

# 青藏高原冰芯过去 100 年 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与温度变化\*

姚檀栋<sup>\*\*</sup> 郭学军 Lonnie Thompson 段克勤 王宁练  
蒲建辰 徐柏青 杨晓新 孙维贞

( 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085; 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000;  
Byrd Polar Research Center, The Ohio State University, USA)

**摘要** 以羌塘高原普若岗日冰原钻取的 213 m 冰芯中记录为基础, 研究了过去 100 年来  $\delta^{18}\text{O}$  变化所反映的这一地区的温度变化. 结合已获取的青藏高原南部的达索普冰芯、西北部的古里雅冰芯和东北部的敦德冰芯, 综合研究了青藏高原温度变化的区域差异. 结果表明, 青藏高原不同地区冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  变化各有特点, 特别是南、北差异和东、西差异十分明显. 但 4 根冰芯记录均反映出过去 100 年来  $\delta^{18}\text{O}$  增加的趋势, 说明过去 100 年来青藏高原在不断变暖. 将  $\delta^{18}\text{O}$  记录所反映的青藏高原温度变化、青藏高原气象记录的温度变化同北半球温度变化比较研究发现, 这些记录所反映的过去 100 年总体变暖趋势是一致的.

**关键词** 青藏高原 冰芯 温度

青藏高原的气象站不但分布比较稀疏, 而且开始记录的时间比较晚: 大部分仅开始于上世纪 60 年代. 其地理分布格局也很不均匀: 大多集中在高原东部和南部, 高原中部和西部的许多地区至今没有气象站. 因此, 通过代用指标的研究揭示青藏高原中部和西部的温度变化特征, 是一条重要途径. 通过代用指标研究过去气候变化的最高目标是获得大到区域范围、细到季节尺度的各种气候分量的变化特征. 因此, 代用指标研究的关注焦点除了单一站点的年际变化之外, 还有大范围气候变化特征. 已有学者<sup>[1-3]</sup>

利用不同代用指标探讨了过去 2000 年青藏高原的温度变化. 过去 100 年温度变化大范围特征的研究主要在中国东部<sup>[4]</sup>. 就冰芯研究而言, 从 20 世纪 80 年代开始, 已经从不同地点、不同时间尺度揭示了研究地区气候变化的重要特征<sup>[5-11]</sup>. 其中也有过去 100 年单点冰芯记录的温度变化的研究<sup>[5]</sup>. 但羌塘高原这个关键地区由于不容易接近, 无论是气象记录还是冰芯记录都一直处于空白状态. 1999~2000 年, 我们在羌塘高原的普若岗日冰原上钻取了冰芯. 本文将以前普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录研究为基础, 结合其他冰芯记

收稿日期: 2004-09-28; 接受日期: 2005-08-02

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX-SW-339, KZCX-SW-118)、国家自然科学基金创新群体基金(批准号: 40121101)和科技部国际合作计划“青藏高原晚第四纪环境变迁过程”项目共同资助

\*\* E-mail: [tdyao@itpcas.ac.cn](mailto:tdyao@itpcas.ac.cn)

录, 探讨青藏高原过去 100 年的温度变化特征.

## 1 普若岗日冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录

普若岗日冰原(33°44' ~34°04' N, 89°20' ~89°50' E) (图 1)位于羌塘高原、唐古拉山西端. 该冰原由数个冰帽型冰川组成, 面积 423 km<sup>2</sup>, 冰储量 52.52 km<sup>3</sup>, 冰川雪线海拔 5620~5860 m. 普若岗日冰原顶部是宽坦贯通、开阔的粒雪原. 表面南北贯通的平坦区域面积达 150 km<sup>2</sup>以上, 冰雪积累补给区域宽大. 从冰原呈辐射状向周围溢出 50 多条长短不等的冰舌, 最长的伸至山麓地带, 形成宽尾状冰舌, 末端海拔一般为

5350~5800 m. 巨大的冰体和平坦的冰下与冰面地形, 使得普若岗日冰原提供了保存过去气候环境记录的理想条件.

1999 年, 我们首次考察了普若岗日冰原. 在确定了冰川地貌、冰温、物质平衡、冰芯钻孔位置后, 于 2000 年再登普若岗日冰原, 并钻取了 4 根共 600 多米长的冰芯(分别为 213, 150, 160, 86 m). 本研究所分析的是在海拔 6200 m 处钻取的 213 m 冰芯. 冰芯处理是在中国科学院冰芯与寒区环境重点实验室进行的. 冰芯共切成 6000 多个样品, 并在 MAT-252 气体稳定同位素比质谱仪上进行了  $\delta^{18}\text{O}$  测定.

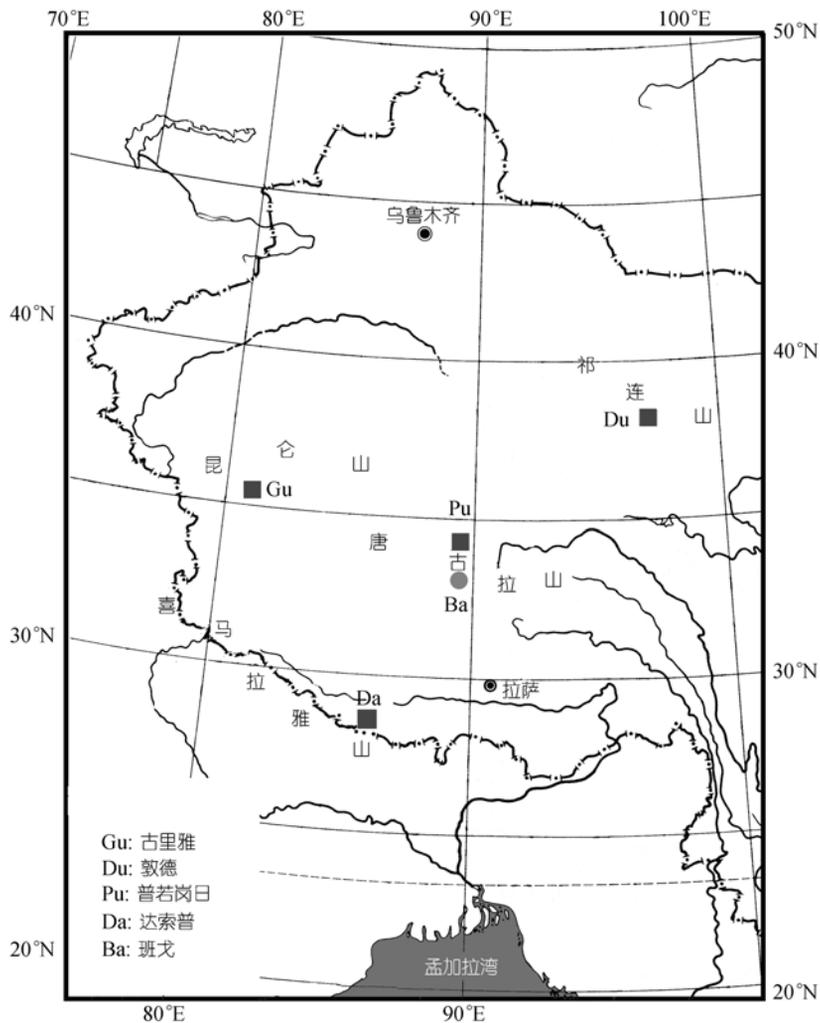


图 1 普若岗日及青藏高原其他相关冰芯钻取点分布图

冰芯定年的核心是如何从冰芯中区分每年的降雪年层及厚度。对普若岗日冰原地区的实地考察和冰川雪坑研究发现, 这一地区每年春夏之间陆源物质被风搬运到冰面而形成的污化层是区分这一地区每年降雪年层的一个良好指标。在普若岗日冰芯中, 每年形成的污化层很明显, 通过污化层与污化层之间界限的测定, 也就确定了每年的年层和厚度。因此通过计算污化层的个数就可以确定上部冰层的年龄。污化层定年的结果与利用氧同位素季节变化得到的定年结果可以互相印证。在这样确定的年层序列中, 1963 年对应的冰层深度(14 m)与 1962 年前苏联核试验所产生的  $\beta$  峰值对应的冰层深度吻合。几种方法的相互印证证明普若岗日冰芯的年层划分是正确的。

利用冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  记录恢复温度变化的主要依据是, 降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  是降水时水汽凝结高度气温的函数<sup>[12,13]</sup>。由于水汽凝结高度气温与近地面气温有密切关系, 因此降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  也就成为研究地面气温变化的指标。越来越多的研究表明, 极地冰芯和中低纬度山地冰芯中的  $\delta^{18}\text{O}$  都与当地气温存在正相关关系<sup>[14-16]</sup>。特别是近年来青藏高原降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的研究进一步证实了这种关系<sup>[16-19]</sup>。研究发现, 在青藏高原北部, 这种关系更好; 在青藏高原南部, 虽然降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  在季节和年际时间尺度上存在降水量效应, 但在 10 年或更长时间尺度上, 降水中的  $\delta^{18}\text{O}$  与温度仍存在正相关关系(图 2(c))。因此, 我们认为, 普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录所反映的主要是过去温度变化。我们将普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录与距其最近的气象站——班戈气象站的气温记录进行了比较(图 2)。图 2(a) 是普若岗日冰芯上部 34.8 m(对应于过去 100 a)的  $\delta^{18}\text{O}$  随深度的变化, 图 2(b) 是 1900 年以来  $\delta^{18}\text{O}$  的逐年变化, 图 2(c) 是距普若岗日冰原最近的班戈气象站自 1957 年以来的气温记录与这一时期普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的比较。从图 2(c) 可以看出, 近 50 年来普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的温度变化与班戈气象站气温记录比较一致( $r = 0.3$ ), 同时记录了过去 40 多年来气候变暖的特征。这表明普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录反应了当地的气温变化。需要指出的是, 尽管本文是将普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录作为年平均温度指标, 但它和实际的年平均温度是有差异的。因为冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录是

通过每次降水事件积累起来的。根据对班戈气象站气象资料的分析, 夏季降水的比例大于年总降水量的 70%。因此该冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录虽然可作为年平均温度指标, 但它主要反映夏季温度的变化。

## 2 青藏高原冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的空间变化

图 3 是普若岗日冰芯、敦德冰芯、古里雅冰芯和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的比较。可以看出,  $\delta^{18}\text{O}$  值存在由南向北逐渐增大的趋势。达索普冰川(约为  $28^\circ\text{N}$ )位于高原南部喜马拉雅山, 过去 100 年达索普冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-19.88\%$ ; 普若岗日冰原(约为  $33^\circ\text{N}$ )和古里雅冰帽(约为  $35.5^\circ\text{N}$ )位于高原中部, 两冰芯中过去 100 年  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-14.67\%$  和  $-14.25\%$ ; 敦德冰帽(约为  $37^\circ\text{N}$ )位于青藏高原北部, 过去 100 年  $\delta^{18}\text{O}$  平均值为  $-9.93\%$ 。4 根冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  从南向北逐渐增大的这种空间变化特征, 是这 4 个点海拔高度和季风降水因子综合影响的结果。

从图 3 看出, 4 根冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录反映出很强的区域差异性。从年际变化看, 很难找出两个完全相同的  $\delta^{18}\text{O}$  记录。另外, 达索普和古里雅冰芯记录都显示上世纪 80 年代以来的升温, 而普若岗日冰芯记录这一时期则有降温趋势, 说明不同地区短期气候变化差异较大。增温幅度在不同地区也有差异: 按线性趋势计算, 敦德、普若岗日、古里雅和达索普 4 根冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录在过去 100 年里分别增加了  $-0.5\%$ 、 $1.0\%$ 、 $1.3\%$  和  $1.5\%$ 。敦德和普若岗日增幅最小。但从总体趋势变化看, 可以看到某些记录之间的相似性。如, 1900 年以来普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  所反映的增大趋势不显著, 这与敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录有相似之处。与之形成对照的是达索普和古里雅冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  增大趋势显著。从图 3 所示年代际气候变化看, 普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录所反映的气候事件与达索普冰芯所反映的事件比较一致, 古里雅与敦德冰芯记录的相似性较多。根据 4 根冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的长期趋势所反映的这些空间分布差异, 可以将这 4 个冰芯记录分为南、北两大组, 即以普若岗日和达索普为代表的青藏高原南部组和以古里雅和敦德为代表的青藏高原北部组。这就是说, 除了不同地区气候变化的各种差异外, 在青藏高原南、北区域可能存在气候变化的系统差异。

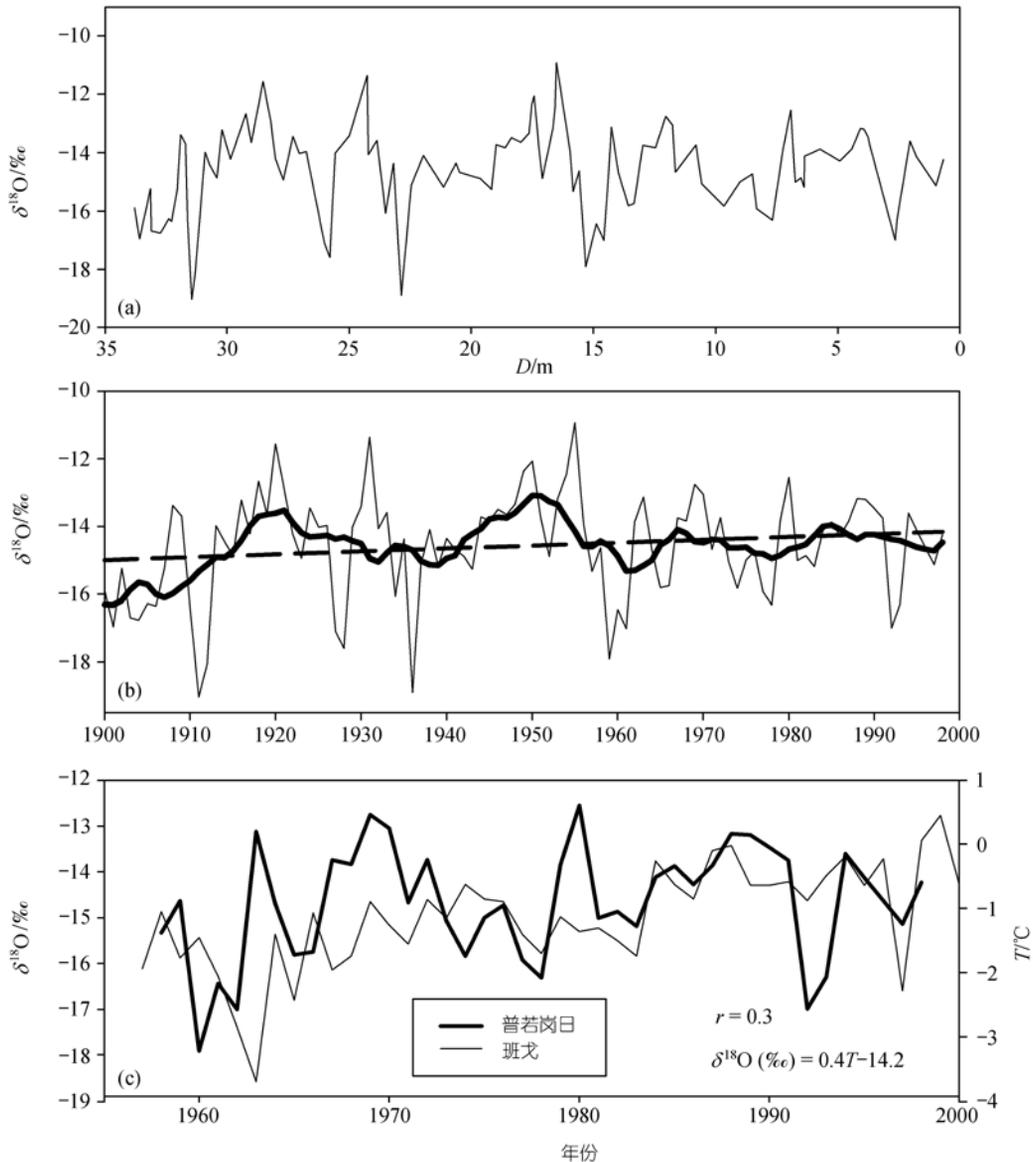


图 2 普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录与附近班戈气象站气温记录的比较

- (a) 普若岗日冰芯上部 34.8 m (对应于过去 100 a) 的  $\delta^{18}\text{O}$  随深度的变化; (b) 1900 年以来普若岗日冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  逐年变化 (细线) 和 5 年滑动平均 (粗线);  
 (c) 普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录 (粗线) 与距其最近的班戈气象站自 1957 年以来气温记录 (细线) 的比较

表 1 普若岗日、敦德、古里雅和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录之间的相关系数。其中古里雅、普若岗日和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录时段为 1900~1992 年, 而敦德为 1900~1985 年。

但气温变暖幅度、谱分析和相关系数分析则揭示

了 4 根冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  空间变化东、西差异的存在。从图 3 可以看出, 古里雅、达索普和普若岗日 3 根冰芯中的  $\delta^{18}\text{O}$  值在过去一个世纪都呈明显的增大趋势, 而敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的增大趋势没有其他 3 根冰芯明显, 反映出青藏高原温度变化的东、西区域差异。当

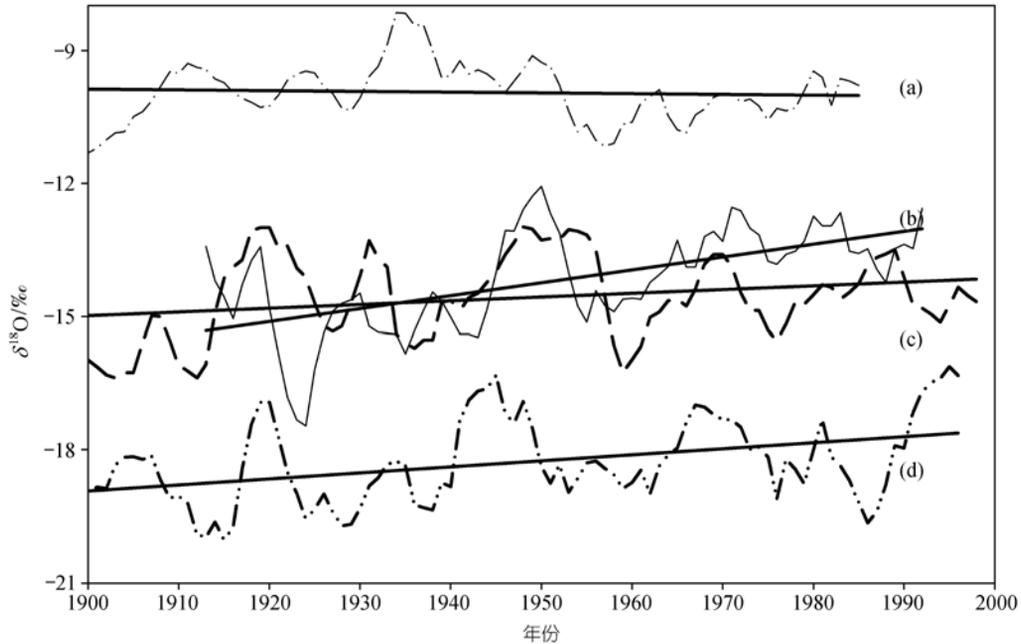


图 3 普若岗日冰芯、敦德冰芯、古里雅冰芯和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录比较

(a) 敦德冰芯记录; (b) 古里雅冰芯记录; (c) 普若岗日冰芯记录; (d) 达索普冰芯记录. 图中的直线为趋势线

表 1 普若岗日、敦德、古里雅和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录之间的相关系数

	普若岗日	达索普	古里雅	敦德
普若岗日	1			
达索普	0.13	1		
古里雅	0.06	0.14	1	
敦德	-0.07	-0.19	0.05	1

然, 敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录于 1986 年钻取, 没有 1986 年以后的  $\delta^{18}\text{O}$  记录, 而这一时期正好是过去 100 年来全球变暖最强烈的时期. 因此, 敦德冰芯没有这一时期的  $\delta^{18}\text{O}$  记录, 可能也是影响其整体趋势的一个因子. 反映东西差异的另外一个证据是对 4 根冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的周期分析. 由图 4 可见, 4 根冰芯记录具有不同的周期变化, 但这个特点从图 3 中可以直观地看出. 这就是说, 太阳活动对这个地区的气候变化有重要影响. 但与敦德冰芯记录不同的是, 古里雅、达索普和普若岗日 3 根冰芯中的  $\delta^{18}\text{O}$  变化都有 7 年左右的周期. 相关系数分析也反映东西差异性. 根据 4 根冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录之间的相关系数分析(表 1), 达索普、古里雅和普若岗

日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录之间有较高的相关系数, 而敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录与古里雅冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录相关系数较低, 与达索普和普若岗日冰芯记录呈反相关关系, 这是反映青藏高原降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化东、西差异的一个重要指标.

以上证据说明, 普若岗日、古里雅和达索普和敦德 4 根冰芯可能不但记录了气候变化的南、北差异, 也记录了东、西差异. 这 4 根冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  变化所揭示的南、北差异和东、西差异, 实际上反映了青藏高原南部和北部、东部和西部不同气候区的差异. 青藏高原北部和南部气候区差异的本质是: 高原南部主要受印度季风的影响, 但高原北部则在受夏季印度季风影响的同时, 冬季还比南部更多地受到西风带的影响. 青藏高原西部和东部气候区差异则表现在: 高原西部夏季主要受印度洋和阿拉伯海水汽的影响, 但高原东部夏季则会受到太平洋水汽的影响.

### 3 青藏高原冰芯中 $\delta^{18}\text{O}$ 记录与气候变暖

根据前面的讨论, 普若岗日  $\delta^{18}\text{O}$  冰芯记录是过去温度变化的指标. 已经发表的研究成果指出, 青藏

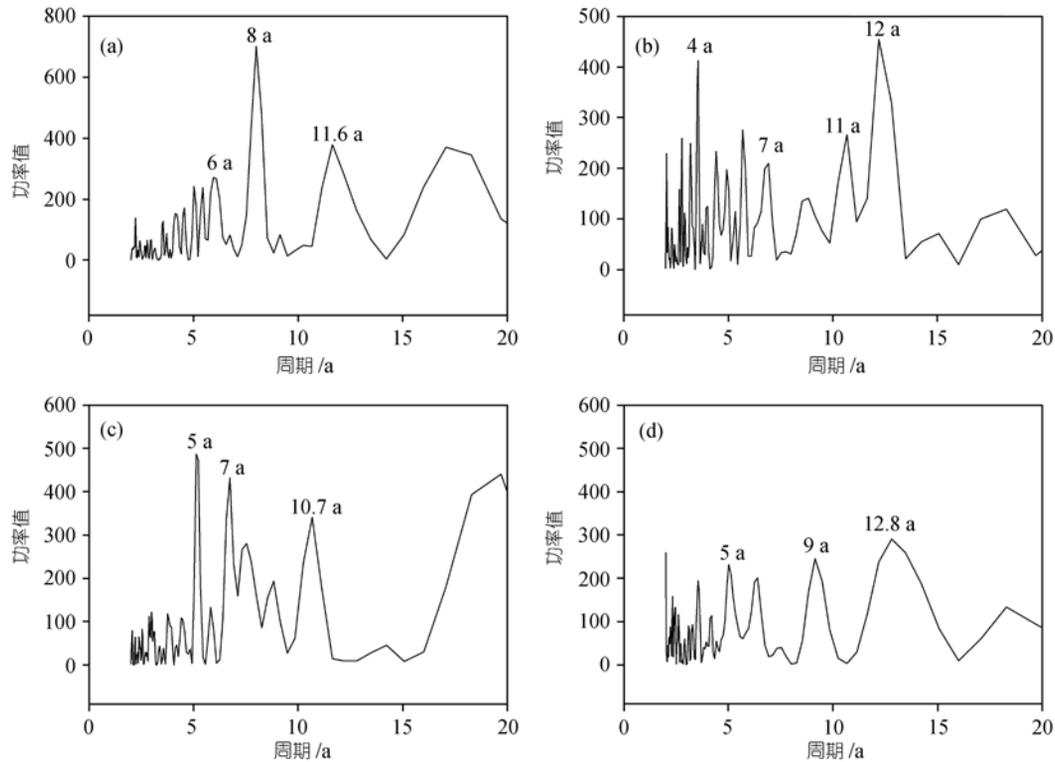


图 4 对普若岗日(a)、达索普(b)、古里雅(c)和敦德(d)冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的周期分析

高原南部达索普冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  的长期记录也是温度变化的指标<sup>[10,19]</sup>。冰芯记录的  $\delta^{18}\text{O}$  所反映的温度变化,在青藏高原西北部古里雅冰芯得到了很好的体现<sup>[6,20,21]</sup>。敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录与附近气象资料的对比研究发现,两者之间也存在显著的正相关性<sup>[21]</sup>。同时敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录与所恢复的中国年平均温度一致,也说明敦德冰芯是可信的温度记录。特别值得指出的是,在过去 100 年,敦德冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录高值阶段出现在 20 世纪 30 和 40 年代,30 年代的  $\delta^{18}\text{O}$  值要比 80 年代还高。这与中国年平均温度曲线的特点一致。

但过去的研究都是以单点冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录代表的温度变化与其他地区大范围的气候变化进行比较,这样许多局部事件就会影响单点记录与大范围气候变化的相关性。本文试图用 4 根冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的平均值,更好地反映较大范围气候变化的平均状况,这样局部事件的影响会大大降低。由于敦德冰芯是 1986 年钻取的,1986 年以后的  $\delta^{18}\text{O}$  记录缺失,作为过去 100 年尺度的研究,就不好和其他 3 根记录一起使用。

因此,本文用普若岗日、古里雅和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录的平均值研究青藏高原过去 100 年的温度变化(图 5)。

由于冰芯采样点空间变化范围很大(图 1),  $\delta^{18}\text{O}$  值的平均值变化范围也很大。为了较真实地反映高原整体降水中  $\delta^{18}\text{O}$  的变化,对 3 根冰芯的  $\delta^{18}\text{O}$  进行标准化,然后平均,得到整个青藏高原 3 根冰芯 1900 年以来的  $\delta^{18}\text{O}$  记录平均值。图 5 是用上述方法处理后得到的表示过去 100 年温度变化的  $\delta^{18}\text{O}$  记录(在此暂称其为“青藏高原  $\delta^{18}\text{O}$  平均温度”)。以此为基础,进行了与青藏高原气象台站记录的平均气温(图 5(a))<sup>[22]</sup>和北半球平均温度(图 5(b))<sup>[23]</sup>的比较研究。

将“青藏高原  $\delta^{18}\text{O}$  平均温度”与 1955 年以来有较好台站记录<sup>[22]</sup>所恢复的近 50 年青藏高原气温变化进行比较(图 5(a))。两记录在细节上并不完全一致。比如说,上世纪 80 年代后期气象记录的强烈变暖在普若岗日冰芯中没有出现。这是可以理解的。因为两个不同地区局部温度变化本身就会有差异;此外,冰

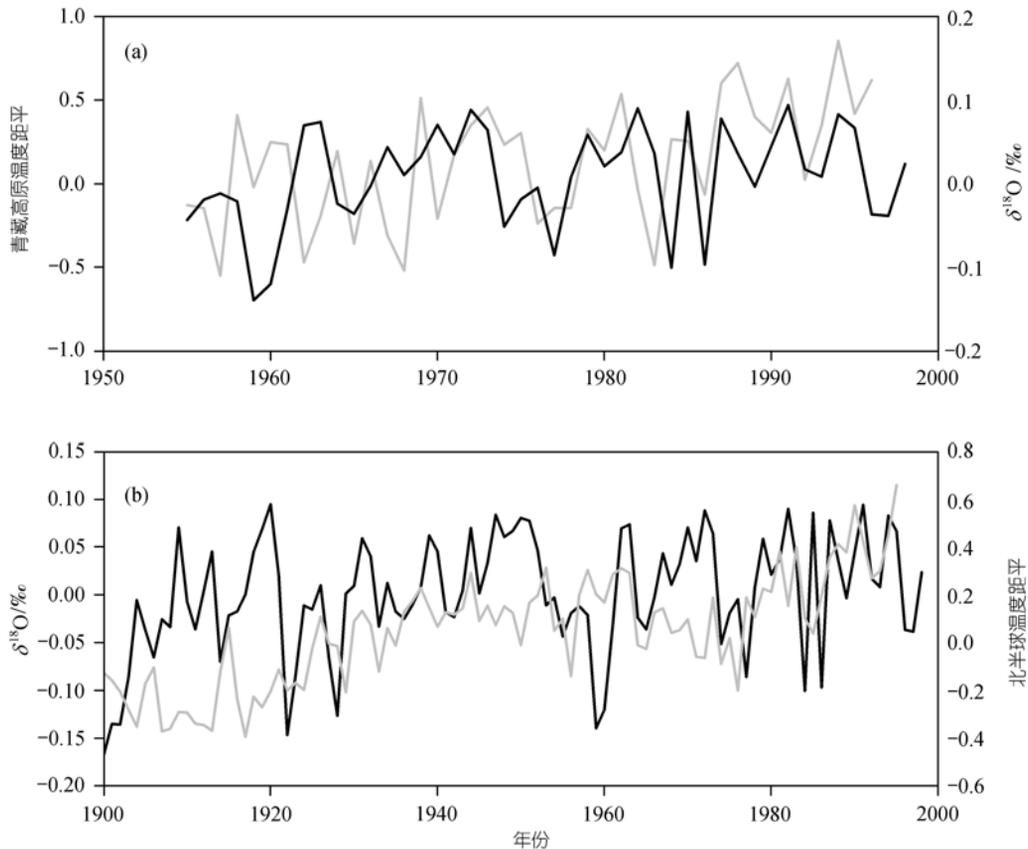


图 5 普若岗日、古里雅和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录平均值与青藏高原温度和北半球温度的比较

(a) 普若岗日、古里雅和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录平均值(黑线)与青藏高原温度(灰线)的比较; (b) 普若岗日、古里雅和达索普冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录平均值(黑线)与北半球温度(灰线)的比较

芯记录并不能百分之百地反映温度变化的全部过程。这也就是说，“青藏高原  $\delta^{18}\text{O}$  平均温度”还有不确定性，这种不确定性需要更多冰芯记录的获取和研究来完善。但这两记录总体都显示了从上世纪中期到末期气候在波动中逐渐变暖的趋势。对两序列进行谱分析，发现两序列均存在明显的 10 a 左右周期。两曲线的相关系数为 0.19 ( $n = 41$ )。对两序列进行 5 点平均，则相关系数达到 0.48，达到 95% 的信度。这说明由青藏高原冰芯恢复的温度至少在 10 a 尺度以上能反映青藏高原温度变化，由此可以利用冰芯记录时间较长这个特点，恢复青藏高原更长时间尺度的温度变化。

同北半球温度变化相比，冰芯记录的青藏高原温度有相同的变化趋势(图 5(b))，两记录在 1900~1995 年期间逐年相关系数为 0.31，达到了 95% 的信

度。从图 4 所示的线性趋势可以算出，过去 100 年北半球平均温度升高了约 0.6，同期青藏高原冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  增值为 1.3‰。根据过去研究<sup>[11]</sup>，青藏高原北部降水中  $\delta^{18}\text{O}$  变化 1‰，相当于温度变化 1。所以， $\delta^{18}\text{O}$  增加 1‰意味着相应的温度升高超过 1。通过对青藏高原  $\delta^{18}\text{O}$  平均温度的研究，进一步证实了青藏高原过去 100 年来明显升温的特征。

#### 4 结论

普若岗日冰芯中过去 100 年的  $\delta^{18}\text{O}$  记录反映了该地区这一时期的温度变化。将普若岗日冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  温度记录作为一个关键链条，可以与青藏高原其他冰芯记录结合起来进行研究。在空间上，普若岗日冰芯与青藏高原其他冰芯所记录揭示的过去 100 年温度变化在不同地区并不是完全相同的。4 个冰芯记录

的对比研究揭示了青藏高原气候变化明显的南、北差异和东、西差异。但是,到底是以南北差异为主,还是以东西差异为主,则是需要深入研究的问题。普若岗日、达索普和古里雅 3 个冰芯  $\delta^{18}\text{O}$  记录综合后得到的“青藏高原  $\delta^{18}\text{O}$  平均温度”,与青藏高原气象台站平均温度记录及北半球温度变化较为相似,再次证明了从冰芯中恢复历史时期温度的可靠性。需要指出的是,本文得到的“青藏高原  $\delta^{18}\text{O}$  平均温度”仍有不确定性,这种不确定性需要更多的冰芯记录的获取和研究来完善。

### 参 考 文 献

- 1 王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温. 自然科学进展, 2000, 10(4): 325~332
- 2 Yang B, Braeuning A, Jhonson K, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *J Geophys Res*, 2002, 29(9): 381~384
- 3 施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2000a 古里雅冰芯 10a 尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较. 中国科学, D 辑, 1999, 42(增刊): 91~100
- 4 王绍武, 叶谨琳, 龚道溢, 等. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报, 1998, 9(4): 391~401
- 5 Wang N L, 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. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(22): 2167~2172[DOI]
- 6 姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究. 中国科学, D 辑, 1997, 40: 662~668
- 7 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2 ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. 中国科学, D 辑, 1996, 26: 348~353
- 8 Duan K Q, Yao T D, Sun W Z, et al. Indian monsoon variability in Himalayas since 1800 A.D. *Annals of Glaciology*, 2002, 35: 437~442
- 9 Duan K Q, Yao T D. Monsoon variability in the Himalayas under the condition of global warming. *J Meteorological Soc Japan*, 2003, 81(2): 251~257[DOI]
- 10 Thompson L G, Yao T D, Thompson E M, et al. A high resolution millennial record of the south Asian Monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, 2000, 289: 1916~1919[DOI]
- 11 Yao T D, Yang M X. ENSO events recorded in Tibetan ice cores. *Developments in Paleoenvironmental Research*, 2004, 9: 163~180
- 12 Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. *Tellus*, 1964, 14(4): 436~468
- 13 Rozanski K, Arguas L, Gongiantini R. Isotope patterns in modern global precipitation, *Geophysical Monograph* 78. In: *Climate Change in Continental Isotope Records*, American Geophysical Union, 1993, 1~36
- 14 Cuffey K M, Alley R B, Grootes P M, et al. Calibration of the  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic paleothermometer for central Greenland, using borehole temperatures. *J Glacial*, 1994, 40: 341~349
- 15 Jouzel J. Validity of the temperature reconstruction from water isotopes in ice cores. *J Geophys Res*, 1997, 102(26): 471~26
- 16 Yao T D, Thompson L G, Thompson E M, et al. Climatological significance of  $\delta^{18}\text{O}$  in the north Tibetan ice cores. *J Geophys Res*, 1996, 101(23): 29531~29537[DOI]
- 17 Yao T D, Masson V, Jouzel J, et al. Relationship between  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation and surface air temperature in the Urumqi River Basin, East Tianshan Mountain, China. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(23): 3473~3480[DOI]
- 18 Tian L D, Yao T D, Atusi N, et al. Stable isotope in present precipitation and ice core records on the Tibetan Plateau. *J Meteorological Soc Japan*, 2001, 79(5): 959~966[DOI]
- 19 Thompson L G. Ice core evidence for climate change in the Tropics: implications for our future. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 19~35[DOI]
- 20 Thompson L G, Yao T D, Davis M E, et al. Tropical Climate Instability: The Last Glacial Cycle from a Qinghai-Tibetan Ice Core. *Science*, 1997, 276: 1821~1825[DOI]
- 21 姚檀栋, 谢自楚, 武筱龄, 等. 敦德冰帽中的小冰期气候记录. 中国科学, B 辑, 1990, 20(11): 1198~1201
- 22 Liu X D, Chen B D. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729~1742[DOI]
- 23 Mann M E, Jones P D. Global surface temperature over the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30, doi: 10.1029/2003GL017814[DOI]