

利用树轮资料集成重建的过去 2000 年 北半球年平均温度变化*

史 锋^① 杨 保^② 冯 娟^{③④} 李建平^{③④} 杨凤梅^⑤ 郭正堂^①

(^①中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029; ^②中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 中国科学院沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; ^③北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875; ^④全球变化研究协同创新中心, 北京 100875; ^⑤中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要 为了解过去 2000 年北半球温度变化特征, 本文基于 16 条长度超过 2000 年的树木年轮年表, 利用最优信号提取法重建了过去 2000 年北半球年平均温度序列。结果显示, 过去 2000 年存在 1 个极端低温年和 4 个极端高温年、50 个低温年和 53 个高温年, 以及 2 个冷期和 3 个暖期。其中, 第一个冷期大约在 500~550A.D., 这期间出现了 8 个低温年, 第二个冷期是小冰期(1450~1850A.D.), 出现了 38 个低温年和 1 个极端低温年。3 个暖期除发生了 17 个高温年的中世纪暖期(900~1250A.D.)外, 1000A.D. 前还存在一个大约是在 400~500A.D. 的暖期, 该时期发生了 1 个极端高温年和 11 个高温年。第三个暖期是受人类影响显著的 20 世纪暖期, 该时期未出现极端低温年和低温年, 而出现了 2 个极端高温年和 21 个高温年, 这意味着在全球持续增温的情景下, 历史上曾发生过的低温年和极端低温年再次出现的概率很小。对重建温度变化进行归因分析, 发现大西洋多年代际涛动(Atlantic Multi-decadal Oscillation, 简称 AMO)、太阳活动和火山活动均对北半球的温度变化有贡献。年平均 AMO 指数可以解释 36% 的年代际以上尺度的温度变率, 而太阳活动的贡献仅限于与北半球的温度序列具有类似周期信号, 其相关性并未通过显著性检验, 这表明 AMO 可能是北半球过去 2000 年年平均温度变化的主要驱动因子。但由于 AMO 指数重建时包括了与本文资料的地理位置相同的资料, 那么资料本身的相似性可能会影响 AMO 和北半球温度的关系, 未来需要利用海洋沉积等其他类型的地质记录重建 AMO 指数, 以进一步对比检验 AMO 的贡献。重建结果与全球 34 个强火山事件对比发现, 火山爆发后的第一年北半球降温最为明显, 这种降温效应在第四年完全消失, 说明火山爆发对北半球年平均温度的影响主要体现在年际尺度上, 这与已有研究结果一致。

关键词 北半球 过去 2000 年 树木年轮 最优信号提取法 大西洋多年代际涛动

中图分类号 P467, P534.63*2 **文献标识码** A

1 引言

气候重建为探讨气候变化机制提供了过去气候变化特征的基本事实^[1]。过去 2000 年气候重建, 既包括了人类活动影响显著的现代暖期, 又包括了自然因子主控的中世纪暖期和小冰期, 在区分人类与自然对温度变化影响的权重方面具有天然的优势。而且, 重建过去 2000 年温度变化的代用记录大多具有较高的时间分辨率, 可用于得到具有统计意义的重建结果, 例如冰芯^[2,3]、石笋^[4-7]、树轮^[8,9]、珊瑚^[10,11]以及历史文献^[12-15]等, 在一定程

度上延长仪器观测记录, 使得我们可以利用数理统计的方法在更长时间尺度探究温度变化的特征和规律。

目前, 已有的北半球过去 2000 年温度重建序列均是利用多种类型的代用记录集成得到的^[16,17], 这样做减少了利用单一记录重建引起的固有偏差。但由于代用记录的指示意义非常复杂, 很难仅利用数理统计等的方法完全解决, 需要深入了解所用代用资料的特性, 才能做出较准确的重建。从前人赋予不同类型记录的权重可以看出^[18], 大多重建结果均是给予树轮较大的权重。因为树轮与仪器观测

第一作者简介: 史 锋 男 33 岁 副研究员 古气候诊断与模拟研究 E-mail: shifeng@mail.iggcas.ac.cn

* 中国科学院战略性先导科技专项项目(批准号: XDB03020500 和 XDA05080801)、国家自然科学基金项目(批准号: 41301220, 41325008 和 41430531)和中国科学院“西部之光”人才培养计划共同资助

2015-04-13 收稿, 2015-06-25 收修稿

通讯作者: 杨 保 E-mail: yangbao@lzb.ac.cn

温度的相关系数通常高于其他类型的代用记录。另外,树轮具有定年准确、样本重复性强和分布广泛等优点,在过去2000年的温度重建中应用最为广泛^[19]。最近,在欧洲、北美洲的西部和亚洲高纬度地区发表了多条长度超过2000年的树轮宽度和密度年表,中国柴达木盆地周边地区也公布了长度超过2000年的树轮宽度年表,但其反映的是降水变化^[20]。这些高质量、长时间跨度的树轮年表,为我们进一步提高对过去2000年温度变化特征及规律的认知水平提供了基础资料。

集成重建不仅需要珍贵优质的代用记录,重建方法的选择对结果也会有重要影响^[21]。常用的序列重建方法有综合加比例法(Composite Plus Scale,简称CPS)^[22]、主成分分析法(Principal Component Analysis,简称PCA)^[23]和正则期望最大法(Regularized Expectation Maximization,简称RegEM)^[24],以及贝叶斯方法^[25]等,均是利用仪器观测记录与代用记录的关系,建立转换函数进行重建。由于仪器观测记录很短,这种思路只能在年际和年代际尺度上判断代用记录响应温度变化的能力,多年代际和百年等更长时间尺度的响应关系很难在转换函数中体现,而影响多年代际和百年尺度气候变化的驱动因子又可能是不同的。此外,上述方法大多存在低估气候变化低频信息的问题^[26]。另外,工业革命以来人类排放的二氧化碳迅速增加,对地质记录响应气候变化的能力可能有所影响。例如20世纪中叶以来,在北半球高纬度一些地区树轮的宽度和密度指标未能很好响应温度的快速上升^[27,28]。此外,可能存在一些代用记录在有仪器观测的时段缺失,或者在这一时段由于受到人类活动的影响,不能很好的反映气候变化状况,但却在工业革命之前或更长时间尺度上具备响应温度变化的能力。最后,在重建过程中,如果样本量变化,那么所建转换函数系数的稳定性也无法得到保证。为了尝试解决和避免上述一系列问题,我们仅选择了覆盖过去2000年的树轮记录,利用考虑记录所在位置局地气候代表性的集合局地回归的最优信号提取法^[29]进行了北半球过去2000年年平均温度集成重建。

在气候变化归因研究方面,有学者认为半球尺度温度的变化是由外强迫(如太阳活动、火山活动和温室气体)控制的^[30,31],但也有学者通过模式模拟发现太阳活动对温度变化的影响很小^[32]。1998年以来全球变暖停滞现象未能出现在多数国际耦合

模式对未来气候的预估结果中,引起气象学家开始重视气候系统内部变率对温度的影响。目前,部分学者认为大西洋多年代际涛动(Atlantic Multi-decadal Oscillation,简称AMO)与北半球温度在多年代际尺度上有很好的对应关系^[33],而北大西洋涛动(Northern Atlantic Oscillation,简称NAO)和AMO的超前滞后关系可以解释北半球升温停滞现象^[34],也有学者认为太平洋年代际涛动(Pacific Decadal Oscillation,简称PDO或Interdecadal Pacific Oscillation,简称IPO)是全球变暖停滞现象的主因^[35]。最近,有学者提出AMO和IPO可能共同作用导致北半球温度变化出现停滞的观点^[36]。那么在过去2000年是怎样的状况,由于AMO和IPO指数以及北半球温度序列长度的限制,至今仍未有详细报道。

2 数据和方法

2.1 校准序列选择

在早期的工作中,我们基于45条年分辨率长度超过千年的代用记录,利用主成分分析法、正则最大期望法和综合比例法等3种方法重建了3条过去千年北半球年分辨率的年均温序列^[21]。其中,基于主成分分析法和二阶自回归模型(Principal Components Plus Second-order Autoregressive Model,简称PCAR)建立转换函数重建的序列被IPCC第五次评估报告古气候章节撰写专家评估后引用^[19](详见报告第五章图5.7和表5.4),且其与其他重建和模式模拟结果均有较好的一致性。该序列与器测CRUTEM 4v数据集^[37]在1850~1998A.D.期间年均温的相关系数是0.76,对过去149年北半球全年平均温度的解释方差可达58%。

Shi等^[21]PCAR重建序列具有年分辨率,长度覆盖998~1998A.D.。如果将这条经过专家评估相对较为准确的北半球过去千年年平均温度序列作为校准序列,来校准其他代用记录建立转换函数,可避免在重建时与仪器观测记录相关性较好的代用记录赋予过高权重而引起系统偏差。故我们利用该条序列作为本文过去2000年温度重建的校准序列。

2.2 代用记录筛选

在树轮气候学研究领域,通常依据树轮记录与器测数据的相关性来判断其气候指示意义^[38]。从树木生理的角度,由于树轮指标与海拔、树种和局

地微环境等都有很大的关系，导致树轮年表对温度响应最敏感的月份并不唯一。为了方便数据集成，选择统一的月份进行重建是国际同行采用的可行途径^[18,39,40]，也是过去两千年古全球变化研究网络 (PAGES2K network) 经过多次国际同行会商的推荐做法。因此本研究选择集成重建北半球的年平均温度。

挑选树轮记录的原则是：1) 记录长度覆盖 1~1970A.D.; 2) 与重建目标的相关性通过 95% 显著性检验。为了避免趋势相关，计算相关系数时均去除了线性趋势。最终选择了 16 条树轮年表，具体信息如图 1、图 2 和表 1^[17,41-50]。其中包括 15 条树轮宽度年表和 1 条树轮密度年表。值得注意的是，从表 1 中 16 条树轮年表与 CRUTEM 4v 数据集在 1850~1970A.D. 期间年均温去趋势后的相关系数可以看出，有 6 条树轮序列计算的相关系数较低，并未通过 90% 的显著性检验，但所有序列与校准序列在 998~1970A.D. 期间的相关性均通过了 95% 的显著性检验。正如本文引言中所述，存在一些记录在有仪器观测的时段可能由于受到人类活动的影响，不能很好的反映气候变化，但却在更长的时间尺度上具备响应温度变化的能力，故应该在集成重建中包括这样的序列，以提高重建结果的空间覆盖度。

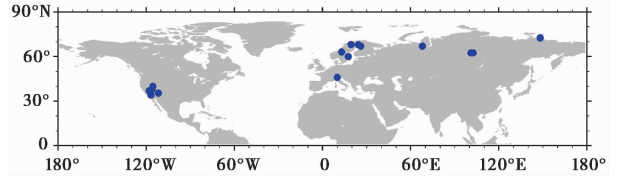


图 1 16 条树轮年表的分布图

Fig. 1 Distribution of the 16 tree-ring chronologies

这也正是本文采用更长时间尺度序列进行校准的优势所在。

Mann 等^[24]用到的长度覆盖过去 2000 年的树轮数据仅有两条，在国际古气候数据库中的代码是 ca535 和 nv515。ca535 是 Hughes 和 Graumlich^[51]用于重建 Nevada 降水的序列，nv515 也是来自 Indian Garden Nevada 的序列^[52]。经过我们检验，这两条序列与校准序列均未通过显著性检验，故未能在本此重建中使用。Christiansen 和 Ljungqvist^[16]重建北半球温度时用到的长度覆盖过去 2000 年的树轮数据仅有 4 条树轮数据，具体是 ‘Avam-Taimyr’^[49]、‘Central Europe’^[43]、‘Finnish Lapland’^[53] 和 ‘Indigirka’^[17]，其中 3 条包括在本文的重建中；Helama 等^[41]更新了 ‘Finnish Lapland’^[53] 序列，本文选择了更新后的 ‘Fennoscandia’^[41] 序列。Moberg 等^[17]用到的 7 条树轮年表长度均覆盖过去 2000 年，其中两条序列^[17,47] 在本文中用到，其余序列所

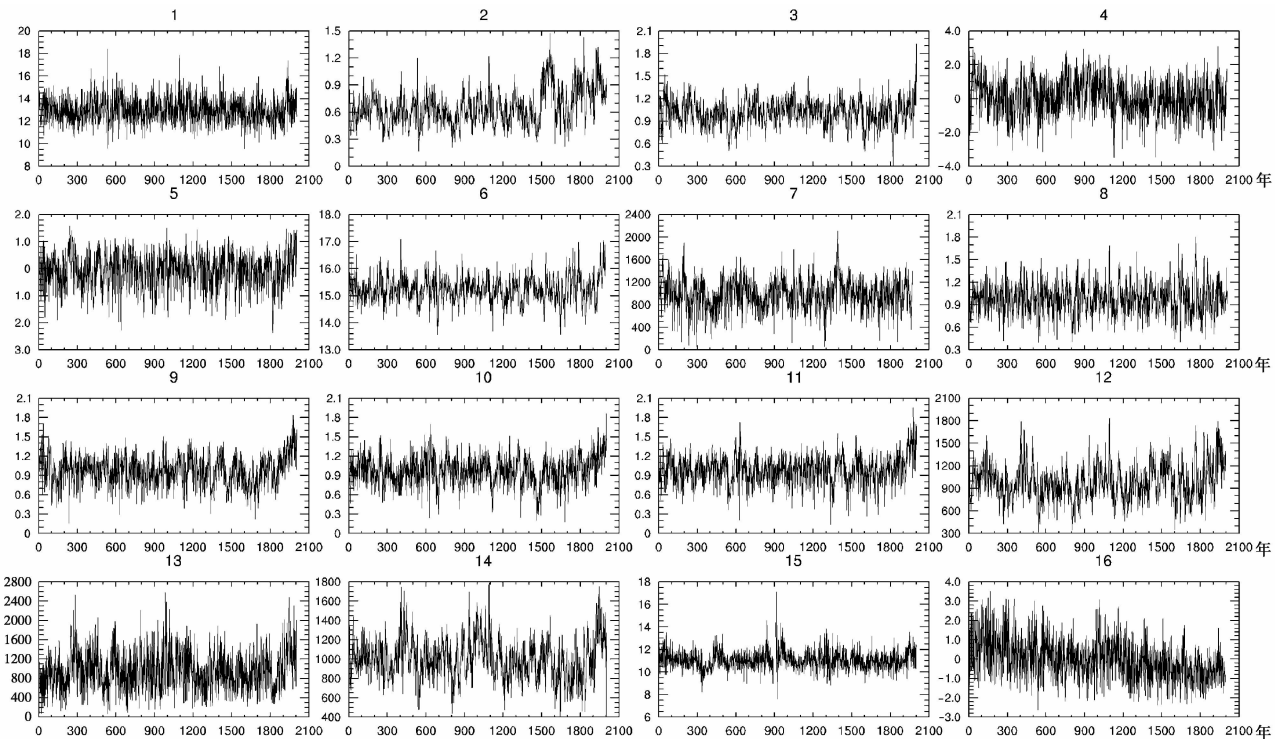


图 2 16 条树轮年表的时间序列

Fig. 2 The 16 tree-ring chronologies versus time

表 1 16 条树轮年表的具体信息*

Table 1 Metadata of the 16 tree-ring chronologies

序号	位置或代码	指标类型	响应的气候因子	纬度	经度	相关系数	来源
1	Fennoscandia	树轮宽度	7月温度	68°~70°N	20°~30°E	0.32/0.28	[41]
2	Lapland	树轮宽度	7月温度	67°N	26°E	0.41/0.33	[42]
3	Central Europe	树轮宽度	6~8月温度	46°N	10°E	0.32/-0.03	[43]
4	Northern European	树轮密度	6~8月温度	60°N	17.5°E	0.29/0.15	[44]
5	Yamalia	树轮宽度	6~7月温度	67°N	68°E	0.30/0.20	[45]
6	Southern Colorado Plateau	树轮宽度	年最大温度	35.4°N	111.7°W	0.28/0.06	[46]
7	ca051	树轮宽度	月份不详	34.12°N	116.82°W	0.07/0.11	国际树轮数据库
8	swed334	树轮宽度	7~8月温度	68.13°N	19.45°E	0.27/0.34	[47]
9	Sheep Mountain	树轮宽度	前一年9月-当年8月温度	37°N	118°W	0.54/0.02	[48]
10	Mt. Washington	树轮宽度	前一年9月-当年8月温度	38°N	116°W	0.47/0.06	[48]
11	Pearl Peak	树轮宽度	前一年9月-当年8月温度	40°N	115.5°W	0.50/0.29	[48]
12	Torneträsk	树轮宽度	7~8月温度	68.14°N	19.4°E	0.52/0.37	[49]
13	Avam-Taimyr	树轮宽度	7月温度	62.5°N	102.5°E	0.37/0.23	[49]
14	Eurasia	树轮宽度	7月温度	62.5°N	101°E	0.64/0.39	[49]
15	Jämtland	树轮宽度	6~8月温度	63.1°N	13°E	0.33/0.19	[50]
16	Indigirka	树轮宽度	6~8月温度	72.53°N	148.15°E	0.17/0.15	[17]

* 相关系数是指每条树轮年表与北半球过去 1000 年年平均温度^[21]以及 CRUTEM 4v 数据集^[37]在 1850~1970A.D. 期间年均温的相关系数

在位置的树轮年表均已更新, 本文采用了更新后的数据, 例如 Briffa 等^[45,49]对 Torneträsk、Yamal 和 Taimyr 等地区进行了数据更新。Ljungqvist^[54]利用了 3 条长度覆盖 2000 年的树轮年表, 其中 ‘Indigirka’^[17]和 ‘Jämtland’^[50]两条序列在本文中使用了, 其余一条序列所在位置的树轮年表已更新, 本文选择了更新后的数据。在整理前人 5 条序列的基础上, 本文新收集了 11 条序列, 共计 16 条长度覆盖 2000 年的树轮年表, 在数据数量上有很程度的增加, 相应的空间覆盖度也得到了提高。

这里选取美国国家海洋大气局古气候数据集 (NOAA/World Data Center for Paleoclimatology archive) 公布的 AMO 和 PDO 指数, 包括 Mann 等^[18]利用重建的全球温度空间型数据, 平均北半球大西洋区域海温, 得到的过去 1507 年 (500~2006A.D.) 的年平均 AMO 指数; 平均太平洋区域 (22.5°~57.5°N, 152.5°E~132.5°W) 海温, 获得的过去 1507 年 (500~2006A.D.) 的年平均 PDO 指数; Grey 等^[55]利用北美东部、西欧和斯堪的纳维亚半岛 (Scandinavia) 以及中东的 12 条树轮资料重建了 1567 年以来的北大西洋 (0°~70°N) 年平均海温, 而后用 10 年滑动平均得到 1572 年以来的年平均 AMO 指数; D’Arrigo 和 Wilson^[56]利用亚洲 17 条树轮资料重建的 1565~1988A.D. 的春季 (3~5 月) PDO 指数。这两个工作均未用到跨度超过 2000 年的树轮资料。

2.3 重建方法——最优信号提取法

最优信号提取法是考虑记录所在位置局地气候代表性的集合局地回归法^[29], 属于过去气候重建综合比例法 (Composite-plus-scale) 的分类。区别于其他方法的优点: 一是利用校准序列与代用记录所在位置局地气候要素的相关系数来取不同权重, 以衡量每条记录对重建目标响应的区域差异, 从而获得代用记录共有的气候信息^[29]; 二是利用集合局地回归法提高保留低频信号的能力^[57]。具体计算步骤如下:

(1) 第一步, 代用记录取权重

将第 i 条代用记录与重建目标之间的相关系数标记为 $r_{i,1}$, 第 i 条代用记录所在位置的仪器观测年平均温度与北半球年平均温度的相关系数标记为 $r_{i,2}$, 赋予记录权重时考虑上述两种权重^[29], 具体公式如下:

$$p_{i,t} = \frac{r_{i,1}^2 \cdot r_{i,2}^2 \cdot po_{i,t}}{\sum_{i=1}^n r_{i,1}^2 \cdot r_{i,2}^2} \quad (1)$$

公式 (1) 中, $po_{i,t}$ 是原始的第 i 条代用记录第 t 年的值, $p_{i,t}$ 是赋予权重的第 i 条代用记录的第 t 年的值, n 为筛选后代用记录的数目。

(2) 第二步, 代用记录回归

利用集合局地回归法进行集成重建。集合局地回归法的原理是将线性回归和逆回归的结果进行算

术平均^[57]。具体推导过程如下:

在线性回归中, 将第 t 年重建目标温度表示为 $T_{i,1}$, 赋予权重的代用记录之和表示为 P_t , 回归方程是:

$$T_{i,1} = \alpha P_t + \varepsilon \quad (2)$$

公式(2)中, α , ε 均为回归系数。

在局地回归法中, 将第 t 年重建目标温度表示为 $T_{i,2}$, 回归方程是:

$$P_t = \beta T_{i,2} + \xi \quad (3)$$

公式(3)中, β , ξ 均为回归系数。

由公式(2)和(3)可得最终的重建温度 T_i 为:

$$T_i = \frac{1}{2}(T_{i,1} + T_{i,2}) \\ = \frac{1}{2}\left(\alpha + \frac{1}{\beta}\right)P_t + \frac{1}{2}\varepsilon - \frac{\xi}{2\beta} \quad (4)$$

(3)第三步, 重建结果检验

使用独立的检验段来衡量重建精度是比较常用的方法^[24,39]。我们选择 998~1597A.D. 共 600 年的数据进行校准, 1598~1970A.D. 时段进行检验。选择常用的检验统计量包括: 解释方差(r^2)、误差缩减量 (Reduction of Error, 简称 RE) 和有效系数 (Coefficient of Efficiency, 简称 CE) 等。沿用 Mann 等^[24] 提出标准差来表征不确定性, 计算公式如下:

$$U = s \cdot 2\sqrt{1-r^2} \quad (5)$$

公式(5)中, U 表示重建的不确定性; s 代表校准段校准序列的标准差; r 是检验段重建结果与校准序列的相关系数。

2.4 其他方法

根据定义气候极值年份的传统方法^[58], 本文将温度大(小)于过去 2000 年平均温度 3 倍标准差的年份记为极端高(低)温年, 大(小)于 2 倍标准差的年份记为高(低)温年; 将出现至少 5 个以上高(低)温年的时段定义为一个暖(冷)期。

滤波方法常用于古气候重建序列中, 以辨识不同时间尺度气候变化的特征^[59], 本文采用的是 loess (LOcal regrESSion) 方法是一种局部加权非参数回归方法^[60]。由于其是利用时间窗口内的数据进行局部加权二阶多项式拟合, 与参数滤波相比可能更适合反映代用记录的不稳定性, 故本文选用 loess 方法进行滤波处理。参数 span 代表选取时间窗口占数据总长度的比率。对于本文重建的 1970 年序列来说, span=0.05 代表 98.5 年的时间窗口, 可粗略认为是表示百年际尺度的变化。而 span =

0.01 代表 19.7 年的时间窗口, 粗略认为是表示年代际尺度的变化。

在统计学上可以简单认为相关系数的平方代表了自变量对因变量的方差的解释量, 也可认为是解释变化的百分比^[61]。滤波后两条序列的相关系数会增大, 但同时自由度会降低, 意味着显著性水平的要求也会相应提高。本文的有效自由度 N_{eff} 用下式进行估计^[62,63]:

$$\frac{1}{N_{eff}} \approx \frac{1}{N} + \frac{2}{N} \sum_{j=1}^N \frac{N-j}{N} \rho_{XX}(j) \rho_{YY}(j) \quad (6)$$

公式(6)中, N 为样本数, $\rho_{XX}(j)$ 和 $\rho_{YY}(j)$ 分别为变量 X 和变量 Y 在滞后 j 时的自相关系数。则变量 X 和 Y 相关系数不为 0 的临界值为:

$$r_{crit} = \sqrt{t_{\alpha, N_{eff}}^2 / (t_{\alpha, N_{eff}}^2 + N_{eff})} \quad (7)$$

公式(7)中, $t_{\alpha, N_{eff}}$ 为给定 α 显著水平和有效自由度 N_{eff} 的 t 分布值。当 X 和 Y 的相关系数超过 r_{crit} , 则在 α 显著水平下是显著的。

时序叠加分析 (Superposed Epoch Analysis, 简称 SEA) 方法是一种检测特殊事件点对时间序列影响的统计方法。具体做法是将时间序列按照特殊事件进行重新排序后叠加, 叠加的归一化平均序列作为统计检验的结果, 用于表征特殊事件对原始时间序列的影响^[64]; 而置信限是利用分块自举法 (block bootstrap) 重新取样 10000 次计算得到, 详见相关文献^[65]。

3 结果与讨论

3.1 温度变化特征

我们得到检验统计量 r^2 、RE 和 CE 的计算结果分别是 0.45、0.49 和 0.45, 说明重建结果通过了显著性检验, 具有统计意义。从北半球过去 2000 年年均温重建序列可见 (图 3), 整体上, 20 世纪 50 年 (1921~1970A.D.) 北半球年均温在过去 2000 年可能是前所未有的, 但重建的不确定性估计是 $\pm 0.33^\circ\text{C}$, 故需要未来减少不确定性进一步证实该结果。在前人定义的小冰期 (1450~1850A.D.) 和中世纪 (950~1250A.D.) 期间^[66], 重建的北半球年均温均出现明显的降温和升温过程。过去 2000 年发生了 1 个年均温极端低温年是在 1642A.D.。4 个年均温极端高温年分别是 35A.D.、429A.D.、1943A.D. 和 1953A.D., 其中有 2 个发生在 1940A.D. 以后。从 50 个低温年来看, 500~550A.D. 期间存在 1 个低温期, 包括了 8 个低温年。小冰期 (1450~1850A.D.)

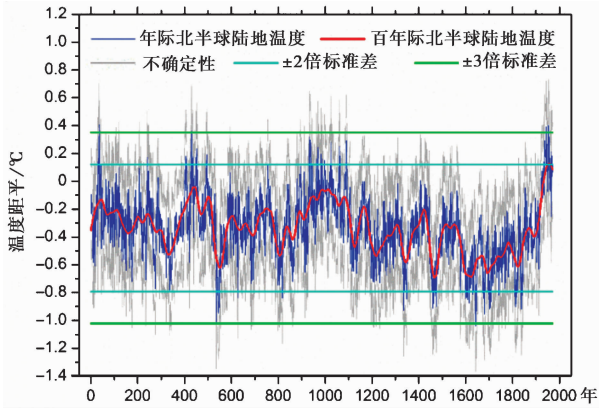


图3 过去2000年北半球年均温序列

蓝线是年分辨率的重建结果, 红线是 loess 方法滤波后的结果 (span=0.05), 灰线代表不确定性, 蓝绿线代表 ± 2 倍标准差水平线, 绿线代表 ± 3 倍标准差水平线

Fig. 3 Northern Hemisphere annual temperature variability over the past two millennia with the annual resolution (blue line) and the loess method filtered result (red line, span=0.05). The gray lines represent the reconstruction uncertainties. The blue green horizontal lines represent ± 2 times the standard deviation, and the green lines represent ± 3 times the standard deviation

期间发生了38个低温年和1个极端低温年。而从53个高温年可知, 400~500A.D. 存在1个高温期, 包括了11个高温年, 另900~1100A.D. 期间, 亦存在1个高温期, 包括了17个高温年。高温年有21个高温年发生在1930A.D. 以后, 这种40年内50%以上的年份出现高温年的情况, 在过去2000年自然因素主导的情况下未曾出现过。根据高温年和低温年的出现年份分析得到, 在过去2000年出现两个冷期和3个暖期。冷期大约分别是500~550A.D. 和小冰期(1450~1850A.D.)。3个暖期第一个大约是400~500A.D., 第二个是中世纪暖期, 本文建议将中世纪暖期的定义扩大为900~1250A.D., 而第三个暖期为20世纪暖期。

与北半球千年年均温序列以及北半球器测数据对比发现(图4), 在年际尺度上与过去千年北半球年均温序列在998~1970A.D. 期间的相关系数可达到0.80。滤波后在百年际尺度上, 重建结果与校准序列相比可见, 低频变化趋势更为明显。在中世纪暖期, 重建结果与校准序列相比升温也更为明显。另外, 与CRUTEM 4v数据集的北半球实测年平均温度序列相关系数为0.65(1850~1970A.D.), 略低于已有序列的结果(0.66)。将序列进行 loess 滤波 (span=0.1) 之后的结果, 新序列与器测数据的相关系数达到0.90, 考虑有效自由度的情况下通过了

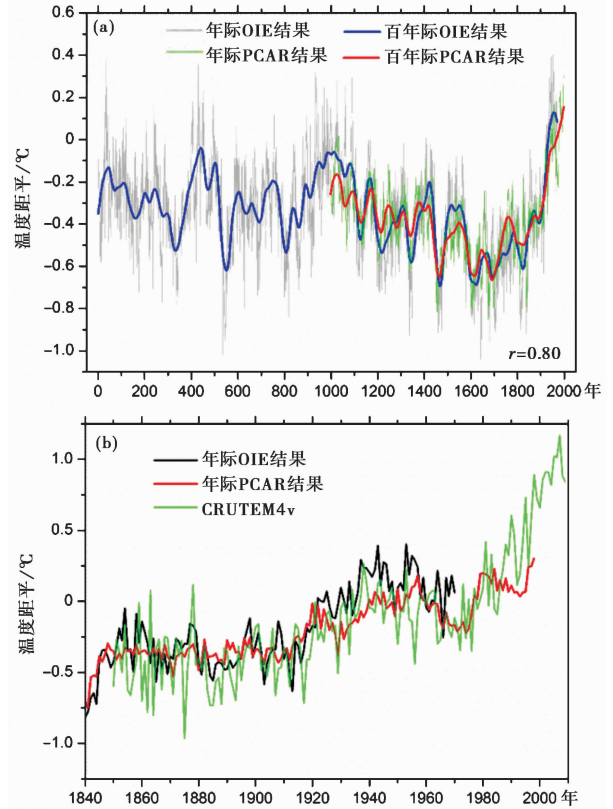


图4 北半球过去2000年年均温序列(OIE结果)与先前重建的北半球过去1000年年均温序列^[21](PCAR结果)和器测数据(CRUTEM 4v)的对比

(a) OIE 结果与 PCAR 结果对比图, 灰线是过去2000年年分辨率的重建结果, 蓝线是 loess 滤波后的结果 (span=0.05), 绿线是过去1000年年分辨率的重建结果, 红线是 loess 滤波后的结果 (span=0.1); (b) 两种重建结果与实测年平均温度对比图, 黑线是过去2000年年分辨率的重建结果(本文), 红线是过去1000年年分辨率的重建结果^[21], 绿线是 CRUTEM 4v 数据集的北半球过去150年年平均温度序列

Fig. 4 Time series of the reconstructed Northern Hemisphere annual temperature over the last two millennia (OIE result) as compared with the previous result^[21] (PCAR result) and instrumental data (CRUTEM 4v). (a) The OIE results with annual resolution (gray line) and the loess filtered version (span=0.05, blue line) compared with the PCAR results with annual resolution (green line) and the loess filtered version (span=0.01, red line); (b) two reconstruction results (black OIE result and red PCAR result) compared with the instrumental CRUTEM 4v data (green line)

95%显著性水平。而已有序列的结果是0.86, 考虑有效自由度的情况下也均通过了90%显著性水平。此外, 器测数据的标准差是0.25℃, 已有序列的仅为0.16℃, 而新重建结果的标准差为0.25℃。上述结果均说明本文的重建序列比已有序列可能保留了与仪器观测记录更为接近的低频变化信息。

与前人结果^[16, 17, 24, 54]对比发现(图 5), 在世纪尺度上的冷暖交替均有较好的对应关系, 例如在 1000 年以前的 500~650A.D. 存在一个冷期, 其在他人^[16, 17]的重建结果中也得到了证实。与前人结果^[16, 17, 24, 54]不同的是, 大约在 400~500A.D. 存在一个暖期。造成与他人结果不同的原因, 除所选用的重建方法不同外, 选取代用记录的类型也有所不同, 他人重建均集成了除树轮以外的其他类型代用记录。

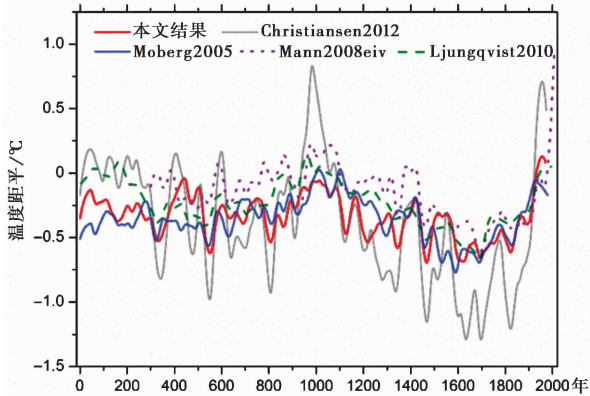


图 5 北半球过去 2000 年年均温序列与前人结果对比
 红色线是本文重建结果, 灰线是 Christiansen 和 Ljungqvist^[16] 的重建结果, 蓝色线是 Moberg 等^[17] 的重建结果, 粉色线是 Mann 等^[24] 的 EIV 方法重建结果, 绿色线是 Ljungqvist^[54] 的重建结果; 上述所有结果均是原始序列 loess 滤波后的结果 (span = 0.05)
 Fig. 5 Time series of the reconstructed Northern Hemisphere annual temperature over the last two millennia (red line) as compared with the other reconstructions^[16, 17, 24, 54]. All series were filtered using the loess method (span = 0.05)

从功率谱的结果可以看出(图 6), 过去 2000 年北半球年均温序列存在 116a、131a、164a、281a 和 493a 的准周期。从小波分析也可以看出存在类似的准周期, 但周期信号的显著时间段是不同的(图 7), 例如 116~164a 左右的周期可能仅在 1200~1600A.D. 时段通过了 95% 的显著性水平, 而 281a 和 493a 的周期可能在 200A.D. 以后是存在的, 但受到重建数据长度的限制, 其置信时段是很有限的, 尤其是 493a 的周期仅在 800~1200A.D. 是可信的。

3.2 温度变化的归因分析

AMO 是典型的气候系统的内部变率, Li 等^[67] 重构了 NAO 指数, 并建立了 AMO 和 NAO 相互作用的延迟阵子理论模型, 可以很好的解释 AMO 作为气候系统的内部变率准 50~70a 的周期变化^[34, 68]。Mann 等^[18] 重建的 AMO 指数与 Gray 等^[55] 的 AMO 指数相关系数是 0.50, 说明 Mann

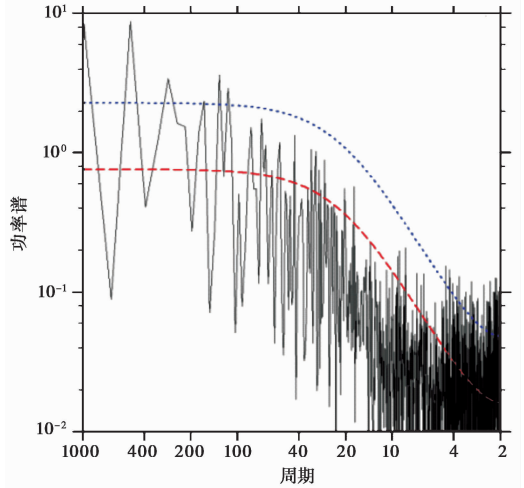


图 6 北半球过去 2000 年年均温序列功率谱
 红色虚线表示红噪声, 蓝色线表示 95% 的置信限
 Fig. 6 Power spectrum of Northern Hemisphere annual temperature over the last two millennia with 95% confidence limit given as blue dotted line, and the referenced red noise spectrum as red dashed line

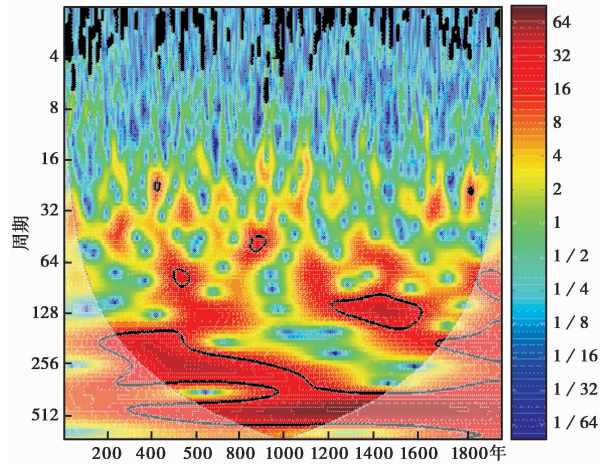


图 7 过去 2000 年北半球年均温序列的小波分析
 Fig. 7 Wavelet analysis of Northern Hemisphere annual temperature over the last two millennia

等^[18] 重建的结果具有可对比性。为了在更长时间尺度考察过去 2000 年北半球年均温变化与 AMO 指数的相关性, 我们选择了 Mann 等^[18] 的 AMO 指数进行对比(图 8), 重建结果与 AMO 在年代际尺度存在显著相关, 相关系数为 0.59, 考虑有效自由度的情况下通过了 99% 的显著性水平。说明北大西洋海洋内部变率 AMO 可能可以解释 36% 左右北半球过去 1500 年年代际尺度以上的年均温变化。而重建结果与 Gray 等^[55] 1572~1970 年年分辨率的 AMO 指数, 相关系数可达到 0.41, 考虑有效自由度的情况下也可通过 90% 的置信水平。

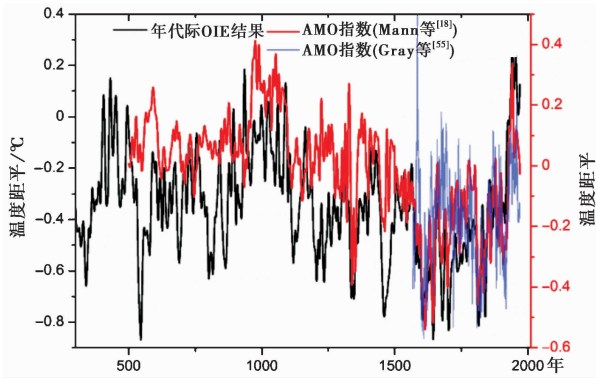


图8 过去2000年北半球年均温序列 loess 滤波后的结果 (span=0.01) 与 AMO 两条重建序列^[18,55]的对比

Fig. 8 Time series of the reconstructed Northern Hemisphere annual temperature over the last two millennia filtered by the loess method (span=0.01) and the two AMO indices^[18,55]

与太阳活动^[69]的对比可以发现(图9), 滤波后在百年际尺度上, 重建的北半球年均温与太阳活动序列相关系数为0.26, 考虑有效自由度的情况下并未通过显著性检验。利用时序叠加分析方法分析火山活动对北半球过去2000年年均温的影响(图10), 这里火山活动序列选择的是过去千年全球发生的34个显著火山爆发事件^[70], 发现在火山爆发的下一年北半球年均温降低最为明显, 而这种影响逐渐降低, 到第四年完全消失。

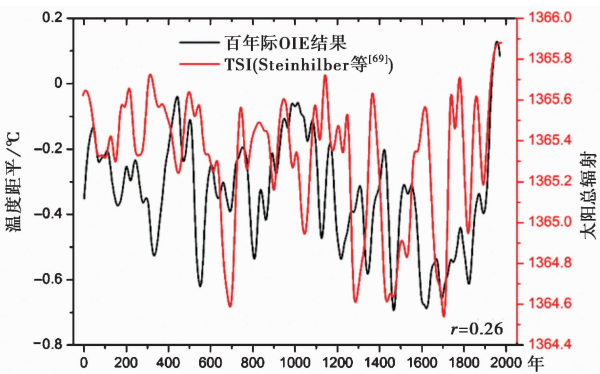


图9 北半球过去2000年年均温序列 loess 滤波后的结果 (span=0.05) 与太阳活动^[69]的对比

Fig. 9 Time series of the reconstructed Northern Hemisphere annual temperature filtered by the loess method (span=0.05) and total solar irradiance (TSI)^[69] over the last two millennia

3.3 讨论

本文重建的过去2000年北半球年平均温度序列的变化幅度, 大于之前重建的过去1000年北半球年平均温度序列, 原因可能是由于集合局地回归法引入逆回归所引起的。从图5可见, Christiansen

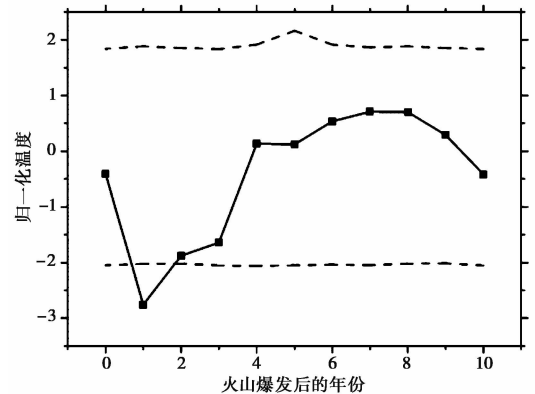


图10 过去2000年北半球年均温序列与全球34个显著火山活动序列^[70]对比的时序叠加分析(虚线代表99%的置信度)
Fig. 10 Superposed Epoch Analysis results applied to the Northern Hemisphere annual temperature reconstruction over the last two millennia response to 34 significant volcanic events^[70] with 99% confidence limits of the mean given as dashed lines

和 Ljungqvist^[16]局地回归法的温度变化幅度明显大于其他结果。正如其在原文中所述, 局地回归法能保留更多的低频信号, 但同时也过高估计了高频变化^[71]。而我们的集合局地回归法是算术平均了两种方法的结果, 所以所得结果更接近器测数据^[57]。

在温度归因分析方面, 已有研究表明, 太阳活动序列可能存在510a的准周期^[19,72], 500a左右的周期在其他代用记录中也得到证实^[73]。这意味着重建序列中493a的准周期可能与太阳活动有关。但在百年尺度上重建序列与太阳活动指数的相关性并未通过显著性检验。前人研究表明, 温度序列和太阳活动指数的关系可能是随时间变化^[20], 所以太阳活动是否为过去2000年北半球温度变化的主控因素需进一步研究。重建结果与火山活动的关系表明, 火山活动对温度的影响是爆发后第一年温度降低最为明显, 之后影响逐渐减弱, 第四年影响完全消失。意味着火山活动对北半球温度在年际尺度上有重要的影响, 这与前人的研究一致^[74,75]。

在气候系统内部变率对温度的影响方面, 本文结果显示AMO可以解释36%左右的过去1500年北半球年际尺度以上的年均温变化, 证实现代气候中北半球年均温与AMO的显著相关关系在过去1500年也是存在的。需要注意的是, 尽管Mann等^[18]重建全球温度空间格局时, 用到的两条跨度超过2000年的树轮资料本文并未采用, 但Mann等^[18]用到的跨度小于2000年的树轮记录的地理位置与本文用到的资料的地理位置可能较为接近或重

叠,造成两项工作在该地区用到的资料较为相似或在某时段重复,这可能一定程度上影响本文重建结果与 AMO 指数的相关性,因而造成上述结果存在一定不确定性。

本文重建结果虽然与 Mann 等^[18]重建的 PDO 指数相关系数达到了 0.47,但与 D'Arrigo 和 Wilson^[56]重建的 PDO 指数相关系数为 -0.19,而 Mann 等^[18]重建的年平均 PDO 指数与 D'Arrigo 和 Wilson^[56]重建的春季 PDO 指数相关系数仅为 -0.12,说明这两条重建的 PDO 指数一致性较差。其原因可能是由于 D'Arrigo 和 Wilson^[56]重建的 PDO 指数所用的树轮资料均来自亚洲,一定程度上强调了 PDO 对亚洲气候变化的影响,加之该指数是代表春季 PDO 指数,而 Mann 等^[18]重建的是年平均 PDO 指数。所以数据来源和重建季节的差异可能共同导致两条 PDO 指数变化不一致。实际上,美国国家海洋大气局古气候数据集共收集了 4 条 PDO 重建指数,计算公共时段(1565~1988A.D.)的相关系数均未超过 0.2,启示我们首先需要得到准确的 PDO 指数重建结果,而后才有可能来研究 PDO 或 IPO 对过去 2000 年北半球温度的贡献。

4 结论与展望

基于 16 条长度超过 2000 年的树轮年表,利用最优信号提取法重建了过去 2000 年的北半球年均温序列,重建结果通过了独立时段的统计检验。结果显示过去 2000 年北半球年均温存在 50 个低温年和 1 个极端低温年,其中有 8 个低温年大约发生在第一个冷期(500~550A.D.),有 1 个极端低温年和 38 个低温年发生在小冰期。存在 53 个高温年和 4 个极端高温年,其中 1 个极端高温年和 11 个高温年大约发生在第一个暖期(400~500A.D.),第二个暖期是中世纪暖期发生了 17 个高温年。而 20 世纪从未出现过低温年,却发生了 2 个极端高温年和 21 个高温年。从过去 2000 年来看,20 世纪以来高低温年出现的概率发生了变化,这意味着驱动因子影响温度变化的相对贡献权重可能发生了变化。

探讨过去 2000 年北半球温度变化的驱动机制发现,气候系统内部变率 AMO、太阳活动和火山活动对北半球年均温变化均有贡献。从现有重建结果来看,AMO 可以解释 36% 的年代际以上的温度变率。显著的火山爆发也直接影响火山爆发后 3 年的北半球年均温变化,火山爆发后的第一年北半球降温最为明显。需要指出的是,目前公布的 AMO 指

数主要是利用树轮资料重建的^[18,55],而本文重建的温度序列也是基于树轮资料的,故这其中存在资料本身的相似性,从而影响 AMO 与北半球温度相关性的可能性。为了进一步确认 AMO 对北半球过去 2000 年年均温的影响,需要利用其他类型的代用记录,如海洋沉积记录重建 AMO 指数进行对比验证。

从本文采用的树轮样点的空间分布来看,重建温度的代表性可能仅限于北美洲西部、欧洲和亚洲高纬度地区,数量上也仅有 16 条序列。为了得到空间覆盖度更大、精度更高的过去 2000 年全球温度的变化特征,一方面需要发掘更多更长的树轮资料,利用最新的去趋势方法,如零信号去趋势方法^[76]、特征值方法^[77]和集合权重方法^[78]等,减少树木本身的生长趋势对年表的影响,得到对世纪或更长时间尺度气候变化响应更准确的树轮资料;另一方面可以利用不同类型的代用记录,例如冰芯^[79,80]、石笋^[81-83]、树轮^[84,85]、珊瑚^[11,86]和历史文献^[87,88]等集成重建,扬长避短,优势互补,得到更为准确的气候变化序列。

致谢 笔者感谢中国科学院大气物理研究所李晓峰博士、赵森同学和北京师范大学孙诚博士提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 1 周天军, 满文敏, 张 洁. 过去千年气候变化的数值模拟研究进展. *地球科学进展*, 2009, **24**(5): 469~476
Zhou Tianjun, Man Wenmin, Zhang Jie. Progress in numerical simulations of the climate over the last millennium. *Advances in Earth Science*, 2009, **24**(5): 469~476
- 2 姚檀栋, 杨梅学, 康兴成. 从古里雅冰芯与祁连山树轮记录看过去 2000 年气候变化. *第四纪研究*, 2001, **21**(6): 514~519
Yao Tandong, Yang Meixue, Kang Xingcheng. Comparative study of the climate changes in the past 2000 years by using ice core and tree ring records. *Quaternary Sciences*, 2001, **21**(6): 514~519
- 3 Yang X, Yao T, Joswiak D *et al.* Integration of Tibetan Plateau ice-core temperature records and the influence of atmospheric circulation on isotopic signals in the past century. *Quaternary Research*, 2014, **81**(3): 520~530
- 4 谭 明, 侯居峙, 程 海. 定量重建气候历史的石笋年层方法. *第四纪研究*, 2002, **22**(3): 209~219
Tan Ming, Hou Juzhi, Cheng Hai. Methodology of quantitatively reconstructing paleoclimate from annually laminated stalagmites. *Quaternary Sciences*, 2002, **22**(3): 209~219
- 5 谭亮成, 蔡演军, 安芷生等. 石笋氧同位素和微量元素记录的陕南地区 4200~2000a B.P. 高分辨率季风降雨变化. *第四纪研究*, 2014, **34**(6): 1238~1245
Tan Liangcheng, Cai Yanjun, An Zhisheng *et al.* High-resolution monsoon precipitation variations in southern Shaanxi, Central China

- during 4200~2000a B.P. as revealed by speleothem $\delta^{18}\text{O}$ and Sr/Ca records. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1238~1245
- 6 张伟宏, 汪永进, 吴江澄等. 南京葫芦洞石笋微量元素记录的末次冰消期气候变化. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1227~1237
Zhang Weihong, Wang Yongjin, Wu Jiangying *et al.* Last deglacial climate variations inferred from trace elements in a stalagmite from Hulu Cave, Nanjing. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1227~1237
- 7 陈琼, 刘淑华, 米小建等. 川东北石笋记录的 GIS 4~5 夏季风气候变化及与高纬气候的联系. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1264~1269
Chen Qiong, Liu Shuhua, Mi Xiaojian *et al.* Speleothem-derived Asian summer monsoon variations during Greenland Interstadials 4 to 5 in NE Sichuan, Central China and teleconnections with high latitude climates. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1264~1269
- 8 邵雪梅, 王树芝, 徐岩等. 柴达木盆地东北部 3500 年树轮定年年表的初步建立. 第四纪研究, 2007, **27**(4): 477~485
Shao Xuemei, Wang Shuzhi, Xu Yan *et al.* A 3500-year master tree-ring dating chronology from the northeastern part of the Qaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2007, **27**(4): 477~485
- 9 刘禹, 蔡秋芳, 宋慧明. 关于青藏高原 2485 年温度的季节和空间代表性问题. 第四纪研究, 2013, **33**(1): 108~114
Liu Yu, Cai Qiufang, Song Huiming. Seasonal and spatial representativeness of the tree-ring based 2485-year annual mean temperature reconstruction in the northeastern Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(1): 108~114
- 10 韦刚健, 余克服, 李献华等. 南海北部珊瑚 Sr/Ca 和 Mg/Ca 温度计及高分辨率 SST 记录重建尝试. 第四纪研究, 2004, **24**(3): 325~331
Wei Gangjian, Yu Kefu, Li Xianhua *et al.* Coralline Sr/Ca and Mg/Ca thermometer for the northern South China Sea: Calibration and primary application on high-resolution SST reconstructing. *Quaternary Sciences*, 2004, **24**(3): 325~331
- 11 陈天然, 余克服. 南海相对高纬度珊瑚对海洋环境变化的响应和高分辨率记录. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1288~1295
Chen Tianran, Yu Kefu. Responses and high-resolution records for marine environment changes in the relatively high-latitude corals from the South China Sea. *Quaternary Sciences*, 2004, **34**(6): 1288~1295
- 12 葛全胜, 郑景云, 方修琦等. 过去 2000 年中国东部冬半年温度变化. 第四纪研究, 2002, **22**(2): 166~173
Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Fang Xiuqi *et al.* Temperature changes of winter-half-year in Eastern China during the past 2000 years. *Quaternary Sciences*, 2002, **22**(2): 166~173
- 13 张德二, 梁有叶. 历史极端寒冬事件研究——1892/93 年中国的寒冬. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1176~1185
Zhang De'er, Liang Youye. A study of the severest winter of 1892/93 over China as an extreme climatic event in history. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1176~1185
- 14 方修琦, 苏筠, 尹君等. 历史气候变化影响研究中的社会经济等级序列重建方法探讨. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1204~1214
Fang Xiuqi, Su Yun, Yin Jun *et al.* Methodology for quantifying social and economic series on the base of semantic differential to serve the research on impacts of climate change. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1204~1214
- 15 Hao Z X, Zheng J Y, Ge Q S *et al.* Winter temperature variations over the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736 AD. *Climate of the Past*, 2012, **8**(3): 1023~1030
- 16 Christiansen B, Ljungqvist F C. The extra-tropical Northern Hemisphere temperature in the last two millennia: Reconstructions of low-frequency variability. *Climate of the Past*, 2012, **8**(2): 765~786
- 17 Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K *et al.* Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low-and high-resolution proxy data. *Nature*, 2005, **433**(7026): 613~617
- 18 Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S *et al.* Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval climate anomaly. *Science*, 2009, **326**(5957): 1256~1260
- 19 Masson-Delmotte V, Schulz M, Abe-Ouchi A *et al.* Information from paleoclimate archives. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K *et al.* eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013. 383~464
- 20 Yang B, Qin C, Wang J L *et al.* A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(8): 2903~2908
- 21 Shi F, Yang B, Mairesse A *et al.* Northern Hemisphere temperature reconstruction during the last millennium using multiple annual proxies. *Climate Research*, 2013, **56**(3): 231~244
- 22 Von Storch H, Zorita E, Jones J *et al.* Reconstructing past climate from noisy data. *Science*, 2004, **306**(5696): 679~682
- 23 Cook E R, Meko D M, Stahle D W *et al.* Drought reconstructions for the continental United States. *Journal of Climate*, 1999, **12**(4): 1145~1162
- 24 Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K *et al.* Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(36): 13252~13257
- 25 Tingley M P, Huybers P. A Bayesian Algorithm for reconstructing climate anomalies in space and time. Part I: Development and applications to paleoclimate reconstruction problems. *Journal of Climate*, 2010, **23**(10): 2759~2781
- 26 Christiansen B, Schmith T, Thejll P. A surrogate ensemble study of climate reconstruction methods: Stochasticity and robustness. *Journal of Climate*, 2009, **22**(4): 951~976
- 27 D'Arrigo R, Wilson R, Liepert B *et al.* On the 'Divergence Problem' in Northern Forests: A review of the tree-ring evidence and possible causes. *Global and Planetary Change*, 2008, **60**(3~4): 289~305
- 28 Wilson R, D'Arrigo R, Buckley B *et al.* A matter of divergence: Tracking recent warming at hemispheric scales using tree ring data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D17): doi: 10.1029/2006jd008318
- 29 Shi F, Li J, Wilson R J S. A tree-ring reconstruction of the South Asian summer monsoon index over the past millennium. *Scientific Reports*, 2014, **4**(6739): doi: 10.1038/srep06739
- 30 Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years.

- Science*, 2000, **289**(5477): 270~277
- 31 Ammann C M, Joos F, Schimel D S *et al.* Solar influence on climate during the past millennium: Results from transient simulations with the NCAR Climate System Model. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, **104**(10): 3713~3718
- 32 Schurer A P, Tett S F B, Hegerl G C. Small influence of solar variability on climate over the past millennium. *Nature Geoscience*, 2014, **7**(2): 104~108
- 33 Tung K K, Zhou J. Using data to attribute episodes of warming and cooling in instrumental records. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(6): 2058~2063
- 34 Li J, Sun C, Jin F F. NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(20): 5497~5502
- 35 Dai A, Fyfe J C, Xie S P *et al.* Decadal modulation of global surface temperature by internal climate variability. *Nature Climate Change*, 2015, **5**(6): 555~559
- 36 Steinman B A, Mann M E, Miller S K. Atlantic and Pacific multidecadal oscillations and Northern Hemisphere temperatures. *Science*, 2015, **347**(6225): 988~991
- 37 Jones P D, Lister D H, Osborn T J *et al.* Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal Geophysical Research*, 2012, **117**(D5): doi: 10.1029/2011jd017139
- 38 Fritts H. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976. 316
- 39 Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M *et al.* Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium. *Science*, 2010, **328**(5977): 486~489
- 40 Cook E R, Krusic P J, Anchukaitis K J *et al.* Tree-ring reconstructed summer temperature anomalies for temperate East Asia since 800 CE. *Climate Dynamics*, 2013, **41**(11~12): 2957~2972
- 41 Helama S, Seppä H, Bjune A E *et al.* Fusing pollen-stratigraphic and dendroclimatic proxy data to reconstruct summer temperature variability during the past 7.5 ka in subarctic Fennoscandia. *Journal of Paleolimnology*, 2012, **48**(1): 275~286
- 42 Helama S, Lindholm M, Timonen M *et al.* The supra-long Scots pine tree-ring record for Finnish Lapland: Part 2, Interannual to centennial variability in summer temperatures for 7500 years. *The Holocene*, 2002, **12**(6): 681~687
- 43 Büntgen U, Tegel W, Nicolussi K *et al.* 2500 years of European climate variability and human susceptibility. *Science*, 2011, **331**(6017): 578~582
- 44 Esper J, Duethorn E, Krusic P J *et al.* Northern European summer temperature variations over the Common Era from integrated tree-ring density records. *Journal of Quaternary Science*, 2014, **29**(5): 487~494
- 45 Briffa K R, Melvin T M, Osborn T J *et al.* Reassessing the evidence for tree-growth and inferred temperature change during the Common Era in Yamalia, northwest Siberia. *Quaternary Science Reviews*, 2013, **72**(0): 83~107
- 46 Salzer M, Kipfmueller K. Reconstructed temperature and precipitation on a millennial timescale from tree-rings in the southern Colorado Plateau, USA. *Climatic Change*, 2005, **70**(3): 465~487
- 47 Grudd H, Briffa K, Karlen W *et al.* A 7400-year tree-ring chronology in northern Swedish Lapland: Natural climatic variability expressed on annual to millennial timescales. *The Holocene*, 2002, **12**(6): 657~665
- 48 Salzer M, Hughes M, Bunn A *et al.* Recent unprecedented tree-ring growth in bristlecone pine at the highest elevations and possible causes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(48): 20348~20353
- 49 Briffa K R, Shishov V V, Melvin T M *et al.* Trends in recent temperature and radial tree growth spanning 2000 years across Northwest Eurasia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, **363**(1501): 2269~2282
- 50 Linderholm H W, Gunnarson B E. Summer temperature variability in Central Scandinavia during the last 3600 years. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2005, **87**(1): 231~241
- 51 Hughes M K, Graumlich L J. Multimillennial dendroclimatic studies from the western United States. In: Jones P D, Bradley R S, Jouzel J eds. *Climatic Variations and Forcing Mechanisms of the Last 2000 Years*. *NATO ASI Series*, 1996, **41**: 109~124
- 52 Graybill D A, Idso S B. Detecting the aerial fertilization effect of atmospheric CO₂ enrichment in tree-ring chronologies. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(1): 81~95
- 53 Helama S, Fauria M M, Mielikäinen K *et al.* Sub-Milankovitch solar forcing of past climates: Mid and Late Holocene perspectives. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, doi: 10.1130/b30088.1
- 54 Ljungqvist F C. A new reconstruction of temperature variability in the extra-tropical Northern Hemisphere during the last two millennia. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2010, **92**(3): 339~351
- 55 Gray S T, Graumlich L J, Betancourt J L *et al.* A tree-ring based reconstruction of the Atlantic Multidecadal Oscillation since 1567 AD. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(12): L12205
- 56 D'Arrigo R, Wilson R. On the Asian expression of the PDO. *International Journal Climatolgy*, 2006, **26**(12): 1607~1617
- 57 Shi F, Yang B, Charpentier Ljungqvist F *et al.* Multi-proxy reconstruction of Arctic summer temperatures over the past 1400 years. *Climate Research*, 2012, **54**(2): 113~128
- 58 Hu W, Wu R, Liu Y. Relation of the South China Sea precipitation variability to Tropical Indo-Pacific SST anomalies during spring-to-summer transition. *Journal of Climate*, 2014, **27**(14): 5451~5467
- 59 McShane B B, Wyner A J. A statistical analysis of multiple temperature proxies: Are reconstructions of surface temperatures over the last 1000 years reliable? *Annals of Applied Statistics*, 2011, **5**(1): 5~44
- 60 Cleveland W S, Devlin S J. Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 1988, **83**(403): 596~610
- 61 Wilks D. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 2006. 463
- 62 Pyper B J, Peterman R M. Comparison of methods to account for autocorrelation in correlation analyses of fish data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1998, **55**(9): 2127~2140
- 63 Li Y, Li J P, Feng J. A teleconnection between the reduction of rainfall in southwest Western Australia and North China. *Journal of Climate*, 2012, **25**(24): 8444~8461
- 64 Adams J B, Mann M E, Ammann C M. Proxy evidence for an

- El Niño-like response to volcanic forcing. *Nature*, 2003, **426** (6964): 274~278
- 65 Blarquez O, Carcaillet C. Fire, fuel composition and resilience threshold in subalpine ecosystem. *PLoS One*, 2010, **5**(8): doi: 10.1371/journal.pone.0012480
- 66 PAGES 2k Consortium. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience*, 2013, **6**(5): 339~346
- 67 Li J, Wang J X. A new North Atlantic Oscillation index and its variability. *Advance Atmospheric Sciences*, 2003, **20**(5): 661~676
- 68 Sun C, Li J, Jin F F. A delayed oscillator model for the quasi-periodic multidecadal variability of the NAO. *Climate Dynamics*, 2015, doi: 10.1007/s00382-014-2459-z
- 69 Steinhilber F, Abreu J A, Beer J *et al.* 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(16): 5967~5971
- 70 Esper J, Schneider L, Krusic P *et al.* European summer temperature response to annually dated volcanic eruptions over the past nine centuries. *Bulletin of Volcanology*, 2013, **75**(7): 1~14
- 71 Christiansen B, Ljungqvist F C. Reconstruction of the extratropical NH mean temperature over the last millennium with a method that preserves low-frequency variability. *Journal of Climate*, 2011, **24**(23): 6013~6034
- 72 Zhang L, Zhou T. Drought over East Asia: A Review. *Journal of Climate*, 2015, **28**(8): 3375~3399
- 73 Xu D, Lu H, Chu G *et al.* 500-year climate cycles stacking of recent centennial warming documented in an East Asian pollen record. *Scientific Reports*, 2014, **4**(3611): doi: 10.1038/srep03611
- 74 Briffa K, Jones P, Schweingruber F *et al.* Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the last 600 years. *Nature*, 1998, **393**(6684): 450~455
- 75 Man W, Zhou T, Jungclauss J H. Effects of large volcanic eruptions on global summer climate and East Asian monsoon changes during the last millennium: Analysis of MPI-ESM simulations. *Journal of Climate*, 2014, **27**(19): 7394~7409
- 76 Melvin T, Briffa K. A signal-free approach to dendroclimatic standardisation. *Dendrochronologia*, 2008, **26**(2): 71~86
- 77 Yang B, Sonechkin D, Datsenko N *et al.* Eigen analysis of tree-ring records: Part 3, Taking heteroscedasticity and sampling effects into consideration. *Theoretical and Applied Climatology*, 2012, **107**(3~4): 519~530
- 78 Fang K, Wilmking M, Davi N *et al.* An ensemble weighting approach for dendroclimatology: Drought reconstructions for the northeastern Tibetan Plateau. *PLoS One*, 2014, **9**(1): e86689
- 79 徐柏青, 姚檀栋, Chappellaz J. 过去 2000 年大气甲烷含量与气候变化的冰芯记录. 第四纪研究, 2006, **26**(2): 173~184
Xu Boqing, Yao Tandong, Chappellaz J. Atmospheric methane concentration and climate change recorded in ice cores over the past 2000 years. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(2): 173~184
- 80 赵华标, 徐柏青, 王宁练. 青藏高原冰芯氧同位素记录的溫度代表性研究. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1215~1226
Zhao Huabiao, Xu Boqing, Wang Ninglian. Study on the water stable isotopes in Tibetan Plateau ice cores as a proxy of temperature. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1215~1226
- 81 谭明, 段武辉. 北京石花洞石笋季节尺度地球化学旋回特征——以年层标定的纳米离子探针分析. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1338~1339
Tan Ming, Duan Wuhui. Seasonal scale geochemical cycles in a stalagmite from Beijing Shihua Cave——Nano SIMS analysis for annual layers. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1338~1339
- 82 李伟, 陈仕涛, 吴帅男等. 东亚季风“2.8ka”事件高分辨率的石笋记录. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1256~1263
Li Wei, Chen Shitao, Wu Shuainan *et al.* A high-resolution East Asian monsoon records around 2.8ka B.P. from Mt. Shennongjia, Central China. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1256~1263
- 83 张振球, 刘殿兵, 汪永进等. 中全新世东亚季风年至 10 年际气候变率: 湖北青天洞 5.56~4.84ka B.P. 石笋年层厚度与地球化学证据. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1246~1255
Zhang Zhenqiu, Liu Dianbing, Wang Yongjin *et al.* Annual- to decadal-scale variability of Asian monsoon climates during Mid-Holocene: Evidence from proxies of annual bands and geochemical behaviors a speleothem from 5.56ka B.P. to 4.84 B.P. in Qingtian Cave, Central China. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1246~1255
- 84 时兴合, 秦宁生, 刘洪滨等. 青海治多公元 1374 年以来树轮记录的青藏高原地面加热场强度变化. 第四纪研究, 2013, **33**(1): 115~125
Shi Xinghe, Qin Ningsheng, Liu Hongbin *et al.* Surface heating field intensity change over Tibetan Plateau recorded Qinghai Zhiduo tree rings since 1374A.D. *Quaternary Sciences*, 2013, **33**(1): 115~125
- 85 任军莉, 刘禹, 宋慧明等. 甘肃临夏地区过去 195 年最高温度历史重建——基于紫果云杉树轮宽度资料. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1270~1279
Ren Junli, Liu Yu, Song Huiming *et al.* The historical reconstruction of the maximum temperature over the past 195 years, Linxia region, Gansu previous——Based on the data from *Picea purpurea* Mast. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1270~1279
- 86 张会领, 余克服, 施祺等. 珊瑚生长率重建西沙海家中晚全新世海温变化. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1296~1305
Zhang Huiling, Yu Kefu, Shi Qi *et al.* Sea surface temperature variations during the Mid-Late Holocene reconstructed by *Porites* coral growth rates in the Xisha Islands. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1296~1305
- 87 郑景云, 葛全胜, 郝志新等. 历史文献中的气象记录与气候变化定量重建方法. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1186~1196
Zheng Jingyun, Ge Quansheng, Hao Zhixin *et al.* Paleoclimatology proxy recorded in historical documents and method for reconstruction on climate change. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1186~1196
- 88 满志敏, 杨煜达. 中世纪温暖期升温影响中国东部地区自然环境的文献证据. 第四纪研究, 2014, **34**(6): 1197~1203
Man Zhimin, Yang Yuda. The Medieval warming impacts on the natural environment in Eastern China as inferred from historical documents. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(6): 1197~1203

RECONSTRUCTION OF THE NORTHERN HEMISPHERE ANNUAL TEMPERATURE CHANGE OVER THE COMMON ERA DERIVED FROM TREE RINGS

Shi Feng^① Yang Bao^② Feng Juan^{③④} Li Jianping^{③④} Yang Fengmei^⑤ Guo Zhengtang^①

(^①Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

^②Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; ^③College of Global Change and Earth System Science (GCESS), Beijing Normal University, Beijing 100875;

^④Joint Center for Global Change Studies (JGCS), Beijing 100875; ^⑤China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081)

Abstract

In order to further understand the past temperature variation over Common Era in the Northern Hemisphere (NH), we reconstructed the NH annual temperature variability over Common Era using the optimal information extraction (OIE) method, based on 16 tree-ring chronologies longer than 2000 years.

The proxy dataset is composed of 15 tree-ring width chronologies and one tree-ring density chronology covering a large area extending across the Northern America, Europe, and Asia. All chronologies are strongly correlated with the multi-proxy reconstructed annual NH temperature anomalies over the past millennium at the 95% confidence level. The OIE method utilized the ensemble LOCal regression method to improve the ability to retain the low frequency signal, and used the correlation coefficient between the calibrated sequence and the local climate factor in the proxy record location to measure regional differences response to the climate signal. This method belongs to the Composite-plus-scale method classification.

The results show that there are one extreme low temperature event and four extreme high temperature events, 50 low temperature events and 53 high temperature events, two cold periods and three warm periods over the past 2000 years. Among them, 8 low temperature events occurred in the first cold period (ca.500~550A.D.), one extreme low temperature event and 38 low temperature events appeared during the Little Ice Age (1450~1850A.D.). In addition, there are 17 high temperature events in the Medieval Warm Period (900~1250A.D.). Before 1000A.D., there is a warm period in ca.400~500A.D., during which existed one extreme high temperature event and 11 high temperature events. The third warm period is the 20th century, during which extreme low temperature and low temperature events did not appear but there have been two extreme high temperature events and 21 high temperature events. This implies that the extreme low and low temperature events over a hemispheric scale could not likely appear under further global warming scenario.

Based on the attribution analysis of the reconstructed temperature variability, the forcings, including the Atlantic Multi-decadal Oscillation (AMO), solar activity and volcanic activity all could have affected the NH annual temperature anomalies variability over the past 2000 years. The AMO explains more than 36% NH temperature variability over multi-decadal time scale indicating that the AMO is the main driving factor of the NH annual temperature variations over the past 2000 years. Note that the tree-ring chronologies used in this reconstruction and in AMO index reconstruction may derive from the same positions. This similarity would cause the uncertainty in the influence of AMO on the NH temperature. This needs to be verified using the new AMO index based on the other type proxy records, *e.g.* coral record. Solar activity could have weak impact on the NH temperature variability on a centennial time scale. Compared with 34 stronger global volcanic events, the NH temperature obviously drops in the first year after the eruption. This cooling effect completely disappeared in the fourth year. This implies that the impact of the volcanic activity on NH temperature decrease is transient and takes effect only on the inter-annual time scale, which is consistent with other results.

Key words Northern Hemisphere, Common Era, tree-ring, optimal information extraction, Atlantic Multi-decadal Oscillation