

近千年温度变化研究的回顾与展望

初子莹 任国玉

中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘要 近年来, 年代到世纪尺度气候变化研究在国际地球科学领域受到高度重视, 而近千年左右大范围区域平均温度序列的重建和分析工作尤其令人瞩目, 我国的相关研究也已获得了若干重要成果。作者从过去千年温度变化概况、机制及相关研究资料和方法等方面, 对国内外近千年温度变化研究做了初步回顾和展望。

关键词 气候变化 古气候 温度序列

文章编号 1006-9585 (2005) 04-0818-08 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

An Overview of the Research on Temperature Variability of the Last 1 000 Years

CHU Zi-Ying and REN Guo-Yu

Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract In the background of global warming, the studies of natural climate variability on decadal to century time scales, one of the most active fields of the current global change research, have been remarkably emphasized for the last decade. This situation can be felt in China as well. Some progresses in the studies are obvious both in China and abroad, but there are still a lot of problems facing the paleo-science community. Although there have been some preliminary reconstructed results of regional temperature series in China, the reliability of the results needs to be further enhanced. It would be necessary to tackle such problems as the poor quality of the site reconstruction, the sparseness of the proxy-data sites and the incomplete methodology of region-averaged temperature reconstruction.

Key words climate change, medieval warm period, little ice age, regional mean temperature

1 引言

年代到世纪尺度气候变化是近年来国内外气候变化研究的一个重要方向, 是 CLIVAR 计划的 3 个主题之一。研究这个时间尺度上的气候变化和变率, 要求至少千年左右的代用气候序列, 包括温度序列和其他气候要素序列。

IPCC^[1]第三次评估报告认为, 自 19 世纪晚期

以来, 全球平均地表气温上升了 0.6 ± 0.2 °C, 其中, 增温最为显著的两个阶段——1910~1945 年和 1979 年至今, 增温率达到 0.15 °C/10 a, 20 世纪有可能是北半球过去 1 000 年里增温率最高, 温暖状态持续时间最长的阶段, 而 20 世纪 90 年代很有可能是北半球过去 1 000 年中最暖的 10 年。尽管 IPCC 评估报告同时指出, 这一结论可信度很低, 但这也暗示了 20 世纪特别是近几十年的温度变化可能是异常的, 且很可能不是由自然原因引

收稿日期 2005-07-26 收到, 2005-11-20 收到修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目课题“全球与中国气候变化的检测和预测”(2001BA611B-01) 以及中国气象局气候研究开放实验室开放基金

作者简介 初子莹, 女, 1981 年出生, 硕士, 主要从事古气候重建及器测资料分析等方面的工作。E-mail: chuziy@ema.gov.cn

起。目前,多数气候学家认为1850~1920年的变暖主要由太阳辐射的增加、火山活动的减少及气候系统内部因子的反馈引起,而导致近50年来变暖的主要影响因素则是人类活动,主要指由于温室气体排放导致的增强的温室效应^[1]。

关于这一结论,目前还存在着激烈的争论。争论的焦点之一就是20世纪特别是近几十年的增暖是否的确超出了历史上的气候温暖时期,特别是是否超出了“中世纪温暖期”^[2]。这一问题的解决,显然将取决于高精度的至少近千年左右平均地表温度序列的建立。由于缺乏这种高精度的气候代用资料,大范围区域平均温度序列的建立还非常困难,我们对年代到世纪尺度气候自然变率的了解仍然非常有限。严格地说,至今我们并没有足够的证据证明过去100多年或近几十年的增暖已经超出了气候自然变化的范围,这种状况不利于我们对过去和现在气候变化原因与机制的深入理解。

IPCC第三次评估报告还指出,基于模式预估结果,全球平均地面气温在1990~2100年期间将升高1.4~5.8℃。其中,增加我们预测难度的主要原因,在于自然强迫与人类强迫的复杂性与不确定性。因此,更好的了解年代到世纪尺度气候的自然变率显得尤其重要,这也是对预估未来气候变化的气候模式进行校准与检验的重要前提条件之一。

综上所述,重建和分析过去千年左右的温度变化序列,是了解或检测现代气候变化是否异常及其可能原因的关键所在,也是最终准确预测和预估未来气候变化的基础工作。

2 近千年温度变化研究资料与方法

古气候学家利用可记录气候变化的代用资料来重建古气候。由于代用资料的分辨率和对气候变化的敏感性不同,不同尺度的气候重建所利用的代用资料也有所不同。适用于年代到世纪尺度温度重建的代用资料以早期器测资料、历史文献资料、树轮宽度和密度资料、冰芯资料和珊瑚资料为主,湖泊沉积、花粉资料、冰川进退记录、洞穴沉积及只能表现气温低频变化的地热资料也是其有益补充。

2.1 历史文献资料

历史文献资料的存在地区主要限于欧洲和亚洲。利用历史文献恢复重建古温度曲线时,主要基于不同时期冷暖、物候以及作物分界线等指示物变化的记录。这些指示物提供的信息虽然可靠,但较难定量化,且很容易受到记录者的主观影响。一般来讲私人记录最为可靠,官方记录相对可靠,地方志可靠性较差^[3]。

中国学者关于这方面的研究较多,积累了很多利用历史文献重建温度序列的方法。其中基于不同时期物候与作物分界线差异的重建分辨率较低,如竺可桢早年对中国过去5000年气候变化轮廓的描述。而根据特征天气气候现象与温度要素的物理机制联系及统计关系反演温度的方法,则可定量地恢复温度变化,且准确性比较高,但该方法要求连续的文献记录,而事实上很少有哪个地点可满足这一要求。

目前应用较为普遍且可获得分辨率较高的温度序列的方法,是对史料记载的冷暖事件判定、分等、定级或确定指数,然后通过与现代资料的对比,进一步将其转换为相应的温度距平^[4];或以降低时间分辨率为代价,直接统计给定时段内冷、暖事件发生的频率,据此重建温度变化曲线或生成冷暖指数序列^[5]。但大多文献中的温度相关记载均为极端事件,而对于极端温暖与寒冷事件与平均温度之间是否存在明确的关系等问题,还缺乏充分的认识,由此得出的温度序列的可信性也需进一步验证。

无论如何,对于恢复区域千年尺度的温度曲线,综合使用以上方法将是最好的重建途径,葛全胜等^[6]曾利用以上多种方法初步重建了过去2000年中国东部冬半年的温度变化序列,并得到了较为满意的结果。

2.2 树轮资料

由于定年准确、连续性好、分辨率高且分布范围^[7],在过去千年左右尺度的气候重建中,树轮资料的应用极为广泛。通常树轮宽度与密度是树木生长情况的最好指示,近年来也有很多学者利用树轮中的稳定碳同位素来恢复过去气候。目前,国际上更强调多种树轮代用指标的合并,一般来讲,合并后的序列具有信号强,可信度高的特点,是恢复古气候更为有效的途径^[7]。

树轮资料主要源自中高纬度陆地区域或高山地区的一些树种,由于不同地区气候状况与地理位置不同,树轮资料所指示环境的季节与适合重建的气候要素(温度或降水)也有所不同。一般来讲,大多树轮资料只指示温暖季节的环境。在古温度重建方面,树轮密度通常为较好的指标,已经有很多学者利用树轮资料恢复了地区甚至半球尺度的温度曲线^[8-10]。我国这方面的工作也取得了可喜进展,在单点占温度重建方面开展了许多研究^[11-19]。但由于资料相对稀疏,目前国内尚未有利用树轮资料重建的区域平均温度曲线。

当然,利用树轮资料恢复历史温度序列也存在一些问題。如,对年表做平均或平滑时引起的序列高频部分信号的遗失;去除树木生长趋势时引入的低频气候信号的损失和误差;以及一些自然因素如采样点树木郁闭度改变而导致的轮宽低频变化等。目前,由于年代到世纪尺度的气候变化广受关注,如何保留树轮年表中的低频气候信息成为树轮气候学领域近年来的焦点问題之一,而区域曲线标准化法(regional curve standardization)与年龄绑定法(age band method)则是当前解决这一问題的主要方法^[20]。

此外,其他不确定性也给树轮气候学的研究增大了难度。其中,20世纪下半叶以来,北半球高纬度地区的树木生长对地表气温敏感性的下降是对树木年轮气候学的极大挑战^[21]。这将直接影响采用轮宽或密度建立定量转换气候要素的校准方程。对此,人们目前尚未找到明确的解释,但近百年来增加的二氧化碳施肥效应可能是造成这种现象的重要原因。

2.3 冰芯资料

冰盖和冰帽是研究古气候变化最可靠的天然档案之一,从冰川上适当的位置钻取冰芯加以分析,是目前重建高分辨率古气候序列的重要手段。冰芯资料只分布在极地或中低纬度的高海拔地区。Dansgaard^[22]首先将氧同位素比率可反映气温的思想应用于冰川学研究,发现粒雪层中氧同位素比率变化与雪层层位特征及气温季节变化具有很好的一致性。不同的冰芯资料具有不同的优缺点。高山冰芯分辨率较高,可达到年甚至季节,适于恢复年代到世纪尺度的温度变化,但可提供理想样本的地点少;而在理想样本丰富的南北极地区,

高分辨率的冰芯资料却非常稀少。目前,反映年代到万年尺度古气候变化最好的冰芯资料多来自格陵兰地区,其绝对定年误差可达 $2\sim 3\text{ a}/10\text{ a}$,而以标志性的火山爆发为基准的相对定年误差可达百分之几。来自南极大陆的冰芯资料对于重建更长时间尺度的温度和大气成分变化具有重大价值。但是,对于近千年左右的温度变化,目前还缺乏高精度的冰芯资料序列。

我国青藏高原地区冰川资源丰富,在大陆性冰川(尤其是平顶冰川)上,比较适合进行冰芯研究。目前已有祁连山敦德、西昆仑古里雅和喜马拉雅山中段希夏邦马峰达索普至少3条可反应过去千年左右温度变化的冰芯序列^[23-25]。

利用冰芯资料恢复古温度的主要误差来源于年代测定及当地温度与 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的关系。在南北极地区, $\delta^{18}\text{O}$ 对温度具有很好的指示意义,但中低纬度高山和高原地区降雪中的 $\delta^{18}\text{O}$ 与当地温度之间的关系没有南北极地区密切。

2.4 其他代用资料

珊瑚资料在恢复热带、副热带海洋地区温度序列的工作中起着不可替代的作用,但目前对于非气候因素的可能影响并没有很好的了解,与树轮和冰芯资料相比较,相关工作依然存在很大差距;湖泊沉积是很好的降水或湿度代用资料,但在高分辨率的温度重建方面尚显不足,部分与温度相关较好的指示物也可用于重建年代到多年代分辨率的温度序列^[26];孢粉资料一般分辨率较粗,且在许多地区植被变化和花粉沉积受人类活动影响严重,难以用来重建高分辨率温度序列;利用洞穴沉积特别是石笋资料恢复古气候具有一定潜力,特别在重建千年以上时间尺度温度变化方面。石笋资料对于重建近千年温度变化的作用还需要进一步确认。然而作为上述资料的有益补充,石笋资料的价值依然不容忽视^[27]。

2.5 综合代用资料

以上气候代用资料各有利弊,在充分认识到这些问题的基础上,综合使用它们来重建过去几百年到几千年的平均温度曲线是有可能的。Overpeck等^[28]、Jones等^[29]、Mann等^[30,31]、Crowley等^[32]等人都曾综合各种代用资料,重建了过去几个世纪甚至千年的全球或半球平均温度曲线。在我国,王绍武等^[33]也曾综合史料、冰芯及树轮资

料, 重建了中国 10 个地区近 400~1 000 年的 10 年平均气温序列; Yang^[34]则在中国及周边地区选取了 11 条具有年到 50 年分辨率的代用温度资料序列, 重建了具有 10 年分辨率的中国近 2 000 年温度曲线。

2.6 温度重建方法

重建古温度序列的方法有很多, 特别在树轮气候学上, 有很多经典的方法可以借鉴, 这里不再赘述。然而, 对于综合各种代用资料的气候序列重建, 不同代用资料间的归一化问题是工作中的难点。不同的代用资料及其重建序列在时间分辨率、季节指示性、频率指示性、信噪比率、定量程度等多方面均存在差异, 需要采用适当方法进行归一化和标准化。Mann 等^[30]利用树轮资料重建区域曲线时使用了正交空间回归法^[8], 提取原始序列中与气候相关的信息。Fisher 等^[35]也用类似的方法评估了所恢复的气候信号与误差。

3 主要研究进展

3.1 温度变化事实

关于近千年的温度变化, 当前研究的焦点主要集中在小冰期和中世纪暖期。早期的研究表明, 尽管部分地区的变化与全球变化的大趋势相悖, 但近代的增暖和此前存在了近半个千年的小冰期可能都是全球性事件^[36,37]。然而, 由于代用资料的可靠性较低、资料覆盖面小, 且存在科学以外因素的介入等问题, 关于中世纪暖期是否曾在全球或北半球较大范围内存在, 以及其温暖程度是否接近或超过了 20 世纪晚期等问题, 一直存在相当多的争议。由于中世纪暖期可能是过去 1000 年内唯一可能与近代增暖相比较的时期, 因此, 该阶段对于确定当代气候变化的历史地位和基本原因具有关键作用, 它的精确再现甚为重要。近年来, 越来越多的古气候学家试图将温度曲线恢复到公元 1000 年左右, 甚至更久远的年代。

Hughes^[38]认为, 很多古气候证据表明, 在 9~14 世纪, 至少有部分地区的温度超过了 20 世纪初, 这些地区包括斯堪地纳维亚半岛、中国、美国加利福尼亚的内华达山脉、加拿大的落基山脉以及塔斯马尼亚等地; 然而, 也有证据表明, 美国东南部、地中海以及南美部分地区, 在这一时

期并不存在显著的温暖阶段, 因此, 中世纪暖期似乎并不在半球或全球尺度内普遍存在。Bradley 等^[39]认为, 中世纪全球或半球平均气温不可能高于 20 世纪, 但一些地区的干旱非常严重。最为典型的是美国西部在 1210~1350 年的长期干旱, 因此把中世纪暖期称为“中世纪气候异常”可能更合适。IPCC 第三次评估报告引用了 Mann 等人^[31]的北半球夏季温度千年曲线, 近代增暖前, 该序列以逐渐变冷的趋势为主, 中世纪暖期并不明显, 但 20 世纪增温迅速且异常温暖。关于这条曲线, 古气候学界颇有争议。此前, Jones 等^[29]曾给出大体相似的结果, 但对资料的问题和结果的不确定性未给予更多关注。Esper 等^[10]利用树轮资料重建的温度曲线则在过去千年里表现出了更大的波动, 并展示了几乎与现代变暖程度相当的中世纪暖期。

小冰期可能是千年尺度气候波动中最近的一个冷期。不同于早期的气候波动, 在人类的观测记录中, 关于小冰期的记载非常丰富, 而且这些记录已经包括如雨量计、温度计等早期的气象仪器记录。其他如树轮等代用资料在这个时段内也具有较强的指示性。因此, 学者们对小冰期的研究相对来说也更为透彻。大部分全球或北半球的温度重建序列都在 16~19 世纪展示出了相对寒冷的特征, 其中在北半球大陆地区, 17 世纪和 19 世纪可能是小冰期内两个温度最低的阶段^[39,40]。

当然, 近 10 余年的主流学派认为, 中世纪暖期和小冰期均不足普遍现象, 全球或半球平均温度序列没有展示明显的中世纪暖期, 小冰期的界定可能也不像过去认为的那样清晰^[31,41]。由于这一看法对全球气候变化主流学术观点具有支撑作用, 近年来受到古气候学界以外的部分研究者的赞赏。

3.2 温度变化的原因

一般认为, 全球或半球气温变化与太阳黑子活动周期同步。15、17、19 世纪发生在亚欧大陆的三次明显冰川前进阶段分别对应 3 次太阳黑子最小期, 17 世纪的 Maunder 极小期是 2 000 多年来太阳黑子最少的一个阶段, 也是小冰期内最为寒冷的阶段之一^[41]。Lean 等^[42]利用现代太阳监测器资料与太阳耀斑亮度和黑子暗度关系, 重建了 1610 年以来的太阳辐照度变化序列。该序列的

变化与利用大气中 ^{14}C 和 ^{10}Be 确定的太阳活动指数非常相似。他们的研究表明,在1610~1800年的前工业化时期,太阳辐照度的变化可解释北半球地表温度变化74%的方差,二者相关系数达到0.86;而1800年至今,太阳活动的方差贡献亦可达56%。由此,可认为太阳活动周期可能是近400年温度变化的主导因子。

然而,一般认为,即使在世纪时间尺度上,太阳活动引起的太阳辐射输出量的变化也是微弱的,而地表气温对这一相对微弱的太阳输出辐射变化的响应机制,一直是气候变化研究中的一个疑点^[43,44]。Shindell等^[44]认为太阳辐射的变化在平流层或热层得到了一定程度的放大。Salby等^[45]则用统计方法证明,太阳活动的变化影响了气候系统内部强迫因子,如大气和海洋内部的涛动,进而作用到地表大气。

火山活动可能也是影响过去千年气候变化的重要驱动因素。据统计,火山喷发出的 SO_2 总量与北半球温度下降幅度之间存在着明显的正相关关系。一些研究指出,“中世纪暖期”火山活动较弱,而“小冰期”火山活动也相对较强。Briffa等^[46]研究了过去600年火山爆发对北半球夏季温度的影响,在高分辨率的树轮重建温度序列上,很多强的冷事件发生的当年或前一年都被证实有大规模的火山活动发生。Mann等^[30]曾在对重建的过去600年温度序列的分析中提到,18、19世纪的偏冷气候很大程度上与该时段火山的频发密切相关。

此外,北大西洋温盐环流、北大西洋涛动与热带太平洋海气的动力耦合作用可能也是引起大范围长期温度变化的重要因子。研究认为,北大西洋温盐环流与热带太平洋海气的动力耦合作用很可能是引发气候突变的关键^[47],同时,洋流和海表温度的变化可能也对年代到世纪尺度的气候变化产生了深远的影响。但目前还没有高度可靠的资料证实这种联系。近年来的很多研究还表明,陆面系统如植被覆盖的变化也对全球或半球气候有一定影响。

3.3 国内研究进展及展望

过去的30年里,我国积累了大量有价值的古气候代用资料。其中,根据我国历史文献资料和冰芯资料获得的我国历史时期气候变化序列尤其

受到国内外同行的瞩目。20世纪80年代末期以来,中国科学院在历史文献资料稀少的我国西部地区开展了大规模的冰芯和树木年轮样品采集与分析工作,积累了可贵的古气候代用资料。与此同时,关于我国中世纪暖期和小冰期的研究也有了不少成果。

竺可桢^[48]认为,中国隋、唐时期(公元589~907年)气候温暖,宋朝(公元960~1279年)气候转凉,即中国的暖期出现在欧洲中世纪暖期之前。20世纪90年代以来,国内学者的进一步研究发现,中国可能也存在中世纪暖期^[5,49,50]。王绍武等^[33]利用史料重建了中国东部公元800年以来的气温序列,认为从公元9世纪后半叶到11世纪及13世纪,中国东部气温可能与20世纪平均相当或略低;康兴成^[15]根据青海都兰树木年轮,指出公元819~1086年为持续时间最长的暖期;姚檀栋^[23]通过对青藏高原东北部的古里雅冰芯分析研究,认为该地区公元9世纪比较暖;葛全胜等^[6]则由利用史料重建的我国东部冬半年温度序列认为,930~1310年为我国东部与欧洲中世纪暖期相对应的阶段;刘晓宏等^[4]通过对祁连山树轮宽度变化的研究,认为相应的中世纪暖期在祁连山区出现在1050~1150年间。由上述结果可见,尽管多数研究认为我国可能存在着中世纪暖期,但一些研究给出的温暖时段却存在着明显差别,东西部中世纪暖期可能有所差异。

相比之下,国内对小冰期的研究结果则颇为统一。竺可桢^[48]指出,中国东部寒冷的冬季多出现在1470~1520年、1620~1720年及1840~1890年。此后,很多学者都对小冰期有过较细致的研究。近年来王绍武等^[51]、葛全胜等^[6]及杨保^[34]的最新区域千年温度曲线及个别地区代用资料重建温度序列中都存在清晰的小冰期阶段。他们的结果大体上可以与北半球其他地区的小冰期寒冷阶段相对比。

目前,我国已经建立的区域或单点温度序列以东部的历史文献资料、北方和西部的树轮资料以及青藏高原地区的冰芯资料为主,此外,若干湖泊沉积、花粉、石笋等分辨率较粗或未经过定量校准的代用资料也可作为恢复过去千年温度曲线的有益补充。然而,较之我国广袤的国土而言,以上代用资料的分布尚显稀疏,这在相当程度上

限制了全国范围近千年温度序列的重建工作; 此外, 我国大多数气象站点的仪器观测都始于 50 年代以后, 较短的器测资料序列也给代用资料的校订工作带来了一定难度, 特别是一些分辨率较粗的代用资料, 几乎无法利用器测资料进行校订。综合以上两点, 在中国, 目前还不大可能利用类似于正交空间回归的方法来重建百年到世纪尺度的气候变化, 同时 10 年以上分辨率的气候序列也因没有足够长度的器测资料对比而缺乏可信度。

因此, 在我国, 单点温度代用资料的发掘和分析工作仍然非常必要和紧迫, 应当更为有序的开展。研究的重点区域应当放在青藏高原、西南地区、华南地区、东北和内蒙古等地区, 采用树轮、冰芯、高分辨率湖泊沉积、石笋、历史文献等代用资料建立单点或区域千年左右温度序列。我国东部其他地区的历史文献资料还应该深入挖掘和分析, 采用对温度反映敏感的指示物建立年温度变化序列。要对大范围或全国平均温度重建的方法学开展研究, 为进一步建立千年温度序列奠定基础。

4 结束语

代用气候资料的可靠性明显低于器测资料。但由于年代到世纪尺度气候变化不能单独依赖器测资料, 代用资料的价值仍然十分重要, 需要给予足够重视。20 世纪 90 年代以来, 利用代用资料分析近千年温度变化受到很多关注, 区域平均温度的重建也获得若干初步结果, 但主要由于资料本身问题和空间覆盖面不够, 这方面的工作还有待加强和深入。改进单点重建序列的质量, 增加关键地区温度序列重建的点数, 开展综合代用资料归一化和区域平均序列重建的方法学研究, 将有助于促进我国近千年温度变化规律和原因的研究。

参考文献

- [1] IPCC, WG1. *Climate Change: Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [2] 任国玉. 与当前全球变暖有关的古气候学问题. 应用气象学报, 1996, 7 (3): 361~370
- Ren Guoyu. Some palaeoclimatological problems associated with the present global warming. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, 7 (3): 361~370
- [3] 葛全胜, 张不远. 历史文献中气候信息的评价. 地理学报, 1990, 45 (1): 22~29
- Ge Quansheng, Zhang Piyuan. The evaluation on climatic information in the historical literature. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1990, 45 (1): 22~29
- [4] 王绍武, 王日昇. 1470 年以来我国华东四季与年平均气温变化的研究. 气象学报, 1990, 48: 26~35
- Wang Shaowu, Wang Risheng. Variations of seasonal and annual temperature during 1470—1978 AD in Eastern China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1990, 48: 26~35
- [5] 张德二. 我国“中世纪温暖期”气候的初步研究. 第四纪研究, 1993, (1): 7~15
- Zhang De'er. A study on the Medieval Warm Period in China. *Quaternary Research* (in Chinese), 1993, (1): 7~15
- [6] 葛全胜, 郑景云, 汤志敏, 等. 过去 2000 年中国东部冬半年温度变化序列重建及初步分析. 地学前缘, 2002, 9 (1): 169~181
- Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Man Zhimin, et al. Reconstruction and analysis on the series of winter-half-year temperature changes over the past 2000 years in eastern China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2002, 9 (1): 169~181
- [7] 邵雪梅. 树轮年代学的若干进展. 第四纪研究, 1997, (3): 265~271
- Shao Xuemei. Advancements in dendrochronology. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1997, (3): 265~271
- [8] Briffa K R, Jones P D. Tree-ring density reconstructions of summer temperature patterns across western north America since 1600. *J. Climate*, 1992, 5: 735~753
- [9] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H, et al. Low-Frequency temperature variations from a northern tree ring density network. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106: 2929~2941
- [10] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-Frequency Signals in Long Tree Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability. *Science*, 2002, 295: 2250~2253
- [11] 邵雪梅, 吴祥定. 利用树轮资料重建长白山区过去气候变化. 第四纪研究, 1997, (1): 76~83
- Shao Xuemei, Wu Xiangding. Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, Northeastern China using tree-ring data. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1997, (1): 76~83
- [12] 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安

- 1755 年以来的初春温度. 气象学报, 2000, **58** (3): 220~229
- Liu Hongbin, Shao Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature at Zhenan from 1755 using tree ring chronology. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **22** (3): 220~229
- [13] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽窄资料所指示的川西过去气候变化. 第四纪研究, 1999, (1): 81~88
- Shao Xuemei, Fan Jinmei. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of dragon spruce. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1999, (1): 81~88
- [14] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. 中国科学 (D 辑), 2004, **34** (1): 89~95
- Liu Xiaohong, Qin Dabao, Shao Xuemei, et al. Temperature change in the middle of Qilian Mountain area over the past 1000 years, using tree-ring data. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2004, **34** (1): 89~95
- [15] 康兴成. 利用树轮资料重建青海都兰地区过去 1835 年的气候变化. 冰川冻土, 2000, **22** (1): 65~72
- Kang Xingcheng. Reconstruction of a 1835a past climate for Dulan, Qinghai Province, using tree-ring. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2000, **22** (1): 65~72
- [16] 袁江江, 李江风. 天山乌鲁木齐河源 450a 冬季温度序列的重建与分析. 冰川冻土, 1999, **21** (1): 64~70
- Yuan Yujiang, Li Jiangfeng. Reconstruction and analysis of 450 year's winter temperature series in the Urumpi River Source of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1999, **21** (1): 64~70
- [17] 秦宁生, 邵雪梅, 靳立亚, 等. 青藏高原树轮年表的建立及与气候要素的关系. 高原气象, 2003, **22** (5): 445~450
- Qin Ningsheng, Shao Xuemei, Jin Liya, et al. Tree-ring chronology in southern Qinghai and its relation to climatic element. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (5): 445~450
- [18] 吴祥定, 孙力, 洪绪志. 利用树木年轮资料重建西藏中部过去气候的初步尝试. 地理学报, 1989, **44** (3): 334~341
- Wu Xiangding, Sun Li, Zhan Xuzhi. Preliminary reconstruction of climate in the middle of Tibet, using tree-ring data. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 1989, **44** (3): 334~341
- [19] Achim Braeuning. Climate history of the Tibetan Plateau during the last 1000 years derived from a network of Juniper chronologies. *Dendrochronologia*, 2001, **19** (1): 127~137
- [20] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 2002, **295**: 2250~2252
- [21] Briffa K R, Schweingruber F H, Jones P D. Reduced sensitivity of recent tree-growth to temperature at high northern latitudes. *Nature*, 1998, **391**: 678~682
- [22] Dansgaard W. The O^{18} -abundance in fresh water. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1954, **6**: 241~260
- [23] 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, (1): 52~61
- Yao Tandong. Climatic and environmental record in the past about 2000 years from the Guliya ice core. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1997, (1): 52~61
- [24] 姚檀栋, Thompson L G. 敦德冰芯记录与过去 5 ka 温度变化. 中国科学 (B 辑), 1992, (10): 1089~1093
- Yao Tandong, Thompson L G. Records of temperature change over the past 5000 years in Dunde ice core. *Science in China* (Ser. B) (in Chinese), 1992, (10): 1089~1093
- [25] 姚檀栋, 徐柏青, 段克勤, 等. 青藏高原东达索普冰芯 2ka 来温度与甲烷浓度变化记录. 中国科学 (D 辑), 2002, **32** (4): 346~352
- Yao Tandong, Xu Baiqing, Duan Keqin, et al. The records of temperature and methane concentration change in Dasuopu ice core over the past 2000 years. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2002, **32** (4): 346~352
- [26] 曹建廷, 金章东, 沈吉, 等. 近 800 年来内蒙古岱海地区古气温的定量重建. 地理科学, 2003, **23** (3): 299~303
- Chao Jianting, Jin Zhandong, Shen Ji, et al. An 800-year temperature reconstruction in Daibai Lake area of Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **23** (3): 299~303
- [27] Tan M, Liu T, Hou J, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2850-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (12): 1617~1620
- [28] Overpeck J, Huguken, K, Hardy D, et al. Arctic Environmental Change of the Last Four Centuries. *Science*, 1997, **278**: 1251~1256
- [29] Jones P D, Briffa K R, Barnett T P, Tett S F B. High-resolution paleoclimatic records for the last millennium; interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures. *The Holocene*, 1998, **8** (4): 455~471
- [30] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 1998, **392**: 779~787
- [31] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium; inferences, uncertainties, and limitations. *Geophys. Res.*

- Lett., 1999, **26**: 759~762
- [32] Crowley T J, Lowery T S. How warm was the medieval warm period? *Ambio*, 2000, **29** (1): 51~54.
- [33] 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
Wang Shaowu, Gong Daoyi. Temperature change in China during some typical periods in Holocene. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2000, **10** (4): 325~332
- [34] Yang Bao. Climatic variations in China over the last 2000 years. *Chinese Geographical Science*, 2001, **11** (2): 97~103
- [35] Fisher D A. High-resolution multiproxy climatic records from ice cores, Tree-rings, corals and documentary sources using eigenvector techniques and maps assessment of recovered signal and errors. *The Holocene*, 2003, **12** (4): 401~419
- [36] Lamb H H. Climatic History and the Future. In: *Climate, Present, Past and Future*. London: Methuen and Co Ltd., 1977
- [37] Bradley R S. *Quaternary Paleoclimatology*. Boston: Allen and Unwin, 1985
- [38] Hughes M K. Was there a 'medieval warm period', and if so, where and when? *Climatic Change*, 1994, **26**: 109~142
- [39] Bradley R S, Briffa K R, Cole J, et al. The climate of the last millennium. In: *Paleoclimate, Global Change and the Future*. Alverson K D, Bradley R S, Thomas F P, Eds. Global Change-the IGBP Series (PAGES), 2003, 105~141
- [40] Briffa K R, Osborn T J. Blowing, hot and cold. *Science*, 2002, **295**: 2227~2228
- [41] 汤懋苍. 大冰期、冰期、小冰期、和冰川波动原因的内在同一性. <http://www.tibet-web.com/ziran/10keyan/09.htm>
Tang Maocang. Inner identity among big ice age, ice age, little ice age and glaciers fluctuation. <http://www.tibet-web.com/ziran/10keyan/09.htm>
- [42] Lean J, Beer J, Bradley R. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, **22**: 3195~3198
- [43] Lean J, Rind D. Earth's response to a variable Sun. *Science*, 2001, **292**: 234~236
- [44] Shindell D T, Schmidt G A, Mann M E. Solar forcing of regional climate change during the Maunder Minimum. *Science*, 2001, **294**: 2149~2152
- [45] Salby M L, Shea D J. Correlations between solar activity and the atmosphere: An unphysical explanation. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 22579~22595
- [46] Briffa K R, Jones P D, Schweingruber F H. Influence of volcanic eruptions on northern hemisphere summer temperature over the past 600 years. *Nature*, 1998, **393**: 450~454
- [47] Broecker W S. Does the trigger for abrupt climate change reside in the ocean or in the atmosphere? *Science*, 2003, **300**: 1519~1522
- [48] 竺可桢. 中国近 5000 年来气候变迁的初步研究. 中国科学, 1973, (1): 168~189
Zhu Kezhen. Preliminary research about climate change over the past 5000 years in China. *Science in China* (in Chinese), 1973, (1): 168~189
- [49] Ren G. Pollen evidence for increased summer rainfall in the Medieval warm period at Maili, Northeast China. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**: 1931~1934
- [50] 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2000
Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu. *Global Change* (in Chinese). Beijing, Higher Education Press, 2000
- [51] 王绍武, 叶雄琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. 第四纪研究, 1998, (1): 54~64
Wang Shaowu, Ye Xinlin, Gong Daoyi. Climate in China during the little ice age. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 1998, (1): 54~64