

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0100

TIAN Lide, TANG Mingxing. A review and perspective of the ice core dating methods on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):1083–1090. [田立德, 唐明星. 青藏高原冰芯定年方法回顾及新技术展望[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3):1083–1090.]

青藏高原冰芯定年方法回顾及新技术展望

田立德^{1,2}, 唐明星¹

(1. 云南大学 国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省国际河流与跨境生态安全重点实验室, 云南 昆明 650500)

摘 要: 冰芯高分辨率高保真地记录了过去不同时间尺度气候环境变化历史, 而冰芯精确定年是重建过去气候环境演化的先决条件。通过回顾青藏高原冰芯定年的常用方法, 提出了目前冰芯定年仍存在的挑战和机遇。通常的冰芯定年方法包括基于冰芯季节变化信号的数层方法、放射性标志层定年、冰川流动模型、基于其他已知时间序列的对比定年, 以及放射性同位素定年。最可靠的方法是数层的方法, 但受到冰川中下部年层逐渐减薄的制约, 冰川流动模型主要应用于冰芯中下部定年, 但存在不确定性较大而且难以验证的难题。未来冰芯学科发展对冰芯定年提出了更高要求, 随着测量技术与手段的突破, 新的方法与技术开始在极地冰芯与高山冰芯定年研究中展示了广泛的应用前景。冰芯连续测量技术(如冰芯同位素连续测量技术、激光剥蚀等离子体质谱技术)大幅度提高了冰芯测量结果的时间精度, 有可能把数层的定年方法延推到冰芯底部; 基于“原子阱痕量分析”(Atom Trap Trace Analysis, ATTA)的惰性气体(⁸⁵Kr、⁸¹Kr、³⁹Ar)放射性测年技术是一项革命性的技术, 由于惰性气体在大气中的稳定性与均匀性使其在不同时间尺度冰川冰的绝对定年中发挥出优势。低浓度的可溶性有机碳的¹⁴C定年也从实验室探索阶段开始转入试用阶段, 而且用冰量低, 有望解决冰芯中碳含量低, 定年困难的窘迫状况。此外, 人类活动影响之前处于自然背景下的冰芯³H低本底测量技术结合数据处理方法, 有望恢复过去100~200年与太阳活动周期相关的信号, 将补充放射性标志层只有近代结果的不足。这些新的技术与方法在冰芯定年中的应用有望进一步推动中低纬度高山冰芯研究。

关键词: 冰芯记录; 定年; 新技术; 气候环境记录; 青藏高原

中图分类号: P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-1083-08

0 引言

冰芯是重建过去气候与环境变化的重要指标之一。冰芯记录具有分辨率高、信息量大、保真性强、时间序列长等特点^[1]。在极地冰芯, 其记录的时间尺度可达80万年^[2], 在山地冰芯, 报道的最长记录可达末次间冰期^[3]。冰芯记录了一系列的与自然过程和人类过程相关的气温变化、温室气体、太阳活动、火山活动、生物地球化学循环等演化的信息^[4]。除了南北极冰盖的冰芯研究之外, 中低纬度冰川, 由于冰川积累量大而时间分辨率高、距离人类活动近而更易保存人类活动信息等特点, 是开展冰芯研究理想场所。在过去几十年中, 中低纬度冰芯记录为重建过去不同时间尺度气候环境演化历

史提供了直接证据^[5]。

在我国, 自从1987年在敦德冰帽钻取了中国第一支透底冰芯之后, 先后在20多个冰川区开展了冰芯记录研究。如1992年与2015年分别在古里雅冰帽钻取了中低纬地区最深的冰芯^[3,6-7]。在喜马拉雅山中段的达索普冰川与帕米尔的慕士塔格冰川钻取了海拔高度达7 000米的冰芯^[1,8]。利用这些冰芯中的稳定同位素、冰川积累量、可溶性离子、微粒、有机成分、重金属记录, 重建了过去不同时间尺度气温、降水、大气化学环境等多种气候环境指标的演化历史。特别是近几年, 冰芯在利用黑碳^[9]、有机污染物^[10]与重金属记录^[11]重建过去人类活动对环境的影响中发挥了重要作用。

收稿日期: 2020-12-17; 修订日期: 2021-06-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB40000000); 国家自然科学基金项目(41530748; 41771043)资助

作者简介: 田立德, 研究员, 主要从事稳定同位素水循环及冰芯记录现代过程研究. E-mail: ldtian@ynu.edu.cn

目前,冰芯研究在三个方面不断取得突破。第一,新的冰芯测年技术不断出现,提高了冰芯气候环境时间序列的可靠性,并可以从中挖掘更多的气候环境变化信息。第二,新的气候环境变化的指标被应用于冰芯研究中。例如冰芯中与火灾相关的有机化合物的指标^[10]，“非靶向”分析技术识别出的大量不同组分有机分子^[12]，此外还包括硝酸盐与硫酸盐的氮氧同位素成分等^[13-16]。第三,对于冰芯记录代用指标的现代过程的认识不断完善,例如冰芯记录中 $\delta^{18}\text{O}$ 的高频波动反映 ENSO 循环以及机制问题^[17-18]。

冰芯准确定年是冰芯研究的前提,是重建可靠气候环境变化时间序列的保障。多种方法可用于冰芯定年,包括常用的利用冰芯的季节变化信号从上向下数年层、确定核事件的放射性标志层、特殊事件(如火山活动)以及冰川流动模型等。在中低纬度地区,优先使用的方法仍然是数年层,特别是在冰芯的上部。对于冰川中下部,冰芯样品分析的时间分辨率随冰川年层的减薄而变低,这种方法将失效,而冰川中下部定年一般是通过冰川流动模型实现的。

与极地冰芯不同,中低纬山地冰芯在冰川积累量、冰芯时间尺度及冰川积累气候环境条件存在较显著差异,虽然冰芯定年方法存在很多共性,但中

低纬山地冰芯定年有自己的特殊性。本文回顾了山地冰芯定年的常用方法,探讨了围绕青藏高原冰芯定年的现状与存在的问题。最后,总结了最近几年出现的新的冰芯定年方法并展望了在青藏高原冰芯定年中的应用前景。

1 青藏高原冰芯定年常用方法回顾

在过去的 30 多年,青藏高原钻取了十几支透底深孔冰芯,这些冰芯的长度从数十米到 309 米,时间尺度不等。表 1 列出了青藏高原钻取的主要冰芯采用的定年方法。青藏高原冰川积累量大,几乎所有冰芯定年都利用了数年层的方法,特别是冰芯的上部。该方法基于高原山地冰川季节变化指标(包括冰芯稳定同位素、微粒含量、可溶性化学成分等)特征显著。很多冰芯也利用了 1963 年放射性标志层(β 活化度、 ^3H 、 ^{137}Cs),可以验证冰芯上部最近几十年定年结果的可靠性。此外,还有 6 根冰芯利用了冰川流动模型对冰芯下部进行定年。对于数千年以上年龄的冰芯,利用 ^{14}C 与 ^{36}Cl 放射性同位素定年,是一种辅助的方法。敦德、普若岗日与崇测冰芯都利用了 ^{14}C 定年方法。只有在古里雅冰芯定年中利用了 ^{36}Cl 定年。在实际冰芯定年中,冰芯气候环境时间序列的建立都是基于多个不同方法的综合。

表 1 青藏高原主要冰芯及利用的定年方法
Table 1 Dating methods of the main ice cores drilled on the Tibetan Plateau

冰芯名称	钻取年份	钻取深度/m	海拔/m a. s. l.	定年方法	参考文献
敦德冰芯	1987 年	139. 8	5 325	$\delta^{18}\text{O}$ 、微粒、 ^{14}C 、 β 活化度	[19-22]
古里雅冰芯	1992 年	308. 6	6 200	$\delta^{18}\text{O}$ 、 β 活化度、 ^{36}Cl	[3]
达索普冰芯	1997 年	149. 2	7 200	$\delta^{18}\text{O}$ 、 β 活化度、流动模型	[22]
马兰冰芯	1999 年	102. 0	5 680	$\delta^{18}\text{O}$ 、流动模型	[23-24]
念青唐古拉冰芯	1999 年	29. 5	5 850	δD	[25]
普若岗日冰芯	2000 年	214. 7	6 070	$\delta^{18}\text{O}$ 、微粒、 ^{14}C 、 β 活化度	[19, 26]
东绒布冰芯	2001 年	117. 1	6 518	CH_4 、 $\delta^{18}\text{Oatm}$	[19, 27]
慕士塔格冰芯	2003 年	41. 6	7 010	$\delta^{18}\text{O}$ 、 β 活化度	[8]
唐古拉冰芯	2005 年	190	5 650	离子、 $\delta^{18}\text{Oatm}$ 、Bolzan 模型	[26]
格拉丹东	2005 年	146	5 750	$\delta^{18}\text{O}$ 、离子、元素、 ^3H 、 ^{210}Pb 、流动模型	[28]
藏色岗日冰芯	2009 年	127. 7、126. 7	6 226	$\delta^{18}\text{O}$ 、离子、 β 活化度、 ^{14}C	[29-31]
	2013 年	208. 6	6 075	$\delta^{18}\text{O}$ 、污化层、微粒、Bolzan 模型	[32]
崇测冰芯	2013 年	216. 6	6 100	^3H 、 ^{210}Pb 、 ^{14}C 、光释光	[19, 33]
羌塘 1 号冰芯	2014 年	109. 0	5 890	$\delta^{18}\text{O}$ 、 ^3H 、 ^{137}Cs 、流动模型	[34-35]
古里雅新冰芯	2015 年	309. 7	6 710	$\delta^{18}\text{O}$ 、离子、微粒	[36]

2 青藏高原冰芯定年的机遇与挑战

2.1 青藏高原冰芯定年存在的限制条件

冰芯中保存的高分辨率的季节信号(物理、化

学)是冰芯高分辨率定年的主要指标。冬季与夏季不同降雪形成条件导致的季节变化(如透光性、密度等)以及降水样化学性质(稳定同位素、化学离子、黑碳记录等)的季节变化,通常作为冰芯高分辨

率定年的依据。通过季节信号定年,要求冰芯钻取点冬季与夏季都有相当量的降水,但对于青藏高原大部分地区,降水只集中于夏季季风期,导致冰芯中季节性信号强度不够,与天气尺度的冰芯信号难以区分,加大了依靠数年层进行定年的难度。目前,非季风期降水较多的区域有藏东南地区、沿喜马拉雅山脉受冬季西风槽影响显著地区以及喀喇昆仑山地区。位于喜马拉雅山中段的达索普冰芯^[37]与西段的那木纳尼冰芯^[38]都保存了非常清晰的季节信号。此外,冰川表面的后沉积过程会影响季节信号,高原内陆强的风蚀作用会破坏雪层结构,甚至侵蚀部分或全部的雪层,导致冰芯中年层信号不清甚至缺失。如2002年我们在敦德冰芯顶部钻取的数支浅冰芯的同位素记录高频波动信号不同步,而且在打钻现场发现表面积雪层理被强风破坏严重。随着气候转暖,冰川平衡线不断升高,出现冰川表面夏季融化的海拔高度不断上升,冰面消融会导致冰芯中部分或全部的年层信号损失^[39-40],影响冰芯定年。

冰芯分样的精度是影响冰芯中下部定年结果的另一个因素。通常情况下,冰芯是以2~5厘米的间距分割样品进行实验室分析测试。随着冰川深度增加,由于冰川流动变形年层减薄,一个年层的样品数量太少不足以识别出季节信号。因此,数年层的方法只针对于冰川的上部,其定年精度与冰芯中季节信号的强弱有关。冰芯上部定年结果的验证可以通过放射性标志层的深度来确定,这些放射性事件(热核实验、切尔诺贝利核泄漏事件)会在冰芯中相应位置被记录下来,利用总 β 活化度、 ^{137}Cs 、 ^3H 的浓度峰值可准确确定这一标志层。冰川中下部通常利用冰川流动模型定年,由于冰川边界和下伏地形的复杂性,冰川流动模型的定年结果随深度增加不确定性增大。以前对于冰芯底部定年缺乏有效的绝对定年手段,只有个别冰芯底部有有限的 ^{14}C 定年结果,利用 ^{36}Cl 进行冰芯定年不确定性太大,而光释光技术也只能用来限定冰芯底部冰的年龄^[33]。

由于在最早的冰芯研究中缺乏可靠的绝对定年手段,且存在认识的时代局限性,建立的冰芯时间序列的准确性存在一些问题。但随着技术的发展,对冰芯年代的认识在不断提高。敦德冰芯最初认定时间尺度可达数万年^[20],但后期发现可能只有6 000多年^[21]。古里雅冰芯目前被认为是中低纬度

钻取的时间尺度最长的冰芯^[3],但石笋同位素记录^[41]与其他冰芯同位素对比研究^[42]对这一结果提出了不同看法。

2.2 高分辨率冰芯定年结果的机遇

(1)冰芯上部年际尺度的定年结果有望重获过去更长时间尺度ENSO循环的信号。

冰芯中保存的稳定同位素信号,是反映过去气候变化或大气环流变化的指标。最近的研究发现,亚洲季风区降水及冰芯中稳定同位素信号短周期的波动与ENSO循环紧密相关^[18,35,43]。冰川是由过去降水沉积形成,冰芯忠实地保存了过去降水稳定同位素的信号。建立与树轮时间序列精度一致的冰芯年际尺度时间序列,有望从冰芯同位素记录中重建更加可靠的长时间尺度ENSO循环的历史,但目前可以验证的高分辨率定年结果主要是在冰芯上部,随着冰芯深度的增加,定年误差会逐步增大。

(2)增加长时间尺度冰芯定年可靠性,有望建立可以与其他记录相对比的气候变化时间序列。

目前中低纬度冰芯定年最大的不确定性仍然是在冰芯底部,即使极地冰芯的时间序列建立,也经历了不断调整以及与其他不同时间序列的检验过程^[44-46],包括利用极端气候事件以及冰芯包裹气体及其同位素成分变化的一致性对比。通过高分辨率测量技术、和更准确的绝对定年技术,将进一步提高深冰芯中下部定年结果的可靠性,从而为过去气候环境变化研究提供可以与其他记录对比的,可以相互验证的标准气候环境时间变化序列。

3 冰芯定年新技术与展望

近些年来,技术的发展与测量手段的不断提高在冰芯定年中得到了应用或展示了应用前景。这些方法与技术有望帮助建立更高分辨率、更可靠冰芯记录时间序列,从而推动青藏高原冰芯气候环境变化研究取得更多创新成果。这些技术与方法包括冰芯高分辨率连续测量技术、基于“原子阱痕量分析”(Atom Trap Trace Analysis, ATTA)的惰性气体放射性测年技术、冰芯 ^{14}C (DOC)定年,以及 ^3H 同位素测量技术。除了下面讨论的定年方法之外,通过与石笋、树轮等高分辨率时间序列的对比,也可能是进一步验证冰芯定年结果的一种方法。

3.1 高分辨率冰芯测量技术

测量技术与测量手段的提高不断拓展冰芯研究的内容。特别是冰芯的连续测量系统的建立,为

重建更高频气候事件研究提供了解决方案。

与以前通过切割冰芯样品块不同,通过激光吸收光谱技术和连续流技术可以实现冰芯中氢氧稳定同位素的连续测量^[47]。现在一根冰芯可以测量达数百万个同位素数据,这一技术把长时间尺度气候变化的精度提高到了年代际甚至季节变化。在南极 WAIS Divide 冰芯的水体同位素研究中,已重建了整个全新世以来的年际变化信号,分辨出了末次冰期时年际尺度到年代际尺度的南方涛动(EN-SO)高频波动^[48]。

利用激光剥蚀等离子体质谱技术(LA-ICP-MS),可以直接对固态冰芯进行多达30多种元素的连续测量,精度可以达到4 mm^[49]甚至微米级,而且不会破坏样品。这种精度足以探测冰芯底部年层中的季节变化信号。用这种方法在格陵兰冰芯的深部可以识别出以前用化学方法无法辨别的年层^[50]。

3.2 惰性气体放射性同位素定年

在青藏高原,除个别极高海拔与极低气温钻取的冰芯(如达索普冰芯^[51-52]与慕士塔格冰芯^[53])之外,大部分冰芯钻取点位置的降雪密实化过程很快,冰芯中包裹气体与冰芯中冰的年龄一致,可直接利用冰芯包裹气体放射性同位素定年。

惰性气体化学性质与物理性质稳定,而且只存在气态,因而惰性气体放射性同位素可以作为理想的定年手段^[54]。常用的3种惰性气体同位素(⁸¹Kr、⁸⁵Kr、³⁹Ar),其定年尺度涵盖了几十年~1 000年、数万年~140万年的定年区间。但这些惰性气体同位素浓度极低,通过测量放射记数的方法需要巨量的冰样,无法在实际中得到应用。“原子阱痕量分析”技术(ATOM)是基于数原子个数的方法来探测环境样品中的⁸¹Kr、⁸⁵Kr和³⁹Ar^[54]。

⁸¹Kr形成于高层大气宇宙射线激发常规Kr裂变,⁸¹Kr的半衰期长达22.9万年,因而可以认为其在大气圈中均匀分布,而且在过去150万年变化很小^[55]。⁸¹Kr首次用于南极泰勒冰川表面出露老冰的定年,确定了4个冰川冰样品的年龄最老可达12万年。这一结果也为南极蓝冰区和冰盖边缘老冰样品的定年铺平了道路^[55]。在中低纬度高山冰川,⁸¹Kr放射性同位素方法首次用于古里雅冰帽边缘底部老冰的定年,发现8个冰川冰样品估算的最老年龄介于1.5~7.5万年之间,比以前冰芯确定的冰川最老年龄低一个数量级。

³⁹Ar的半衰期为269年,其定年范围为100~1 000年左右,特别适合于高山冰川千年尺度的定年。但其同位素丰度更低,只有10⁻¹⁶,测量难度更大^[56]。ATTA方法可以用于测量³⁹Ar^[56],而且随着技术水平的改进,测量效果不断提高^[57]。在阿尔卑斯山冰川底部取得的冰川冰样本的³⁹Ar的定年结果与¹⁴C结果一致,显示了³⁹Ar方法在千年尺度冰芯定年的应用前景,为准确重建过去千年尺度气候环境变化提供了技术支持^[58]。

开展冰芯样品惰性气体放射性同位素定年的局限性主要是对于冰量需要仍较大,往往需要数公斤到数十公斤的冰样,还取决于冰中的气体含量。随着ATTA测量技术的提高,对冰的样品量的要求逐渐降低,这些方法为冰芯绝对定年提供了一个新的选择。

3.3 ¹⁴C(DOC)定年

碳的半衰期是5 730年,非常适合用来进行高山冰芯定年。但由于从冰芯中发现的碳含量很少,从冰芯中提取足量碳,并且保证提取效果与防止外界污染,仍存在技术障碍,因此以前的冰芯定年结果很少利用¹⁴C的方法。只有在敦德冰帽与普若岗日冰芯底部有单个的¹⁴C加速质谱的定年结果^[21]。目前通过技术创新,利用少量的冰就可能提取出足够的碳进行¹⁴C测定,有可能使¹⁴C定年方法在冰芯研究中得到更多应用^[59]。例如,利用不溶性颗粒有机碳(WIOC)通过加速质谱对崇测冰芯样品定年,发现该冰帽的冰形成于全新世^[19]。由于冰川所处位置大多远离碳源,可溶性有机碳(DOC)含量是不溶性有机碳的5倍,从冰芯中提取DOC开展¹⁴C定年技术取得了进展。基于新设计的设置,包括超净环境、紫外线照射氧化技术,可以使用350 mL的冰芯样品,进行碳含量低至~25 μg·kg⁻¹的冰芯样品的¹⁴C定年,适合山地冰川冰芯定年研究^[60]。

3.4 放射性同位素氚(³H)定年

³H的半衰期为12.43年,³H的来源包括太阳活动和人类活动。自然界的³H是宇宙射线与高层大气间作用产生,人类活动则主要通过热核实验生成³H。由1962年热核试验形成的³H峰值是验证冰芯上层定年结果的重要放射性标志层,并被广泛应用于青藏高原冰芯定年^[34, 61]。自然界中³H的本底浓度极低,但热核试验造成的人工³H输入大气浓度使得自然界³H的浓度增加了2~3个数量级^[62],因而降水中天然形成的³H的浓度变化无法检测出来。

与宇宙射线相关的同位素成分往往都与太阳活动的周期呈反相关关系。太阳表面的磁场变化存在 11 年的周期(太阳黑子数量变化周期),而到达地球的宇宙射线强度与太阳磁场有关。在核时代之前自然形成的 ^3H 浓度已很低,但是可以通过新的测量技术,如 ^3He 增强技术测量出来^[63]。现在不乏全球降水中 ^3H 的时间变化序列,对时间序列分析可以发现 (12.4 ± 1.8) 年的周期,与太阳活动 11 年周期一致,如果通过计算方法消除核排放的影响,这种 11 年的周期更加显著,并且降水中 ^3H 的太阳活动周期并不明显受到人类核物质排放以及水循环的影响^[62]。由于自然界中保存的 ^3H 在不断衰变,其浓度不断降低,从测量技术上把测量的精度提高到 0.005 TU 或更好,有可能在冰芯定年研究中得到应用。如果从冰芯样品中测量出 ^3H 的周期性变化,有可能把过去 200 年以内的冰芯记录定年精度提高到 1~2 年的误差范围,为高时间分辨率冰芯记录研究带来了曙光^[62]。

4 结语

冰芯气候环境变化研究是冰冻圈科学研究的重要内容之一。在过去的三十多年,青藏高原冰芯记录研究取得了众多研究成果,并在一些新的研究方向不断取得突破。近些年来,一些测量技术上的创新也推动冰芯研究取得更多新发现。其中之一是新的定年方法的应用,包括冰芯样品连续测量技术、 $^{14}\text{C}(\text{DOC})$ 定年技术、基于“原子阱痕量分析(ATTA)”的冰芯包裹气体惰性气体放射性同位素定年技术已在冰芯定年方法中崭露头角, ^3H 测量技术的提高有望在冰芯上部高分辨率定年中得到应用。这些新的方法将进一步提高冰芯气候环境变化时间序列的精度与可靠性,推进冰芯研究的发展。

参考文献(References):

- [1] Yao T, Thompson L G, Duan K, et al. Temperature and methane records over the last 2 ka in Dasuopu ice core [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2002, 45(12): 1068-1074.
- [2] Augustin L, Barbante C, Barnes P R F, et al. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core [J]. *Nature*, 2004, 429: 623-628.
- [3] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Tropical climate instability: the last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core [J]. *Science*, 1997, 276(5320): 1821-1825.
- [4] Yao Tandong, Han Jiankang, Zhang Wanchang, et al. The environmental record in glaciers and ice sheets [J]. Lanzhou Science and Technology Press, 1993. [姚檀栋, 韩健康, 张万昌, 等. 冰川与冰盖中的环境记录 [J]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993.]
- [5] Tian Lide, Yao Tandong. High-resolution climatic and environmental records from the Tibetan Plateau ice cores [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(9): 926-937. [田立德, 姚檀栋. 青藏高原冰芯高分辨率气候环境记录研究进展 [J]. 科学通报, 2016, 61(9): 926-937.]
- [6] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 188: 1-14.
- [7] Yao Tandong, Shi Yafeng, Qin Dahe, et al. Record of climate change since the last interglacial in the Guliya ice core [J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 1997, 27(5): 447-452. [姚檀栋, 施雅风, 秦大河, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究 [J]. 中国科学: D 辑 地球科学, 1997, 27(5): 447-452.]
- [8] Tian L, Yao T, Li Z, et al. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111: D13.
- [9] Wang M, Xu B, Cao J, et al. Carbonaceous aerosols recorded in a southeastern Tibetan glacier: analysis of temporal variations and model estimates of sources and radiative forcing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15(3): 1191-1204.
- [10] You C, Yao T, Xu C. Recent increases in wildfires in the Himalayas and surrounding regions detected in central Tibetan ice core records [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(6): 3285-3291.
- [11] Gabrielli P, Wegner A, Sierra-Hernández M R, et al. Early atmospheric contamination on the top of the Himalayas since the onset of the European Industrial Revolution [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, 117(8): 3967-3973.
- [12] Vogel A L, Lauer A, Fang L, et al. A comprehensive nontarget analysis for the molecular reconstruction of organic aerosol composition from glacier ice cores [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(21): 12565-12575.
- [13] Geng L, Alexander B, Cole-Dai J, et al. Nitrogen isotopes in ice core nitrate linked to anthropogenic atmospheric acidity change [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(16): 5808-5812.
- [14] Geng L, Murray L T, Mickley L J, et al. Isotopic evidence of multiple controls on atmospheric oxidants over climate transitions [J]. *Nature*, 2017, 546(7656): 133-136.
- [15] Li Z, Hastings M G, Walters W W, et al. Isotopic evidence that recent agriculture overprints climate variability in nitrogen deposition to the Tibetan Plateau [J]. *Environment International*, 2020, 138: 105614.
- [16] Sofen E D, Alexander B, Kunasek S A. The sensitivity of oxygen isotopes of ice core sulfate to changing oxidant concentrations since the preindustrial [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 10: 20607-20623.
- [17] Cai Z, Tian L, Bowen G J. Influence of recent climate shifts on the relationship between ENSO and Asian Monsoon precipitation oxygen isotope ratios [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(14): 7825-7835.
- [18] Cai Z, Tian L. Atmospheric controls on seasonal and interannual variations in the precipitation isotope in the East Asian Monsoon region [J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(4): 1339-1352.
- [19] Hou S, Jenk T M, Zhang W, et al. Age ranges of the Tibetan ice cores with emphasis on the Chongce ice cores, western Kunlun Mountains [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(7): 2341-2348.
- [20] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Holo-

- cene—late Pleistocene climatic ice core records from Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science*, 1989, 246(4929): 474-477.
- [21] Thompson L G, Davis M E, Mosley-Thompson E, et al. Tropical ice core records: evidence for asynchronous glaciation on Milankovitch timescales [J]. *Journal of Quaternary Science: Published for the Quaternary Research Association*, 2005, 20(7/8): 723-733.
- [22] Kehrwald N M, Thompson L G, Tandong Y, et al. Mass loss on Himalayan glacier endangers water resources[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(22).
- [23] Wang N, Yao T, Pu J, et al. Climatic and environmental changes over the last millennium recorded in the Malan ice core from the northern Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1079-1089.
- [24] Ninglian W, Thompson L G, Davis M E, et al. Influence of variations in NAO and SO on air temperature over the northern Tibetan Plateau as recorded by $\delta^{18}\text{O}$ in the Malan ice core[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 1-6.
- [25] Kang S, Qin D, Ren J, et al. Relationships between an ice core records from southern Tibetan Plateau and atmospheric circulation over Asia [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 153-164.
- [26] Xu Chenpeng, Li Jiule, Wang Ninglian. Climatic and environmental indications of stable oxygen isotopes in enclosed air bubbles in Tanggula ice core[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2019, 55(1): 145-152. [徐陈鹏, 李久乐, 王宁练. 唐古拉冰芯包裹气体氧稳定同位素气候环境指示意义[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(1): 145-152.]
- [27] Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, et al. The effect of snow storm in the south of Himalayas on ice core record [J]. *Journal of Meteorological*, 2001, 59(4): 509-512. [田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 喜马拉雅山南坡冬季暴雪对高原南部冰芯中稳定同位素记录的影响[J]. *气象学报*, 2001, 59(4): 509-512.]
- [28] Zhang Y, Kang S, Grigholm B, et al. Twentieth-century warming preserved in a Geladaindong mountain ice core, central Tibetan Plateau[J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 70-80.
- [29] An W, Hou S, Zhang W, et al. Significant recent warming over the northern Tibetan Plateau from ice core $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Climate of the Past*, 2016, 12(2): 201-211.
- [30] Zou X, Hou S, Zhang W, et al. An increase of ammonia emissions from terrestrial ecosystems on the Tibetan Plateau since 1980 deduced from ice core record [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114314.
- [31] Hou S, Zhang W, Fang L, et al. Brief Communication: new evidence further constraining Tibetan ice core chronologies to the Holocene[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 2109-2114.
- [32] You Chao. Historical biomass burning records in the Zangse-gangri ice core[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. [游超. 藏色岗日冰芯中生物质燃烧历史记录研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.]
- [33] Zhang Z, Hou S, Yi S. The first luminescence dating of Tibetan glacier basal sediment[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(1): 163-168.
- [34] Shao L, Tian L, Wu G, et al. Dating of an alpine ice core from the interior of the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary International*, 2020, 544: 88-95.
- [35] Shao L, Tian L, Cai Z, et al. Driver of the interannual variations of isotope in ice core from the middle of Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Research*, 2017, 188: 48-54.
- [36] Thompson L G, Yao T, Davis M E, et al. Ice core records of climate variability on the Third Pole with emphasis on the Guliya ice cap, western Kunlun Mountains[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 188: 1-14.
- [37] Yao Tandong, Duan Keqin, Tian Lide, et al. Dussop ice core accumulation record and changes in Indian summer monsoon precipitation in the past 400 years[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2000, 30(6): 619-627. [姚檀栋, 段克勤, 田立德, 等. 达索普冰芯积累量记录和过去 400 a 来印度夏季风降水变化[J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2000, 30(6): 619-627.]
- [38] Tian Lide, Yao Tandong, Wen Rong, et al. Preliminary study on the climatic significance of the isotopic records from the ice cores of Namuna Ni in the western Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Research*, 2012, 32(1): 46-52. [田立德, 姚檀栋, 文蓉, 等. 青藏高原西部纳木那尼冰芯同位素记录的气候意义初探[J]. *第四纪研究*, 2012, 32(1): 46-52.]
- [39] Tian Lide, Yao Tandong, Sun Weizhen, et al. Changes of oxygen stable isotopes during water evaporation in the central Tibetan Plateau [J] *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 159-164. [田立德, 姚檀栋, 孙维贞, 等. 青藏高原中部水蒸发过程中的氧稳定同位素变化[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(2): 159-164.]
- [40] Hou S, Qin D, Zhang D, et al. Comparison of two ice-core chemical records recovered from the Qomolangma (Mount Everest) region, Himalaya [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 35: 266-272.
- [41] Cheng H, Zhang P Z, Spötl C, et al. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500 000 years[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(1): 1-5.
- [42] Hou S, Zhang W, Pang H, et al. Apparent discrepancy of Tibetan ice core $\delta^{18}\text{O}$ records may be attributed to misinterpretation of chronology [J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(6): 1743-1752.
- [43] Yang X, Yao T, Zhao H, et al. Possible ENSO influences on the northwestern Tibetan Plateau revealed by annually resolved ice core records [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123(8): 3857-3870.
- [44] Blunier T, Spahni R, Barnola J M, et al. Synchronization of ice core records via atmospheric gases [J]. *Climate of the Past*, 2007, 3(2): 325-330.
- [45] 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.
- [46] WAIS Divide Project Members. Precise interpolar phasing of abrupt climate change during the last ice age [J]. *Nature*, 2015, 520(7549): 661-665.
- [47] Jones T R, White J W C, Steig E J, et al. Improved methodologies for continuous-flow analysis of stable water isotopes in ice cores [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(2): 617-632.
- [48] Jones T R, Roberts W H G, Steig E J, et al. Southern Hemisphere climate variability forced by Northern Hemisphere ice-sheet topography [J]. *Nature*, 2018, 554(7692): 351-355.
- [49] Reinhardt H, Kriews M, Miller H, et al. Application of LA-ICP-MS in polar ice core studies [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2003, 375(8): 1265-1275.
- [50] Sneed S B, Mayewski P A, Sayre W G, et al. New LA-ICP-

- MS cryocell and calibration technique for sub-millimeter analysis of ice cores [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61 (226): 233-242.
- [51] Xu Baiqing, Yao Tandong. A study of bubble sealing process at an altitude of 7 100 m in Dthorpe Glacier [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21 (2): 120-124. [徐柏青, 姚檀栋. 达索普冰川海拔 7 100 m 处气泡封闭过程研究 [J]. *冰川冻土*, 1999, 21 (2): 120-124.]
- [52] Yao Tandong, Xu Baiqing, Duan Keqin, et al. Records of temperature and methane concentration in the last 2 ka from Dasopu ice core on the Tibetan Plateau [J]. *Science in China: Series D Earth Science*, 2002, 32 (4): 346-352. [姚檀栋, 徐柏青, 段克勤, 等. 青藏高原达索普冰芯 2 ka 来温度与甲烷浓度变化记录 [J]. *中国科学: D 辑 地球科学*, 2002, 32 (4): 346-352.]
- [53] Tian L, Yao T, Li Z, et al. Recent rapid warming trend revealed from the isotopic record in Muztagata ice core, eastern Pamirs [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111 (D13): 1-7.
- [54] Jiang W, Bailey K, Lu Z T, et al. An atom counter for measuring ^{81}Kr and ^{85}Kr in environmental samples [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 91: 1-6.
- [55] Buizert C, Baggenstos D, Jiang W, et al. Radiometric ^{81}Kr dating identifies 120 000-year-old ice at Taylor Glacier, Antarctica [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111 (19): 6876-6881.
- [56] Jiang W, Williams W, Bailey K, et al. ^{39}Ar detection at the 10^{-16} isotopic abundance level with atom trap trace analysis [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106 (10): 103001.
- [57] Ebser S, Kersting A, Stöven T, et al. ^{39}Ar dating with small samples provides new key constraints on ocean ventilation [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1): 1-7.
- [58] Feng Z, Bohleber P, Ebser S, et al. Dating glacier ice of the last millennium by quantum technology [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116 (18): 8781-8786.
- [59] Hoffmann H, Preunkert S, Legrand M, et al. A new sample preparation system for Micro- ^{14}C dating of glacier ice with a first application to a high Alpine ice core from Colle Gnifetti (Switzerland) [J]. *Radiocarbon*, 2018, 60 (2): 517-533.
- [60] Fang L, Schindler J, Jenk T M, et al. Extraction of dissolved organic carbon from glacier ice for radiocarbon analysis [J]. *Radiocarbon*, 2019, 61 (3): 681-694.
- [61] Wang C, Tian L, Shao L, et al. Glaciochemical records for the past century from the Qiangtang Glacier No. 1 ice core on the central Tibetan Plateau: likely proxies for climate and atmospheric circulations [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 197: 66-76.
- [62] Palcsu L, Morgenstern U, Sültenfuss J, et al. Modulation of cosmogenic tritium in meteoric precipitation by the 11-year cycle of solar magnetic field activity [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 1-9.
- [63] Clarke W B, Jenkins W J, Top Z. Determination of tritium by mass spectrometric measurement of ^3He [J]. *The International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, 1976, 27 (9): 515-522.

A review and perspective of the ice core dating methods on the Tibetan Plateau

TIAN Lide^{1,2}, TANG Mingxing¹

(1. Institute of International Rivers and Eco-security, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Key Lab of International Rivers and Transboundary Eco-security, Kunming 650500, China)

Abstract: Ice core is nature archives to rebuild paleo climate and environment in varying time scale with high resolution and high fidelity, while precise ice core dating is the prerequisite for such a purpose. This paper presented a review of ice core dating methods mostly used in the Tibetan Plateau ice core research, and also addressed the challenge and opportunity involved in the ice core dating. Conventional dating methods includes annual layer counting, radioactive laying marker, glacier flow modeling, comparison with other established chronology, and radioactive dating. The most reliable dating method is the annual layer counting. However, this method is limited in the middle and lower part of ice core as the annual layer become too thin to be identified as ice moves towards the bottom of glacier. The glacier flow modeling is restricted by larger uncertainty in the dating result and hard to be verified. The achievements in the ice core research require an improvement in the ice core dating precision. Therefore, we also reviewed the new technology and methods emerged in recent years made available in the ice core dating. Ice core continuous measuring technique (e.g., ice core water isotope continuously measurement, laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry (LA-ICP-MS)), provides sub-millimeter-scale sampling resolution, and therefore, can extend the annual layer counting method to the bottom of ice core. Noble gas (^{85}Kr , ^{81}Kr , ^{39}Ar) radioactive dating method based on ATTA (Atom Trap Trace Analysis) provided a revolutionary method for absolute dating of glacier ice, as for their stability and homogeneity in the atmosphere. Dissolved organic carbon (DOC) ^{14}C dating will make its practice in laboratory ice dating due to its less ice sample size used and showed its potential in the ice core dating. In addition, low level ^3H in ice core measurement, particular prior to the nuclear test epoch, can be used to dating the ice core age in the past 1~2 centuries as for its concentration steps with the solar cycle. These new methods and technique provide the potential wide practice in the recent and future alpine ice core dating, and therefore, benefit the future ice core research.

Key words: ice core records; dating; new technologies; climate and environment records; Tibetan Plateau

(责任编辑: 侯书贵)