

基于历史文献重建的近 2000 年中国温度变化比较研究^{*1}

郑景云¹ 葛全胜¹ 方修琦^{1,2} 张学珍²

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京, 100101

2 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京, 100875

摘 要

文中对不同学者利用不同来源中国历史文献资料重建的温度变化代用序列进行了比对, 分析了同一地区不同序列之间及不同地区间序列的异同, 以及造成这些异同的主要原因。结果表明: (1) 不同学者重建的同一地区温度(或冷暖)变化序列具有较高的相似性; 不同学者所估计的 30 a 平均温度相对变幅完全一致(即在 99.9% 置信水平下, 二者通过无显著性差别的检验)的时段平均占有所有时段的 73.4%, 还有 8.6% 的时段虽在幅度大小上有差异但冷暖定性一致, 二者共计占 82%。(2) 不同地区间的温度变化序列也具有较高相关性, 且重建区域相距越近其相关系数也越高, 序列的相似程度也越大; 而不同学者所选择的重建方法与代用指标不同并不影响不同地区之间序列的相似程度, 说明不同地区序列的不一致是由于地区的气候变化差异造成的。(3) 虽然不同学者所估计的中国过去千年以上的温度变化趋势及波动幅度等存在一定差异, 但各家所揭示的中国东部过去 2000 年主要冷暖阶段的出现时间则基本一致。这些结果进一步说明: 以前学术界对各家序列差异的认识可能并没有或很少考虑地区间气候变化的差异, 因而夸大了不同学者因重建方法与原始证据不同而造成的重建结果差异, 这是不客观的。

关键词: 历史文献资料, 近 2000 年, 中国温度变化, 比对分析。

1 引 言

连续丰富的历史文献记载是重建中国历史时期气候变化的一个主要资料来源^[1-4]。竺可桢^[5]开创利用中国历史文献研究气候变化领域以来, 不但已有许多学者利用中国历史文献记载^[1, 3, 6-22], 而且还有一些学者利用冰芯^[23-25]、树轮^[26]、石笋^[27]等自然证据, 或综合文献、树轮、冰芯、湖泊沉积及泥炭等多种证据^[19, 28-29]建立了大量的历史温度变化代用序列。这些序列的重建不但为揭示中国数百年至数千年的温度变化提供了重要依据, 而且也被国际同行所关注。

然而, 随着这一领域研究的深入, 特别是随着重建序列的不断增多和序列重建方法、代用指标及时空分辨率等的多样化, 不同研究者间的重建结果差异似乎也越来越明显; 进而也导致了对一些问题的认识可能会因使用序列的不同而产生分歧。以中世纪的温暖程度为例, 竺可桢^[1]重建的中国过去 5000

年温度变化序列表明: 中国在北宋以后未出现暖于现代的温暖期; 但其后一些学者的研究却证明^[19-20, 30-31]: 中国在 10—13 世纪明显存在过较现代温暖的时期。据王绍武等^[19]重建的中国东部过去 1200 年温度变化序列, 该暖期的最暖 50 a (13 世纪上半叶) 的温度略低于 20 世纪最暖的 50 a (20 世纪上半叶); 但据葛全胜等^[20]重建的中国东部过去 2000 年温度变化, 该暖期的最暖 30 a (13 世纪 30—50 年代) 却较 20 世纪的最暖 30 a 略暖。这些不一致虽然从研究的角度看是正常的, 因为在不同时期, 不同研究者所使用的原始证据(包括证据来源、性质、特点和数量等) 不尽相同, 研究区域和重建方法(包括定量化方法和所选用的温度代用指标) 等也各不相同, 因此所得的重建结果肯定会存在差异; 事实上, 这样的差异在北半球的温度变化重建工作中也明显存在^[32-35]; 但它却使得一些学者(特别是国际同行) 在引用这些序列时往往无所适从, 因而对中国学者的历史气候重建工作, 甚至对气候变化记载的可

* 初稿时间: 2006 年 4 月 30 日; 修改稿时间: 2006 年 9 月 12 日。

资助课题: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-315-1), 国家自然科学基金项目(40625002, 90502009, 40331013)。

通讯作者: 葛全胜, geqs@igsrr.ac.cn

靠性产生怀疑,从而影响了中国历史气候研究的进一步发展。

为深入研究这一问题,我们收集了迄今为止已公开的由不同学者利用历史文献资料重建的温度变化代用序列,采用相关分析、小波分析、聚类分析、假设检验等统计方法对这些序列的异同进行了定量对比,目的是:① 辨识同一地区,不同序列之间的差异程度;② 辨识不同地区间序列的相似程度;③ 揭示造成这些异同的主要原因。

2 资料简介

本文用于比对的温度序列根据下述 3 个条件遴

选:① 各序列间必须相互独立,即来自不同学者或不同地区(当同一学者采用同一方法或代用指标在同一地区多次建立序列时,则取其最新版本);② 序列长度不短于 500 a;③ 利用中国历史文献资料重建,且已公开发表。遴选结果列于表 1。从中可以看出,尽管重建这些序列的原始资料均源于中国历史文献,但各序列所使用的原始证据类型、代用指标、数值化方法和序列所代表的空间位置和范围(图 1)却不完全一致,而且这些序列所覆盖的时间长度和时间分辨率也不完全相同。为便于进行定量对比,我们先将序列分为 2 部分:一是时间分辨率为 10 a 的序列,共 16 条,其长度均在千年之内;二是时

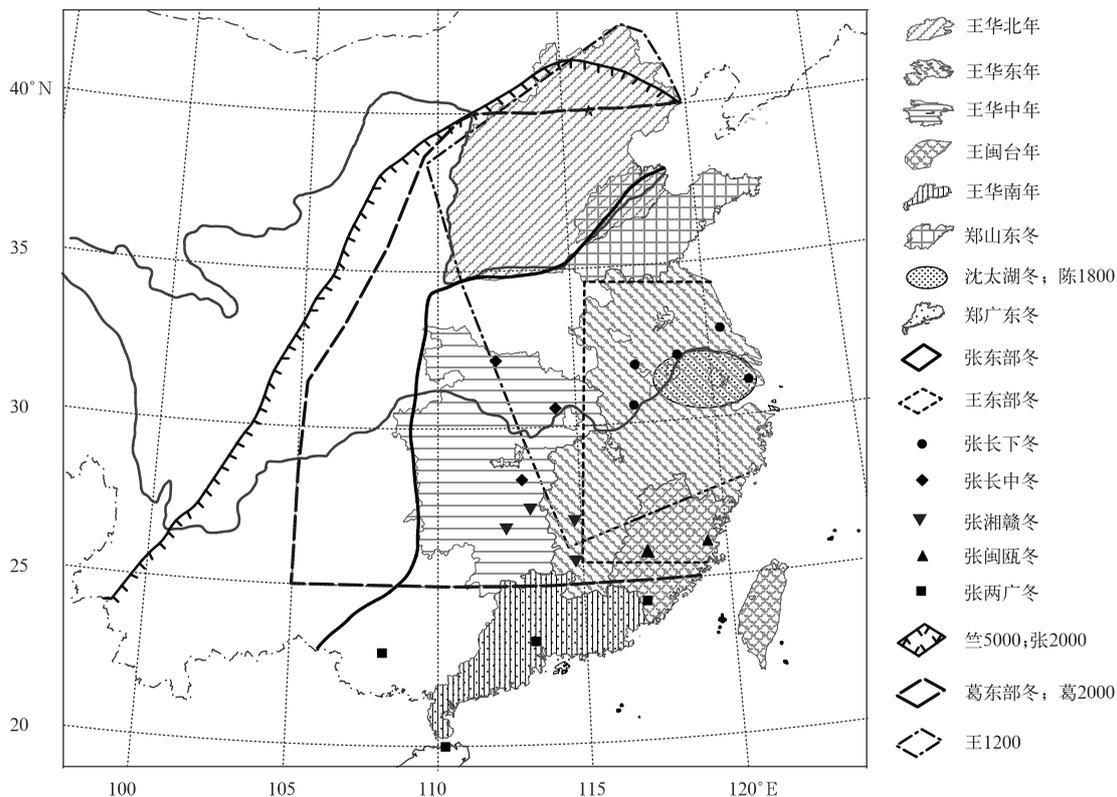


图 1 各序列的空间位置与范围示意图

Fig. 1 Sketch map for area or location of each reconstructed temperature series

间分辨率低于 10 a 的序列,共 5 条,其长度均在千年以上。

3 千年之内温度变化序列的异同分析

为消除因代用指标量纲不同而造成的差别,本文使用式(1)对各序列进行标准化处理

$$x'_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma} \quad (1)$$

式中 x_i 为各序列的原始值, x'_i 为各序列的标准化

值, \bar{x} 及 σ 为各序列共有时段(15 世纪—20 世纪 40 年代)的均值与均方差。经标准化处理后各个序列所反映的绝对变幅的差异被剔除了,但各序列的相对变幅与位相并未发生变化。

3.1 同一地区序列间的异同

先按重建地区相同(或大部分交叉)的原则将表 1 中长度在千年之内的序列分为 6 组 14 对(表 2)。然后按下列步骤与方法对各对序列的共有时段进行分析。

表 1 本文用于比对的冷暖序列简介
Table 1 Brief introduction to each reconstructed temperature series for inter-comparison

地区	重建指标	序列长度	时间分辨率(a)	原始证据内容	原始证据来源地	重建方法	作者及发表时间	缩写
华北	年温度	1380s—1990s	10	陨霜,大雪,(河湖)结冰,淫雨,冷害等	北京、天津、河北、山西、山东西北部、河南北部	据冷暖描述分等定级,通过与现代资料的对比,将等级转换为相应的温度距平序列	王绍武等, 1998 ^[17]	王华北年
华东	年温度	1380s—1990s	10	同上	安徽、江苏、浙江、江西、上海		王绍武等, 1998 ^[17]	王华东年
华中	年温度	1470s—1990s	10	同上	湖南、湖北		王绍武等, 1998 ^[17]	王华中年
闽台	年温度	1500s—1990s	10	同上	福建、台湾		王绍武等, 1998 ^[17]	王闽台年
华南	年温度	1500s—1990s	10	同上	广东		王绍武等, 1998 ^[17]	王华南年
山东	冬季温度	1470s—1980s	10	陨霜,大雪,(河湖)结冰	山东	统计每 10 年冷暖年(次数),通过冷暖年数对比重建序列	郑景云等, 1993 ^[14]	郑山东冬
太湖流域	冬季温度	1100s—1970s	10	同上	太湖流域		沈晓英等, 1991 ^[13]	沈太湖冬
长江下游	冬季温度	1470s—1960s	10	同上	上海、南京、东台、安庆、合肥		张德二, 1981 ^[7]	张长下冬
长江中游	冬季温度	1470s—1960s	10	陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	汉口、襄阳、长沙		张德二, 1981 ^[7]	张长中冬
湘赣	冬季温度	1470s—1960s	10	同上	吉安、赣州、衡阳、醴陵		张德二, 1981 ^[7]	张湘赣冬
闽瓯	冬季温度	1470s—1960s	10	同上	福州、永安		张德二, 1981 ^[7]	张闽瓯冬
两广	冬季温度	1470s—1960s	10	同上	广州、樟州、南宁、海口		张德二, 1981 ^[7]	张两广冬
广东	寒冬频数	1400s—1970s	10	陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	广东省	统计各年代寒冬记录数,其时间趋势用线性拟合剔除	郑斯中, 1982 ^[8]	郑广东冬
东部地区	寒冬年数	1500s—1970s	10	陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	中国东部(仅黄河以南)	先据各地记载确定寒冬年,然而统计各年代寒冬数	张丕远, 1979 ^[6]	张东部冬
东部地区	冬半年温度	1470s—1970s	10	陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	25°—35°N, 115°—120°E	据冷暖描述分等定级,通过与现代资料的对比,将等级转换为相应的温度距平序列	王日口等, 1990 ^[11]	王东部冬
东部地区	冬半年温度	1500s—1990s	10	植物、气象水文与农业物候等	25°—40°N, 110°—120°E	比较古今物候差异,以现代物候与温度变化的关系为依据,重建温度序列	葛全胜等, 2003 ^[20]	葛东部冬
中国中东部	年温度	3000BC—1960AD	数十年至数百年不等	植物、气象水文与农业物候,陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	中国中东部(不含东北)	比较古今物候或冷暖现象差异,通过与现代同类物候或冷暖现象的类比,确定各时段温度,重建序列	竺可桢, 1973 ^[1]	竺 5000
中国中东部	年温度	1—1980	数十年至百年不等	植物、气象水文与农业物候,陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害	中国中东部(不含东北)	比较古今物候或冷暖现象差异,通过与现代同类物候或冷暖现象的类比,确定各时段温度,重建序列	张丕远, 1996 ^[16]	张 2000
中国东部	冬半年温度	1—2000	30	植物、气象水文与农业物候等	25°—40°N, 110°—120°E	比较古今物候差异,以现代物候与温度变化的关系为依据,重建温度序列	葛全胜等, 2003 ^[20]	葛 2000
太湖流域	冬季温度	200—1975	25	陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	太湖流域	统计每 25 年冷暖年(次数),通过冷暖年数对比重建序列	陈家其, 1998 ^[18]	陈 1800
中国东部	年温度	800—2000	50	陨霜,大雪,(河湖)结冰,冷害等	中国东部(不含东北)	据 1400 年以后东部温度重建值与寒冷指数(由冷暖描述确定)的回归关系重建序列	王绍武等, 2000 ^[19]	王 1200

(1) 计算各对序列的相关系数,分析它们的相关性。

(2) 采用 Morlet 小波变换方法计算各序列的小波谱^[35],比对各对序列的小波谱,分析每对序列在各时间尺度上的变化异同。

(3) 对各对序列的差值进行 t 检验,辨识各对序列在哪些年代中没有显著差别。即将两序列相减得到差值序列,计算差值为 0(即两序列的数值一致)的置信区间(置信水平取 99.9%),若某年代两序列的差值在置信区间内,则说明该年代两序列没有显著性差别(简称“完全一致”)。

(4) 对各序列进行 t 检验,辨识各个年代的冷暖型(即暖、冷或正常),再比对每对序列各个有差别年代的冷暖性质是否一致。即先计算各序列在 99.9% 置信水平下 0 值(因各序列为标准化序列,均值为 0)的置信区间,若某年代值在置信区间内,说明该年代为正常;若超出置信区间上界,说明该年代为暖;若超出下界,则为冷。然后在比较各年代两序列的冷暖型是否一致;若某年代两序列的冷暖型相

同,称为“基本一致”;若相反,称为“不一致”;若一个序列为正常,而另一个序列为冷或暖,则称为“不太一致”。

根据上述算法,表 2 给出所有 14 对序列的比对分析结果。从表中的相关系数看,各对序列都存在显著的相关。其中相关系数最高者达 0.73,最低者也有 0.31;多数相关系数都达到了 0.001 的显著性水平,其余的也都达到了 0.05 的显著性水平;这说明在同一地区内,不同序列之间具有相似性。然而对比各对序列的小波谱(图 2,为节省篇幅,这里以华北年温度与山东冬温序列为例,其他各对序列对比图略)则可以发现:这种相似性主要表现在序列的低频信号对应上,即在数十年至数百年尺度上的波动极为相似,而在 30 a 以下尺度则存在一定的差异。 t 检验结果表明,在所有 14 对序列中,完全一致的年代占对比时段年代总数比例最高不过为 48.9%,最低仅有 26.0%。所有 14 对序列平均有 36.6% 的年代完全一致,15.4% 的年代基本一致,34.3% 的年代不太一致,13.7% 的年代不一致。

表 2 同一地区各对序列的相关系数及 10 a 时段的一致性比较

Table 2 Correlation coefficient and coherence between different temperature series in a 10-year resolution for each identical area

地区	对比序列组	相关系数	共有时段 (年代数)	完全一致 (%)	基本一致 (%)	不太一致 (%)	不一致 (%)
华北	王华北年 vs 郑山东冬	0.519***	52	32.7	19.2	42.3	5.8
	王华东年 vs 张长下冬	0.518***	50	40.0	12.0	44.0	4.0
长江下游	王华东年 vs 沈太湖冬	0.661***	60	33.3	26.7	38.3	1.7
	张长下冬 vs 沈太湖冬	0.722***	50	38.0	32.0	28.0	2.0
	王华东年 vs 张湘赣冬	0.373**	50	26.0	16.0	56.0	2.0
长江中游	王华中年 vs 张长中冬	0.653***	50	36.0	24.0	36.0	4.0
	王华中年 vs 张湘赣冬	0.330*	50	40.0	16.0	36.0	8.0
东南沿海	王闽台年 vs 张闽瓯冬	0.428**	47	48.9	17.0	29.8	4.3
	王华南年 vs 张两广冬	0.729***	47	38.3	36.2	23.4	2.1
华南	王华南年 vs 郑广东冬	0.569***	45	33.3	0.0	28.9	37.8
	郑广东冬 vs 张两广年	0.567***	45	33.3	0.0	22.2	44.5
中国东部	葛东部冬 vs 王东部冬	0.463***	48	43.8	6.3	41.6	8.3
	王东部冬 vs 张东部冬	0.550***	48	33.3	0.0	31.3	35.4
	葛东部冬 vs 张东部冬	0.310*	48	35.4	10.4	22.9	31.3
平均 ^a				36.6	15.4	34.3	13.7
平均 ^b				37.7	20.6	37.5	4.2

注:相关系数右上角符号为置信水平,其中:***为 99.9%,**为 99%,*为 95%。本表中其他显著性差别检验的置信水平皆为 99.9%。a:所有 14 对的比较结果平均;b:除与郑广东冬、张东部冬 2 个寒冷年数序列有关的所有 4 对序列比较结果外的所有 10 对序列平均。

需要说明的是:在表 2 中,有 4 对序列不一致年代所占比例超过了 30%,最高者甚至达 44.4%,这主要是由于其中的东部地区寒冬年数及广东寒冬频数两序列所采用的重建指标仅考虑了寒冷状况变

化,因而它们可能并不能完全反映温度变化所造成的结果。如果排除它们参与的 4 对序列比对结果,那么其余 10 对序列完全一致的年代所占比例平均为 37.7%,基本一致的为 20.6%,不太一致的为 37.5%,

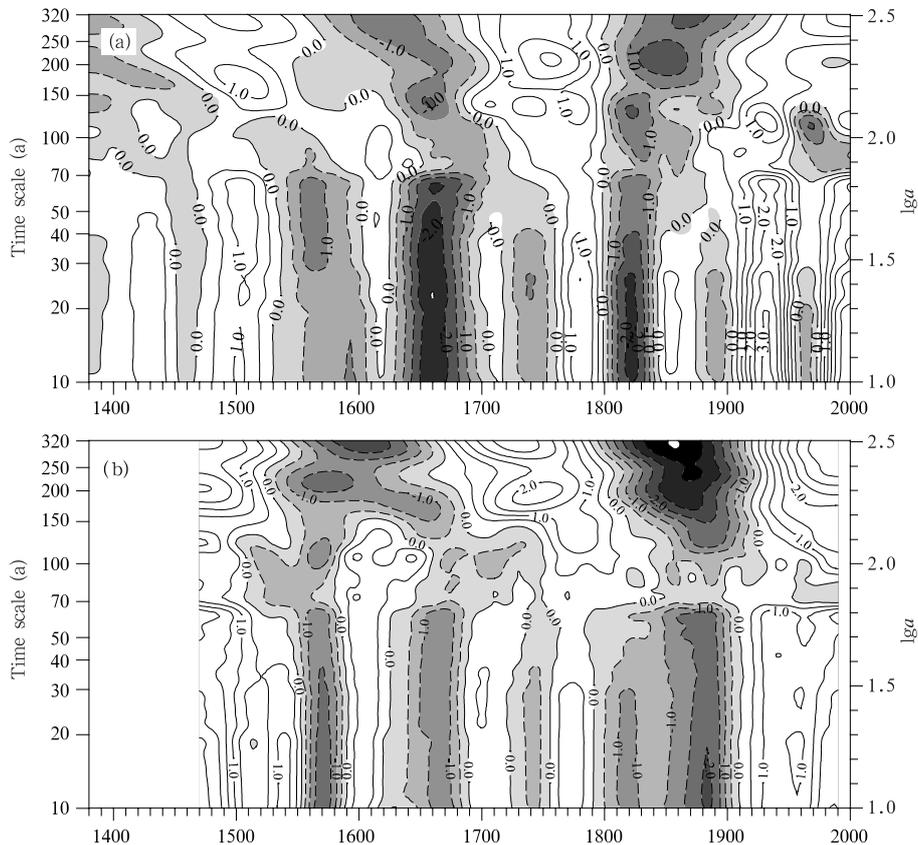


图2 华北年温度变化序列(a)与山东冬温指数序列(b)的 Morlet 小波系数实部值的对比

Fig. 2 Comparison between real parts of the Morlet Wavelets of (a) yearly temperature series in North China and (b) winter temperature series in Shandong

不一致的仅为 4.2%。

为进一步比较各对序列低频信号的一致性,我们又采用上述方法,以 30 a 为单位时段(即将序列分辨率降为 30 a)分别对各对序列的一致性进行了对比,结果(表 3)显示:在所有 14 对序列中,完全一致的时段占对比时段总数的比例最高者达 82.0%,最低者也有 58.8%。所有 14 对序列平均有 73.4% 的时段完全一致,8.6% 的时段基本一致,二者共计达 82.0%;仅有 14.9% 的时段不太一致,3.1% 的时段不一致。如果再排除其中东部地区寒冬年数及广东寒冬频数两序列对结果所造成的影响,那么其余 10 对序列完全一致的时段所占比例平均为 73.6%,基本一致的时段占 10.5%,二者共占 84.1%;而不太一致与不一致的时段则仅分别占 15.5% 与 0.4%。这说明,各序列所反映的 30 a 以上的冷暖变化是基本一致的。

上述分析说明,尽管利用文献重建的序列可以

分辨到 10 a,但它们可能并不能完全地反映出 10 年际温度变化的真实特征。这是因为文献记载只是温度变化的一种代用资料,而且也只是气候变化真实历史的部分样本,所以,当时间分辨率越来越细(如 10 a),每个单位时段所拥有的记载样本量就会相对减少。由于不同作者采用的证据可能不同,因此在记载样本量较少时,不同作者所得到的重建结果就会因证据不同而产生差异;而当时间分辨率降低(如 30 a),每个单位时段所拥有的记录数则相对增多。而当样本量增多到一定程度时,即使不同作者使用不同的证据,也能较完全地捕捉到气候变化的真实特征,因而不同作者的结果就会有更大的相似性。

从这一结果可以进一步得到以下 3 点推论:(1) 历史文献中所记载的气候变化信息应是可靠的,否则即使降低分辨率,那么使用不同的证据也不能得到一致的结果。(2) 重建方法,特别是重建指标的不同,会对序列能否较全面地捕捉到完整的气候变化

表 3 同一地区各对序列 30 a 时段的一致性比较

Table 3 Coherence between different temperature series in a 30-year resolution for each identical area

地区	对比序列组	共有时段 (30 a 时段数)	完全一致 (%)	基本一致 (%)	不太一致 (%)	不一致 (%)
华北	王华北年 vs 郑山东冬	17	58.8	23.5	17.7	0.0
	王华东年 vs 张长下冬	17	76.0	6.0	18.0	0.0
长江下游	王华东年 vs 沈太湖冬	17	71.0	0.0	29.0	0.0
	张长下冬 vs 沈太湖冬	17	82.0	12.0	6.0	0.0
	王华东年 vs 张湘赣冬	17	76.5	5.9	17.6	0.0
长江中游	王华中年 vs 张长中冬	17	76.0	24.0	0.0	0.0
	王华中年 vs 张湘赣冬	17	70.6	5.9	23.5	0.0
东南沿海	王闽台年 vs 张闽瓯冬	16	68.8	12.5	18.7	0.0
	王华南年 vs 张两广冬	16	75.0	19.0	6.0	0.0
华南	王华南年 vs 郑广东冬	15	80.0	0.0	13.3	6.7
	郑广东冬 vs 张两广年	15	69.0	0.0	19.0	13.0
中国东部	葛东部冬 vs 王东部冬	16	81.1	6.3	6.3	6.3
	王东部冬 vs 张东部冬	16	75.0	0.0	6.3	18.7
	葛东部冬 vs 张东部冬	16	68.7	6.3	12.5	12.5
平均 ^a			73.4	8.6	14.9	3.1
平均 ^b			73.6	10.5	15.5	0.4

注:本表中显著性差别检验的置信水平皆为 99.9%。a:所有 14 对的比较结果平均;b:除与郑广东冬、张东部冬 2 个寒冷年数序列有关的 4 对序列比较结果外的所有 10 对序列平均。

信息产生一定的影响。如东部地区寒冬年数及广东寒冬频数 2 序列,由于其仅考虑了寒冷状况变化,因而它们就不能较完全地捕捉到气候变化的全部信息。(3)在利用文献记载进行气候变化重建时,关键是必须保证单位时段有足够的样本量;否则,即使序列拥有较高的时间分辨率,也无法真实地捕捉到气候变化的信息。而在目前所拥有的资料条件下,利用中国历史文献辨识温度变化的时间分辨率应以 30 a 为宜。

3.2 不同地区间序列的异同

表 4 给出上述 16 条 10 a 分辨率序列的两两相关系数。从中可以看出:在除相同地区之外的 106 个相关系数中,有 92 个(占 86.8%)通过了 90% 以上的置信水平检验(其中达到 99.9% 以上的为 30 个,99% 以上的为 26 个,95% 以上的为 19 个,90% 以上的 17 个),这说明绝大多数序列具有显著的相关性。仔细分析还可以看出:不同地区间序列相关系数的高低与重建区域是否相邻(近)或是否包容有关。重建区域相邻、相距越近或具有包容关系,其相关系数越高。而在 14 个(占 13.2%)未通过显著性检验的相关系数中,有 12 个的重建区域不邻接或没有包含关系,仅两广与闽瓯的冬温指数序列的重建地区相邻,东部寒冬年数与闽台年温度序列的重建地区包容。

图 3 进一步给出上述 16 个序列的聚类谱系图。从中可以看出,在谱系图的最底层,最先聚为一类的是同一区域的序列。而在不同区域之间,决定类与类合并顺序的主要因素是重建地区的空间关系。从图中可以看出,重建区域在空间上相距越近,其相似性就越高。如华东年温、东部(25°—35°N, 115°—120°E)冬季温度、太湖流域冬季温度、长江下游地区冬季温度指数序列由于重建地区相互交叉或包容,因此先聚为一类;然后它们又与其相邻的湘赣地区聚在一起成为代表长江下游地区温度变化的新类。华北地区的诸序列和华中地区的诸序列由于其重建区域相邻,因此也先聚为一类。然后这两类序列再聚为代表华北与长江中下游地区的类别。这一新类又再与东南沿海地区的两序列相聚为代表南岭以北地区的类别,最后才与华南地区的冷暖序列相聚为代表整个中国东部地区的序列。

需要说明的是,虽然东部寒冬年数、冬季温度及冬半年温度等 3 个序列反映的是东部地区的冷暖变化,但在上述聚类时,这 3 个序列却表现出与局部地区序列先聚为一类的特征。这是因为这 3 个序列的证据来源地区并不完全一致所造成的。其中东部寒冬年数序列的证据源于黄河以南地区(其中主要是江淮流域),冬季温度序列的证据源于 25°—35°N、115°—120°E 的区域,因而它们先与长江下游地区

表 4 所有 16 个 10 a 分辨率序列间的两两相关系数

Table 4 The correlation coefficient for 16 temperature series in 10-year resolution

序列缩写	王华 北年	郑山 东冬	王华 东年	沈太 湖冬	张长 下冬	张湘 赣冬	王华 中年	张长 中冬	王闽 台年	张闽 瓯冬	王华 南年	张两 广冬	郑广 东冬	王东 部冬	葛东 部冬
郑山东冬	0.519 [△]														
王华东年	0.536 [△]	0.406 [★]													
沈太湖冬	0.287 [*]	0.356 [*]	0.661 [△]												
张长下冬	0.221 [✓]	0.315 [*]	0.518 [△]	0.722 [△]											
张湘赣冬	0.146	0.288 [*]	0.373 [★]	0.240 [✓]	0.260 [✓]										
王华中年	0.606 [△]	0.411 [★]	0.746 [△]	0.343 [*]	0.490 [△]	0.330 [*]									
张长中冬	0.356 [★]	0.448 [★]	0.466 [△]	0.325 [*]	0.486 [△]	0.510 [△]	0.653 [△]								
王闽台年	0.461 [△]	0.415 [★]	0.514 [△]	0.295 [*]	0.038	0.099	0.386 [★]	0.157							
张闽瓯冬	0.407 [★]	0.422 [★]	0.531 [△]	0.371 [★]	0.288 [*]	0.380 [★]	0.458 [△]	0.418 [★]	0.428 [★]						
王华南年	0.443 [★]	0.238 [✓]	0.471 [△]	0.171	0.295 [*]	0.508 [△]	0.495 [△]	0.423 [★]	0.291 [*]	0.343 [*]					
张两广冬	0.180	0.267 [✓]	0.255 [✓]	0.215 [✓]	0.261 [✓]	0.367 [★]	0.322 [*]	0.407 [★]	0.208 [✓]	0.199	0.729 [△]				
郑广东冬	0.252 [✓]	0.033	0.281 [*]	0.107	0.186	0.209 [✓]	0.203 [✓]	0.144	0.374 [★]	0.229 [✓]	0.567 [△]	0.569 [△]			
王东部冬	0.255 [✓]	0.426 [★]	0.740 [△]	0.666 [△]	0.638 [△]	0.496 [△]	0.518 [△]	0.480 [△]	0.269 [✓]	0.460 [△]	0.382 [★]	0.387 [★]	0.241 [✓]		
葛东部冬	0.459 [△]	0.541 [△]	0.546 [△]	0.409 [★]	0.418 [★]	0.367 [★]	0.516 [△]	0.627 [△]	0.452 [★]	0.295 [*]	0.334 [*]	0.285 [*]	0.240 [✓]	0.463 [△]	
张东部冬	0.191	0.178	0.427 [★]	0.402 [★]	0.414 [★]	0.499 [△]	0.354 [*]	0.355 [*]	0.136	0.308 [*]	0.552 [△]	0.461 [△]	0.605 [△]	0.550 [△]	0.310 [*]

注: 右上角符号为置信水平, 其中: [△] 为 99.9%, [★] 为 99%, ^{*} 为 95%, [✓] 为 90%; 粗体字为同地区间序列的相关(见表 2)。

的诸序列聚为一类; 而东部冬半年温度序列的来源于长江中下游和黄河下游地区, 因而它先与代表这 2 个地区序列温度的序列聚为一类。

此外, 从图 3 还可以看出: 在同一地区中, 重建方法与指标一致或相似的序列总是优先聚类。如同样是代表长江下游地区冷暖变化的东部 (25°—35°N、115°—120°E) 冬季温度、华东年温度、太湖冬季温度与长江下游冬季温度指数等 4 个序列, 由于前 2 个的重建方法相似, 后 2 者的方法也一致, 因此在聚类时先是方法相似的 2 组序列进行优先聚类, 然后它们才再相聚。又如代表南岭以南地区冷暖变化的华南年温、两广冬季温度指数与广东寒冬频数等 3 个序列, 由于前 2 者采用的指标更为相似, 因此它们先优先聚为一类后, 才再与广东寒冬频数聚为同一类。然而, 这种现象仅限于聚类图谱的最低层, 即仅在同个区域的不同序列之间, 这说明重建方法与代用指标并没有影响不同地区之间序列的聚类层次, 亦即重建方法与代用指标并不会影响不同地区间序列的相似程度。

由此, 我们可以进一步得到以下推论, 即不同作者所重建的不同地区间的序列不一致实质上是由于地区间的气候变化差异造成的, 而这也正说明: 利用历史文献进行气候变化重建是可以较明确地揭示区域气候变化差异的。然而, 至今为止, 由于学术界 (特别是国际同行) 在引用各家序列时, 可能并没有或很少考虑地区间的气候变化差异, 因而夸大了不

同作者、不同原始证据与不同重建方法对结果所造成的影响, 这是不客观的。

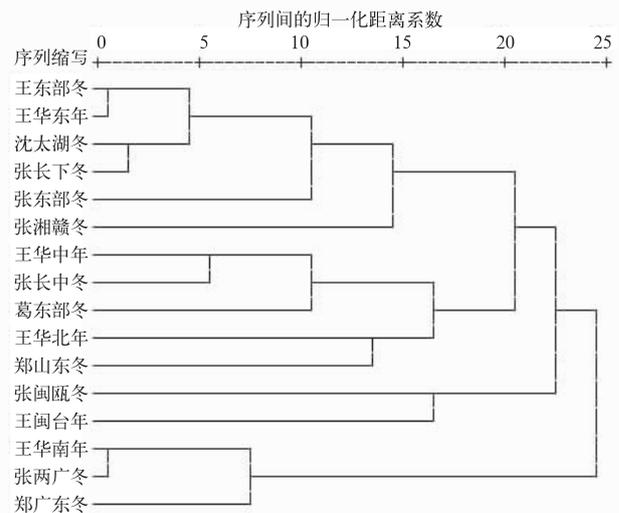


图 3 所有 16 个 10 a 分辨率序列的聚类谱系

Fig. 3 Diagram for cluster analysis of 16 temperature series in a 10-year resolution

4 千年以上温度变化序列的异同分析

图 4 给出迄今为止所有利用中国历史文献重建的千年以上的温度变化代用序列。需要说明的是由于各序列的分辨率不同, 因而我们没有对其进行统一的标准化处理。表 5 给出这些序列所揭示的温度变化的最大变幅、周期信号及变化趋势, 同时给出了各序列的均一性。对比可知, 它们之间存在一定的

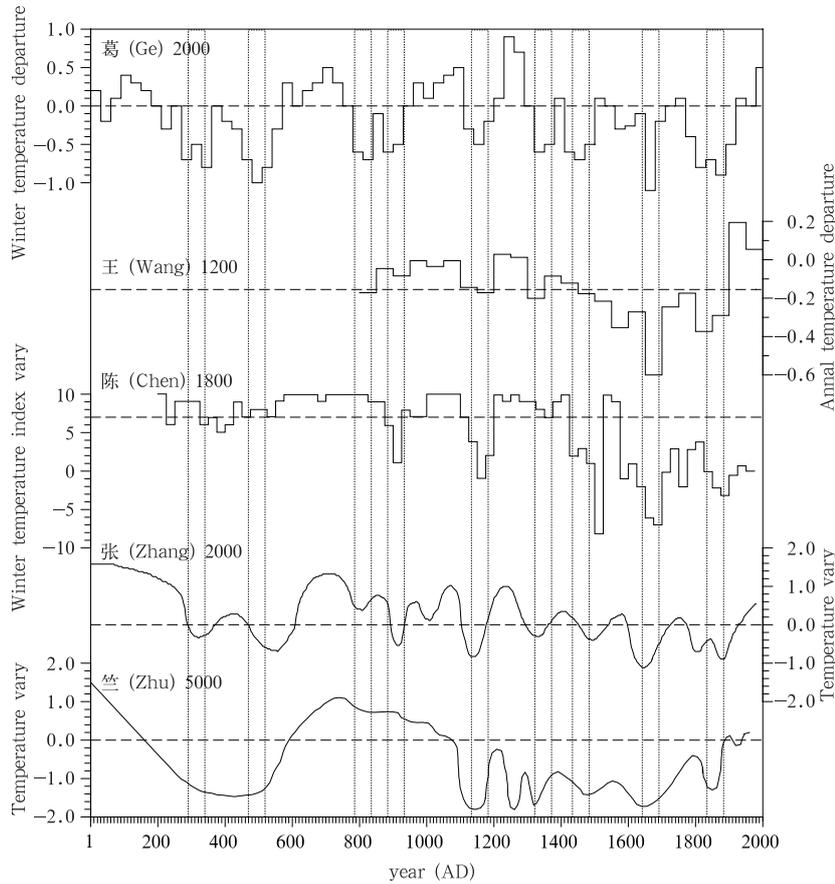


图 4 基于中国历史文献重建的千年以上温度(或冷暖)变化序列
 Fig. 4 Temperature series of more than 1000 years reconstructed from Chinese historical documents

表 5 各个千年以上序列揭示的温度最大变幅、周期信号、变化趋势及序列均一性对比
 Table 5 Maximum range, period, trend and homogeneity of temperature revealed from each temperature change series of more than 1000 years

序列缩写	葛 2000	王 1200	陈 1800	张 2000	竺 5000
最大变幅(°C)	2.0	0.8	无法确定	2.5	>3.0
百年至千年尺度间的强周期信号(图 5)	200—300 a 准 600 a 准 1000 a	200—300 a 600—700 a	准 200 a 准 1000 a	无法确定	400—800 a ^[1]
变化趋势	无	无	冷谷值逐渐下降,有总体变冷趋势	暖峰值逐渐下降,有总体变冷趋势	暖峰值逐渐下降,有总体变冷趋势
序列均一性	比较均一	1400 年后序列方差明显加大	800 年前高频信号弱;800 年后序列方差明显加大,1500 年后又明显缩小	800 年前无高频变化信号	1100 年前无高频变化信号;1100 年后序列波动幅度明显缩小
小冰期的寒冷程度	最冷 30 a 冬半年均温较 20 世纪平均低 1.1 °C	最冷 50 a 年均温较 20 世纪平均低 0.7 °C	最冷时段明显较 20 世纪冷,但原序列仅给出冬温指数,因而无法确定具体的温度数值	最冷时段均温较 20 世纪平均低 1.2 °C	最冷时段均温较 20 世纪平均低 1.8 °C
有否中世纪暖期	有	有	有	有	无
20 世纪与中世纪温暖程度比较	中世纪略暖	20 世纪略暖	中世纪明显温暖	中世纪略暖	20 世纪略暖

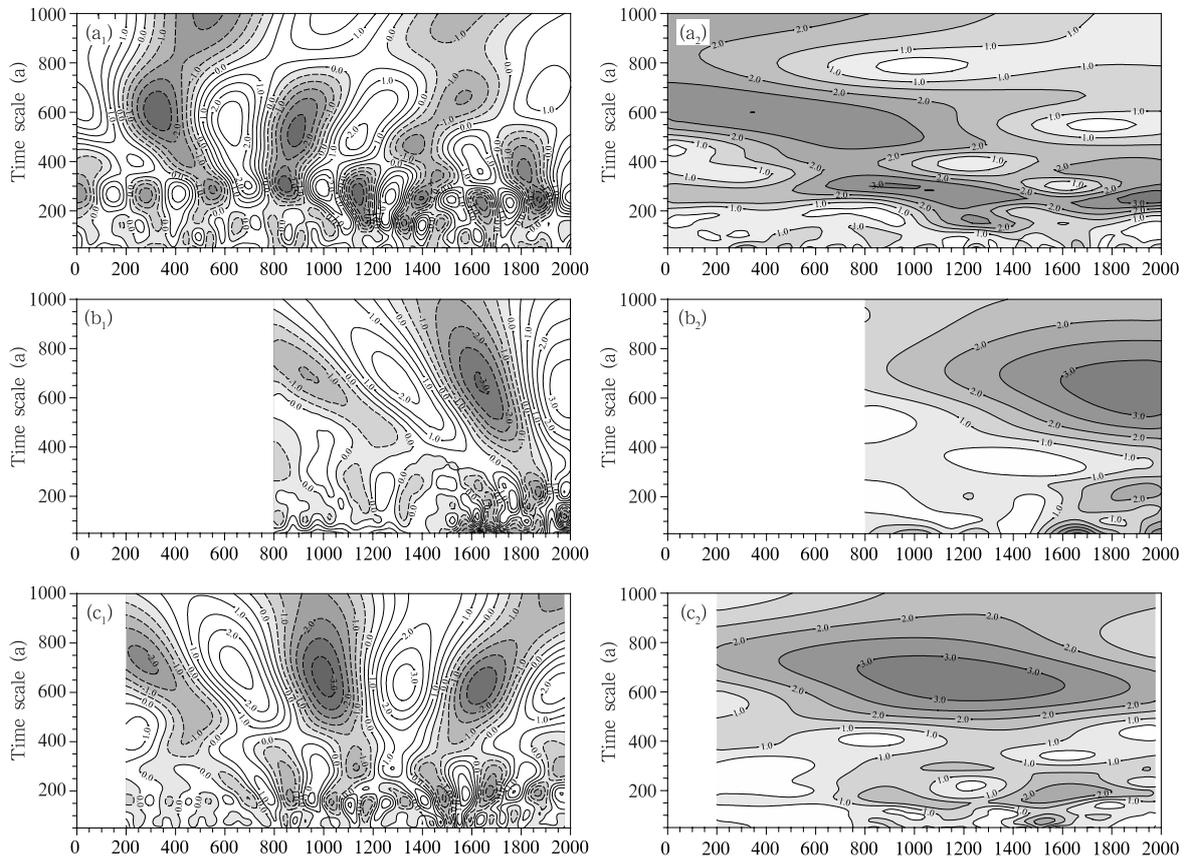


图5 葛 2000(a)、王 1200(b)及陈 1800(c)序列的 Morlet 小波系数(a_1, b_1, c_1)与模数(a_2, b_2, c_2)

Fig. 5 Real parts (a_1, b_1, c_1) and modules (a_2, b_2, c_2) of morlet wavelets for temperature change series reconstructed by (a) Ge for 2000 years, (b) Wang for 1200 years in eastern China and (c) Chen for 1800 years in the Taihu basin, respectively

差异。也正是由于这些差异,使得不同研究者对小冰期的寒冷程度、是否存在中世纪暖期及 20 世纪与中世纪哪个时段更为温暖等 3 个问题的认识不一致(表 5)。究其原因,主要有以下几个方面。

(1) 各序列的重建指标与时间分辨率不同。由于冬季温度的变幅要较年平均温度的变幅大,50 a 分辨率的变幅较 30 a 或 10 a 分辨率的变幅小,因而使得王 1200 的最大变幅明显较其他几个序列小。同时,序列分辨率的不同还会对序列周期信号的识别产生一定影响,因而使得各序列在百年至千年尺度间的强周期信号也产生一定的差异。

(2) 不同类型冷暖记载对温度变化的敏感性不同。历史文献中的反映温度变化的记载主要有 3 类:一是植物物候(如植物花期;柑橘、茶、竹等亚热带植物北界)、气象水文物候(如初终霜、雪日期与持续日数;河、湖、海封、解冻日期与持续日数;土壤冻结、解冻日期与持续日数等)、农业物候(如作物播

种、收获期,冬小麦、双季稻的分布范围等)等,可直接反应一个时段温度的平均或累积状况;二是异常气象水文现象记录,如陨霜、大雪、河湖结冰、冷害等,它们可以直接反映极端温度特征,但却无法直接反应一个时段的平均温度;三是人文感应证据,如人类所感受的“苦寒”、“冬暖”及其影响事件记载等,它们能直接反映各阶段温度变化的相对幅度,但无法直接反映温度变化的绝对幅度大小。因此,如果采用异常气象水文现象记录与人文感应证据重建温度,需要首先对各个原始记载进行数值化(如根据冷暖程度描述分等定级),然后再根据其温度的关系(如回归方程)进行温度重建。由于在这个过程中每个步骤均不能解释原方差的 100%,因而就必然会使序列的变幅变小。而利用物候等自然证据重建温度时,或与现代同类物候类比推断温度,或以现代物候与温度变化的关系重建温度,其重建步骤较少,因而其所建序列的方差解释量就相对要高,序列的

变幅也就较大。这也是造成王 1200 变幅较小、其他几个序列变幅较大的一个重要原因。

(3) 原始证据的不均一性。历史文献中气候变化记载有“距今越近、记载越丰富”及“寒冷事件记载较温暖事件记载多”的特点。如果在序列重建时,不充分考虑这一特点,并采用适当的方法对其进行剔除,就会造成“距今越近冷暖波动越频繁、温度变幅越小,且距今越远越温暖”的假象。而竺 5000、张 2000 及陈 1800 等 3 个序列所揭示的过去 2000 年变冷趋势及序列前后的波动频率、温度变幅不一致主要就是由于这一原因造成的,因而并不能证明过去 2000 年气候在逐渐变冷。

此外,不同时段序列重建方法是否一致也会对重建结果造成明显的影响。如王 1200 在序列重建时^[19],1400 年后,采用寒冷指数(由冷暖描述确定)与观测资料的回归方程反演温度,而在 1400 年前,又使用寒冷指数与重建温度的回归方程反演温度,因而使得序列 1400 年以前的方差明显小于 1400 年以后的方差。

然而,对比这 5 个序列(图 4)仍可以看出:除竺 5000 序列因 1000 年以前分辨率低而没有反映出数十年到数百年的冷暖波动外,各家所揭示的中国东部过去 2000 年主要冷暖阶段的出现时间则基本一致。特别是在 1000—1300 年及 1600—1900 年,各序列所揭示的温度变化特征更为一致。这主要是因为到目前为止,中国学者对这 2 个时段的原始证据挖掘较为充分,同时对它们的研究也更为深入详细而致。因此,我们相信,随着今后对其他时段研究的进一步深入,各家对中国千年以上温度变化的认识会逐步趋于一致。

5 结语与讨论

通过上述比对分析,可以得到以下结论:

(1) 不同作者利用史料气候记载重建的长度在千年之内、分辨率为 10 a 的同一地区温度(或冷暖)变化序列具有很高的相似性,特别是在辨识同一地区 30 a 以上尺度的温度相对变幅与冷暖类型时,不同研究者之间的一致性(所有地区平均)分别达 73.4% 与 82%。这也说明中国的史料气候记载本省应是可靠的。但需要注意的是一味要求时间分辨率提高反而会导致重建结果的失真,因而在目前所拥有的资料条件下,利用中国史料气候记载辨识温

度变化的时间分辨率应以 30 a 为宜。

(2) 虽然重建方法,特别是重建指标的不同,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的影响,但不同作者所选择的重建方法与代用指标不同并不影响不同地区之间序列的相似程度,即不同地区间序列不一致实质上是由于地区间的气候变化差异造成的。而以前学术界对各家序列差异的认识可能并没有或很少考虑地区间气候变化的差异,从而夸大了不同作者因重建方法与原始证据不同而造成的重建结果差异,这是不客观的。

(3) 虽然由于原始证据的不均一、不同类型冷暖记载对温度变化的敏感性不同及不同作者在序列重建时所采用的指标与时间分辨率不同,使得不同作者所估计的中国过去千年以上的温度变化趋势及波动幅度等存在一定差异,进而导致了不同研究者对小冰期的寒冷程度、是否存在中世纪暖期及 20 世纪与中世纪哪个时段更为温暖等 3 个问题的认识不一致,但各家所揭示的中国东部过去 2000 年主要冷暖阶段的出现时间基本一致。

需要进一步讨论的是:在进行千年之内温度变化序列的异同比对分析时,我们对各序列进行了标准化处理,这会掩盖各个序列所反映的绝对变幅差异。同时,在辨识与比较序列各时段的冷暖类型时,由于只分了“冷、正常与暖”3 种类型,因此还会掩盖一些时段虽然冷暖型一致,但冷暖幅度却有差别这一问题。然而从各个千年以上温度变化序列的比对分析看,不同作者在重建序列时所选用的代用指标与冷暖记载对温度变化的敏感性不同,以及因此而导致的重建过程差异虽不会影响各个序列所揭示的位相与相对变幅,却会影响各个重建序列的绝对变幅。然而这种差别与影响究竟有多大,由于目前的多数重建序列使用的是代用指标(如冬温指数),而并未直接给出具体的温度变化数值,因而目前还无法进行比对,有待今后的进一步研究予以揭示。

此外,由于中国的史料气候记载及其所重建的序列主要集中于东部(除东北外),因此本文的研究范围也仅局限于这一区域。而关于全国范围的温度变化比对,由于其或涉及到文献与自然证据、或涉及到文献、自然证据与综合序列(由于综合序列大多建议在文献与自然证据的序列基础上,因此实质上它们并不是相互独立的)的相互比对问题,限于本文篇幅,我们将在今后另文分析。

最后还有一点需要说明的是,本研究是建立在认为上述序列重建成果是可信的或基本可信的基础上的。然而由于以前的序列重建工作除少数外,大多没有对重建结果的误差与不确定性进行分析,因而我们目前也无法对此进行详细分析。但从不同研究者间的序列所估计的 30 a 以上尺度的温度相对变幅与冷暖类型具有较高一致性这一结果看,上述重建成果应当是可靠或基本可靠的。因为,假如序列是不可信的,即没有捕捉到气候变化的真实信息,那么不同研究者之间的序列就不会有如此高的一致性。当然,也有个别序列(如竺 5000、张 2000 及陈 1800 等 3 个序列)没有很好剔除原始证据的不均一性对重建结果所造成的影响,这在使用时需要予以特别注意。

参考文献

- [1] 竺可桢. 中国近五千年气候变迁的初步研究. 中国科学, 1973, (2): 168-189
- [2] Zhang Piyuan, Gong Gaofa. Ancient precipitation records in China. WMO Bull, 1980, 29: 7-11
- [3] Zhang Jiacheng, Crowley Thomas J. Historical climate records in China and reconstruction of past climates. J Climate, 1989, 2: 833-849
- [4] Bradley R S, Shieu D, Wang W-C. High-resolution paleoclimate records from monsoon Asia. EOS Trans Am Geophys Union, 1993, 74: 601, 603-604
- [5] 竺可桢. 中国历史上气候之变迁. 东方杂志, 1925, 22(3): 84-99
- [6] 张丕远, 龚高法. 16 世纪以来中国气候变化的若干特征. 地理学报, 1979, 34(3): 238-247
- [7] 张德二. 近 500 年来我国南部冬温状况的初步探讨. 科学通报, 1980, (6): 270-272
- [8] 郑斯中. 广东小冰期的气候及其影响. 科学通报, 1982, 27(5): 302-304
- [9] 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
- [10] 王绍武, 王日昇. 1470 年以来我国华东四季与年平均温度变化的研究. 气象学报, 1990, 48(1): 26-35
- [11] 王日昇, 王绍武. 近 500 年我国东部冬季气温的重建. 气象学报, 1990, 48(2): 180-189
- [12] 黄增明, 梁建茵, 刘宗锦. 华南近 500 年气候变化特征. 热带气象学报, 1990, 6(4): 332-339
- [13] 沈小英, 陈家其. 太湖流域的粮食生产与气候变化. 地理科学, 1991, 11(3): 207-212
- [14] 郑景云, 郑斯中. 山东历史时期冷暖旱涝状况分析. 地理学报, 1993, 48(4): 348-357
- [15] 周清波, 张丕远, 王铮. 合肥地区 1736—1991 年冬季平均气温序列的重建. 地理学报, 1994, 49(4): 332-337
- [16] 张丕远. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 433-436
- [17] 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
- [18] 陈家其, 姜彤, 许朋柱. 江苏省近两千年气候变化研究. 地理科学, 1998, (3): 219-226
- [19] 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
- [20] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Fang Xiuqi, et al. Temperature changes of winter-half-year in Eastern China during the past 2000 years. The Holocene, 2003, 13(6): 933-940
- [21] Wang W C, Portman D, Gong G F, et al. Beijing summer temperatures since 1724 // Bradley R S, Jones P D. Climate since AD 1500. London and New York: Routledge, 1992: 210-23
- [22] 郑景云, 葛全胜, 郝志新等. 1736—1999 年西安与汉中地区年冬季平均气温序列重建. 地理研究, 2003, 22(3): 343-348
- [23] Yao Tandong, Qin Dahe, Tian Lide, et al. Variations in temperature and precipitation in the past 2000 years on the Tibetan Plateau. Sci China (Series D), 1997, 39: 425-433
- [24] Yao Tandong, Thompson L G, Duan Keqin, et al. Temperature and methane records over the last 2 ka in Dasuopu ice core. Sci China (Series D), 2002, 45(12): 1068-1074
- [25] 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(3): 99-103
- [26] 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
- [27] Tan Ming, Liu Tungsheng, Hou Juzhi, et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. Geophys Res Lett, 2003, 30(20): 1617, doi: 10.1029/2003GL017352
- [28] Yang Bao, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. Geophys Res Lett, 2002, 29(9): 381-384
- [29] 初子莹, 任国玉, 邵雪梅等. 我国过去千年地表温度序列的初步重建. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 826-836
- [30] 张德二. 我国中世纪温暖期气候的初步研究. 第四纪研究, 1993, (1): 7-15
- [31] 满志敏, 张修桂. 中国东部中世纪温暖期的历史证据和基本特征的初步研究 // 张兰生. 中国生存环境历史演变规律研究(一). 北京: 海洋出版社, 1993: 95-103
- [32] Briffa K R, Osborn T J. Paleoclimate: Blowing hot and cold. Science, 2002, 295: 2227-2228
- [33] Jones P D, Mann M E. Climate over past millennia. Rev Geophys, 2004, 42, RG2002, doi: 10.1029/2003RG 000143
- [34] Esper J, Frank D C. Climate reconstructions: low-frequency ambition and high-frequency ratification. EOS: Trans Am Geophys Union, 2004, 85(12): 113-114, 120
- [35] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79(1): 61-78

COMPARISON ON TEMPERATURE SERIES RECONSTRUCTED FROM HISTORICAL DOCUMENTS IN CHINA FOR THE LAST 2000 YEARS

Zheng Jingyun¹ Ge Quansheng¹ Fang Xiuqi^{1,2} Zhang Xuezheng²

¹ *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101*

² *School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875*

Abstract

China has abundant continuous historical documents with a large number of records describing the weather and climate information. Much effort has been made in the last few decades to reconstruct the historical climate over China using a variety of historical documents, such as histories, local gazettes, archives of government, the private diaries, and so on. . Consequently, a lot of differences exist in the reconstructed time series when researchers use either the data from same sources or records from different documents. To address the issue, we have conducted a detailed analysis of 21 time series reconstructed using different historical documents by different researchers recently, and differences among these time series and their causes are also discussed. It is found that the temperature series in the same region by different researchers have higher similarity; and time periods with a completely consistent relative change range of temperature for 30-year mean temperature magnitudes estimated by different series from different researchers account for 73.4% of the total ($P < 0.01$, Student's t test), and time periods with a consistent cold/warm grade for 8.6% of the total, leading to 82% consistent periods in total. The temperature series in different regions are also closer associated, and the nearer the reconstructed regions, the closer the association of temperature series, and the higher the similarities. Differences in reconstructed approaches and in proxy indices used by different researchers do not have any impacts on the similarities of different series for different reconstructed regions, suggesting that differences of time series reconstructed in different regions are resulted from the regional differences of climate change. These comparative analyses also indicate that the 30-year temporal resolution is the most creditable period for using the historical documents in temperature change studies in China. Moreover, although there are still some differences in trends and amplitudes of the temperature series reconstructed by different researchers, the main cold/warm periods during the last 2000 years over eastern China are still concentrated in the several stages. We also conclude that the previous cognition of researchers to differences in time series reconstructed did not consider differences in climate change in different regions enough, which exaggerated differences in time series subjectively reconstructed using different approaches and data sources by different researchers.

Key words: Comparison, Reconstructed temperature series, Historical documents, China, Last 2000 years.