

过去2000年冷暖变化的基本特征与主要暖期

葛全胜¹, 刘 健^{2,3}, 方修琦^{4,1}, 杨 保⁵, 郝志新¹, 邵雪梅¹, 郑景云¹

- (1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023;
3. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008;
4. 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
5. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 根据近年国内外相关研究结果, 分析了北半球与中国过去2000年冷暖变化的阶段性, 辨识了百年尺度暖期的起讫年代及其与20世纪温暖程度的差别。结果表明: (1) 最近新建的多数北半球温度变化序列显示公元1-270年温暖; 271-840年冷暖相间, 但总体偏冷; 841-1290年温暖; 1291-1910年寒冷; 1911年以后再次转为温暖; 这些冷暖阶段虽分别与Lamb指出的罗马暖期(约公元前1世纪-4世纪中期)、黑暗时代冷期(约4世纪末-10世纪前期)、中世纪暖期(约10世纪中期-13世纪末)、小冰期(约15-19世纪)以及20世纪增暖大致对应, 但各阶段的起讫时间与Lamb确定的时段存在一定差别。(2) 尽管过去2000年冷暖变化过程及其变幅大小在中国境内各个区域间并不完全一致, 但从全国平均看, 中国与北半球百年尺度的冷暖波动阶段基本一致, 仅起讫年代存在一定差异; 其中公元1-200年、551-760年、941-1300年及20世纪气候相对温暖, 其他时段则相对寒冷。(3) 多数序列显示中世纪期间北半球的温暖程度至少与20世纪相当。中国941-1300年间的最暖百年和最暖30年(暖峰)的温度也略高于20世纪, 551-760年间的最暖百年与20世纪基本相当, 但1-200年间最暖百年的温暖程度则较20世纪略低。

关键词: 过去2000年; 北半球; 中国; 温度变化; 百年际暖期

辨识过去2000年气候变化的阶段性, 揭示其间百年尺度暖期的主要特征、成因机制及其影响, 不但对深入理解地球系统多尺度运行规律、评估气候环境变化与人类活动的相互影响、预测未来数十年全球与区域气候环境变化具有重要科学意义, 而且可直接为人类适应未来全球增暖提供历史相似型, 因而备受国内外学术界的关注^[1]。特别是自上世纪末以来, 在国际地圈-生物圈计划(IGBP)的核心研究计划“过去全球变化(PAGES)”和世界气候研究计划(WCRP)的核心计划“气候变率研究(CLIVAR)”推动下, 全球特别是北半球过去2000年温度变化集成重建工作取得了重大进展, 但随着研究的不断深入, 国际学术界对过去2000年是否存在与20世纪温暖程度相当的暖期、中世纪暖期是否在全球广泛存在等问题的争论也越来越多; 1994年和2010年, 国际学术界还以“中世纪暖期”为主题举行了2次专题研讨会^[2-3]。与此同时, 中国也利用历史文献及树轮、石笋等高分辨率的自然证据重建了多条长达千年的温度变化代用序列, 辨识了中国冷暖变化的阶段性及其重

收稿日期: 2013-01-31; 修订日期: 2013-03-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB950100); 中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05080100); 科技基础性工作专项项目(2011FY120300) [Foundation: China Global Change Research Program, No.2010CB950100; The "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA05080100; Basic Research Project of the Ministry of Science and Technology, No.2011FY120300]

作者简介: 葛全胜(1963-), 男, 安徽安庆人, 研究员, 中国地理学会会员(S110000942M), 从事全球变化研究。
E-mail: geqs@igsrr.ac.cn

通讯作者: 郑景云(1966-), 男, 福建莆田人, 研究员, 中国地理学会会员(S110005556M), 从事气候变化研究。
E-mail: zhengjy@igsrr.ac.cn

要特征^[4-5]。本文拟根据近年国内外相关研究结果,对北半球及中国过去2000年冷暖变化的阶段性,特别是百年尺度暖期的出现时间及其与20世纪温暖程度的差别进行进一步分析。

1 20世纪80年代前对过去2000年冷暖变化的概貌性认识

自20世纪初起,就有一些学者根据北美、冰岛、格陵兰、斯堪的纳维亚和东欧等地的各种证据,包括植被、农作物种植范围及收成等历史记录和树轮、冰川与冰缘活动及格陵兰冰芯中的氧同位素寒冷变化等,对过去2000年气候变化进行了研究^[6]。虽然支持这些研究的资料多为零星的局地或单点记录,多数证据并不能直接定量反映大区域温度变化,

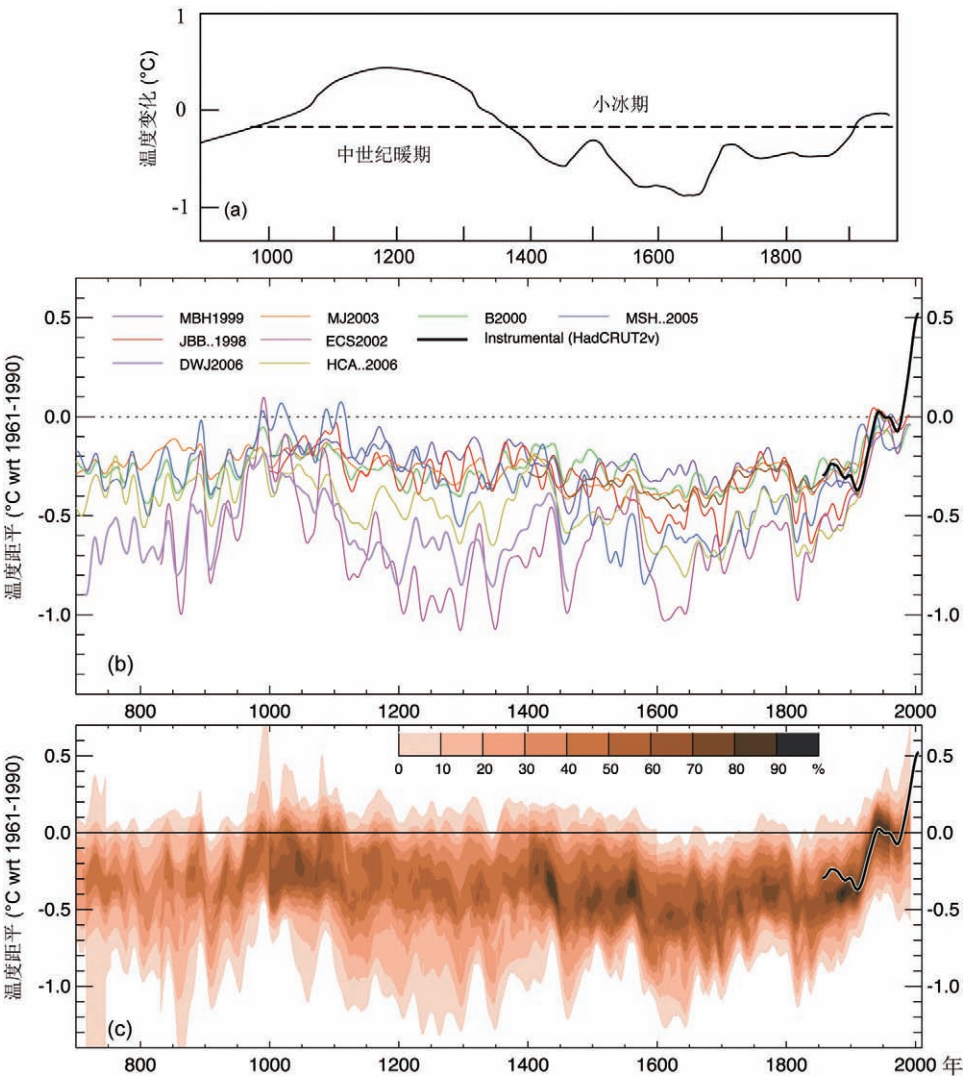


图1 (a) 过去千年温度变化示意图(引自文献^[12])。 (b) 2007年之前不同作者重建的过去1300年北半球温度变化序列(各序列简介见表1); (c) 北半球过去1300年温度变化重建结果的不确定性范围及各序列的多年代温度变化信号重叠量(引自文献^[16])。

Fig. 1 (a) Schematic diagram of temperature variation since AD 900^[12]. (b) Proxy-based NH temperature reconstructions for the past 1300 years from different publications before 2007 (see Tab. 1 for information of illustrated series); (c) The multi-decadal time scale uncertainty ranges and overlap of reconstructed NH temperature series for the past 1300 years^[16].

且一些资料也没有经过精确定年,但毕竟给出了过去2000年温度百年际波动的概貌。特别是Lamb系统总结了20世纪80年代前的历史时期气候变化研究成果,初步描绘了北半球公元900年以来温度变化示意图(图1a)^[7-8]。结果表明:自公元前1世纪起,气候转暖,并持续了数百年,约至公元4世纪中期转为寒冷,此后则数度波动(5-6世纪、7世纪后期至8世纪前期、9世纪中期至10世纪前期寒冷,其他时段则短暂回暖),直至10世纪以后再度明显转暖,11-13世纪温暖,14世纪从温暖转为寒冷,15-19世纪寒冷,20世纪又再度回暖;温暖时段与寒冷时段之间的温度差异大致为1~2℃。

Lamb还提出并使用“中世纪暖期”(Medieval Warm Period/Epoch, Medieval Climatic Optimum, Little Climatic Optimum)和“小冰期”(Little Ice Age)等术语描述百年尺度的冷暖阶段。指出:中世纪的持续温暖时段为200~300年,但在世界各地出现的时间不同(北美和欧洲约出现在公元950-1200年间,其他地区则可能出现在公元1150-1300年间);小冰期的持续时间约为15-19世纪,其中最寒冷的时段为1550-1700年^[7-8]。后来的学者们还常将Lamb确定的公元前1世纪-公元4世纪中期的温暖及其后的寒冷期(约4世纪末-10世纪前期)分别称为“罗马暖期”(Roman Warm Period)和“黑暗时代冷期”(Dark Ages Cold Period)^[9-11]。

2 20世纪90年代后北半球温度变化集成重建与中世纪暖期的争议

2.1 北半球温度变化集成重建及不同作者的结果差异

20世纪90年代以后,特别是在Bradley与Jones^[13]首次集成全球范围的代用资料(以树轮为主,且主要来源于北半球)重建了公元1400年以来的温度变化序列、开启定量重建全球(特别是北半球)温度变化工作的序幕后,集成重建过去千年全球(特别是北半球)温度变化研究得到迅速发展,发表了多条长逾千年的全球(特别是北半球)温度变化序列(表1,图1b)^[14-16]。IPCC第四次评估报告采用“包络法”对这些序列进行综合评估,给出了过去1300年以来北半球温度变化的包络范围(用于指示不确定性)和各序列的多年代温度变化信号重叠量(Overlap,指示可信度最高的温度变化信号)^[16]。结果(图1c)显示:北半球温度在公元700-950年间以小幅度的多年代波动为主要特征;950年起气候转暖,至1100年以后温度在波动中逐渐下降,至17世纪降至最低谷;此后北半球温度在波动中缓慢回升,直至20世纪初出现快速上升。其中950-1100年间气候较为温暖,1450-1900年最

表1 IPCC第四次评估报告引用的8条过去千年北半球温度变化序列简介(引自文献[16])

Tab. 1 Brief of millennial proxy-based NH temperature change series cited in IPCC AR4 ^[6]										
序号	序列名称	重建时段	被建 季节	重建区域范围	代用证据 类 型	资料覆盖				文献来源
						H	M	L	O	
1	JBB1998	1000-1991	夏季	20-90°N陆地	TL _C	▲	▲	□	□	[21-22]
2	MBH1999	1000-1980	年	0-90°N 陆地和海洋	TL _C	■	■	▲	▲	[17]
3	ECS2002	831-1992	年	20-90°N陆地	T	▲	▲	□	□	[24-25]
4	B2000	1-1993	夏季	20-90°N陆地	T	▲	□	□	□	[19-20]
5	MJ2003	200-1980	年	0-90°N 陆地和海洋	TDI _C S _d	▲	▲	□	□	[18]
6	MSH2005	1-1979	年	0-90°N 陆地和海洋	TSI _C I _s L _s M _s M _p	▲	▲	▲	▲	[27]
7	DWJ2006	713-1995	年	20-90°N陆地	T	■	▲	□	□	[26]
8	HCA2006	558-1960	年	20-90°N陆地	T	▲	▲	□	□	[23]

注: 1. 代用证据类型: T= 树轮, S= 洞穴石笋, C= 珊瑚, D= 历史文献, I_c= 冰芯, I_s= 冰层, L_s= 湖泊沉积, S_d= 沉积, M_s= 海湾沉积, M_p= 多源资料合成指标; 2. 资料覆盖: H= 高纬陆地, M= 中纬陆地, L= 低纬陆地, O= 海洋, □ = 没有或很少 (none or very few), ▲ = 覆盖有限 (limited), ■ = 中度 (moderate) 覆盖。

冷寒冷, 20世纪(特别是最后几十年)的温暖程度可能已超过过去1300年的任何时期。

然而, 这些序列所揭示的冷暖变化过程和温度波动幅度并不一致, 特别是有些时段的差异甚至还很显著。从图1b可以看出: 在IPCC第四次评估报告引用的北半球8条(其中7条以树轮为主要代用资料重建)长逾千年温度变化序列(表1)中, 以树轮为主重建的2条北半球过去千年温度变化序列(MBH1999, MJ2003)^[17-18]和过去2000年夏季温度变化序列(B2000)^[19-20]均显示: 20世纪以前的北半球的最大温度变幅仅有0.4℃左右; JBB1998^[21-22]和HCA2006^[23]两序列20世纪以前的变幅虽稍大一些, 但也仅有0.7℃。只有根据“区域曲线标准化”(regional curve standardization)保留树轮年表低频信息方法重建的ECS2002^[24-25]和DWJ2006^[26]两条序列, 其20世纪之前的温度变幅才达1℃以上。此外, MSH2005^[27]序列因采用了更多类型的代用资料, 包括用7个中高纬地区的树轮序列反映高频(<80年)温度变率, 用11个源于洞穴石笋、孢粉、湖泊及海洋沉积等多种资料合成的温度代用指标反映低频(>80年)温度变化, 然后采用子波分析合成技术重建过去2000年北半球温度变化, 故其20世纪之前的最大温度变幅也达1.0℃以上。

同时, 对13世纪以前温暖程度和其后寒冷程度的估计, 不同序列间的差异也极为明显。如Mann等重建的MBH1999和MJ2003序列均显示, 北半球过去千年温度趋势呈“曲棍球杆”式, 即前900年持续缓慢下降, 最后100年(20世纪)快速上升, 20世纪温暖为过去千年最暖, 特别是原先学术界认为的“中世纪暖期”(约950-1250年)很不明显; JBB1998、B2000、DWJ2006和HCA2006序列也显示, 20世纪温暖程度较其前的时段更为温暖; 但MSH2005序列却显示: 950-1100年与20世纪温暖程度类似, 其间暖峰的温度与20世纪后期(1961-1990年)基本相当; ECS2002也显示: 公元1000年前后与20世纪后期的温暖程度大体一致。

2.2 对中世纪暖期的主要争议

由于世界各地的冷暖阶段变化并不同步, 特别是中世纪暖期在出现时间、显著程度等方面的区域差异很大^[22, 28-29], 因此早在1994年就有学者指出: 尽管确有一些区域(如北大西洋毗邻地区、斯堪的纳维亚及中国等)在中世纪期间可能存在比20世纪更暖的气候阶段, 但并不能证明中世纪暖期是一个“全球性”的气候暖期^[2]。特别是MBH1999和MJ2003序列显示中世纪温暖和小冰期的寒冷程度均极不明显后, Mann等甚至建议不要再用“中世纪暖期”与“小冰期”这两个术语^[14]。但Soon等采用18条全球、半球或大区域尺度序列及139条单点(区)序列, 分别检查公元800-1300年中有否连续50年以上的明显暖期和公元1300-1900年中有否连续50年以上的明显冷期; 结果却发现: 在18条全球、半球或大区域尺度序列中, 有15条显示公元800-1300年间有明显暖期, 10条序列显示公元1300-1900年间有明显冷期。在139条单点(区)序列中, 有122条显示公元800-1300年间有明显暖期, 109条显示公元1300-1900年间有明显冷期, 分别占87.8%及78.4%。同时在检查20世纪的最暖50年是否为有记录以来最暖的50年时, 18条全球、半球或大区域尺度序列中只有7条显示为最暖, 139条单点(区)序列中只有16条显示为最暖。因此他们认为: “中世纪暖期”与“小冰期”是全球性的气候期, 且不能认为20世纪温暖程度已超过中世纪^[30]。

3 近5年新建序列显示的北半球过去2000年主要暖期

3.1 新建的北半球温度变化序列

在IPCC第四次评估报告发布后, 又有多位学者^[31-37]进行了北半球过去2000年温度重建(表2)。与先前的多数重建工作相比, 这些研究不再限于以树轮为主, 同时也包括了历史文献、洞穴石笋、冰芯以及高分辨率湖泊沉积等更多类型的代用证据; 资料覆盖范围和

表2 2008年以来新建的北半球过去千年温度变化序列简介

Tab. 2 Brief of new millennial proxy-based NH temperature change series from different publications since 2008										
序号	序列名称	重建时段	数据分辨率 /代表尺度	重建区域 范 围	资料覆盖				代用证据类型及重建方法	文献来源
					H	M	L	O		
1	LM08	16-1935	年/30年 ^①	全球 ^②	▲	▲	▲	▲	SDI _c L _s M _s M _p ; 多序列平均	[31-32]
2	M08cps	200-1849 1850-1995 ^③	年/年代 ^④	北半球陆地	■	■	▲	□	TSDI _c L _s ; 多尺度相关加权 平均(CPS)+方差匹配(VM)	[33]
3	M08eiv	300-1849 1850-2006 ^③	年/年代 ^④	北半球陆地	■	■	▲	□	TSDI _c L _s ; 分段异变量 (EIV) 回归+VM	[33]
4	M09f	500-1849 1850-2006 ^③	年/年代 ^④	北半球陆地及海洋 ^⑤	■	■	▲	▲	TSDI _c L _s M _s ; EIV+VM	[34]
5	M09s	500-1849 1850-2006 ^③	年/年代 ^④	北半球陆地及海洋 ^⑤	■	■	▲	▲	TSDI _c L _s M _s ; EIV+VM	[34]
6	Lj10	1-1999	年代/年代	30-90°N陆地	▲	▲	□	□	TSDI _c L _s M _p ; CPS+VM	[35]
7	WM11	998-1998	年/年	北半球陆地	■	■	▲	□	TSDI _c L _s ; 主分量贝叶斯回归 (PCR _{Bayesian})	[36]
8	CL12	1-1973	年/年	30-90°N	■	■	□	□	TSDI _c L _s M _s M _p ; 局地逆回归 加权平均 (CPS _{fit})	[37]

注：资料覆盖度和代用证据类型的编码含义同表1。重建技术：CPS = composite-plus-scale, VM = Variance matching of composite average, EIV=enor in-variables, PCR=Principal Components Regression, CPSIir= Composite average of local records calibrated by local inverse regression; 各种技术方法的详细介绍参见原文献。^①数据分辨率为年，但采用29年滑动平均计算，代表30年尺度温度变化。^②尽管重建范围为全球，但资料主要来源于北半球中高纬陆地。^③根据观测资料的主分量重建。^④数据分辨率为年，但使用了部分年代分辨率原始序列，代表年代变化信号。^⑤分别根据 Full proxy (达到基本条件的所有代用序列，其中长度覆盖至500年之前的有28条) 和 Screened proxy (Full proxy中去掉与当地温度变化相关不显著的序列，其中长度覆盖至500年之前的仅12条) 资料重建成M09f和M09s序列，但二者差异不大(详见文献^[33-34])。

数量(特别是公元1500年之前)也有了一定改善。如Mann等新建的序列^[33-34]就采用了31条千年以上的原始序列(其中有25条覆达2000年)，Ljungqvist^[35]采用的千年以上的原始序列也有30条(其中16条达2000年); 较先前(如MJ2003^[18]和MSH2005^[27]当时所用的千年以上序列分别为13条和18条) 均有成倍增加; 且重建方法也更为多样化，代用指标与温度变化之间的校准技术也有进一步发展(表2)。

对比这些新建序列(图2)可以看出：尽管不同序列所显示的温度波动幅度仍存在一定差异，但除LM08序列在200~900年间存在持续增暖趋势(主要因该序列没有使用定年相对准确的树轮资料重建而致^[31-32]) 与其他序列显著不同外，多数序列揭示的温度波动过程较为相似。相关分析(表3)也表明：除M08cps序列(该序列在780~850年间存在一个极为异常的冷期，且受愈往前原始代用序列愈少的影响，1000年前的变幅显著大于后1000年)与其他各序列、LM08与CL12序列(因这2序列代表不同尺度的温度变化，前者代表30年，后者为年)的相关系数稍低外，其他各序列之间的相关系数均超过0.5，即各序列高度相关。

3.2 过去2000年主要暖期及其与20世纪温暖程度的比较

图2的各序列显示：在过去2000年中，公元1000年以来温度较其前千年(即公元初至1000年)略低一些，这与过去认识的全新世大暖期以来全球特别是北半球中高纬度气温存在下降趋势^[38]吻合；同时还存在较为显著的多年代至百年尺度冷

表3 2008年后新建的8条北半球温度变化序列之间的相关系数(显著性水平平均超过0.01)

Tab. 3 Correlation coefficients between proxy-based NH temperature change series from publications since 2008 (All correlations passed significant level of 0.01)							
序列	LM08	M08cps	M08eiv	M09f	M09s	Lj10	MW11
M08cps	0.145						
M08eiv	0.688	0.386					
M09f	0.802	0.374	0.807				
M09s	0.786	0.326	0.921	0.881			
Lj10	0.572	0.260	0.751	0.683	0.771		
MW11	0.660	0.462	0.848	0.698	0.807	0.766	
CL12	0.343	0.281	0.533	0.555	0.574	0.730	0.503

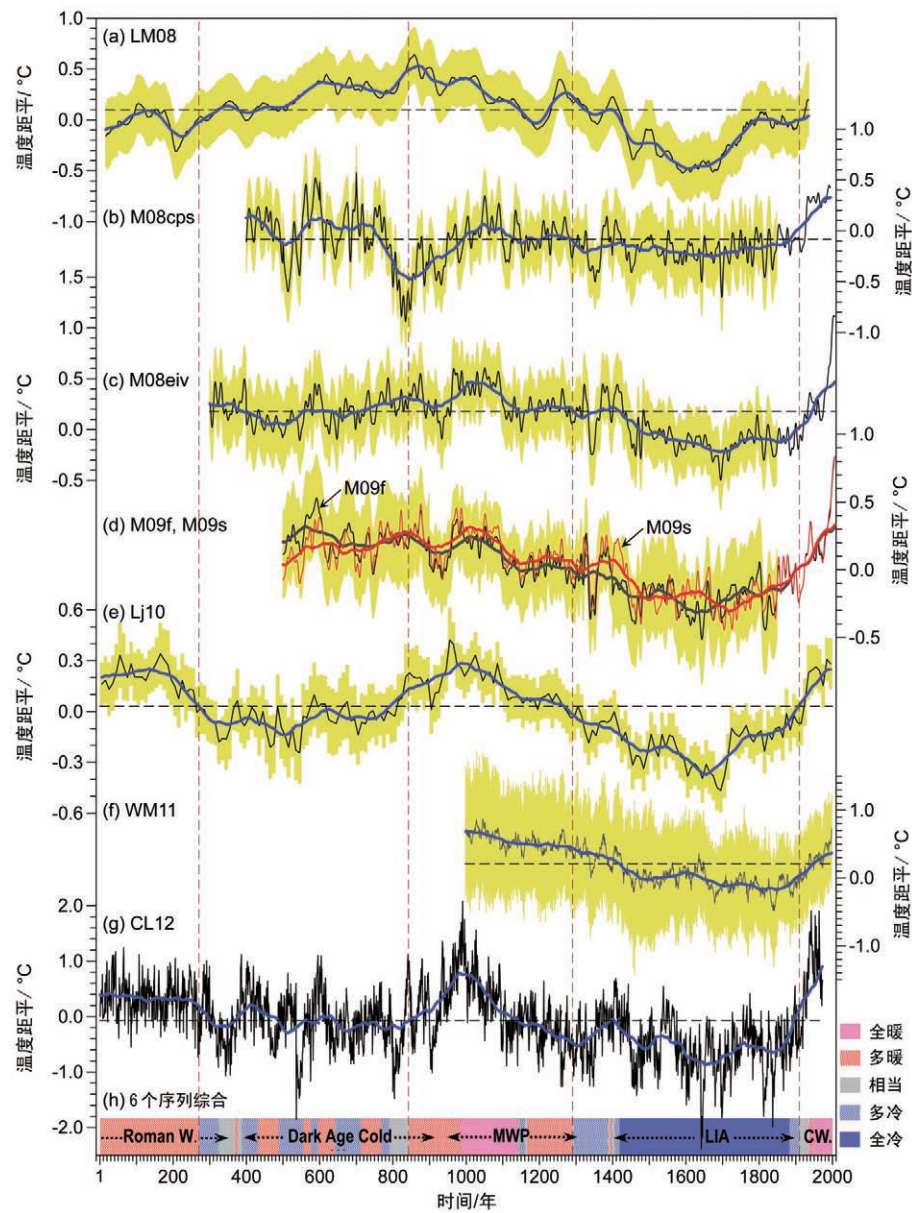


图2 2008年以来新建的北半球千年温度序列

各序列简介见表2。细实线：年（或年代）的温度距平（ $^{\circ}\text{C}$ ，相对于1851-1950年平均）；黄色阴影区：95%信度的不确
信性范围；粗线：100年滑动；虚线：各序列均值。（h）除M09f和M09s外其他6个序列的冷暖时段综合结果，全暖：
6个序列均指示该时段温暖；多暖：多数序列指示该时段温暖；相当：指示该时段温暖与寒冷的序列数相当；多冷：
多数序列指示该时段寒冷；全冷：6个序列均指示该时段寒冷。箭头：Lamb定义的罗马暖期（Roman W.）、黑暗时代
冷期（Dark Age Cold）、中世纪暖期（MWP）、小冰期（LIA）的大致起迄年代^[8]。

Fig. 2 New millennial proxy-based NH temperature change series from different publications since 2008
Tab. 2 for information of illustrated series. Thin line: annual (or decadal) temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$) with referee to mean of
1851-1950. Yellow shades: uncertainty ranges at 95% confidence level. Bold line: 100-year adjacent averaging smooth.
Dash line: mean of the series for all time. (h) The synthesis of the centennial warm/cold periods revealed by all illustrated
series except for M09f and M09s. Pink: all series show warm; Dot red: more than half but not all series show warm; Gray:
half of all series show warm but the other half show cold; Dot blue: more than half but not all series show cold; Blue: all
series show cold. Dash arrow: The approximate duration of Roman Warm, Dark Age Cold, Medieval Warm Period and
Litter Ice Age identified by Lamb^[8].

暖波动。然而从各序列的百年滑动可以看出：不同序列所揭示的百年尺度冷暖阶段并不一致。因 M09f 和 M09s 序列与 M08eiv 序列的重建方法一致，仅原始证据多包括了海温代用资料，且重建结果与 M08eiv 无明显差别，但较其短 100 年，故图 2(h) 给出除 M09f 和 M09s 序列外其他 6 个序列所揭示的百年尺度冷暖时段综合结果。从中可见，多数序列指示公元 1-270 年温暖，271-840 年冷暖相间、但总体偏冷，841-1290 年温暖，1291~1910 年寒冷，1911 年以后再次转为温暖，其中所有序列均指示 985-1140 年和 1945 年以后气候温暖，1440-1880 年气候寒冷。这些冷暖阶段虽分别与罗马暖期、黑暗时代冷期、中世纪暖期、小冰期以及 20 世纪增暖大致对应；但各阶段的起讫时间与 Lamb 定义的时段存在一定差别，这可能与百年冷暖阶段存在区域差异及北半球温度变化重建结果尚存在一定不确定性有关。

与图 1 相比，图 2 各序列均更清晰地指示出中世纪期间气候的显著温暖。特别是除 M08cps 序列外，其他各序列均显示：中世纪期间的最暖百年和最暖 30 年（暖峰）的温暖程度均与 20 世纪及其暖峰持平或更高（表 4）；表明中世纪期间温暖程度可能至少与 20 世纪相当。M08cps 序列虽显示 20 世纪后期的温暖程度超过了中世纪的暖峰，但这可能主要是因这一序列（包括 M08eiv、M09f 和 M09s 三个序列）1850 年以后直接使用观测资料的主分量而非代用资料重建所致。因为在利用代用资料重建温度变化时，通常都会缩减重建结果的方差^[39]，从而造成变幅（特别是暖峰和冷谷的程度）减小，其中低频变化和趋势变化的变幅通常会被低估 20%~50%^[40]。在覆盖至公元初的 3 个序列中，Lj10 序列显示罗马暖期期间最暖百年和最暖 30 年的温暖程度均与 20 世纪及其暖峰的温暖程度基本一致；而其他 2 序列则显示罗马暖期期间的温暖程度较 20 世纪低。

4 中国过去 2000 年的主要暖期及其与北半球的异同

4.1 温度变化重建结果的评估

20 世纪初起，竺可桢等开始利用中国历史文献研究中国历史时期的冷暖变化，并于 1972 年重建了中国过去 5000 年温度变化基本轮廓^[41]。20 世纪 70 年代以后，又有多位学者利用史料重建了中国东部过去 2000 年温度变化^[42-48]；并利用树轮^[49-53]、孢粉^[54]、冰芯^[55-57]、石笋^[58]、湖泊沉积物^[59-61]等自然证据重建了中国各地（特别是东北、华北北部、西北和青藏高原等地）的过去 2000 年温度变化；同时集成各种代用证据重建了全国范围的过去 2000 年温度变化^[62-65]，分析了冷暖变化的主要特征及其区域差异^[66-67]。

表 4 2008 年后新建温度变化序列揭示的最暖历史时段及其与 20 世纪温暖程度的对比
Tab. 4 Comparison on the warmth of centennial warm periods before the 20th century and the 20th century revealed by proxy-based NH temperature change series from publications since 2008

序列	各阶段最暖百年起讫年份及其温度距平/℃			各阶段最暖 30 年起讫年份及其温度距平/℃		
	1-270 年	841-1290 年	1901-2000 年	1-270 年	841-1290 年	1901-2000 年
LM08 ^①	81-180/0.09	841-940/0.47		91-120/0.16	854-883/0.64	
M08cps		997-1096/0.07	0.22		1043-1072/0.15	1971-2000/0.35
M08eiv		963-1062/0.47	0.23		962-991/0.52	1971-2000/0.48
M09f		961-1060/0.24	0.13		854-883/0.33	1971-2000/0.32
M09s		960-1059/0.31	0.13		962-991/0.38	1971-2000/0.32
Lj10	81-180/0.25	941-1030/0.29	0.16	151-180/0.31	951-980/0.37	1971-2000/0.25
MW11		998-1097/0.65	0.24		1023-1052/0.74	1971-2000/0.45
CL12 ^②	32-131/0.38	932-1031/0.79	0.66	1443/0.54	969-998/1.15	1936-1965/1.16

注：①原序列数据仅覆盖至 1950 年，故无法给出 20 世纪及其暖峰的温度距平；但该序列作者认为历史上最暖时段较 20 世纪更暖。②原序列数据仅覆盖至 1973 年，20 世纪的最暖时段温度距平为根据校准时段的温度距平推算结果。表中所有温度距平皆相对于各序列 1851-1950 年均值。

根据已发表的中国各地23条温度变化代用(包括源于历史文献、树轮、石笋、冰芯及湖泊沉积等多种资料)序列,葛全胜^[67]等采用包络法对中国过去2000年温度变化进行了分

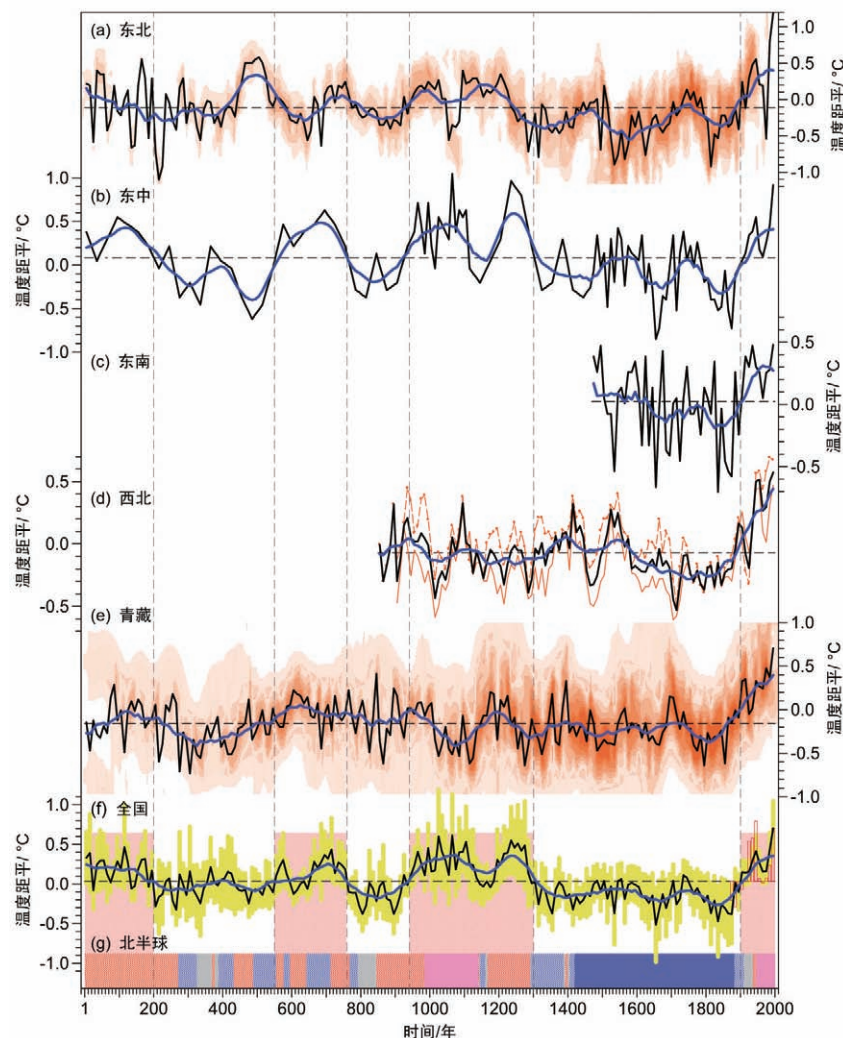


图3 过去2000年中国温度变化

(a) 东北部; (b) 东中部 (引自文献^[67]); (c) 东南部 (引自文献^[67]); (d) 西北部; (e) 青藏; (f) 全国; 黑线: 年代温度距平 (距1851-1950年均值); 兰线: 100年平滑; 虚线: 序列均值。其中 (a) 和 (e) 图中的棕红色阴影区为采用包络法对该区温度变化代用序列的评估结果, 颜色越深, 表示可信性越大。(d) 图中的棕红色线为祁连山北坡中部 (实线)^[51]和西段 (点虚线)^[69]森林上限树轮宽度指示的温度变化。(f) 黄色阴影区: 95%信度的不确定性范围; 红柱: 用于重建的校准时段温度观测记录 (引自文献^[71]); 浅粉色时段: 全国序列指示的百年尺度暖期。(g) 北半球的冷暖期 (同图2)。

Fig. 3 Temperature change series in China for the past 2000 years.

(a) Northeast. (b) Central east^[67]. (c) Southeast^[67]. (d) Northwest. (e) Tibetan Plateau. (f) Whole China. Black line: decadal temperature anomaly ($^{\circ}\text{C}$, with referee to mean of 1851-1950). Blue line: 100-year adjacent averaging smooth. Dash line: mean of the series for all periods. Contour shades in plate (a) and (e): uncertainty ranges and overlap revealed by the envelope analysis for all proxy-based temperature change series from different publications. (d) Orange line: temperature change series derived from the tree-ring width chronology for the trees lived around upper tree-line in the central (solid line)^[51] and western (dot dash line)^[69] of Qilian Mountains. (f) Yellow shades: uncertainty ranges at 95% confidence level; Red bar: decadal mean temperature anomaly for whole China derived from instrumental observations^[71]. Pink bar: the centennial warm/cold periods revealed by temperature change series for whole China. (g) The synthesis of the centennial warm/cold periods revealed by NH temperature series shown in Fig. 2.

区(东北部、东中部、东南部、西北部及青藏高原)评估,得到了各区包络得分(指示可信度)最高的温度变化序列(图 3);这里我们又根据新近发表的序列,对其中东北部(图 3a)、西北部(图 3d)及青藏高原(图 3e)三个区域的温度变化进行了重新评估。其中,东北部除金川泥炭沉积的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录^[68]以及根据北京石花洞石笋纹层厚度重建的夏季温度和根据历史文献重建的华北与山东温度变化外,又新增了四海龙湾(42°17'N, 126°36'E, 791 m)暖季温度序列,该序列根据湖泊纹层沉积中长链烯酮(Alkenone)重建,定年误差较小,时间分辨率较高^[61];但去掉了时间分辨率较粗(18-42 年)的岱海孢粉记录序列^[54]。西北部地区,除利用新增的树轮样本将原来的祁连山北坡中部序列延至公元 900 年外,又新增了祁连山北坡西段公元 850 年来森林上限树轮轮宽年表。在青藏高原共使用了 8 条代用序列,除保留过去 2000 年高原 4 个冰芯的 $\delta^{18}\text{O}$ 合成序列^[56]、公元 1050 年来青海湖沉积物的总有机碳含量(TOC)记录^[59]和公元 1000 年以来青海乌兰的森林上限树轮轮宽年表^[52]外,又新增了马兰冰芯 1130 年来的 $\delta^{18}\text{O}$ 序列^[57]和利用青海湖沉积中长链烯酮重建的过去 2000 年温度变化序列^[60];并将青海乌兰的森林上限树轮轮宽年表延长至公元 400 年^[53];同时去掉了代用指标存在争议的苏干湖沉积碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录^[69]。这些代用资料的增加与更新改善了这三个区域温度代用序列的覆盖度及区域温度变化评估结果的代表性。图 3 显示,中国境内各个区域间的冷暖变化过程及其变幅大小虽不完全一致,但相关分析(表 5)显示各区域间的年代温度序列显著相关,说明各区域间冷暖变化具有相似性。

4.2 中国过去 2000 年的主要暖期及其与北半球的异同

为划分全国过去 2000 年冷暖变化阶段,本文以据观测记录重建的 1870 年代以来全国平均温度变化序列^[71]为校准序列,采用偏最小二乘回归方法(其中校准方程采用留一法验证)^[71]将各区温度变化序列校准为全国温度序列(图 3f)。结果显示:公元 1-200 年、551-760 年、941-1300 年及 20 世纪气候相对温暖,其他时段则相对寒冷。在这些温暖阶段中,941-1300 年间最暖百年和最暖 30 年(暖峰)的温度略高于 20 世纪,551-760 年间的最暖百年与 20 世纪基本相当,1-200 年间最暖百年的温暖程度则较 20 世纪略低(表 6)。其中在东北部,20 世纪世纪的温暖程度与历史上最暖百年(441-540 年)基本相当;东中部,20 世纪世纪的温暖程度较历史上的最暖

表 5 中国各区域间年代温度变化的相关系数
Tab. 5 Correlation coefficients between regional temperature change series in China
(Mark *, **, *** indicate the correlation passed significant level of 0.1, 0.05 or 0.01 respectively)

区域	东中部	东南部	西北部	青藏高原
东北部	0.138**	0.320**	0.231**	0.243**
东中部		0.464**	0.271**	0.246**
东南部			0.256*	0.352**
西北部				0.428**

*、**、*** 表示显著性水平超过 0.1、0.05 和 0.01

表 6 中国境内各区域历史上的最暖百年及其暖峰(30 年)与 20 世纪温暖程度的对比
Tab. 6 Comparison on the warmth of centennial warm periods before the 20th century and the 20th century revealed by regional temperature change series in China

区域	各阶段最暖百年起迄年代及其温度距平/℃				各阶段最暖 30 年起迄年代及其温度距平/℃			
	1-200 年	401-850 年	851-1300 年	1901-2000 年	1-200 年	401-850 年	851-1300 年	1901-2000 年
东北	31-130/0.03	441-540/0.38	1091-1190/0.20	0.33	31-60/0.37	491-520/0.55	1091-1120/0.29	1971-2000/0.48
		691-780/0.09	951-1050/0.15			741-770/0.16	1001-1030/0.20	
东中	71-170/0.44	641-740/0.50	1201-1300/0.63	0.34	91-120/0.52	681-710/0.59	1231-1260/0.91	1971-2000/0.54
			1011-1110/0.49				1061-1090/0.69	
东南				0.29				1911-1940/0.39
西北			891-980/0.04	0.27			921-950/0.14	1971-2000/0.46
			1051-1150/0.0				1081-1110/0.13	
青藏	71-170/0.01	581-680/0.08	1151-1250/0.0	0.30	71-100/0.09	601-630/0.19	1201-1230/0.10	1971-2000/0.52
			891-990/0.0				891-910/0.08	
全国	31-130/0.23	661-760/0.27	1191-1290/0.39	0.29	91-120/0.31	691-720/0.37	1231-1260/0.51	1971-2000/0.43
			1021-1120/0.38				1081-1110/0.44	

说明:表中所有温度距平皆相对于各序列 1851-1950 年均值。

百年(1201-1300年)低;但在青藏高原和西北地区,20世纪的温暖程度则超越了历史最暖百年。

对比图3和图2可以看出:在百年尺度上,中国过去2000年的冷暖阶段波动与北半球基本一致,特别是公元1-200年和941-1300年的温暖分别与罗马暖期和中世纪暖期对应;201-550年和1301-1900年的寒冷分别与黑暗时代冷期前半段和小冰期对应;但各个阶段的起讫年代则存在一定差异。与北半球多数序列揭示的百年尺度冷暖阶段起讫时间比,出现在中国的公元1-200年暖期约较北半球早70年结束,941-1300年暖期约较北半球期晚100年开始。此外,中国551-760年的温暖虽也与黑暗时代冷期后期的相对温暖对应,但其间中国的温暖程度更为显著。中国在761-940年间,气候总体上寒冷,但多数序列显示其间北半球并不寒冷。这些差异既可能是气候变化的区域差异所致,也可能与重建结果的不确定性(特别是代用资料定年误差和代用指标的指示意义及其定量程度等因素)有关。

5 结论与讨论

5.1 结论

揭示过去2000年温度年代一百年尺度的变化过程及空间差异,是辨识当前气候增暖在更长时段内是否异常的科学基础,也是科学界、甚至社会各界关注的焦点问题。本文结合全球(特别是北半球)及中国过去2000年温度变化的研究结果,分析了北半球与中国过去2000年冷暖变化的阶段性及历史上百年尺度暖期与20世纪温暖程度的差别,得到以下结论。

(1) 在百年尺度上,北半球过去2000年可划分为公元1-270年、841-1290年和1911年以后3个暖期,以及271-840年和1291-1910年2个冷期。上述冷暖阶段分别与罗马暖期、黑暗时代冷期、中世纪暖期、小冰期以及20世纪增暖大致对应,但各阶段的起讫时间与Lamb定义的时段存在一定差别。

(2) 20世纪的温暖程度在过去2000年中并非空前。多数序列显示中世纪期间的最暖百年和最暖的30年(暖峰)的温暖程度均与20世纪及其暖峰持平或较其更高,即其温暖程度至少与20世纪相当。在覆盖至公元初的3个北半球温度变化序列中,1个序列显示罗马暖期期间最暖百年和最暖30年的温暖程度与20世纪及其暖峰的温暖程度基本一致,2个序列则显示略低。271-840年虽总体偏冷,但因冷暖相间,故其寒冷程度不及1291-1910年。

(3) 从全国平均看,中国与北半球百年尺度的冷暖波动阶段基本一致,仅起讫年代存在一定差异。公元1-200年、551-760年、941-1300年及20世纪气候相对温暖,其他时段则相对寒冷。中国941-1300年间的最暖百年和最暖30年(暖峰)的温度也略高于20世纪,551-760年间的最暖百年与20世纪基本相当,但1-200年间最暖百年的温暖程度则较20世纪略低。中国551-760年的温暖虽也与黑暗时代冷期后期的相对温暖对应,但其间中国的温暖程度更为显著;中国在761-940年间,气候总体上寒冷,但多数序列显示其间北半球并不寒冷。

5.2 讨论

尽管随着研究的深入,不同作者对过去2000年冷暖变化(特别是百年尺度)认识的分歧已在逐步缩小;但迄今为止,对一些重要问题(如冷暖阶段的起止年代、冷暖程度及区域间温度变化的同步性)的认识尚存在差异;我国过去2000年冷暖变化过程与北半球也存在一定程度的不一致。这些差异既可能是气候变化的区域差异所致,也可能与重建结果的不确定性(特别是代用资料定年误差和代用指标的指示意义及其定量程度等因素)有关。因此,继续获取高精度代用资料,改进气候变化重建技术方法,降低重建结果的不确定性,深入揭示区域气候变化的动力学机制,仍是本领域研究今后努力的一个主要方向。

参考文献 (References)

- [1] PAGES. Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No.57. IGBP Secretariat, Stockholm. 2009. 67pp.
- [2] Hughes M K, Diaz H F. Was there a medieval warm period, and if so, where and when? *Climatic Change*, 1994, 26 (2-3): 109-142.
- [3] Diaz H F, Trigo R, Hughes M K et al. Spatial and temporal characteristics of climate in Medieval Times revisited. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92: 1487-1500.
- [4] Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X et al. General characteristics of climate changes during the past 2000 years in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2012, doi: 10.1007/s11430-012-4370-y.
- [5] Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Progress on the study of the forcing and impacts of the warm periods in China during the past 2000 years. *Geographical Research*, 2012, 31(4): 769. [葛全胜, 郑景云. 过去 2000 年全球典型暖期的形成机制及其影响研究进展. *地理研究*, 2012, 31(4): 769.]
- [6] Brooks C E P. *The Evolution of Climate*. London: Benn Brothers, 1922, 173pp.
- [7] Lamb H H. The early medieval warm epoch and its sequel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1965, 1 (1): 13-37.
- [8] Lamb H H. *Climate: Present, Past and Future*. Vol. 2: *Climatic History and the Future*. London: Methuen, 1977, 837pp.
- [9] Patterson W P. Stable isotopic record of climatic and environmental change in continental settings [D]. University of Michigan, 1995.
- [10] Bianchi G G, McCave I N. Holocene periodicity in North Atlantic climate and deep-ocean flow south of Iceland. *Nature*, 1999, 397: 515-517.
- [11] Patterson W P, Dietrich K A, Holmden C et al. Two millennia of North Atlantic seasonality and implications for Norse colonies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 2010, 107(12): 5306-5310, doi: 10.1073/pnas.0902522107.
- [12] IPCC. *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*. Houghton J, Jenkins G J, Epharums J J eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1990: 201-205.
- [13] Bradley R S, Jones P D. "Little Ice Age" summer temperature variations: Their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene*, 1993, (3): 367-376.
- [14] Jones P D, Mann M E. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 2004, 42(2): 1-42.
- [15] Jones P D, Briffa K R, Osborn T J et al. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *The Holocene*, 2009, 19(1): 3-49.
- [16] IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M et al eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007: 466-482.
- [17] Mann M E, Bradley R S, Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(6): 759-762.
- [18] Mann M E, Jones P D. Global surface temperatures over the past two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(15): 1820, doi: 10.1029/2003GL017814.
- [19] Briffa K R. Annual climate variability in the Holocene: Interpreting the message of ancient trees. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 87-105.
- [20] Briffa K R, Osborn T J, Schweingruber F H. Large-scale temperature inferences from tree rings: A review. *Global Planet Change*, 2004, 40: 11-26.
- [21] Jones P D, Briffa K R, Barnett T P et al. High resolution palaeoclimatic records for the last millennium: interpretation, integration and comparison with general circulation model control-run temperatures. *The Holocene*, 1998, 8(4): 455-471.
- [22] Jones P D, Osborn T J, Briffa K R. The evolution of climate over the last millennium. *Science*, 2001, 292: 662-667.
- [23] Hegerl G C, Crowley T J, Hyde W T et al. Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. *Nature*, 2006, 440: 1029-1032.
- [24] Esper J, Cook E R, Schweingruber F H. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*, 2002, 295: 2250-2253.
- [25] Cook E R, Esper J, D'Arrigo R. Extra-tropical Northern Hemisphere land temperature variability over the past 1000 years. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23(20-22): 2063-2074.
- [26] D'Arrigo R, Wilson R, Jacoby G. On the long-term context for late twentieth century warming. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(D3), doi: 10.1029/2005JD006352.

- [27] 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: 613-617.
- [28] Bradley R S, Hughes M K, Diaz H F. Climate in Medieval Time. *Science*, 2003, 302: 404-405, doi: 10.1126/science.1090372.
- [29] Osborn T J, Briffa K R. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years. *Science*, 2006, 311: 841-844.
- [30] Soon W, Baliunas S, Idso C et al. Reconstructing climatic and environmental changes of the past 1000 years: Reappraisal. *Energy & Environment*, 2003, 14(2/3): 233-296.
- [31] Loehle C. A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies. *Energy & Environment*, 2007, 18: 1049-1058.
- [32] Loehle C, McCulloch J H. Correction to: A 2000-year global temperature reconstruction based on non-tree ring proxies. *Energy & Environment*, 2008, 19: 93-100.
- [33] Mann M E, Zhange 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: 13252-13257.
- [34] Mann M E, Zhange 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Wanner H, Beer J, Bütikofer J et al. Mid- to late Holocene climate change: An overview. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 1791-1828.
- [39] Bürger G. On the verification of climate reconstructions. *Climate of the Past*, 2007, 3: 397-409.
- [40] 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.
- [41] Chu Ko-chen. A preliminary study on the climatic fluctuations during the last 5000 years in China. *Acta Archaeologica Sinica*, 1972, (1): 15-38. [竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. *考古学报*, 1972, (1): 15-38.]
- [42] Zhang Piyuan, Gong Gaofa. Some characteristics of climatic fluctuations in China since the 16th century. *Acta Geographica Sinica*, 1979, 34(3): 238-247. [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.]
- [43] Zhang Piyuan. *Climate Changes in China during Historical Times*. Jinan: Shandong Science & Technology Press, 1996: 195-440. [张丕远. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 1996: 195-440.]
- [44] Zhang D E. Winter temperature changes during the last 500 years in South China. *Chinese Science Bulletin*, 1980, 25 (6): 497-500.
- [45] Zheng Sizhong. Climate and its effect on food production during the Little Ice Age in Guangdong Province. *Chinese Science Bulletin*, 1982, 27(10): 1081-1084.
- [46] Wang S W, Wang R S. Reconstruction of temperature series of North China from 1380s to 1980s. *Science in China: Series B*, 1991, (6): 751-759.
- [47] Wang Shaowu, Wang Risheng. Variations of seasonal and annual temperatures during 1470-1978AD in eastern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 48(1): 26-35. [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.]
- [48] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Fang Xiuqi et al. Reconstruction and analysis on the series of winter-half-year temperature changes over the past 2 000 years in eastern China. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 169-181. [葛全胜, 郑景云, 方修琦等. 过去2000a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.]
- [49] Shao Xuemei, Wu Xiangding. Reconstruction of climate change on Changbai Mountain, Northeast China using tree-ring data. *Quaternary Sciences*, 1997, (1): 77-85. [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): 77-85.]
- [50] Shao Xuemei, Fan Jinmei. Past climate on west Sichuan Plateau as reconstructed from ring-widths of dragon spruce. *Quaternary Sciences*, 1999, (1): 81-89. [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): 81-89.]
- [51] Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei et al. Temperature variations recovered from tree-rings in the middle Qilian

- Mountain over the last millennium. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 48(4): 521-529.
- [52] Zhu H F, Zheng Y H, Shao X M et al., Millennial temperature reconstruction based on treering widths of Qilian juniper from Wulan, Qinghai Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53: 3914-3920.
- [53] Shao X M, Xu Y, Yin Z Y et al. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29: 2111-2122, doi: 10.1016/j.quascirev.2010.05.005.
- [54] Xu Qinghai, Xiao Jule, Toshio Nakamura et al. Climate changes of Daihai basin during the past 1 500 from a pollen record. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(3): 341-347. [许青海, 肖举乐, 中村俊夫 等. 2004. 孢粉记录的岱海盆地1500年以来气候变化. 第四纪研究, 2004, 24(3): 341-347.]
- [55] Yao T D, Qin D H, Xu B Q et al. Temperature change over the past millennium recorded in ice cores from the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(3): 99-103. [姚檀栋, 秦大河, 徐柏青 等. 2006. 冰芯记录的过去1000a青藏高原温度变化. 气候变化研究进展, 2006, 2(3): 99-103.]
- [56] Thompson L G, Thompson E M, Brecher H et al. Abrupt tropical climate change: Past and present. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103: 10536-10543.
- [57] Wang N L, Yao T D, Pu J C et al. Climatic and environmental changes over the last millennium recorded in the Malan ice core from the northern Tibetan Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1079-1089.
- [58] Tan M, Liu T S, Hou J Z et al. Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(20): 1617, doi: 10.1029/2003GL017352.
- [59] Shen Ji, Zhang Eenlou, Xia Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 year. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508-513. [沈吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 2001, 21(6): 508-513.]
- [60] Liu Z H, Henderson A C G, Huang Y S. Alkenone-based reconstruction of late-Holocene surface temperature and salinity changes in Lake Qinghai, China. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L09707, doi: 10.1029/2006GL026151.
- [61] Chu G Q, Sun Q, Wang X H et al. Seasonal temperature variability during the past 1600 years recorded in historical documents and varved lake sediment profiles from northeastern China. *The Holocene*, 2012, 22: 785-792.
- [62] Wang S W, Gong D Y. Climate in China during the four special periods in Holocene. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(5): 379-386.
- [63] Ge Quansheng, Fang Xiuqi, Zheng Jingyun. Warm-cold change in millenarian cycle derived from natural proxy data in china during the past 3000 years. *Advance in Earth Sciences*, 2002, 17(1): 96-103. [葛全胜, 方修琦, 郑景云. 中国过去3ka冷暖千年周期变化的自然证据及其集成分析. 地球科学进展, 2002, 17(1): 96-103.]
- [64] Yang Bao, Braeuning A, Johnson K R et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 381-384.
- [65] Ge Q S, Wang S B, Zheng J Y. Reconstruction of temperature series in China for the last 5000 years. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(8): 838-845.
- [66] Ge Quansheng. *The Climate Change in China during the Past Dynasties*. Beijing: Science Press, 2011, 705pp. [葛全胜. 中国历朝气候变化. 北京: 科学出版社, 2011: 705pp.]
- [67] Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Hao Zhixin et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37: L03703, doi: 10.1029/2009GL041281.
- [68] Hong Y T, Liu D S, Jiang H B et al. Evidence for solar forcing of climate variation from $\delta^{18}\text{O}$ of peat cellulose. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 2000, 43(2): 217-224.
- [69] Holmes J A, Zhang J W, Chen F H et al. Paleoclimatic implications of an 850-year oxygen-isotope record from the northern Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L23403, doi: 10.1029/2007GL032228.
- [70] Tang Guoli, Ding Yihui, Wang Shaowu et al. Comparative analysis of the time series of surface air temperature over China for the last 100 years. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(2): 71-78. [唐国利, 丁一汇, 王绍武 等. 中国近百年温度曲线的对比分析. 气候变化研究进展, 2009, 5 (2): 71-78.]
- [71] Hoskuldsson A. PLS regression methods. *Journal of Chemometrics*, 1988, 2: 211-228.

General characteristics of temperature change and centennial warm periods during the past 2000 years

GE Quansheng¹, LIU Jian^{2, 3}, FANG Xiuqi^{4, 1}, YANG Bao⁵,
HAO Zhixin¹, SHAO Xuemei¹, ZHENG Jingyun¹

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;*

3. *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China;*

4. *School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

5. *Institute of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering, CAS, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: The characteristics of warm/cold fluctuation for Northern Hemisphere (NH) and China during the past 2000 years were analyzed using the proxy-based temperature change series published recently. The duration of centennial warm periods before the 20th century and the difference between the warmth of the 20th century and the centennial warm periods that occurred prior to the 20th century were also investigated. The conclusions are summarized as follows: (1) Most of proxy-based NH temperature series show that the warm climate occurred in the periods of AD 1-270, 841-1290 and 1911-2000. In general, it was cool with multi-decadal temperature fluctuations from 271 to 840, and cold from 1291 to 1910. These centennial periods of warm/cold fluctuation over NH are corresponding to the Roman Warm Period (the 1st century BC to the mid-4th century AD), Dark Age Cold Period (the end of 4th century to the early of 10th century AD), Medieval Warm Period (the mid-10th century to the end of 13th century AD), Little Ice Age (the 15th to 19th century) and Warming Period in the 20th century illustrated by Lamb respectively. But they have different durations between the NH centennial warm/cold periods and those Warm/Cold Periods identified by Lamb. (2) The duration and amplitude of regional centennial phases of warm/cold fluctuation are different in China, but the timing of centennial periods of warm/cold over whole China, i.e. warm in AD 1-200, 551-760, 941-1300, 1901-2000 and cold in the others, which are consistent with that observed in NH approximately. (3) Most of proxy-based NH temperature change series show that the warmth in Medieval Warm Period is at least comparable to that during the Warming Period in the 20th century. The warmest 100-year and 30-year (i.e., warm peak duration) for whole China occurred in the periods of 941-1300 during the past 2000 years, which are slightly higher than in the 20th century respectively. Moreover, the temperature anomalies in the warmest 100-year and 30-year for whole China that occurred in the periods of 571-760 and 1-200 are comparable to and a little lower in the 20th century respectively.

Key words: temperature change; centennial warm period; the past 2000 years; Northern Hemisphere; China