

文章编号: 1000-0240(2007)01-0149-07

# 唐古拉山垭口地区的第四纪冰川测年新研究

王 杰<sup>1</sup>, 周尚哲<sup>1, 2</sup>, 唐述林<sup>3</sup>,

Patrick M. Colgan<sup>4</sup>, Jeffrey S. Munroe<sup>5</sup>

(1. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室 地理科学系, 甘肃 兰州 730000; 2. 华南师范大学 地理系, 广东 广州 510631; 3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. Department of Geology, Grand Valley State University, 1 Campus Drive, Allendale, MI 49401, USA; 5. Department of Geology, Middlebury College, Middlebury VT 05753, USA)

**摘 要:** 在野外综合考察的基础上, 对唐古拉山垭口地区末次冰期的冰碛漂砾(或有冰川擦痕的露头)进行了宇生核素<sup>10</sup>Be 暴露年龄的测定, 得到(16.1±1.7) ka BP、(31.9±3.4) ka BP、(41.4±4.3) ka BP 和 (66.8±4.3) ka BP 4 个测年数据。结合前人对本地区研究和测年的资料, 确定该区更新世经历了 4 次较大规模的冰川作用, 中更新世晚期的倒数第二次冰期、晚更新世中晚期的末次冰期早冰阶、间冰阶和晚冰阶, 依次与 MIS6、MIS4、MIS3 和 MIS2 阶段对应, 全新世经历了 2 次小的冰进, 新冰期和小冰期, 它们的时代与青藏高原其它地区新冰期和小冰期的时代基本一致。末次盛冰期的冰川范围十分有限, 并且 MIS3 阶段的冰进规模远远超过了末次盛冰期。早期考察中所命名的唐古拉冰期和巴斯错冰期的时代是中更新世晚期(MIS6)和末次冰期早冰阶(MIS4), 扎加藏布冰期的冰碛可能是末次冰期的冰碛叠加在倒数第二次冰期的冰碛物之上, 而又经过后期作用改造而形成的一套冰碛。在该区老的冰碛物上没有测定出 MIS6 阶段之前的年代数据, 可能是由后期的破坏或采集的样品不够充分所致, 因此对本区最早冰川作用的年代还有待于进一步深入研究。

**关键词:** 唐古拉山垭口; 第四纪冰川; MIS3; CRN 测年

**中图分类号:** P343.6 **文献标识码:** A

唐古拉山山脉位于青藏高原的中部, 对这个地区第四纪冰川的考察和研究始于 20 世纪 70 年代, 这一时期主要是基于冰川地貌学的定性研究, 并把此地区的冰期划分为 3 次(唐古拉冰期、扎加藏布冰期和巴斯错冰期)<sup>[1]</sup> 或 4 次(拜多冰期、布曲冰期、扎加藏布冰期和巴斯错冰期)<sup>[2]</sup>。进入 20 世纪 90 年代以来, 电子自旋共振法(ESR、electric spin resonance)、光释光法(OSL、optically simulated luminescence)和宇生同位素法(CRN、cosmogenic radionuclide)等技术逐步被应用到第四纪冰川的测年中, 这就使我们得到各次冰期的确切年代成为可能。邓晓峰等<sup>[3]</sup>对各拉丹东峰东坡新冰期冰碛, 李世杰等<sup>[4]</sup>对唐古拉山各拉丹东峰地区的冰碛, 焦克勤等<sup>[5]</sup>对唐古拉山北坡龙匣宰陇巴及冬克玛底末次冰期分别进行了<sup>14</sup>C 测年; 赵志忠等<sup>[6]</sup>、Schäfer *et*

*al.*<sup>[7]</sup>和 Owen *et al.*<sup>[8]</sup>也先后对唐古拉山垭口南北两侧的冰碛物进行了 CRN 测年; 段志明等<sup>[9]</sup>等对唐古拉山垭口附近的冰碛物进行了 TL 测年。

虽然前人对这个地区做了大量的测年工作, 但本区末次冰期早、中和晚阶段冰川的范围和时代还不是很清楚, 尤其近期大量研究提出的 MIS3 阶段冰进的问题是否也在本研究区内存在。有鉴于此, 本研究采用宇生核素<sup>10</sup>Be 测年技术, 对研究区内末次冰期的冰川沉积进行了直接定年, 结合前人的工作, 为唐古拉山垭口地区第四纪冰川作用的历史提供新的证据, 并进一步验证本区与青藏高原其它地区末次冰期冰川波动模式的异同。

## 1 研究区概况

唐古拉山山脉横亘于青海省和西藏自治区之

收稿日期: 2006-08-21; 修订日期: 2006-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371013; 40501007); 国家重点基础研究发展规划项目(G1998040811)资助

作者简介: 王杰(1978—), 男, 山东潍坊人, 2001年毕业于曲阜师范大学地理系, 现为兰州大学在读博士生, 主要从事第四纪冰川与地貌研究。E-mail: wangjie03@lzu.edu.cn

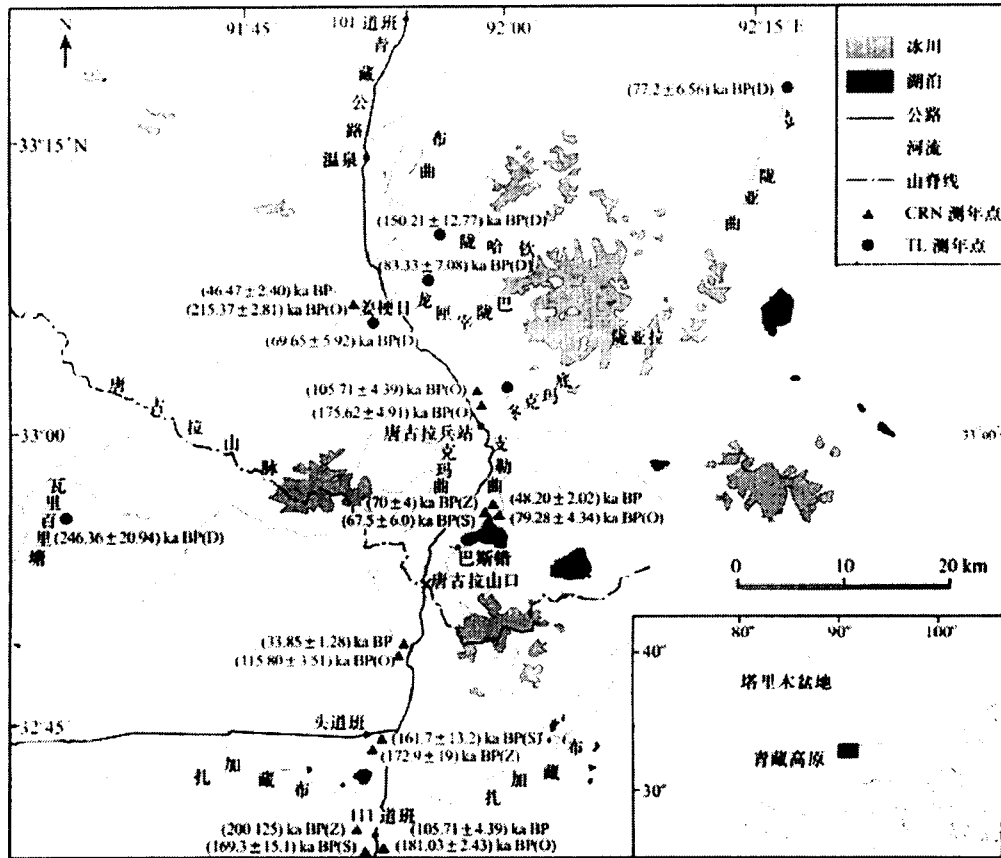


图 1 唐古拉山垭口地区第四纪冰川遗迹研究状况(已取得测年数据的点)

O、S、D 与 Z 分别代表 Owen、Schäfer、段志明和赵志忠所测数据

Fig. 1 Map showing the study situation of relics of Quaternary Glaciations around the Tanggula Pass (having dated)

间,为太平洋与印度洋流域的重要分水岭。山脉走向大致为北西西走向,保存有较完整的早第三纪和晚第三纪的两级夷平面,这些夷平面特别是座落在其上的古蚀余残山就成为现代冰川和第四纪冰川赖以发育的地形基础。唐古拉山垭口位于唐古拉山的中段(图 1),地势较西段要低,有少数的山头达到海拔 6 100 m 左右,现代雪线海拔在 5 100 m 或稍高。唐古拉山中段没有规模太大的冰川,除主山脊冰川较大外,哈白珠岭冰川群、固尔班罗齐冰川群为另外两个中心。气候主要受太平洋来的东南季风和印度洋来的西南季风的影响,为典型的季风山地气候。垭口地区的年降水量为 420 mm,且 5~9 月的降水占 88%,与其相邻的安多年平均气温为 -3.0℃。

## 2 研究方法和结果

传统的测年方法,通常用于测定岩石和沉积物形成的年代,而地貌面或基岩面形成的年代无法直

接测量,这样宇宙同位素测年技术就应运而生,尤其是应用于冰消期的测年。自从 Philli TP *et al.* [10] 用测量  $^{36}\text{Cl}$  活度指出了 Sierra Nevada 的 Bloody 峡谷冰碛的年龄以来,在缺乏有机质的地区,众多的研究已经用宇宙  $^3\text{He}$ 、 $^{10}\text{Be}$ 、 $^{26}\text{Al}$  和  $^{36}\text{Cl}$  测定了冰川地形的年龄。

首先利用地貌和沉积学的知识确定每个地区地貌地层上不同的冰碛序列,然后在每个研究区中确定适合用于 CRN 测年的地点。采样时应注意以下几点: 1) CRN 样品要选在明显没有被挖掘和斜坡稳定的地方,同时漂砾要选择最大的,这样可以减少漂砾被覆盖的可能性(一年中的几个月); 2) 沿着冰碛顶部富含石英的露头和漂砾上表面 5 cm 范围内采集; 3) 用 GTP 记录下位置,样品的数量要 > 1 kg,以保证有足够测量需要的石英; 4) 为了提供测年的再生性和检测遗传的宇宙射线的可能性,需要从每条冰碛垄上的不同漂砾上采集样品; 5) 风化程度和每个漂砾周围的情况都要被记录下来,地形的

盖度由测量漂砾与周围山脊或山峰的倾角决定(仰角)。

在野外综合考察研究的基础上,我们在唐古拉山垭口和巴斯错附近按要求采集了 4 块岩石样品(图 2),在 Vermont 大学进行了预处理,然后被送到 Lawrence Livermore 国家实验室测定。实验方法采用 Bierman *et al.* [11] 与 Colgan *et al.* [12-13] 描述过的方法。样品 TAN-02-10 是从高大约 2 m 带有明显冰川擦痕的露头上采集,距离唐古拉山现代冰川末端约 2 km,年龄为  $(16.1 \pm 1.7)$  ka BP; 样品 TAN-02-11 是从冰碛垄顶部的漂砾上采集,距离唐古拉山现代冰川末端约 3 km,年龄是  $(31.9 \pm 3.4)$  ka BP; 样品 TAN-02-05 距离现代冰川约 10 km,采自于巴斯错北岸(紧靠近巴斯错的一侧)巴斯错冰期冰碛上的石英安山岩漂砾,年龄为  $(41.4 \pm 4.3)$  ka BP; 样品 TAN-02-12 是从青藏公路西侧支勒曲与克玛曲之间分水岭的漂砾上采集,年龄为  $(66.8 \pm 4.3)$  ka BP。

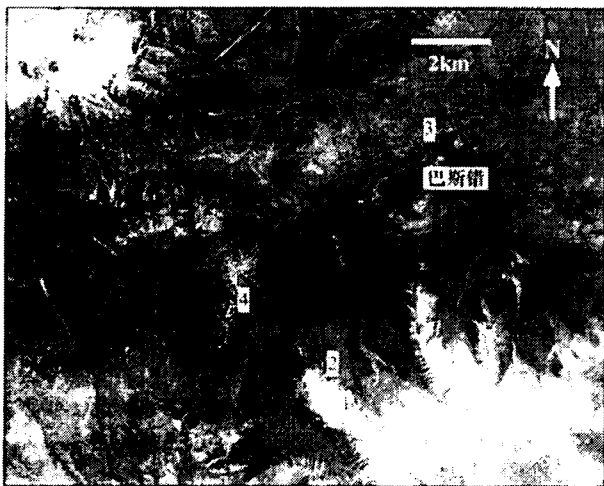


图 2 唐古拉山垭口与巴斯错地区采样点的位置

1. TAN-02-10; 2. TAN-02-11; 3. TAN-02-05;
4. TAN-02-12

Fig. 2 The sampling sites around the Tanggula Pass and Bacicuo Lake

### 3 唐古拉山垭口地区第四纪冰川序列

在对唐古拉山垭口地区第四纪冰川遗迹野外考察的基础上,结合前人的研究成果和此次宇生同位素测年(CRN)数据,我们对唐古拉山垭口第四纪冰川序列从老到新总结如下:

#### 3.1 倒数第二次冰期

在 20 世纪 70 年代根据冰川地貌学的知识,把

广泛分布于唐古拉山岭两侧海拔 5 200~5 400 m 夷平面上的冰碛(向南到 110 道班附近,向北一直可以追溯到 101 道班附近山坡上的冰碛,如青藏公路西侧高出谷地 200~300 m,支勒曲于克玛曲之间的分水岭上的冰碛)当作本区最大冰期的冰碛物,并把这次冰期命名为唐古拉冰期[1]。初步计算在唐古拉山中段西起曲果河,东至登卡的青藏公路两侧,该期冰川覆盖面积达 3 000 km<sup>2</sup>,比现代冰川大 30 倍。后来进一步认为唐古拉山此次冰期的时代应该与青藏高原最大冰期(昆仑冰期)的时代相同,可能起始于 MIS 20 或 MIS 18,而于 MIS 16 达到鼎盛[14]。

多个研究根据早期考察给出的唐古拉冰期的范围,对此次冰期进行了测年。Schäfer *et al.* [7] 利用宇生<sup>10</sup>Be、<sup>26</sup>Al、<sup>21</sup>Ne 测年技术测定了此次冰期的时代,在距离现代冰川末端 30 km 的地方(111 道班南侧冰碛台地)采集样品的年龄下限为  $(169.3 \pm 15.1)$  ka BP,在扎加藏布曲南测距离现代冰川 25 km 处(头道班东侧冰碛台地)采集样品的年龄为  $(161.7 \pm 13.2)$  ka BP。在 111 道班东侧冰碛台地与头道班附近冰碛漂砾得到的宇生核素暴露年龄分别为 200.125 ka BP 和  $(172.9 \pm 19)$  ka BP[6]。Owen *et al.* [8] 同样利用宇生核素<sup>10</sup>Be 测年,在此次冰期唐古拉山南北两侧范围内采集了 6 个样品,平均年龄大约为  $(148 \pm 36)$  ka BP。布曲冰川谷的温泉断陷盆地中堆积冰碛-冰水泥砾堆积厚度达到 410 m,陇哈沟南测采样,经 TL 测年为  $(150.20 \pm 12.22)$  ka BP[9]。

综合以上数据可以看出,唐古拉冰期正好与 MIS 6(130~200 ka BP)阶段对应,即中更新世晚期的倒数第二次冰期,而不是原来认为的中更新世早期。依据其规模推测此时的冰川应属于巨型冰帽-山麓冰川。

#### 3.2 末次冰期

末次冰期包括早冰阶、间冰阶和晚冰阶 3 个阶段,分别与 MIS 2、3 和 4 阶段对应。在唐古拉山中南部地区也发现了与这 3 个阶段相对应的冰进记录。

##### 3.2.1 末次冰期早冰阶

根据 Zheng Benxing *et al.* [15] 绘制的唐古拉山垭口地区的第四纪冰川地质图, Owen *et al.* [8] 在巴斯错冰期范围内采集了 14 块样品,得到的宇生核素<sup>10</sup>Be 的平均暴露年龄为  $(68 \pm 26)$  ka BP。另外得到了巴斯错北岸巴斯错冰碛垄外侧冰川漂砾的宇生<sup>10</sup>Be、<sup>26</sup>Al、<sup>21</sup>Ne 暴露年龄为  $(70 \pm 4)$  ka BP[6] 与

(67.5±6.0) ka BP<sup>[7]</sup>；我们测得青藏公路西侧支勒曲与克玛曲之间分水岭上的漂砾年龄为(66.8±4.3) ka BP。冬克玛底冰川谷底倒数第三道冰碛泥砾 TL 测年为(85.71±7.28) ka BP；在通冒纳查残存的倒数第二道冰碛丘陵 TL 测年为(83.33±7.08) ka BP；陇亚曲的冰川北延至卡日依，冰川长达 30 km，形成 6 道冰碛垄，砾石扁平面倾向南，以 15°~17° 倾角迎向冰川来向，倒数第五道冰碛丘陵的 TL 测年为(77.22±6.56) ka BP；在姜梗日冰碛台地保留有残存的 3 列终碛垄，倒数第二列冰碛物的 TL 测年为(69.65±5.92) ka BP<sup>[9]</sup>。

这些测年数据表明，巴斯错冰期出现在末次冰期早冰阶，与 MIS4 阶段相对应。此时巴斯错冰川的面积是现代冰川的 4.5 倍左右，依据其规模推测此时冰川应为冰帽-山谷冰川。焦克勤等<sup>[5]</sup>以 AAR 值为主，并用瓦尔达法和冰斗法进行复验，得到雪线的下降值为 175 m，但这个数字并未考虑高原的隆升。但可能由于末次冰期早冰阶的冰进要小于晚期，或者缺乏足够的测年数据，导致到目前为止，在青藏高原也只发现了少数地点存在末次冰期早冰阶的冰川遗迹，如喀喇昆仑山北坡<sup>[16]</sup>、珠穆朗玛峰南坡<sup>[17]</sup>、年保玉山<sup>[18]</sup>和当雄羊八井<sup>[19]</sup>等地。

### 3.2.2 末次冰期间冰阶

近期的研究表明，青藏高原的多个地区末次冰期间冰阶(MIS3)的冰进规模不亚于甚至超过了末次冰期盛冰期(LGM)，如 Lahul Himalaya 山区<sup>[20]</sup>、Hindu Kush Mountains(兴都库什山)东部 Chitral 地区<sup>[21]</sup>、喜马拉雅山地区<sup>[22]</sup>、巴基斯坦境内 Swat Himalaya 山区<sup>[23]</sup>、尼泊尔 Macha Khola 河谷<sup>[24]</sup>、青藏高原东南部绒坝盆地区<sup>[25]</sup>等地区。在唐古拉山垭口北侧，距离现代冰川约 10 km，巴斯错北岸紧靠近湖的地方测得宇生核素<sup>10</sup>Be 年龄为(41.4±4.3) ka BP。距离现代冰川约 3 km，测得冰碛垄顶部漂砾年龄为(31.9±3.4) ka BP。这就表明处于青藏高原中部的唐古拉山垭口地区也存在 MIS3 阶段的冰进。

### 3.2.3 末次冰期晚冰阶(LGM)

相对于其它两个阶段，这个阶段的测年数据就比较丰富。距离唐古拉山现代冰川末端大约 2 km，带有明显冰川擦痕的露头宇生核素<sup>10</sup>Be 暴露年龄为(16.1±1.7) ka BP。龙匣宰陇巴冰川下伸到海拔 5 600 m 处，保存的终碛垄的<sup>14</sup>C 测年为(16.1±0.305) ka BP。冬克玛底冰川外围保存有数道终碛垄，对最外一道终碛垄(海拔 5 200 m)的内、外侧采

样，经<sup>14</sup>C 测年分别为(21.69±0.638) ka BP 和(22.653±0.85) ka BP，而在最内一道终碛垄(海拔 5 220 m)的内、外侧采样，经过测年分别为(16.085±0.382) ka BP 和(17.089±0.756) ka BP<sup>[5]</sup>。比之青藏高原其它地区，本区末次冰盛期冰川作用的范围是十分有限的。

### 3.3 新冰期

在本区新冰期的冰碛垄距离现代冰川末端基本不超过 1 km，截至目前还没有获得直接的测年数据。在龙匣宰陇巴冰川前端 1.0 km 处，新冰期冰碛与末次盛冰期冰碛之间的沼泽泥炭层的<sup>14</sup>C 测年为(5.805±0.175) ka BP，因此在这层沼泽泥炭层之上的新冰期冰碛应形成与(5.805±0.175) ka BP 之后<sup>[5]</sup>。邓晓峰等<sup>[3]</sup>在各拉丹冬岗加曲巴冰川右侧冰碛外外碛外(海拔 5 320 m)，深 75 cm 处采样，经<sup>14</sup>C 测年为(3.54±0.16) ka BP。李世杰等<sup>[4]</sup>在唐古拉山卧美通冬谷地于末次冰期冰碛垄以内，划分了 3 列新冰期冰碛垄和 3 列小冰期冰碛垄，在最外侧一道终碛垄表层下 60 cm 深处采样，经<sup>14</sup>C 测年为(5.41±0.225) ka BP；在最内侧一道冰碛垄外低洼地草甸下 75 cm 深处，所采泥炭样品的<sup>14</sup>C 年代为(3.54±0.105) ka BP，最内侧一道冰碛垄表层土壤层底部的有机炭<sup>14</sup>C 年代为(2.69±0.11) ka BP。因此，可以认为该区新冰期的时代应与西段乃至青藏高原其它地区新冰期的时代相当，即 4.0~3.0 ka BP。

### 3.4 小冰期

小冰期(Little Ice Age)是指发生在大约 15 世纪至 19 世纪地球气候相对比较寒冷，冰川重新前进的时期。研究表明青藏高原地区现代冰川的外缘普遍存在 3~4 列冰碛垄，如在本区布曲的门甲日冰川前缘就形成了 3 道小冰期的冰碛垄，最外侧的冰碛垄距离现代冰川末端小于 1.0 km<sup>[26]</sup>。

## 4 讨论与结论

在唐古拉山垭口地区，更新世经历了 4 次较大规模的冰川作用，中更新世晚期的倒数第二次冰期、晚更新世中晚期的末次冰期早冰阶、间冰阶和晚冰阶，它们的时代分别与 MIS6、MIS4、MIS3 和 MIS2 阶段对应，全新世经历了 2 次小的冰进，新冰期和小冰期，它们的时代与青藏高原其它地区新冰期和小冰期的时代基本一致。早期考察中所命名的唐古拉冰期和巴斯错冰期的时代是中更新世晚期(MIS6)和末次冰期早冰阶(MIS4)。

研究表明,青藏高原许多地区的最老冰碛对应于 MIS18~16(或者 MIS12)阶段<sup>[27]</sup>,而根据现有的测年数据可以看出,唐古拉山垭口地区最早的冰川作用发生在 MIS6 阶段,即唐古拉冰期时,在唐古拉山垭口地区老的冰碛物上未测出倒数第二次冰期之前的年代数据,可能是由于后期的侵蚀风化使之破坏而难以发现,或者老冰期采集的样品还不够多、数据不充分所导致,对这个问题还有待于进一步深入研究。

在没有对扎加藏布冰期进行测年之前,一直认为它是发生在中更新世晚期的倒数第二次冰期,那时在唐古拉山垭口附近形成树枝状山谷冰川,在巴斯错附近许多冰川汇合并南北分流,一支北流入布曲河谷,一支南流入扎加藏布谷地并形成大面积冰碛丘陵一般相对高度为 20~30 m,海拔在 4 950~5 100 m 之间,冰川长约 20 km,被局限在谷地之中<sup>[1]</sup>。Owen *et al.*<sup>[8]</sup>用宇生核素<sup>10</sup>Be 对扎加藏布冰期进行了测年,共采集了 5 个样品(位于姜梗日北侧布曲右岸,年龄分别为(215.37±2.81) ka BP, (121.76±3.78) ka BP, (46.47±2.40) ka BP, (47.13±2.09) ka BP 和 (157.08±7.54) ka BP),其中 2 个对应于 MIS3 阶段,另外 3 个大约对应于 MIS6 阶段,得到这样的数据很有可能是 MIS3 阶段冰碛物覆盖在 MIS6 阶段冰碛物之上,经后期侵蚀等作用而暴露出部分 MIS6 阶段的冰碛,因此,扎加藏布冰期的冰碛可能是末次冰期的冰碛叠加在倒数第二次冰期的冰碛物之上,而又经过后期作用改造而形成的这样一套冰碛。

唐古拉山垭口地区末次冰期时的冰川是季风大陆性冰川,较之温度的影响可能降水对它的影响要更大一些。我们在有擦痕的基岩和冰碛物漂砾上做出的(16.1±1.7) ka BP 与(31.9±3.4) ka BP 的年龄都表明, MIS2 阶段的冰川范围不会超过现代冰川末端 3 km。这可能是由于此时处于青藏高原中部的唐古拉山垭口地区气候已经异常干旱,严重的限制了冰川的前进,而 MIS3/4 阶段的冰川却到达了距离现代冰川末端 10 km 的巴斯错北侧,远远超过了末次冰盛期时冰川的范围,末次冰期早冰阶的冰进可能是由于次干旱的 MIS4 阶段的降水量足够控制升华,从而引发冰进。MIS3 阶段冰进问题是近期研究的一个热点,施雅风等<sup>[28]</sup>专文探讨了 MIS3b 阶段冰进的问题, Owen *et al.*<sup>[20]</sup>也提出了 MIS3 阶段冰进的可能解释,许刘兵等<sup>[29]</sup>综合这两种意见后认为: MIS3 早期和晚期夏季风强盛,降

水丰富,温度较高,水热平衡状况有利于冰川发育; MIS3 中期气温较低,夏季风较强盛,降水较丰富,这种冷湿组合的气候条件有利于冰川发育,结合本区季风大陆性冰川的特征,可能主要是降水的巨大差异,使得 MIS3 阶段冰川前进规模不亚于甚至超过末次盛冰期。

#### 参考文献(References):

- [1] Xu Shuying. The Quaternary glaciation in the Taggula Range [M]// Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijing, *et al.* Glaciers of Xizang (Tibet). Beijing: Science Press, 1986. 238-242. [徐叔鹰,唐古拉山古冰川遗迹[M]// 李吉均,郑本兴,杨锡金,等.西藏冰川.北京:科学出版社,1986:238-242.]
- [2] Pu Qingyu, Wu Xihao, Qian Fang. The Quaternary geology problem of the Tanggula Mountain region along the Qinghai-Xizang Highway[C]// Professional Paper on Geology Studies of Qinghai-Xizang Plateau (4). Beijing: Geology Press, 1982: 19-33. [蒲庆余,吴锡浩,钱方.青藏公路沿线唐古拉山地区的第四纪地质问题[C].青藏高原地质文集(4).北京:地质出版社,1982:19-33.]
- [3] 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.唐古拉山各拉丹东峰东坡第四纪冰川与环境演变[J].冰川冻土,1992,14(2):153-160.]
- [4] Li Shijie, Li Shude. Quaternary glacial and environmental changes in the region of Hoh Xil, Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(4): 316-324. [李世杰,李树德.青海可可西里地区第四纪冰川与环境演化[J].冰川冻土,1992,14(4):316-324.]
- [5] Jiao Keqin, Shuji Iwata. Glacial changes since the Last Glaciation in Kunlun pass, Tanggula pass and Southeastern Xizang (Tibet) [C]// 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[C].青藏高原冰川气候与环境.北京:科学出版社,1993:120-129.]
- [6] Zhao Zhizhong, Wu Xihao, Schluchter C, *et al.* The first determination on nuclides exposure age of Quaternary glaciers in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8(4): 306. [赵志忠,吴锡浩, Schluchter C, 等.青藏高原第四纪冰川的宇宙核素暴露年龄首次测定[J].地质力学学报,2002,8(4):306.]
- [7] Schäfer J M, Tschudi S, Zhao Z, *et al.* The limited influence of glaciations in Tibet on global climate over the past 170000 yr [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 194: 287-297.
- [8] 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 <sup>10</sup>Be cosmogenic radionuclide surface exposure dating [J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24: 1391-1411.
- [9] Duan Zhiming, Li Yong, Li Yalin, *et al.* Quaternary tills at the pass of the Tanggula Mountains on the Qinghai-Tibet Plat-

- eau and their geological—environmental significance [J]. *Geology in China*, 2005, **32**(1): 128—134. [段志明, 李勇, 李亚林, 等. 青藏高原唐古拉山口第四纪冰碛层划分及其地质环境意义[J]. *中国地质*, 2005, **32**(1): 128—134.]
- [10] Philp T P F M, Zreda M G, Smith S S, *et al.* Cosmogenic chlorine-36 chronology for glacial deposits at Bloody Canyon, eastern Sierra Nevada [J]. *Science*, 1990, **248**: 1529—1532.
- [11] Bierman P R, Caffee M W, Davis P T, *et al.* Rates and timing of earth surface processes from in-situ-produced cosmogenic Be-10[J]. *Reviews in Mineralogy*, 2002, **50**: 147—196.
- [12] Colgan P M, Bierman P R, Mickelson D M, *et al.* Variation in glacial erosion near the southern margin of the Laurentide Ice Sheet, south-central Wisconsin, USA: implications for cosmogenic dating of glacial terrains[J]. *Bulletin of the Geological Society of America*, 2002, **114**: 1581—1591.
- [13] Colgan P M, Munroe J S, Zhou S Z. 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.
- [14] Jiao Keqin, Shen Yongping. The Quaternary glaciations and glacier properties in the Tanggula Range [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(1): 34—42. [焦克勤, 沈永平. 唐古拉山地区第四纪冰川作用与冰川特征[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(1): 34—42.]
- [15] Zheng Benxing, Jiao Keqin. Quaternary glaciations and periglaciations in the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau [M]. *International Union for Quaternary Research*, 1991: 25—28.
- [16] 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. 青藏高原泛冰盖遗迹与冰期[J]. *冰川冻土*, 1995, **17**(3): 213—229.]
- [17] Sharma M C, Owen L A. Quaternary glacial history of the NW Garhwal, Central Himalayas [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1996, **15**(4): 335—365.
- [18] Lehmkuhl F, Liu Shijian. An outline of physical geography, including glacial landform of Eastern Tibet [J]. *Geo Journal*, **34**: 7—30.
- [19] Wu Zhonghai, Zhao Xitao, Jiang Wan, *et al.* Dating result of the Pleistocene glacial deposits on the southeast foot of Nyaiqentanglha Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(3): 272—274. [吴中海, 赵希涛, 江万, 等. 念青唐古拉山东南麓更新世冰川沉积物年龄测定[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(3): 272—274.]
- [20] Owen L A, Wishart M, Bailey R M, *et al.* Style and timing of glaciation in Lahul Himalaya, North India: A framework for reconstructing Late Quaternary paleoclimatic change in the western Himalayas [J]. *Journal of Quaternary Science*, 1997, **12**: 83—110.
- [21] Owen L A, Kamp U, Spencer J Q, *et al.* Timing and style of Late Quaternary glaciation in the eastern Hindu Kush, Central, Northern Pakistan: A review and revision of the glacial chronology based on new optically stimulated luminescence dating [J]. *Quaternary International*, 2002, **97/98**: 41—55.
- [22] Owen L A, Finkel R C, Caffee M W. A note on the extent of glaciation throughout the Himalayan during the global Last Glacial Maximum [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, **21**(1—3): 147—157.
- [23] Richards B W, Owen L A, Rhodes E J. Timing of Late Quaternary glaciations in the Himalayas of Northern Pakistan [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2000, **15**(3): 283—297.
- [24] Zech W, Glaser B, Abramowski U, *et al.* Reconstruction of the Late Quaternary glaciation of the Macha Khola valley (Gorkha Himal, Nepal) using relative and absolute ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ , dendrochronology) dating techniques [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, **22**(21—22): 2253—2265.
- [25] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Li Changai, *et al.* The Quaternary glaciation in Rongbacha and correlation with the loess-paleosol in Garzê [J]. *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[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(5): 504—509.]
- [26] Li Jijun. Existing glaciers in the Tanggula Range [M] // Li Jijun, Zheng Benxing, Yang Xijing, *et al.* *Glaciers of Xizang (Tibet)*. Beijing: Science Press, 1986: 149—155. [李吉均. 唐古拉山现代冰川 [M] // 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. *西藏冰川*. 北京: 科学出版社, 1986: 149—155.]
- [27] Shi Yafeng. Evolution of the cryosphere in the Tibetan Plateau, China, and its relations with the global change in the Mid Quaternary [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, **20**(3): 197—212. [施雅风. 第四纪中期青藏高原冰冻圈的演化及其与全球变化的联系 [J]. *冰川冻土*, 1998, **20**(3): 197—212.]
- [28] 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 MIS 3b (54~44 ka BP) 冷期与冰川前进 [J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(1): 1—9.]
- [29] Xu Liubing, Zhou Shangzhe, Wang Jie. Pleistocene glaciations in the Shalulishan and the influences of southwest monsoon on the glaciations during the Last Glacial Period [J]. *Quaternary Sciences*, 2005, **25**(5): 620—629. [许刘兵, 周尚哲, 王杰. 沙鲁里山更新世冰川作用及西南季风波动对末次冰期冰川作用的影响 [J]. *第四纪研究*, 2005, **25**(5): 620—629.]

## The Sequence of Quaternary Glaciations around the Tanggula Pass

WANG Jie<sup>1</sup>, ZHOU Shang-zhe<sup>1,2</sup>, TANG Shu-lin<sup>3</sup>,  
Patrick M. Colgan<sup>4</sup>, Jeffrey S. Munroe<sup>5</sup>

(1. National Laboratory of Western China's Environmental Systems of Ministry of Education of China and Department of Geography, Lanzhou University, Lanzhou Gansu 730000, China; 2. Department of Geography, South China Normal University, Guangzhou Guangdong 510631, China; 3. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China; 4. Department of Geology, Grand Valley State University, 1 Campus Drive, Allendale, MI 49401, USA; 5. Department of Geology, Middlebury College, Middlebury VT 05753, USA)

**Abstract:** Based on investigations and studies of modern and ancient glaciers around the Tanggula Pass, dating of cosmogenic radionuclide <sup>10</sup>Be exposure age of the last glacial moraine boundaries (or striated outcrop) of this region, four data, i. e., (16.1 ± 1.7) ka BP, (31.9 ± 3.4) ka BP, (41.4 ± 4.3) ka BP and (66.8 ± 4.3) ka BP, were gained. Combined with the former studies and dating, it is believed that the area around the Tanggula Pass has experienced four major Pleistocene Glaciations, corresponding to marine isotope stage (MIS) 2, 3, 4 and 6, respectively, and two Holocene glacial advances (the Neoglaciation and the Little Ice Age). The dating results are consistent with those in oth-

er areas of the Tibetan Plateau. The extent of the Last Glacial Maximum was limited; however, the scale of glacial advance during MIS 3/4 even exceeded that of the Last Glacial Maximum. The Tanggula Glaciation and Basicuo Glaciation named in the early expedition are demonstrated occurring during the late Middle Pleistocene (MIS 6) and the early stage of the Last Glaciation (MIS 4). There is no dating result older than MIS 6 in the oldest moraines of this area, perhaps due to destruction later or insufficient of collecting samples. Further study of timing of the oldest glaciation in this area should be performed.

**Key words:** Tanggula Pass; Quaternary Glaciations; MIS 3; CRN dating