

# 气候研究中不同时期的资料获取与重建方法综述

魏文寿 尚华明 陈峰

(中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/新疆树木年轮生态实验室/中国气象局  
树木年轮理化研究重点开放实验室, 乌鲁木齐 830002)

**摘要:** 过去30年里, 全球气候变化的研究取得了世界瞩目的成就。这一研究领域中每次重要的进展, 都伴随着资料获取新技术的发展和研究方法的创新。有鉴于此, 主要对近30年来气候研究中不同时期(包括现代器测时期和过去气候变化代用资料)的资料获取, 数据资料中存在问题的甄别和处理, 气候序列的重建及其他相关气候研究领域研究方法的发展做了回顾与综述。其中过去气候变化代用资料包括树木年轮、冰芯、石笋、历史文献、黄土、湖泊沉积和岩芯等。各种代用资料在空间分布、时间分辨率和气候信息含量等方面各有优劣。文中列出了气候研究中不同时期的资料获取与重建方法的进展, 其主要体现在利用更为丰富的数据来源, 更为有效、更为精确地提取和利用气候代用资料, 尽量减少气候重建过程和结果的不确定性。而一定的方法只是适用于一定的介质和一定的时间所反演的资料数据。并认为气候资料的多种获取手段和集成技术与研究方法的创新, 将进一步推动气候和气候变化研究的发展。

**关键词:** 气候变化, 代用资料, 获取方法

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.03.002

## Review: Data Acquisition Methods in Different Periods in Climatology Study

Wei Wenshou, Shang Huaming, Chen Feng

(Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration/ Xinjiang Laboratory of Tree Ring Ecology/  
Key Laboratory of Tree-Ring Physical and Chemical Research of China Meteorological Administration, Urumqi 830002)

**Abstract:** In the past 30 years, great progress has been made in the research methods for the past global climate change along with the exploit of new materials. As the good sources of proxy data about climatic change, records about climate in tree rings, stalagmites, lake sediments, ice cores and the historical documents have been collected, distinguished and used by scholars to reconstruct the past climate change such as temperature, precipitation and so on. This paper sums up the research methods of the work in these 30 years and points out: it helps the research methods to go forward, for example, how to get more useful information from high-resolution proxy data more efficiently to reduce the uncertainty in the process and conclusion. Meanwhile, certain kinds of methods can just be applied in certain forms of materials. New data should be exploited and methods of integrative research should be developed to push ahead the research work.

**Keywords:** climate change, proxy data, acquisition method

### 1 引言

近百年来全球变暖及其引发的一系列后果引起了国际社会普遍关注, 由此引发了对全球变化研究的热潮。在近30年的时间里, 国内外大批学者投入到了这一领域的研究, 实施了包括世界气候研究计划(World Climate Research Programme, WCRP)、国际地圈生物圈计划(International Geosphere and

Biosphere Programme, IGBP)、全球环境变化人文因素计划(International Human Dimension of Global Environmental Change Programme, IHDP)和生物多样性计划(DIVERSITAS)等在内的一系列研究计划, 使得全球变化科学的研究得以迅速发展并取得了显著的成果<sup>[1]</sup>。其中, 研究气候及其规律是全球变化研究的核心内容之一。通过对历史气候事实及其变化规律的揭示, 辨识现代及未来气候变化的自然背景, 诊断20世纪全球升温的历史地位, 评估当前全球变暖的自然和人为因素的贡献, 认识气候变化与人类社会、地球生态环境交互作用, 预估未来气候变化趋势, 为人类更好地制定应对气候变化的策略、方式和

收稿日期: 2012年4月10日; 修回日期: 2012年5月13日  
第一作者: 魏文寿(1954-), Email: weiwsh@idm.cn  
资助信息: 国家自然科学基金项目(41071072);  
国家科技支撑计划课题(2012BAC23B01);  
国家自然科学基金项目(41205124, 41275120)

措施服务。

气候研究最直接、最准确的资料是气象观测资料。随着科技的发展,新的气象观测仪器和探测手段层出不穷,气候研究资料呈现爆炸性增长。同时,由于现代气象观测数据的时间比较短,资料不太齐全,对气候变化的细节及其成因的认识还远远不足。高精度、高时空分辨率、定量半定量的古气候资料获取是深入研究气候变化的关键手段之一。目前针对气候变化研究包括基于代用资料的统计分析研究和通过气候模式研究两个主要方向。前者通过对各种气候代用资料——历史文献记录、黄土、冰芯、海洋与湖泊沉积、树木年轮、珊瑚等获取气候信息,来揭示气候变化规律及其与全球变化的联系。利用树轮资料<sup>[2]</sup>和冰芯中氧同位素比率变化<sup>[3]</sup>等高分辨率资料重建过去上百乃至上千年的降水和温度变化,弥补了气候资料的不足。来自地球上冰芯记录证明了在末次冰期一间冰期旋回大尺度气候变化背景下,全球气候存在较大不稳定性这一基本事实<sup>[4,5]</sup>。Chen等通过湖泊水位和孢粉记录等多个指标的综合分析,发现西风区西部(新疆)和西风区东部季风边缘区在全新世存在错位相的干湿变化<sup>[6]</sup>。由于这些千年尺度快速气候波动不能简单地用传统的米兰科维奇理论中轨道参数的变化来解释,因此对近130ka BP(距今千年)以来的气候波动事件的研究就成了近几十年来国内外古气候古环境研究的热点,尤其是末次盛冰期以来有关研究已取得较大进展。在中国,黄土记录中的千年尺度振荡旋回明显<sup>[7]</sup>。An等基于在青藏高原东南缘鹤庆盆地获取的666m湖泊沉积岩芯,利用古地磁和<sup>14</sup>C测年手段,高分辨率测试了岩芯的植物花粉、沉积学、地球物理和地球化学等参数,重建了更新世(过去260万年)印度季风变迁的历史<sup>[8]</sup>。因此,现代气候资料与不同历史时期气候重建能够提供关于气候变化极有价值的洞察信息。本文通过总结近30年现代气候资料获取方法和不同历史时期气候重建方法论述,为今后的气候研究提供参考。

## 2 现代器测资料获取

### 2.1 现代气候地面观测

气候过程是以大气圈为核心,涵盖水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈等圈层的变化过程以及多圈层之间相互作用的过程,这使得现代气候研究的数据不再仅限于大气圈。对气候影响最直接的是碳循环,大气中的CO<sub>2</sub>浓度的增加是全球变暖重要原因之一,各国科学家对大气温室气体浓度和气候变化进行了许多观测研究<sup>[9]</sup>。Zheng等利用中国东部26个站点的现代

物候观测资料,诊断了自然物候对温度变化的响应过程,建立了自然物候与温度变化的定量关系方程<sup>[10]</sup>。但现有气候观测项目中主要针对大气圈进行观测,观测内容主要为大气中的气候要素,基本没有开展其他地球圈层的观测,只是少数农业气象试验站、科学试验站有极少的岩石圈(地温和土壤水分)、生物圈(物候)、大气中温室气体和气溶胶等观测项目,可以说,对大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈等5大圈层内和圈层间相互作用的总体观测极为薄弱,许多方面是空白。开展气候要素、辐射平衡、宏观生态特征(植被指数等)、植被生理和生态过程(物候等)、碳通量以及酸雨、沙尘成分、臭氧、大气气溶胶、温室气体等项目的气候综合观测是十分有必要的。这对于揭示气候过程形成的物理特性以及气候环境变化的根本原因,使气象站网观测的天气气候现象获得科学认识,以此提高预报预测水平,并且发展陆面过程参数化方案,改进气候数值模式有着重要意义。

现代气候资料最主要的来源是广布在全球各地的气象站网,通过人工或自动气象站监测天气过程,记录气候数据。中国经过60多年的建设,已经建成了以县行政区划为基点、具备一定规模且具有一致观测规范的地基观测系统。目前,中国境内地面观测多以自动气象站为主体,开展地面基本气象要素观测、太阳辐射、土壤湿度、地温等项目的常规观测,取得巨大成就。同时,中国境内的气候观测能力建设还存在一些不足。现有气象部门站网主要以县级行政区划为基点,台站网络的空间分辨率与欧美等发达国家相比还比较低,使得气候模式模拟效果不佳。在现有地面气象观测站网的基础上,建成密度更加科学合理的气象台站网络。

### 2.2 现代空基、天基和移动观测资料

空基探测主要由气球探测、飞机探测和火箭探测组成。通过在气球、飞机和火箭等空中载体上装载大气物理和大气化学仪器,探测地面至对流层顶的气温、湿度、气压、风向、风速、辐射、大气成分等大气物理化学要素<sup>[11]</sup>。无线电探测的观测值虽然精度较好,垂直分辨率高,但地区覆盖不均匀,在海洋上几乎没有数据。近20年来,遥感和GPS技术以其覆盖面广、精度高、垂直分辨率高的优点成为高空气候探测重要方法。应用地基高精度GPS接管机,通过测量GPS信号在大气中湿延迟量的大小可以反算出大气中水汽总量。同时,GPS还被应用于闪电定位监测。

天基监测主要由极轨气象卫星和静止气象卫星等

探测平台以及相应的地面应用系统组成,是现代气候观测系统的重要组成部分,可以实时地对地球多个圈层进行空间无缝隙连续监测。通过对地面接收到的卫星遥感资料进行反演,除了能够获取大气空间物理和化学要素的垂直分布数据,还能获得一些地面观测所不能获得的大范围海温、海平面气压、极地冰盖和冰川面积变化、土地利用变化及植被指数等可以反映气候变化的地表特征参数。天基监测在气候系统各个圈层以及相互作用的监测和气候研究具有不可替代的作用。

移动综合观测平台是对固定观测站点、密度不足的站网或代表性不足的观测站的有效补充,可以搭载不同功能的移动综合观测平台,如:车载自动气象站、探空站、卫星地面站和雷达,车载陆面过程综合系统,车载生态气候观测系统等,能够对突发性极端气候事件、区域小气候进行连续不间断的移动观测。

### 2.3 格点气候数据

除了台站观测数据外,均一化的格点数据集和再分析资料也是气候研究的重要资料来源。其中较有名的是由美国国家环境预报中心(NCEP)和国家大气研究中心(NCAR)协作发表的全球气象资料数据库(1948年至今),英国East Anglia大学的Climatic Reserch Unit通过整合已有的若干个知名数据库重建了一套覆盖完整、高分辨率且无中断的月地表气候要素数据集(1901—2009年)<sup>[12, 13]</sup>。其他还有如Dai等研制的全球帕尔默干旱指数数据集(1870—2010年)、Hadley Centre所研发的海温数据集HadSST3(1850—2006年)等<sup>[14, 15]</sup>。目前这些高分辨率气候资料数据集广泛应用于气候诊断分析、东亚季风、热通量水循环等各方面的研究中,并且在一些全球、区域气候变化的模拟和预测中,作为气候模式的初始场和驱动场资料,用来检验模拟结果。目前人们认为利用这些资料研究中国区域气候的长期变化是基本可信的,但由于受各个时期资料来源的限制,这些资料各个时期同化所选用的资料不同,这就使不同时期的气候资料相对于实测值的误差不一致,这些资料在气候变化长期趋势变化研究中存在较大的不确定性<sup>[16, 17]</sup>。20世纪50年代以后的资料可信度要高于50年代以前的资料;我国东部和低纬的可信度比西部和高纬那些台站数量稀少、地形复杂的地区高,因此利用这些气候资料时候,必须考虑其可靠性的问题。

## 3 过去气候变化资料获取与重建

### 3.1 树木年轮

树木年轮以其定年准确、连续性好、分辨率高(可以达到年甚至季节)等优点在气候研究中有不

可替代的价值。树轮的结构(包括树轮宽度、密度、细胞结构),稳定同位素等能够准确、清楚地反映树木生长气候环境的变化。树轮宽度是树轮气候研究中最早和最常采用的研究方法。树木生长过程中每一年树轮的形成都受到当年及上一年气候因素(主要是温度、降水)的综合影响,这种影响使得树木生长能够有效记录气候信息<sup>[18]</sup>。树轮采样地区应选择树木年轮生长受气象因子制约的地带,如森林上限。利用生长锥在同一棵树的不同角度采集2根样芯,一个采样点至少采集25棵树。依照树轮样本处理的基本程序,首先对所采样芯进行晾干、粘贴、磨平和打光等预处理,然后用轮宽测量仪进行轮宽测量。利用COFECHA程序对交叉定年结果进行检验<sup>[19]</sup>。树轮宽度的去趋势和宽度年表的建立一般是利用ARSTAN程序完成的<sup>[20]</sup>。利用相关函数和响应函数的方法分析树轮宽度资料与气候要素之间的关系,并根据气候响应分析和相关普查的结果,建立回归方程对最佳时间段的气候要素进行重建<sup>[21]</sup>。近30年来,伴随着树轮气候学的快速发展,中国的树轮气候研究也取得了长足的进步,研究人员利用树轮宽度数据恢复了许多地区过去数百年乃至千年尺度的气温、降水、湿润指数等指标,取得了很多有价值的气候数据<sup>[22-24]</sup>。

树轮密度作为树轮细胞直径及木质部细胞壁厚度和细胞腔大小等结构的间接反映,包含了从树轮宽度中无法提取到的气候信息。相对于树轮宽度,树轮密度的测量一直存在很大难度。直到20世纪60年代,随着X射线技术被成功地应用于树木年代学研究中,人们才开始将树轮的细胞壁厚度和细胞密度作为细胞生理活动的一种表达,并发展了以木材密度为环境代用资料的测量技术,树轮密度的研究也逐渐兴起<sup>[25]</sup>。X射线分析法的大致过程是:首先,将样本进行脱糖脱脂处理,将样芯切割成薄片;然后用X射线照射树木年轮标本,得到年轮密度的胶片;之后,用光密度计扫描X光胶片,得到年轮密度的变化信息,包括最大晚材密度、最小早材密度、早材密度、晚材密度、早材宽度、晚材宽度及年轮宽度。树轮最大密度被证明能很好地反映树木生长季内的温度,已被用于局地或者大范围温度重建<sup>[26, 27]</sup>。一些研究还表明早材密度或最小早材密度对降水量的响应比较显著。例如,对秦岭地区4个地点的树轮样本密度分析表明,最小早材密度与当地5—6月的降水量呈显著负相关,而最大晚材密度则与当地7月的降水量呈显著正相关,树轮密度变化对气候变化有显著的响应,可以作为表征过去降水的代用资料<sup>[28]</sup>。陕西黄陵地区的树轮最小早材密度与当地4—6月的降水量也呈显著负相关关系,在以

最小早材密度重建该地区4—6月的降水量时, 降水回归方程方差解释量可达49%<sup>[29]</sup>。

从细胞尺度来看, 树木的径向生长是维管形成层进行细胞分裂和分化的结果。细胞在分裂和分化过程中受到生长环境中气候要素的影响, 能在细胞结构特征上有所反映。研究发现, 从细胞结构特征指标(如细胞个数、细胞壁厚度、面积、胞腔比和树脂道频率以及伪年轮和浅轮的发生频率等)的变化中可以提取季节的气候变化信息<sup>[30]</sup>。细胞特征指标的量测一般在显微图像分析仪下进行。量测细胞时, 对每年树轮从当年的晚材与下一年早材的交界线开始, 由晚材向早材方向逐个细胞量测, 为了均匀地反映树木生长状况, 对每个年轮沿径向随机选取大体平行的5条线, 测量每个细胞的大小和每行细胞的数目。按以上步骤, 由样芯的最后一年开始进行细胞量测, 直到起始年<sup>[31]</sup>。挑出早材中细胞直径最大和晚材中直径最小的细胞, 分别对其进行COFECHA程序交叉定年检验, 用ARSTAN程序建立了树轮细胞参数的年表。相对于树轮宽度、密度和同位素的研究工作而言, 在世界上利用树轮细胞数据进行气候重建的研究较少。Panyushkina利用落叶松的树轮细胞个数和细胞厚度重建了自1642年以来西伯利亚东北部地区夏季温度变化<sup>[32]</sup>。

随着计算机技术和数字图像处理技术的进步, 对于树木年轮微观形态的研究迅速发展起来, 为较湿润地区的树木年轮研究提供了新的手段, 数字图像分析法就是其中之一, 该方法是一项已经被相关研究证实了在树木年轮研究中具有实用价值的技术<sup>[33, 34]</sup>。该方法的物质基础是图像灰度直接反映年轮细胞腔大小和细胞壁厚度等微观结构受气候环境因子影响而出现的显示差异, 可以从年轮灰度变化中提取树轮宽度资料所无法获取的气候变化信息。利用普通扫描仪以及图像分析软件, 通过图像灰度值的大小, 间接反映树轮密度的变化, 克服了由于实验手段和技术设备限制而带来的不便, 节省了实验成本, 也为树轮研究提供新的研究手段。陈峰等<sup>[33]</sup>利用树轮最大灰度重建了南天山北坡西部6—7月温度变化。张瑞波等<sup>[35]</sup>发现新疆伊犁乌孙山北坡3个采点的标准化全轮灰度年表序列与该地区4—5月平均最低气温显著相关, 并进一步利用树轮标准化全轮灰度年表重建该地区过去324年的4—5月最低气温变化。主要步骤如下: 首先将采集的样本进行晾干、粘贴、磨平、打光等预处理, 挑选出树轮较宽且具有相似亮度和密度曲线的样本, 使用高分辨率扫描仪及WINDENDRO等图像分析系统, 获取

树轮灰度参数。在这一过程中, 必须剔除异常生长年年轮和色泽异常的年轮, 保证灰度值的准确性。最后每个采点得到5个灰度参数, 包括早材平均灰度、晚材平均灰度、最大灰度、最小灰度和树轮平均灰度。使用COFECHA程序进行树轮灰度数据交叉定年, 最后使用ARSTAN程序完成灰度年表的研制。

树木通过光合作用利用大气CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O形成年轮, 每一年轮的碳都来源于大气CO<sub>2</sub>, 而氢、氧来源于土壤水分和降水。树轮中碳、氢、氧稳定同位素的组成不仅反映了来源物质稳定同位素的变化, 也随着树木生长环境的变化而变化, 因此树轮稳定同位素能反映年轮形成时的气候与环境变化。树轮稳定同位素相对于其他指标还具有生理意义明显、低频信息含量丰富等优势<sup>[36]</sup>。随着同位素分析技术的进步, 树轮稳定同位素分析在过去气候变化中的应用越来越广泛, 并取得了丰硕的成果<sup>[37-40]</sup>。树木是由多种化学成分组成的复合体, 由于光合作用过程中各种组分形成的生物化学过程不同, 各组分的稳定同位素组成也存在差异。早期的树轮同位素研究都采用全木, 但自从Wilson等发现木材的不同组分的同位素存在差异后<sup>[41]</sup>, 很多研究都分析木材中的纤维素。关于选择 $\alpha$ -纤维素而不采用全木分析的原因, 相关的研究论述较多<sup>[42-44]</sup>。为了提高树轮同位素气候信息含量, 提取纤维素成为同位素分析所必需的前处理工作。要测定树木年轮的稳定同位素, 必须先将其转化为气体(CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>等), 然后进入质谱仪分析。一般用稳定气体同位素质谱仪分析样品气体的稳定碳、氢、氧同位素组成。

树轮稳定同位素富含了丰富的古气候信息, 但同时也包含了一些非气候趋势和变化。因此需要对数据进行处理, 在剔除非气候信息的同时, 保留真实的气候信号。工业革命以来的人类活动引起的大气CO<sub>2</sub>浓度增加导致大气 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低了1.5%。这种趋势在树轮同位素中也得到了反映, 很多树轮同位素研究都发现了这种趋势<sup>[45-48]</sup>。因此在进行树轮同位素气候研究前, 需要剔除大气CO<sub>2</sub>背景 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势<sup>[49, 50]</sup>。最终得到用于气候重建的树轮同位素校正序列。

### 3.2 冰芯

在极地和中低纬度的高山区分布着大量的冰川, 连续的冰层能够提供过去气候变化的丰富信息。冰芯中的物理、化学和生物信息能够真实再现冰层形成时的气候与环境特点。冰芯记录具有高精度和连续性的特点, 其时间尺度最长可达数十万年, 时间分辨率高, 中纬度冰芯顶部可以达到年甚至季节<sup>[51]</sup>。冰芯不

仅记录了气温、降水等气候变化的信息，冰芯中的气泡还能连续记录过去大气成分的变化<sup>[52]</sup>。

在野外进行冰芯钻取是利用冰芯开展过去气候研究中的关键环节。在格陵兰和南极大陆，实施了多项国际极地冰芯钻探计划（GRIP，GISP2，EPICA等）<sup>[53-55]</sup>。冰芯定年的方法很多，主要包括：物理和化学特性季节变化及参考层定年、通过已知的时序列与事件记录对比定年、放射性物质年层、火山活动年层、冰川流动模型等<sup>[56-58]</sup>。如果冰层具有季节性物理和化学特性的连续变化，就可以通过数年层的方式进行定年。实际应用上主要是稳定同位素、离子浓度、冰芯气溶胶微粒的季节变化。根据已知时序列事件记录对比定年，是将待定年的冰芯指标序列与已建立年代序列的其他冰芯或深海沉积氧同位素序列进行对比。放射性物质年层定年主要是由于20世纪60年代初期全球核试验高峰期和1986年切尔诺贝利核泄漏事件导致环境放射性背景增加，冰芯 $\beta$ 活化度的两个峰值分别与这两个时段对应。火山活动会产生大量气溶胶，并随大气环流到达全球，冰芯污化层或 $\text{SO}_4^{2-}$ 含量峰值与火山爆发的时间吻合。在实际的冰芯定年中一般要结合多种方法，最终建立可靠的冰芯年代序列。

冰芯的气候信息指标丰富，包括冰芯积累量，稳定氢氧同位素，温室气体（ $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{NO}_2$ ），气溶胶成分（微粒、离子与碳黑），有机成分，重金属和微生物等<sup>[59-66]</sup>。冰芯积累量是降水量的直接记录，特别是在冰芯上部未发生冰川流动和季节性消融的区域，冰芯积累量是重建降水的有效指标。降水的稳定同位素含量存在温度效应、降水量效应和海拔效应等。高纬度地区的降水中稳定同位素与气温之间有很好的线性关系， $\delta^{18}\text{O}$ 的高值对应高温阶段。冰芯中包裹的气泡反映了冰层形成时期的大气组成状况，包括温室气体。冰芯中的各种气溶胶（微粒、离子与碳黑）能从另一个角度反映气候状况，如 $\text{SO}_4^{2-}$ 的峰值与火山活动对应，而沙尘暴活动的高峰期在冰芯中伴随出现污化层和高 $\text{NO}_3^-$ 。碳黑是含碳物质不完全燃烧的产物，冰芯中碳黑记录可以提供人类活动污染排放信息。

### 3.3 石笋

石笋是洞穴堆积物中的一种，其生长过程与气候环境的关系密切，是陆相古气候研究中继极地冰芯之后的又一重要信息源。随着石笋碳酸盐中氧同位素与温度之间关系的研究进展以及测年技术的进步，高分辨率的石笋气候变化记录发展迅猛，成果引人注目<sup>[67-69]</sup>。

石笋定年的方法包括纹层统计、 $^{210}\text{Pb}$ 法和U-Th测年法<sup>[70-72]</sup>，其中 $^{210}\text{Pb}$ 主要用于测量年轻石笋的年龄（150a以内）。石笋的气候代用指标包括无机碳氧同位素、元素含量及其比值、生长速度、灰度以及微生物、有机质荧光微层、反射光谱等指标<sup>[73-78]</sup>。其中石笋的碳酸盐碳、氧同位素是使用最多且气候信息含量最为丰富的指标。石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 具有较好的区域和全球可对比性，主要受控于源水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和石笋形成时的温度，而大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 又受到水汽源、移动路径、降水量等控制，因此石笋的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了石笋形成时的洞穴温度和降水信息。在温带地区，石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 常反映了温度信息，而在热带地区主要作为降水量指标。石笋 $\delta^{13}\text{C}_{\text{inorg}}$ 的变化受到植被、洞穴母岩和石笋形成时的分馏作用的共同影响，其气候信息比 $\delta^{18}\text{O}$ 更为复杂，较多地受到局地气候或者洞穴系统的影响。石笋的纹层不仅可以作为高分辨率的定年指标，同时还可以通过年层厚度对温度、降水等要素的响应规律，反演过去气候变化信息<sup>[79]</sup>。石笋的生长速率取决于滴水以及滴水下落后的饱和程度，影响石笋生长率的因素有：碳酸盐岩的可溶性、降水量、温度、土壤 $\text{CO}_2$ 、浓度、地区水文地质条件等。石笋元素指标包括元素含量、比值和同位素。Mg与Sr的比值可以用作为古气温的替代指标，即温度升高，比值增加。

### 3.4 历史文献

在历史时期气候环境变化的各种证据中，历史文献具有时间准确、空间分辨率高、信息丰富等特点，时间分辨率最高可以精确到天。历史文献的时间覆盖范围依赖于各地历史文字记载开始时间的早迟。中国最早可以追溯至公元前2000年前后。从历史文献中提取气候信息并进行气候重建是研究历史时期气候变化的重要手段之一<sup>[80-82]</sup>。

根据各类文献中所涉及的气候记载的资料特点，气候资料可以分为四类，包括官私文献类、地方志类、档案类和日记。历史文献中的气候环境变化内容多样，不但有温度、干湿或雨量、气象气候灾害以及自然、生物、农业物候等常用的气候要素及其影响信息，同时也包含与气候变化密切相关的河湖水系变迁、海平面变动、动植物分布状况变化、农事活动、物产、农业收成与社会影响等信息<sup>[83-85]</sup>。

历史文献中环境变化记载的考证源于史学的考证。从史学研究的角度看，史料记载的考证主要包括两个部分：一是史书的辨伪；二是史事记载的考证。如何使用好历史文献中的环境变化记载是环境变化研究中的一项最基础的工作，需要对历史资料进行分

类,使用时还应遵循第一手资料优先、相互校正、客观和保证资料均一性等原则<sup>[86]</sup>。

历史文献记录气候研究的目的是将文献记载进行数值化和定量化处理,并最终建立定量的气候变化序列<sup>[87]</sup>。其中温度变化序列重建的方法包括频次(如年数、次数)统计法、指数法、分等定级法和回归统计法。降水(旱涝)变化序列重建方法包括比值法、湿润指数法、分等定级法、回归统计法和物理模型法。

### 3.5 黄土

黄土—古土壤是季风作用的产物,其中黄土层形成于冬季风强盛时期,以粉尘堆积作用为主。古土壤则代表了夏季风相对强盛期,风化成壤作用强,就形成褐红色的古土壤。黄土—古土壤的发育与气候变化密切相关,从黄土沉积物中可以提取大量的代用指标反映过去气候变化信息。黄土时间尺度能达到几百万年,但时间分辨率较低,为100a。中国是世界上黄土分布最广、厚度最大的国家,中国黄土以其分布广泛、沉积连续、蕴含环境信息丰富而与深海沉积物、极地冰芯并称为全球变化研究的三大支柱<sup>[88-92]</sup>。

黄土测年的方法包括<sup>14</sup>C定年、地层对比和释光定年等方法。黄土中的古气候代用指标主要包括三大类:物理学指标(磁化率、粒度)<sup>[93]</sup>、地球化学指标(元素含量及其比值、有机质成分和含量、有机碳稳定同位素、碳酸盐碳氧同位素、碳酸盐的含量和形式)<sup>[94-98]</sup>和生物学指标(孢粉)<sup>[99-101]</sup>。磁化率作为一种古气候替代性指标在黄土研究中得到广泛的应用,是衡量夏季风强弱的敏感指标之一,暖湿气候是古土壤磁化率增加的原因之一。黄土的粒度指标记录了大尺度空间范围内风场的变化,从中可以提取北半球中纬度地带风场乃至古大气环流变化的重要信息,是最常用的古气候替代指标之一。粒度测试的方法也从沉降法和筛析法发展到激光粒度分析法,测试的效率和精度等大大提高。碳酸盐是黄土地层较为敏感的化学组分,其含量、组成和结构不仅与物源有关,而且与黄土母质沉积之后的一系列化学生物过程有着密切的关系,因其广泛存在和易于溶解的化学性质,是土壤的重要划分标志和主要的气候代用指标,黄土和古土壤中碳酸盐的含量、存在形式、迁移深度都表征着制约风化成土作用的生物气候环境的变迁。一般而言,在黄土层碳酸盐含量较高,而在古土壤层碳酸盐含量较低。黄土—古土壤次生碳酸盐碳、氧同位素和土壤有机质碳同位素是随着稳定同位素分析技术发展而逐渐在黄土古气候研究中得到应用的。钙结核碳同位素主要指示古土壤发育时的环境降水量,氧同位素指

示土壤发育时的环境温度。孢粉是黄土中重要的生物学指标,可以作为物理化学指标的重要补充,用于定量重建植被与气候演化的历史。

### 3.6 湖泊沉积

作为流域地表物质运移的主要宿体,湖泊沉积物信息量大,连续性好,沉积速率大,时间分辨率高,地理覆盖面广,在恢复短时间尺度的气候和环境演化系列时有其他自然历史记录无法替代的优势<sup>[102-107]</sup>。湖泊沉积物的时间尺度可以从万年到数百万年,时间分辨率可以达到1~10a,具有纹层的沉积物的时间分辨率最多可以达到年<sup>[108]</sup>。

湖泊沉积物的代用指标最为丰富,包括碳酸盐碳氧同位素、碳酸盐含量、有机质含量、有机碳同位素、元素含量及其比值、沉积物粒度、矿物含量及其比值、分子化合物、磁性参数、孢粉、色素、硅藻和微体动物化石摇蚊等<sup>[109-113]</sup>。记载的信息也非常丰富,包括温度、降水、湿度、生产力、盐度、pH值、大气污染、火山活动和森林火灾等。粒度是湖泊沉积物经典指标之一,一般粗粒沉积物指示湖泊收缩、湖水较浅的干旱气候期;细粒沉积物指示湖泊扩张、湖水较深的湿润气候期。但在较短时间尺度内,粗粒沉积物对应大的洪水事件。孢粉是湖泊沉积中最常用的指标,能在沉积物中保存数万年的时间,根据沉积物不同层位的孢粉形态分析可以确定其种属组成,揭示不同时期流域内主要植被状况,进而可推断气候和环境历史。湖泊藻类中的色素种类和数量能反映湖泊初级生产力的变化。微体古生物是近年来发展起来的新的湖泊沉积物指标,包括硅藻、介形虫和摇蚊等。微体生物化石与其生活时期的湖水盐度、温度等环境条件密切相关。沉积物硅藻组合和数量可反映湖水的酸度、盐度和生产力变化,介形类组合可反映湖水盐度条件,而摇蚊等对水温变化敏感。湖泊沉积物同位素指标包括有机质稳定碳同位素和碳酸盐碳氧同位素,沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 能指示沉积物中有机物的来源,对于以陆源植物为主的沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 能反映陆地植被演化特征。湖泊沉积物自生碳酸盐(或螺壳和介形虫等壳体)碳氧同位素组成一般用于指示温度变化。由于在解释湖泊各种指标的气候意义时,需要明确其适用条件,实际研究时,一般采用多种代用指标,互相补充印证。

### 3.7 岩芯

沉积物岩芯的时间尺度最长,能达到百万甚至千万年以上,时间分辨率为10~100a。1996年国际大陆科学钻探计划(ICDP)正式成立,通过数千米甚至

表1 各种过去气候变化代用资料特征比较

信息载体	时间分辨率 <sup>①</sup>	时间尺度(年) <sup>②</sup>	代用指标	蕴含的气候与环境信息
树木年轮	季节/a	10 <sup>4</sup>	宽度、密度、同位素、灰度、细胞等。	温度、降水、水文、大气成分、环境污染、生产力、太阳和火山活动。
冰芯	季节/a	10 <sup>5</sup>	同位素、冰芯积累量、微生物、化学成分、大气成分等。	温度、降水、大气成分、太阳和火山活动。
石笋	季节/a	10 <sup>4</sup>	同位素、元素含量及其比值、石笋微层生长速度、灰度以及微生物、有机质荧光微层、反射光谱等。	温度、降水量等。
历史文献	d	5×10 <sup>3</sup>	官私文献类、地方志类、档案类和日记等。	温度、降水量、水文、火山和太阳活动等。
黄土	10a	10 <sup>6</sup>	磁化率、粒度、地元素含量及其比值、有机质成分和含量、稳定同位素、孢粉等。	温度、降水量、生产力等。
湖泊沉积	1~10a	10 <sup>6</sup>	同位素、碳酸盐含量、有机质含量、元素含量及其比值、粒度、矿物含量及其比值、分子化合物、磁性参数、孢粉、色素、硅藻和微体动物化石摇蚊等。	温度、降水、水文、生产力、火山活动、湖水盐度和pH值等。
岩芯	10~100a	10 <sup>7</sup>	稳定同位素、碳酸盐和有机质含量、元素含量及其比值、粒度、矿物含量及其比值、孢粉等。	温度、降水、太阳和火山活动等。

注：①为表中时间分辨率指最高的时间分辨率；②为时间尺度指最长时间尺度

上万米的大陆科学钻探，揭示大陆地壳的物质组成与结构构造，研究全球气候变化及环境变迁，长期观察地球变化等<sup>[114-117]</sup>。目前，该计划已经有21个成员，其中19个国家成员。气候变化与环境是该计划主题之一，最能反映全球气候变化与环境的沉积记录大多保存在大陆内部的湖相沉积中，特别是具有较长寿命的湖相沉积中。系统地在全球大陆上广泛分布的湖相沉积物进行系统钻探取样分析，可以得到全球气候长期演化过程。中国的白垩纪松辽盆地大陆科学钻探项目和青海湖环境钻探项目也属于该主题相关的项目<sup>[118]</sup>。

利用沉积物岩芯进行过去气候与环境研究所采用的指标与湖泊沉积物类似，包括物理、化学和生物等方面的指标。云南鹤庆盆地737m的沉积岩芯孢粉、烧失量等指标记录了2.78Ma以来的气候环境和植被的演化历史<sup>[119-121]</sup>。塔希提岛海平面变化钻探项目获取的长岩芯记录了上一次大冰期前连续的热带冰期事件，并记录了500ka以来气候变化，为确定南美地区千年尺度气候变化规律提供了重要的证据。美国的大盐湖和熊湖的岩芯同位素指标研究记录了280ka以来的连续的古气候纪录和冰期/间冰期级别的古水文波动<sup>[122]</sup>。

#### 4 小结

随着观测技术和实验分析技术的发展，气候变化研究的资料来源日益丰富。气象站的器测资料从常规的地面观测和探空观测扩展到空基、天基和移动观测，观测的仪器、手段和要素也日益丰富。基于全球台站观测资料的格点数据集和再分析资料在全球气候变化的诊断和模拟研究中应用广泛。过去气候变化研究代用资料包括树木年轮、冰芯、历史文献记录、黄土、海洋与湖泊沉积、大陆岩芯、石笋、珊瑚、风沙沉积等(表1)，各种古气候记录的代用指标也非常丰富，涉及物理、化学、生物等诸多方面，揭示的信

息除了温度、降水、湿度等主要的气候要素以外，还能反映太阳活动、大气成分、火山活动、人类活动强度等信息。不同代用资料在时间尺度、时间分辨率、空间分布、信息含量和可靠性方面各有其优缺点，多种代用资料的结合以及多指标综合分析是目前过去气候变化研究的发展趋势之一。

#### 参考文献

- [1] 黄秉维, 郑度, 赵名茶, 等. 现代自然地理. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Mann M, Zhang Z, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. *Science*, 2009, 326:1256-1260.
- [3] 姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 等. 冰芯记录的过去1000年青藏高原温度变化. *气候变化研究进展*, 2006, 2(3): 99-103.
- [4] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M, et al. Late glacial stage and Holocene tropical ice core records from Huascaran, Peru. *Science*, 1995, 269: 46-50.
- [5] Andersen K K, Azuma N, Barnola J M, et al. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 2004, 431: 147-151.
- [6] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(3-4): 351-364.
- [7] An Z. The history and variability of the East Asian paleomonsoon climate. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 171-187.
- [8] An Z, Clemens S C, Shen J. Glacial-interglacial Indian summer monsoon dynamics. *Science*, 2011, 333(6043): 719-723.
- [9] IPCC. Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [10] Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Impacts of climate warming on plants phenophases in China for the last 40 years. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 47(21):1826-1831.
- [11] 张霁琛. 现代气象观测. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [12] Mitchell T, Jones P. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 693-712.
- [13] Kalnay E, Karmmitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77: 437-472.
- [14] Dai Aiguo, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorol*, 2004, 5(6): 1117-1130.

- [15] Kennedy J J, Rayner N A, Smith R O, et al. Reassessing biases and other uncertainties in sea-surface temperature observations since 1850. Part 2: Biases and homogenisation. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116, D14104, doi:10.1029/2010JD015220.
- [16] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 美国NCEP / NCAR近50年全球再分析资料在我国气候变化研究中可信度的初步分析. *应用气象学报*, 2001, 12(3): 337-347.
- [17] 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. NCEP / NCAR再分析风速、表面气温距平在中国区域气候变化研究中的可信度分析. *气象学报*, 2006, 64(6): 709-722.
- [18] 李江风, 袁玉江, 由希尧. 树木年轮水文学研究与应用. 北京: 科学出版社, 2000.
- [19] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [20] Cook E R. A Time Series Analysis Approach to Tree-ring Standardization. Tucson: The University of Arizona, 1985.
- [21] Yuan Y J, Li J F, Zhang J B. 348-year precipitation reconstruction from tree-rings for the north slope of the middle Tianshan Mountains. *Acta Meteorologica Sinica*, 2001, 15: 95-104.
- [22] 勾晓华, 杨梅学, 彭剑峰, 等. 树轮记录的阿尼玛卿山区过去830年夏半年最高温度变化. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 991-998.
- [23] 梁尔源, 邵雪梅, 刘鸿雁, 等. 树轮所记录的公元1842年以来内蒙古东部浑善达克沙地PDSI的变化. *科学通报*, 2007, 52(14): 1694-1699.
- [24] Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 2111-2122.
- [25] Schweingruber F H, Fritts H C, Bräker O U, et al. The X-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin*, 1978, 38: 61-91.
- [26] Wilson R J S, Luckman B H. Dendroclimatic reconstruction of maximum summer temperatures from upper tree-line sites in interior British Columbia. *The Holocene*, 2003, 13: 853-863.
- [27] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. 2004. Large-scale temperature inferences from tree rings: A review. *Global and Planetary Change*, 40 (1-2): 11-26.
- [28] Hughes M K, Wu X, Shao X, et al. A preliminary reconstruction of rainfall in north-central China since A.D. 1600 from tree-ring density and width. *Quaternary Research*, 1994, 42, 88-99.
- [29] 刘禹, 吴祥定, 邵雪梅, 等. 树轮密度、稳定C同位素对过去近100年陕西黄陵季节气温与降水的恢复. *中国科学 (D辑)*, 1997, 27 (3): 271-277.
- [30] Wang L L, Payette S, Begin Y. A quantitative definition of light rings in black spruce (*Picea mariana*) at tharctic treeline in northern Québec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2000, 32: 324-330.
- [31] 李雁, 梁尔源, 邵雪梅. 柴达木盆地东缘青海云杉树轮细胞结构变化特征及其对气候的指示. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 524-532.
- [32] Panyushkina I P, Hughes M K, Vaganov E A, et al. Summer temperature in northeastern Siberia since 1642 reconstructed from tracheids dimensions and cell numbers of *Larix cajanderi*. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33: 1-10.
- [33] 陈峰, 袁玉江, 魏文寿, 等. 利用树轮图像灰度重建南天山北坡西部初夏温度序列. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 842-847.
- [34] 潘娅婷, 袁玉江, 喻树龙, 等. 采用树轮图像分析法重建过去气候变化. *干旱区研究*, 2007, 24(2): 255-260.
- [35] 张瑞波, 袁玉江, 魏文寿, 等. 用树轮灰度重建乌孙山北坡4-5月平均最低气温. *中国沙漠*, 2008, 28(5): 849-854.
- [36] McCarroll D, Loader N J. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 771-801.
- [37] Treydte K, Schleser G H, Helle G, et al. The 20th century was the wettest period in northern Pakistan over the past millennium. *Nature*, 2006, 44: 1179-1182.
- [38] Leavitt S W, Long A. Sampling strategy for the stable carbon isotope analysis of tree rings in pine. *Nature*, 1984, 311(5982): 145-147.
- [39] Kress A, Saurer M, Siegwolf R T W, et al. A 350 year drought reconstruction from Alpine tree ring stable isotopes. *Global Biogeochem Cycles*, 2010, 24, GB2011, doi: 10.1029/2009GB003613.
- [40] Leavitt S W, Treydte K, Liu Yu. Environment in Time and Space: Opportunities from Tree-Ring Isotope Networks. In: West J B, et al. *Isoscapes: Understanding Movement, Pattern, and Process on Earth Through Isotope Mapping*, doi: 10.1007/978-90-481-3354-3-6.
- [41] Wilson A T, Grinsted M J.  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  in cellulose and lignin as paleothermometers. *Nature*, 1977, 265: 133-135.
- [42] 马利民, 刘禹, 赵建夫, 等. 树木年轮中不同组分稳定碳同位素含量对气候的响应. *生态学报*, 2003, 23(2): 2607-2613.
- [43] Loader N J, Switsur V R, Field E M. High-resolution stable isotope analysis of tree-rings: Implications of 'microdendroclimatology' for palaeoenvironmental research. *The Holocene*, 1995, 5: 457-460.
- [44] Schleser G. H, Helle G, Lucke A, Vos H. Isotope signals as climate proxies: the role of transfer functions in the study of terrestrial archives. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18: 927-943.
- [45] February E C, Stock W D. Declining trends in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  ratio of atmospheric carbon dioxide from tree rings of South African *Widdringtonia cedarbergensis*. *Quaternary Research*, 1999, 52: 229-236.
- [46] Feng X, Epstein S. Carbon isotopes of trees from arid environments and implications for reconstructing atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59: 2599-2608.
- [47] 李正华, 刘荣谟, 安芷生, 等. 工业革命以来大气 $\text{CO}_2$ 浓度不断增加等树轮稳定同位素证据. *科学通报*, 1994, 39(23): 2172-2174.
- [48] 陈拓, 秦大河, 刘晓宏, 等. 新疆阿勒泰地区近440年来大气 $\delta^{13}\text{C}$ 变化. *应用生态学报*, 2003, 14(9): 1469-1472.
- [49] McCarroll D, et al. Correction of tree ring stable carbon isotope chronologies for changes in the carbon dioxide content of the atmosphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(6): 1539-1547.
- [50] Wang W Z, Liu X H, Shao X M, et al. A 200-yr temperature record from tree-ring  $\delta^{13}\text{C}$  at the Qaidam Basin of the Tibetan Plateau after identifying the optimum method to correct for changing atmospheric  $\text{CO}_2$  and  $\delta^{13}\text{C}$ . *JGR Biogeoscience*, 2011, doi: 10.1029/2011JG001665.
- [51] Vimeux F, Ginot P, Schwikowski M, et al. Climate variability during the last 1000 years inferred from Andean ice cores: A review of methodology and recent results. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2009, 281(3-4): 229-241.
- [52] Indermuhle A, Monnin E, Stauer B, et al. Atmospheric  $\text{CO}_2$  concentration from 60 to 20 kyr BP from the Taylor Dome ice core, Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(22): 4243-4246.
- [53] Anklin M, Schwander J, Stauer B, et al.  $\text{CO}_2$  record between 40 and 8 kyr B.P. from the GRIP ice core. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 26539-26545.
- [54] Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2  $\delta^{18}\text{O}$  climate record of the past 16500 years and the role of the sun, ocean and volcanoes. *Quaternary Research*, 1995, 44: 341-354.
- [55] Schwander J, Jouzel J, Hammer C U, et al. A tentative chronology for the EPICA Dome Concordia ice core. *Geophysical research letters*, 2001, 28(22): 4243-4246.
- [56] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice core record. *Nature*, 1993, 364: 218-220.
- [57] Salamatin A N, Lipenkov V Y, Barkov N I, et al. Ice core age dating and paleothermometer calibration based on isotope and temperature profiles from deep boreholes at Vostok Station (East Antarctica). *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 8963-8977.
- [58] 姚檀栋, 王宁练. 冰芯研究的过去、现在和未来. *科学通报*, 1997, 42(3): 225-230.
- [59] 段克勤, 洪健昌. 喜马拉雅山达索普冰芯近400a来 $\text{NO}_3^-$ 浓度的变化. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 231-234.
- [60] 王宁练. 可可西里马兰冰芯记录的20世纪净积累量变化及其与太阳活动关系研究. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 913-919.

- [61] 田立德, 姚檀栋, 余武生, 等. 青藏高原水汽输送与冰芯中稳定同位素记录. 第四纪研究, 2006, 26(2): 145-152.
- [62] Thompson L G, Yao T, Thompson E M, et al. A high resolution millennial record of the South Asian Monsoon from Himalayan ice cores. *Science*, 2000, 289: 1916-1920.
- [63] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, Barkov N I, et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399: 429-436.
- [64] Lorius C, Jouzel J, Raynaud D, et al. The ice-core record: Climate sensitivity and future greenhouse warming. *Nature*, 1990, 347: 139-145.
- [65] 姚檀栋. 古里雅冰芯近2000年来气候环境变化记录. 第四纪研究, 1997, 17(1): 52-61.
- [66] 刘先勤, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 慕士塔格冰芯记录的近50年来碳质气溶胶含量变化. 科学通报, 2008, 53(19): 2358-2364.
- [67] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, 2008, 322: 940-942.
- [68] Paulsen D E, Li H C, Ku T L. Climate variability in central China over the last 1270 years revealed by high-resolution stalagmite records. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22: 691-701.
- [69] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. Summer monsoon precipitation variations in Central China over the past 750 years derived from a high resolution absolute-dated stalagmite. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2009, 280: 432-439.
- [70] Baker A, Smart P L, Edwards R L, et al. Annual growth banding in a cave stalagmite. *Nature*, 1993, 364: 518-520.
- [71] Holmgren K, Lauritzen S, Possnert G.  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  dating of a late Pleistocene stalagmite in Lobatse II Cave, Botswana. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13(2): 111-119.
- [72] 杨勋林, 张平中, 袁道先, 等. 黄龙洞年轻石笋的 $^{210}\text{Pb}$ 测年研究. 地质论评, 2010, 56(4): 543-548.
- [73] 张会领, 蒲晓强, 覃嘉铭. 石笋有机碳作为气候指标的初步研究. 热带地理, 2011, 31(3): 231-237.
- [74] 徐丽娜, 邵晓华. 中国南方石笋中古气候代用指标的研究. 中国科技信息, 2011(8): 66-67.
- [75] 李偏, 张茂恒, 孔兴功, 等. 近2000年来东亚夏季风石笋记录及与历史变迁的关系. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(4): 201-208.
- [76] 殷建军, 覃嘉铭, 林玉石, 等. 中国近2000年来气候变化石笋记录研究进展. 中国岩溶, 2010, 29(3): 258-266.
- [77] Zhang D Z, Zhang P Z, Sang W C, et al. Implications of stalagmite density for past climate change: An example from stalagmite growth during the last deglaciation from Wanxing Cave, western Loess Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(34): 3936-3943.
- [78] 谭明. 石笋微层气候学的几个重要问题. 第四纪研究, 2005, 25(2): 164-169.
- [79] 张美良, 朱晓燕, 程海, 等. 贵州荔波1200年来石笋高分辨率的古气候环境记录. 地球学报, 2009, 30(6): 831-840.
- [80] 龚高法, 张丕远, 吴祥定, 等. 历史时期气候变化研究方法. 北京: 科学出版社, 1983.
- [81] 张丕远. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996.
- [82] 葛全胜, 张丕远. 历史文献中气候信息的评价. 地理学报, 1990, 45(1): 22-30.
- [83] 费杰, 周杰, 安芷生. 历史文献记录的唐五代时期(618—959AD)气候冷暖变化. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 109-118.
- [84] 张德二. 中国历史文献中的高分辨率古气候记录. 第四纪研究, 1995(1): 75-81.
- [85] Zheng J Y, Wang W C, Ge Q S, et al. Precipitation variability and extreme events in Eastern China during the past 1500 years. *Terr Atmos Ocean Sci*, 2006, 17(3): 579-592.
- [86] 邹逸麟, 张修桂. 关于历史气候文献资料的收集利用和辨析问题. 历史自然地理研究, 1995(2): 1-5.
- [87] 杨煜达, 王美芬, 满志敏. 近三十年来中国历史气候研究方法的进展. 中国历史地理论丛, 2009, 24(2): 5-9.
- [88] 鹿化煜, 王先彦, 孙雪峰, 等. 钻探揭示的青藏高原东北部黄土地层与第四纪气候变化. 第四纪研究, 2007, 27(2): 230-241.
- [89] 安芷生, Porter S, Kukla G, 等. 最近13万年黄土高原季风变迁的磁化率证据. 科学通报, 1990, 35(7): 529-532.
- [90] 顾兆炎, 韩家桥, 刘东生. 中国第四纪黄土地球化学研究进展. 第四纪研究, 2000, 20(1): 42-55.
- [91] 许清海, 李月丛, 李育, 等. 现代花粉过程与第四纪环境研究若干问题讨论. 自然科学进展, 2006, 16(6): 647-656.
- [92] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [93] 刘冬雁, 李巍然, 彭莎莎, 等. 粒度分析在中国第四纪黄土古气候研究中的应用现状. 中国海洋大学学报, 2010, 40(2): 79-84.
- [94] 谢远云, 李长安, 周嘉, 等. 陇西民和黄土 $\text{CaCO}_3$ 和有机碳总量的含量变化及其气候指标的局限性. 中国地质, 2003, 30(1): 99-104.
- [95] 杜青松. 黄土高原黄土-古土壤序列古气候代用指标综述. 西北地质, 2011, 44(2): 177-185.
- [96] 丁峰, 丁仲礼. 塔吉克斯坦黄土的化学风化历史及古气候意义. 中国科学, 2003, 33(6): 505-512.
- [97] 陈发虎, 饶志国, 张家武, 等. 陇西黄土高原末次冰期有机碳同位素变化及其意义. 科学通报, 2006, 51(11): 1310-1317.
- [98] 宁有丰. 黄土有机碳同位素与古气候植被定量研究进展. 地质论评, 2010, 56(6): 851-857.
- [99] 李杏茹, 方小敏, 吴福莉, 等. 黄土高原北部保德孢粉记录及早上新世夏季风强盛. 科学通报, 2010, 55(35): 3397-3402.
- [100] Li C S, Wang Y F, Sun Q G. Climate analysis of endemic Species: A novel method for quantitative analysis of global climate change since tertiary. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43 (2): 217-220.
- [101] 潘安定, 陈碧珊, 刘会平, 等. 孢粉学定量重建古气候方法探讨. 热带地理, 2008, 28(6): 493-497.
- [102] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. 湖泊科学, 2009, 21(3): 307-313.
- [103] 王苏民, 吴瑞金, 蒋新禾. 内蒙古岱海末次冰期以来的环境变迁与古气候. 第四纪研究, 1990(3): 223-232.
- [104] 陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究. 科学通报, 2004, 49(1): 1-9.
- [105] 王君波, 朱立平. 青藏高原湖泊沉积与环境演变研究: 现状与展望. 地理科学进展, 2005, 24(5): 1-12.
- [106] Liua K, Fearnb M L. Reconstruction of prehistoric landfall frequencies of catastrophic hurricanes in northwestern Florida from lake sediment records. *Quaternary Research*, 2000, 54(2): 238-245.
- [107] 翟秋敏, 郭志永, 沈娟. 豫西涇池盆地湖泊沉积特征与古环境. 地理科学, 2011, 31(8): 922-928.
- [108] Hajdas I, Bonani G, Zolitschka B. Radiocarbon dating of valve chronologies: Soppensee and Holzmaar lakes after ten years. *Radiocarbon*, 2000, 42(3): 349-353.
- [109] 金章东. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展. 地球科学与环境学报, 2011, 33(1): 34-45.
- [110] Kramer A, Herzschuh U, Mischke S, et al. Late glacial vegetation and climate oscillations on the southeastern Tibetan Plateau inferred from the Lake Naleng pollen profile. *Quat Res*, 2010, 73: 324-325.
- [111] 曾艳, 陈敬安, 朱正杰, 等. 湖泊沉积物Rb/Sr比值在古气候/古环境研究中的应用与展望. 地球科学进展, 2011, 26(8): 805-810.
- [112] 朱正杰, 任世聪, 李航, 等. 湖泊沉积物纤维素氧同位素研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(2): 198-203.
- [113] Haltia-Hovi E, Saarinen T, Kukkonen M. A 2000-year record of solar forcing on varved lake sediment in eastern Finland. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(5-6): 678-689.
- [114] 张伟. 国际大陆科学钻探计划(ICDP)实施十年的进展. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2005(S): 26-29.
- [115] 白星碧. 国际大陆科学钻探计划近况. 国土资源情报, 2003(2): 43-46.
- [116] 苏德良, 杨经绥. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展. 地质学报, 2010, 84(6): 873-886.
- [117] 宋雁翔, 何宜章. 国际大陆科学钻探的回顾成果. 岩土钻掘工程, 1999(1): 1-8.
- [118] 王成善. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究——从重大地质事件探寻地球表层系统耦合. 地球科学进展, 2006, 21(7): 838-842.

- [119] 肖霞云, 沈吉, 王苏民, 等. 鹤庆深钻孢粉记录揭示的2.78Ma以来的植被演替与气候变迁. 中国科学 (D辑), 2007, 37(6): 778-788.
- [120] 沈吉, 安芷生, 王苏民, 等. 鹤庆深钻岩芯揭示的构造-沉积旋回及其西南季风区2.78Ma以来的气候环境演化. 中国科学 (D辑), 2008, 38(3): 355-363.
- [121] 沈吉, 肖海丰, 王苏民, 等. 云南鹤庆深钻揭示的区域气候轨道尺度演化. 科学通报, 2007, 52(10): 1168-1173.
- [122] Bright J, Kaufman D S, Forester R M, et al. A continuous 250,000 year record of oxygen and carbon isotopes in ostracode and bulk: Sediment carbonate from Bear Lake, Utah-Idaho. Quaternary Science Reviews, 2006, 25: 2258-2270.

## 编辑走台站：湖北行

### 本刊编辑部

湖北省位于中国中南部，地处长江中游，是楚国的发源地，楚地之中心。2013年4月，借到中国气象局武汉暴雨研究所协调合作“中国暴雨研究”专辑的契机，《气象科技进展》编辑部走访了包括武汉暴雨所、麻城市气象局/麻城国家基本气象站、十堰市气象局/十堰国家基本气象站在内的省市县三级科研、业务单位以及行业气象部门——湖北空管分局气象台。

武汉暴雨研究所是中国气象局九个专业研究所之一，研究重点是我国陆地暴雨，特别是江淮梅雨锋暴雨、锋前暖区暴雨和登陆台风暴雨，同时开展我国西南山地暴雨和北方暴雨的比较研究。武汉多江多湖，水文气象已成为该所最具特色的项目之一。对于科研与业务的结合及相互转化，武汉暴雨研究所也有自己的一套做法。据暴雨所的同乡介绍，模式室每天都会配合气象台的预报业务，值模式预报班，汛期还会增加额外的汛期值班，以保证预报模式的正常运行。

为了了解省级科研成果在地方业务部门的应用，我们来到了麻城市气象局/麻城国家基本气象站。这里曾经是国家基准气候站，由于台站周围环境被超高建筑严重破坏，2012年底被调整为基本站，但对于麻城的气象工作者来说，他们肩上的责任并没有因此减轻，2013年台站迁往新址后，观测项目依然按基准站标准进行。在他们使用的预报预警工作平台上，除常用的欧洲、日本数值产品外，湖北自动站、黄冈区域站、湖北乡村气象服务和暴雨所产品等极具当地特色的产品占据了很大比重。据介绍，工作平台由湖北省气象局统一开发，地级市根据各自需要进行改进后供县一级业务单位使用。

和麻城不同，十堰国家基本气象站坐落在离市局不远的一个小山丘上，相比整个城市有种居高临下之感，这里是全省为数不多的安装闪电定位检测仪的台站之一，同时也承担着酸雨的观测项目。十堰市气象



台使用的工作平台同样基于省局模板的改进，但相比于麻城，作为地级市的十堰工作平台上出现了更多的产品来支撑其预报工作。除了常规的资料外，汉江丹江口水文气象产品、中尺度系统产品也是市局预报员经常关注的。

湖北空管分局气象台是本刊编辑走访的第一个气象局系统以外的，同时又和气象预报息息相关的部门。走进湖北空管分局气象台，一面挂满手绘天气图的墙吸引了我们眼球，每天手绘前一天20时四个层次的天气图是空管局预报员一天工作的开始。能和气象局进行最大程度的观测资料共享是湖北空管的预报员们最希望的。对于还在使用MICAPS2.0的预报系统，预报员们虽表现出了些许无奈，但并不妨碍他们的工作热情。“气象局有没有做区域数值模拟的？我觉得区域数值模拟在机场的局地预报中应该可以发挥很大作用。”预报员小潘热切地说道。可以看出，充分使用现有资料、冲破部门界限加强专业上的交流与合作，是各部门气象人都在期盼着的。

