结论

应用¹⁰Be暴露测年技术对唐古拉山东段布加岗日南坡拥曲河源区西(主)谷与东(悬)谷的多列冰碛垄 M_{w1} 与 M_{e1} 进行了定年,测得它们的年龄分别为 (203 ± 52) a($n=4$)和 (162 ± 58) a($n=3$)。测试年龄显示这些冰碛垄形成于LIA冰进,同时也显示核素继承和后期地质地貌过程未对测试结果造成明显的影响。本文的测年结果与青藏高原及其周围山地的LIA冰进事件可相互印证,表明这次冰进普遍存在于青藏高原及周边山地。考虑到研究区夏季受印度季风的控制,冬季受西风环流的影响并综合已有的古气候环境研究成果推断,降温是本区LIA冰进的主因。

致谢:美国普渡大学PRIME实验室的Thomas E. Woodruff协助完成了样品靶标的测试;兰州大学地质科学与矿产资源学院熊聪慧女士对石英纯度进行了ICP-OES检测;兰州大学资源环境学院董子娟博士协助进行了样品遮蔽度计算。在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Grove J M. Little Ice Ages: ancient and modern[M]. 2nd ed. London and New York: Routledge, 2004.
- [3] Matthes F E. Report of committee on glaciers[J]. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 1939, 20: 518-523.
- [4] Solomina O N, Bradley R S, Jomelli V, et al. Glacier fluctuations during the past 2 000 years[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 149: 61-90.
- [5] Liu Jinhua, Yi Chaolu, Li Yingkui, et al. Glacial fluctuations around the Karola Pass, eastern Lhagoi Kangri Range, since the Last Glacial Maximum[J]. Journal of Quaternary Science, 2017, 32: 516-527.
- [6] Peng Xu, Chen Yixin, Li Yingkui, et al. Late Holocene glacier fluctuations in the Bhutanese Himalaya[J]. Global and Planetary Change, 2020, 187: 103137.
- [7] Peng Xu, Chen Yixin, Liu Gengnian, et al. Late Quaternary glaciations in the Cogarbu valley, Bhutanese Himalaya[J]. Journal of Quaternary Science, 2019, 34: 40-50.
- [8] Dong Guocheng, Zhou Weijian, Yi Chaolu, et al. Cosmogenic ¹⁰Be surface exposure dating of 'Little Ice Age' glacial events in the Mount Jaggang area, central Tibet[J]. The Holocene, 2017, 27: 1516-1525.
- [9] Zhang Qian, Yi Chaolu, Dong Guocheng, et al. Quaternary glaciations in the Lopu Kangri area, central Gangdise Mountains, southern Tibetan Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 201: 470-482.
- [10] Murari M K, Owen L A, Dortch J M, et al. Timing and climatic drivers for glaciation across monsoon-influenced regions of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Quaternary Science Reviews, 2014, 88: 159-182.
- [11] Saha S, Owen L A, Orr E N, et al. Timing and nature of Holocene glacier advances at the northwestern end of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Quaternary Science Reviews, 2018, 187: 177-202.
- [12] Saha S, Owen L A, Orr E N, et al. High-frequency Holocene glacier fluctuations in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Quaternary Science Reviews, 2019, 220: 372-400.
- [13] Lee S Y, Seong Y B, Owen L A, et al. Late Quaternary glaciation in the Nun-Kun massif, northwestern India[J]. Boreas, 2014, 43: 67-89.
- [14] Shi Yafeng. Concise glacier inventory of China[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2008.
- [15] Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijin, et al. Glaciers of Xizang[M]. Beijing: Science Press, 1986. [李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川[M]. 北京: 科学出版社, 1986.]
- [16] Deng Xiaofeng, Zhang Wenjing. Evolution of Quaternary glaciers and environment on the eastern side of the Geladandong Peak[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(2): 153-160. [邓晓峰, 张文敬. 唐古拉山各拉丹冬峰东坡第四纪冰川与环境演变[J]. 冰川冻土, 1992, 14(2): 153-160.]
- [17] Jiao Keqin, Iwata S. Glacial changes since the Last Glaciation in Kunlun Pass, Tanggula Pass and, southeastern Xizang (Tibet)[M]//Yao Tangdong, Ageta Y. Glaciological climate and environment on the Qing-Zang Plateau. Beijing: Science Press, 1993: 120-129. [焦克勤, 岩田修二. 昆仑山垭口、唐古拉山垭口和藏东南地区末次冰期以来的冰川变化[M]//姚檀栋, 上田丰. 青藏高原冰川气候与环境. 北京: 科学出版社, 1993: 120-129.]
- [18] Schäfer J M, Tschudi S, Zhao Zhizhong, et al. The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170 000 yr[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 194: 287-297.
- [19] Owen L A, Finkel R C, Barnard P L, et al. Climatic and topographic controls on the style and timing of Late Quaternary glaciation throughout Tibet and the Himalaya defined by ¹⁰Be cosmogenic radionuclide surface exposure dating[J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24: 1391-1411.
- [20] Colgan P M, Munroe J S, Zhou Shangzhe. Cosmogenic radionuclide evidence for the limited extent of last glacial maximum glaciers in the Tanggula Shan of the central Tibetan Plateau[J]. Quaternary Research, 2006, 65: 336-339.
- [21] Pu Jianchen. Glacier inventory of China X: the Nujiang River

- [M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 2001: 51-180. [蒲建辰. 中国冰川目录X: 怒江流域[M]. 西安: 西安地图出版社, 2001: 51-180.]
- [22] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Su Zhen. The Quaternary glaciations and environmental variations in China[M]. Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Publishing House, 2006. [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.]
- [23] Heyman J, Applegate P J, Blomdin R, et al. Boulder height-exposure age relationships from a global glacial ^{10}Be compilation[J]. *Quaternary Geochronology*, 2016, 34: 1-11.
- [24] Zhao Jingdong, Liu Ruilian, Wang Weicheng, et al. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides (TCN) dating targets preparation: a case study of its application in Quaternary glaciations research[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(3): 767-775. [赵井东, 刘瑞连, 王潍诚, 等. 原地宇宙成因核素(TCN)测年靶标制备——以第四纪冰川研究中的应用为例[J]. 冰川冻土, 2021, 43(3): 767-775.]
- [25] Kohl C P, Nishiizumi K. Chemical isolation of quartz for measurement of in-situ-produced cosmogenic nuclides[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56: 3583-3587.
- [26] Nishiizumi K, Imamura M, Caffee M W, et al. Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2007, 258: 403-413.
- [27] Balco G, Stone J O, Lifton N A, et al. A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ^{10}Be and ^{26}Al measurements[J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3: 174-195.
- [28] Li Yingkui. Determining topographic shielding from digital elevation models for cosmogenic nuclide analysis: a GIS model for discrete sample sites[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15: 939-947.
- [29] Heyman J, Stroeve A P, Harbor J M, et al. Too young or too old: evaluating cosmogenic exposure dating based on an analysis of compiled boulder exposure ages[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 302: 71-80.
- [30] Dortch J M, Tomkins M D, Saha S, et al. A tool for the ages: the probabilistic cosmogenic age analysis tool (P-CAAT)[J]. *Quaternary Geochronology*, 2022, 71: 101323.
- [31] Putkonen J, Swanson T. Accuracy of cosmogenic ages for moraines[J]. *Quaternary Research*, 2003, 59: 255-261.
- [32] Xu Xiangke, Yi Chaolu. Little Ice Age on the Tibetan Plateau and its bordering mountains: evidence from moraine chronologies[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 116: 41-53.
- [33] Dortch J M, Owen L A, Caffee M W. Timing and climatic drivers for glaciation across semi-arid western Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 78: 188-208.
- [34] Owen L A, Dortch J M. Nature and timing of Quaternary glaciation in the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 88: 14-54.
- [35] Zhang Mei, Chen Yixin, Li Yingkui, et al. Late Quaternary glacial history of the Nalati Range, central Tian Shan, China, investigated using ^{10}Be surface exposure dating[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2016: 31: 659-670.
- [36] Li Yanan, Li Yingkui, Harbor J, et al. Cosmogenic ^{10}Be constraints on Little Ice Age glacial advances in the eastern Tian Shan, China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 138: 105-118.
- [37] Li Yingkui, Liu Gengnian, Chen Yixin, et al. Timing and extent of Quaternary glaciations in the Tianger Range, eastern Tian Shan, China, investigated using ^{10}Be surface exposure dating[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 98: 7-23.
- [38] Chen Yixin, Li Yingkui, Wang Yueyan, et al. Late Quaternary glacial history of the Karlik Range, easternmost Tian Shan, derived from ^{10}Be surface exposure and optically stimulated luminescence datings[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 115: 17-27.
- [39] Chen Fahu, Chen Jianhui, Huang Wei, et al. Westerlies Asia and monsoonal Asia: spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 192: 337-354.
- [40] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Brecher H, et al. Abrupt tropical climate change: past and present[J]. *PNAS*, 2006, 103: 10536-10543.
- [41] Mischke S, Zhang Chengjun. Holocene cold events on the Tibetan Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 2010, 72: 155-163.
- [42] Ge Q, Hao Z, Zheng J, et al. Temperature changes over the past 2 000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere[J]. *Climate of the Past*, 2013, 9: 1153-1160.
- [43] Herzschuh U. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50 000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 25: 163-178.
- [44] Rowan A V. The 'Little Ice Age' in the Himalaya: a review of glacier advance driven by Northern Hemisphere temperature change[J]. *The Holocene*, 2017, 27: 292-308.

¹⁰Be surface exposure dating of Little Ice Age glacial events on the southern slope of Bujia Gangri, eastern Tanggula Mountains

ZHAO Jingdong¹, QIU Jinkun², JI Huihan², GUO Wanqin¹, LIU Ruilian¹, MA Haonan³

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000 China; 3. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: The spectacular glacial erosional and depositional landforms on the Tibetan Plateau (TP) and its surrounding mountains are direct imprints of the Quaternary glaciations and contain essential information of palaeoclimate change and landscape evolution. According to the glacial sequences in the TP and its surroundings, the moraine complexes with fresh-looking tills, distribute beyond the modern glacial landforms are assumed to be formed during Little Ice Age (LIA) glacial advance. The timing and extent of this glacial advance is critical to understand the spatiotemporal variation of ancient glaciers and palaeoclimate change during the past millennium. Here, the first moraine complexes in the west (main) and east (hanging) valleys of Yongqu River valley, which originates from the southern slope of Bujia Gangri were investigated by terrestrial *in situ* cosmogenic nuclides (TCN) ¹⁰Be surface exposure dating techniques. Their ages are (203±52) years (M_{w1} , $n=4$) and (162±58) years (M_{e1} , $n=3$). Our dating results, position, geomorphological and sedimentary relationship, characteristics of boulders and moraines, soil development and vegetation coverage and other features demonstrate that the first set of moraines were formed during the LIA glacial advance. This glacial event is synchronous with those in the TP and its surroundings. Combining the climate proxies in the TP and its surroundings, it is reasonable to infer that the cooling during LIA was a main control factor to force this glacial advance.

Key words: LIA glacial advance; ¹⁰Be surface exposure dating; Tanggula Mountains

(责任编辑: 王杰)