中国科学: 地球科学 2011 年 第 41 卷 第 9 期: 1233 ~ 1241
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

中国过去 2000 年温度变化速率

葛全胜, 张学珍, 郝志新, 郑景云*

中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

* 联系人, E-mail: zhengjy@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2010-09-28; 接受日期: 2010-12-27

中国科学院知识创新工程方向项目(编号: KZCX2-YW-Q1-01)、全球变化研究国家重大科学研究计划(编号: 2010CB950101)、国家自然科学基金(批准号: 40625002)和中国科学院地理科学与资源研究所自主部署创新基金(编号: 200905006)资助

摘要 利用 24 条温度变化代用序列, 分析了中国过去 2000 年温度在百年与 30 a 两个尺度上的变化速率及过去 500 年 10 a 尺度的温度变化速率. 结果表明: 从全国平均看, 在百年尺度上, 20 世纪的升温速率为(0.6±1.6)℃/100 a (95%的置信区间, 下同); 在过去 500 年中, 最大升温速率为(1.1±1.2)℃/100 a, 出现在小冰期向 20 世纪暖期的转换过程中, 且这一升温速率可能也是过去 2000 年中最大的. 在 30 a 尺度上, 尽管 20 世纪期间全国平均升温显著, 但其最大升温速率仍小于历史时期的最大升温速率(分别出现在小冰期末至 20 世纪初及公元 270s~320s). 在 10 a 尺度上, 20 世纪末的升温虽非常明显, 但在过去 500 年中却并非空前. 而且, 最大升温速率的出现时间、持续长度与幅度大小存在区域差异; 其中在百年尺度上, 东北部地区过去 2000 年的最快升温出现在公元 180s~350s, 青藏高原出现在 260s~410s 和 500s~660s. 降温方面, 小冰期期间出现的最快百年和 30 a 尺度降温在过去 2000 年中也并非史无前例. 20 世纪期间, 全国平均的 10 a 尺度最快降温出现在 1940s~1950s, 速率为(–0.3±0.6)℃/10 a, 与 20 世纪前的最快降温大致相当; 且各区域 20 世纪期间最大降温速率皆未超过历史时期的最大速率.

关键词
中国
过去 2000 年
温度变化速率

过去 2000 年是国际过去全球变化研究计划(PAGES)关注的重点时段. 研究这一时段的温度变化, 对揭示气候的自然变率与成因机制和预估未来气候情景等均具有极为重要的意义[1], 且有助于客观认识 20 世纪增暖的历史地位, 是政府间气候变化专门委员会(IPCC)关注的重要内容之一. 目前, 科学界已重建了许多全球、半球和区域尺度的过去千年温度变化序列[2~4], 并已进行了多次较系统的评估, 但认识尚存在明显分歧. 如, 美国国家研究理事会的《过去 2000 年地表温度重建》[5]指出: 现有的大范围温度重建结果所揭示的过去千年温度变化趋势基本一致, 其中公元 1000 年前后气候相对温暖、1700 年前后气候寒冷; 并认为"20 世纪最后数十年的全球平均温度是过去 400 年来最高"的认识具有高可信度(a high level of confidence); 而 900~1600 年的重建结果可信度较低. 而 IPCC 第四次评估报告(AR4)指出: 20 世纪后半叶北半球平均温度很可能比近 500 年中任何一个 50 年时段的平均温度都高, 且可能至少在最近 1300 年中是最高的[6]; 同时过去 100 年(1906~2005 年)的升温速率已达(0.74±0.18)℃/100 a, 并认为自 20 世

英文引用格式: Ge Q S, Zhang X Z, Hao Z X, et al. Rates of temperature change in China during the past 2000 years. Sci China Earth Sci, 2011, doi: 10.1007/s11430-011-4257-3

纪中叶以来大部分已观测到的全球平均温度的升高很可能(即90%以上的可能性)是由于观测到的人为温室气体浓度增加所导致[7]. 那么, 类似20世纪的快速升温在历史时期、特别是过去 2000 年是否发生过? 这一问题虽关系到对 20 世纪增暖驱动力的辨识, 也极为重要, 但目前却未见深入研究.

在中国, 温度变化重建在过去数十年中取得显著进展. 利用历史文献[8~15]、树轮[16,17]、石笋[18]、冰芯[19]和湖泊沉积[20~24]等代用证据, 学者们已重建了多条长达 500~2000 年的区域温度变化序列. 对这些重建结果的不确定性分析表明[25]: 在一些区域, 20 世纪最后数十年的温暖程度在过去 500 年中是空前的, 然而 10~14 世纪的温暖程度可能与 20 世纪最后数十年相当. 本文拟利用这些区域温度变化代用序列, 对温度变化速率的古、今差异及其不确定性进行评估.

1 资料与方法

本文共采用 24 条区域温度变化代用序列(表 1), 其中包括文献[25]中所用的 23 条, 并新增了红原泥炭的 $\delta^{18}O$ 含量序列(即表 1 的 TB2), 该序列指示年平均温度[22]. 本文依据各序列所代表的空间范围, 将24 条序列分为 5 组, 其中东北部地区 5 条, 东中部地区 8 条, 东南部地区 5 条, 西北部地区 1 条, 青藏高原 5 条(图 1). 这些序列虽然源于树轮、历史文献、石笋、冰芯和湖泊沉积等不同代用资料, 但它们均能定量指示温度变化; 如表 1 所示, 其中 9 条指示年均温度变化[8,19,20,22,23], 其余的序列指示季节温度变化[9~18,21,24]. 此外, 我们此前的研究[25]还发现, 在年际尺度上, 这些序列所指示的季节温度变化对年温度变化的方差解释量达 44%~90%(表 2).

虽然这 24 条序列时间分辨率不一, 但多数序列为 10 a 或更高, 故本文将所有序列的时间分辨率同化为 10 a. 即对分辨率高于 10 a 的树轮和石笋等序列, 直接计算年代平均值; 对分辨率低于 10 a 的湖泊与泥炭沉积序列, 采用线性内插方法按年代进行插值. 同时为同化各代用序列的量纲, 以便进行序列间的比较, 还以各区所有序列的共有时段为基准, 按区域对各序列进行标准化处理. 其中东北部地区的基准时段为 1470s~1950s, 东中部和东南部地区为 1500s~

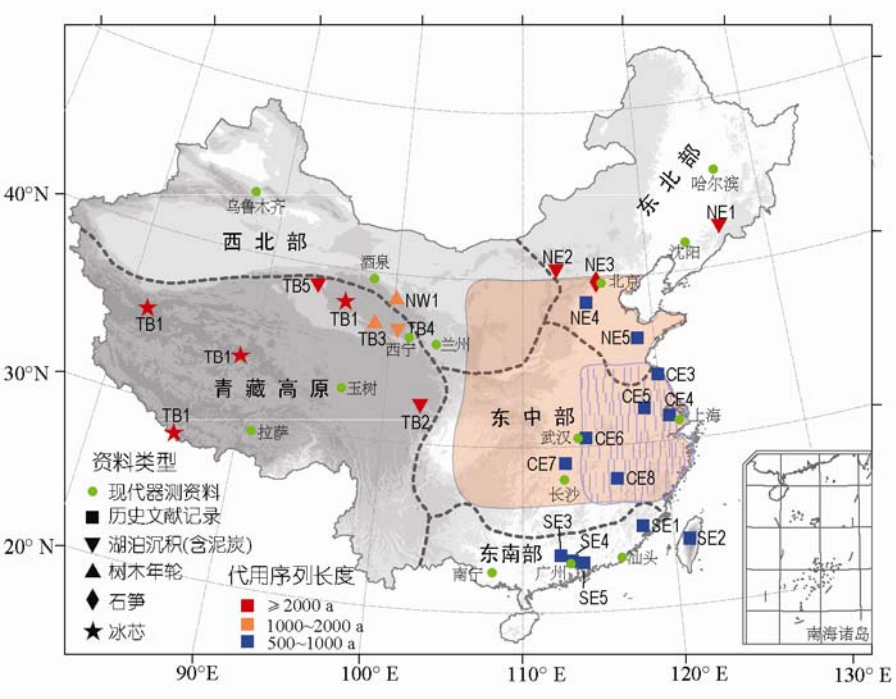

图 1 中国温度变化分区及本文所用代用序列的空间分布、资料类型、序列长度与器测温度的站点分布

浅棕色区域为 CE1 序列[10], 其中带有竖线的区域为 CE2 序列[11]; 各序列的详细信息见表 1; 温度变化分区是采用因子分析方法, 通过对器测温度资料分析而得到的, 详见文献[25]; 图中灰色阴影由浅至深指示由低至高的海拔高度

表 1 本研究采用的代用序列详细信息

代用资料类型 a)	采样地点和区域	代用指标及其气候学意义	序列起、止年	时间分辨率(a)	参考文献	在图 1 中的标号 b)
东北部(5 条序列)						
SD	金川泥炭 (42.33°N, 126.37°E)	$\delta^{18}O‰$, 年平均温度	3965 BC~AD 1950	10~100	[20]	NE1
SD	岱海 (40.57°N, 112.68°E)	孢粉含量, 7 月平均温度	9748 BC~AD 1950	18~42	[21]	NE2
ST	石华洞 (39.80°N, 115.80°E)	石笋微层厚度, 5~8 月平均温度	665 BC~AD 1985	1	[18]	NE3
HD	华北 (40.00°N, 118.00°E)	冷暖程度文字描述, 年平均温度	1380s~1990s	10	[8]	NE4
HD	山东 (36.63°N, 117.00°E)	冷暖年频数, 冬季平均温度	1470s~1980s	10	[9]	NE5
东中部(8 条序列)						
HD	华东 (25~40°N, 105°E 以东)	物候记录, 冬半年平均温度	1~2000	10~30	[10]	CE1
HD	华东 (25~35°N, 115~120°E)	冬季寒冷指数, 冬季温度	1470s~1970s	10	[11]	CE2
HD	华东 (34.00°N, 120.00°E)	冷暖程度文字描述, 年平均温度	1380s~1990s	10	[8]	CE3
HD	太湖 (31.50°N, 120.50°E)	极端冷、暖冬季年数, 冬季平均温度	1380s~1970s	10	[12]	CE4
HD	长江下游 (32.10°N, 118.80°E)	冬温指数, 冬季平均温度	1470s~1960s	10	[13]	CE5
HD	长江中游 (30.50°N, 114.50°E)	冬温指数, 冬季平均温度	1470s~1960s	10	[13]	CE6
HD	华中 (29.00°N, 113.00°E)	冷暖程度文字描述, 年平均温度	1470s~1990s	10	[8]	CE7
HD	湖南和江西 (28.00°N, 116.50°E)	冬温指数, 冬季平均温度	1470s~1960s	10	[13]	CE8
东南部(5 条序列)						
HD	浙江和福建 (25.00°N, 118.00°E)	冬温指数, 冬季平均温度	1470s~1960s	10	[13]	SE1
HD	福建和台湾 (24.00°N, 121.00°E)	冷暖程度文字描述, 年平均温度	1500s~1990s	10	[8]	SE2
HD	广东和广西 (23.50°N, 112.50°E)	冬温指数, 冬季平均温度	1470s~1960s	10	[13]	SE3
HD	广东 (23.16°N, 113.23°E)	寒冬记录数, 冬季平均温度	1400s~1940s	10	[14]	SE4
HD	华南 (23.00°N, 114.00°E)	冷暖程度文字描述, 年平均温度	1500s~1990s	10	[8]	SE5
青藏高原(5 条序列)						
IC	达索普、敦德、古里雅和普若岗日	$\delta^{18}O‰$, 年平均温度	1~2000	10	[19]	TB1
SD	红原泥炭 (32.77°N, 102.50°E)	$\delta^{18}O‰$, 年平均温度	4170 BC~AD 1950	30	[22]	TB2
TR	青海乌兰地区 (37.05°N, 98.67°E)	树轮宽度, 9 月~次年 4 月温度	1000~2004	1	[16]	TB3
SD	青海湖 (36.60°N, 100.50°E)	总有机碳(TOC)含量, 年平均温度	1050~2000	20	[23]	TB4
SD	苏干湖 (38.85°N, 93.90°E)	$\delta^{13}C‰$, 冬半年温度	1~2000	9~11, 42	[24]	TB5
西北部(1 条序列)						
TR	祁连山北坡中段 (38.43°N, 99.93°E)	树轮宽度, 12 月~次年 4 月温度	1066~1999	3	[17]	NW1

a) SD, 湖泊沉积和泥炭; ST, 石笋; HD, 历史文献; TR, 树木年轮; IC, 冰芯; b) 在图 1 中的标号由两部分组成: 代用序列的归属区域和在该区域的顺序号

表 2　部分代用序列的参考站点的季节平均温度对年均温的方差解释量 [a)]

区域	代用序列	参考站点	参考季节(或月份)	对区域年均温的方差解释量(%)
东北部	NE3	北京(39°48′N, 116°28′E)	5~8 月	58
	NE2	呼和浩特(40°49′N, 111°41′E)	7 月	44
	NE5	济南(36°41′N, 119°59′E)	冬季	86
东中部	全部序列	长沙(28°12′N, 113°05′E)	冬季	76
		杭州(30°14′N, 120°10′E)		85
		南京(32°00′N, 118°48′E)		85
		武汉(30°37′N, 114°08′E)		90
东南部	全部序列	厦门(24°29′N, 118°04′E)	冬季	85
		广州(23°10′N, 113°20′E)		88
		韶关(24°41′N, 113°36′E)		85
		桂林(25°19′N, 110°18′E)		90
青藏高原	TB5	冷湖(38°45′N, 93°20′E)	冬季	77
	TB3	都兰(36°18′N, 98°06′E)	9 月~次年 4 月	88
西北部	NW1	张掖(38°56′N, 100°26′E)	12 月~次年 4 月	81

a) 东中部和东南部区域内的代用序列一般代表较大的空间范围, 在此我们选取了 4 个代表性站点

1940s, 西北部地区为 1060s~1990s, 青藏高原为 1050s~1990s. 并通过各区域代用序列与器测温度序列的方差匹配, 计算得到各区域代用序列单位标准值所对应的温度值: 东北部地区为 0.64℃, 东中部地区为 0.41℃, 东南部地区为 0.42℃, 西北部地区为 0.68℃, 青藏高原为 0.44℃. 利用这些序列, Ge 等[25]在进行不确定性分析的基础上, 根据区域温度变化重建结果的可信度, 建立了具有最高可信度的区域温度变化合成序列, 简称“区域温度序列”; 分析表明, 这些代用的区域温度序列与器测时期的各区温度变化代表序列(即每区 3 个具有较长观测记录的站点平均值)高度相关, 相关系数分别为 0.60(东北部)、0.76(东中部)、0.44(东南部)、0.97(青藏高原)和 0.51(西北部).

为分析各区域年代与百年尺度的温度变化速率, 本文分别滑动计算各区域温度序列的一阶差和两个相邻 30 a 间的温度差, 并采用最小二乘法滑动计算各区域温度序列的百年线性趋势. 此外, 为分析全国温度变化速率, 我们先采用同样方法滑动计算 24 个代用序列的一阶差和两个相邻 30 a 间的温度差与百年线性趋势, 然后再计算这些温度变化速率的平均值与方差. 其中, 滑动一阶差(R_{10i})、相邻 30 a 的温度差(R_{30i})和百年线性趋势(R_{100i})分别采用下列公式计算:

$$R_{10i} = T_i - T_{i-1}, \tag{1}$$

$$R_{30i} = \frac{1}{3}\sum_{k=i}^{i+2} T_k - \frac{1}{3}\sum_{k=i-3}^{i-1} T_k, \tag{2}$$

$$R_{100i} = \frac{\sum_{k=i-4}^{i+5}(T_k \times k) - \frac{1}{10}\left(\sum_{k=i-4}^{i+5} T_k \times \sum_{k=i-4}^{i+5} k\right)}{\sum_{k=i-4}^{i+5} k^2 - \frac{1}{10}\left(\sum_{k=i-4}^{i+5} k\right)^2} \times 100, \tag{3}$$

式中, T_i为标准化序列, i 表示时间, i=0, 1, 2, ……, 199, 依次表示 0s, 10s ……1990s; 其中式(1), 1≤i≤199; 式(2), 3≤i≤197; 式(3), 4≤i≤194; k 为计数时段.

2　结果分析

2.1　百年尺度的温度变化速率

滑动百年温度线性趋势(图 2)序列显示: 距今最近的最快升温时段出现在 19 世纪中期至 20 世纪中期, 即气候自小冰期转向 20 世纪暖期的转换期. 在此期间, 各区域最大升温速率皆达 1.0℃/100 a 以上, 其中东北部地区为 1.3℃/100 a, 东中部和东南部地区为 1.1℃/100 a, 西北部地区为 1.3℃/100 a, 青藏高原为 1.0℃/100 a. 然而, 各区域最快升温过程的出现时间不一; 其中东北部地区出现在 1810s~1900s 和 1850s~1940s, 东中部出现在 1860s~1950s, 东南部出现在 1850s~1940s, 西北部及青藏高原均为 1820s~1910s. 全国平均显示, 气候自小冰期向 20 世纪暖期的转变大致始于 1810s, 其中 1850s~1940s 的升温速

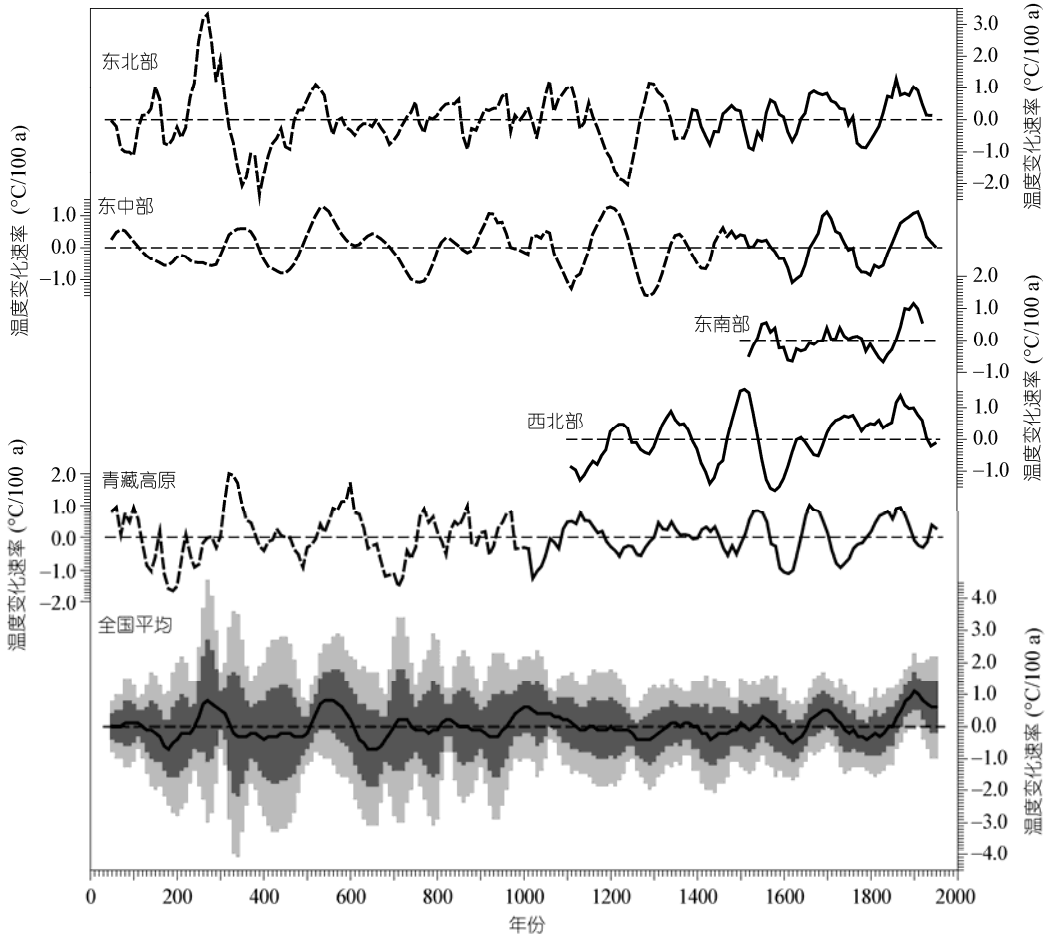

图 2　过去 2000 a 的百年尺度温度变化速率

各区域图中的虚曲线表示可信度相对较低的时段; 全国平均图中深灰色和浅灰色阴影区分别表示±1 倍标准差和±2 倍标准差范围

率最大, 达(1.1±1.2)℃/100 a (95%的置信区间, 下同). 虽然 20 世纪期间(1900s~1990s)全国平均升温速率达(0.6±1.6)℃/100 a, 但仍明显小于气候自小冰期转向 20 世纪暖期时的最大升温速率.

与过去 2000 年中其他几次较显著的快速升温相比, 每个区域 19 世纪中期至 20 世纪中期的最大升温速率均较其前略大或与其前大致相当. 仅东北部地区 180s~350s 最大升温速率较 19 世纪中期至 20 世纪更高; 青藏高原 260s~410s 和 500s~660s 的最大升温速率可能也较 1860s 前后的快速增暖更大一些. 我们此前的研究[25]已指出, 公元 1500s 以前的各区域温度序列不确定性较大; 且全国温度变化速率序列的平均值与不确定性范围也显示, 公元 1000 年前全国温度变化速率的不确定性范围明显大于其后, 因而小冰期向 20 世纪转换的最大升温率全国平均值虽然可能在过去 2000 年中是最大的, 但从区域看, 19 世纪中期至 20 世纪中期的最大升温速率仅是过去 500 年中最大的, 却未必是过去 2000 年中最大的.

另一方面, 过去 500 年间的快速降温时段分别出现在 1790s 和 1610s 前后, 其间全国平均降温速率分别达(–0.4±1.0)和(–0.5±1.2)℃/100 a. 而公元 1500 年之前, 全国平均最大降温速率达–0.7℃/100 a (分别发生在 600s~690s 和 130s~220s, 95%的置信区间分别为(–0.7±2.4)℃/100 a和(–0.7±1.8)℃/100 a); 次大降温速率为(–0.4±1.2)℃/100 a, 出现在 1220s~1310s, 与气候自中世纪暖期向小冰期转换过程基本一致.

过去 2000 年间最大降温速率的出现时间与幅度也存在区域差异. 其中东北部地区的最快降温分别出现在 300s~430s 和 1170s~1280s, 速率均达–2.0℃/100 a, 而近 500 年间的最大降温速率仅有–0.9℃/100

a. 东中部地区的最快降温出现在 1240s~1330s, 速率达–1.5℃/100 a, 且 700s~810s, 1050s~1150s 和 1570s~1660s 的降温速率也皆超过–1.0℃/100 a. 东南部地区过去 500 年间最快降温出现在 1570s~1660s 和 1780s~1860s, 速率皆达–0.7℃/100 a. 西北部地区过去 1000 年间的最快降温分别出现在 1080s~1170s, 1380s~1470s 和 1530s~1620s, 速率依次为–1.3, –1.4 和–1.6℃/100 a. 青藏高原过去 2000 年有 5 个降温过程的速率超过了–1.0℃/100 a, 分别为 140s~230s (–1.7℃/100 a), 660s~750s(–1.5℃/100 a), 970s~1060s (–1.5℃/100 a), 1560s~1650s(–1.1℃/100 a)和 1680s~1770s(–1.0℃/100 a).

2.2 30 a 尺度的温度变化速率

图 3 给出两个相邻 30 a 温度差的滑动序列. 从中可见, 在东北部、东中部、东南部和西北部地区, 20 世纪期间的最大 30 a 升温幅度均较 20 世纪前的要小; 仅青藏高原 20 世纪的最大 30 a 升温幅度达 1.2℃/30 a (自 1940s~1960s 至 1970s~1990s), 与历史时期的最大 30 a 升温速率相当. 同时各区最大 30 a 升温的起止时间与幅度大小也有差异, 而且即使是工业革命(1750s)以来的最大 30 a 升温速率在过去 2000 年中也并非异常. 从全国平均看, 过去 2000 年中的最大 30 a 升温速率为 (0.6±2.0) ℃/30 a(出现在 260s~280s 至 290s~310s); 而 1750 年以来与 20 世纪的最大 30 a 升温速率仅分别为 (0.5±0.6) ℃/30 a(出现在 1870s~1890s 至 1900s~1920s) 和 (0.2±0.7) ℃/30 a(出现在 1940s~1960s 至 1970s~1990s).

同时, 30 a 尺度降温也表现出类似特征, 即各区 20 世纪前的最大 30 a 降温速率均比 20 世纪大. 尽管小冰期内曾多次出现 30 a 尺度的快速降温, 但其最大降温速率也仍小于小冰期之前所出现的最大降温速率. 从全国平均看, 小冰期内最快 30 a 降温出现在 1600s~1620s 至 1630s~1650s, 速率达(–0.2±0.6)℃/30 a; 然而此前的 170s~190s 至 200s~220s, 300s~320s 至 330s~350s, 620s~640s 至 650s~670s 等降温过程, 其

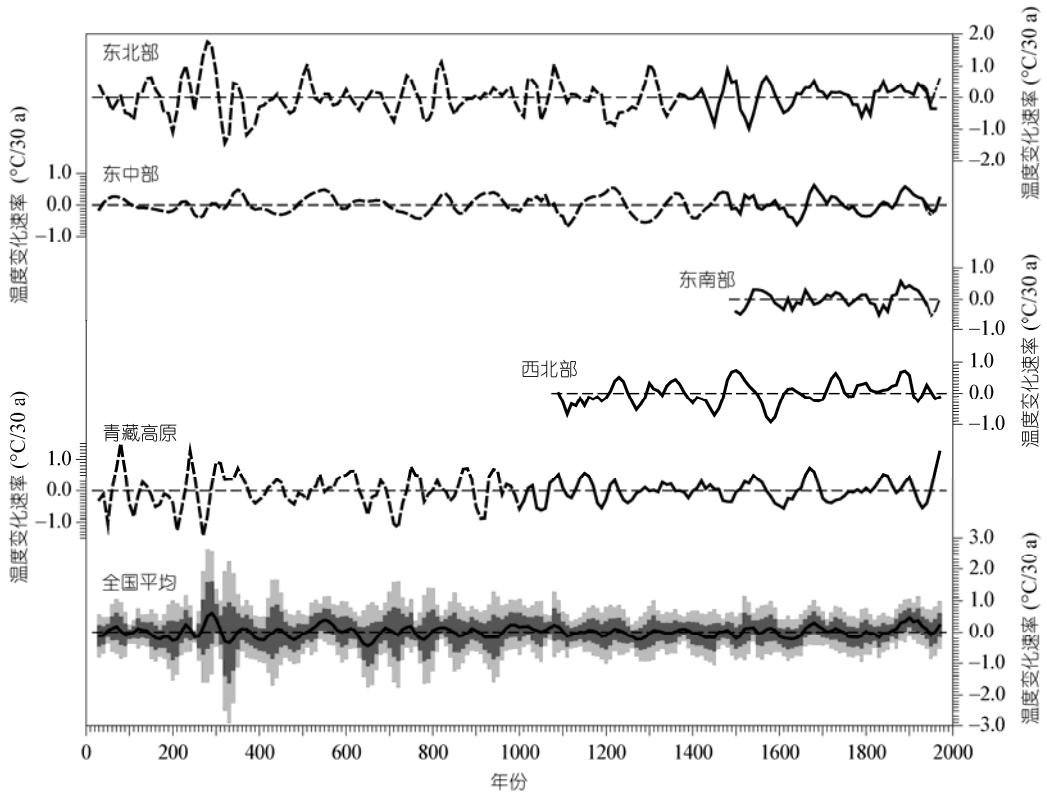

图 3 过去 2000 a 的 30 a 尺度温度变化速率

各区域图中的虚曲线表示可信度相对较低的时段; 点划线为根据器测温度资料计算的 30 a 尺度温度变化速率; 全国平均图中深灰色和浅灰色阴影区分别表示±1 倍标准差和±2 倍标准差范围

降温速率分别达到了(–0.3±1.3), (–0.3±2.5)和(–0.5±1.3)℃/30 a. 这也说明出现在小冰期及 20 世纪期间的 30 年温度变化速率并不是空前的.

2.3　10 a 尺度的温度变化速率

由于多数原始代用序列 1450 年之前的分辨率低于 10 a, 因此本文只分析 1450s 以来的 10 a 尺度温度变化速率. 图 4 给出过去 500 年各区域温度序列的一阶差和全国所有序列一阶差的平均值. 从图 4 可见, 各区域在 20 世纪末均出现了快速升温, 且 1980s~1990s 全国平均升温速率达(0.5±0.5)℃/10 a, 已达过去 500 年最大. 然而从区域看, 东北部地区 20 世纪的最大 10 a 升温速率为 0.5℃/10 a (出现在 1970s~1980s), 东中部地区为 0.7℃/10 a (出现在 1980s~1990s), 青藏高原亦为 0.7℃/10 a (出现在 1970s~1980s), 西北部地区为 0.4℃/10 a (出现在 1980s~1990s), 它们均与历史上曾经出现的 10 a 尺度最大升温速率相当. 东南部地区因 20 世纪后期缺少代用资料, 故无法与其前直接比较; 但观测记录显示其 20 世纪后期的最大 10 a 升温速率为 0.6℃/10 a (出现在 1980s~1990s), 低于过去 500 a 曾经出现的最大值. 这说明 20 世纪末的快速升温虽已相当显著, 但在区域上, 其升温速率在过去 500 年也并非异常.

在降温方面, 20 世纪期间全国平均的最快 10 a 降温出现在 1940s~1950s, 速率为(–0.3±0.6)℃/10 a, 与 20 世纪前曾经出现的最大 10 a 降温速率大致相当. 但各区 20 世纪期间的最大 10 a 降温皆低于此前曾经出现的最大降温速率.

3　结论与讨论

本文通过对全国 24 条源于多种代用资料的温度变化代用序列的分析, 检测了中国过去 2000 年的百年与年代际尺度温度变化速率. 结果发现: (1) 在百年尺度上, 各区域的增暖速率大小和出现时间均存在一定差异. 其中东北部地区过去 2000 年的最快百年升温出现在 180s~350s, 青藏高原出现在 260s~410s 和 500s~660s. 但全国平均显示, 小冰期向 20 世纪暖期转换时, 最大百年升温速率达(1.1±1.2)℃/100 a, 不但为过去 500 年最大, 且可能也是过去 2000 年中最大的. 然而, 全国平均最快百年降温却未出现在小冰期, 而是分别出现在 600s~690s 和 130s~220s 两个时段. (2) 在 30 a 尺度上, 20 世纪期间的最大升温速率低于其前曾出现过的最大升温速

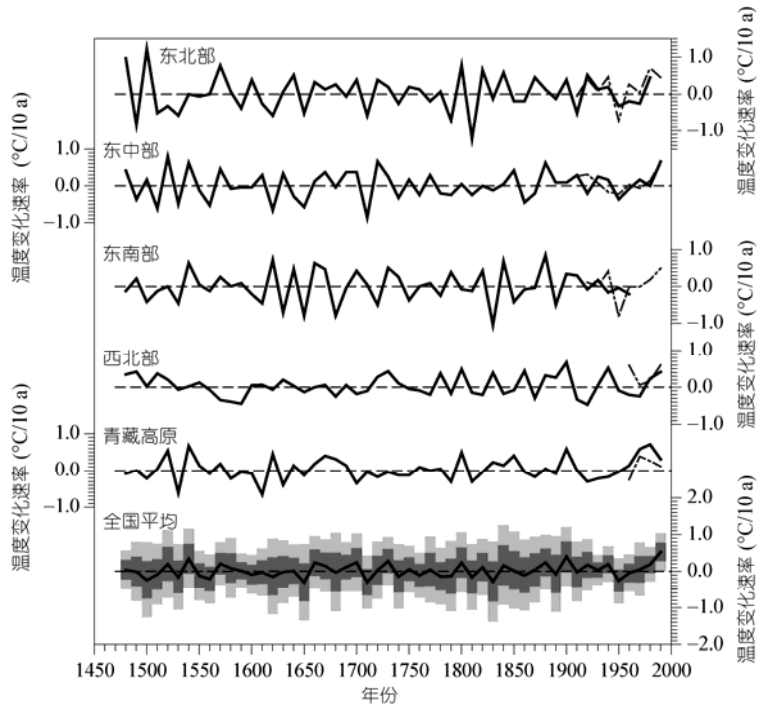

图 4　过去 500 年的 10 a 尺度温度变化速率

各区域图中的点划线为根据器测温度资料计算的 10 a 尺度温度变化速率; 全国平均图中深灰色和浅灰色阴影区分别表示±1 倍标准差和±2 倍标准差范围

率(如小冰期末至20世纪初和270s~290s至300s~320s的升温速率). 虽然小冰期期间曾出现过多次快速降温, 但其间的最大降温速率也并非史无前例. (3) 在10 a尺度上, 虽然20世纪末的快速升温相当显著, 但其速率在过去 500 年中也并非异常. 总之, 与过去2000 年所出现的百年及年代际尺度温度变化速率相比, 20 世纪的升温速率并非特例. 这表明: 虽然因人类活动导致的增强温室效应很可能影响了全球 20 世纪以来的增暖速率, 但从中国看, 类似的增暖速率在没有人为增强温室效应的历史时期, 也曾经在年代-百年尺度上出现过.

然而, 由于温度变化代用序列存在不确定性, 特别是在 1500 年之前, 其不确定性更大[25], 因而需要进一步讨论代用资料和器测记录揭示的温度变化速率差异. 虽然测站分布稀疏, 但中国的温度观测自20世纪初便已开始, 并被Ge等[25]用于温度变化分析. 根据这些记录, 我们分别计算 20 世纪期间各区 30 a与10 a尺度的温度变化速率(图3和4). 结果表明, 在30 a尺度上, 东北部地区器测记录的最大升温速率为0.6℃/30 a(出现在 1940s~1960s 至 1970s~1990s), 其次为0.4℃/30 a(出现在1900s~1920s至1930s~1950s), 而最大降温速率为–0.2℃/30 a(出现在 1920s~1940s至 1950s~1970s); 与代用资料对比显示, 自 1930s~1950s至1960s~1980s以后(由于代用资料1990s缺值)二者存在差异: 代用资料显示其间存在 30 a 尺度的降温, 但器测记录却显示持续升温. 然而即便如此, 器测记录的最大升温速率(即 1940s~1960s 至1970s~1990s 的0.6℃/30 a)仍低于代用资料揭示的历史时期最大升温速率. 东中部地区代用资料与器测记录的温度变化速率几乎一致. 虽然东南部地区1970s 以后没有代用资料, 但仪器记录显示的1920s~1940s至1950s~1970s的降温及整个20世纪几无明显升温, 与代用资料显示的变化特征基本一致.

在 10 a 尺度上, 器测资料显示各区域在 20 世纪后期均出现快速升温, 这与代用资料指示的温度变化特征相似. 然而, 代用资料与器测记录的温度变化速率大小之间并不完全一一对应. 这主要是由代用资料的不确定性(特别是指示短时间尺度气候变化的不确定性)引起的. 如湖泊沉积、泥炭和冰芯等代用资料含有固有的定年误差, 代用资料也不能完整揭示出所有尺度的温度变化信息谱等, 均会影响代用资料指示温度变化的精确程度; 此外, 也与代用资料数量少且空间分布不均有关. 特别是东北部地区, 5 条序列中有 2 条为分辨率相对较低、定年误差相对较大的湖泊沉积和泥炭序列, 西北目前仅有 1 条序列, 因而目前结果的不确定性也较大, 需要下一步加强研究.

致谢 感谢美国圣地亚哥大学的尹志勇教授和中国科学院地理科学与资源研究所的孙惠南老师在本文写作过程中给予的指导和帮助, 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

1 International Geosphere-Biosphere Programme. PAGES Science Plan and Implementation Strategy, Rep. 57. Stockholm: IGBP Secr, 2009. 3–9

2 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. Proc Natl Acad Sci USA, 2008, 105: 13252–13257

3 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: 1256–1260

4 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. Holocene, 2009, 19: 3–49

5 National Research Council. Surface Temperature Reconstructions for the Last 2,000 Years. Washington D C: The National Academies Press, 2006

6 Jansen E, Overpeck J, Briffa K R, et al. Palaeoclimate. In: Solomon S, Qing D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 463–497

7 Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, Qing D, Manning M, et al, eds. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 235–336
8 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. 第四纪研究, 1998, 18: 54–64
9 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: 348–357
10 Ge Q S, Zheng J Y, Fang X Q, et al. Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. Holocene, 2003, 13: 933–940
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: 180–189
12 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: 207–212
13 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, 25: 270–272
14 郑斯中. 广东小冰期的气候及其影响. 科学通报, 1982, 27: 302–304
15 Ge Q S, Zheng J Y, Tian Y Y, et al. Coherence of climatic reconstruction from historical documents in China by different studies. Int J Climatol, 2008, 28: 1007–1024
16 朱海峰, 郑永宏, 邵雪梅, 等. 树木年轮记录的青海乌兰地区近千年温度变化. 科学通报, 2008, 53: 1835–1841
17 Liu X H, Shao X M, Zhao L J, et al. Dendroclimatic temperature record derived from tree-ring width and stable carbon isotope chronologies in the middle Qilian Mountains, China. Arct Antarct Alp Res, 2007, 39: 651–657
18 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. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1617, doi: 10.1029/2003GL017352
19 Thompson L G, Mosley-Thompson E, Brecher H, et al. Abrupt tropical climate change: Past and present. Proc Natl Acad Sci USA, 2006, 103: 10536–10543
20 Hong Y T, Jiang H B, Liu T S, et al. Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year δ^{18}O time-series of Chinese peat cellulose. Holocene, 2000, 10: 1–7
21 许清海, 肖举乐, 中村俊夫, 等. 孢粉资料定量重建全新世以来岱海盆地的古气候. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23: 99–108
22 徐海, 洪业汤, 林庆华, 等. 红原泥炭纤维素氧同位素指示的距今 6 ka 温度变化. 科学通报, 2002, 47: 1181–1186
23 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: 508–513
24 强明瑞, 陈发虎, 张家武, 等. 2 ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化. 科学通报, 2005, 50: 1385–1394
25 Ge Q S, Zheng J Y, Hao Z X, et al. Temperature variation through 2000 years in China: An uncertainty analysis of reconstruction and regional difference. Geophys Res Lett, 2010, 37: L03703, doi: 10.1029/2009GL041281