

我国过去千年地表温度序列的初步重建

初子莹¹ 任国玉¹ 邵雪梅² 刘洪滨³

- 1 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081
- 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
- 3 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘要 通过对器测温度资料与代用温度资料的研究, 对中国过去 1 000 年的地表温度序列进行了初步重建。重建主要以树轮年表资料为基础, 采用不同方法分别合成具有年分辨率的 400 年与 1 000 年西部温度序列, 以及具有 10 年分辨率的 400 年全国温度序列和具有 30 年分辨率的 1 000 年全国温度序列。全国温度重建结果表明, 中国在 1000~1310 年间表现出了与欧洲中世纪暖期相对应的温暖阶段, 但该暖期在中国西部地区反映得并不明显; 而 14 到 19 世纪的小冰期则在所有序列中均有显著表现; 19 世纪中期至上世纪 80 年代升温显著, 但并未超过中世纪暖期水平。作者也讨论了重建序列的不确定性, 以及重建序列与前人研究结果的异同。

关键词 气候变化 古气候 温度序列 中世纪暖期 小冰期

文章编号 1006-9585 (2005) 04-0826-11 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

A Preliminary Reconstruction of Mean Surface Air Temperature over the Last 1 000 Years in China

CHU Zi-Ying¹, REN Guo-Yu¹, SHAO Xue-Mei², and LIU Hong-Bin³

- 1 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081*
- 2 *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085*
- 3 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract Twenty seven tree-ring chronologies from 7 individual sites in western and Northeastern China, which have been proved good in quality and being capable of indicating seasonal temperature variation at regional scale, are collected and used to reconstruct regional annual mean temperature series. Combined with the winter-half-year temperature series in eastern China using historical documents, area-averaged annual mean temperature anomalies with time resolutions of 10–30 years over the last 1 000 years for entire China are also reconstructed. Variability and amplitudes of cold-warm changes in China over the last 1 000 years are evident. Annual mean temperature of China is generally warmer from A. D. 1 000 to A. D. 1310 with a relatively cool episode in the 13th century, and it is significantly colder from A. D. 1310 to 1910 with minimum anomalies occurring in the 15th, 17th and 19th centuries respectively. Modern warm period beginning from the end of the 19th century looks unusual in terms of the 1 000-year variation of annual mean temperature, but it is not significantly warmer than the earlier warm period or medieval warm period (MWP). Some differences between the series of western and eastern China have been detected, and there seems no significant warming during the MWP in the western temperature series. We also compare the present

收稿日期 2005-07-25 收到, 2005-11-25 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)与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: chuzy@cma.gov.cn

temperature series with those obtained by other researchers

Key words climate change, paleoclimate, temperature series, medieval warm period, little ice age

1 引言

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 ,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子则是人类活动,主要指由于温室气体排放导致的增强的温室效应^[1]。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]仍然是古气候学界争论的焦点之一,这一问题的解决,显然将取决于高精度的至少近千年来平均地表温度序列的建立。此外,更好地了解年代到世纪尺度气候的自然变率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。

然而除欧洲个别观测站外,一般气温观测序列均只有百年左右,我国的器测资料则更为匮乏。因此研究年代到世纪尺度的气候变化需要采用代用温度资料来进行,这些代用资料包括树木年轮、冰芯、史料等。竺可桢^[3]根据史料记载的物候变化认为,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。王绍武等^[4]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^[5]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^[6]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^[7]则通过利用史料重建的我国东部冬半年温度序列认为,公元930~1310为我国东部与欧洲中世纪暖期相对应的阶段;刘晓宏等^[8]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。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,东西部中世纪暖期也可能存在差异。

相比之下,国内对小冰期的研究结果则颇为统一。竺可桢^[3]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^[9]、葛全胜等^[7]及杨保^[10]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着清晰的小冰期阶段。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。

本文主要借助树木年轮资料,采用不同方法重建了我国西部及全国年到30年分辨率的地表温度序列。

2 资料与方法

本文的基础研究资料包括器测温度资料与代用温度资料两种,其中器测资料来源于中国气象局国家气象信息中心气候资料室提供的中国726个测站1951~2000年的逐年平均地表温度记录;代用资料则以过去几年中在权威杂志上发表的树轮年表资料为主,仅在树轮资料匮乏的东部地区辅以历史文献重建序列,而文中涉及到的数理统计方法则主要引自树轮气候学中的常用方法。

2.1 资料简介

目前,我国千年尺度的温度代用资料以东部的历史文献资料、北方和西部与温度相关的树轮年表以及青藏高原地区的冰芯序列为主,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。由于本文研究目的为重建高分辨率的千年温度序列,因此,着重考虑采用树轮与史料对我国过去的温度变化情况加以重建分析。青藏高原冰芯资料分辨率也可以达到年,但其定年精度与树轮比较还有一定差距,¹⁸O在高原地区对温度的指示作用也还没有得到广泛认可,故本文没有采用。

从代用资料空间分布情况看,目前我国自然代用资料数量仍较少,分布尚显稀疏,而本文所希望使用的树轮资料在序列长度上亦长短不一。其中,以祁连山树轮序列为最长,可达到约 1 000 年;其次为青南高原的树轮序列,可追溯到公元 1500 年左右;余下所有树轮年表,长度均不超过 400 年;本文所选年表长度下限为 150 年,短于 150 年的年表不予使用;然而,东部的历史文献资料则数量繁多,且分布密集,已有葛全胜等^[7]利用此类资料重建了我国东部地区过去 2 000 年的冬半年平均温度序列。

2.2 温度分区

中国幅员辽阔,区域气候特征复杂多样,各地区气候变化和变率的特征也存在显著差异。为较细致地讨论我国过去千年左右的气候变化,本文希望将全国按温度变率划分为几大区域。分区方法很多,本文主要采取旋转 EOF 方法^[11]。进一步计算前,考虑到测站海拔高度与地区间温度差异对区域温度序列合成的不利影响,本文所有温度资料均转换成以 1971~2000 年为气候参考期的温度距平资料。

旋转 EOF 方法要求资料矩阵必须整齐,但原始器测资料的空白区却随时间前移而迅速增加,且空间分布极不均匀,数学上的插补方法难以得到较为理想的结果。因此,在中国 726 个基本/基准站 1951~2000 年 50 年年温资料基础上,综合考虑站点空间分布的均匀性及资料的整齐性(青藏高原腹地始终无站点资料),从中选出 526 个空间分布相对均匀的站点,将其年温资料作为分区依据。

对此 526 个站点的 1959~2000 年 42 年年温资料做旋转 EOF,提取旋转主分量做聚类分析,将中国地区按温度变率特征划分为 6 大区域,分别为:天山以北的北疆地区;天山以南及昆仑山、祁连山至太行山以北的西北地区;东北华北构成的东部区;青藏高原区;江淮流域区和华南地区。分区结果及各区域代用资料分布情况如图 1 所示。

在分区的基础上,考虑到我国资料整齐的 526 个台站在 1959~2000 年间空间分布相对均匀,故直接对区域内各站点温度距平序列作简单的算术平均,选取 1971~2000 年为气候参考期,计算各区域平均温度距平序列,作为温度重建的校准序

列。

2.3 温度序列重建

本文所选代用资料以树轮年表为主,在希望利用树轮年表重建温度序列的区域,首先应从诸多年表中选取出可用年表序列。树轮气候学的研究表明,标准年表(STD)能更好地反映气候的低频变化,故本文所有提及年表均为标准年表。此外,由于不同地区的树轮年表对气候因子的指示意义不同,本文仅选取对该区域年平均地表温度有较好指示作用的部分年表。选取原则为:与该区域平均年温序列相关超过 90% 的信度检验,并与区域内一个以上台站器测年温资料相关超过 99% 的信度检验。

在此基础上,采用多元回归模型进行区域温度序列重建。即以器测区域平均年温序列为校订序列,对区域内可用年表的所有组合作多元回归,通过比较各项回归检验标准,选出“最优”回归方程,进而建立区域平均温度序列。检验过程中,由于作为校订序列的器测温度序列长度较短,故均采用逐一剔除法进行检验,其中,主要检验指标包括:复相关系数、 F 检验值、误差缩减值、符号检验、乘积平均值及相关系数等^[12~14]。

依上述方法,本文对我国具有可用代用资料的西北地区、青藏高原区、东北华北东部区及江淮流域,进行了初步的区域平均温度序列重建,并进一步合成了西部地表温度序列与全国地表温度序列。表 1 列出了本文最终引用的所有树轮年表^[8,15~19],表 2 则给出了重建各区域温度所采用的预报因子及回归检验结果。

在江淮流域,考虑到该区域 42 年的年温序列与葛全胜等^[7]所选 20 个气象台站平均的 42 年冬温序列相关系数达 0.56 (通过 99.9% 信度检验),可认为他们的校订冬温序列与重建冬温序列对江淮流域年平均温度具有较好的代表性,故直接引用其重建序列中具有 10 年分辨率的公元 1500~2000 年部分以及具有 30 年分辨率的公元 1000~2000 年部分,参与全国平均温度序列的重建。葛全胜等^[7]序列的气候参考期为公元 1951~1980 年。

在区域温度重建基础上,分别采用重建区域温度序列所使用的多元回归法与面积加权平均法来重建西部地区地表温度序列。本文所指西部地

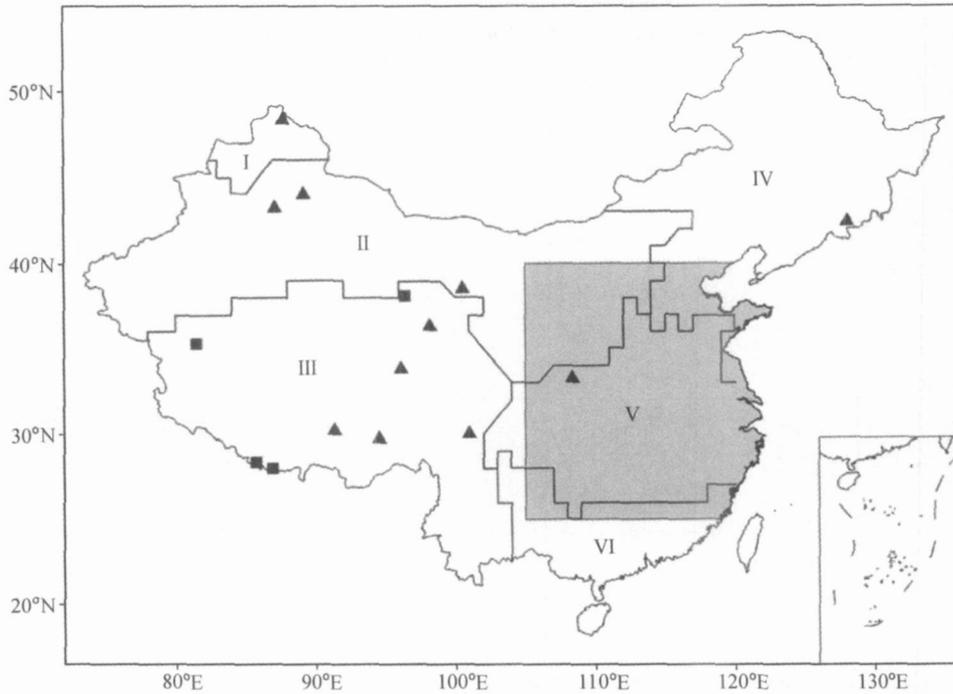


图 1 中国温度分区结果及各区域温度代用资料分布情况。▲ 为树轮采样点；■ 为冰芯采样点；阴影区为历史文献记录区；I- 北疆地区；II - 西北地区；III- 青藏高原区；IV - 东北华北东部区；V - 江淮流域；VI- 华南地区

Fig. 1 Regions divided by temperature variability and the distribution of temperature proxies of China. ▲ and ■ indicate the sampling point of tree-ring and ice core respectively, and the shadowed domain is abundant of history documents. I- Northern Xinjiang; II- Northwestern China; III- Tibetan Plateau; IV - Northeastern China; V - Yangtze and Huaihe River Basin; VI- Southern China

表 1 温度重建选用树轮年表

Table 1 Brief introduction of tree-ring chronologies used to reconstruct surface temperature of China

年表代码 Code of chronology	采样点 Sampling point	纬度 Latitude	经度 Longitude	高度 Altitude/ m	年表长度 Length of chronology
TAE	秦岭(西北地区) Qinling Mountain (Northwestern China)	33°55' N	107°41' E	2500	1872 ~ 1989
FPB	秦岭(西北地区) Qinling Mountain (Northwestern China)	33°43' N	107°48' E	2838	1789 ~ 1992
ZA1	秦岭(西北地区) Qinling Mountain (Northwestern China)	33°25' N	108°45' E	2500	1666 ~ 1992
FPA	秦岭(西北地区) Qinling Mountain (Northwestern China)	33°43' N	107°48' E	2838	1605 ~ 1992
HXB	乌鲁木齐河(西北地区) Ürümqi River basin (Northwestern China)	43°11' N	87°11' E	2430	1542 ~ 1993
QLS	祁连山(西北地区) Qilian Mountain (Northwestern China)	38°26' N	99°56' E	3475	1000 ~ 2000
DF	川西(青藏高原) Western Sichuan (Tibetan Plateau)	30°55' N	101°10' E	3750	1617 ~ 1994
XL P	川西(青藏高原) Western Sichuan (Tibetan Plateau)	30°52' N	100°42' E	3700	1603 ~ 1994
LB	川西(青藏高原) Western Sichuan (Tibetan Plateau)	29°35' N	102°02' E	3900	1514 ~ 1994
QM	曲麻莱(青藏高原) Qumarleb (Tibetan Plateau)	33°48' N	96°08' E	4062	1480 ~ 2002
ANPK	长白山区(东北地区) Changbai Mountain (Northeastern China)	42°36' N	128°12' E	650	1833 ~ 1994
CBL1	长白山区(东北地区) Changbai Mountain (Northeastern China)	42°07' N	128°05' E	1270	1789 ~ 1994
CBPI	长白山(东北地区) Changbai Mountain (Northeastern China)	42°05' N	128°04' E	1700	1653 ~ 1994
CBL2	长白山(东北地区) Changbai Mountain (Northeastern China)	42°03' N	128°04' E	1750	1602 ~ 1994

表 2 各区域温度重建结果检验

Table 2 Verification of reconstructed temperature series at each area

区域 Area	预报因子 Predictor	R	F	R_E	S_1	S_2	T	r
西北地区 Northwestern China	HXB, TAE, QLS	0.353 **	4.729 **	0.135	21 **	12	5.153	0.434 **
	FPB, QLS	0.307 *	5.981 **	0.116	19 *	9	4.811	0.384 **
	ZA1, QLS	0.274	5.097 *	0.132	20 **	13	5.073	0.391 **
	FPA, QLS	0.278	5.203 *	0.117	18	14	4.521	0.380 **
	HXB, QLS	0.246	4.404 *	0.089	21 **	12	4.736	0.356 **
	QLS	0.246	9.117 **	0.135	21 **	14	4.771	0.388 **
青藏高原 Tibetan Plateau	DF, QM	0.209	4.232 *	0.049	18	19	7.475	0.289 *
	XLP	0.143	5.519 *	0.049	16	21 *	5.081	0.252
东北地区 Northeastern China	ANPK, CBL1	0.216	4.405 *	0.081	25 **	19	5.455	0.323 *
	CBL1	0.148	5.716 *	0.048	22 *	20	5.730	0.254
	CBL2	0.132	5.006 *	0.024	23 **	19	4.380	0.213

注： R 为复相关系数， F 为 F 检验值， R_E 为误差缩减值， S_1 为一阶符号， S_2 为二阶符号， T 为乘积平均数， r 为相关系数。 R 与 r 列数字右上角加 * 表示通过 90% 信度检验，** 表示通过 95% 信度检验； F 、 S_1 、 S_2 列数字右上角加 * 表示通过 95% 信度检验，** 表示通过 99% 信度检验。

Note: R : multiple correlation coefficient; F : variance analysis; R_E : reduction error; S_1 : first order sign test; S_2 : second order sign test; T : product mean; r : correlation coefficient. In column R and r , “*” means passing the Student’s test at 90% confidence level, and “**” means passing the Student’s test at 95% confidence level. While, as to other column, “*” means passing the Student’s test at 95% confidence level, and “**” means passing the Student’s test at 99% confidence level.

区为西北地区与青藏高原区的总和，北疆地区温度变化较为特殊，且无可用年表，故未包括在内。多元回归法合成的序列长度为公元 1000 ~ 1989，共 990 年；而面积加权法合成的序列长度为公元 1603 ~ 1994，共 392 年，其中西北地区与青藏高原区面积权重系数分别为 0.58 和 0.42，合成结果见图 2。

按照与西部地区平均温度序列重建相似的办法，合成了全国平均年温度序列。首先考虑将西北地区、青藏高原区、东北华北东部区及江淮流域重建结果合成一条全国温度序列，而对于无可用代用资料的北疆与华南地区，只能暂时留下空缺。计算南疆内蒙、青藏高原、东北华北东部区及江淮流域的面积权重系数分别为 0.33、0.24、0.20 及 0.22。合成结果见图 3a。为求得树轮重建序列与史料重建序列间的一致，所有区域温度序列分辨率均被降到 10 年，气候参考期也统一到 1951 ~ 1980 年。

考虑到目前已有西部地区 990 年温度序列一条（图 2b），而江淮流域具有 30 年分辨率的温度序列亦可延长至 1000 年左右，因此可在此基础上，重建序列长度为 990 年、时间分辨率为 30 年的全国平均温度序列。此处取西部地区面积权重为 0.72，江淮流域面积权重为 0.28，气候参考期为 1951 ~ 1980 年。合成结果见图 3b。

3 结果分析与比较

3.1 结果分析

重建的全国 1000 年温度序列展示了一些重要的特点。该序列较客观地建立在当前认识的基础上，对我国过去千年左右的地表温度变化有一定的代表性。从变化趋势上看，过去 1000 年里我国的温度变化总体上呈波动下降的趋势，但 20 世纪温度升高明显。根据世纪尺度波动特点，可以将近千年温度变化史划分为两个大的阶段，即公元 1000 ~ 1300 年的相对温暖期与 1300 ~ 1900 年的相对寒冷期。

公元 1000 ~ 1300 年的相对温暖阶段对应欧洲中世纪暖期。欧洲中世纪暖期主要发生在 9 世纪到 13 世纪。本文重建序列始自公元 1000 年，在 11 ~ 13 世纪亦表现出了的相对温暖的温度变化特征。

11 世纪早期，中国的温度要较 20 世纪中期低 0.15 左右，但在整个千年温度序列中，仍属于相对温暖的时期；此后，温度逐步上升，到 11 世纪晚期，温度约上升 0.25，超过 20 世纪中期 0.1 左右，该极暖值在整条序列中位列第二，仅次于 13 世纪晚期水平；至 12 世纪中期，温度又迅速下跌，降幅约为 0.4，为整个 11 ~ 13 世

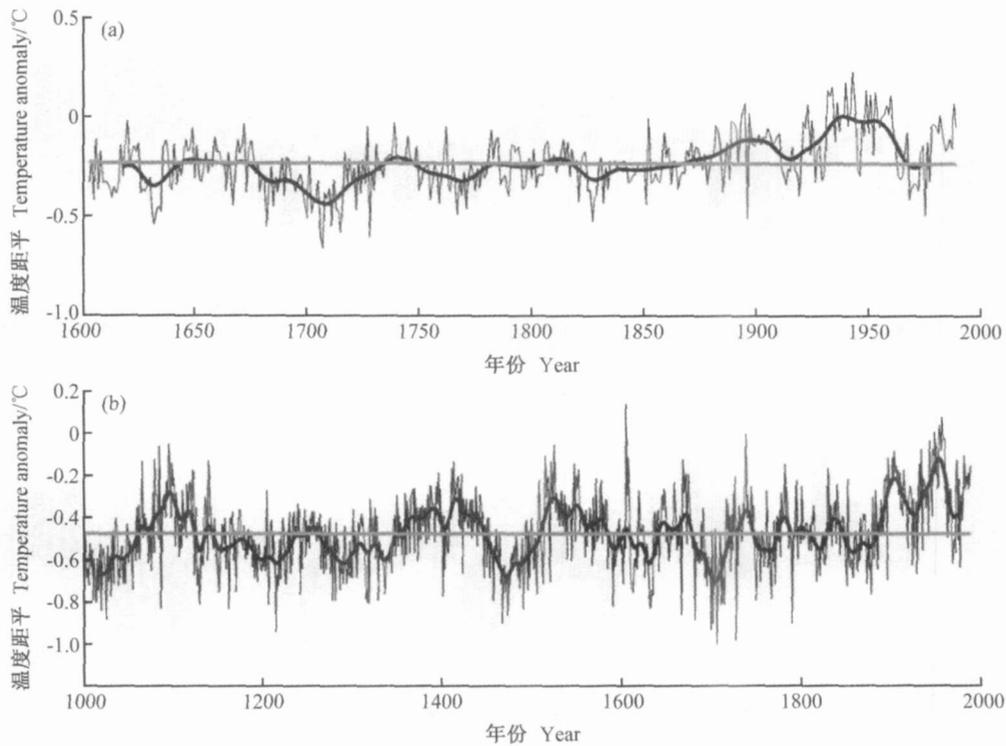


图2 西部地区温度重建序列 (a) 多元回归法重建序列; (b) 面积加权法重建序列 (细实线为重建曲线, 粗实线为 30 年高斯滤波结果, 灰色实线表示重建序列均值)

Fig. 2 Surface temperature reconstruction in western China. Curve (a) is obtained by the method of multiple linear regressions, and curve (b) using the way of area-weighted average. The black thin line is the reconstructed curve and the black bold line is the result of Gauss filter. Mean value of the series is indicated by the gray bold line

纪相对温暖期内最低值; 之后, 气温稳步回升, 温度距平值在 13 世纪中期恢复到 0.1 以上, 达到整条千年序列的最暖阶段; 以后, 在 13 世纪晚期, 以与 20 世纪中叶相当的温度水平结束了此次相对温暖阶段。

公元 1300~1800 年的相对寒冷阶段对应广义的小冰期。14 到 19 世纪小冰期的存在早已得到了古气候学界的广泛认可, 本文重建序列对此亦有较好体现。

14 世纪温度先降后升, 1350 年左右为极冷期, 温度距平值约为 -0.35 , 到 1400 年左右, 温度距平回升至 -0.05 左右; 之后的 15 世纪迎来了通常意义上的小冰期的第一个寒冷阶段, 这个世纪的下半叶尤其寒冷, 最冷时温度距平值达 -0.38 ; 之后, 在 15 世纪末 16 世纪初, 这一寒冷阶段迅速结束。

16 世纪为小冰期内相对温暖的一个世纪, 特别是 16 世纪上半叶, 仅较 20 世纪中叶平均气温

低 0.5 左右, 这样的温暖状态一直持续了半个多世纪; 16 世纪末, 温度再度下降, 降幅约为 0.2; 温度距平值在 -0.2 左右停滞了约一百年后, 在 17 世纪 40 年代出现了短暂的回升; 此后温度又开始迅速下滑, 距平值在 1650~1670 年间已接近 -0.4 ; 到 17 世纪 90 年代, 温度有大幅回升, 温度距平值接近 -0.1 , 此后地表气温缓慢下降, 在 18 世纪 30 年代达到 -0.16 后, 平均气温距平回升至 0 左右, 这一寒冷阶段也因此而告一段落。

需要指出的是, 1600 年后本文重建序列分辨率达到 10 年, 但由于图 4a 和 4b 序列中所涵盖的西部序列重建方法不尽相同, 故图 4a 序列的温度距平在数值上与图 4b 序列稍有差异。

1730~1790 是非常温暖的 60 年, 地表气温距平没有达到 -0.2 以下, 但随之而来的是新一轮的降温; 18 世纪后期气候加速转冷, 温度距平在 19 世纪初再次超过 -0.35 , 并相对稳定地持

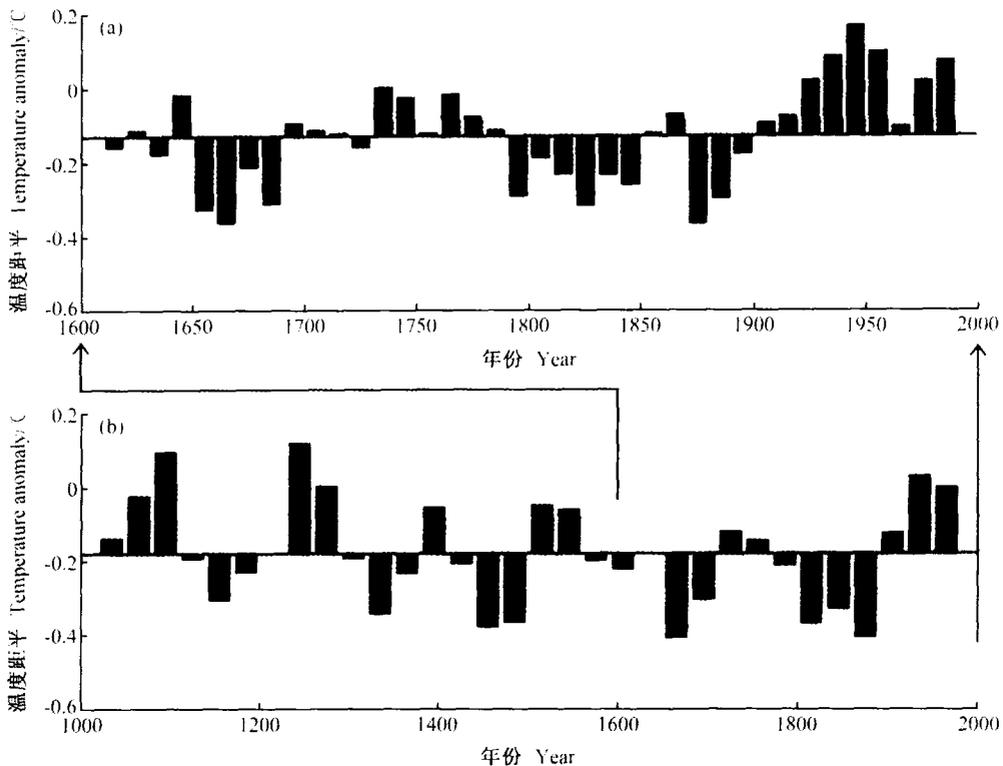


图3 中国地表温度重建序列。(a) 10年分辨率序列；(b) 30年分辨率序列(灰色实线表示重建序列均值)

Fig. 3 Surface temperature reconstruction in western China. The resolution of curve (a) is 10 years, and that of curve (b) is 30 years. Mean value of the series is indicated by the gray bold line

续了100年左右,这个寒冷的百年仅在1850~1870年间出现了短暂的小幅增暖,温度距平至多回升至-0.15,寒冷的极值点出现在19世纪70年代,约为-0.4;此后,我国的温度变化呈现出了非常显著的线性上升趋势,小冰期就此结束。19世纪的寒冷阶段在本序列中持续时间最长,但寒冷程度基本与17世纪的寒冷阶段相当。

公元1900年至今气候增暖,进入现代暖期。到20世纪40年代,温度距平已达0.16,为公元1300年以来的最暖阶段;此后地表气温又出现回落,距平值在70年代跌至-0.1左右;接下来,是新一轮的显著增温过程。由于本文的重建序列截至公元1980年,因此序列中并未能体现出过去百年中最暖的20世纪90年代。由于器测资料序列方差要较重建序列方差大,根据两类资料建立的序列不宜直接拼接,因此对于20世纪90年代增暖在过去千年温度史中的地位,本文不再加以评述。

3.2 东西部温度曲线的对比

若分别以葛全胜等冬温序列与西部合成序列

为我国东、西部地表温度序列的代表曲线,则可对我国东、西部过去千年左右的气候变化特点加以比较。考虑到本文的主要研究尺度在百年左右,故将西部990年温度序列进行尺度升级,变成与东部一样的30年分辨率,以便于比较分析。

图4a与4b最显著的差异在于二序列方差不同,但这种振幅上的差异主要归结于所选代用资料性质的不同,因此本文不对两条序列在数值上加以比较。小冰期阶段,二序列位相上的主要差异在于西部序列19世纪的冷阶不甚明显,而在17世纪的极冷阶段,西部序列要较东部序列落后30年。至于我国西部地区是否存在中世纪暖期,由于本序列早期仅有祁连山树轮序列一条,这里不好妄加评论,只是姑且认为,我国西部地区有可能不存在与欧洲中世纪暖期相对应的温暖阶段。总体看来,东、西部序列基本上始终处于同位相状态,极冷与极暖年前后差异不超过30年。

3.3 与其他全国温度序列比较

图3中的重建序列所表现出的总体变化趋势与我国学者利用分辨率较高、温度指示意义明确

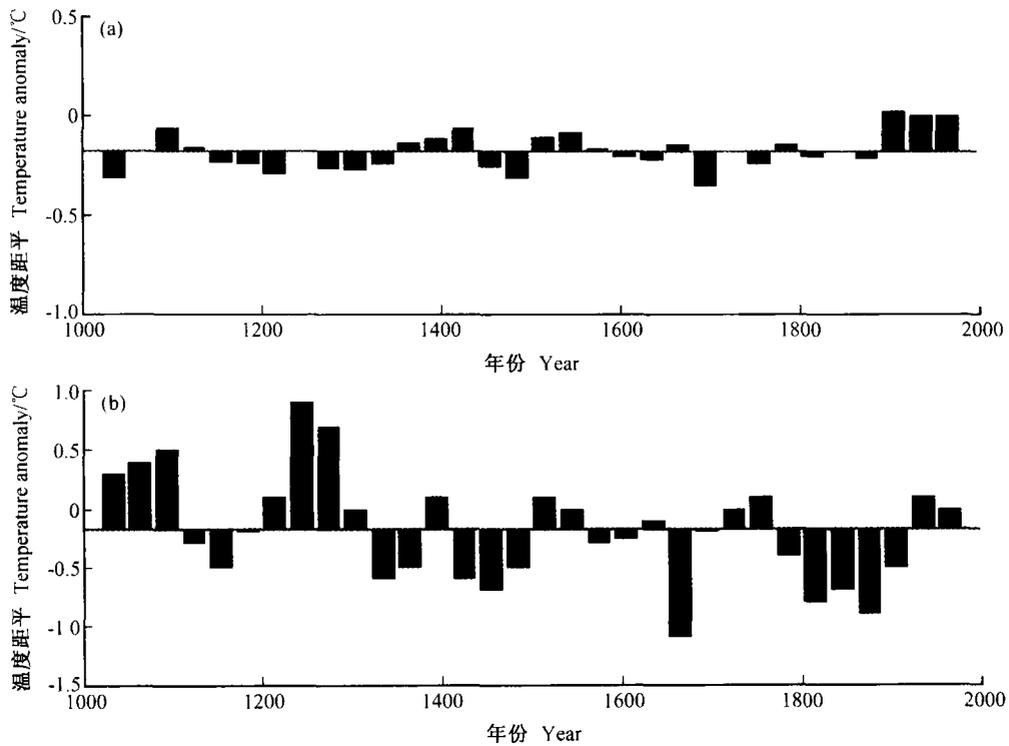


图 4 我国过去千年东西部地表温度变化比较。(a) 为西部温度序列；(b) 为东部温度序列

Fig. 4 Contrast of surface temperature between northern and western China. (a) Temperature series of western China; (b) temperature series of northern China. Mean value of the series are indicated by the gray bold line

的孢粉^[20]、石笋纹层^[21]与湖泊沉积^[22]等代用资料重建的千年左右序列也有较好的对应关系。图 5 给出了几条代表性温度序列的比较情况。

图 5 所引用的其他各条序列在早期的几个世纪一般都表现出了相对温暖的状态，其中杨保等与王绍武等温度序列均表明了 11 世纪晚期与 13 世纪中期的极暖阶段与 12 世纪左右的相对寒冷时期，与本文重建序列具有比较高的一致性。

对比图 5 中其他序列，15 世纪中后期，除内蒙古岱海的湖泊沉积序列稍有升温指示外，其他各序列均表现出了不同程度的温度下降趋势。但是，到 16 世纪上半叶，本文重建的序列要较其他序列表现得更为温暖，而其他序列的相对暖期都发生在 16 世纪后半叶。17 世纪的极冷阶段，本文重建序列与王绍武序列都发生在 17 世纪中期，而北京石花洞石笋序列、内蒙古岱海湖泊沉积序列、金川泥炭序列及杨保等温度序列的极冷期都发生在 17 世纪初期。此后，在 19 世纪的小冰期最后一个寒冷阶段，本文重建序列在持续时间与强度上都要较我国的其他序列更为显著，并与北半球

的形势相当。

4 结论、问题与展望

本文根据器测时期温度资料，划分了我国温度变率区域。采用每个区域的单点代用温度资料，重建了各个区域的年平均温度序列，并进一步合成了初步的我国西部地区 and 全国的平均温度序列。在西部地区，分别合成了具有年分辨率的 400 年与 1 000 年温度序列；全国平均温度序列分为具有 10 年分辨率的 400 年曲线和具有 30 年分辨率的 1 000 年曲线。本文的温度重建结果表明，我国在公元 1000~1310 年间表现出了与欧洲中世纪暖期相对应的温暖阶段，但该暖期在我国西部地区反映似乎并不明显。从 14 世纪到 19 世纪的小冰期在全国以及西部温度序列中均有显著表现。19 世纪中期至 20 世纪 80 年代升温显著，但近现代的升温并未超过中世纪暖期水平。

就重建温度序列看，我国过去 1 000 年可依照传统方法划分为中世纪暖期与小冰期。其中东部

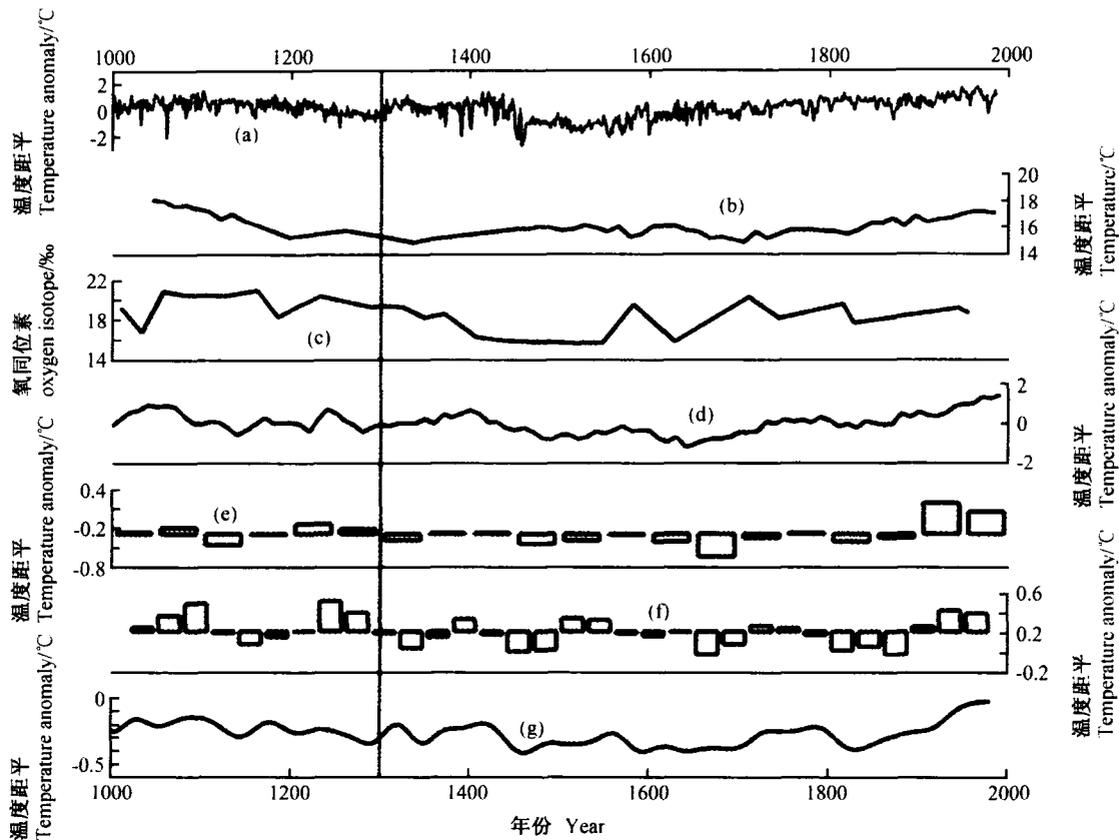


图5 中国过去 1 000 年地表温度变化序列及与其他冷暖序列的对比。(a) 北京石花洞石笋纹层重建序列^[16]；(b) 内蒙古岱海湖泊沉积重建序列^[17]；(c) 金川泥炭孢粉序列^[15]；(d) 杨保等中国温度变化序列^[10]；(e) 王绍武等中国温度变化序列^[4]；(f) 本文重建中国温度变化序列；(g) 北半球温度变化序列^[18]

Fig. 5 Comparison among the series of temperature change during the last 1 000 years (a) Temperature series reconstructed by stalagmite^[16]; (b) temperature series reconstructed by lake sediment^[17]; (c) temperature series reconstructed by peat^[15]; (d) Chinese temperature series reconstructed by Yang^[10]; (e) Chinese temperature series reconstructed by Wang et al. ^[4]; (f) temperature series reconstructed by this paper; (g) temperature series of the Northern Hemisphere^[23]

地区对中世纪暖期的体现要较西部地区明显，温暖阶段主要发生在 11 世纪与 13 世纪，12 世纪相对寒冷；而西部地区尽管在公元 1100 年左右亦相对温暖，但可能无法达到与现代相当的温暖程度。在相当于小冰期阶段，15、17、19 世纪的 3 次寒冷阶段在东西部及全国序列中均有一定表现，其中 17 世纪最为寒冷，19 世纪的冷阶最为漫长，但西部序列对 19 世纪冷阶的表现较弱。

本文重建结果与前人研究既具有相似之处，也存在明显差异。其中关于早期的相对温暖和小冰期的降温等特点与前人研究结果相近。与其他重建结果最为突出的差异在于本文重建序列在 16 世纪早期所表现出的异常温暖，但该异常在本文的冬、西部序列中都非常稳定地存在。因此，我

们仍认为 16 世纪上半叶要较下半叶更为温暖，其温暖程度几乎与 20 世纪中叶相当。

但是，本文所采用的代用资料有限，序列重建中仍有很多疑难问题有待将来解决。对于代用资料而言，尽管我国西部的树轮年表已有相当数量，但年表中可反映温度变化的并不占多数，序列长度可以达到千年的更是少之又少。我国西部、东北、华南等地区其他高分辨率的代用资料也甚为缺乏。这些区域单点重建序列的缺乏直接影响本文全国温度重建序列的质量。

今后应加大在西部地区的采样密度，获得更多的单点温度重建序列。同时，东北和华北东部区树轮资料亦具备相当的开发潜力，除长白山地区外，大小兴安岭也应当成为重要的采样区域。

华南地区树轮资料不具备重建古温度的条件, 应着重考虑对历史文献与长序列南海珊瑚资料的开发, 同时应针对西南地区宝贵的石笋等洞穴沉积开展古温度重建分析工作。青藏高原地区不仅代用资料稀少, 器测资料数量亦较缺乏, 高原东部的代用资料开发应从百年序列重建着手, 同时由于高原周边地区对高原温度的指示意义均较差, 单点温度重建最好深入到高原腹地。总之, 受高分辨率单点代用资料数量限制, 目前我国全国平均的千年左右温度序列重建只能是初步的。为了把重建序列的不确定性降到最低, 今后还需要进行大量工作。

致 谢 新疆气象局袁玉江研究员、青海省气象局秦宁生研究员提供了可贵的树轮资料, 丁一汇教授、王绍武教授、赵宗慈研究员、钱维宏教授和陈菊英研究员也为本文提出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] IPCC, WGI. *Climate Change: Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- [2] 任国玉. 与当前全球增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] 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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] 葛全胜, 郑景云, 满志敏, 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
- [8] 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 Dahe, 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
- [9] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. *第四纪研究*, 1998, (1): 54~64
Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi. Climate in China during the little ice age. *Quaternary Science* (in Chinese), 1998, (1): 54~64
- [10] Yang B. Climatic variations in China over the last 2000 years. *Chinese Geographical Science*, 2001, 11 (2): 97~103
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 128~134, 194~201
Wei Fengying. *Statistical Diagnosis and Prediction Technique Applied in modern Climatology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 128~134, 194~201
- [12] 吴祥定. 树木年轮与气候变化. 北京: 气象出版社, 1990. 218~234
Wu Xiangding. *Tree-Ring and Climate Change* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1990. 218~234
- [13] 李江风, 袁玉江, 由希尧, 等. 树木年轮水文学研究与应用. 北京: 科学出版社, 2000. 105~109
Li Jiangfeng, Yuan Yujiang, You Xiyao, et al. *Research and Application of Dendroclimatology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 105~109
- [14] 刘洪滨. 秦岭地区三百年来气候变化. 中国科学院地理科学与资源研究所博士学位论文, 1996
Liu Hongbin. Climate reconstruction of Qinling Mountain area over the past 300 years. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, 1996
- [15] 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
- [16] 袁玉江, 李江风. 天山乌鲁木齐河源 450 a 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 Urumqi River Source of Tianshan Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1999, **21** (1): 64~70
- [17] 邵雪梅, 范金梅. 树轮宽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
- [18] 秦宁生, 邵雪梅, 靳立亚等. 青南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
- [19] 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
- [20] 洪业汤, 姜洪波, 陶发祥, 等. 近 5 ka 温度的金川泥炭 ^{18}O 记录. *中国科学 (D 辑)*, 1997, **27** (6): 525~530
Hong Yetang, Jiang Hongbo, Tao Faxiang, et al. Peat records of temperature by ^{18}O in Jinchuan over the past 5 000 years. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 1997, **27** (6): 525~530
- [21] Tan M, Liu T, Hou J, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (12): 1617~1620
- [22] 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 Zhangdong, Shen Ji, et al. An 800-year temperature reconstruction in Daihai Lake area of Inner Mongolia. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **23** (3): 299~303
- [23] Mann M E, Jones P D. Global Surface Temperatures over the Past Two Millennia. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, **30** (15): 1820~1823