

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0038

CHAI Le, ZHANG Wei, LIU Liang, et al. Study on early-mid Holocene glacial advance events in the Taniantaweng Mountains, southeastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):307-315. [柴乐, 张威, 刘亮, 等. 青藏高原东南部他念他翁山全新世早中期冰进事件研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):307-315.]

青藏高原东南部他念他翁山全新世早中期冰进事件研究

柴乐^{1,2}, 张威³, 刘亮³, 马瑞丰³, 唐倩玉³, 李亚鹏³, 乔静茹³

(1. 江西省地质调查研究院, 江西南昌 330013; 2. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013;

3. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连 116029)

摘要: 他念他翁山位于横断山脉西部, 是海洋性冰川向亚大陆性冰川的过渡区, 维持冰川发育的降水补给主要由西南季风带来, 该区第四纪冰川进退对西南季风波动有较为直接的反映。正是这一地理位置的特殊性, 使得该区第四纪冰川研究具有重要意义。采用野外地貌调查与宇宙成因核素测年技术相结合的方法, 试图查明他念他翁山青古隆槽谷全新世期间冰川地貌学特征, 并确定其发生的具体时间, 探讨其响应机制。结果显示: 他念他翁山全新世早中期冰川波动的时限介于(6.13±0.37)~(8.83±0.50) ka, 可能是当时西南季风强盛, 降水增加的结果。研究可为探究冰川作用与西南季风气候变化及全球气候变化之间的动力学联系提供新依据。

关键词: 青藏高原; 他念他翁山; 全新世早中期; 宇生核素

中图分类号: P931.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0307-09

0 引言

全新世是第四纪最后一次冰期结束至今的这段时间, 也是人类文明迅速发展的时期, 该时期气候并不稳定, 存在一系列千年/百年尺度快速的冷暖波动, 其变化具有显著的周期性^[1]。在全球变化背景下, 全新世冷暖波动周期、暖期的温暖程度、冷暖气候事件等, 均是全面理解目前日益突出的全球变暖, 评估未来全球变化所必需的古气候背景^[2]。由气候变化引起的冰川进退过程是全新世气候演化特征的重要体现, 冰川地貌遗迹所含古气候信息在重建特定时段古气候环境过程中具有其独特优势, 如古冰川的规模、发生时限及多种冰川地貌类型等。

根据冰期年代资料、冰芯气候记录, 中国全新世冰川活动主要有4个阶段, 分别为早期(8.5~8.0 ka)、中期(7.3~5.7 ka)、新冰期(3.0~1.5 ka)和小冰期(0.6~0.1 ka)^[3]。青藏高原及其周边山地大部分现

代冰川末端附近几千米范围内发育有被认为是形成于全新世时期的冰碛垄, 具有形态清晰、保存较为完整的特点, 是探索全新世气候演化规律的关键材料。近年来, 不同测年技术获得的年代结果显示, 青藏高原多个冰川作用区获得了对应于全新世早期的年代学数据^[4-5], 表明在该时期可能发生一次冰进事件。基于石笋^[6]、植物孢粉^[7-8]、深海沉积^[9]等多种高分辨率环境指标的研究显示, 全新世早中期冰进事件具有持续时间短、影响范围广和气候波动强等显著特征, 得到国际地学界的广泛关注。

他念他翁山位于横断山脉西部, 是青藏高原南部和云贵高原的过渡地带, 第四纪以来依托区内大面积夷平面发育了多次冰川作用, 冰川侵蚀和堆积地貌可以相互匹配, 特别是冰川沉积地貌保存尤为清晰, 现代冰川末端几千米范围内保存着多次冰川波动的痕迹, 是讨论青藏高原东南部全新世冰川演化规律的理想载体。本区维持冰川发育的降水

收稿日期: 2021-02-04; 修订日期: 2022-01-23

基金项目: 东华理工大学博士科研启动基金项目(DHBK2019005); 国家自然科学基金项目(41671005; 42071013)资助

作者简介: 柴乐, 讲师, 主要从事第四纪冰川地貌研究. E-mail: 541544672@qq.com

通信作者: 张威, 教授, 主要从事自然地理学、第四纪地质学研究. E-mail: zhangweilnu@163.com

补给主要由西南季风带来,因而本区第四纪冰川进退对西南季风波动有较为直接的反映,正是这一地理位置的特殊性,使得他念他翁山第四纪冰川研究具有重要意义。基于上述背景,本文采用宇宙成因核素测年技术,确定该区青古隆冰川槽谷全新世期间的冰川波动事件,并探讨其响应机制。

1 研究区与样品

1.1 研究区概况

他念他翁山(30°40'~30°11' N,96°39'~97°16' E)位于横断山脉西部的怒江与澜沧江之间(图 1),地

势总体特点是北高南低,西高东低^[10]。气候上属于大陆性高寒气候区,降水主要来自印度洋的西南季风,同时也受地势、地貌条件的影响,故降水量南部多于北部、西部多于东部,年均降水量 474.2 mm,年平均气温 7.6 °C·(10a)⁻¹^[11]。研究区现代冰川物理性质属于海洋性向亚大陆性冰川过渡区,冰川形态类型以冰斗冰川和悬冰川为主,根据 2017 年发布的 Randolph Glacier Inventory 6.0 数据记录,研究区共有现代冰川 88 条,总面积 12.955 km²,冰川规模普遍较小,冰川总储量约为 1.350 km³,主要分布在玉曲西岸,冰川末端下伸到 5 100~5 200 m^[11]。

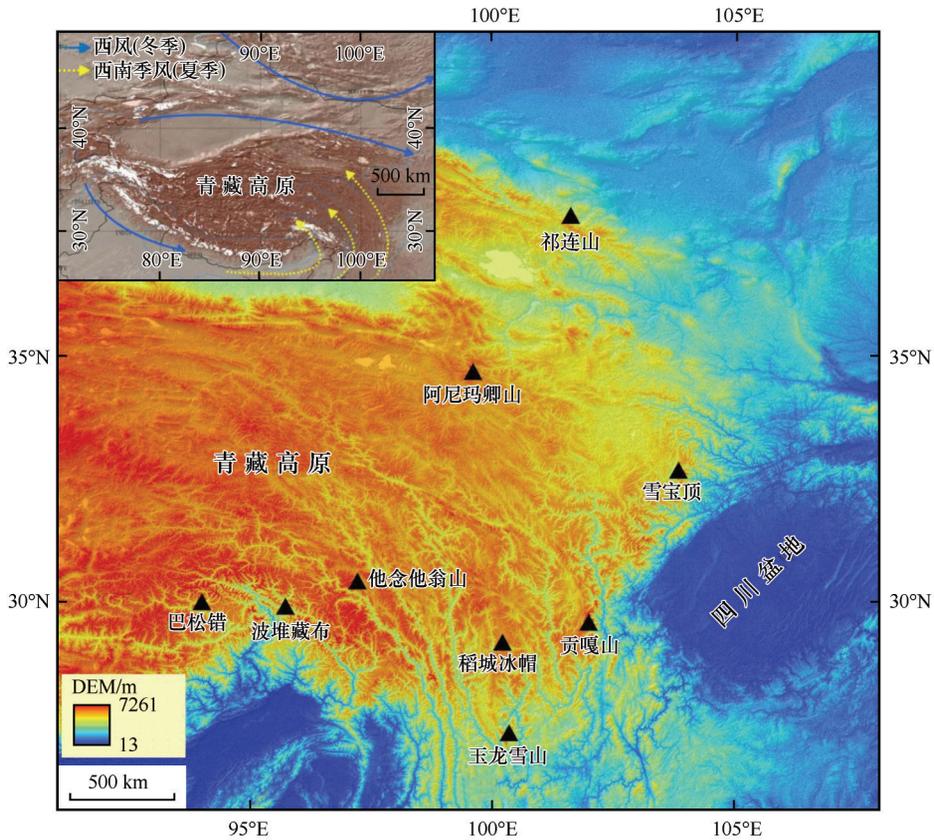


图1 他念他翁山中段位置及青藏高原东部获得全新世早中期年代结果的其他山地
 Fig. 1 Map showing location of the Taniantaweng Mountains and other mountains in the eastern Qinghai-Tibet Plateau which have yielded the early-mid Holocene ages

1.2 样品采集

基于对他念他翁山中段第四纪冰川地貌野外调查,应用光释光(optically stimulated luminescence, OSL)和电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)测年技术,前人对该区域的第四纪冰川地貌分布、发育历史、规模进行了研究^[12-13]。结果显示,该区域海拔 4 200 m 以上保存着确切的第四纪冰川遗迹,第四纪以来共发生 4 次冰川作用,发生时

限分别对应于深海氧同位素(marine isotope stage, 简称 MIS) MIS 6、MIS 3、MIS 2 和 MIS 1。最大冰期之后,冰川规模逐渐缩小,冰川厚度逐渐减薄,多期冰川堆积地貌组合以内叠形式向槽谷源头收缩。其中, MIS 6 阶段的冰川规模最大,冰川厚度为 40~235 m,长度介于 25~35 km,普遍到达冰川谷谷口,觉曲、曲扎等冰川谷在该时期的冰川规模延伸至玉曲河谷,冰川末端海拔介于 4 300~4 760 m 之间。

MIS 3 阶段冰川长度介于 12~15 km, 厚度为 25~150 m。MIS 2 时期冰川长度整体介于 7~8 km 之间, 以形态完整的高大冰碛垄为典型地貌。

上述研究结果其目标旨在与青藏高原及邻近山地进行对比研究, 来揭示高原地区冰川发育的气候与构造耦合模式, 因而年代学结果主要集中在末次冰期及更老冰川作用的发生时限, 而对于本区全新世冰川发生时限, 则根据地貌地层法进行了笼统划分, 而缺乏详细的地貌学和年代学证据。本区主山脊两侧自现代冰川末端向下游几公里范围内保存着多次冰川波动的地貌证据, 冰碛垄形态清晰, 保存完整, 确定其发生时限, 与青藏高原东部已有的年代学数据进一步对比分析全新世冰期轮回规律, 进而检测其中可能存在的对特定时段气候变化

的响应模式, 将丰富和完善青藏高原东南部全新世冰川演化序列, 为进一步探索青藏高原全新世期间冰川演化的时空分布规律研究提供可靠的数据支持。

基于上述背景, 本研究重点考察了青古隆冰川槽谷古冰川作用遗迹(图 2), 该冰川谷发育小规模悬冰川, 保留三组冰碛物。与青古隆槽谷相邻的冰川槽谷保留了相似的冰川地貌。其中, QM3 冰碛物分布在海拔 5 250~4 600 m 之间, 自上游向下延伸约 7 km, 最明显的为两条平行对称分布的侧碛堤及下游的终碛垄[图 3(a)]。侧碛堤呈垄岗状, 顶部坡度和缓, 相对高度约 20 m, 表面散落大量花岗岩漂砾, OSL 和 ESR 年代学结果显示该套冰碛垄形成于 LGM (Last Glacial Maximum) 时期^[13]。

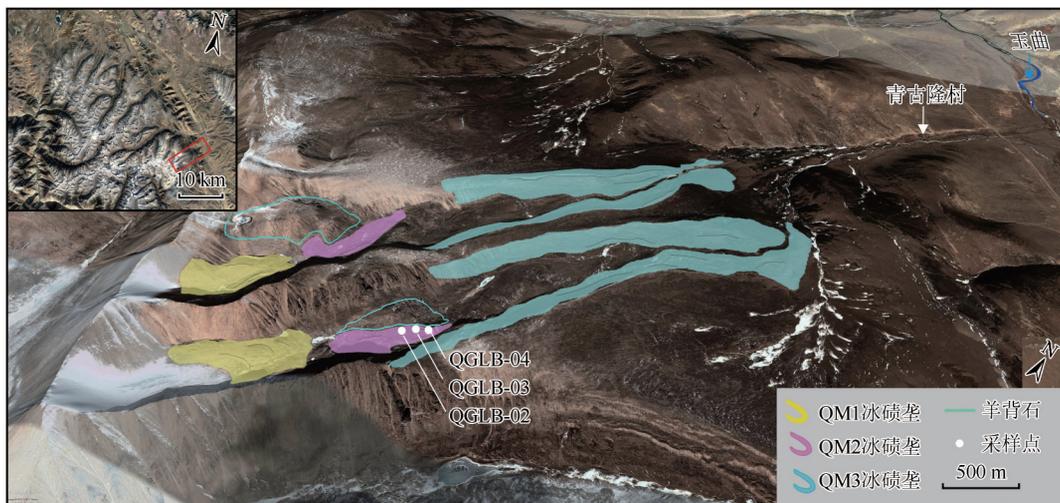


图 2 青古隆槽谷冰川地貌分布

Fig. 2 Glacier landforms of the Qinggulong Valley

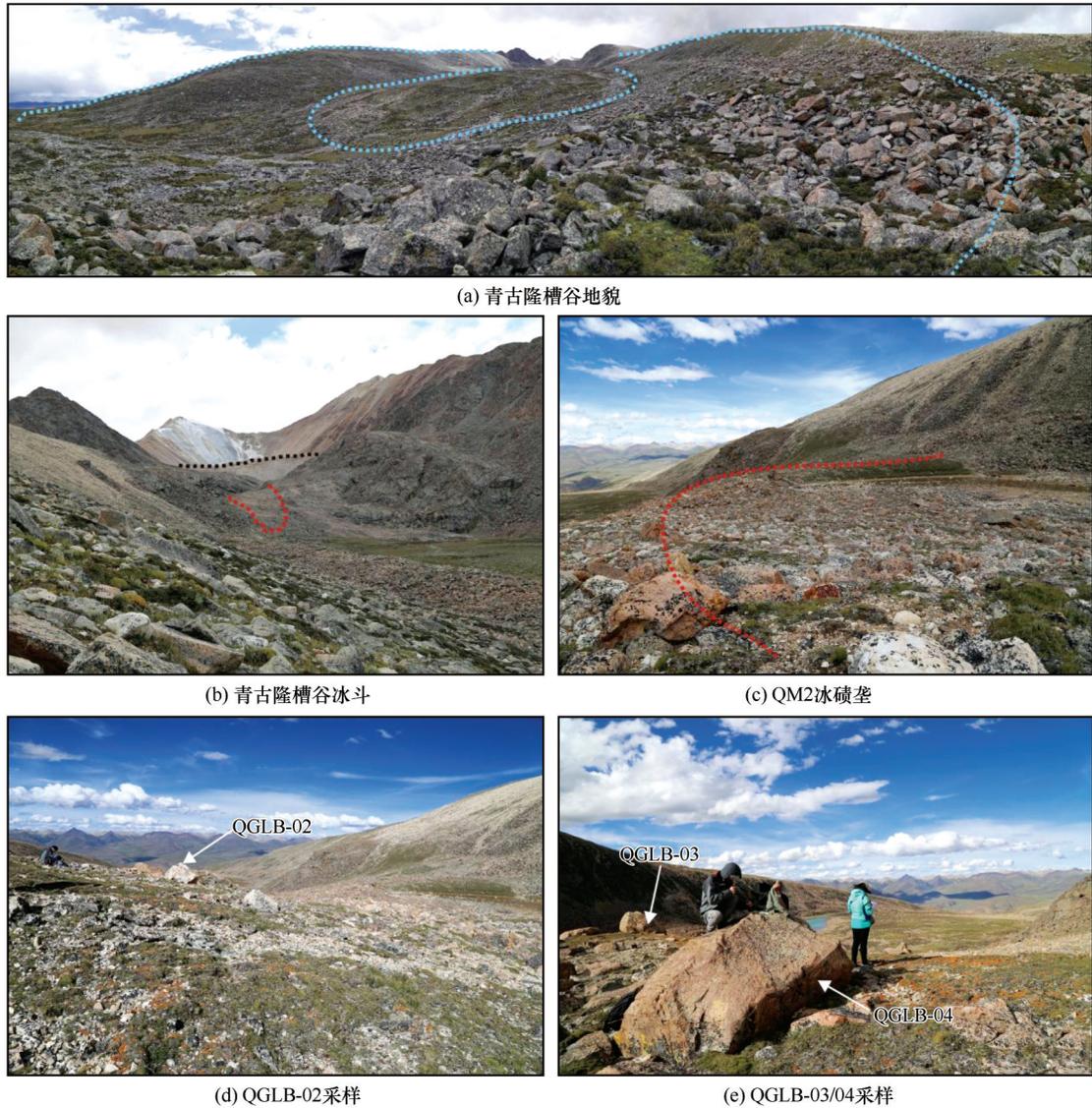
冰斗内部海拔 5 290~5 175 m 之间保存的终碛垄 QM2 [图 3(b)], 高出青古隆冰川槽谷谷底 60~70 m, 颜色为灰黄色, 呈弧形分布 [图 3(c)], 内缓外陡, 向下延伸 0.75~1.5 km 至冰斗口岩坎上部, 冰碛垄顶部常分布体积较大、棱角明显的二长花岗岩漂砾, 漂砾表面新鲜, 风化程度低, 发育少量草本植被。在冰碛垄西侧发育相对高度约 2 m 的羊背石, 岩性为花岗岩, 顶部平缓, 未见明显擦痕, 背冰面受冰川拔蚀作用的影响, 呈现锯齿状断口, 坡度为 29°~35°, 迎冰坡平缓, 坡度介于 11°~15°, 羊背石表面生长少量地衣。根据相对地貌判断, 该套冰碛物可能形成于全新世早期。本研究在此采集 3 个冰川漂砾样品 [图 3(d, e), QGLB-02~04], 样品参数见表 1。

冰斗源头现代冰川末端 5 360 m 向下延伸至

5 270 m 左右发育一套终碛垄 QM1 (图 2) 冰斗底部 80 m 左右 [图 3(b)], 终碛垄顶部保存大量碎石和粒径较小的花岗岩漂砾, 冰碛物风化程度极低, 无植被发育。根据相对地貌判断, 该套冰碛垄可能形成于全新世晚期。

2 ¹⁰Be 表面暴露年代测定

样品前处理制靶是在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(拉萨部)进行, 处理流程参照 Nishiizumi 等^[14]提出的方法。经过人工挑选与化学分离、纯化, 挑选出 20~60 g 纯净石英, 纯石英加入约 0.3 g 的 ⁹Be 载体, 然后将石英用 HF 和 HNO₃ 溶液溶解, 经过去氟和阴阳树脂交换分离、提纯 Be, 然后在 Be 溶液中加入氢氧化铵制备



注：(a) 中蓝色线为QM3冰碛垄；(b) 中红色线为QM2冰碛垄，黑色线为QM1冰碛垄；(c) 中红色线为QM2冰碛垄

图3 研究区野外地貌及采样照片

Fig. 3 Field topography and sampling photos in the study area: geomorphology of the Qinggulong Valley, and the blue line represents the moraine of the QM3 moraine (a); cirque in the Qinggulong Valley, and the red line represents the QM2 moraine, while the black line represents the QM1 moraine (b); the red line represents the QM2 moraine (c); the sampling photos (d, e)

表1 青古隆槽谷采样点位置、宇宙核素 ^{10}Be 浓度及测年结果

Table 1 Coordinates, ^{10}Be concentrations, and dating results for samples from Qinggulong Valley

样品编号	纬度/N	经度/E	海拔/m	采样厚度/cm	漂砾尺寸/m (高/宽/长)	地形遮蔽 因子	^{10}Be 浓度/ ($10^5 \text{ atoms}\cdot\text{g}^{-1}$)	年代/ka
QGLB-02	30.4288°	97.1104°	5 201	2.5	1.5/1.6/1.8	0.9796	4.640±0.110	6.13±0.37
QGLB-03	30.4288°	97.1118°	5 193	3.0	1.5/1.8/3.0	0.9756	6.552±0.143	8.83±0.53
QGLB-04	30.4288°	97.1119°	5 198	2.0	0.7/1.2/2.5	0.9836	6.352±0.129	8.37±0.50

注：atoms/g指每克BeO含有的原子个数。

氢氧化物,之后,脱水提取BeO,将BeO与Nb粉混合得到AMS测量的制备靶样,靶样在中国科学院西安加速器质谱中心测试完成。

所有样品的 ^{10}Be 暴露年代计算均采用Heyman

等^[15]改进的CRONUS网络计算器^[16]。假设样品在出露前未经过宇宙射线的照射且后期表面侵蚀率为0,石英密度为 $2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, ^{10}Be 半衰期取 1.387 Ma ^[17],实验中心采用ICN ^{10}Be 质谱加速器标准^[18],对应于

CRONUS Calculator 网络计算程序中的 07KNSTD 标准^[16], 依据 Li^[19] 提出的方法计算采样处遮蔽角。由于采样区气候条件干燥, 且植被稀疏, 故而未对采样点积雪/植被覆盖进行修正。如前文所述, 本文采用侵蚀速率为 $0 \text{ m} \cdot (\text{Ma})^{-1}$ 来计算暴露年代, 研究显示, 由表面侵蚀引起的暴露年代, 其不确定性在不同年代范围内具有明显的差异性, 假设表面平均侵蚀速率为 $2.5 \text{ m} \cdot (\text{Ma})^{-1}$, 对于小于 1 ka 的暴露年代, 其不确定性可能 $< 0.5\%$, 而对于晚冰期和全球 LGM 时期的年代, 不确定性在 $2\% \sim 5\%$ ^[20]。样品参数和测试结果如表 1 所示。

暴露年代测年结果可能受测量误差或地貌体后期扰动的影响^[21]。对冰碛垄所有 ^{10}Be 年代绘制概率密度函数, 以辨别样品年代的集中与分散程度, 进而移除极值。冰碛垄 QM2 顶部 3 个暴露年代的概率密度曲线见图 4。

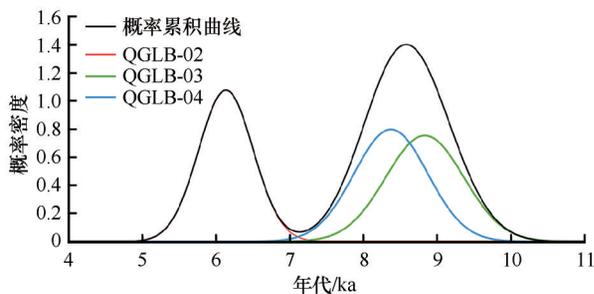


图4 青古隆槽谷 QM2 冰碛垄 ^{10}Be 暴露年代概率曲线
Fig. 4 Probability density function (PDF) plots of ^{10}Be exposure ages for moraine QM2 of the Qinggulong Valley

一般而言, 冰碛垄顶部漂砾的暴露年代应代表冰碛形成的最小时间年龄, 但由于冰川地貌过程的复杂性, 可能导致冰碛垄上漂砾的暴露年代远大于或小于实际年龄。因此, 研究者根据冰碛垄是否经历了影响测年结果的地貌过程, 而采用不同策略来解释年代学数据。通常采用以下步骤来考虑地貌过程的影响, 并将分散的年代学数据集聚到更集中的年代范围内^[22]。首先, 野外根据地貌地层法建立冰碛物的相对年代, 并将该相对年代与青藏高原东南部其他具有绝对年代学数据的冰碛物序列进行对比验证, 基于相对年代为绝对年代的确定初步划定框架; 第二, 去除可能由地貌过程导致 ^{10}Be 暴露年代中的异常值, 采用相对年代与累积概率密度函数 (PDF) 共同识别异常值。最后, 采用卡方分析 (χ^2) 检验排除异常值后剩余年代间的离散度, 以确定年代学样品的离散度是否由测量误差所产生。如果

χ^2 接近于 1 或 < 1 则可能是测量误差导致, 反之 $\chi^2 > 1$, 则很可能是由地貌过程引起。因此, 逐步去除异常值, 使某组暴露年代的 χ^2 值更接近于 1, 进而获得更准确的地貌年代^[23]。

青古隆槽谷 QM2 冰碛垄 3 个暴露年代的 χ^2 值为 12.58, 表明该组样品年代学分散可能由地貌过程所导致。结合相对地貌和测年结果, 用年代学范围 $(6.13 \pm 0.37) \sim (8.83 \pm 0.50)$ ka 作为该套冰碛垄形成的年代。基于国际年代地层学年表 (2020 版), 早全新世年代范围为 11.7~8.2 ka, 中全新世为 8.2~4.2 ka, 4.2 ka 至今为晚全新世^[24], 表明青古隆槽谷 QM2 冰碛垄在全新世早中期发生波动。

3 结果与分析

3.1 冰川波动的空间框架

关于青藏高原全新世早中期冰进事件, 已有多位学者基于冰川本身进行了总结与讨论。如研究者根据青藏高原南部 68 个放射性 ^{14}C 年代, 判断喜马拉雅山和喀喇昆仑山等地区在 8.3 ka (7 400 ^{14}C BP) 左右发生过冰进^[25]; 青藏高原东北部在全新世早中期发生冰川波动^[26], 且青藏高原此次冰进具有局部性^[27] 和同时性^[5], 而对青藏高原全新世早中期冰进 ^{10}Be 年代结果的分析也表明, 冰川对气候波动表现敏感^[28], 能够反映出全新世快速波动的气候特征^[29]。

近年来, 研究者基于 TCN ^{10}Be 测年技术, 在青藏高原东部、东南部多个典型冰川作用区获得了全新世早中期冰川波动的年代学证据。为了与研究区周边山地全新世早中期冰川波动事件进行对比研究, 本文采用 CRONUS 网络计算器, 对所有用于对比的 ^{10}Be 暴露年代数据进行重新计算, 计算所采用的 ^{10}Be 半衰期为 1.387 Ma, 岩石密度为 $2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 假设侵蚀速率为 0。

重新计算的 ^{10}Be 暴露年代学结果显示, 全新世早中期冰川波动事件在祁连山冷龙岭的 ^{10}Be 暴露年代介于 $(6.45 \pm 0.57) \sim (8.90 \pm 0.66)$ ka^[30], 阿尼玛卿山最年轻的哈龙冰期冰碛垄波动时限为 $(6.48 \pm 0.19) \sim (9.00 \pm 0.53)$ ka^[31], 雪宝顶盐津沟 M2 冰碛垄的波动时限为 $(6.83 \pm 0.56) \sim (9.79 \pm 0.63)$ ka^[32], 贡嘎山海螺沟冰水阶地发生时限为 $(7.86 \pm 0.78) \sim (8.97 \pm 0.84)$ ka^[33], 玉龙雪山冰碛阶地顶部漂砾的 ^{10}Be 年代结果为 $(9.20 \pm 0.56) \sim (10.68 \pm 0.69)$ ka^[34], 青藏高原东南部 Karola 山口附近冰川槽谷 M3 冰碛

垄波动时间介于 $(7.03 \pm 0.76) \sim (10.07 \pm 0.60)$ ka^[35]。

此外, Hu等^[36]基于OSL测年技术在青藏高原东南部Bsongcuo流域测得该地区全新世早中期冰进时间为 $(7.4 \pm 0.7) \sim (8.2 \pm 1.6)$ ka。与他念他翁山中段纬度相同的稻城海子山, 央英错沟最内侧冰碛垄前缘的河湖相沉积,¹⁴C测年结果为 (8010 ± 150) a, 研究者认为该套冰碛物为全新世早期时, 冰川退缩中的第一次停顿期所形成, 同时认为此次冰川波动可能受8000年前全新世冷事件的影响^[37]。

上述典型冰川作用区的年代学结果表明, 他念他翁山中段全新世早中期冰川波动与青藏高原东南部、东部地区典型冰川作用区较为一致, 同时也说明全新世早中期冰川波动在上述地区具有一定的普遍性。本文虽然列举了青藏高原东南部及东部地区若干全新世早中期冰进事件的典型区域, 但由于这些冰川作用区域全新世早中期冰川波动事件的年代学证据主要是基于TCN、OSL和放射性¹⁴C所获得, 不同测年技术结果指示的事件不完全相同, 且不同测年手段各有其优点和不足。同时测年技术也受山地冰川作用区复杂的地质地貌过程和冰川沉积的特殊性的限制, 且对于全新世以来的冰川地貌年代的分辨率还不够高, 年代数据的不确定性比较大, 支撑该时期冰进的年代学数量仍较少。因此, 在本文讨论中只希望给出一个初步的年代学框架及其在全新世早中期冰进的初步结果, 更多、更准确的冰川地貌年代学是进一步了解青藏高原全新世早期冰进的关键。

3.2 冰川波动的响应机制

冰川发育受地形、气温和降水等因素的共同影响, 其中温度和降水对冰川变化起决定性作用。研究显示, 青藏高原东南部及东部地区全新世早中期冰川波动的规模大部分分布在距离现代冰川末端几公里范围内, 规模普遍较小, 一定程度上可以说明, 此次冰进事件持续时间较短, 气温和降水组合并不利于大规模冰川的发育。

研究者基于¹⁰Be年代结果和高分辨率环境替代指标的分析认为, 青藏高原全新世早中期冰川发育可能受热带辐合带北移, 及夏季风增强的控制^[38]。青藏高原达索普冰芯、普若冈日冰芯及古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 的对比研究表明, 全新世早中期高原南部和中部的冰川扩张主要由季风降水变化驱动, 而季风降水变化则受岁差驱动的太阳辐射量变化的调节^[39]。青藏高原东南部及东部冰川作用区, 全新世早中期

冰川发育受太阳辐射值增大导致西南季风增强的影响, 即太阳辐射通过控制季风的地理分布范围, 进而影响其降水分布。西南季风降水增加则有利于冰川积累, 进而使得高海拔冰川作用区降水增加的同时发生冰进, 如青藏高原东部阿尼玛卿山哈龙冰期^[31]、雪宝顶^[32]及贡嘎山^[33]等区域全新世早中期的冰川波动与同时期太阳辐射最大值相一致, 季风降水增强对驱动该时期青藏高原东部冰川波动具有重要作用。

他念他翁山中段位置处在西南季风通道上, 该区域冰川发育主要受西南季风的控制。研究区附近仁错湖和海登湖高分辨率的植物孢粉记录反映^[40], 青藏高原东南部在末次冰盛期期间, 气候寒冷干燥, 降水量仅250 mm左右, 是现今当地的40%, 1月、7月和年平均气温分别低于当地 $7 \sim 10$ °C、 $0.5 \sim 1.5$ °C和 $4 \sim 6$ °C, 低温是研究区末次冰盛期冰川发育的主导因素, 而该地区全新世早中期年均气温介于 $0 \sim 1$ °C之间, 降水量较现代有所增加, $8 \sim 6$ ka BP更是研究区气候最适宜期, 1月、7月均高于现在 $2 \sim 3$ °C, 年降水量比现在当地高100 mm左右, 说明本阶段这一地区西南季风强盛。因此, 降水增加可能是本区全新世早中期冰川发育小规模冰川的主要因素。

然而, 关于青藏高原全新世早中期冰川变化模式及驱动机制尚存在其他观点。一种观点认为, 在青藏高原季风控制区, 全新世早中期冰川的长期波动一般不遵循轨道变化趋势, 可能以显著的遥相关模式触发, 其波动频率更高^[41]; 还有学者的研究显示, 青藏高原-喜马拉雅山季风控制区全新世11次区域性冰川发育事件中, 8次冰进与中纬度西风带的变化相关(主要为全新世早期和晚期), 3次与季风增强有关^[42], 青藏高原-喜马拉雅山西部半干旱区在21 ka以后的冰川发育主要与全球冰量和北半球气候事件相关^[43], 而欧先交等^[44]的分析结果则认为, 青藏高原及其周边山地早全新世冰川发育可能是印度季风水汽和北半球降温事件的共同影响。可见, 青藏高原全新世冰川变化模式及驱动机制仍存在较大争议, 而冰川波动过程整合了气温和降水信号, 全新世期间青藏高原不同冰川作用区气候因子的组合特征及其与全球气候变化的动力学联系具有显著差异性。因此, 对于该时期冰川演化机制的探索, 除了需要获得详实而准确的年代学, 还要结合冰川地貌定量研究进行探究。

4 结论

本研究基于他念他翁山中段青古隆冰川槽谷 QM2 冰碛垄的 ^{10}Be 暴露年代学数据, 并结合前人关于青藏高原东南部、东部典型冰川作用区全新世早中期冰川波动的研究结果, 得出以下结论:

他念他翁山中段青古隆槽谷全新世早中期发育一次小规模冰川波动事件, 时间为 $(6.13 \pm 0.37) \sim (8.83 \pm 0.50)$ ka。究其原因, 青藏高原东南部全新世早中期西南季风强盛, 导致降水增加, 可能是影响此次冰川作用的主要机制。在将来的研究工作中, 有待从更多、更准确的年代学证据及冰川地貌定量研究等方面给出更充分的证据。

参考文献(References):

- [1] Rasmussen S O, Vinther B M, Clausen H B, et al. Early Holocene climate oscillations recorded in three Greenland ice cores [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26: 1907-1914.
- [2] Fang Xiuqi, Hou Guangliang. Synthetically reconstructed Holocene temperature change in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(4): 385-393. [方修琦, 侯光良. 中国全新世气温序列的集成重建 [J]. *地理科学*, 2011, 31(4): 385-393.]
- [3] Cui Zhijiu, Chen Yixin, Zhang Wei, et al. Research history, glacial chronology and origins of Quaternary glaciations in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(5): 749-764. [崔之久, 陈艺鑫, 张威, 等. 中国第四纪冰期历史、特征及成因探讨 [J]. *第四纪研究*, 2011, 31(5): 749-764.]
- [4] Phillips W M, Sloan V F, Shroder J, et al. Asynchronous glaciation at Nanga Parbat, northwestern Himalaya Mountains, Pakistan [J]. *Geology*, 2000, 28(5): 431-434.
- [5] Yi C L, Chen H, Yang J, et al. Review of Holocene glacial chronologies based on radiocarbon dating in Tibet and its surrounding mountains [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2008, 23(6/7): 533-543.
- [6] Cui Yingfang, Dong Jinguo, Zhao Kan. A comparative study on the Little Ice Age and the "8.2 ka BP" event based on two stalagmite records from the Dongge Cave, Southwest China [J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 42-51. [崔英方, 董进国, 赵侃. 基于石笋记录的小冰期与"8.2 ka BP"事件的对比研究 [J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 42-51.]
- [7] Chabangborn A, Punwong P, Phountong K, et al. Environmental changes on the west coast of the Gulf of Thailand during the 8.2 ka event [J]. *Quaternary International*, 2020, 536: 103-113.
- [8] Zhang Shengrui, Xiao Jule, Xu Qinghai, et al. Contrasting impacts of the 8.2- and 4.2-ka abrupt climatic events on the regional vegetation of the Hulun Lake region in northeastern China [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2020, 6(35): 831-840.
- [9] Estrella-Martínez J, Ascough P L, Schöne B R, et al. 8.2 ka event North Sea hydrography determined by bivalve shell stable isotope geochemistry [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6753.
- [10] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Ren Binghui. An introduction to the glaciers in China [M]. Beijing: Science Press, 1988: 163-166. [施雅风, 黄茂桓, 任炳辉. 中国冰川概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988: 163-166.]
- [11] Su Zhen, Pu Jianchen. Development conditions, number and morphological characteristics of glaciers in the Hengduan Mountains region [M]// *Glaciers in the Hengduan Mountains*. Beijing: Science Press, 1996: 1-21. [苏珍, 蒲健辰. 横断山冰川发育条件、数量及形态特征 [M]// *横断山冰川*. 北京: 科学出版社, 1996: 1-21.]
- [12] Zhang Wei, Chai Le. The preliminary study of the Quaternary glacier in middle part of the Tenasserim Chain with ESR dating method [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(5): 1281-1291. [张威, 柴乐. 他念他翁山中段第四纪冰川作用 ESR 定年初步研究 [J]. *冰川冻土*, 2016, 38(5): 1281-1291.]
- [13] Zhang W, Chai L, Evans I S, et al. Geomorphic features of Quaternary glaciation in the Taniantaweng Mountain, on the southeastern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(2): 256-274.
- [14] Nishiizumi K, Imamura M, Caffee M W, et al. Absolute calibration of ^{10}Be AMS standards [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 258(2): 403-413.
- [15] 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.
- [16] 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(3): 174-195.
- [17] Chmeleff J, Blanckenburg F V, Kossert K, et al. Determination of the ^{10}Be half-life by multicollector ICP-MS and liquid scintillation counting [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2010, 268(2): 192-199.
- [18] Stone J O. Air pressure and cosmogenic isotope production [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2000, 105(B10): 23753-23759.
- [19] Li Yingkui. Determining topographic shielding from digital elevation models for cosmogenic nuclide analysis: a GIS approach and field validation [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 10(3): 355-362.
- [20] Owen L A, Robinson R, Benn D I. Quaternary glaciation of Mount Everest [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 28: 1412-1433.
- [21] 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.
- [22] Chen Y X, Li Y K, Wang Y Y, 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.
- [23] Heyman J. Paleoglaciation of the Tibetan Plateau and surrounding mountains based on exposure ages and ELA depression estimates [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 91: 30-41.
- [24] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS international Chronostratigraphic Chart [J]. *Episodes*, 2013, 36(3): 199-204.
- [25] Röthlisberger F, Geyh M A. Glacier variations in Himalayas and Karakoram [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1986, 4(8): 333-344. [诺特里斯伯格 F, 格依 M A. 喜马拉雅山和喀喇昆仑山冰川的变化 [J]. *冰川冻土*, 1986, 4(8):

- 333-344.]
- [26] Zhou S Z, Chen F H, Pan B T, et al. Environmental change during the Holocene in western China on a millennial timescale [J]. *Holocene*, 1991, 1(2): 151-156.
- [27] 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.]
- [28] 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.
- [29] Mayewski P A, Rohling E E, Stager J C, et al. Holocene climate variability [J]. *Quaternary Research*, 2004, 62 (3) : 243-255.
- [30] Lasserre C, Gaudemer Y, Tapponnier P, et al. Fast late Pleistocene slip rate on the Leng Long Ling segment of the Haiyuan fault, Qinghai, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107: 2276-2291.
- [31] Owen L A, Finkel R C, Ma Haizhou, et al. Timing and style of Late Quaternary glaciation in northeastern Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2003, 115(11): 1356-1364.
- [32] Liu B B, Cui Z J, Peng X, et al. Using ¹⁰Be exposure dating to constrain glacial advances during the late glacial and Holocene on Mount Xuebaoding, eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2018, 90: 348-359.
- [33] 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 radio nuclide surface exposure dating[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(12/13): 1391-1411.
- [34] Kong P, Na C G, Fink D, et al. Moraine dam related to late Quaternary glaciation in the Yulong Mountains, southwest China, and impacts on the Jinsha River [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28: 3224-3235.
- [35] Liu J H, Yi C L, Li Y K, et al. Glacial fluctuations around the Karola Pass, eastern Lhagoi Kangri Range, since the Last Glacial Maximum [JOL]. *Journal of Quaternary Science*, 2017, 32(4) [2022-01-12]. <https://doi.org/10.1002/jqs.2946>.
- [36] Hu G, Yi C L, Zhang J F, et al. Luminescence dating of glacial deposits near the eastern Himalayan syntaxis using different grain-size fractions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 124: 124-144.
- [37] Zheng Benxing, Ma Qiuhua. A study on the geomorphological characteristics and glaciations in Paleo-Daocheng Ice Cap, western Sichuan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(1): 23-32. [郑本兴, 马秋华. 川西稻城古冰帽的地貌特征与冰期探讨[J]. *冰川冻土*, 1995, 17(1): 23-32.]
- [38] 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.
- [39] Thompson L G, Davis M E, Thompson E M, et al. Tropical ice core records: evidence for asynchronous glaciation on Milankovitch timescales [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2005, 20(7/8): 723-733.
- [40] Tang Lingyu, Shen Caiming, Liu K B, et al. New high-resolution pollen records from two lakes in Xizang (Tibet) [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1999, 41(8): 896-902. [唐领余, 沈才明, 廖淦标, 等. 西藏两个小湖高分辨率的花粉记录[J]. *植物学报*, 1999, 41(8): 896-902.]
- [41] Solomina O N, Bradley R S, Hodgson D A, et al. Holocene glacier fluctuations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 111: 9-34.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Ou Xianjiao, Zhou Shangzhe, Lai Zhongping, et al. Discussions on Quaternary glaciations and their climatic responding in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(1): 12-28. [欧先交, 周尚哲, 赖忠平, 等. 青藏高原第四纪冰川作用及其气候响应的讨论[J]. *第四纪研究*, 2015, 35(1): 12-28.]

Study on early-mid Holocene glacial advance events in the Taniantaweng Mountains, southeastern Qinghai-Tibet Plateau

CHAI Le^{1,2}, ZHANG Wei³, LIU Liang³, MA Ruifeng³, TANG Qianyu³,
LI Yapeng³, QIAO Jingru³

(1. Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: Taniantaweng Mountains (30°45'~30°11' N, 96°30'~97°30' E) is situated towards the west of the Hengduan Mountains and lies in the transition zone of the southeastern Qinghai-Tibet Plateau (QTP) and the Yunnan-Guizhou Plateau (YGP). During the Quaternary period, multiple glaciations occurred on the planation surface of the middle section of Taniantaweng Mountains; hence, it contains numerous typical glacial erosional and depositional landforms. The Quaternary glaciers in this area are marine glaciers, maintained by precipitation

brought by the South Asian monsoon. Thus, the advances and retreats of these Quaternary glaciers directly reflect the fluctuations of the South Asian monsoon and are highly important for Quaternary glacial research. The Qinggulong Valley is about 7 km long and possesses numerous groups of preserved moraines in clear and complete formations. Moraine QM3 was distributed within an altitude range of 4 600 to 5 250 m, and extended from upstream to downstream for approximately 7 km. ESR and OSL dating results reveal that these moraines were formed during the LGM and correspond to MIS 2. Moraine QM2 was preserved at altitudes between 5 290 and 5 175 m in the cirque, displayed a greyish-yellow colour and an arcuate distribution and was recorded lying across the cirque mouth. Moraine QM1 was distributed 5 360~5 270 m, and massive granite debris were scattered on the surface. Here, we investigated the QM2 moraine history of the Qinggulong Valley using cosmogenic ^{10}Be surface exposure dating techniques. The three samples for QM2 yielded ages of (6.13 ± 0.37) , (8.83 ± 0.53) and (8.37 ± 0.50) ka, and we assigned an age range of 8.83 to 6.13 ka to this moraine, indicating a glacial event during the early-mid Holocene. In order to make regional comparisons we recalculated the ^{10}Be ages for surrounding mountains using data compiled from previously published literature. Combined with other dating results (OSL and ^{14}C), we suggest that the early-mid Holocene occurred on the eastern and southeastern QTP. Air temperature and precipitation are two major factors affecting glacier change. The water vapor carried by the southwest monsoon, which influences the development of glaciers in Taniantaweng Mountains, is obstructed by high terrain barriers above 6 000 m. Thus, the precipitation reaching the Taniantaweng Mountains is significantly reduced, resulting in much smaller glaciers compared with those in glaciated areas with abundant precipitation, such as the southeastern QTP. Pollen from cores of Lake Rencuo and Hidden in southeast Tibet demonstrated that the mean air temperature in January was likely 2~3 °C higher than present, and mean annual precipitation during the 8~6 ka BP was 100 mm greater than the current values. At high altitudes abundant precipitation fall as snow, which led to positive glacial mass balance and glacial advance. The glacial advance in Taniantaweng Mountains during the early-mid Holocene may have resulted from an increase in precipitation from the southwest monsoon. At present, the geochronological evidence of the early-mid Holocene glacial advance event in the eastern QTP is primarily based on TCN, OSL, and radioactive ^{14}C . The dating technology used in the current study is limited by the complex geological and geomorphic processes that have occurred in this region, and by the particularities of glacial deposition in mountain areas. Furthermore, the resolution of the glacial geomorphic age since the Holocene is insufficiently high, leading to large uncertainties in the chronological data. There are also few geochronology data available to support the glacial advance in this period. Therefore, in this study, we aim to provide an initial chronological framework and preliminary results for the early Holocene glacial advance. More accurate glacial geochronology data are required to further understand the early-mid Holocene glacial advance in the QTP. This study provides a new basis for investigating the dynamic relationships amongst glaciations, changes in the South Asian monsoon, and global climate change.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; Taniantaweng Mountains; early-mid Holocene; cosmogenic nuclides

(责任编辑: 赵井东)