

编者按:

2004年11月PAGES/CLIVAR 联合工作组,在加拿大维多利亚召开了新一届工作组会议,规划2005-2010年的研究工作。会议共提出4个重点,其中第1个即过去千年的气候变率。PAGES News于2005年8月出版了中国专号(Vol.13, No.2),其中有4篇文章涉及到近千年中国的气候变化。为什么把近千年气候变化的研究置于如此重要的地位?其中主要的原因就是为了预测未来的气候变化。美国科学家M. E. Mann建立了近千年全球平均温度曲线,认为20世纪90年代是近千年来最暖的十年,1998年是最暖的一年。这个结论被IPCC第三次科学评估报告(2001年)引用。随后,在国际上围绕这个问题展开了热烈的讨论。尽管目前科学界的主导思想是弱化、甚至否认这个结论,只承认20世纪90年代和1998年是19世纪有观测记录以来最暖的十年和一年,但是,近千年气候变化仍是一个热门问题。因此,研究近千年中国的气候变化有重要的意义。为了促进这方面的研究,本刊邀请了一批作者撰稿,汇集成“千年气候变化专栏”,提供近千年中国气候变化的第一手资料。但是,读者也可以看到,对过去千年中国气候变化的估计并不完全一致,尤其对中国西部分歧较大,这可能与不同作者使用的资料、研究区域和方法不同有关,也反映了以代用记录重建历史气候的复杂性。

文章编号: 1673-1719 (2006) 03-0099-05

冰芯记录的过去 1000 a 青藏高原温度变化

Temperature Change over the Past Millennium Recorded in Ice Cores
from the Tibetan Plateau

姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 杨梅学, 段克勤, 王宁练, 王有清, 侯书贵

(中国科学院 冰冻圈与环境联合重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 根据青藏高原4支记录超过1000 a的冰芯(普若岗日冰芯、古里雅冰芯、达索普冰芯和敦德冰芯)中氧同位素($\delta^{18}\text{O}$) 10 a平均值变化,研究了青藏高原最近1000 a来的气温变化。4支冰芯记录的过去1000 a气温均是在冷暖波动中逐渐上升,但在变化幅度上存在区域性差异。利用4支冰芯记录恢复的青藏高原千年气温曲线表明,青藏高原中世纪暖期持续到13世纪,期间经历了3个暖期和冷期;14世纪和16世纪是相对冷期,15世纪和17世纪是相对暖期,17世纪末至1920 AD气候冷暖波动频繁;以后快速升温至今,目前为过去1000 a来最暖期。青藏高原过去1000 a气温的总体变化趋势与北半球气温的变化趋势基本相一致。

关键词: 青藏高原; 冰芯记录; 过去千年; 气温; $\delta^{18}\text{O}$

中图分类号: P467 **文献标识码:** A

引言

随着全球气候变暖对人类的威胁日益增大,人

们对气候变化的研究也更多地关注目前全球变暖在过去长期气候变化中的位置,或者说更多地关注过去自然气候的变幅^[1-2]。由于仪器记录资料序列太

收稿日期: 2006-02-21; 修订日期: 2006-04-17

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2005CB422000), 国家自然科学基金创新群体项目(40121101); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-118)资助

作者简介: 姚檀栋(1955-), 男, 研究员, 主要从事冰川、冰芯与气候环境变化研究。E-mail: tdyao@itpcas.ac.cn

短,因此需要通过各种有效手段,把器测记录延伸到更长的古气候记录上去。

近年来,冰芯、树轮、珊瑚和文献记录(文字记载)等高分辨率代用资料在研究过去温度变化中发挥了重要的作用,但仍需要进一步完善。最近, Mann *et al.* [3-4] 的研究结果就受到了 McIntyre *et al.* [5] 的挑战,他们认为 Mann *et al.* 的研究工作存在两个主要问题:一是使用的资料有问题(北美的树轮资料所占比重太大);二是资料的分析方法有问题。其核心问题是代用资料的使用。因为当把不同地区不同的气候替代指标同时用于温度变化研究时,要做到各个指标的量化的同一性、精确性是十分困难的。比较理想和精确的研究方法应该是如同温度记录那样,不管在什么地方都采用单一(或同一)指标进行研究。当然,由于在不同地区取得同一替代指标受到极大限制,因而可以进行这种研究的地区并不多。

青藏高原是目前具备利用单一(或同一)替代指标进行大范围气候变化研究的理想地区,这就是青藏高原的冰芯记录。目前已经从青藏高原不同区域进行了广泛的冰芯研究,敦德冰芯 [6-7]、古里雅冰芯 [8-9]、达索普冰芯 [10-11]、珠峰绒布冰芯 [12-14] 等,都从 $\delta^{18}\text{O}$ 角度研究了温度的记录过程和记录结果。除了珠峰绒布冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示为季风降水效应之外,其余几支冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录均反映了气温的变化。最近, Yao *et al.* [15] 对青藏高原中部的普若岗日冰原也进行了冰芯研究,这使得通过冰芯记录研究青藏高原古气候变化的区域特征成为可能。本文将普若岗日冰芯和已发表的青藏高原冰芯研究中超过 1000 a 的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录为基础,同时尽可能考虑地理分布,研究过去 1000 a 来青藏高原的温度变化。

1 过去 1000 a 青藏高原气候变化的冰芯记录

图 1 表示用于本研究的青藏高原冰芯的位置分布,可以看出,在东西南北中几个关键位置都已取得了冰芯记录。敦德冰芯记录 [6-7] 是在青藏高原首次获取的冰芯记录,这一记录不但揭示了末次冰期

以来的气候环境变化,而且从冰芯记录中反映出 20 世纪 50 年代以来急剧变暖的特征。古里雅冰芯 [8-9] 作为青藏高原时间跨度最长的冰芯记录,揭示了青藏高原过去十多万年来气候变化。达索普冰芯记录 [10-11] 作为青藏高原地区海拔最高的冰芯记录,为研究印度季风长期变化特征提供了良好载体。普若岗日冰原处在青藏高原中部(藏北高原),因此,从这里提取的冰芯就成了研究整个青藏高原气候变化的关键链条。1999-2000 年,我们在此成功地钻取了冰芯,通过综合室内分析,已取得初步结果 [15]。

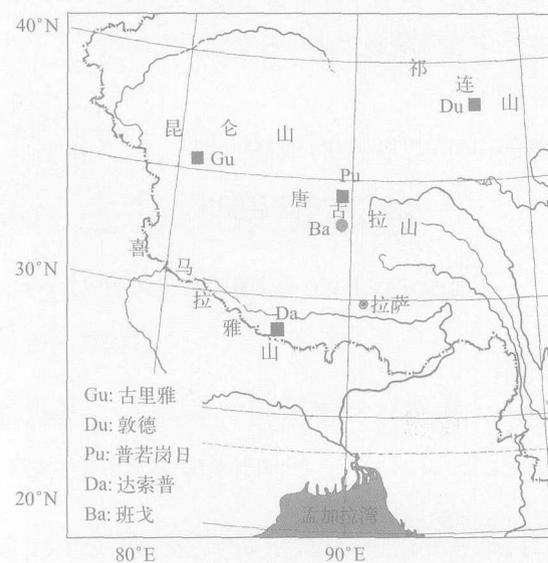


图 1 本文采用的青藏高原冰芯记录(古里雅、敦德、普若岗日、达索普冰芯)提取点(图中的班戈是指班戈气象站,该站记录的温度变化与普若岗日冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录有良好的正相关关系)

Fig. 1 The drilling sites of ice cores of Guliya, Dunde, Puruogangri and Dasuopu over the Qinghai-Tibetan Plateau

冰芯中温度变化的替代指标是稳定同位素,这也是南北极冰芯记录中长期使用的温度替代指标。关于青藏高原大气降水中的稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$)是否代表温度变化,以前从未进行过任何研究。直到 1989 年,在青藏高原建立大气降水稳定同位素研究站才开始相关的研究,至今已进行了十多年。随着时间的延长、区域的扩展和资料的积累,对这一问题的认识也渐趋清晰 [16-17]。现在可以有根据地说,青藏高原大气降水中的稳定同位素可以反映温度的变化。在青藏高原北部,这种关系更为明显,因其主要反

映降水时的同位素分馏温度。在青藏高原南部,这种关系主要反映海洋过程,即可以反映较长时间尺度上温度的变化过程。

因此,根据以上这些记录建立平均趋势曲线应该对整个青藏高原气候变化有较好的代表性。Yao *et al.* [15, 18] 根据这些点的记录,曾就青藏高原过去几十年冰芯记录的气候变化与青藏高原 20 世纪 50 年代以来有气象记录的重叠部分进行了对比。结果表明,用这几个点的冰芯稳定氧同位素记录平均值反映的温度变化与整个青藏高原同一时期气象记录平均值所反映的温度变化是一致的。因而,利用多点冰芯记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值变化可以较好地揭示过去青藏高原的温度变化特征,这也是以几个点的冰芯稳定氧同位素记录研究过去 1000 a 青藏高原温度变化的基础。

图 2 是考虑时间序列长度和地理分布提出的青藏高原 4 个超过 1000 a 的冰芯记录,这 4 个记录都是在恢复的逐年变化数据基础上,计算出来的 10 a 平均值。由于取自青藏高原不同的地区,这 4 个记录本身就反映了其所在地区的气候特征(表 1)。达索普冰芯取自喜马拉雅山中段希夏邦马峰北坡的达索普冰川海拔 7200 m 处,因此 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低 (-20.3‰)。普若岗日冰芯和古里雅冰芯都取自海拔 6200 m 处,但前者的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-15.8‰) 略低于后者 (-15.5‰),这可能是由于普若岗日冰原的面积大于古里雅冰帽,冰川对周围的冷却效应更大的缘故。敦德冰芯的钻取点海拔最低, $\delta^{18}\text{O}$ 值也最高。近年来的研究发现,在青藏高原及周围地区,大气降水中的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (‰) 与气温 T ($^{\circ}\text{C}$) 的关系可以用 Dansgaard 提出的模型表示,即:

$$\delta^{18}\text{O} = A \cdot T + B \text{ 或 } \Delta(\delta^{18}\text{O}) = A \cdot \Delta T$$

式中: A 、 B 分别为根据观测结果计算出来的系数与常数。在青藏高原地区, A 值随地区的变化而变化。一般在高海拔地区 A 值大,表明 $\delta^{18}\text{O}$ 对温度的变化比较敏感;在低海拔地区,影响 $\delta^{18}\text{O}$ 的因子较多,对温度变化的反应不如高海拔地区敏感,因此 A 值较小。现在已获取的 A 值最大为 $0.7(\text{‰})/^{\circ}\text{C}$ 。如果以此系数计算表 1 中 $\delta^{18}\text{O}$ 所代表的温度差值 (ΔT_1),

则达索普与普若岗日相差 6.43°C ; 普若岗日与古里雅相差 0.43°C ; 古里雅与敦德相差 6.71°C 。这与表 1 中所计算的各冰芯点之间高度差所代表的温差 (ΔT_2) 基本一致。这从另一方面说明了 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度之间密切的物理关系。

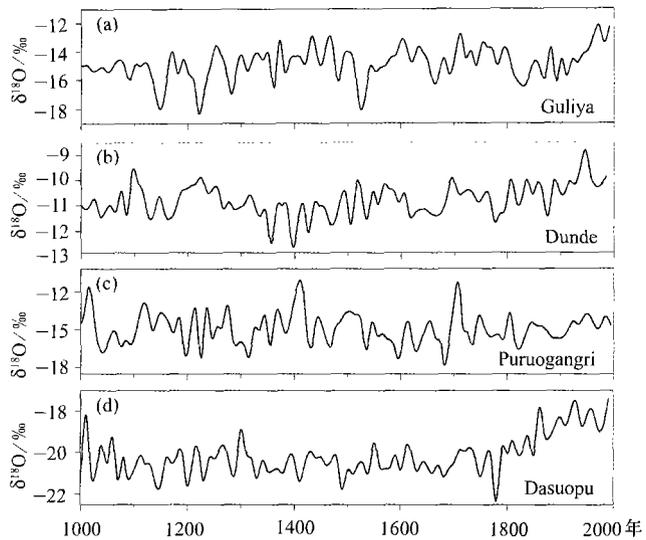


图 2 古里雅冰芯 (a)、敦德冰芯 (b)、普若岗日冰芯 (c) 和达索普冰芯 (d) 记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 在过去 1000 a 的变化

Fig. 2 Variations of $\delta^{18}\text{O}$ in the past 1000 years recorded in ice cores of Guliya (a), Dunde (b), Puruogangri (c) and Dasuopu (d) in the Tibetan Plateau

表 1 不同冰芯之间的 $\delta^{18}\text{O}$ 值、海拔高度及其相应的温差
Table 1 The values of $\delta^{18}\text{O}$, elevation and their relevant temperature differences among different ice cores

冰芯名称	海拔/m	平均 $\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\Delta T_1/^{\circ}\text{C}$	$\Delta T_2/^{\circ}\text{C}$
达索普	7200	-20.3	6.43	6.4~7.0
普若岗日	6200	-15.8	0.43	0.0
古里雅	6200	-15.5	6.71	5.8~6.3
敦德	5300	-10.8		

注: ΔT_1 和 ΔT_2 分别表示由于 $\delta^{18}\text{O}$ 的差别和海拔不同而造成的相邻冰芯记录的温度差

2 冰芯记录的过去 1000 a 青藏高原气候变化的一些特征

图 3 (a) 是以图 2 为基础进行标准化计算后得到的 4 条冰芯稳定氧同位素记录的平均值曲线, 该曲线可以作为过去 1000 a 青藏高原的温度变化曲线。

可以看出,过去 1000 a 的最初 300 a 是由温暖气候主导的,这一时期也正是欧洲的中世纪暖期。中世纪暖期一般认为是 800–1200 AD。在青藏高原,这一暖期由 3 次暖期和 3 次冷期组成,3 次冷期时的稳定氧同位素标准化值下降 0.5,3 次暖期的稳定氧同位素标准化值上升 0.7。

从 11 世纪末开始,气候逐渐变冷,但中世纪暖期特征在记录中还是比较明显的。15 世纪的升温也十分明显,其温暖程度几乎和中世纪暖期相当。经过 15 世纪的升温之后,进入了十分明显的 16 世纪冷期。17 世纪早期的暖期温暖程度几乎和 15 世纪相当,但从 17 世纪下半叶开始,气候系统处于一种频繁的波动之中,或者说气候系统在这个时候是极不稳定的。这种不稳定过程一直持续到 1920 AD 左右,然后开始快速升温。在 20 世纪 50 年代初出现过一次短暂降温之后,气候急剧变暖。将过去 1000 a 作为一个整体看,大致可以认为是一个逐渐升温的趋势。但更严格地讲,是在中世纪暖期的降温事件以后,气候在波动中逐渐变暖。但 20 世纪 80 年代以后的升温是过去 1000 a 中最强的。

那么,整个青藏高原的气候变化与全球的气候变化有什么关系呢? Jones *et al.*^[19] 的工作为进行青藏高原与北半球的气候对比研究奠定了基础。由青藏高原平均温度曲线和北半球平均温度曲线的比较(图 3 (a), (b)) 可见,青藏高原的气候变化与北半球气候变化的总体趋势是一致的,但也存在差异。如

在 19 世纪的前几十年,北半球经历了快速变冷,18 世纪的气候接近于长期平均值,整个 16 世纪是冷期。17 世纪的平均温度比 1961–1990 AD 平均值低 0.5℃,这是过去 1000 a 来持续时间最长的冷期,但其寒冷程度没有 19 世纪强。在青藏高原冰芯记录中,这些事件都存在时间上的错位。

3 结语与结论

以上分析表明,4 条冰芯记录反映了青藏高原一些共同的气候变化特征。例如,4 条记录都表明过去 1000 a 气温是在波动中逐渐上升的;都反映了小冰期的变冷;中世纪暖期也有不同程度的反映;20 世纪暖期十分明显等。这就是说,建立一条多个冰芯记录的平均曲线,应该能够基本揭示青藏高原区域气候变化的基本特征。目前这一研究正在进行之中。

综上所述,青藏高原普若岗日冰芯、古里雅冰芯、达索普冰芯和敦德冰芯中的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录表明,青藏高原不同区域 1000 a 来的气温总体变化趋势基本相一致,但中世纪暖期、小冰期和 20 世纪的快速升温的变化幅度存在时空差异。由 4 个冰芯记录初步恢复的青藏高原千年温度曲线与北半球气温相比,总体变化趋势基本一致,即自中世纪暖期至 17 世纪末气温在冷暖波动中呈线性下降趋势,18 世纪初至今是过去 1000 a 升温最剧烈的时期。

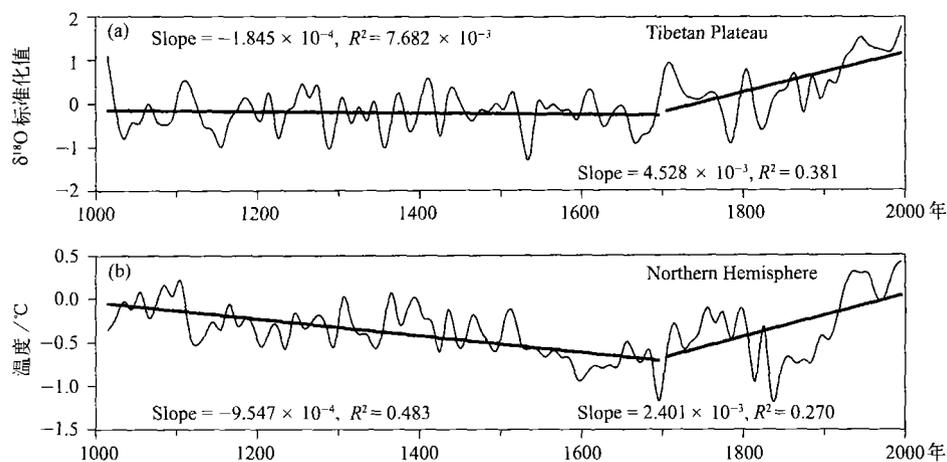


图 3 青藏高原温度变化曲线 (a) 与北半球温度变化曲线 (b) 的比较

Fig. 3 Comparison of temperature variation between the Northern Hemisphere and Tibetan Plateau

参考文献

- [1] Jones P D, New M, Parker D E, *et al.* Surface air temperature and its changes over the past 150 years [J]. *Reviews of Geophysics*, 1999, 37: 173-199.
- [2] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium [J]. *Science*, 2001, 292: 662-667.
- [3] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries [J]. *Nature*, 1998, 392: 779-787.
- [4] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern Hemisphere temperatures during the past millennium: inferences, uncertainties, and limitations [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26: 759-762.
- [5] McIntyre S, McKittrick R. Hockey sticks, principal components, and spurious significance [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32 (3): L03710, doi:10.1029/2004GL021750.
- [6] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M, *et al.* Holocene-Pleistocene climate ice core record from Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science*, 1989, 246: 474-477.
- [7] Yao Tandong, Xie Zichu, Wu Xiaoling, *et al.* Climatic change since the Little Ice Age as recorded in the Dunde ice cap [J]. *Science in China (Series D)*, 1991, 34 (6): 760-767.
- [8] Thompson L G, Yao Tandong, Mosley-Thompson E, *et al.* Tropical climate instability: the last glacial cycle from Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science*, 1997, 276: 1821-1825.
- [9] Yao Tandong, Qin Dahe, Tian Lide, *et al.* Variations in temperature and precipitation in the past 2000 years on the Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 39: 425-433.
- [10] Duan Keqin, Wang Ninglian, Li Yuefang. Accumulation in Dasuopu ice core in Qinghai-Tibet Plateau and solar activity [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (11): 1038-1041.
- [11] Thompson L G, Yao Tandong, Mosley-Thompson E, *et al.* A high resolution millennial record of the south Asian Monsoon from Himalayan ice cores [J]. *Science*, 2000, 289: 1916-1919.
- [12] Hou Shugui, Qin Dahe, Wake C P, *et al.* Climatological significance of ice core net-accumulation recorded at Mt. Qomolangma (Everest) [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (3): 259-264.
- [13] Qin Dahe, Hou Shugui, Zhang Dongqi, *et al.* Preliminary results from the chemical records of an 80.4 m ice core recovered from East Rongbuk Glacier, Mt. Qomolangma (Everest) [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 35: 278-284.
- [14] Kang Shichang, Mayewski P A, Qin Dahe, *et al.* Glaciochemical records from a Mt. Everest ice core: relationship to atmospheric circulation over Asia [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36 (21): 3351-3361.
- [15] Yao Tandong, Li Zexia, Thompson L G, *et al.* $\delta^{18}\text{O}$ record in Tibetan ice core reveals differences in climatic changes [J]. *Annals of Glaciology*, 2006: in press.
- [16] Yao Tandong, Masson V, Jouzel J, *et al.* Relationships between $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation and surface air temperature in the Ürümqi River Basin, east Tianshan Mountain, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26 (33): 3473-3476.
- [17] Tian Lide, Yao Tandong, Atusi Numaguti, *et al.* Stable isotope variations in monsoon precipitation on the Tibetan Plateau [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2001, 79 (5): 959-966.
- [18] Yao Tandong, Thompson L G, Mosley-Thompson E, *et al.* Climatological significance of $\delta^{18}\text{O}$ in north Tibetan ice cores [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (D23): 29 531-29 537.
- [19] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium [J]. *Science*, 2001, 292: 662-667.