

近千年全球平均气温变化的研究*

王绍武¹ 谢志辉¹ 蔡静宁¹ 朱锦红¹ 龚道溢²

1. 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871;

2. 北京师范大学环境资源研究所, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875

摘要 综合分析了 Mann 等、Jones 等、Crowley 等及 Briffa 所建立的 4 条代表北半球或全球平均的近千年气温序列。介绍了王绍武等用 30 个站代资料建立的近千年全球平均气温序列(W), 以及用能量平衡模式所作的近千年气温变化的模拟结果(S)。对各种气温序列与模拟结果作了比较。W 的振幅最大, 与 S 相关系数最高(0.83)。对重建与模拟千年气温变化的不确定性进行了讨论, 利用大气环流模式所作的模拟研究评估了根据 30 个站建立全球气温序列可能包含的误差。并指出 11 世纪的气温明显高于近千年平均气温, 这在一定程度上也可以反映出中世纪暖期。不过, 20 世纪仍然是近千年中最暖的一个世纪。

关键词 近千年 气温变化 中世纪暖期 小冰期 现代气候变暖

1998~2000 年短短的 3 年之内, 国际上就发表了 4 个代表近千年北半球或全球气温变化的曲线。为什么要把研究的时间范围扩大到 1000 年, 又为什么要建立北半球或全球气温变化的曲线? 主要有两个原因; 第一, 要用足够长的序列来说明 20 世纪的气候变暖是否异常, 从而推断这是否是人类活动的结果。第二, 要从北半球或全球尺度来判断近千年中是否确实存在中世纪暖期(medieval warm period, MWP)及小冰期(little ice age, LIA)。因为这两个气候事件均发生在人类活动可能产生明显影响之前, 所以大多数作者都把它们归之于自然气候变化。如果自然变化也是全球性的, 而且变化幅度接近或甚至超过了 20 世纪的气候变暖, 则表明 20 世纪的变暖也可能是自然原因造成的。2001 年发表的 IPCC(政府间气候变化协调委员会)报告^[1]引用了这方面的最新研究成果, 并着重指出: (1) 20 世纪的气候变暖(百年气温上升 0.6 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$)是千年以来最强烈的。(2) 20 世纪 90 年代可能是近千年中北半球最暖的 10 年。(3) 1998 年可能是最暖的 1 年。这是对现代气候变暖的最重要评价。而千年气温序列, 则是作出这个评价的主要依据。因此有必要对相应的千年气温变化序列的建立、不确定性及其可能提供的信息作一个分析。

1 近千年气温变化序列

根据观测记录建立的全球平均气温序列仅开始于 1861 年^[1]。因此, 要向前延伸北半球或全球平均气温序列, 只能依靠代用资料。Mann 等^[2]首先成功地建立了近 600 a 北半球的气温序列, 后来又推广到 1000 a^[3], 这一结果用代号 M 表示。Mann 等的做法是强调关键地区的气温与全球气温变化的主分量(PC)有密切关系。因此, 利用能反映气温变化主分量的少数代用资料, 可重建全球的气温场。但是 Jones 等^[4]认为对建立全球平均温度场而言, 没有什么重要和不重要地区之分, 所以他是直接把 17 个代用资料平均得到全球平均, 其代号为 J。然而 Crowley 等^[5]认为这两个序列所采用的代用资料站数前后不均匀, 即早期少后期多。所以采用 15 个均达到 1000 a 的站, 得到北半球的平均气温, 其代号为 C。后来 Briffa^[6]利用北半球高纬度的树木年轮建立了平均气温序列, 其代号为 B。这样就有了 4 个平均气温序列^[7,8]。表 1 中数字表示每个序列所用代用资料站数, 括弧中数字为达到 1000 a 或至少有 900 a 的代用资料站数。实际上, Crowley 等^[5]所指出的序列不均匀性是十分严重的。最典型的是 Mann 的序列,

2002-03-15 收稿, 2002-05-08 收修修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G1998040900)和国家自然科学基金(批准号:49635190)资助项目

E-mail: swwang@pku.edu.cn

在重建前 600 a 的序列时，采用了 31 个年轮、6 个冰芯、7 个珊瑚、8 个史料还有年轮的 PC 系数，每个系数又由若干年轮序列构成，共计约 70 余项，资料可谓丰富。但是其中大约只有 1/3 向前延伸到公元 1400 年。像珊瑚资料仅开始于 1750 年。所以即使这 600 a 内序列也是不均匀的。后来扩展到 1000 a 则仅用了 12 个代用资料，其中只有北美年轮的 3 个 PC 系数又由若干年轮序列组成。J 所用的 17 个代用资料序列中只有 7 个，B 的 7 个序列中只有 3 个达到 1000 a。这自然对序列的代表性有很大影响，也就是说 M, J, B 三个序列的前半段不确定性是非常大的，而且前后用的资料站数不同。

表 1 重建千年平均温度序列所用的代用资料站数^{a)}

代号	北半球	南半球	全球	文献
M	8(8)	4(4)	12(12)	[3]
J	10(4)	7(3)	17(7)	[4]
C	15(15)		15(15)	[5]
B	7(3)	7(3)		[6]
W	20(20)	10(10)	30(30)	[9]

a) 括弧中数字为达到 900 a 以上长度的资料站数

C 序列是比较完整的，但是所用的 15 个代用资料之中只有 7 个分辨率达到年，5 个分辨率为 10 a，3 个分辨率为 50 a。所以尽管 C 序列早期与后期所应用的资料站数是一样的，但是要由 C 序列得到近千年的年平均气温也是不可能的。分辨率为 10 a 或 50 a，实际上已经排除了年时间尺度的信息，或者说年时间尺度的变化已大为削弱。所以 Jones 在文献 7, 8 中只分析 50 a 以上的滤波结果是十分恰当的。从表 1 可以看出 C 及 B 仅限于北半球中高纬，J, M 在南半球的序列也不多，所以应该认为这 4 个序列主要反映了北半球，特别是北半球中、高纬的气温变化特征。表 2 列出各序列所用的代用资料来源。同样括弧中数字表示达到 900 a 以上的序列。显然在这里树木年轮资料占了很大的比重。因此，尽管一些作者认为自己的序列代表年平均气温^[3]，但是 Jones 在文献 8 中，还是把这些序列与 4 月~9 月的夏半年气温比较，这是有道理的。

表 2 千年平均温度序列资料来源^{a)}

代号	年轮	冰芯	史料	孢粉	珊瑚	洞穴	冰川	海冰	文献
M	9(9)	3(3)							[3]
J	8(6)	4(1)	2(0)		3(0)				[4]
C	8(8)	3(3)	2(2)	1(1)				1(1)	[5]
B	7(3)								[6]
W	8(8)	8(8)	7(7)	2(2)		3(3)	2(2)		[9]

a) 括弧中数字为达到 900 a 以上长度的资料站数

2 全球平均气温的低频变化

由于各种代用资料的时间分辨率不同。所以在同时应用这些代用资料时，实际上只能研究最低的分辨率所反映的气温变化，即低频变化。王绍武等在 20 世纪 90 年代先后根据代用资料研究了近千年的气温变化^[9,10]。图 1 给出 30 个代用资料站的位置，原序列情况参看文献 9, 10]。为了保证序列的均匀性，统一采用 25 a 的分辨率。起始年为公元 1000 年，依次为 1025 年、1050 年、...1975 年。这样把 30 个代用资料序列都统一到同一个时间尺度。其中分辨率高的序列则作 50 a 滑动平均。这样每个序列均有 40 个同一时刻的值。但是有的代用资料没有转换为气温，有的缺少 1975 年，所以用近百年气温观测资料作了插补。没有换算成气温的按相应地理位置近百年气温的变化进行标定(calibration)^[11]。这样就得到 30 个近千年平均气温序列，其代号为 W，一律对近千年平均求距平。图 2 给出 30 个站的气温变化曲线。

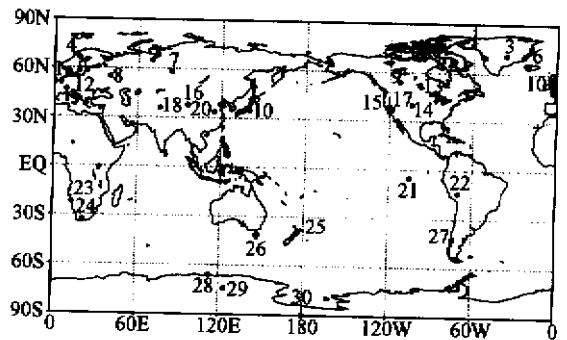


图 1 W 序列所用 30 个代用资料站的地理位置

为了研究近千年气温变化的原因，也同时为了检验代用资料所建立的千年气温变化序列，先用能量平衡模式模拟了近百年的全球平均气温变化^[12]。这里采用的是海气耦合模式，其中大气为零维模式，海洋模式中考虑了海水的上翻和扩散。辐射强迫因子包括太阳活动造成的太阳辐照度变化、火山活动引起的大气透明度的变化、温室气体增加导致的温室效应加剧。这是一般在气候模拟中均考虑的因子。此外，增加了 ENSO 的影响。用这 4 个因子模拟的近百年全球年平均气温与观测值的相关系数达到 0.88。模式中的辐射强迫的处理在文献 12 中有详细介绍。由于利用这个模式能较好地模拟近百年的气温变化。所以，根据同一模式作了公元 1000 年到 1999 年的千年模拟，与百年积分不同的是应用了五千年这 4 个强迫因子的序列(表 3)。模拟结果用 S 表示。

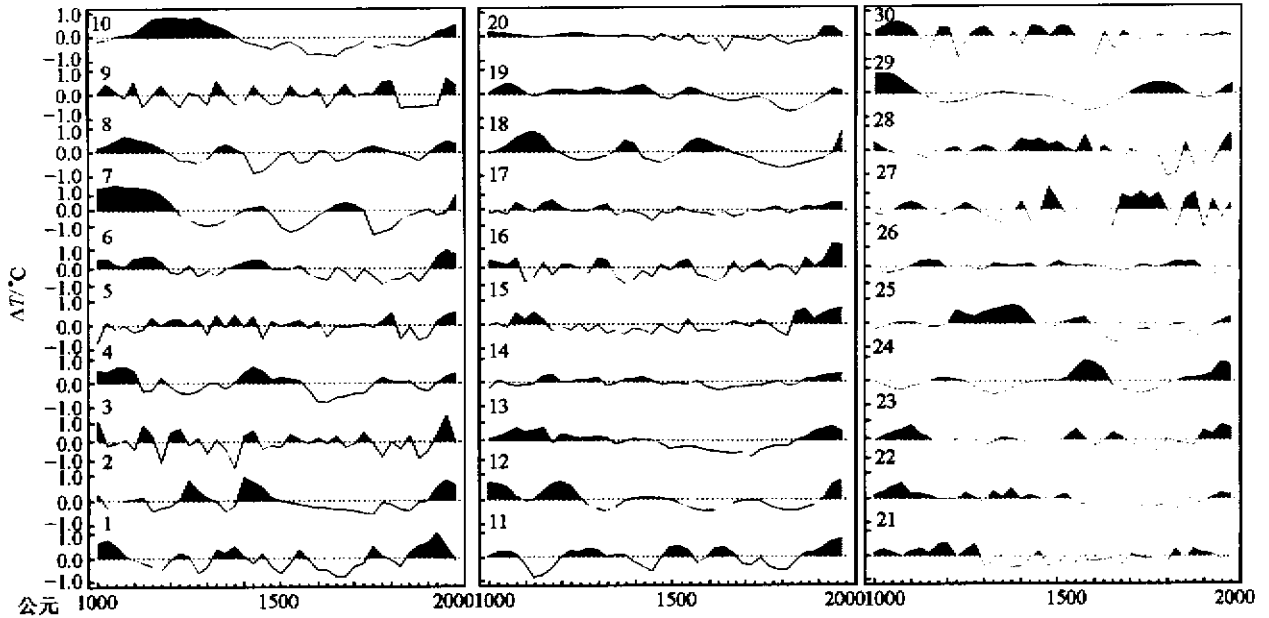


图 2 W 序列所用 30 个站的近千年气温变化(°C)

站点位置见图 1

表 3 千年气候模拟所用辐射强迫因子

因子	资料性质	文献
太阳活动	树木年轮 ¹⁴ C	[13]
火山活动(北半球)	冰芯酸度	[14]
火山活动(南半球)	冰芯中质点	[15]
CO ₂	冰芯气泡	[16]
ENSO	史料、冰芯	[17]

3 讨论

我们把曲线 W 与其他作者的曲线及模拟结果作一个比较研究。为此，对 M, J, C, B 四条曲线的 50 a 低频滤波曲线也按 W 曲线的时间分辨率，读出 1000, 1050 ...1975 年的值。同样模拟结果也取出相同时刻的值(图 3)。表 4 列出 6 条曲线之间的相关系数。从图 3 可见，各个不同作者所给出来的曲线的低频变化是相当一致的。这里分辨率为 25 a，即 1000 a 中有 40 个点。这时如果相关系数达到 0.40 就有 99% 的信度，达到 0.50 就有 99.9% 的信度。

表 4 各千年曲线与模拟结果相关系数及标准差

序列	M	J	C	B	W	S
M	×	0.77	0.79	0.60	0.73	0.65
J		×	0.81	0.69	0.74	0.56
C			×	0.66	0.85	0.76
B				×	0.84	0.59
W					×	0.83
S						×
$\sigma/^\circ\text{C}$	0.10	0.11	0.16	0.17	0.18	0.13

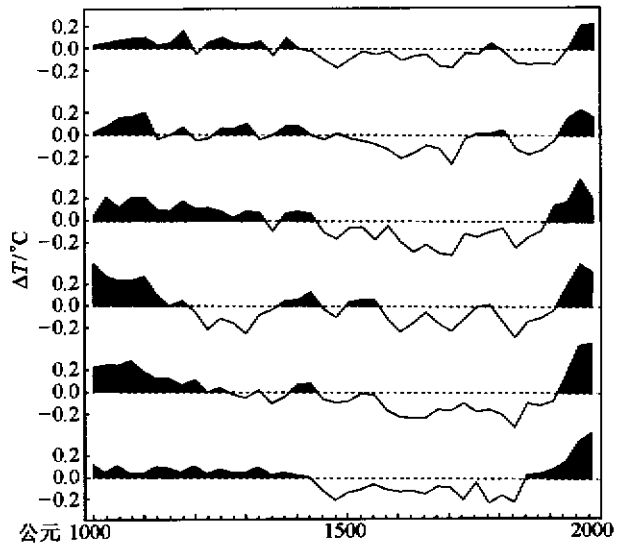


图 3 近千年气温序列及模拟结果

Mann et al.^[3], Jones et al.^[4], Crowley et al.^[5],
Briffa^[6], 王等^[9], 模拟^[11]

由此我们可以得出什么结论呢?(1) 5 条重建的气温序列中，每个序列与另外 4 个序列的相关系数的平均值均在 0.70 以上。但以 W 与其余 4 个序列的相关最高，达到 0.79，这说明虽然不同作者应用的原始资料有所不同，得到的低频变化的信息则比较接近，W 由于应用资料较多，代表性较好，

(2) 5 个序列与模拟序列的相关系数变化于 0.56~0.83 之间, 都达到了 99.9% 的信度. 因此, 无论从那一条曲线来看模拟均是成功的. 由于进行模拟与建立序列是完全独立进行的. 反过来也可以认为每个序列都在一定程度上反映了气候变化的基本特征. 但是 W 与模拟结果的相关最高, 达到 0.83. 这表明 W 包含的气候变化信息最多. (3) 表 4 中给出了每个序列的标准差. 标准差愈大即气候变化振幅最大. 模式模拟, 在某种程度上也像用统计方法拟合曲线一样, 即模拟的振幅总是低于实际气候变化的振幅, 能量平衡模式尤其是这样, 所以 S 的标准差较低是可以理解的. 各曲线标准差也不同, C, B, W 三个序列标准差较高, 在 0.16~0.18°C 之间. 而 M 及 J 两个序列只有 0.10~0.11°C, 甚至还低于模式模拟的结果. 这可能与建立序列采用的方法有关; 例如在采用树木年轮资料时, 为了除去长期的影响也除去了一部分低频变化, 或者采用回归的方法拟合气温也使振幅有所削弱. 不过无论如何, W 序列的振幅最大, 说明在资料处理过程中, 在更大程度上保留了低频变化的信息. 而且与模拟的结果最接近.

从以上的分析中能够对近千年的温度变化得到以下几点结论: (1) 小冰期是比较明显的, 无论哪一个序列还是模拟结果, 在 15 世纪后半叶, 17 世纪及 19 世纪有 3 个冷期, (2) 中世纪暖期则不如小冰期一致. 但各序列在 11 世纪到 12 世纪气温均明显高于千年平均, (3) 以 1900, 1925, 1950 及 1975 年的平均代表 20 世纪. C, B, W 三个序列 11 世纪的值还高于 20 世纪的值或与之接近. 不过 1861~2000 年的气温观测资料^[1]表明在低频变化曲线上, 2000 年的值可能比 1975 年高 0.45°C. 这样如果用 1925, 1950, 1975 及 2000 年计算百年平均, 则对千年平均的距平可能达到 0.50°C 左右, 那时百年平均则显著高于 11 世纪到 12 世纪中任何百年的平均, 而用 1900, 1925, 1950 及 1975 年平均则只有 0.25°C. 所以, 可以认为如果考虑了 20 世纪最后的变暖, 则 20 世纪百年平均气温明显高于近千年中任何连续的一百年.

最后我们再讨论一下, 重建 W 序列可能包含的误差. 显然误差来自两个方面; 由于站点不够密造成的误差, 以及由于代用资料不能充分代表气温所造成的误差. 对于后者, Jones 等^[4]已经进行了许多讨论, 这里想着重对前一种不确定性作一个分

析. 正好近来作者用 CCM3.6 模式完成了 130 a 的模拟. 这里只说明, 这是用观测的海面温度(SST)强迫大气环流模式得到的 1872~1999 年的结果. 这个序列虽然是模拟的, 但计算的全球平均气温与观测序列有很好的相关(0.93), 而这个序列有 100% 的覆盖面, 观测序列即使在近期也只有 80%~90% 的覆盖率, 早期则只有 30%~40% 的覆盖率, 所以模拟的序列更适于作这样的检验. 我们从中选取 1900~1999 年 100 a 来研究这个问题. 设计很简单. 按图 1 中经纬度位置在模拟的全球地表气温场中取相应的 30 个点. 把这些点的气温作算术平均求得 1900~1999 年逐年气温距平(称为 T). 然后, 对全球所有网格点, 按面积加权平均求出 1900~1999 年的全球平均气温(称为 T_0). 计算 T 与 T_0 的相关系数达到 0.89, 这表明从百年的模拟来看用 30 个站来建立代表平均序列是可能的. T 与 T_0 之差的方差 σ 为 0.14°C. 这样如果以 2σ 为可能误差范围, 超过 $\pm 0.28^\circ\text{C}$ 概率大体上为 5%. 因此, 可以认为 1925, 1950, 1975 及 2000 年构成的百年平均, 显著高于过去一千年中的任何一个百年. 当然, 需要再次指出, 这是仅只考虑了资料覆盖面影响的结果.

参 考 文 献

- 1 Folland C K, et al. Observed Climate Variability and Change. In: Houghton J T, et al. eds. Climate Change 2001: The Scientific Basis: Third Assessment Report of the IPCC, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2001. 99~181
- 2 Mann M E, et al. Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature*, 1998, 392: 779
- 3 Mann M E, et al. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties and limitations. *Geophys Res Letts*, 1999, 26: 759
- 4 Jones P D, et al. High-resolution paleoclimatic records for the last millennium: Integration, interpretation and comparison with general circulation model control run temperatures. *The Holocene*, 1998, 8: 455
- 5 Crowley T J, et al. How warm was the medieval warm period? A comment on man-made versus natural climate change. *Ambio*, 2000, 39: 51
- 6 Briffa K R. Annual climate variability in the Holocene: Interpreting the message of ancient trees. *Quarter Sci Rev*, 2000, 19: 87
- 7 Jones P D, et al. The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 2001, 292: 662
- 8 Jones P D, et al. Unlocking the doors to past: Recent developments in climate and climate-impact research. In: Jones P D et al., eds. *Memories of the Future?* New York, Boston, Dordrecht, London,

- Moscow : Kluwer Academic/ Plenum Publishers , 2001. 1~8
- 9 王绍武, 等. 近千年全球气温变化. 见: 85-913 项目 02 课题论文编委会编. 气候变化规律及其数值模拟研究论文(第三集), 北京: 气象出版社, 1996. 137~147
 - 10 Wang Shaowu. Climatic variations during the last millennium, In : Ye Du zheng, et al. eds. Climate, Environment and Geophysical Fluid Dynamics. Beijing : China Meteorological Press, 1993. 56~63
 - 11 王绍武, 等. 气候变化与变率的诊断研究. 见: 85-913 项目 02 课题论文编委会. 气候变化规律及其数值模拟研究论文. 第三集. 北京: 气象出版社, 1996. 17~22
 - 12 毕 鸣, 等. 近百年气候变化模拟以及未来 50 年气候变化预测. 见: 85-913 项目 02 课题论文编委会编. 气候变化规律及其数值模拟研究论文. 第三集. 北京: 气象出版社, 1996. 124~136
 - 13 Stuiver M, et al. High-precision calibration of the radiocarbon time scale A. D. 1950~500B. C. eds. Radiocarbon, 1986, 28(2B): 805
 - 14 Porter S C. Pattern and forcing of Northern Hemisphere glacier variations during the last millennium. Quatern Res, 1986, 26:27
 - 15 Mosley-Thompson E, et al. Centuries of microparticle, deposition at the south pole. Quatern Res, 1982, 17:1
 - 16 Houghton J T, et al. Climate Change 1994, Radiation forcing of climate change and an evaluation of the IPCC. IS 92 emission scenarios. Cambridge : Cambridge University Press, 1995. 44
 - 17 Diaz H F, et al. An analysis of the time scales of variability in centuries-long ENSO-sensitive records in the last 1000 years. Climatic Change, 1994, 26: 317

我国学者在天然丝与超高强度纤维方面取得重要进展

在国家自然科学基金等资助下, 复旦大学邵正中教授和他的同事长期致力于天然蚕丝和蜘蛛丝聚集态结构研究, 他们对丝素蛋白成纤机理、自组装规律和过程进行了深入研究, 提出了在丝蛋白成纤过程中存在成核控制和构象转变的速度依赖性, 发现在多方面蚕丝和蜘蛛丝成丝具有相似性。

2002 年 8 月 15 日出版的《Nature》发表了邵正中教授和英国牛津大学 Vollrath 教授题为“ Surprising strength of silkworm silk ”的论文。

早在古代人们就已开始应用蚕丝。至 20 世纪高分子科学建立以后, 人们才知道蚕丝是非生理活性的结构蛋白质类高分子, 其性能与聚集态结构有密切关系。随着高分子科学的发展, 人们发现力学性能最好的纤维是蜘蛛丝, 而蜘蛛丝也是非生理活性的结构蛋白质类高分子。国际上对蜘蛛丝这类超级纤维的研究非常重视, 人们通常认为蚕丝的力学性能不如蜘蛛丝的原因是蚕丝和蜘蛛丝蛋白的一级结构(又称: 化学结构即组成高分子的单体氨基酸种类及其序列分布) 差别很大。

但邵正中教授及他的合作者发现: 在适当的制备条件下, 仍能得到力学性能可与蜘蛛丝媲美的天然蚕丝, 据此提出了自己的观点: 对于丝及丝蛋白这类非生理活性的结构蛋白质, 其性能不仅仅取决于蛋白质的一级结构, 而其分子链的聚集过程及成丝条件也许更为重要。通过基因工程产生一级结构与蜘蛛丝相同的类蜘蛛丝丝素蛋白, 并不一定能获得与天然蜘蛛丝性能相近的纤维。

这项成果对丝和丝蛋白进一步的研究有重要影响, 有可能影响今后国内外在丝(蛋白) 问题上的研究工作重点, 若能控制桑蚕吐丝条件, 同样能得到综合性能可与蜘蛛丝媲美的蚕丝。并且, 该成果对合成高分子纤维特别是含极性基团的缩聚物的改性有重要意义, 也就是说, 提高高分子的力学性能, 更应重视高级结构研究, 通过调控成丝过程形成理想的聚集态结构, 就有可能使一般纤维变成超级纤维。

(供稿: 董建华)