

论文

过去 2000 年中国气候变化的若干重要特征

葛全胜, 郑景云, 郝志新*, 刘浩龙

中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: haozx@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2011-06-01; 接受日期: 2012-01-28

全球变化研究国家重大科学研究计划(编号: 2010CB950100)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-YW-Q1-01)和国家自然科学基金(批准号: 41071029)资助

摘要 集成已有的高分辨率气候重建序列, 分析了过去 2000 年中国气候变化的主要特征、区域差异和已有重建结果的不确定性. 结果表明: 秦汉以来中国温度变化经历了两汉(公元前 200~公元 180 年)、隋唐(541~810 年)、宋元(931~1320 年)及 20 世纪 4 个暖期和魏晋南北朝(181~540 年)、晚唐(811~930 年)及明清(1321~1920 年) 3 个冷期, 其中宋元暖期与北半球存在的中世纪暖期基本对应, 而魏晋南北朝和明清冷期分别与黑暗时代冷期和小冰期相当; 13~15 世纪为气候由干向湿发展的转折点, 且中国西部在 1500 年以前降水变率较小; 在温暖气候背景下, 北旱南涝是中国东部主要的降水空间格局. 此外, 已有的温度变化重建结果在公元 1500 年前分歧较大, 但 1500 年以后一致性较高.

关键词过去 2000 年
温度(冷暖)
降水(干湿)
不确定性

过去 2000 年气候变化研究对揭示年代至百年尺度的气候变率, 评估全球变暖的自然和人为驱动贡献, 认识人类活动在过去和将来气候变化中的作用具有极为重要的科学意义. 早在 20 世纪 60 年代, Lamb^[1,2]利用多种证据对历史时期的气候变化进行了阐述, 并指出了“中世纪暖期”和“小冰期”等气候阶段. 在中国, 竺可桢^[3]利用考古证据与自然物候记载首次建立了过去 5000 年中国温度变化曲线, 描绘了中国历史时期冷暖变化的基本轮廓. 20 世纪 80 年代以来, 又有许多学者利用史料对中国东部各地的冷暖(温度)、干湿(降水)变化进行了重建^[4-9], 利用树轮、冰芯、石笋、沉积、孢粉和珊瑚等自然证据对中国东北和华北北部、西北和青藏高原及东南沿海地区过去气候变化进行了研究^[10-15], 并综合多种代用指标, 重建了覆盖全国范围的过去 1000^[16]和 2000 年温度变化

序列^[17], 同时也利用气候模式对中国过去 1000 年的气候变化进行了模拟^[18]. 本文拟以这些序列为基础, 分析过去 2000 年中国气候变化的主要特征及气候变化重建结果的不确定性, 并对中国与北半球温度变化的异同进行比较.

1 序列选用简介

本文使用的序列来源于近年公开发表的论文, 并根据以下两个原则选取: 一是该序列可指示较大区域(包括全国)范围的温度和降水变化; 二是序列长度至少达 1000 年, 且时间分辨率至少为 30 年. 其中利用代用资料重建的温度序列有 5 条, 分别是: 根据历史文献记载的物候及相关证据重建的公元前 210~公元 2010 年中国东中部冬半年(10~4 月)温度序列,

时间分辨率为 10~30 年^[8,19]; 利用祁连山中段森林上限祁连圆柏的树轮宽度和 ^{13}C 同位素重建的 10~4 月温度变化序列, 时间分辨率为 3 年, 该序列对青藏高原东北部温度变化具有很好的代表性^[10]; 青藏高原 4 支冰芯(普若冈日、古里雅、达索普和敦德冰芯)记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值序列, 时间分辨率为 10 年, 该序列代表青藏高原最近 2000 年的温度变化^[20]; 采用多源证据集成重建的过去 1000 年全国平均温度序列^[16]和过去 2000 年中国温度变化序列^[17], 时间分辨率均为 10 年. 需要说明的是这两条代表全国平均温度变化序列的重建方法基本一致, 但在原始序列的选取上存在差别. 此外, 为进行比较, 本文还选取了利用 ECHO-G 模式模拟的过去 1000 年中国东部($25^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 123.75^{\circ}\text{E}$)温度变化序列^[18], 该序列以随时间变化的有效太阳辐射、 CO_2 浓度和 CH_4 浓度变化为外强迫, 以及集成中国西部和北部地区冰川进退、植被带移动、冰缘活动和古土壤发育等证据所指示的过去 2000 年温度阶段性变化序列^[21].

利用代用资料重建的干湿序列有 5 条, 分别是: 华北、江淮、江南及整个东中部地区过去 2000 年干湿指数序列(正值表示降水偏多, 负值表示降水偏少), 它们根据源于历史文献记载确定的 48 个站点旱涝等级重建^[9]; 以及可指示青海柴达木盆地东北部气候干旱历史的公元前 1585~公元 2005 年祁连圆柏轮宽指数年表, 本文选取了 1~2005 年时段用以指示降水变化^[15].

2 温度变化

2.1 基本特征

过去 2000 年区域尺度温度变化的重建及模拟序列显示(图 1): 因各序列使用的重建手段及重建结果的时间分辨率不同, 其在年代际尺度上的变化特征不尽一致, 但百年际尺度的波动特征较为相似. 自秦朝以来, 中国冷暖变化大致可划分为公元前 200~公元 180, 181~540, 541~810, 811~930, 931~1320, 1321~1920 和 1921 年以后等 7 个阶段. 其中, 公元前 200~180, 541~810, 931~1320 和 1921~2000 年等 4 个阶段相对温暖, 东中部地区的冬半年平均气温分别较今(1951~1980 年)高 0.28, 0.48, 0.18 和 0.27 $^{\circ}\text{C}$; 181~540, 811~930 和 1321~1920 年等 3 个阶段相对寒冷, 东中部地区的冬半年平均气温分别较今低 0.30,

0.28 和 0.39 $^{\circ}\text{C}$. 除定量的重建结果外, 山地冰川进退、冰缘活动和古土壤发育等温度代用证据也指示了这一变化规律. 秦汉以来中国北方地区和青藏高原大致出现了 3 个相对寒冷时期, 分别是 1~550, 801~1000 和 1301~1900 年, 以及 4 个相对温暖时期, 分别是公元前 200~公元前 1 年, 551~800, 1001~1300 年和 20 世纪以后^[21].

需要指出的是尽管图 1 中序列(e)和(f)均根据多源证据集成重建, 且皆代表全国, 但二者的相关系数只有 0.61(通过 0.01 显著性水平检验), 特别是在 1000~1250 和 1700~1850 年等时段, 两条序列的相似性极低. 分析其差异产生的原因, 我们认为主要是由两条序列采用的原始序列不同所致. 这些不同主要表现在两个方面: 一是序列(e)选用了更多的原始代用序列, 但多源于中国西部, 特别是青藏高原地区, 因而它可能含有更多的西部地区温度变化信息; 序列(f)选用的原始代用序列空间密度虽较低, 但却基本覆盖整个中国, 故空间代表性更高一些; 二是选用的原始代用序列不同, 有的指示季节温度变化信息, 有的则为年温度变化信息, 且不同原始代用序列的时间分辨率和对温度变化的方差解释量也存在差异.

在上述冷、暖阶段交替过程中, 温度存在较快变化速率与较大变幅(最高与最低点差值). 以中国东中部冬半年气温变化计, 这些冷暖交替过程的升(降)温速率达 1 $^{\circ}\text{C}/100$ a, 甚至更大. 其中, 公元前 90~公元 30 年的降温速率达 1.2 $^{\circ}\text{C}/100$ a; 781~870 年的降温速率达 0.9 $^{\circ}\text{C}/100$ a; 1231~1380 年的降温速率为 1.4 $^{\circ}\text{C}/100$ a. 而 481~630 年的升温速率约为 1.5 $^{\circ}\text{C}/100$ a; 871~990 年的升温速率达 1.1 $^{\circ}\text{C}/100$ a; 1861~2007 年的升温速率则超过了 1.2 $^{\circ}\text{C}/100$ a. 在各冷、暖阶段内, 温度变化也存在较大的振幅. 如在 931~1320 年的暖期中, 1081~1170 年的降温和 1171~1260 年的增温, 其幅度分别达 1.0 和 1.4 $^{\circ}\text{C}$; 在 1321~1920 年的冷期中, 1381~1470 和 1741~1830 年的降温幅度分别为 0.8 和 0.9 $^{\circ}\text{C}$; 1441~1530 和 1651~1770 年的升温幅度也分别达 0.8 和 1.2 $^{\circ}\text{C}$.

此外, 温度变化还具有多尺度的准周期波动特征, 其中 100~300, 400, 准 600 和 1350 年左右的千年周期较为显著. 根据冷暖变化的 1350 年重现周期推断, 20 世纪属持续时间长度为 200 多年的暖期, 在位相上与 570s~770s 的隋唐暖期相同, 其变化过程也与隋唐暖期非常相近^[21].

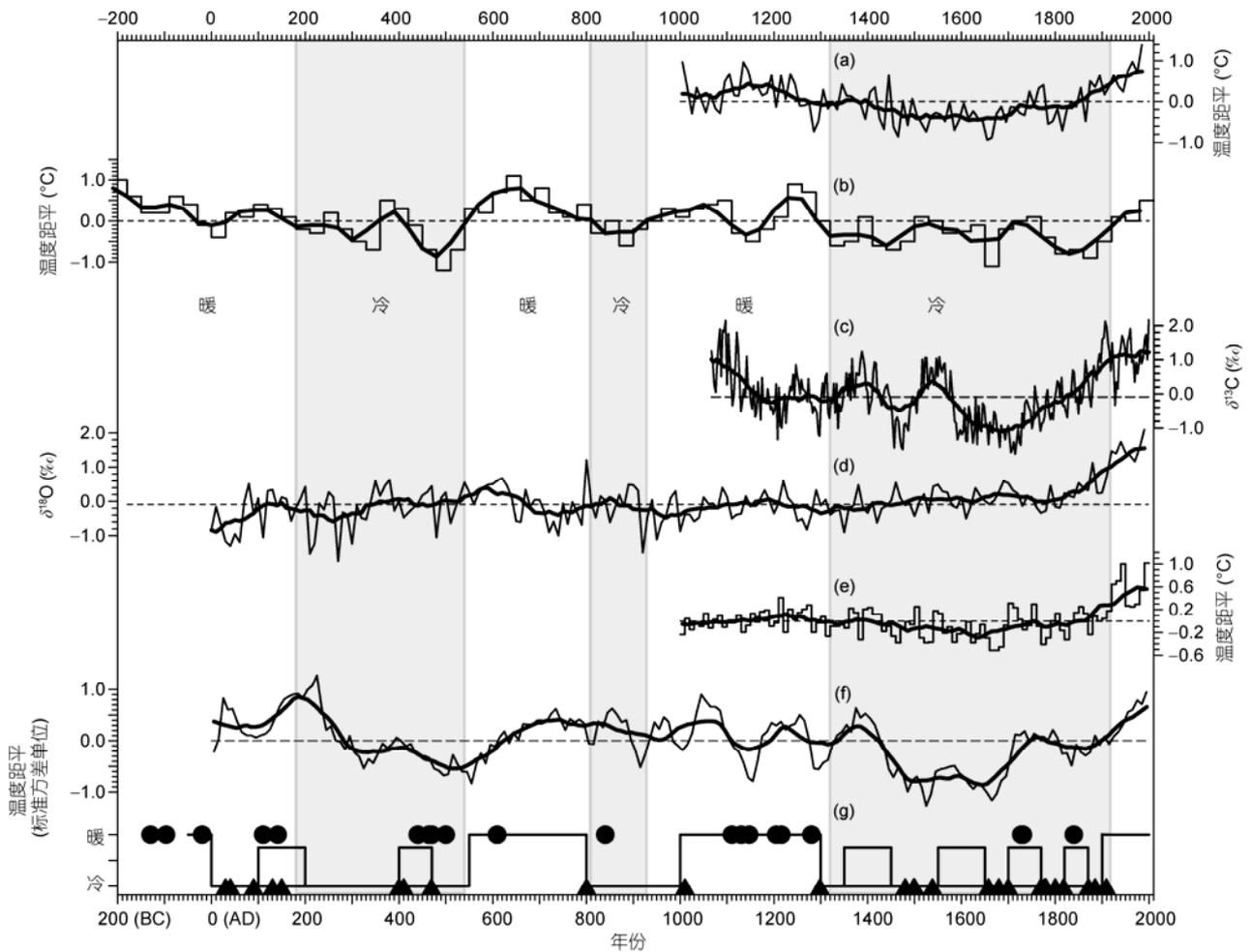


图 1 过去 1000~2000 年中国温度变化重建与模拟序列

(a) 过去 1000 年中国东部温度变化的模拟结果, 时间分辨率 10 年^[18]; (b) 源于历史文献的过去 2000 年中国东中部温度曲线, 时间分辨率 30 年(源于文献[8,19], 有改动); (c) 源于树轮的过去 1000 年祁连山中部地区的温度变化, 时间分辨率 3 年^[10]; (d) 源于敦德、古里雅、达索普和普若冈日冰芯的过去 2000 年集成温度序列, 时间分辨率 10 年^[20]; (e) 集成冰芯、石笋、树轮、泥炭、湖泊沉积、孢粉和史料等资料重建的中国过去千年温度序列, 时间分辨率 10 年^[16]; (f) 集成冰芯、树轮、湖泊沉积和史料等重建的中国过去 2000 年温度曲线, 时间分辨率 10 年^[17]; (g) 古土壤(黑点)和冰川(黑三角)发育所指示的过去 2000 年温度变化特征, 无固定时间分辨率^[21]; 平滑实线表示百年尺度的温度变化, 虚线表示各序列的平均值

表 1 给出了图 1 各条温度序列的变化特征, 包括序列的变幅、是否存在宋元暖期、明清冷期的寒冷程度以及 20 世纪暖期的温暖程度等. 对比结果显示: 中国东部过去 2000 年的温度变幅约为 2.3°C; 而整个中国过去 2000 年则只有 1.5°C. 除青藏高原 4 条冰芯集成重建指示温度变化的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列外, 其他序列均存在明显的宋元暖期, 只是暖期持续的时间和温暖幅度略有差别; 17 世纪为过去 2000 年最寒冷的世纪, 较 20 世纪平均温度低 1°C 左右; 20 世纪暖期在各条序列中均表现明显, 但部分序列(图 1(b), (c)和(f))显示

20 世纪并非过去 2000 年的唯一最暖时段, 东汉、隋唐和宋元时期的温暖程度也与之相当.

2.2 区域差异

Ge 等^[22]集成已有温度结果, 重建了东北部、东中部、东南部、西北和青藏高原 5 个区域过去 2000 年温度的百年际波动曲线(图 2). 结果显示过去 500 年, 5 个区域均存在两个明显的冷期(1620s~1710s 与 1800s~1860s)和 20 世纪暖期, 且其温暖程度为过去 500 年前所未有. 除东南区受资料长度限制外, 其余

表 1 中国各地过去 2000 年温度变化特征的对比

序列	区域	变幅	周期(年)	宋元暖期	明清冷期	20 世纪暖期是否为千年最暖
图 1(a)	东部	2.3°C	100, 200, 300, 400	有	最冷百年 1580~1680 年较 20 世纪平均温度低 1.1°C	20 世纪略暖
图 1(b)	东中部	2.3°C	350, 400, 600, 1000	有	最冷百年 1800~1900 年较 20 世纪平均温度低 1.0°C; 最冷 30 年发生在 1650~1680 年.	隋唐更暖
图 1(c)	祁连山	无法判断	150~300, 400	有	最冷百年发生在 1630~1730 年	与宋元暖期温暖程度相当
图 1(d)	青藏高原	无法判断	200~400, 700~800	不明显	无	20 世纪为过去 2000 年之最暖
图 1(e)	全国	1.5°C	100~300, 400	有	最冷百年 1590~1690 年较 20 世纪平均温度低 0.8°C	20 世纪为过去千年之最暖
图 1(f)	全国	无法判断	150~300, 600, 1000	有	最冷百年发生在 1600~1700 年	与宋元及东汉时期相当

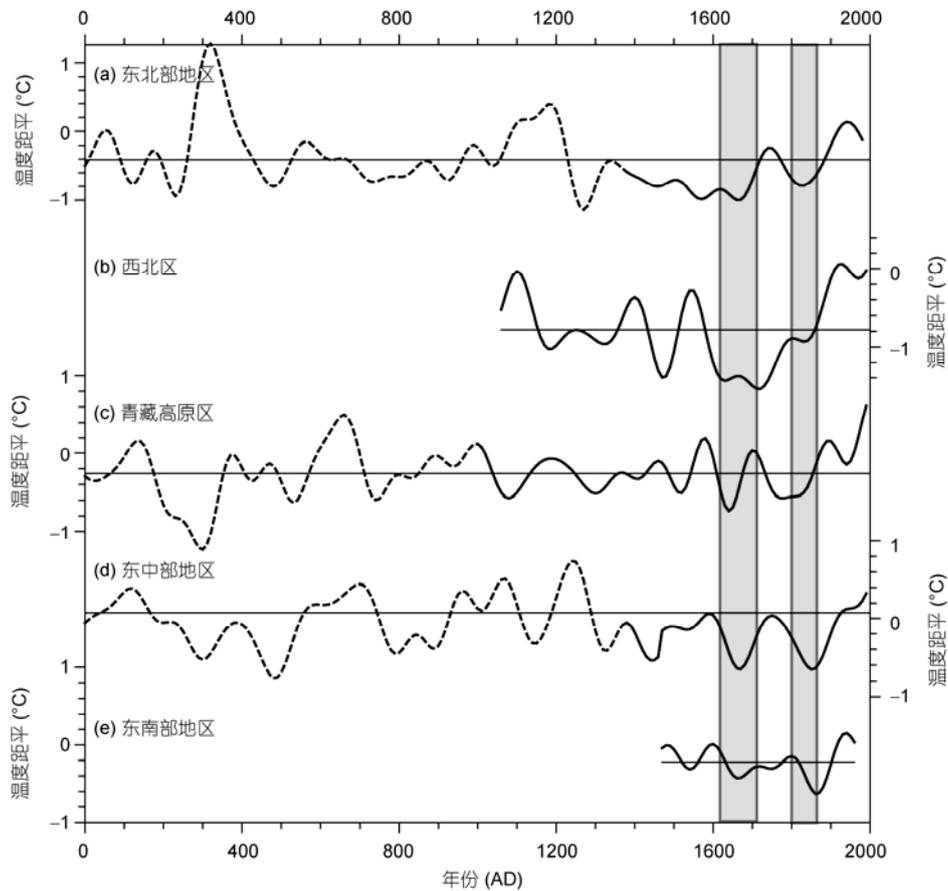


图 2 东北部、东中部、东南部、西北和青藏高原 5 个区域过去 2000 年温度的百年际波动曲线
阴影表示两个明显的冷期

4 个区域均存在宋元暖期, 但温暖幅度及暖峰出现的时间有区域差异, 其中东中部地区出现在 1240s, 较 1901~1950 年平均高 0.8°C; 东北部地区出现在 1190s, 高 0.4°C; 青藏高原出现在 1000s, 高 0.2°C; 西北部地

区则出现在 1100s, 与 1901~1950 年的气候均值相当。此外, 20 世纪暖期的起始时间在各区域也有差别, 青藏高原和西北区自 1850s 开始增暖, 东北、东南和东中部地区则分别始于 1890s, 1900s 和 1920s。

需要指出的是, 图2还显示: 宋元和20世纪暖期均有青藏高原和西北增暖在先、东部增暖相对滞后的特征, 其中暖峰出现时间在宋元暖期前后各区相差100~200年, 20世纪暖期相差不足100年. 我们认为这一特征既是区域气候变化差异的结果, 也与1500年之前的温度变化重建结果尚存在较大不确定性有关.

2.3 中国与北半球温度变化对比

IPCC 第四次评估报告的第六章引用了近 10 年国际上发表的古气候重建序列, 对过去 2000 年北半球温度变化过程进行了综合评估. 评估结果表明北半球的小冰期发生在 17~19 世纪早期, 中世纪暖期发生在 11~15 世纪早期, 20 世纪的温暖程度为过去 1300 年以来之最高. 本文从这些温度代用数据中选取了 6 条长度接近 2000 年的序列, 与中国东中部的温度重建序列进行了对比分析, 结果见图 3. 图 3 中, 除 HCA2006 和 B2000 序列分别源于模式模拟和单一树轮资料外, 其他 4 条序列均利用多源证据, 如树轮、湖泊沉积、石笋和冰芯等重建而成. 总体讲, 中国东中部与北半球过去 2000 年温度变化的阶段性基本一致. 其中出现在北半球其他地区的黑暗时代冷期 (Dark Ages Cold Period)、中世纪暖期、小冰期以及 20 世纪以来的温度快速上升阶段在中国也明显存在. 但 550s~850s 间, 中国与北半球的温度变化位相完全相反, 中国表现为温暖, 北半球则寒冷. 与北半球中

世纪暖期对应的中国宋元暖期, 其起讫时间为 930s~1310s, 较 IPCC 明确认定的北半球中世纪暖期 (950~1100 年^[23])长约 200 年. 此外, 大多数温度集成重建结果显示: 北半球的 20 世纪后期是过去 1300 年以来最暖的; 但在中国东中部, 隋唐和宋元时期曾出现过与 20 世纪最后几十年相当甚至更温暖的时段.

2.4 温度重建结果的不确定性及其主要原因

导致中国过去 2000 年温度变化重建结果存在不确定性的原因主要源于代用指标对温度变化的指示意义、定年误差和不同代用资料的时间分辨率不同与重建过程所导致的方差缩减等几个方面. 为此, Ge 等^[22]采用 IPCC 第四次评估报告提出的包络分析方法, 评估了中国 5 个区域(东北、东中、东南、青藏高原及西北地区)温度变化重建结果的不确定性. 结果显示: 东北部地区 1560s 以后, 东中部地区 1540s~1620s 和 1670s~1780s, 以及东南区 1550s~1630s, 1700s~1740s 和 1780s~1840s 等时段的温度重建结果具有 80%以上的高可信度, 说明已有的温度变化重建结果在公元 1500 年以后一致性较高, 但 1500 年前分歧较明显, 即 1500 年之前的温度变化重建结果不确定性较大; 而造成 1500 年之前不确定性较大的原因, 除上述已指出的代用资料本身局限和因重建过程所致的方差缩减等因素外, 还有一个重要因素是由于目前能够覆盖至 1500 年之前的温度序列不多, 可用于评估的总样本量(即序列数量)也较小, 直接

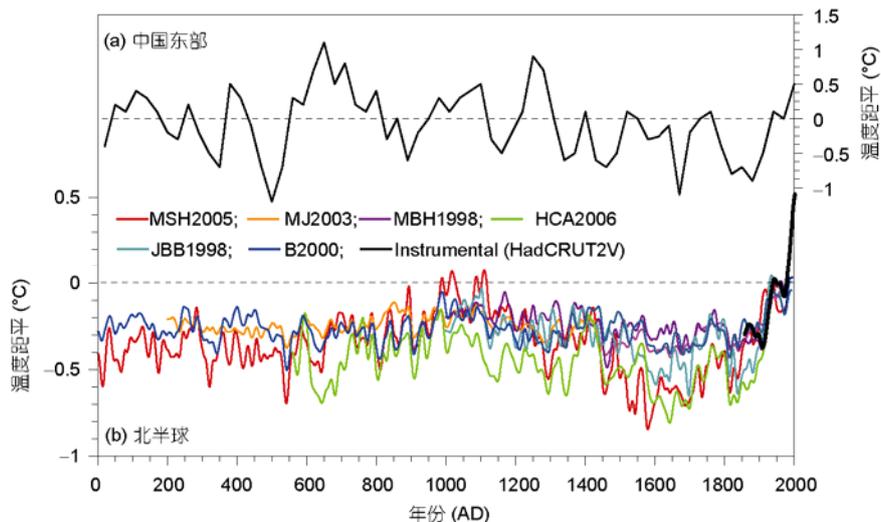


图 3 中国东中部^[8](a)与北半球(b)过去 2000 年的温度变化对比

北半球源数据及序列缩写引自 IPCC 第四次评估报告^[23], http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/datapages/fig6.10_ipccar4_wg1_2007_smoothed.txt

导致了不确定性的增加。

然而,应当指出的是,采用包络分析方法评估的不确定性主要着眼于不同重建结果的相互包容程度问题,并不涉及原始重建结果本身是否可靠.因此尽管目前因样本较少而致的1500年之前温度变化重建结果不确定性较大,但这并不证明目前关于1500年之前的温度变化重建结果是不可靠的.因为,判别一个重建序列可靠与否,主要取决于各种代用证据本身是否含有足够的温度变化信号,信息解译和重建方法是否合理,且能否最大程度地保真.以利用历史文献记载重建气候变化序列为例,其重建结果是否可靠主要取决于两个方面:一是记载本身是否准确,二是重建方法是否科学合理.对此我们曾在以前的论文中分别进行过较深入的研究^[24-26].结论是:中国的史料气候记录总体是可靠的;虽然重建方法,特别是代用指标的不同会对序列能否较全面地捕捉到完整的气候变化信息产生一定影响,但并不会明显影响分辨率30 a以上的温度变幅估计(因篇幅所限不展开论述).由于本文对公元1500年前,特别是隋唐和宋元等时期温度变化特征的定量分析,大多是从利用历史文献记载的物候及相关证据重建的过去2000年中国东中部冬半年(10~4月)温度序列中得到的,因此我们有理由相信,尽管目前1500年之前的温度变化重建结果不确定性较大,但关于隋唐和宋元等时期温度变化特征的认识基本可靠.

3 干湿与降水变化

图4给出利用历史文献重建的中国东部地区及其3个子区域过去2000年干湿变化标准化序列,以及青藏高原东北部过去2000年降水变化的树轮年表.从中可以看出,东部季风区的干湿变化存在显著的年代-百年际-千年际尺度的变化.在千年尺度上干湿状况大致可分为两个阶段:13世纪中期前降水呈波动逐渐变干趋势,特别是901~1200年时段,转干趋势最为明显,达 $-0.5\sigma/100\text{ a}$ (σ 为序列标准方差,下同,显著性水平达95%);13世纪中期后降水则呈波动转湿趋势,其中1201~1400和1436~1760年,上升趋势分别为0.7和 $0.5\sigma/100\text{ a}$ (显著性水平达95%);1200年以前的干湿指数平均值为 -0.14 ,1200年以后平均值为0.24.其中,魏晋南北朝期间(公元221~580年)气候总体偏干,仅240s~290s,430s~450s和480s~520s等时段相对湿润.隋唐期间(公元581~907年)干湿围绕过去2000年的平均水平上下波动,公元600,730,820和900年前后气候偏湿,而660,760,800和850年前后气候偏干.五代至北宋(公元908~1127年)则在1000年前后由湿转干.南宋至元(公元1128~1368年)的气候总体偏干,但在1250年开始转湿.明前期(约1369~1429年)气候湿润,中期(约1430~1550年)持续偏干,中后期虽曾两度(1570和1600年前后)短暂转湿,但趋势为波动转干,明末则出现了秦汉以来最为严重的一次持续性干旱.清代(1645~1911年)气

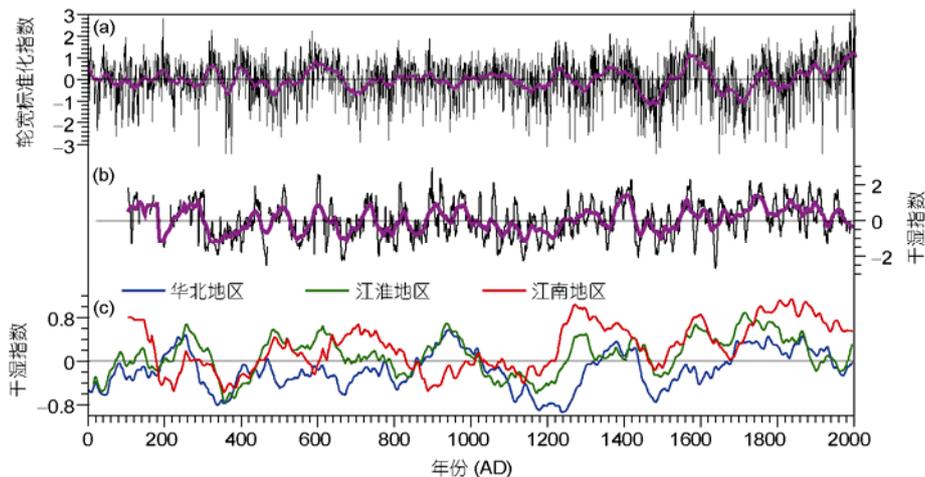


图4 过去2000年降水(干湿)变化序列

(a) 青藏高原东北部树轮宽度年表^[15]; (b) 源于历史文献的中国东部干湿指数序列^[9], 紫线为31年滑动平均; (c) 源于历史文献的华北、江淮和江南地区干湿指数的100年滑动平均序列

候总体湿润, 但年代际波动极为显著, 1720, 1785, 1810 和 1877 年前后出现了持续性干旱. 20 世纪气候在波动中趋干, 40 年代中期至 60 年代中期较为湿润, 80 年代起则再次转干.

图 4 还显示中国东部的 3 个子区域在 100 年尺度上, 干湿变化在近 1/3 的时段上具有较高一致性, 如 260s~460s, 1020s~1220s 和 1680s 以后; 还有近 2/3 时段各区域间变化不一致, 其中 100s~260s 和 660s~1020s, 华北与江淮地区变化一致, 但与江南地区变化趋势相反; 而在 460s~660s, 1220s~1320s 和 1520s~1680s, 江淮与江南地区干湿变化一致, 但与华北地区变化趋势相反.

中国西部的降水也存在年代际-百年际-千年际的变化. 在千年尺度上, 公元 1500 年以前降水变率较小, 基本在平均值附近波动, 且以干旱为主要特征; 1500 年以后降水的变率较大, 且在波动中呈逐渐增加趋势. 其中, 1430~1530 和 1630~1740 年是两个最为干旱的百年; 而 1550~1630 和 1930~2005 年是两个最为湿润的百年. 从该地区过去 2000 年的降水变化过程看, 魏晋南北朝期间降水在 300s~340s 和 380s~420s 偏多; 隋唐期间降水呈逐渐变干趋势, 公元 600 年前后气候偏湿, 而 680 年前后气候偏干; 五代至北宋气候在平均值附近波动; 南宋至元气候总体偏干, 仅在 1250 年前后较为湿润; 明前期气候湿润, 中期持续偏干(1480s 为过去 2000 年最干的 10 年), 后期气候较湿润; 清代气候总体偏干; 20 世纪则在波动中趋于湿润.

然而, 由于本文主要以柴达木盆地的降水序列描述西部干湿变化过程, 尽管该序列能很好地指示整个青藏高原东北部的降水变化, 但其对整个西部

地区的空间代表性尚需进一步验证, 据此得到的认识也与其他学者对西北近期降水变化的认识不尽一致. 如施雅风等^[27]早就指出: 20 世纪 80 年代以来, 西北气候总体转向暖湿; 但最近的研究却发现^[28]西北气候自 1961 年以来呈局部暖湿、整体暖干的特征, 仅在新疆北部、祁连山区及柴达木盆地降水呈增加趋势.

4 温度与降水变化的关系

在 20 世纪最后几十年温暖的气候背景下, 中国东部的降水呈现南涝北旱的空间格局; 西部的部分地区降水呈明显增加趋势. 这一观测到的事实在历史上的温暖气候阶段是否发生过, 气候寒冷阶段降水空间格局是否发生了改变, 本文以辨识出的 4 个气候温暖期和 3 个气候寒冷期为温度背景, 通过计算降水量偏多或偏少年份占该阶段全部年份的百分率, 对中国东部(以图 4(b)为代表序列)和西部(以图 4(a)为代表序列)的降水特征做了简单对比分析(结果见表 2). 表 2 显示在 4 个气候温暖期中, 中国东部降水的空间格局均表现为北(华北, 图 4(c))旱南(江南, 图 4(c))涝; 除公元 200~公元 180 年外, 其余 3 个暖期东部均以降水偏少的年份占多数; 中国西部除 1921~2000 年, 其余 3 个暖期均以降水偏少的年份占多数. 在 3 个气候寒冷期中, 中国东部降水的空间格局时而南北均旱, 时而南北均涝, 有时则南北均处于气候平均态; 181~540 年以降水偏少年份占多数, 约占该时段全部年份的 55.8%, 811~930 年降水量偏多与偏少的年份各半, 而 1321~1920 年降水偏多的年份占多数, 为该时段全部年份的 64.2%; 中国西部在

表 2 不同冷暖背景下的中国东西部降水变化特征

气候阶段	冷暖特征	东部降水特征			西部降水特征	
		偏多年份 ^{a)}	偏少年份	空间格局	偏多年份	偏少年份
公元前 200C~公元 180 年	温暖	87.5%	12.5%	北旱南涝	38.3%	61.7%
公元 181~540 年	寒冷	44.2%	55.8%	2 地均旱	34.7%	65.3%
公元 541~810 年	温暖	35.8%	64.2%	北旱南涝	45.8%	54.2%
公元 811~930 年	寒冷	50.0%	50.0%	正常	65.8%	34.2%
公元 931~1320 年	温暖	39.2%	60.8%	北旱南正常	43.6%	56.4%
公元 1321~1920 年	寒冷	64.2%	35.8%	2 地均涝	56.5%	43.5%
公元 1921~2000 年	温暖	41.3%	58.7%	北旱南涝	98.8%	1.2%

a) 表示降水偏多或偏少年份占该气候阶段全部年份的百分率; 由于图 4 的重建数据从公元 1 年开始, 且东部序列有缺失的年份, 因此在公元前 200~公元 180 年这一气候阶段, 东部有资料的年份共 40 年, 西部共 180 年

181~540 年约 65.3% 的年份降水偏少, 而 811~930 和 1321~1920 年均以降水量偏多的年份占多数, 发生概率分别为 65.8% 和 56.5%.

5 结论与讨论

通过对多源证据的收集和整理, 过去 2000 年中国气候变化的基本特征可以归纳为以下几个方面: 1) 中国的冷暖变化经历了 7 个阶段, 包括公元前 200~公元 180, 541~810, 931~1320 和 1921~2000 年等 4 个气候温暖期, 以及 181~540, 811~930 和 1321~1920 年等 3 个气候寒冷期; 2) 中国与北半球温度变化的阶段性基本一致, 即宋元暖期与北半球存在的中世纪暖期基本对应, 而魏晋南北朝和明清冷期分别与黑暗时代冷期和小冰期相当; 3) 中国东西部在中世纪以后气候在波动中均趋于湿润, 但进入 20 世纪以后, 西部降水在波动中趋于湿润, 东部则趋于干旱; 4) 中国温度变化存在千年周期、400~600 与 200 年的百年际周期以及多个年代际周期, 隋唐暖期是与 20 世纪暖期最可能的历史相似型; 5) 在温暖气候背景下, 中国东部以降水偏少的年份占多数, 且北旱南涝是

主要的降水空间格局, 西部则多数年份表现为降水偏少; 6) 由于代用资料在指示气候变化的机理、定年手段、定量化过程以及时空分辨率等方面的差异, 过去 2000 年气候重建结果在 1500 年以前具有较大分歧, 1500 年以后一致性较高.

尽管中国在过去 2000 年气候重建方面已取得较大进展, 一些特征时段如小冰期和 20 世纪暖期等的发生空间范围及起止时间基本清楚, 但仍有几个关键科学问题在不同研究成果之间尚未达成共识. 如 20 世纪增暖的归因问题: 一些学者认为太阳辐射和火山活动是控制 1850 年以前中国区域温度变化的主要因子, 而 1850 年以后, 温室气体浓度的增加对 20 世纪的增暖起着更为重要的作用^[18,29]; 还有部分学者认为 20 世纪前半叶的温度变化仍然归因于太阳辐射和火山活动, 而 20 世纪后 50 年的温度变化则与温室气体浓度的增加有密切关系^[30], 未来加强集成多个模式的模拟结果并与代用资料的重建结果对比工作是解决这一问题的重要途径. 另外, 至目前为止, 1500 年之前温度变化的重建结果仍存在较大不确定性, 这需要收集更多来源、覆盖区域更广的代用资料和重建结果进行补充.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- Lamb H H. The early medieval warm epoch and its sequel. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeocol*, 1965, 1: 13-37
- Lamb H H. *Climate: Present, Past and Future*. London: Methuen, 1972. 107
- 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *考古学报*, 1972, 1: 15-38
- 郑斯中. 广东小冰期的气候及其影响. *科学通报*, 1982, 27: 302-304
- 张丕远. *中国历史气候变化*. 济南: 山东科学技术出版社, 1996. 195-440
- 张德二, 刘传志. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. *第四纪研究*, 1997, 17: 1-11
- 王绍武. 公元 1380 年以来我国华北气温序列的重建. *中国科学 B 辑*, 1990, 5: 553-560
- Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q, et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, 2003, 13: 933-940
- 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: 579-592
- Liu X H, Shao X M, Zhao L J et al. Dendroclimatic temperature record derived from tree-ring width and stable carbon isotope chronologies in the middle Qilian Mountains, China. *Arct Antarct Alp Res*, 2007, 39: 651-657
- Tan M, Liu T S, Hou J Z, et al. Cyclic rapid warming on centennial scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1617-1621
- 姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 等. 冰芯记录的过去 1000 a 青藏高原温度变化. *气候变化研究进展*, 2006, 2: 99-103
- Hong Y T, Jiang H B, Liu T S, et al. Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose. *Holocene*, 2000, 10: 1-7
- Yu K F, Zhao J X, Wei G J, et al. Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ records of *Porites lutea*

- corals at Leizhou Peninsula, northern coast of the South China Sea. *Glob Planet Change*, 2005, 47: 301–316
- 15 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. *Quat Sci Rev*, 2010, 29: 2111–2122
- 16 王绍武, 闻新宇, 罗勇, 等. 近千年中国温度序列的建立. *科学通报*, 2007, 52: 958–964
- 17 Yang B, Braeuning A, Johnson K R. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 1324, doi: 10.1029/2001GL014485
- 18 刘健, Storch H, 陈星, 等. 千年气候模拟与中国东部温度重建序列的比较研究. *科学通报*, 2005, 50: 2251–2255
- 19 葛全胜, 刘浩龙, 郑景云, 等. 隋唐时期东中部地区温度变化的重建(601~920 年). *科学通报*, 2010, 55: 3048–3052
- 20 Thompson L G, Thompson E M, Brecher H, et al. Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2006, 103: 10536–10543
- 21 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 千年尺度上冷暖变化的自相似特征研究. *自然科学进展*, 2002, 12: 1280–1284
- 22 Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference. *Geophys Res Lett*, 2010, 37: L03703, doi: 10.1029/2009GL041281
- 23 Jansen E, Overpeck J, Briffa K R, et al. Palaeoclimate. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007. 435–483
- 24 葛全胜, 张不远. 历史文献中气候信息的评价. *地理学报*, 1990, 45: 22–30
- 25 郑景云, 葛全胜, 方修琦, 等. 基于历史文献重建的近 2000 年中国温度变化比较研究. *气象学报*, 2007, 65: 428–439
- 26 Ge Q S, Zheng J Y, Tian Y Y, et al. Coherence of climatic reconstruction from historical documents in China by different studies. *Int J Climatol*, 2008, 28: 1007–1024
- 27 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23: 152–164
- 28 张强, 张存杰, 杨虎志, 等. 西北地区气候变化新常态及对干旱环境的影响. *干旱气象*, 2010, 28: 1–8
- 29 Peng Y B, Xu Y, Jin L Y. Climate changes over eastern China during the last millennium in simulations and reconstructions. *Quat Int*, 2009, 208: 11–18
- 30 Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24: 954–971