

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0116

LIU Liang, ZHAI Yijie, ZHANG Wei, et al. Late Quaternary glaciations in North America based on ^{10}Be exposure ages[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1283–1297. [刘亮, 翟羿杰, 张威, 等. 基于 ^{10}Be 暴露年代的北美洲晚第四纪冰川演化序列研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1283–1297.]

基于 ^{10}Be 暴露年代的北美洲晚第四纪冰川演化序列研究

刘 亮, 翟羿杰, 张 威, 初智豪

(辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘 要: 对北美洲晚第四纪冰川 ^{10}Be 暴露年代进行汇编与聚集程度置信等级划分, 构建了北美洲各区域的冰川演化序列, 并进一步对比和分析了冰川演化序列对高分辨率气候事件的响应情况, 使用较好和中等聚集程度的暴露年代漂砾组对北美洲各区域进行冰期划分。结果表明: 北美洲冰川序列横跨6个深海氧同位素阶段(marine isotope stage, MIS), 保守估计至少在 MIS 6/5、MIS 4/3、MIS 2时期出现了规模性冰进, 其记录可信区间为约150 ka至今。末次冰盛期(Last Glacial Maximum, LGM)之前的冰川演化存在区域性, 这可能与劳伦泰德冰盖的大气效应存在一定的相关性。LGM的冰川达到最大范围的时间不同步, 揭示了不同地区冰川演化的影响因素不尽相同。LGM以来的冰川作用对于高分辨率气候事件, 如海因里希事件1(Heinrich Stadial 1, HS1)、B-A事件(Bølling-Allerød, B-A)、新仙女木事件(Younger Dryas, YD)的响应存在同步性。对于全新世更高分辨率的邦德事件(Bond), 北美洲的冰川 ^{10}Be 暴露年代同样具有很好的对应关系。

关键词: ^{10}Be 暴露年代; 冰川演化序列; 气候事件; 北美洲

中图分类号: P534.63; P931.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1283-15

0 引言

第四纪气候演变以冷暖交替为特征, 导致了冰川的不断进退^[1-3], 也造就了丰富的冰川遗迹。晚第四纪时期, 北美洲受当时气候的影响在中高纬度形成了横跨大陆的北美冰盖复合体(North American Ice Sheet Complex, NAISC), 作为北半球最大的冰盖, NAISC对气候、海平面、大气环流和人类的迁移都有着深刻的影响^[4-5]。而在中低纬度的美国西部地区形成了对气候变化更为敏感的山岳冰川。丰富的冰川遗迹让人们能够更加了解古气候的变化特征, 利用冰川沉积物年代构建的冰川演化序列, 有助于了解冰川对全球气候强迫和反馈的敏感性。精确的冰川作用定年对于了解第四纪冰期、冰川演化过程和全球气候变化至关重要。其中, 宇宙成因核素测年法应用于冰川年代学已经几十年^[6], 积累

了大量的测年数据集。此方法通过测定岩石表面的同位素核素浓度就可以计算其暴露年代, 从而获得冰川消退的确切时间^[7-10]。

目前, 全球第四纪冰期序列研究的热点区域之一, 即青藏高原及周边山地。如赵井东等^[11]基于多种测年技术把中国(以青藏高原为主体)近百万年冰川演化序列划分为15个特征时段。Murari等^[12]、Dortch等^[13]、Owen等^[14]基于 ^{10}Be 暴露年代对青藏高原地区的冰期序列进行了重新总结, 将青藏高原分为喜马拉雅-西藏季风区和西喜马拉雅-西藏半干旱区, 其中喜马拉雅-西藏季风区可以识别出27个区域冰川阶段, 而西喜马拉雅-西藏半干旱区可以划分为19个区域冰川阶段。同样是基于 ^{10}Be 暴露年代, Heyman^[15]、Blomdin等^[16]则采用更加严苛和稳健的方法来剔除数据中的异常值, 其研究表明青

收稿日期: 2022-05-30; 修订日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501068; 42071013)资助

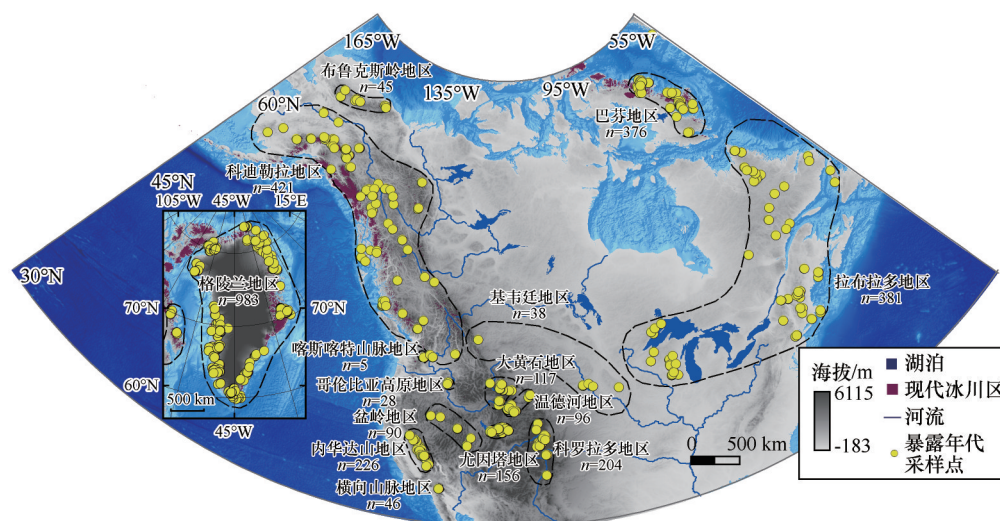
作者简介: 刘亮, 副教授, 主要从事地貌与气候演变研究. E-mail: liuliangdm@126.com

藏高原主要冰进峰值在 10~30 ka 之间,而天山地区只有一个区域冰期是可靠的,即冰川扩张发生在 15~28 ka 之间。虽然青藏高原和天山地区存在大量早于 MIS 2 的年代证据,但漂砾组暴露年代的分散性妨碍了冰川年代学的准确定义。与青藏高原一样,近年来,北美洲第四纪冰川序列研究也如火如荼,如 Dyke^[17] 基于 ¹⁴C 测年数据集对劳伦泰德冰盖末次冰消期的范围进行了高精度的重建,成为了劳伦泰德冰盖末次冰消期期间冰消等时线的权威数据。Laabs 等^[18] 基于宇宙成因核素暴露测年法对美国西部高山进行的冰期序列重新总结,表明在 MIS 6,美国西部高山地区冰期与全球冰量最大值同步发生,末次冰期终碛的平均年代为 (19.5 ± 2.3) ka,对应于 LGM 的后期。尽管在近期大量第四纪冰川测年工作的背景下,以整个北美洲为研究对象去总结、归纳第四纪冰川演化序列的研究却寥寥无几,所以此项研究对于了解北美洲晚第四纪冰川演化序列具有重要意义。

本文利用 Heyman^[15]、Blomdin 等^[16] 的方法,以 ¹⁰Be 暴露年代数据为统一标尺对北美洲各区域冰川演化序列进行了构建,并在原有方法基础上,将概率密度曲线峰值年代与高分辨率气候事件进行对比。具体研究目标为:①对 ¹⁰Be 暴露年代的聚集程度进行等级划分,使用其中可信度较高和中等的漂砾组年代构建北美洲各区域的冰川演化序列;②利用概率密度曲线峰值年代,与 HS 事件、B-A 事件、YD 事件甚至更高分辨率的 Bond 事件进行对比;③探讨北美洲各区域冰期序列演化阶段性特征。

1 研究区概况

根据冰川形态、规模和所处地形条件将北美洲分为四个大区,分别为以山岳冰川为主的美国西部,以大陆冰盖为主的劳伦泰德冰盖覆盖区和相对独立于美洲大陆的格陵兰冰盖覆盖区,以及两种类型兼具的加拿大西部和美国阿拉斯加(图 1)。



注: 现有冰川数据来源于 Randolph Glacier Inventory 6.0, 格陵兰地区仅显示周边冰川范围

图 1 北美洲第四纪冰川区 ¹⁰Be 暴露年代采样点分布

Fig. 1 Map of ¹⁰Be exposure ages deposit in the Quaternary glacier region of North America (Existing glacier data is from Randolph Glacier Inventory 6.0, and the Greenland region only shows periphery glaciers)

加拿大西部和美国阿拉斯加地区(图 1),是全球高纬度冰期记录保存较好的地区之一,为高纬度冰川古气候重建提供了详实的年代学框架^[19]。由于布鲁克斯岭以山地冰川为主的特点独立存在于科迪勒拉冰盖以北地区,故将其分为两个次级区域。此外,当前科迪勒拉冰盖对气候突变的响应研究,也对未来格陵兰冰盖的模拟演化提供可借鉴的研究基础^[20]。

美国西部地区依据 Laabs 等^[18] 的划分标准,按

照不同山地冰川中心进一步划分为喀斯喀特山脉地区、哥伦比亚高原地区、盆岭地区、内华达山地区、横向山脉地区、大黄石地区、温德河地区、尤因塔地区和科罗拉多地区,这些地区全都保留有丰富的冰川遗迹,可以为过去的气候变化提供有价值的信息^[21](图 1)。

随着研究的深入,东部的劳伦泰德冰盖,其最大范围的重建从单一的、稳定的系统转变为多冰

穹、相对动态的系统,整个冰盖包括拉布拉多冰穹、基韦廷冰穹和巴芬冰穹,分别位于哈德逊湾的东部、西部和北部^[22](图1),故按照此将本大区进一步划分为三个次级区域。它在晚更新世对海平面上升的影响最大^[23],并且在末次冰消期期间极大地扰乱了海洋大气系统^[24-26]。所以劳伦泰德冰盖冰川演化序列的重建,对于深入理解劳伦泰德冰盖对气候系统的影响具有重要意义。

最东端的格陵兰冰盖是北极地区现有的最大冰盖(图1),包含相当于全球海平面约7 m的水量。数值模拟表明,到2100年,格陵兰冰盖的融化量可能会使全球海平面上升0.5 m^[27]。格陵兰冰盖将来产生的大量冰山和融水会对海洋环流、生态系统产生重大影响,并最终反作用于气候^[28]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

北美洲冰川 ^{10}Be 暴露年代数据来源于 Expage^[29](www.expage.github.io/, version expage-202103)。该数据库根据 ^{10}Be 产率的变化定期更新,汇编了来自全球各地已发布的 ^{10}Be 和 ^{26}Al 冰川暴露年代数据,其目的是允许轻松访问数据库,进而方便获取重新计算的暴露年代或对年代数据进行新的深入研究。

2.2 暴露年代汇编

北美洲所有 ^{10}Be 暴露年代数据均使用 Heyman 等^[29]基于 CRONUS 计算器^[30]和 LSDn^[31]产率模型开发的暴露年代计算器(<http://expage.github.io/data/calculator/zip/expage-201912.zip>)重新计算获得。其中,全球 ^{10}Be 平均产率参考值为 $(3.98 \pm 0.22) \text{ atoms} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,由 Heyman 对全球 26 个校准点汇总处理获得(<http://expage.github.io>, 2009—2019 年)。

由于无法确定每个研究区的侵蚀速率,本文的暴露年代计算都是基于零侵蚀的假设下,因此,采用的年代被认为是最小暴露年代。这种方法有利于将不同研究区的暴露年代进行横向对比,而不利在于,这种假设的在现实中几乎不可能存在,尤其对于不同时间尺度暴露年代,如假设侵蚀速率为 0.5 、 1 以及 $2 \text{ mm} \cdot \text{ka}^{-1}$ 的样品, $1 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度的样品暴露年代可能低估约 0.5% 、 1% 、 2% ; $10 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度的样品可能低估约 5% 、 7% 、 20% ; $50 \times 10^4 \text{ a}$ 尺度的样品可能低估约 40% 、 70% ,甚至 100% 以上^[32]。除侵蚀速率之外,核素生成速率对较老年代而言不确定性也是非常之

大。所以仅就目前研究的现状和进展,本文暂且按照零侵蚀计算暴露年代,以便于区域之间的对比。

所有暴露年代均按数据库,即原始文献所划分的分组进行计算。由于样品受到地质作用变化的不确定性,通常会导致同一组的样品年代比较分散^[33]。为了使得每个组的暴露年代具有更高的可信度,本文首先采用皮尔斯准则^[34-37]从数据集中剔除异常值。随后使用 Heyman^[15]和 Blomdin 等^[16]改进之后的方法对年代聚集程度的置信等级进行划分,在此分析中,仅考虑样品数 $n \geq 3$ 的暴露年代组,并将其归类为 A、B、C 三个置信等级:

(1) A 级(较好聚集)

当 $\chi_R^2 \leq 2$ 时,将计算后得出的算术平均值和标准偏差值作为冰消年龄的代表,并且假设地貌过程几乎没有造成暴露年代偏离真实年代的影响。

(2) B 级(中等聚集)

当 $\chi_R^2 > 2$ 但标准偏差小于平均暴露年龄的 15% 时,将计算后得出的算术平均值和标准偏差值作为冰消年龄的代表,并且假设地貌过程对暴露年代的分布有一定影响。

(3) C 级(较差聚集)

当 $\chi_R^2 > 2$ 且标准偏差大于平均暴露年龄的 15% 时,将计算后得出的算术平均值和标准偏差值作为冰消年龄的代表,并且假设地貌过程对暴露年代的分布有很大影响。

经过年代置信等级划分之后,可以省略对所有研究点冰川地貌的深入认识,通过一致的标准进行客观分析,从而避免了主观臆断造成的误差^[38]。本文通过上述方法对 171 篇北美洲 ^{10}Be 冰川年代学的文章进行计算和分析(附表略),共包含 ^{10}Be 暴露年代 4 357 个,总计 1 314 组,去除 C 级聚集组和异常值后,符合要求的 ^{10}Be 暴露年代 1 956 个,共计 424 组,其中 A 级聚集组 215 个,占比 50.5% ,B 级聚集组 209 个,占比 49.5% 。

2.3 冰期构建原则

当两组或多组样品暴露年代在误差范围内重叠时,将其年代的并集定义为一个区域冰期^[16,39],而仅有一组样品年代时则被定义为一个局地冰期。在使用 A+B 聚集组的数据进行冰川演化序列的整体构建时,大量的数据重叠可能导致最后的冰期范围更加宽泛^[16,39],同样这种方法也难以体现区域冰期中冰川消退开始的时间。针对可能出现这种情况,尝试对每个区域和局地冰期进行概率密度曲线

拟合,确定出峰值年代,将这些峰值年代与气候事件进行对比,尝试找寻冰川演化对气候的高分辨率响应关系。

3 北美洲各区域冰期序列

3.1 加拿大西部和阿拉斯加

本大区包含两个地区,冰期序列和峰值年代见表1和图2A.1。3个2.0 ka以来和1个横跨 MIS 4/3

的局地冰期 46.78~61.62 ka 均分布在科迪勒拉地区,剩余的新冰期(2.16~3.14 ka)和区域冰期(9.19~28.36 ka)在两个地区具有同步性。与北半球高分辨率气候事件进行对比发现,本大区对 LGM 以来的 YD、HS1、B-A 事件均有较好的对应,而较老 HS 事件的对应则不显著。对于 LGM 之前的冰进,局地冰期 46.78~61.62 ka 的峰值年代分别为 53.5 ka 和 59.2 ka,更有可能对应 MIS 4 晚期或 MIS 3 早期。

表1 北美洲分区域冰期序列和峰值年代汇总表

| Table 1 Summary table of subregional glaciation sequences and peak ages in North America | | | |
|--|-------|-------|--|
| 区域 | A 级/组 | B 级/组 | 冰期序列和峰值年代/ka |
| 加拿大西部和阿拉斯加 | 34 | 29 | 0.14~0.31, 0.44~0.70, 1.33~1.79, 2.16~3.14, 9.19~28.36, 46.78~61.62 |
| | | | 0.2, 0.6, 1.6, 2.6, 10.0, 10.9, 11.4, 11.7, 12.2, 14.0, 15.3, 16.2, 18.3, 19.8, 23.3, 53.5, 59.2 |
| 布鲁克斯岭地区 | 0 | 6 | 2.16~2.78, 14.10~15.56, 15.78~27.94 |
| | | | 2.5, 15.0, 16.6, 20.6 |
| 科迪勒拉地区 | 34 | 23 | 0.14~0.31, 0.44~0.70, 1.33~1.79, 2.44~3.14, 9.19~28.36, 46.78~61.62 |
| | | | 0.2, 0.6, 1.6, 2.8, 10.0, 10.9, 11.4, 11.7, 12.2, 13.4, 13.6, 13.9, 15.3, 16.2, 18.4, 19.8, 23.8, 53.8, 59.1 |
| 美国西部 | 50 | 84 | 7.64~33.97, 36.33~38.03, 90.00~99.46, 110.32~151.11 |
| | | | 14.3, 15.1, 16.2, 17.2, 18.6, 20.2, 21.4, 37.2, 94.9, 118.7, 138.7 |
| 喀斯喀特山脉地区 | 0 | 1 | 11.07~12.31 |
| | | | 11.7 |
| 哥伦比亚高原地区 | 2 | 1 | 10.18~12.70, 18.72~20.88, 23.46~25.34 |
| | | | 11.4, 19.8, 24.4 |
| 盆岭地区 | 4 | 8 | 12.41~14.36, 14.94~25.22, 117.89~150.47 |
| | | | 13.6, 18.3, 21.9, 134.2 |
| 内华达山地区 | 6 | 22 | 7.64~9.02, 11.04~30.27, 116.07~151.11 |
| | | | 8.3, 14.8, 16.0, 17.1, 21.6, 133.6 |
| 横向山脉地区 | 4 | 5 | 12.55~17.90, 17.91~21.99, 22.27~23.32, 36.33~38.03 |
| | | | 15.6, 18.4, 22.8, 37.2 |
| 大黄石地区 | 4 | 11 | 11.61~21.91, 114.32~135.88 |
| | | | 13.7, 16.3, 18.8, 125.1 |
| 温德河地区 | 3 | 9 | 9.32~11.61, 12.98~17.59, 19.98~25.77, 90.00~99.46 |
| | | | 10.5, 14.0, 16.4, 20.2, 94.7 |
| 尤因塔地区 | 14 | 9 | 10.92~11.79, 11.84~25.27, 136.64~140.89 |
| | | | 11.4, 14.6, 15.1, 17.4, 18.6, 20.8, 138.8 |
| 科罗拉多地区 | 13 | 18 | 8.74~12.96, 13.41~26.12, 26.54~33.97, 110.32~122.71 |
| | | | 12.4, 14.1, 16.3, 18.7, 21.4, 22.1, 116.5 |
| 劳伦泰德冰盖地区 | 50 | 38 | 0.41~0.44, 0.71~0.75, 0.78~0.96, 1.08~5.85, 5.95~30.11 |
| | | | 0.4, 0.7, 6.3, 7.4, 7.9, 8.8, 9.9, 11.2, 11.5, 14.1, 15.4, 16.6, 19.6, 21.9, 27.0 |
| 基韦廷地区 | 2 | 2 | 13.36~19.05 |
| | | | 16.7 |
| 巴芬地区 | 26 | 11 | 0.41~0.44, 0.71~0.75, 0.78~0.96, 1.08~5.85, 6.08~6.45, 7.36~19.93, 23.69~30.11 |
| | | | 0.4, 0.7, 5.0, 6.3, 7.9, 8.8, 9.9, 11.2, 11.5, 13.3, 26.9 |
| 拉布拉多地区 | 22 | 25 | 5.95~29.32 |
| | | | 7.4, 7.9, 15.4, 19.6, 21.9, 27.0 |
| 格陵兰 | 80 | 59 | 0.78~0.84, 0.88~1.44, 1.75~1.85, 5.35~27.65, 33.65~46.74, 76.27~88.22 |
| | | | 0.8, 1.0, 1.8, 6.4, 6.7, 7.1, 7.7, 8.6, 8.9, 10.4, 10.9, 12.1, 12.6, 24.0, 35.9, 84.2 |

注:斜体表示局地冰期。

3.1.1 布鲁克斯岭地区

布鲁克斯岭地区的冰期划分和峰值年代见表1和图2A. 2。冰川在约20.6 ka从LGM的最大范围开始冰退,全新世新冰期的冰进破坏了YD事件与B-A事件的冰川记录,故仅保留有HS1事件的对应记录^[40]。14.10~15.56 ka的局地冰期,是布鲁克斯山脉西部冰川在Itkillik II晚期重新冰进之后迅速退缩的局地响应,并在大约15.0 ka稳定^[40],中部地区的冰退早于西部,且东部同时期的冰川仅保留有冰进记录,故未与西部冰退记录重合。2.16~2.78 ka的局地冰期,与地衣年表的转化曲线进行对比发现^[41~42],此局地冰期与地衣年表重叠^[43],说明新冰期期间,布鲁克斯岭中部冰川曾有过令人信服的冰进。

3.1.2 科迪勒拉地区

科迪勒拉地区的冰期划分和峰值年代见表1和图2A. 3。本区西北部的冰川在MIS 4/3有显著冰进,这也是北美洲在MIS 4/3时期唯一可靠的冰进记录。在约23.8 ka,科克赖恩斯丘陵的冰川最先自LGM的最大范围开始冰退,而阿拉斯加山脉的冰川在约19.8 ka冰退,这种不同步很可能与当时有限的水分供应有关^[44]。随后的末次冰消期,冰川整体是退缩的,但在约16.2 ka持续近千年的快速冰退突然停止,阿拉斯加和东北太平洋深海沉积物对此现象有所记录^[45],本文选取的U1419沉积记录也体现了16.2 ka的气候突变(图2g)。冰川的快速消退导致大量冰川融水流向周边低海拔地区,在约15.3 ka造成了东南部的洪水事件。B-A时期冰川整体退缩速度加快,科迪勒拉冰盖于13.9 ka快速解体^[20],而冰川的消退在约13.4 ka被小型冰进所打断,一些高山冰川在此时期重新冰进^[46]。12.2~10.9 ka四个密集的峰值年代是对YD事件的直接响应,YD冰川规模在其早中期冰进比较显著,随后持续退缩至结束。

由于科迪勒拉冰盖边缘被局限在阿拉斯加山北坡,使其保有较完整的冰川遗迹,因此保留有0.14~0.31 ka与0.44~0.70 ka的局地小冰期记录。基查特纳山脉1.33~1.79 ka的局地冰期比较复杂,其采样地貌部位为中碛垄上的碎屑带,碎屑带的物质来源为山谷的岩崩碎屑,由冰川带到中碛垄沉积,特殊的沉积物运输过程导致这些沉积物可能携带有额外的宇宙成因核素,故此冰期仍需要通过进一步的校正^[47]。Tiedemann冰川在2.44~3.14 ka局

地冰期期间达到了全新世最大范围,这与北美西部的大多数冰川不同,可能与岩崩导致冰川变厚和前进相关^[48]。

3.2 美国西部

本大区包含九个地区,冰期序列和峰值年代见表1和图2B. 1。北美洲基于¹⁰Be暴露年代可靠的最老冰期MIS 6冰进只保留在美国西部地区,且存在多区响应。盆岭(117.89~150.47 ka)、内华达山(116.07~151.11 ka)、大黄石(114.32~135.88 ka)、尤因塔(136.64~140.89 ka)以及科罗拉多地区(110.32~122.71 ka)的这些局地冰期共同组成了跨越MIS 6/5的区域大冰期。除此之外,温德河地区属于传统暖期MIS 5c的局地冰期90.00~99.46 ka,也被Fabel等^[49]划分到当地倒二冰期,即与上述区域大冰期同期。Marcott等^[50]基于冰斗冰川的地貌关系和年龄精度,分辨出美国西部地区晚更新世6个冰期阶段。但基于本文的分析方法,这些数据在盆岭、温德河、尤因塔地区仅造成了局地冰期,概率峰值对应于前文六个阶段中的15.1~14.1 ka、14.1~13.5 ka以及11.8~11.2 ka,且大区域同步性仍然存在。与北半球高分辨率气候事件进行对比后发现,美国西部地区对LGM以来的HS1、B-A事件有较好的对应情况,而对其他HS事件的对应不显著。值得一提的是,很多分区对YD事件存在明显的响应,但美国西部地区数据拟合的峰值却没有对应YD事件。

3.2.1 喀斯喀特山脉地区

喀斯喀特山脉仅有一组B级局地冰期,即11.70~12.31 ka(表1和图2B. 2),将这组采于冰斗湖盆地中的测年数据与美国西部其他地区同时期的测年数据对比^[50],结果表明末次冰消期,冰川迅速退缩到冰斗附近,仅在YD期间经历了小的波动,全新世冰川活动基本被限制在YD冰川的范围之内。

3.2.2 哥伦比亚高原地区

哥伦比亚高原地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B. 3。本区冰川在24.4 ka达到LGM最大范围,冰川规模保持至19.8 ka,随后冰川演化情况尚不明确,但在11.4 ka已经退缩到冰斗附近^[51]。由于本区仅有瓦洛厄河谷的暴露测年数据,因此对于瓦洛厄冰帽整体的冰川演化序列研究还需更多的数据支撑。

3.2.3 盆岭地区

盆岭地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.4。本区包括宽广的山谷与南北走向的断层山,后者仅高出中间山谷300~1 500 m^[52]。本区跨越MIS 5/6的局地冰期,峰值年代为134.2 ka,对应MIS 6的晚期。本区特殊的地形条件,再加上大面积洪积湖的潜在影响,冰川在约21.9 ka到达最大位置,在约18.3 ka洪积湖到达最高水位并从湖侵阶段进入溢流阶段后^[53],冰川也开始冰退,最后在约13.6 ka退缩到冰斗附近。通过与图2d的邦尼维尔湖湖面高度的对比发现,冰川峰值年代与湖面高度的阶段性变化均对应显著。

3.2.4 内华达山地区

内华达山地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.5。本区冰川在约30 ka开始稳步冰进,之后保持在稳定状态,于21.6 ka左右,推覆了前期遗迹,达到末次冰期的最大范围^[54]。之后在约17.1 ka快速撤退,在B-A事件之前退缩到冰斗范围附近^[55],故没有明确的证据表明B-A与YD期间存在冰进。塔特尔山谷7.64~9.02 ka局地冰期的采样点地貌形态复杂,其冰碛垄内保留有分选良好的卵石群,这表明在沉积后受到流水侵蚀。Benn等^[56]结合现场工作认为,冰碛垄沉积形态的改变可能与上游山谷堰塞湖崩塌造成的洪水有关,故此局地冰期可能记录的并不是冰川活动。

3.2.5 横向山脉地区

横向山脉地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.6。圣戈尔戈尼奥山东部保存完好的冰碛物为晚第四纪期间的冰川演化提供了证据,也标志着北美西部科迪勒拉山脉冰川作用的最西南界限。Owen等^[57]划分出四次冰期(18~20 ka、15~16 ka、12~13 ka、5~9 ka),本文对YD事件与全新世冰进暴露年代进行聚集等级划分,只得到C级聚集组,故仅保守的接受该地区LGM与HS1的冰进事实。另外划分出的MIS 3a局地冰期(36.33~38.03 ka),Owen等^[57]没有对SG1-5、SG28暴露年代历史进行解释,甚至将其划分在Stage II (15~16 ka),对于这些数据仍需深入研究。

3.2.6 大黄石地区

大黄石地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.7。本区在晚第四纪发育有20 000 km²的冰川复合系统,其演化模式与山谷冰川有很大区别,尤其在末次冰消期,大黄石冰川主体向水分来源地移动

的过程,更加类似于大陆冰盖的演化模式^[58]。MIS 6和MIS 2两次冰期的演化规模也不尽相同,在MIS 6时期,其南部(48 km)、西南部(23 km)、西部(22 km)均比MIS 2时期冰川规模大,而在北部和东部则比MIS 2时期小,Licciardi等^[59]认为可能与黄石新月型山地的抬升变化有关。在暴露年代丰富的LGM,本区冰川到达其最大规模时间较晚,冰川在北部和东部冰进最大规模的时间约为18.8 ka,随后在约16.3 ka,北部和南部山地的冰川不断加厚,并向西部较平坦的黄石高原拓展,最后在约13.7 ka,冰川不断向水分来源的西南部冰进,与此同时,北部的冰川由于降水的减少不断退缩,直到稳定在冰斗附近。

3.2.7 温德河地区

温德河地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.8。Dahms等^[60]在温德河南部采到一组MIS 16时期的暴露年代,并用形态地层学的方法确定了其存在明显的冰进^[61],这是本文数据中最久远的一组,但该组数据聚集等级划分结果较差,故未采纳。Dahms等^[60]认为本区在约22.5 ka达到其LGM的最大范围,但本文拟合出的峰值年代20.2 ka仅对应于LGM的退缩时间。HS1时期,冰川在约16.4 ka重新冰进随后又持续冰消^[54],在约14.0 ka时退到冰斗附近,之后在YD时期又重新冰进^[50]。虽然Dahms等^[60]提出温德河南部早至中全新世冰川事件的证据可能已经不存在,但是在随后Marcott等^[50]的研究中,发现了本区南部全新世早期冰川仍活动在冰斗附近的暴露年代证据。

3.2.8 尤因塔地区

尤因塔地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.9。受到盆岭地区洪积湖的影响^[62],尤因塔地区在末次冰消期的冰川演化中出现空间不同步现象。尤因塔山脉东部首先出现冰退(约20.8 ka),随后南部和西部峡谷分别在约18.6 ka和17.4 ka开始冰退,距离邦纳维尔湖最近的沃萨奇岭则在约15.1 ka开始快速冰退^[62],之后冰川持续退缩,在约11.4 ka尤因塔山脉冰川已经退缩到冰斗后壁之上^[50]。

3.2.9 科罗拉多地区

科罗拉多地区冰期划分和峰值年代见表1和图2B.10。Leonard等^[63]使用冰碛物废弃年龄和河谷侧壁磨光基岩暴露年龄的组合来推断威洛克里克山谷的冰川消退序列,此前Gosse等^[64]的研究中也曾使用过这种方法,但Ward等^[65]在研究中则指出

使用这种方法,在一些冰川磨蚀的基岩样品中发现了遗传的核素浓度,26.54~33.97 ka局地冰期可能是由于这样的原因造成的。本区冰川在约22.1 ka达到LGM的最大范围,随后在约21.4 ka向后退缩^[54],在约16.3 ka时中断了冰川的整体退缩,这与Ward等^[65]认为的时期相同。之后本区所有的冰川都持续消退,在约14.1 ka冰川消退达到顶峰,直到约13 ka时已消失殆尽^[63]。但在约12.4 ka时部分冰川在冰斗范围内又发生了显著的冰进^[50],可能是对YD事件的响应。之后仅有个别冰川在全新世早期存在活动迹象。

3.3 劳伦泰德冰盖地区

本大区包含三个地区,冰期序列和峰值年代见表1和图2C.1。劳伦泰德冰盖对LGM以来的HS1、B-A事件有较好的对应情况,但对其他HS事件对应不显著。在巴芬地区11.0 ka左右的峰值,可能是对YD事件的响应。

3.3.1 基韦廷地区

基韦廷地区冰期划分和峰值年代见表1和图2C.2。受到冰盖动力学的影响,保守推断劳伦泰德冰盖西南边缘在HS1时期依旧维持在LGM最大位置附近,区域冰期(13.36~19.05 ka)与峰值年代(16.7 ka)均对此有所印证,Dyke等^[66]冰盖范围重建的研究也与此结果相吻合。

3.3.2 巴芬地区

巴芬地区冰期划分和峰值年代见表1和图2C.3。Dyke等^[66]认为劳伦泰德冰盖各区域达到LGM最大范围的时间是不同的,西北、东北和南缘可能较早的到达最大范围(28~27 ka),本文构建的26.9 ka冰期峰值也能对其进行佐证。末次冰消期期间,巴芬地区的冰川活动是较为缓慢的,直到YD事件随着全球夏季日照增加和二氧化碳水平增加^[67],导致本区冰川开始加速消退,但早全新世多次突然的冷逆转使得冰川在百年尺度上存在多次冰停或重新冰进,7.36~19.93 ka冰期的峰值对应这些百年尺度的冷逆转事件时期。Young等^[68]认为,全新世早期冰盖的解体开启了一种负反馈机制,劳伦泰德冰盖的融水排放可能削弱了大西洋经向翻转环流(Atlantic meridional overturning circulation, AMOC),进而降低了区域温度,触发了劳伦泰德冰盖、格陵兰冰盖西南缘和区域高山冰川反复的退缩暂停或再次冰进。全新世中期的冰期峰值由于缺乏相关演化历史的研究,暂无法解释。在中世纪暖

期期间,巴芬地区的气候展现了与欧洲地区相反的情况^[69],使得在约0.7 ka的冰川范围接近约0.4 ka小冰期的冰进最大范围^[70]。

3.3.3 拉布拉多地区

拉布拉多地区冰期划分和峰值年代见表1和图2C.4。本区冰川在约27.0 ka达到LGM的最大范围,与巴芬地区同步。在随后的21.9 ka,本区冰川较先启动冰消,这主要是由轨道强迫所驱动的^[71]。在约19.6 ka冰川开始稳定消退,这可能是对北半球夏季日晒加速上升和温室气体增加的响应,这种质量损失的增加与全球平均海平面上升同时发生(图2e)^[71]。由于缅因湾冰架的融化和崩解加剧以及AMOC减弱造成的部分海域温度上升^[72],在HS1事件的末期约15.4 ka,劳伦泰德冰盖东南缘开始由稳定退缩转化为快速崩解。最后,在7.9 ka和7.4 ka的冰期峰值可能记录了劳伦泰德冰盖对8.2 ka冷事件的响应^[73],并且支持了在此事件之后冰盖迅速消亡的证据^[74]。

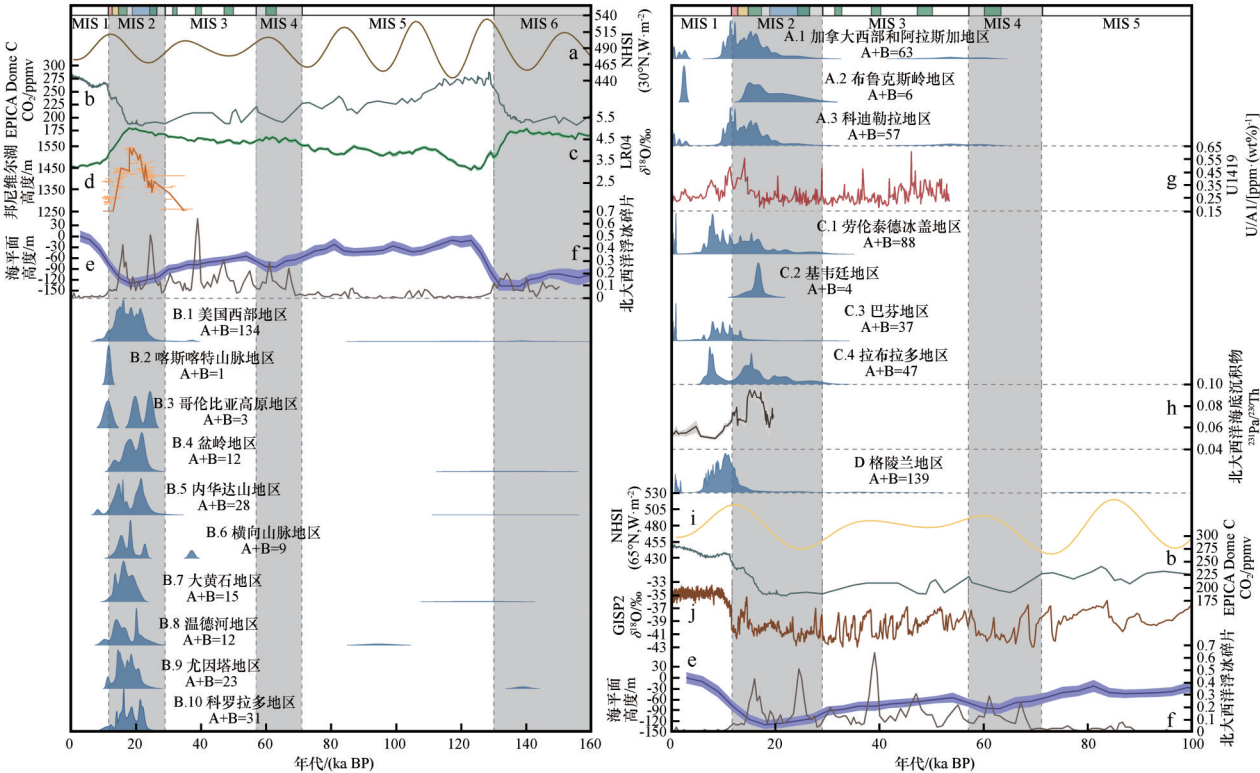
3.4 格陵兰

格陵兰地区冰期划分和峰值年代见表1和图2D。本区LGM前的冰川演化证据仅保留三组且仍存在争议,将其放在下文讨论。LGM由于冰盖向大陆架的拓展,使得本区的陆上证据极为有限,且有可能受到继承核素浓度的影响,故约24.0 ka的冰期峰值无法准确代表本区在LGM的演化情况,但Nørgaard-Pedersen等^[75]的研究表明格陵兰北部地区冰盖的最大冰进时间在20~25 ka。格陵兰地区在末次冰消期的冰川活动类似于巴芬地区较为缓慢,冰盖整体从其大陆架上LGM位置开始退缩,持续时段约为17~11.5 ka,各部分冰退时间各有差别,在约12.1 ka的峰值可能记录了YD期间本区唯一的冰进^[76]。随后的全新世早期,冰川受到百年尺度的冷事件影响,在冰进与冰退间循环,直到全新世大暖期期间,冰川退缩到现在的冰缘范围之内,最后新冰期或小冰期的冰进破坏了大暖期期间的冰川演化记录^[77],Young等^[78]认为格陵兰冰盖在约2 ka时达到全新世最大规模,这与本文构建出1.75~1.85 ka冰期不谋而合。

4 北美洲冰期序列演化阶段性特征

4.1 LGM之前阶段

通过数据分析,LGM之前的北美洲¹⁰Be暴露年代集中保存在阿拉斯加地区、美国西部地区、拉布



注：左图包括美国西部数据，冰期序列横跨 MIS 6~1，右图包括加拿大西部和阿拉斯加、劳伦泰德冰盖地区、格陵兰数据，冰期序列横跨 MIS 5~1，左右两图合起来是一张图，只是右图的时间序列比左图短；在图的上部，粉红色条块代表 YD 事件（11.7~12.9 ka，划分参考了文献[79]），黄色条块代表 B-A 事件（12.9~14.6 ka，划分参考了文献[79]），绿色条块代表 HS 事件（HS1：14.6~17.5 ka，划分参考了文献[80-81]），蓝色条块代表 LGM 时期（19.0~26.5 ka，划分参考了文献[71]），深海氧同位素阶段划分参考了文献[2]；古气候替代记录包含：a. 30°N 的夏季日照辐射^[82]，b. EPICA Dome C 冰芯^[83]，c. LR04 海洋底栖有孔虫中的 $\delta^{18}\text{O}$ ^[2]，d. 邦尼维尔湖高度^[53]，e. 海平面高度^[84]，f. 北大西洋浮冰碎片^[85]，g. 阿拉斯加海底沉积物钻孔 U1419^[86]，h. 北大西洋海底沉积物钻孔 OCE326-GGC5^[87]，i. 65°N 的夏季日照辐射^[82]，j. GISP2 冰芯^[88]

图 2 北美洲分区 A+B 暴露年代概率密度图

Fig. 2 Probability density plots of the class A and B ^{10}Be exposure ages for each of the eighteen regions (The left figure includes data of western United States, and the glaciation sequence spans MIS 6~1, and the right figure includes data of western Canada and Alaska, the Laurentide Ice Sheet region and Greenland, and the glaciation sequence spans MIS 5~1, and the left and right figures are combined into one figure, but the time series of the right figure is shorter than that of the left figure; In the upper part of the figure, pink bars represent YD event (11.7~12.9 ka, the division refers to Reference [79]), yellow bars represent B-A event (12.9~14.6 ka, the division refers to Reference [79]), green bars represent HS events (HS1: 14.6~17.5 ka, the division refers to Reference [80-81]), blue bars represent the LGM (19.0~26.5 ka, the division refers to Reference [71]), and marine isotope stages division refers to Reference [2]; Paleoclimate proxy records contains: a. summer insolation at 30° N^[82], b. EPICA Dome C ice core^[83], c. LR04 series of marine $\delta^{18}\text{O}$ in benthic foraminifers^[2], d. Lake Bonneville altitudes^[53], e. global sea level reconstruction^[84], f. North Atlantic ice-rafted debris stack^[85], g. Alaska deep-sea sediment core U1419^[86], h. North Atlantic deep-sea sediment core OCE326-GGC5^[87], i. summer insolation at 65° N^[82], j. GISP2 ice core^[88])

拉多地区、巴芬地区和格陵兰地区(图 3),但这些地区的冰川演化序列不尽相同。美国西部地区的冰期峰值集中对应于 MIS 6 晚期以及 MIS 5 早期,这与 Laabs 等^[18]的观点相同,而阿拉斯加地区则对应于 MIS 4/3 时期,这与深海氧同位素曲线所揭示的全球冰量变化趋势并不一致(图 2c),说明影响冰川发育的驱动机制非常复杂。冰盖演化模型的研究表明,美国西部山地冰川通常与劳伦泰德冰盖同步进退^[88],同时劳伦泰德冰盖规模与高纬度

的阿拉斯加地区冰川规模之间也可能存在着关联,当劳伦泰德冰盖规模小时,可能对太平洋和阿拉斯加地区上空的大气环流影响较弱,导致阿拉斯加地区冰川的发育条件更好,从而大规模发育冰川^[89-90]。本文的区域冰期构建证明了这一点,即 MIS 6 时期,美国西部山地冰川与劳伦泰德冰盖同步推进阻碍了阿拉斯加地区的冰川发育,导致阿拉斯加地区 MIS 6 时期冰川规模小于 MIS 4 时期,因此阿拉斯加地区仅保留有 MIS 4/3 时期的暴露

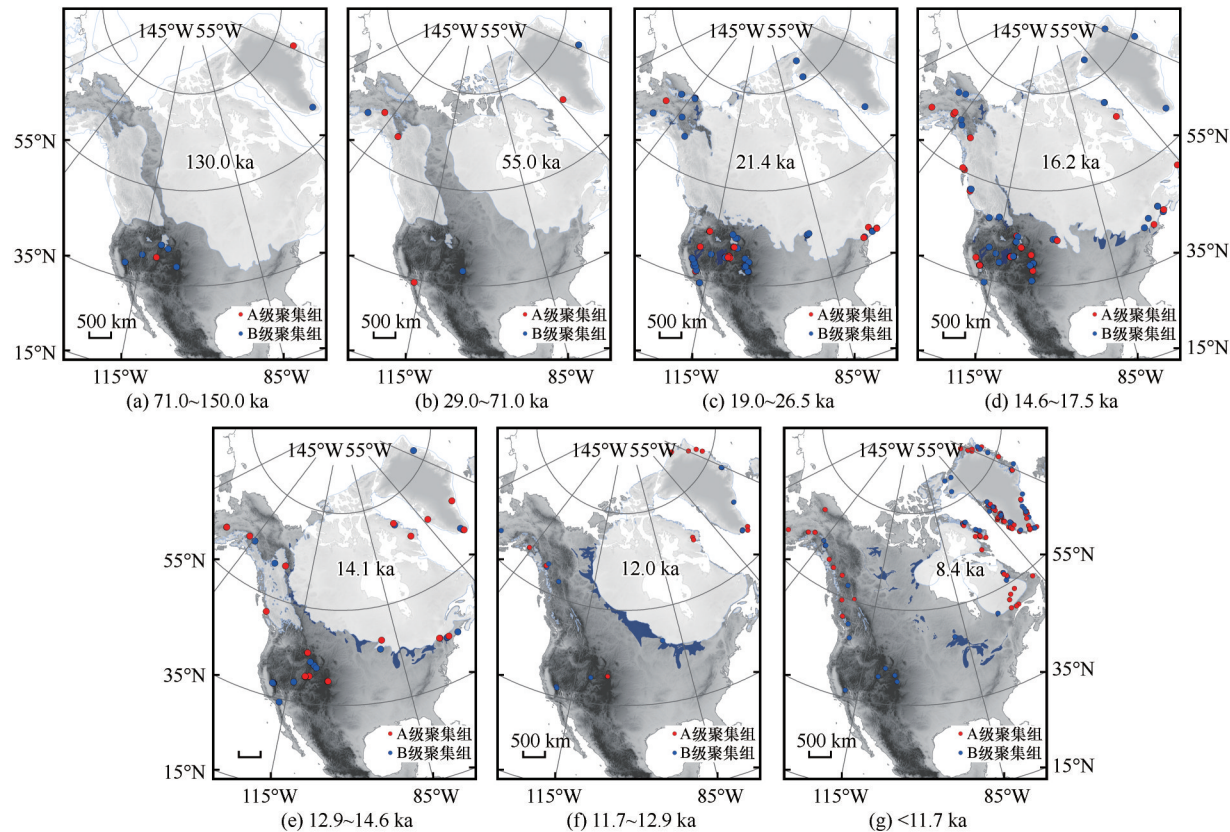


图3 7个时间段(71.0~150.0 ka, 29.0~71.0 ka, 19.0~26.5 ka, 14.6~17.5 ka, 12.9~14.6 ka, 11.7~12.9 ka和<11.7 ka) A、B级聚集组的空间分布(冰盖范围参考了文献[17])

Fig. 3 Spatial distribution of the class A and B ¹⁰Be exposure ages for the seven temporal groups (71.0~150.0 ka, 29.0~71.0 ka, 19.0~26.5 ka, 14.6~17.5 ka, 12.9~14.6 ka, 11.7~12.9 ka and <11.7 ka) (An outline of ice sheets refers to Reference [17])

年代。值得讨论的是,美国西部地区最南端的横山山脉地区保存了一组 MIS 3a时期的暴露年代,有可能继承了之前的核素浓度,抑或者与之前时期的冰进历史相关,但这些假设缺乏更进一步的研究数据支持^[57]。

在拉布拉多、巴芬、格陵兰地区的冰期峰值除了 27 ka 时存在拉布拉多与巴芬地区的同步以外^[91-92],其他的冰期峰值都较为分散。约 27 ka 时期的拉布拉多与巴芬地区的同步在本文零侵蚀速率的假设下,也证明了 Dyke 等^[66]提出的劳伦泰德冰盖东北和南部边缘可能较早达到其最大位置(27~28 ka),但是上文所提高纬度地区样品核素浓度继承的情况仍需注意。Dyke 等^[66]还曾提出劳伦泰德冰盖在 LGM 时期的发展异步性,本文拟合的冰期峰值也有所印证(表 1)。格陵兰地区存在的冰期峰值对应于 MIS 3a、5a 两个暖期, MIS 5a 持续时间较长的夏季高温可能导致了冰川融化留下记录^[93-94], MIS 3a 时期的冰期记录类似于 MIS 5a 时期^[94]。但

Andersen 等^[95]认为来自高海拔(>800 m)地区样品的宇宙核素继承有着不等的梯度,由于地形环境的影响,宇宙核素继承最高可达到 90 ka,故有可能这两次冰期峰值的样品存在核素继承而造成其年代较大。在本文零侵蚀速率的假设下,只将其作为对应 MIS 3a、5a 暖期的冰消记录。

另外,通过对 17 个最老的暴露年代组的统计(表 2),可以发现这些冰碛物的采样地点大部分位于侧碛垄和古夷平面之上,而对于冰川范围指示更为精准的终碛垄上仅存两个采样点,这指示出终碛垄由于受到更强的河流侵蚀和冰川运动的作用,容易被侵蚀破坏,而侧碛垄更好地保存了冰碛物的原始形态,能够更多的保留有过去冰川活动的证据^[96]。

4.2 LGM 阶段

LGM 时期 A 级聚集组的暴露年代普遍分布在美国西部地区 and 劳伦泰德冰盖东南部地区(图 3)。相关研究与本文峰值拟合结果表明(表 1),各地区

表2 LGM之前阶段¹⁰Be采样点地貌形态及样品类型汇总表

| Table 2 Summary table of topographic morphology and sample types of ¹⁰ Be sampling points in pre-LGM stage | | | | | | | |
|---|--------------|----|------------|-------|--------|-------|-------|
| 区域 | 暴露年代/ka BP | 等级 | χ^2_R | 测年数/个 | 地貌形态 | 样品类型 | 文献来源 |
| 科迪勒拉地区 | 51.83±5.05 | B | 9.13 | 4 | 侧碛垄 | 漂砾 | [42] |
| | 53.73±4.12 | A | 1.53 | 3 | 侧碛垄 | 漂砾 | [19] |
| | 59.48±1.67 | A | 0.25 | 4 | 侧碛垄 | 漂砾、基岩 | [19] |
| | 53.59±1.74 | A | 1.05 | 4 | 侧碛垄 | 漂砾 | [97] |
| | 58.18±3.44 | B | 18.97 | 10 | 侧碛垄 | 漂砾 | [98] |
| 温德河地区 | 94.73±4.73 | B | 3.75 | 3 | 侧碛垄 | 基岩 | [49] |
| 盆岭地区 | 134.18±16.29 | B | 19.39 | 10 | 终碛垄 | 漂砾 | [18] |
| 科罗拉多地区 | 30.25±3.71 | B | 16.45 | 3 | 鲸背岩 | 基岩 | [63] |
| | 116.52±6.20 | B | 53.12 | 4 | 侧碛垄 | 漂砾 | [99] |
| 大黄石地区 | 125.10±10.78 | B | 58.72 | 7 | 终碛垄 | 漂砾 | [100] |
| 横向山脉地区 | 37.18±0.85 | A | 0.73 | 4 | 侧碛垄 | 漂砾 | [57] |
| 尤因塔地区 | 138.77±2.13 | A | 0.50 | 4 | 鲸背岩 | 基岩 | [101] |
| 内华达山地区 | 133.59±17.52 | B | 40.87 | 9 | 冰水沉积阶地 | 漂砾 | [102] |
| 格陵兰地区 | 85.39±2.84 | B | 4.40 | 3 | 古夷平面 | 基岩 | [95] |
| | 79.47±3.19 | A | 0.41 | 4 | 古夷平面 | 漂砾、卵石 | [93] |
| | 41.74±5.00 | B | 11.64 | 5 | 古夷平面 | 漂砾、卵石 | [93] |
| | 35.69±2.04 | A | 1.43 | 4 | 古夷平面 | 漂砾 | [103] |

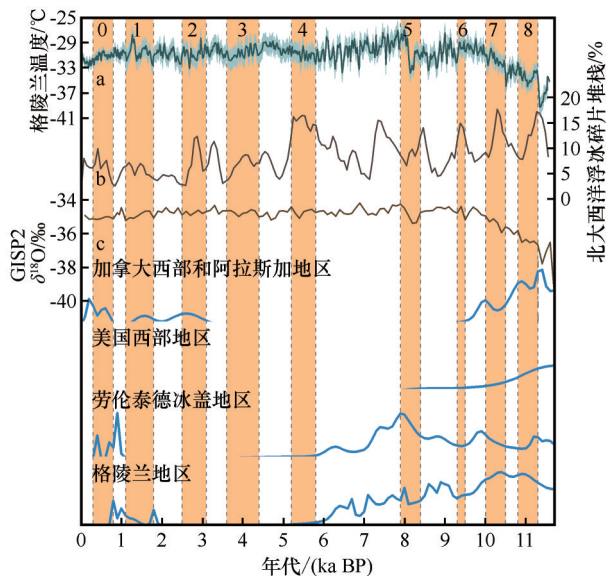
冰川达到 LGM 最大范围的时间可能是不同步的 (图 2), 虽然 LGM 时期, 全球尺度的气候驱动因素如日照 (图 2a,i) 和 CO₂ (图 2b) 的变化揭示了冰川发育大的气候条件, 但区域气候或冰川内部动力学因素, 则影响了各区域冰川达到最大范围的时间。如受到冰盖内部动力学影响的大黄石地区和基韦廷地区, 在 LGM 后期才达到局地的最大范围。除了全球尺度和区域尺度上的影响因素以外, 劳伦泰德冰盖带来的大气效应可能也是影响北美洲各区域冰川达到 LGM 最大范围不同步的一个因素^[104]。在大气环流模型中模拟 LGM 气候时, 一个重要的特征就是在劳伦泰德冰盖上发展了一个强大的反气旋^[104], 它使得冰盖范围以南的区域以寒冷干燥的偏东气流为主, 削弱了西风带的影响, 减少了西部山地的降水, 从而限制了冰川发育。同时, 布鲁克斯岭地区也因为劳伦泰德冰盖大气效应的影响导致了其降水减少, 故较晚达到 LGM 最大范围^[40]。而在最南的横向山脉和科罗拉多地区则受到中纬度西风急流向南迁移导致降水增加^[57], 冰川发育条件更好, 故早于北部山地达到 LGM 最大范围。

4.3 末次冰消期与全新世阶段

Benson 等^[105]主张美国西部的山地冰川在末次冰消期存在同步退缩。根据本文数据处理结果 (表 1), 发现这种现象不仅出现在美国西部山地地区, 而是整个北美洲都趋近同步。在 HS1 事件期间, 整

个北美洲在约 15.3 ka 和 16.2 ka 出现了同步的峰值; 在 B-A 事件期间, 整个北美洲在约 14.2 ka 出现了同步的峰值, 之后进入快速消融期 (图 3); 在 YD 事件期间, 部分保留有冰期记录的地区在约 11.7 ka 和 12.2 ka 附近出现了同步的峰值。Palacios 等^[54]认为这种同步性可能受到了海洋环流 (例如 AMOC) 显著变化的影响, 也可能反映了北半球大冰盖对周围大气环流和温度的深刻影响。根据北大西洋浮冰碎片记录 (图 2f) 和海底沉积物记录 (图 2h) 也揭示了在 12.0~12.6 ka、13.3~13.5 ka、15.1 ka、16.0 ka 这四个时期出现了 AMOC 的显著变化。

全新世的北美洲¹⁰Be 暴露年代集中保存在阿拉斯加地区、劳伦泰德冰盖东部地区以及格陵兰地区 (图 3 和表 1), 表明这些地区的全新世冰进更为显著。从图 4 中可以看出, 美国西部地区以外的各分区全新世冰进主要集中在早中全新世冰川波动阶段, 新冰期和小冰期, 这种整体趋势与青藏高原相似^[11], 全新世中期的记录可能被新冰期或小冰期冰进所淹没。由于已证实的大规模大气-海洋远程联系, 越来越多的古气候学家将 Bond 事件与世界各地全新世的气候异常联系起来^[106], 利用不同代用指标对 Bond 事件的响应进行了研究, 例如 Viau 等^[107]利用花粉记录表明北美洲对 Bond 5、2、1、0 事件有响应关系。格陵兰重建温度 (图 4a) 结合 GISP2 中的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据显示 (图 4c), 尽管两个代用指标记录并不



注: Bond事件划分参考了文献[108]; 古气候替代记录包含:
a. 格陵兰温度重建^[109], b. 北大西洋浮冰碎片堆栈^[110],
c. GISP2冰芯^[88]

图4 北美洲各区全新世概率密度图与Bond事件
Fig. 4 Holocene probability density plots and Bond events in the four regions of North America (The classification of Bond events refers to Reference [108]; Paleoclimate proxy records contains: a. Greenland temperature reconstruction^[109], b. ice-rafted debris stack from four North Atlantic sediment cores^[110], c. GISP2 ice core^[88])

完全一致,但在Bond 8、7、6、5、1、0事件时期可以分辨出寒冷期,尤其以Bond 5事件最为明显。北大西洋浮冰碎片的重建记录(图4b)更加敏感,对每一个Bond事件均有良好的响应。代用记录的温度波动模式与本文发现北美洲冰川对Bond 8、7、5、1、0事件存在对应关系的时期相匹配(图4),这说明AMOC的变化可能依旧是全新世冰川演化的影响因素。

5 结论

(1)对4 357个重新计算的 ^{10}Be 暴露年代进行严格的聚集程度置信等级划分以及分区冰川演化序列的构建,有助于更好的量化过去冰川消长时间。大量且分布广泛的 ^{10}Be 暴露年代记录表明,北美洲在过去至少150 ka中经历多次冰进。北美洲整体上冰进时间似乎与LGM和北半球冰盖的消长相吻合,但受不同气候因素的影响,在部分地区存在不同步的现象。

(2)LGM之前的冰川演化存在区域性。其中MIS 6/5冰进全部集中在美国西部地区,峰值年代为138.7 ka和118.7 ka,对应于MIS 6晚期和MIS 5早

期。MIS 4/3仅保存在阿拉斯加地区,这可能与劳伦泰德冰盖的大气效应存在一定的相关性。在LGM,北美洲广泛冰进,但达到最大范围的时间不同步,揭示了不同地区冰川演化影响因素不同。LGM以来的冰川对于高分辨率气候事件HS1、B-A、YD事件存在同步性,这种同步性可能受到了AMOC显著变化的影响,也可能反映了北半球大冰盖对大气环流和温度的深刻影响。

(3)美国西部地区较少保存全新世以来的冰进记录,而其他地区的早中全新世冰川波动阶段、新冰期和小冰期对Bond 8、7、5、1、0事件具有很好的对应关系。

参考文献(References):

- [1] Mix A C. The oxygen-isotope record of glaciation[M]// Ruddiman W F, Wright H E, Jr. North America and adjacent oceans during the last deglaciation. Boulder, Colorado, USA: Geological Society of America, Inc, 1987: 111-136.
- [2] Lisiecki L E, Raymo M E. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Paleoceanography*, 2005, 20(1): 2004PA001071.
- [3] Zhang Wei, Fu Yanjing, Liu Beibei, et al. Geomorphological process of late Quaternary glaciers in Kanas River valley of the Altay Mountains [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(5): 739-750. [张威, 付延菁, 刘蓓蓓, 等. 阿尔泰山喀纳斯河谷晚第四纪冰川地貌演化过程[J]. *地理学报*, 2015, 70(5): 739-750.]
- [4] Carlson A E, Clark P U. Ice sheet sources of sea level rise and freshwater discharge during the last deglaciation [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(4): 2011RG000371.
- [5] Goebel T, Waters M R, O'Rourke D H. The late Pleistocene dispersal of modern humans in the Americas [J]. *Science*, 2008, 319(5869): 1497-1502.
- [6] Balco G. Contributions and unrealized potential contributions of cosmogenic-nuclide exposure dating to glacier chronology, 1990—2010 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(1/2): 3-27.
- [7] Lal D. In situ-produced cosmogenic isotopes in terrestrial rocks [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1988, 16: 355-388.
- [8] Xu Liubing, Zhou Shangzhe. Theory of cosmogenic nuclide surface exposure dating and its applications in geosciences [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(4): 577-585. [许刘兵, 周尚哲. 宇宙成因核素测年方法及其在地球科学中的应用[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(4): 577-585.]
- [9] Wang Jie, Zhou Shangzhe. Cosmogenic nuclides method applied to Quaternary glaciation dating: review and prospect [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(3): 501-509. [王杰, 周尚哲. 宇宙成因核素技术在第四纪冰川测年研究中的评述及展望[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(3): 501-509.]
- [10] Gosse J C, Phillips F M. Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(14): 1475-1560.
- [11] 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.]
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Blomdin R, Stroeve A P, Harbor J M, et al. Evaluating the timing of former glacier expansions in the Tian Shan: a key step towards robust spatial correlations[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 153: 78-96.
- [17] Dyke A S. An outline of North American deglaciation with emphasis on central and northern Canada[J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2004, 2: 373-424.
- [18] Laabs B J C, Licciardi J M, Leonard E M, et al. Updated cosmogenic chronologies of Pleistocene mountain glaciation in the western United States and associated paleoclimate inferences [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 242: 106427.
- [19] Dortch J M, Owen L A, Caffee M W, et al. Beryllium-10 surface exposure dating of glacial successions in the Central Alaska Range[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 25(8): 1259-1269.
- [20] Menounos B, Goehring B M, Osborn G, et al. Cordilleran Ice Sheet mass loss preceded climate reversals near the Pleistocene Termination[J]. *Science*, 2017, 358(6364): 781-784.
- [21] Laabs B J C, Munroe J S, Best L C, et al. Timing of the last glaciation and subsequent deglaciation in the Ruby Mountains, Great Basin, USA [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 361: 16-25.
- [22] Fulton R, Prest V. Introduction: the Laurentide Ice Sheet and its significance[J]. *Géographie physique et Quaternaire*, 1987, 41(2): 181-186.
- [23] Lambeck K, Rouby H, Purcell A, et al. Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(43): 15296-15303.
- [24] Barber D C, Dyke A, Hillaire-Marcel C, et al. Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes[J]. *Nature*, 1999, 400(6742): 344-348.
- [25] Heinrich H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1988, 29(2): 142-152.
- [26] Hemming S R. Heinrich events: massive late Pleistocene detritus layers of the North Atlantic and their global climate imprint [J]. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42(1): 2003RG000128.
- [27] Pfeffer W T, Harper J T, O'Neel S. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise[J]. *Science*, 2008, 321(5894): 1340-1343.
- [28] Straneo F, Heimbach P. North Atlantic warming and the retreat of Greenland's outlet glaciers[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 36-43.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Lifton N, Sato T, Dunai T J. Scaling in situ cosmogenic nuclide production rates using analytical approximations to atmospheric cosmic-ray fluxes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 386: 149-160.
- [32] Zhang Zhigang, Wang Jian, Bai Shibiao, et al. Impact of surface rock erosion rate on in-situ cosmogenic exposure dating method[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(1): 116-121. [张志刚, 王建, 白世彪, 等. 地表岩石侵蚀速率对宇生核素暴露测年影响的研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(1): 116-121.]
- [33] 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(1/2): 71-80.
- [34] Gould B A. On Peirce's criterion for the rejection of doubtful observations, with tables for facilitating its application[J]. *The Astronomical Journal*, 1855, 4: 81-87.
- [35] Peirce B. On Peirce's criterion[J]. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 1877, 13: 348-351.
- [36] Peirce B. Criterion for the rejection of doubtful observations [J]. *The Astronomical Journal*, 1852, 2: 161-163.
- [37] Ross S M. Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data[J]. *Journal of Engineering Technology*, 2003, 20(2): 38-41.
- [38] Gribenski N, Jansson K N, Preusser F, et al. Re-evaluation of MIS 3 glaciation using cosmogenic radionuclide and single grain luminescence ages, Kanas Valley, Chinese Altai [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2018, 33(1): 55-67.
- [39] Blomdin R, Stroeve A P, Harbor J M, et al. Timing and dynamics of glaciation in the Ikh Turgen Mountains, Altai region, High Asia [J]. *Quaternary Geochronology*, 2018, 47: 54-71.
- [40] Pendleton S L, Ceperley E G, Briner J P, et al. Rapid and early deglaciation in the central Brooks Range, Arctic Alaska[J]. *Geology*, 2015, 43(5): 419-422.
- [41] Solomina O, Calkin P E. Lichenometry as applied to moraines in Alaska, USA, and Kamchatka, Russia[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2003, 35(2): 129-143.
- [42] Calkin P E, Ellis J M. Development and application of a Lichenometric dating curve, Brooks Range, Alaska[J]. *Developments in Palaeontology and Stratigraphy*, 1984, 7: 227-246.
- [43] Badding M E, Briner J P, Kaufman D S. ^{10}Be ages of late Pleistocene deglaciation and Neoglaciation in the north-central Brooks Range, Arctic Alaska [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2013, 28(1): 95-102.
- [44] Briner J P, Kaufman D S, Manley W F, et al. Cosmogenic exposure dating of late Pleistocene moraine stabilization in Alaska [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(7/8): 1108-1120.
- [45] Cosma T, Hendy I L. Pleistocene glacial marine sedimentation on the continental slope off Vancouver Island, British Columbia [J]. *Marine Geology*, 2008, 255(1/2): 45-54.
- [46] Kovanen D J, Easterbrook D J. Timing and extent of Allerød

- and Younger Dryas age (ca. 12,500-10,000 ^{14}C yr BP) oscillations of the Cordilleran Ice Sheet in the Fraser Lowland, western North America [J]. *Quaternary Research*, 2002, 57(2): 208-224.
- [47] Ward D J, Anderson R S. The use of ablation-dominated medial moraines as samplers for ^{10}Be -derived erosion rates of glacier valley walls, Kichatna Mountains, AK [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(4): 495-512.
- [48] Menounos B, Clague J J, Clarke G K C, et al. Did rock avalanche deposits modulate the late Holocene advance of Tiedemann Glacier, southern Coast Mountains, British Columbia, Canada? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 384: 154-164.
- [49] Fabel D, Harbor J, Dahms D, et al. Spatial patterns of glacial erosion at a valley scale derived from terrestrial cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al concentrations in rock [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2004, 94(2): 241-255.
- [50] Marcott S A, Clark P U, Shakun J D, et al. ^{10}Be age constraints on latest Pleistocene and Holocene cirque glaciation across the western United States [J]. *npj Climate and Atmospheric Science*, 2019, 2(1): 5.
- [51] Licciardi J M, Clark P U, Brook E J, et al. Variable responses of western US glaciers during the last deglaciation [J]. *Geology*, 2004, 32(1): 81-84.
- [52] Osborn G, Bevis K. Glaciation in the Great Basin of the western United States [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20(13): 1377-1410.
- [53] Oviatt C G. Chronology of Lake Bonneville, 30,000 to 10,000 yr BP [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 110: 166-171.
- [54] Palacios D, Stokes C R, Phillips F M, et al. The deglaciation of the Americas during the Last Glacial Termination [J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 203: 103113.
- [55] Phillips F M. Cosmogenic nuclide data sets from the Sierra Nevada, California, for assessment of nuclide production models: I. Late Pleistocene glacial chronology [J]. *Quaternary Geochronology*, 2016, 35: 119-129.
- [56] Benn D I, Owen L A, Finkel R C, et al. Pleistocene lake outburst floods and fan formation along the eastern Sierra Nevada, California: implications for the interpretation of intermontane lacustrine records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(21/22): 2729-2748.
- [57] Owen L A, Finkel R C, Minnich R A, et al. Extreme southwestern margin of late Quaternary glaciation in North America: timing and controls [J]. *Geology*, 2003, 31(8): 729-732.
- [58] Roe G H, Lindzen R S. The mutual interaction between continental-scale ice sheets and atmospheric stationary waves [J]. *Journal of Climate*, 2001, 14(7): 1450-1465.
- [59] Licciardi J M, Pierce K L. History and dynamics of the Greater Yellowstone Glacial System during the last two glaciations [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 200: 1-33.
- [60] Dahms D, Egli M, Fabel D, et al. Revised Quaternary glacial succession and post-LGM recession, southern Wind River Range, Wyoming, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 192: 167-184.
- [61] Dahms D E. Relative and numeric age data for Pleistocene glacial deposits and diamictos in and near Sinks Canyon, Wind River Range, Wyoming, USA [J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2004, 36(1): 59-77.
- [62] Laabs B J C, Refsnyder K A, Munroe J S, et al. Latest Pleistocene glacial chronology of the Uinta Mountains: support for moisture-driven asynchrony of the last deglaciation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2009, 28(13/14): 1171-1187.
- [63] Leonard E M, Laabs B J C, Plummer M A, et al. Late Pleistocene glaciation and deglaciation in the Crestone Peaks area, Colorado Sangre de Cristo Mountains, USA: chronology and paleoclimate [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 158: 127-144.
- [64] Gosse J C, Evenson E B, Klein J, et al. Precise cosmogenic ^{10}Be measurements in western North America: support for a global Younger Dryas cooling event [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 877-880.
- [65] Ward D J, Anderson R S, Guido Z S, et al. Numerical modeling of cosmogenic deglaciation records, Front Range and San Juan Mountains, Colorado [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2009, 114(F1): 2008JF001057.
- [66] Dyke A S, Andrews J T, Clark P U, et al. The Laurentide and Innuitian ice sheets during the Last Glacial Maximum [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1/2/3): 9-31.
- [67] Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years [J]. *Science*, 2013, 339(6124): 1198-1201.
- [68] Young N E, Briner J P, Miller G H, et al. Deglaciation of the Greenland and Laurentide ice sheets interrupted by glacier advance during abrupt coolings [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 229: 106091.
- [69] Seidenkrantz M S, Roncaglia L, Fischel A, et al. Variable North Atlantic climate seesaw patterns documented by a late Holocene marine record from Disko Bugt, West Greenland [J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 68(1/2): 66-83.
- [70] Young N E, Schweinsberg A D, Briner J P, et al. Glacier maxima in Baffin Bay during the Medieval Warm Period coeval with Norse settlement [J]. *Science Advances*, 2015, 1(11): e1500806.
- [71] Clark P U, Dyke A S, Shakun J D, et al. The last glacial maximum [J]. *Science*, 2009, 325(5941): 710-714.
- [72] Koester A J, Shakun J D, Bierman P R, et al. Rapid thinning of the Laurentide Ice Sheet in coastal Maine, USA, during late Heinrich Stadial 1 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 163: 180-192.
- [73] Dubé-Loubert H, Roy M, Schaefer J M, et al. ^{10}Be dating of former glacial Lake Naskaupi (Québec-Labrador) and timing of its discharges during the last deglaciation [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 191: 31-40.
- [74] Ullman D J, Carlson A E, Hostetler S W, et al. Final Laurentide ice-sheet deglaciation and Holocene climate-sea level change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 152: 49-59.
- [75] Nørgaard-Pedersen N, Mikkelsen N, Kristoffersen Y. Late glacial and Holocene marine records from the Independence Fjord and Wandel Sea regions, North Greenland [J]. *Polar Research*, 2008, 27(2): 209-221.
- [76] Funder S, Kjeldsen K K, Kjær K H, et al. The Greenland Ice Sheet during the past 300,000 years: a review [J]. *Developments in Quaternary Sciences*, 2011, 15: 699-713.
- [77] Larsen N K, Kjær K H, Lecavalier B, et al. The response of the southern Greenland ice sheet to the Holocene thermal maximum [J]. *Geology*, 2015, 43(4): 291-294.
- [78] Young N E, Lesnek A J, Cuzzone J K, et al. Cosmogenic isotope measurements from recently deglaciated bedrock as a new tool to decipher changes in Greenland Ice Sheet size [J/OL]. *Climate of the Past*, 2020 [2022-08-03]. <https://doi.org/10.5194/cp-2020-111>.
- [79] Rasmussen S O, Bigler M, Blockley S P, et al. A stratigraphic

- framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records; refining and extending the INTIMATE event stratigraphy [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 106: 14-28.
- [80] Denton G H. The mystery interval 17.5 to 14.5 kyr ago [J]. *PAGES News*, 2006, 14: 14-16.
- [81] Goni M F S, Harrison S P. Millennial-scale climate variability and vegetation changes during the Last Glacial: concepts and terminology [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29 (21/22): 2823-2827.
- [82] Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10(4): 297-317.
- [83] Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B, et al. High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present [J]. *Nature*, 2008, 453(7193): 379-382.
- [84] Shakun J D, Lea D W, Lisiecki L E, et al. An 800-kyr record of global surface ocean $\delta^{18}\text{O}$ and implications for ice volume-temperature coupling [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 58-68.
- [85] Lisiecki L E, Stern J V. Regional and global benthic $\delta^{18}\text{O}$ stacks for the last glacial cycle [J]. *Paleoceanography*, 2016, 31(10): 1368-1394.
- [86] Belanger C, Du Jianghui, Mix A. Reconstructing paleo-oxygenation for the last 54,000 years in the Gulf of Alaska using cross-validated benthic foraminiferal and geochemical records [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2021, 36(2): e2020PA003986.
- [87] McManus J F, Francois R, Gherardi J M, et al. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes [J]. *Nature*, 2004, 428(6985): 834-837.
- [88] Grootes P M, Stuiver M. Oxygen 18/16 variability in Greenland snow and ice with 10^3 - to 10^5 -year time resolution [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1997, 102(C12): 26455-26470.
- [89] Kleman J, Fastook J, Ebert K, et al. Pre-LGM Northern Hemisphere ice sheet topography [J]. *Climate of the Past*, 2013, 9(5): 2365-2378.
- [90] Kleman J, Jansson K, De Angelis H, et al. North American Ice Sheet build-up during the last glacial cycle, 115-21 kyr [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(17/18): 2036-2051.
- [91] Briner J P, Miller G H, Finkel R, et al. Glacial erosion at the fjord onset zone and implications for the organization of ice flow on Baffin Island, Arctic Canada [J]. *Geomorphology*, 2008, 97(1/2): 126-134.
- [92] Ceperley E G, Marcott S A, Reusche M M, et al. Widespread early Holocene deglaciation, Washington Land, northwest Greenland [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 231: 106181.
- [93] Håkansson L, Alexanderson H, Hjort C, et al. Late Pleistocene glacial history of Jameson Land, central East Greenland, derived from cosmogenic ^{10}Be and ^{26}Al exposure dating [J]. *Boreas*, 2009, 38(2): 244-260.
- [94] Johnsen S J, Clausen H B, Dansgaard W, et al. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core [J]. *Nature*, 1992, 359(6393): 311-313.
- [95] Andersen J L, Egholm D L, Olsen J, et al. Topographical evolution and glaciation history of South Greenland constrained by paired $^{26}\text{Al}/^{10}\text{Be}$ nuclides [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2020, 542: 116300.
- [96] Fu Ping, Yi Chaolu. Relationships between the heights of moraines and lengths of former glaciers in Tibet and surrounding mountains [J]. *Geomorphology*, 2009, 103(2): 205-211.
- [97] Ward B C, Bond J D, Gosse J C. Evidence for a 55-50 ka (early Wisconsin) glaciation of the Cordilleran ice sheet, Yukon Territory, Canada [J]. *Quaternary Research*, 2007, 68(1): 141-150.
- [98] Tulenko J P, Briner J P, Young N E, et al. Beryllium-10 chronology of early and late Wisconsinan moraines in the Revelation Mountains, Alaska: insights into the forcing of Wisconsinan glaciation in Beringia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 197: 129-141.
- [99] Schweinsberg A D, Briner J P, Licciardi J M, et al. Cosmogenic ^{10}Be exposure dating of Bull Lake and Pinedale moraine sequences in the upper Arkansas River valley, Colorado Rocky Mountains, USA [J]. *Quaternary Research*, 2020, 97: 125-139.
- [100] Licciardi J M, Pierce K L. Cosmogenic exposure-age chronologies of Pinedale and Bull Lake glaciations in greater Yellowstone and the Teton Range, USA [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(7/8): 814-831.
- [101] Quirk B J, Moore J R, Laabs B J C, et al. Termination II, last glacial maximum, and lateglacial chronologies and paleoclimate from Big Cottonwood Canyon, Wasatch Mountains, Utah [J]. *GSA Bulletin*, 2018, 130(11/12): 1889-1902.
- [102] Rood D H, Burbank D W, Finkel R C. Chronology of glaciations in the Sierra Nevada, California, from ^{10}Be surface exposure dating [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(5/6): 646-661.
- [103] Winsor K, Carlson A E, Caffee M W, et al. Rapid last-deglacial thinning and retreat of the marine-terminating southwestern Greenland ice sheet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 426: 1-12.
- [104] Kutzbach J, Gallimore R, Harrison S, et al. Climate and biome simulations for the past 21,000 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1998, 17(6/7): 473-506.
- [105] Benson L, Madole R, Landis G, et al. New data for late Pleistocene Pinedale alpine glaciation from southwestern Colorado [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(1/2): 49-65.
- [106] Wanner H, Mercolli L, Grosjean M, et al. Holocene climate variability and change; a data-based review [J]. *Journal of the Geological Society*, 2015, 172(2): 254-263.
- [107] Viau A E, Gajewski K, Sawada M C, et al. Millennial-scale temperature variations in North America during the Holocene [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111(D9): 2005JD006031.
- [108] Wang Shaowu, Ge Quansheng, Wang Fang, et al. Abrupt climate changes of Holocene [J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, 23(1): 1-12.
- [109] Kobashi T, Menviel L, Jeltsch-Thömmes A, et al. Volcanic influence on centennial to millennial Holocene Greenland temperature change [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1441.
- [110] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294(5549): 2130-2136.

Late Quaternary glaciations in North America based on ^{10}Be exposure ages

LIU Liang, ZHAI Yijie, ZHANG Wei, CHU Zhihao

(School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, Liaoning, China)

Abstract: North America is rich in late Quaternary glaciation remnants. Over recent years, a large number of exposed ages of glacial boulders or bedrock have been obtained using cosmogenic radionuclide (CRN) dating, allowing a potential reconstruction of the North America's late Quaternary evolutionary glaciation sequence. In this paper, the ^{10}Be exposure ages of 4 357 independent samples from North America were compiled and classified according to confidence classes (A-C). All exposure ages were grouped according to the original literature and recalculated using the latest version of the exposure age calculator. Since the erosion rate of each study area could not be determined, the calculation of exposure ages in this study was based on a zero erosion assumption. We considered the ages we adopted to be minimum exposure ages. After division into confidence classes, 424 groups of 1 956 exposure ages with well-clustered and moderately-clustered classes were obtained. Due to considerable overlap of data, the overall range in glaciation in North America appeared too wide. We therefore constructed an evolutionary glaciation sequence and determined the peak age of the probability density curve for four large regions and 15 subregions in North America. The subdivision of regions at all levels was based on glacier shape, scale and topographic conditions. Combining these results with paleoclimate data, we compared and analyzed the response of the resulting evolutionary glaciation sequence to high-resolution climatic events, thereby summarizing the characteristics of each stage of the North American evolutionary glaciation sequence. The results showed that North America has experienced many glaciations in the past 150 ka. It is conservatively estimated that the glaciers in North America have experienced large-scale glaciations during at least marine isotope stage (MIS) 6/5, MIS 4/3 and MIS 2. The evolution of glaciers before the Last Glacial Maximum (LGM) was regional. Of these glaciations, the MIS 6/5 glaciation was concentrated in the western part of the United States, with peak ages of 138.7 ka and 118.7 ka, corresponding to the late MIS 6 and early MIS 5. Traces of a MIS 4/3 glaciation are only preserved in Alaska, possibly related to the atmospheric effect of the Laurentian Ice Sheet. The times when the LGM reached its maximum range may not be regionally synchronous. In addition to the principal mechanisms driven by the global climate change, changes in regional climates, the internal dynamics of different glaciers, and atmospheric effects brought about by the Laurentian Ice Sheet may also have been secondary factors. The responses of glaciers to the high-resolution climatic events known as the Heinrich Stadial 1 (HS-1), the Bølling-Allerød (B-A) interstadial and the Younger Dryas (YD) event, during the last period of deglaciation, appear to be synchronous, possibly affected by a significant change in the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC). The ^{10}Be exposure ages of North American glaciers also correlate well with the high-resolution 'Bond' events that have occurred during the Holocene. In the future, more ^{10}Be exposure age data and climate data are needed to enrich the study of the evolutionary glaciation sequence in North America during the late Quaternary.

Key words: ^{10}Be exposure ages; evolutionary glaciation sequence; climatic events; North America

(责任编辑: 王杰)