



论文

树轮揭示的藏东南米堆冰川小冰期以来的进退历史

徐鹏^{①④}, 朱海峰^{②*}, 邵雪梅^①, 尹志勇^③

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

③ Department of Marine Science and Environmental Studies, University of San Diego, San Diego CA 92110, USA;

④ 中国科学院研究生院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: zhuhf@itpcas.ac.cn

收稿日期: 2011-05-23; 接受日期: 2011-08-02

国家自然科学基金(批准号: 40801033, 41130529)资助

摘要 利用冰川前端冰碛垄上的树轮年代学证据, 对冰碛垄形成年代进行定年, 重建了青藏高原东南部米堆冰川小冰期以来的进退波动历史. 在对冰碛垄进行定年时, 我们对树龄进行了髓心年龄估计和取样高度年龄校正, 并考虑了先锋树种的定居期. 最老树木的年龄显示, 小冰期以来, 米堆冰川至少经历了四次明显的冰川进退波动, 分别为 AD 1767 (TM1-LM1), AD 1875 (LM2), AD 1924 (LTM-LM3) 和 AD 1964 (TM2), 其中 AD 1767 (TM1-LM1) 对应小冰期冰盛期, 冰川前进达到最大规模. 米堆冰川波动历史与中国和北半球其他地区冰川的波动呈现较高的空间一致性. 与藏东南地区夏季温度变化重建的对比表明, 百年时间尺度上米堆冰川进退波动与温度冷暖变化趋势相对应, 在年代际尺度上, 冰川进退波动与温度变化存在约 8 a 的滞后期.

关键词青藏高原
冰川进退
树木年轮
小冰期
气候变化
冰碛垄

青藏高原因海拔高、气候严寒, 承受南亚季风、西风环流提供的降水物质, 成为地球中低纬度地区山岳冰川的发育中心之一^[1]. 近几十年来, 随着气候变暖, 青藏高原地区的冰川退缩加剧, 如岗日嘎布山地区有些冰川末端在一年内退缩了 15~19 m^[2-6]. 冰川的剧烈消融, 不仅对依赖于高山地区冰川融水补给的江河流域地区的水资源供给安全构成威胁, 还可能导致冰川末端冰碛湖的溃堤, 形成泥石流等自然灾害^[7]. 研究青藏高原地区冰川进退变化, 将有助于预估未来气候变暖对青藏高原冰川水资源的影响, 并为预防自然灾害提供科学依据. 然而, 关于该地区

冰川变化的观测数据还特别短, 而且也比较少, 这在很大程度上限制了对长时间尺度上冰川进退及其对气候变化响应关系的认识^[2,6,8-10]. 因此, 有必要对过去的冰川进退历史进行重建.

树轮年代学方法作为一种精确的定年手段, 近些年来在全球许多地区被用于重建过去的冰川进退历史, 如加拿大落基山地区^[11-16]、阿拉斯加地区^[17-20]、南美安第斯山地区^[21-26]和欧洲阿尔卑斯山地区^[27]等. 青藏高原东南部地区发育大量温性冰川, 覆盖面积约占中国冰川总面积的 22.2%^[6]. 其中许多冰川的冰舌末端可以延伸到森林之中, 如念青唐古拉山的冰

川末端平均海拔为 3755 m, 最低甚至可达海拔 2530 m^[28,29]. 冰川前进时会对其前进路径上的树木造成伤害甚至导致树木死亡, 而冰川退缩后, 树木又会生长到退缩后的遗迹上. 这些树木为利用树木年轮重建该地区过去冰川进退历史提供了可能. 自 20 世纪 80 年代以来, 藏东南地区就陆续开展了利用树轮测定冰碛垄年龄的研究^[28,30], 展示了该地区开展树轮冰川学研究的潜力(图 1). 但这些研究^[28,30]没有充分考虑采样高度年龄(树木从基部生长到采样高度时所需要的时间)^[31~33]以及定居期(从冰碛垄形成, 冰川开始后退到其上第一棵树成功萌芽生长所需要的时间)^[26,34]等的影响.

本研究的目的是利用树木年轮对青藏高原东南部米堆冰川的终碛垄和侧碛垄形成的年代进行定年, 进而重建该冰川过去几百年的进退历史. 在对冰碛垄进行定年时, 我们对树龄进行了髓心年龄估计和取样高度年龄校正, 并考虑了先锋树种的定居期. 本研究的结果将为理解该地区冰川进退变化提供长时间尺度的测年数据, 有助于提高对冰川变化-气候变化关系的认识.

1 研究区概况

研究区位于青藏高原东南部岗日嘎布山区, 地处喜马拉雅山、念青唐古拉山东段和横断山脉的交接处. 该地区山峰海拔可高达 6000 m, 河谷下降到海拔 2000~3000 m, 属典型的高山深谷地貌. 自印度洋而来的湿润气流沿澜沧江、怒江和雅鲁藏布江下游的谷地深入, 为该地区带来丰沛的降水. 根据波密气象站(29°52'N, 95°46'E, 海拔 2736 m)记录, 该地区多年(1961~2008 年)平均降水量为 835 mm, 74.9%集中在夏半年(4~9 月). 年均温为 8.7℃, 最冷月 1 月的平均温度为 0.2℃, 最热月 7 月的平均温度为 16.6℃(图 2). 由于有利的地形和水热条件, 该地区发育有大规模的现代温性冰川^[35]. 冰川的积累和消融活动主要同时发生在夏季^[36]. 由于补给和消融水平都比较高, 冰川具有较快的运动速度(年平均运动 100~300 m), 地貌营力作用强烈. 现代冰川的末端一般有 2~3 道新的终碛和侧碛, 新的终侧碛之间许多地方有堵塞湖泊发育^[35]. 该地区常见的树种主要有急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)、林芝云杉(*Picea likiangensis* var.

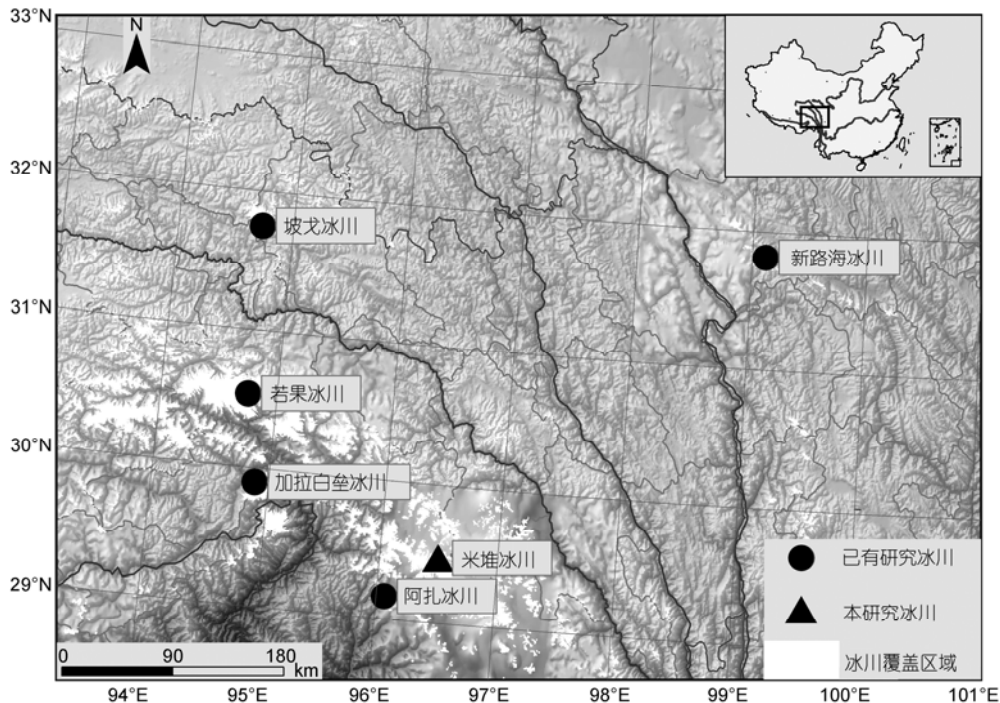


图 1 藏东南地区小冰期以来冰川进退研究样点分布图

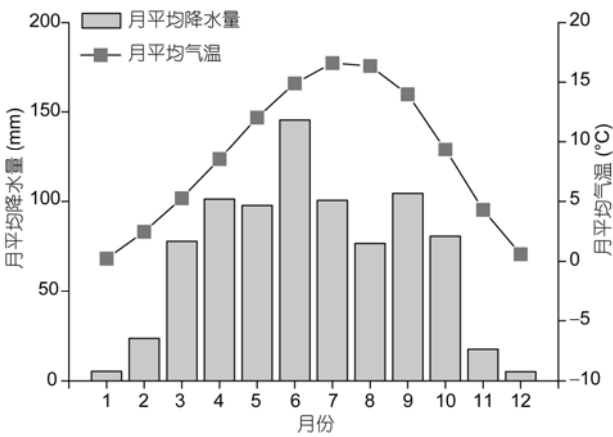


图2 藏东南波密地区平均气候状况(1961~2008年)

linzhiensis)和川西云杉(*Picea likiangensis* var. *balfouriana*)等,在海拔较低的河谷地区也有多种杨树分布,如长序杨(*Populus pseudoglauca*)和山杨(*Populus davidiana*)等^[37].

2 资料与方法

2.1 样本采集与处理

研究地点位于青藏高原东南部波密县境内的米堆冰川谷地(29.47°N, 96.50°E, 图1, 3). 由于强烈的冰川地貌营力作用,谷地中发育有较好的冰川地貌. 我们的取样点位于米堆冰川末端的2道终碛垄(TM1, TM2),东侧的3道侧碛垄(LM1, LM2和LM3),和西侧侧碛垄的末端(LTM). 取样点森林群落郁闭度约在0.2~0.6之间,没有老的死树和倒伏木,据此我们可以初步判定为自然原生演替群落.

我们用生长锥对样点的两个优势树种,长序杨(*Populus pseudoglauca*)和川西云杉(*Picea likiangensis* var. *balfouriana*),钻取了树轮样芯. 为了尽量采集到最老的树,我们在不同的冰碛垄上进行大复本量采样. 最外终碛垄TM1和最外侧碛垄LM1的垄体比较大,在采样过程中根据冰碛垄顶部和内外坡分别进行采样. 其中TM1的外坡比较大(长宽分别约为500和300 m),我们又将其分成了两个取样带TM1-1和TM1-2,而其他的冰碛垄垄体相对比较小,上面生长的树木也比较少,因此作为一个整体样带进行采样,没有细分(表1和图3). 树轮样本带回实验室后,按照树轮样本处理的基本程序^[38],对样芯进行了固定、打

磨、交叉定年和轮宽量测,并利用COFECHA程序对定年结果进行了验证^[39].

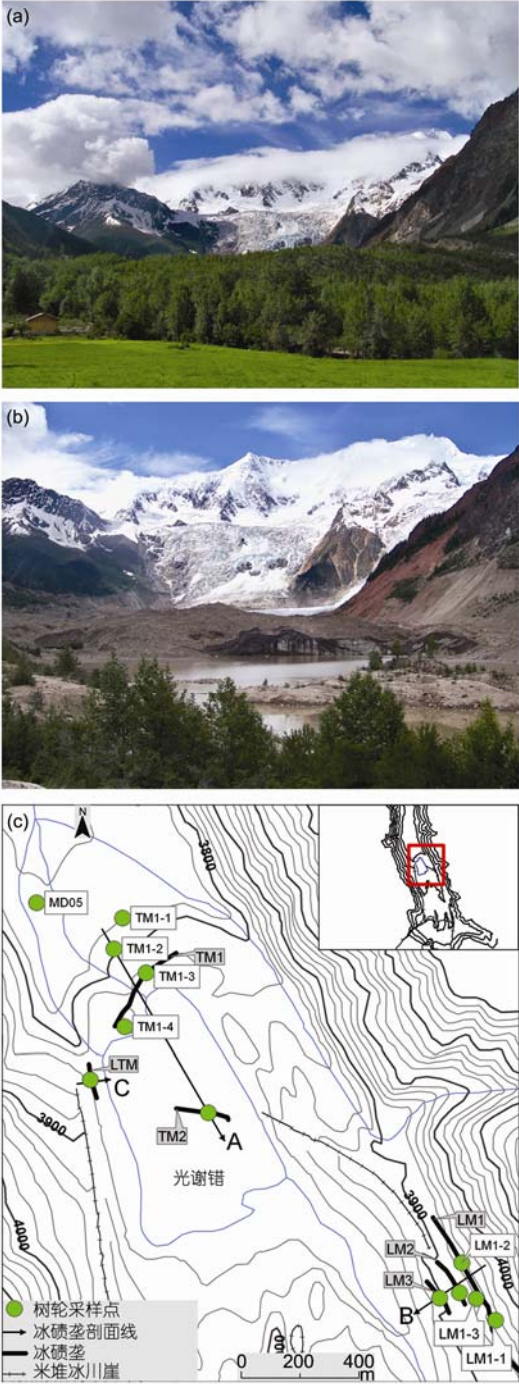


图3 米堆冰川前缘景观图

(a) 终碛垄TM1; (b) TM1内侧, TM2和冰舌末端; (c) 树轮采样点分布图. 其中A, B和C分别为垂直于冰碛垄走向的剖面线. 等高线底图来自根据1980年航拍照片绘制的1:5万地形图

表 1 米堆冰川区树轮采样记录

代码	北纬	东经	海拔(m)	长序杨		川西云杉	
				样本量(芯/树)	最老基部年龄	样本量(芯/树)	最老基部年龄
TM1-1	29.473°	96.498°	3776	48/31	1770	15/13	1909
TM1-2	29.472°	96.498°	3847	67/41	1875	4/4	1915
TM1-3	29.472°	96.499°	3844	30/13	1910	5/4	1933
TM1-4	29.470°	96.498°	3832	43/20	1945	3/1	1963
TM2	29.468°	96.501°	3824	33/12	1967		
LM1-1	29.461°	96.512°	3952			22/13	1795
LM1-2	29.464°	96.511°	3941			13/11	1805
LM1-3	29.463°	96.510°	3941			7/7	1813
LM2	29.462°	96.510°	3936	5/3	1878	10/9	1897
LM3	29.462°	96.509°	3900	11/10	1935	6/6	1944
LTM	29.468°	96.497°	3860	19/9	1927		
MD05	29.474°	96.495°	3772	45/30	1991	2/2	2000

2.2 样本髓心年代、取样高度年龄和定居期的估计

由于生长锥取样很难达到树木的正心，我们对没有正心的树轮样本的髓心年代进行了估算。首先，我们利用样本最内侧年轮弧的弦长和相应的弦高估算内侧年轮弧距髓心的距离^[40,41]。由于树轮样本具有明显的轮弧，我们用内侧 5 个年轮的平均宽度值作为参照，得到样本距正心的缺失轮年数。最终，树木的髓心年代由内轮的年代与估计的缺失年数做差值得到。

树木的年龄可以通过查数采自基部的样本的年轮数来确定^[31]。但由于树的枝干、障碍物、以及生长锥手杆(旋转半径通常大于 20 cm)等的影响，很难用生长锥从树木的基部取样。所以取样时，我们在树的不同高度分别采集 2~3 根芯，利用不同样芯采样位置高度的差值和相应的髓心年代差值来估计树木的高生长速度，然后用取样高度除以高生长速度估计树从基部长到取样高度所需要的时间，对取样高度处髓心年代减去这个时间后，可以获得树木基部年龄的估计。

由于受气候、土壤、种子传播等因素的影响，第一棵树一般在冰碛垄形成一段时间(定居期)以后才会生长到冰碛垄上并成功存活下来^[34]。要通过最老树木的年龄推断冰碛垄的形成的年代，需要先确定先锋树种的定居期。本文根据冰湖溃决法^[26]估计米堆冰川区树木的定居期。米堆冰川前端的冰碛湖(光谢错)曾于 1988 年 7 月 15 日发生溃决^[42]。我们对溃决后出露冰碛物和泄洪道中的杨树进行了采样(MD05)。我们发现两处最老活树基部的髓心年代恰

好均为 1991 年。据此，我们推测杨树的定居时间为 3 a。此外，我们在泄洪道中没有发现较大的云杉，仅有的散布几棵云杉幼苗，查数树枝层数和基部年轮数，确定最大的云杉幼苗开始生长于 2000 年。据此，我们推测云杉的定居期为 12 a。

3 结果和讨论

3.1 取样高度年龄估计

图 4 为不同髓心年龄的杨树和云杉的高生长速度散点分布图。可以看出，大致在 1950 年左右，杨树高生长速度发生突变，髓心年代在 1950 年后的杨树平均高生长速度(17.9 cm a⁻¹)明显高于前一段时期的速度(4.9 cm a⁻¹)。这表明对于不同时期萌发的杨树，

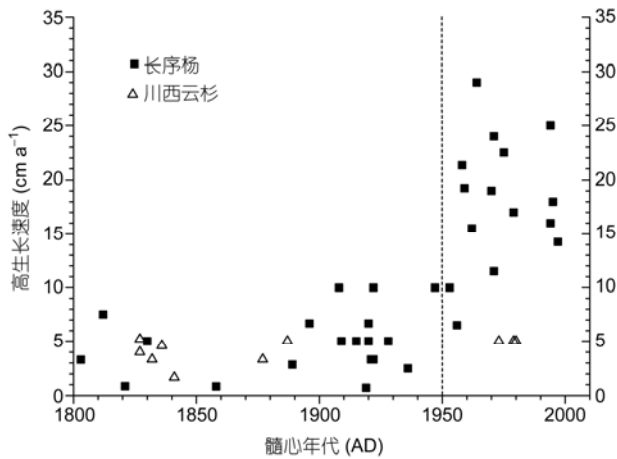


图 4 长序杨和川西云杉高生长速度散点图

应该采用不同的高生长速度进行取样高度年龄估计. 云杉的高生长速度随时间变化比较稳定, 并没有明显的突变现象, 全时段平均高生长速度为 4.2 cm a^{-1} . 这可能与云杉树种本身生理机制及样本量比较小有关系.

3.2 不同冰碛垄上树木基部年龄分布

通过对每个样带内样本的髓心年代估计, 取样高度年龄校正, 我们得到了较老树木的基部髓心年

代(图 5). 从图上可以看出, 沿冰川后退方向, 各样带内最老树年龄依次递减. 终碛垄 TM1 最外侧样带杨树最早于 1770 年开始生长, 其外坡另一条样带最早开始于 1875 年, 而垄顶和内侧分别为 1910 年和 1945 年. 终碛垄 TM2 上最老树开始于 1967 年. 侧碛垄上的树龄结构同样如此, LM1 外侧最老云杉开始生长于 1795 年, 垄顶为 1805 年, 而内侧为 1813 年. 往冰川方向, LM2 的最老云杉开始生长于 1897 年, LM3 为 1944 年. 而 LM2 上最老杨树开始于 1878 年, LM3 上

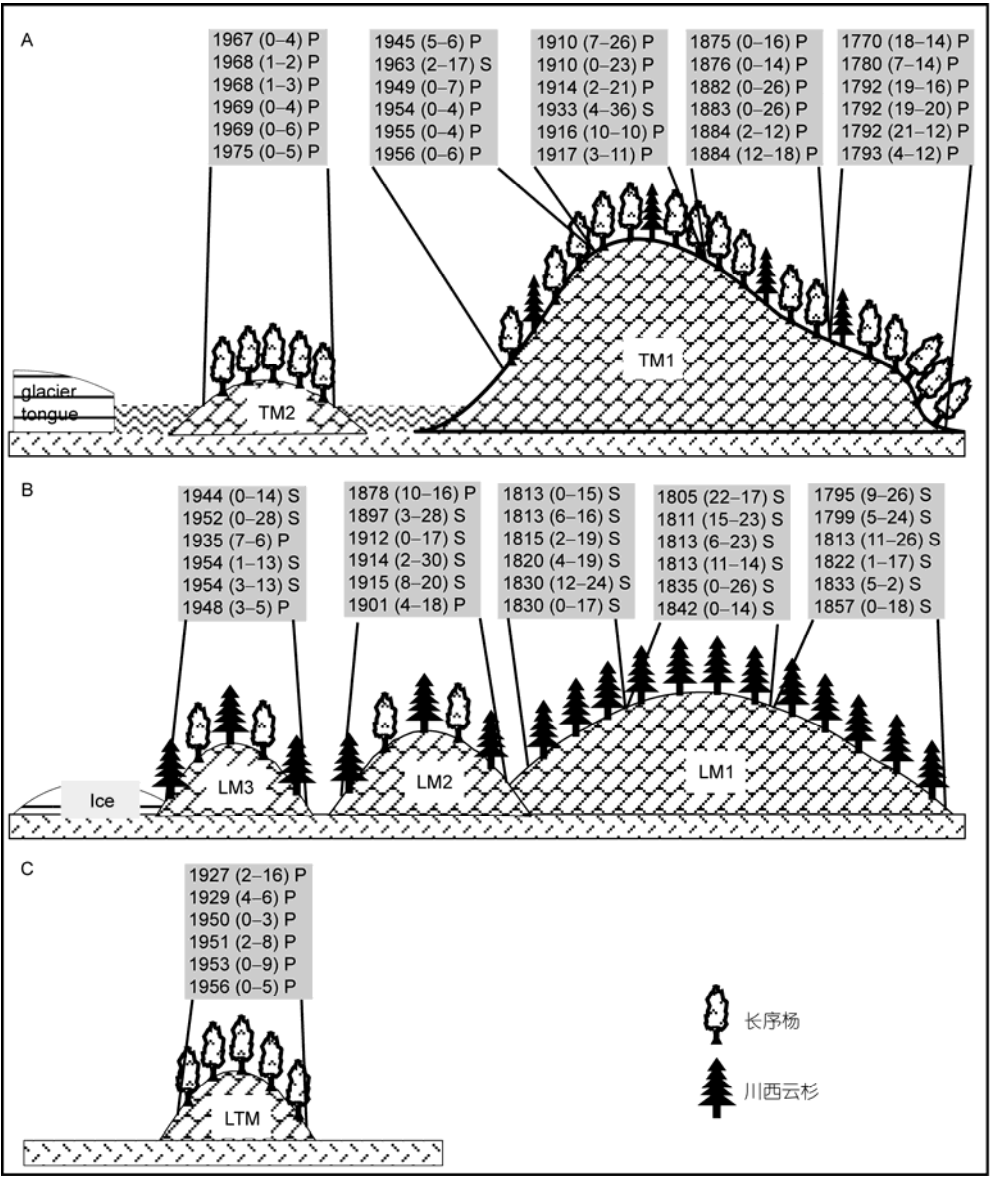


图 5 米堆冰川末端冰碛垄上最老活树基部髓心年代分布的剖面图

其中 A, B, C 为分别对应图 3 中相应剖面线的冰碛垄剖面示意图. 括弧内为距髓心缺失轮数估计-取样高度年龄估计. P 代表杨树; S 代表云杉

为 1935 年. 这些递减表明了冰川退缩后树木在冰碛垄上的原生演替渐变过程. 因此, 这些最老树的树龄可以用来推测冰碛垄形成的最晚时间.

3.3 冰川进退历史重建

对这些树的树龄进行相应的定居期校准后, 我们得到不同冰碛垄形成的最晚时间分别为 AD 1767(TM1), 1964(TM2), 1783(LM1), 1875(LM2), 1932(LM3)和 1924 年(LTM)(图 5). TM1 和 LM1 是环列分布冰碛垄中规模最大的且位于冰川末端最外侧位置, 形成年代基本一致, 表明二者是共生关系, 为小冰期以来米堆冰川最大规模的一次前进事件(小冰期冰盛期). 侧碛垄 LM2 紧邻最外侧碛垄 LM1, 形成年代早于 AD 1875. 与 LM2 相对应的终碛垄难以识别. 但从 TM1 的树龄结构看, 垄外坡靠垄顶样带的最老树可到 AD 1875, 与 LM2 最老树年龄相当, 但与 TM1 自身最外侧样带最老树基部髓心年代 AD 1770 相差近 100 a. 而 TM1 垄顶样带的最老树仅到 AD 1910, 比 LM1 垄顶样带的最老树晚了 100 多年. 这表明与 LM2 同期形成的终碛垄很可能和 AD 1767 以前形成的终碛垄叠加在一起, 形成了 TM1. 侧碛垄 LM3 和 LTM 分列冰川谷地东西两侧, 位于冰川末端环列侧碛垄的最内侧, 测年结果相差 8 a, 应属于同一次冰川进退的结果. 由此可见, 小冰期以来, 米堆冰川至少经历了四次明显的冰川进退波动. 每次波动中冰川由前进或稳定状态开始转变为后退的最晚时间分别约为 AD 1767 (TM1-LM1), AD 1875(LM2), AD 1924(LTM-LM3)和 AD 1964(TM2).

3.4 米堆冰川与其他地区冰川进退历史的对比

我们将米堆冰川的进退历史与中国及邻近地区冰川进退波动进行了对比. 在青藏高原东南部(图 1, 表 2), 冰碛垄上最老树的年龄显示, 新路海冰川和加拉白垒冰川分别在约 1777 和 1760 年开始退缩^[30], 这与米堆冰川 1767 年的退缩一致. 米堆冰川在 1875 年

的波动在新路海冰川和坡戈冰川的进退历史中也能找到相应的波动. 新路海冰川、坡戈冰川、阿扎冰川以及海螺沟冰川^[43]在 20 世纪初曾发生过较大的波动, 与米堆冰川 1924 年的波动一致. 此外, 贡嘎山海螺沟冰川侧碛垄上朽木 ^{14}C 测年^[44]显示, 在约(150±60) a BP 存在一次冰进事件, 但由于测年误差范围较大, 无法确定与米堆冰川的哪次波动事件相对应. 在天山地区, 地衣测年证据显示乌鲁木齐河源 1 号冰川终碛垄形成于 AD (1777±20) a 和 AD (1871±20) a^[45], 与我们所得到的米堆冰川前两次冰川进退事件相对应. 喜马拉雅山西部及周边地区冰川的波动记录也显示 AD 1860~1870 是冰川由前进转为后退的过渡时期, 而在 AD 1890~1910 期间有大量冰川出现再次短暂前进, 随后 AD 1910~1920 时期大部分冰川出现短暂稳定期并重新进入后退状态^[46,47]. 米堆冰川 1964 年的这次冰川进退事件在若果冰川和阿扎冰川^[28]均有体现. 米堆冰川与中国及邻近地区冰川进退事件的对应表明, 青藏高原及其邻近地区冰川波动具有较好的空间一致性.

但是, 新路海冰川、坡戈冰川、若果冰川和阿扎冰川在 19 世纪初的冰川进退波动事件在我们的研究中没有体现. 同样, 没有一条冰川的年代学证据能完整记录前述的五次进退事件. 如加拉白垒冰川只有一次 1760 年附近的波动证据, 新路海冰川的证据相对比较完整, 显示了四次冰川进退事件, 但是却没有记录下最近的一次冰川进退事件. 这一方面可能是由于这些事件所形成的冰碛垄上缺乏年代学证据; 另一方面, 不同类型、地形条件下的冰川对气候变化响应的过程和程度不同, 有的冰川没有形成明显冰碛垄, 而有的是后面的前进破坏了前期的冰川活动形成的冰碛垄, 这使得我们无法找到前期的冰碛遗迹. 因此, 要更好的理解青藏高原小冰期以来冰川进退的时空特征, 需要对更大空间范围的冰川, 开展多种年代学证据, 如树轮、地衣等冰川进退历史的综合重建研究.

我们还将米堆冰川进退历史和北半球其他地区

表 2 藏东南地区小冰期以来冰川进退历史已有研究结果^{a)}

时间段	新路海冰川 ^[30]	坡戈冰川 ^[28]	若果冰川 ^[28]	加拉白垒冰川 ^[30]	阿扎冰川 ^[28]	米堆冰川
1750~1800	1777~1787			1760		1767~1775
1800~1850	1807~1820	1809	1822		1813~1852	
1850~1900	1885	1857~1888				1875
1900~1950	1907~1920	1920			1931	1924
1950~2000			1950s		1960	1964

a) 除坡戈冰川波动历史依据地衣测年外, 其他冰川波动历史均基于树轮年代学定年

的冰川进退进行了对比。加拿大落基山地区大量海洋型冰川的树轮和地衣定年证据^[13,14,48]显示,该地区最近五次冰川进退事件主要分别发生在 AD 1767~1784, 1821~1837, 1871~1900, 1915~1928 和 1942~1946。同时,北美阿拉斯加地区树轮证据也记录下了发生在 AD 1777, 1807~1818, 1874~1894 和 1912~1918 的冰川波动事件。二者均与米堆冰川地区冰川的波动历史在十年尺度上存在很高的一致性。另外,欧洲瑞士中南部阿尔卑斯山地区的年代学证据和历史文献记载^[49]也显示,该地区冰川经历了 AD 1778~1779 和 1855~1856 两次波动事件,这与米堆冰川地区相应的冰川波动事件在十年尺度上基本同步。

3.5 冰川进退和温度变化重建的对比

以前的树轮温度重建和冰川波动对比^[50,51]发现

年代际尺度上青藏高原地区冰川进退与温度变化之间具有较好的对应关系。为了了解年代际-百年时间尺度上米堆冰川进退和温度变化的关系,我们将重建的米堆冰川进退活动与研究区的温度变化重建进行了对比(图 6)。对比所用的温度资料为波密-林芝地区 8 月最低温度重建^[52]。该序列基于米堆冰川地区和附近然乌湖地区森林上限的树木年轮宽度资料,虽然仅为 8 月最低温度重建,但对研究区夏季(6~8 月)平均温度也有较好的指示,二者原始序列的相关为 0.54, 11 a 滑动后升高至 0.95。该序列与林芝夏季(6~8 月)平均气温重建序列^[53]也表现出较为一致的年代际变化。

在百年时间尺度上,该地区在 1500~1650 年期间呈明显的降温趋势(图 6(a)),之后持续低温直到约 18 世纪中叶,这与米堆冰川 1767 年的小冰期最大规模

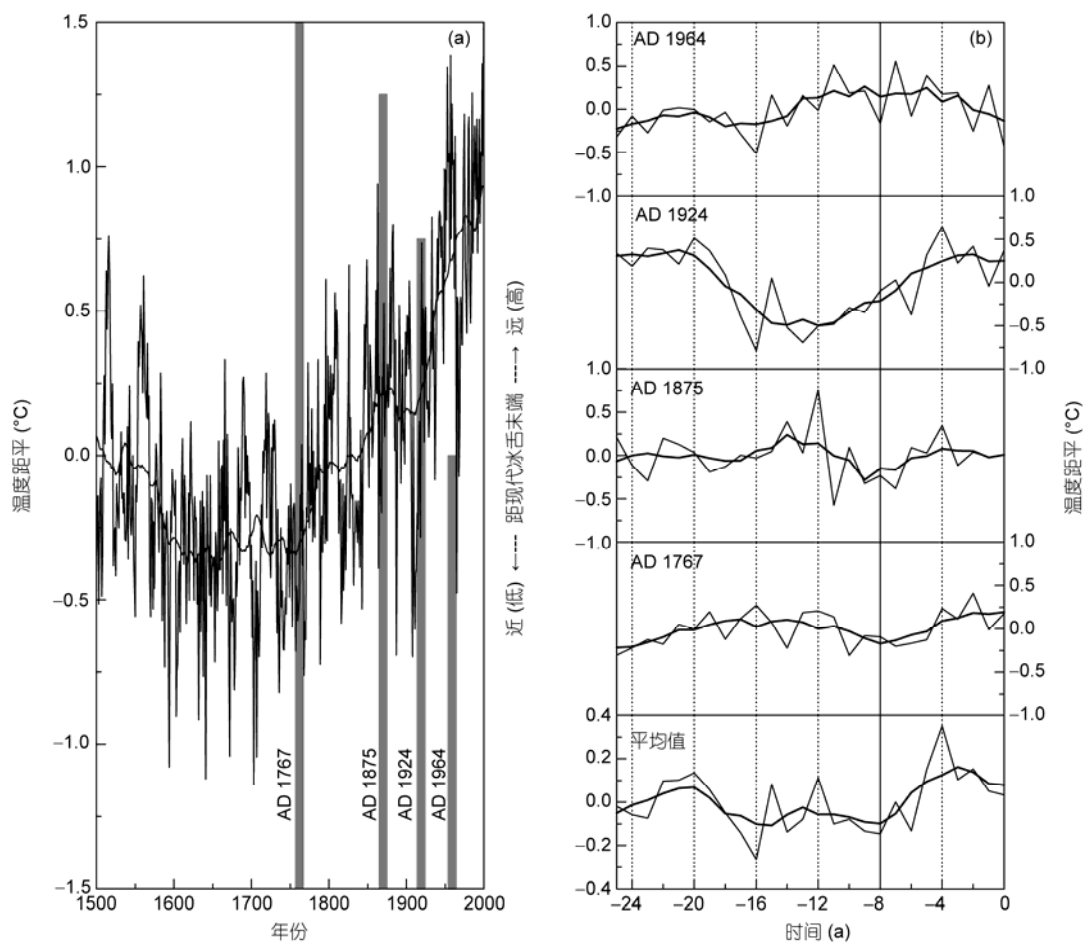


图 6 米堆冰川波动历史与夏季温度变化重建^[52]的对比

(a) 灰色柱状图表示历次冰川波动距离现代冰舌末端的远近或高低(仅为示意), 细实线为 8 月最低温度重建距平值, 粗实线为其 50 a 滑动平均值; (b) 4 次冰川波动前 25 a 温度的距平值及它们的平均值, 粗实线为它们的 5 a 滑动平均

相一致. 之后, 米堆冰川虽然有几次进退波动, 但总体呈退缩趋势, 对应于 18 世纪中叶以后温度的持续上升趋势. 由此可见, 长时间尺度上的冰川进退波动可能与气温变化有关. 从 4 次冰川进退波动前 25 a 平均温度距平值看(图 6(b)), 在 8 a 左右气温由低升高, 这表明在年代际尺度上米堆冰川进退波动与冷暖变化之间总体上存在约 8 a 的滞后时间. 这一滞后时间小于王宁练等^[54]根据冰川物质平衡推断的北半球山地冰川和气候变化之间的 12~13 a 滞后, 可能是由于米堆冰川规模较小(长度<5 km), 对气候变化更为敏感所致. 但从具体的每次进退波动与温度变化看, 滞后时间存在一定差异. 例如, 1924 年的波动对应于约 12 a 前的冷暖变化, 而 1964 年波动的前 8 a 则没有明显的升温. 这种差异可能与气温变化的幅度, 降水量的变化^[55]有关, 有待进一步研究.

4 结论

本文利用冰川前端冰碛垄上的树轮年代学证据, 对冰碛垄形成年代进行定年, 重建了青藏高原东南部

米堆冰川小冰期以来的进退波动历史. 证据显示, 小冰期以来, 米堆冰川至少经历了四次明显的冰川进退波动, 分别为 AD 1767(TM1-LM1), AD 1875(LM2), AD 1924(LTM-LM3)和 AD 1964(TM2), 其中 AD 1767(TM1-LM1)为小冰期冰盛期, 冰川前进达到最大规模. 米堆冰川的这四次波动与中国及北半球其他地区冰川的波动历史具有较好的对应, 这不仅验证了本研究重建结果的可靠性, 还表明米堆冰川波动与北半球许多地区的冰川进退具有很好的空间一致性. 冰川进退波动与气温变化的对比表明, 百年时间尺度上米堆冰川进退波动与温度变化可能具有比较密切的关系, 在年代际尺度上, 冰川进退波动与温度变化具有较好的对应, 冰川进退对温度变化总体上存在约 8 a 的滞后期. 由于有些冰川活动的遗迹没有保存下来或者缺乏年代学证据, 要了解青藏高原地区小冰期以来冰川进退变化的时空特征, 需要对更多的冰川, 开展多种年代学证据, 如树轮、地衣等的冰碛垄测年研究. 此外, 还要加强冰川分布区降水量变化的重建研究, 以综合分析冰川进退与气温、降水量变化之间的关系^[55].

致谢 三位评审专家对论文提出建设性的修改意见, 波密县旅游局和米堆冰川风景区管理处对野外采样工作给予大力支持, 李田育、张永、徐国保、王文志、李永杰等参加野外取样, 在此一并表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 秦大河. 青藏高原的冰川与生态环境. 北京: 中国藏学出版社, 1999
- 2 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩. 科学通报, 2008, 53: 2091–2095
- 3 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34: 535–543
- 4 Su Z, Shi Y. Response of monsoonal temperate glaciers to global warming since the Little Ice Age. *Quat Int*, 2002, 97–98: 123–131
- 5 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化. 冰川冻土, 2004, 26: 517–522
- 6 苏珍, 施雅风. 小冰期以来中国季风温冰川对全球变暖的响应. 冰川冻土, 2000, 22: 223–229
- 7 郑本兴, 马秋华. 贡嘎山区全新世冰川变化与泥石流发育的关系. 山地研究, 1994, 12: 1–8
- 8 刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 20 世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化. 冰川冻土, 2005, 27: 55–63
- 9 施雅风, 刘时银. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. 科学通报, 2000, 45: 434–438
- 10 易朝路, 崔之久, 熊黑钢. 中国第四纪冰期数值年表初步划分. 第四纪研究, 2005, 25: 609–619
- 11 Luckman B H. Reconstruction of Little Ice Age events in the Canadian Rocky Mountains. *Geographie Physique Et Quaternaire*, 1986, 40: 17–28
- 12 Smith D J, Mccarthy D P, Colenutt M E. Little Ice Age glacial activity in Peter Lougheed and Elk Lakes provincial parks, Canadian Rocky Mountains. *Can J Earth Sci*, 1995, 32: 579–589
- 13 Luckman B H. The Little Ice Age in the Canadian Rockies. *Geomorphology*, 2000, 32: 357–384
- 14 Larocque S J, Smith D J. Little Ice Age glacial activity in the Mt. Waddington area, British Columbia Coast Mountains, Canada. *Can J Earth Sci*, 2003, 40: 1413–1436
- 15 Tomkins J D, Lamoureux S F, Sauchyn D J. Reconstruction of climate and glacial history based on a comparison of varve and tree-ring records from Mirror Lake, Northwest Territories, Canada. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 1426–1441

- 16 Luckman B H. Dendroglaciology at Peyto Glacier, Alberta, Canada. In: Dean J S, Meko D M, Swetnam T W, eds. *Tree Rings, Environment and Humanity*. Tucson: University of Arizona, 1996. 679–688
- 17 Wiles G, Calkin P. Late Holocene high-resolution glacial chronologies and climate, Kenai Mountains, Alaska. *Geol Soc Am Bull*, 1994, 106: 281–303
- 18 Wiles G C, Barclay D J, Calkin P E. Tree-ring-dated 'Little Ice Age' histories of maritime glaciers from western Prince William Sound, Alaska. *Holocene*, 1999, 9: 163–173
- 19 Wiles G C, Post A, Muller E H, et al. Dendrochronology and late Holocene history of Bering Piedmont Glacier, Alaska. *Quat Res*, 1999, 52: 185–195
- 20 Wiles G C, Jacoby G C, Davi N K, et al. Late Holocene glacier fluctuations in the Wrangell Mountains, Alaska. *Geol Soc Am Bull*, 2002, 114: 896–908
- 21 Villalba R, Leiva J, Rubulls S, et al. Climate, tree-ring, and glacial fluctuations in the Rio Frias Valley, Rio Negro, Argentina. *Arct Alp Res*, 1990, 22: 215–232
- 22 Glasser N F, Jansson K N, Harrison S, et al. Geomorphological evidence for variations of the North Patagonian Icefield during the Holocene. *Geomorphology*, 2005, 71: 263–277
- 23 Koch J, Kilian R. 'Little Ice Age' glacier fluctuations, Gran Campo Nevado, southernmost Chile. *Holocene*, 2005, 15: 20–28
- 24 Glasser N F, Jansson K N, Harrison S, et al. The glacial geomorphology and Pleistocene history of South America between 38°S and 56°S. *Quat Sci Rev*, 2008, 27: 365–390
- 25 Masiokas M H, Villalba R, Luckman B H, et al. 20th-century glacier recession and regional hydroclimatic changes in northwestern Patagonia. *Global Planet Change*, 2008, 60: 85–100
- 26 Masiokas M H, Luckman B H, Villalba R, et al. Little Ice Age fluctuations of small glaciers in the Monte Fitz Roy and Lago del Desierto areas, south Patagonian Andes, Argentina. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*, 2009, 281: 351–362
- 27 Holzhauser H, Zumbühl H. Glacier Fluctuations in the Western Swiss and French Alps in the 16th Century. *Clim Change*, 1999, 43: 223–237
- 28 李吉均, 郑本兴, 杨锡金, 等. 西藏冰川. 北京: 科学出版社, 1986
- 29 施雅风, 黄茂恒, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境——现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000
- 30 Bräuning A. Tree-ring evidence of 'Little Ice Age' glacier advances in southern Tibet. *Holocene*, 2006, 16: 369–380
- 31 McCarthy D P, Luckman B H, Kelly P E. Sampling height-age error correction for spruce seedlings in glacial forefields, Canadian Cordillera. *Arct Alp Res*, 1991, 23: 451–455
- 32 Wong C M, Lertzman K P. Errors in estimating tree age: Implications for studies of stand dynamics. *Can J For Res*, 2001, 31: 1262–1271
- 33 Winchester V, Harrison S. Dendrochronology and lichenometry: Colonization, growth rates and dating of geomorphological events on the east side of the North Patagonian Icefield, Chile. *Geomorphology*, 2000, 34: 181–194
- 34 McCarthy D P, Luckman B H. Estimating ecesis for tree-ring dating of moraines: A comparative-study from the Canadian Cordillera. *Arct Alp Res*, 1993, 25: 63–68
- 35 杨逸畴, 李炳元, 尹泽生, 等. 西藏地貌. 北京: 科学出版社, 1983
- 36 Thompson L G, Yao T, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, 2000, 289: 1916–1919
- 37 李文华, 韩裕丰, 谌谟美, 等. 西藏森林. 北京: 科学出版社, 1985
- 38 Stokes M A, Smiley T L. *An Introduction to Tree Ring Dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1968
- 39 Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bull*, 1983, 43: 69–78
- 40 Duncan R P. An evaluation of errors in tree age estimates based on increment cores in Kahikatea (*Dacrycarpus Dacrydioides*). *N Z Nat Sci*, 1989, 16: 31–37
- 41 Rozas V. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: Testing previous and improved methods. *Plant Ecol*, 2003, 167: 193–212
- 42 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议. *山地研究*, 1992, 10: 219–224
- 43 Su Z, Liu S, Wang N, et al. Recent fluctuations of glaciers in the Gongga Mountains. *Ann Glaciol*, 1992, 16: 163–167
- 44 郑本兴, 马秋华. 贡嘎山地区全新世的冰川变化、气候变化与河谷阶地发育. *地理学报*, 1994, 49: 500–508
- 45 陈吉阳. 天山乌鲁木齐河源全新世冰川变化地衣年代学若干问题的初步研究. *中国科学 B 辑*, 1988: 95–104
- 46 Mayewski P, Pregent G, Jeschke P, et al. Himalayan and trans-Himalayan glacier fluctuations and the south Asian monsoon record. *Arct Alp Res*, 1980, 12: 171–182
- 47 Mayewski P, Jeschke P. Himalayan and trans-Himalayan glacier fluctuations since AD 1812. *Arct Alp Res*, 1979, 11: 267–287

- 48 Menounos B, Osborn G, Clague J J, et al. Latest Pleistocene and Holocene glacier fluctuations in western Canada. *Quat Sci Rev*, 2009, 28: 2049–2074
- 49 Holzhauser H, Magny M, Zumbuhl H J. Glacier and lake-level variations in west-central Europe over the last 3500 years. *Holocene*, 2005, 15: 789–801
- 50 Gou X, Chen F, Yang M, et al. A comparison of tree-ring records and glacier variations over the past 700 years, northeastern Tibetan Plateau. *Ann Glaciol*, 2006, 43: 86–90
- 51 Liang E Y, Shao X M, Qin N S. Tree-ring based summer temperature reconstruction for the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *Global Planet Change*, 2008, 61: 313–320
- 52 Zhu H F, Shao X M, Yin Z Y, et al. August temperature variability in the southeastern Tibetan Plateau since AD 1385 inferred from tree rings. *Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoecol*, 2011, 305: 84–92
- 53 Liang E Y, Shao X M, Xu Y. Tree-ring evidence of recent abnormal warming on the southeast Tibetan Plateau. *Theor Appl Climatol*, 2009, 98: 9–18
- 54 王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化. *冰川冻土*, 1992, 14: 242–250
- 55 施雅风, 刘时银, 上官冬辉, 等. 青藏高原气候与冰川变化中的两种特殊现象. *气候变化研究进展*, 2006, 2: 154–160