

中国气温变化研究最新进展

任国玉^{1,2} 初子莹^{1,2} 周雅清^{1,3} 徐铭志^{1,2} 王颖⁴
唐国利^{1,2} 翟盘茂^{1,2} 邵雪梅⁵ 张爱英⁶ 陈正洪⁷
郭军⁸ 刘洪滨^{1,2} 周江兴^{1,2} 赵宗慈^{1,2}
张莉^{1,2} 白虎志⁹ 刘学峰¹⁰ 唐红玉¹¹

- 1 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081;
- 2 国家气候中心, 北京 100081
- 3 山西省晋中市气象局, 晋中 030600;
- 4 中国气象局国家气象信息中心气候资料室, 北京 100081
- 5 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
- 6 山东省气象局气象中心, 济南 250031
- 7 湖北省气象科学研究所, 武汉 430074;
- 8 天津市气象局气候中心, 天津 300074
- 9 甘肃省气象局兰州中心气象台, 兰州 730020;
- 10 河北省气象局气候中心, 石家庄 050021
- 11 青海省气象局青海气象台, 西宁 810001

摘要 总结了“十五”攻关课题有关中国温度变化研究的若干进展。在资料质量控制和序列非均匀性检验及订正的基础上, 更新了中国地面近 50 年、100 年和 1 000 年气温序列。研究表明, 不论是近 54 年还是近 100 年全国年平均地面气温升高趋势一般比原来分析结果表明的要强, 分别达到 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。中国现代增暖最明显的地区包括东北、华北、西北和青藏高原北部, 最显著的季节在冬季和春季。近 50 多年中国近地面气候变暖主要是平均最低气温明显上升的结果, 全国范围内极端最低气温也显著升高, 而极端最高气温升高不多。中国与温度相关的极端气候事件强度和频率一般呈降低趋势或稳定态势。研究发现, 城市化因素对中国地面平均气温记录具有显著影响, 但在现有的全国和区域平均温度变化分析中一般没有考虑, 因此需要在将来的研究中给予密切关注。在增温明显的华北地区, 1961~2000 年间城市化引起的年平均气温增加值达到 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$, 占全部增温的 38%, 城市化引起的增温速率为 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。中国其他地区的增温趋势中也或多或少反映出增强的城市热岛效应影响。20 世纪 60 年代初以来中国对流层中下层温度变化趋势不明显, 仅为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 比地面气温变化小一个量级; 对流层上层和平流层底层年平均温度呈明显下降趋势, 变化速率分别为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$; 整个对流层平均温度呈微弱下降趋势。中国对流层温度与地面气温变化趋势存在明显的差异, 但这种差异在 20 世纪 80 年代初以后趋于减小。近千年来中国地面气温变化史上可能确存在“中世纪温暖期”和“小冰期”等特征性气候阶段, 但“中世纪温暖期”的温暖程度似乎没有过去认为的那样明显。从全国范围看, 11 世纪末和 13 世纪中的温暖程度可能均超过了 20 世纪 30~40 年代暖期, 表明 20 世纪的增暖可能并非史无前例。中国 20 世纪气候增暖的原因目前还不能给出明确回答。一些迹象表明, 人类活动可能已经对中国的近地面气温变化产生了影响, 但太阳活动及气候系统内部的低频振动对现代气候变暖可能也具有重要影响。

关键词 气温变化 城市化影响 高空温度 中世纪温暖期 中国大陆

文章编号 1006-9585 (2005) 04-0701-16 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

收稿日期 2005-07-26 收到, 2005-11-28 收到修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关课题“全球与中国气候变化的检测和预测”(2001BA611B-01)

作者简介 任国玉, 男, 1958 年 6 月生, 博士, 研究员, 主要研究方向为气候变化、古气候与古生态学。

E-mail: gyren@homeway.com.cn

Recent Progresses in Studies of Regional Temperature Changes in China

REN Guo-Yu^{1,2}, CHU Zi-Ying^{1,2}, ZHOU Ya-Qing^{2,3}, XU Ming-Zhi^{1,2}, WANG Ying⁴,
TANG Guo-Li^{1,2}, ZHAI Pan-Mao^{1,2}, SHAO Xue-Mei⁵, ZHANG Ai-Ying⁶, CHEN Zheng-Hong⁷,
GUO Jun⁸, LIU Hong-Bin^{1,2}, ZHOU Jiang-Xing^{1,2}, ZHAO Zong-Ci^{1,2},
ZHANG Li^{1,2}, BAI Hu-Zhi⁹, LIU Xue-Feng¹⁰, TANG Hong-Yu¹¹

- 1 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081
- 2 National Climate Center, Beijing 100081
- 3 Jinzhong Meteorological Bureau, Jinzhong 030600
- 4 Climate Data Center of National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081
- 5 Institute of Geographical Sciences and Natural Resource, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101
- 6 Meteorological Center of Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031
- 7 Institute of Meteorological Science and Technology, Hubei Meteorological Bureau, Wuhan 430073
- 8 Climate Center of Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074
- 9 Meteorological Center of Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou 730020
- 10 Climate Center of Hebei Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050021
- 11 Meteorological Center, Qinghai Meteorological Bureau, Xining 810001

Abstract A brief summary of some recent major research findings of temperature changes over China is made in this paper. The findings come mainly from studies on observed changes of surface air temperature of the last 55 years, 100 years and 1 000 years, and of free atmospheric temperature of the last 50 years, on attribution of surface air temperature change to anthropogenic forcing, and on effect of rapid urbanization on site temperature records and regional average temperature series. Based on a data set of national basic and reference stations, which have been quality-controlled and adjusted for in-homogeneity dominantly induced by relocation of stations, updated surface air temperature time series of the past 55 years and 100 years are established. The new temperature series show a generally more rapid warming than those obtained before, with the rates of change of annual mean temperature reaching $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a.}$ and $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a.}$ respectively for the past 55 years and 100 years. The current warming is more significant in Northeast China, North China, Northwest China and the Tibetan Plateau, and the largest increase in temperature occurs in wintertime and springtime. The warming of the last 55 years is the result of more obvious rising of mean minimum temperature. The same change has happened for the country averaged annual extreme low temperature, while the annual extreme high temperature only experiences an insignificant rise. The frequency of temperature-related extreme events such as cold wave, cool summer, hot days generally tends to decrease or to be unchanged in the country as a whole. It is found, however, that significant effects of urbanization on recorded trends of temperature for single stations as well as for region averaged temperature series exist in a few regions investigated so far. In North China which experiences the most remarkable warming in the country, increase of annual mean temperature induced by urbanization for national basic and reference stations reaches $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ in period of 1961–2000, with an increasing rate of temperature of $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a.}$ accounting for 38% of the total warming rate as recorded by these stations. The effects of urbanization might have remained in the other regional changes in annual mean temperature. Regardless the remarkable warming of the surface, mid-to lower troposphere (850–400 hPa) witnesses no significant change in temperature, with a rate of change of only $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a.}$ for the period of 1961–2004, and upper troposphere (300–150 hPa) and lower stratosphere (100–50 hPa) are experien-

cing a significant decrease in temperature at rates of $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ and $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ a respectively. A slight decrease in temperature is found for the entire troposphere in the period investigated. However, mid-to lower troposphere temperature is increasing in the past 20 years at a much higher rate than before, and the difference of change between surfaces and mid-to lower troposphere is getting smaller. A preliminary temperature series of the past 1 000 years has been reconstructed mainly based on tree ring data in the west and historical record in the east. It shows the warmth of period corresponding to the Medieval Warm Period (MWP) and the marked coldness of the Little Ice Age last from about 1400 to 1900. The warmth of the MWP, however, seems not so evident in the country as a whole as reported before, though the temperature in the end of 11th century and in the mid 13th century might have been higher than that of any decade of 20th century. It is still premature to answer the question of what cause the observed warming on the surface in China. Some evidence support the claim that it has mainly been induced by the increased concentration of greenhouse gases in atmosphere, but the influences of other factors like solar activities and the low-frequency oscillations of ocean-atmospheric system could not be ruled out at present.

Key words temperature change, urbanization effect, upper air temperature, medieval warm period, mainland China

1 引言

近百年来,地球表面的气候正经历一次显著的变暖,我国的气候变化趋势与全球变化基本一致。这一认识是基于我国学者对中国过去不同时间尺度气候——特别是温度变化基本事实及可能原因所进行的大量研究^[1~27]。全球性的气候变暖已经被归结于人类活动引起的增强的温室效应^[28]。对于20世纪特别是近50年来中国气候变化的原因,国内的研究给出了各种解释。一些迹象表明,增强的温室效应影响可能也是不能忽视的^[14, 29~31]。

但是,气候变化的观测事实及其原因是一个非常复杂的问题,很多方面还需要开展进一步工作。不同的资料处理方法致使近50~100年地面气温变化分析结果存在重要差异;器测资料的非均一性问题还没有得到妥善解决,这对区域平均气温序列分析有一定影响;城市化对地面气温观测记录及其趋势变化的影响还没有给予足够关注,需要进行定量评价;我国高空温度变化情况还不清楚;近1 000年地面气温变化也需要结合新的代用资料进行分析,以便确定现代气候变暖在历史上的地位。只有在深入工作的基础上,对中国区域不同时间尺度近地面气温变化的时空性质、自由大气温度的变化趋势、极端气温的变化以及人类活动和自然因子对近现代温度变化的影响等问题,才可能有进一步认识。

国家“十五”重点科技攻关项目设立了“全

球与中国气候变化的检测和预测”课题,其主要任务之一是认识我国气候变化的基本历史事实及其可能原因,特别是中国近50年、100年和1 000年来地表气温变化的主要特征及可能成因。经过近5年的研究,课题组获得了一些新成果和新发现,增进了对我国气候变化问题的认识。本文对该课题中有关过去温度变化研究的最新进展做一个概要总结,更详细的资料、方法描述及结果分析见本刊相关论文。

2 近半个世纪地面气温变化

2.1 气温变化的时空特征

对近54年中国600余个观测站资料分析表明,1951~2004年全国年平均气温上升趋势非常明显,变化倾向率达 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;54年平均气温上升了约 $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (见表1及文献[16]中图1~3)。增温主要是从1980年代开始的。1980年代以前,中国气温在较小的范围内上下波动,而从80年代初开始,气温呈不断上升趋势。在1980年代以前的30年中,只有1973年偏暖;而以后的21年中,出现了13个偏暖年份,且偏暖的程度也越来越大。1998年是54年中最暖的一年,温度距平值达到 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1990年代是中国20世纪后半叶最暖的10年。

中国1951~2004年四季平均气温均呈上升趋势,其中冬季增暖最明显,变化速率达 $0.39\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;春季次之;秋季较小;夏季最小,变化速率为 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。54年中,冬季平均气温上升了 $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,

表1 1951~2004年全国平均气温变化速率和幅度

Table 1 Magnitudes and rates of mean surface temperature change in China during 1951—2004

	年平均 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
变化速率 Trends / ($^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)	0.25	0.28	0.15	0.20	0.39
变化幅度 Magnitude/ $^{\circ}\text{C}$	1.3	1.5	0.8	1.1	2.1

春季上升 1.5°C ；秋季上升 1.1°C ；夏季上升 0.8°C 。从年代变化来看，春季和夏季的变化比较相似，两个季节在20世纪后半叶相当长的时间里，气温波动的幅度和变化都很小，但是从1997年开始，春、夏都有一个比较明显的跳跃，开始上升；秋季和冬季的变化较相似，从80年代初开始都呈现明显的增暖，1987年以后增暖有加快迹象。从最暖年份看，春、秋两季都出现在1998年，夏季出现在2001年，冬季出现在1998~1999年。四季的最暖年份都出现在近10年。

此外，徐铭志等^[32]分析了1961~2000年中国气候生长期的变化趋势。全国以及北方、南方和青藏高原气候生长期均有明显增长。根据日平均气温大于或等于 10°C 期间日数统计的气候生长期在全国范围内增加了6.6天，北方地区增加了6.5天，南方地区增加了6.1天，青藏高原则增加了12.3天。

1951~2004年期间，在全国范围内，除四川盆地和云贵高原北部有较小的下降趋势外，其他地区年平均地面气温一般呈上升趋势^[6]。北方和青藏高原北部地区、海南、云西南部以及长江中下游和珠江三角洲地区增暖明显，其中西北和青藏高原北部、内蒙古大部、东北大部、华北北部、华南沿海部分地区年平均气温上升尤其显著，气温趋势系数超过0.6。西南地区北部（包括四川盆地东部和云贵高原北部）的降温现象早就被发现^[7, 8]，目前仍未消失^[25]。

从季节来看，北方和青藏高原各个季节都普遍上升。东北地区除秋季外的其他季节增温更明显；内蒙古全年性的增温都较明显；新疆冬季增温明显，塔里木盆地在春、夏、秋季有变凉趋势，冬季气温上升则十分明显；青海西北是全国四季增温都非常显著的地区；华东、华中地区夏季气温有所变凉，其余季节表现出增温趋势；华南地区一般四季均呈轻微增温趋势，但珠江三角洲夏、秋季增温明显，海南一年四季的增温都比较明显；西南地区春、夏季气温有一定下降，春季降温尤

为明显；云南南部一年四季的增温都很显著。

2.2 城市化对地面气温趋势的影响

全国台站中的城市站均存在城市化对地面气温记录的影响。城市化对气温序列的影响一般在大城市站的冬、春季最明显。最近的研究表明，北京地区国家基准、基本站记录的地表气温变暖中，大部分为城市化影响所致^[33]，山东、天津、湖北、河北以及甘肃等地区城市化对国家基准、基本站气温变化趋势的影响也非常明显^[34~37]。这里以华北地区为例，介绍城市化对国家基本、基准站地表气温记录影响的最新研究结果。

华北地区的范围定义为（ $33^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ ， $108^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ）所限定的区域，主要包括北京、天津、河北、山西、内蒙中南部、山东大部、河南北部、陕西东部以及安徽和江苏北部。由于采用了一般气候观测站的地面气温、台站位置和所在地人口等资料，对气温资料的质量和均一性进行了检验、控制和订正，并对多种统计方法获得的平均气温分别进行了分析和比较。台站类型的划分考虑了台站所在地人口和观测点的具体位置。区域平均气温距平序列的建立采用Jones等^[38]的方法。

从1961年到2000年，华北地区位于城镇的气象台站受城市化的影响相当显著，其中大城市站最明显，热岛引起的增温达到 $0.16^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，对总增温趋势的贡献达47.1%（见表2，图1，及文献[38]中图3）。中等城市和特大城市的影响也很明显，城市化引起的增温占全部增温的比例可达30%左右。特别值得重视的是，国家基本、基准站的热岛增温率为 $0.11^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ，占总增温速率的38%左右。在1961~2000年，由于城市化影响引起的华北地区国家基本、基准站年平均气温上升幅度为 0.44°C 。

从城市化影响的季节分布来看，华北地区城镇台站的热岛增温率以冬季为最大，春、秋季次之，夏季最小。热岛增温对总增温的贡献一般以夏季为最大，各级台站（包括国家基准、基本站）热岛增温贡献率均达到了100%。去除城市化引起

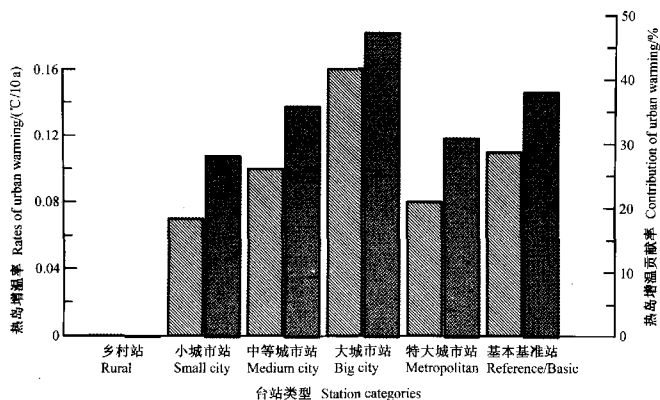


图1 华北地区各类台站热岛增温率（斜条）和热岛增温贡献率（阴影）的比较

Fig.1 Rates of urban warming (scratched) and the contribution (shaded) to total warming recorded for different station categories in North China

表 2 华北地区各类台站城市热岛效应对地面年平均气温趋势的影响（1961—2000 年）

Table 2 Effect of urbanization on annual mean surface temperature of different stations in North China for 1961—2000

	台站数 No. of stations	热岛增温值 Urban warming/℃	热岛增温率 Rate of urban warming/ (℃/10 a)	热岛增温贡献率 Contribution of urban warming/%
乡村站 Rural	63	0	0	0
小城市站 Small city	133	0.28	0.07	28.0
中等城市站 Medium city	37	0.40	0.10	35.7
大城市站 Big city	17	0.64	0.16	47.1
特大城市站 Metropolitan	22	0.32	0.08	30.8
基本、基准站 Reference/Basic	95	0.44	0.11	37.9

表 3 几个研究区域城市化对国家基本、基准站记录的区域平均气温趋势的影响（1961—2000 年）

Table 3 Effect of urbanization on area-averaged annual mean surface temperature as obtained from national basic and reference station data in a few case study areas for 1961—2000

	华北地区 North China	北京市 Beijing	天津市 Tianjin	河北省 Hebei	山东省 Shandong	湖北省 Hubei	甘肃省 Gansu
热岛增温值 Urban warming/℃	0.44	0.64	0.43	0.60	0.35	0.32	0.22
热岛增温率 Rate of urban warming/ (℃/10 a)	0.11	0.16	0.11	0.14	0.09	0.09	0.05
热岛增温贡献率 Contribution of urban warming/%	38	71	20	40	27	75	19

注：天津市统计时段为 1961—2003 年，山东省统计时段为 1964—2002 年，甘肃省统计时段为 1961—2002 年
 Note: Analysed data series for Tianjin is from 1961 to 2003, Shandong is from AD1964 to 2002, while in Gansu is from 1961 to 2002

的增温，这些台站夏季背景气温一般略有变凉；其次为秋季和春季，国家基本、基准站热岛增温贡献率在 40% 到 50% 之间；尽管冬季增暖最明显，热岛增温的绝对数值也是四季中最高的，但热岛增温在全部增温中所占比重较小，国家基本、基准站一般仅为 20% 左右。这说明，在冬季迅速

变暖的过程中，城市化因素的贡献可能还不是最重要的。

在我国其他地区，甘肃省 1961—2002 年间国家基本、基准站观测的年平均地面气温增加速率为 0.29℃/10 a，城市化影响对其贡献为 19%（表 3），比华北地区为弱^[37]；湖北省 1961—2000

年间国家基本、基准站观测的年平均地面气温增加速率为 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 城市化影响对其贡献达 75%, 比华北地区强得多^[35]。在华北地区内部, 各个省和直辖市的分析表明, 城市化影响对国家基本、基准站平均温度增加的贡献在 20%~71% 之间 (表 3)。华北地区的分析结果对全国情况可能具有一定代表性。因此, 中国大陆地区国家基准、基本站的地面气温序列在不同程度上存在着城市化的影响。这些台站资料是迄今为止绝大部分全国或区域平均气温序列建立的基础, 城市化的影响使得过去分析获得的平均气温趋势估计存在显著误差。最近华北等地区的分析表明, 前一节给出的近 54 年中国平均气温变化趋势中, 还在很大程度上包含着城市化因素的影响。这种影响的真实数值究竟有多大, 目前仍在研究中。但是, 如果华北地区的分析结果对全国范围有代表性, 则剔除城市化影响后近 54 年来中国年平均地面气温增暖速率大约在 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 左右。

需要指出的是, 由于背景台站或“乡村”站的确定非常困难, 已经开展的区域研究都不可能采用真正的“乡村”站, 因此现在给出的各级城镇台站和国家基本、基准站记录的地面气温变化中城市热岛增温贡献率只能是最低估计值, 而有关近 54 年中国年平均地面气温增暖速率在 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 左右的推测则应为最高估计值。准确估计城市化对单站和区域平均气温序列的影响是十分困难的, 还需要开展深入研究。边界层之上的自由大气温度变化或许对于反映大尺度背景气候变化更具有代表性。

但是, 最近的研究结果确使我们获得了非常重要的新认识。这一认识同 Jones 等^[36] 和 IPCC TAR^[28] 的结论存在明显差异。新的研究结果说明, 不仅在区域平均气温序列中, 而且在现有的全球和半球平均气温序列中, 城市化的影响可能也不是可以忽略的因素。当然, 这也对全球和区域气候变化的监测和检测研究提出了挑战。如何在区域或全球范围的地面观测资料中有效剔除局地人类活动的影响, 以便更真实地检测全球性或区域性人类活动影响的信号, 是今后研究中需要面对的严肃课题。

3 近 40 多年高空温度变化

自由大气温度变化受城市化等局地人类活动影响比地面小得多, 对于大尺度背景气候场的变化可能具有较好的指示意义。

在 1961~2004 年间, 中国地区对流层中下层 (850、700、500、400 hPa)、对流层上层 (300、250、200、150 hPa) 和平流层底层 (100、70、50 hPa) 年平均温度变化具有明显差异 (表 4) (见图 2 及文献 [40] 中图 1)。全国平均对流层中下层年均温度呈现出明显的年际和年代变化, 20 世纪 60 年代早期和 80 年代末以来一般年份为正距平, 其中最暖年份是 1998 年, 温度距平高达 $0.98\text{ }^{\circ}\text{C}$; 而 60 年代后期到 80 年代中一般为负距平。但是, 对流层中下层温度变化趋势不明显, 仅为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。从各个季节来看, 除了冬季 (1 月) 增温速率高达 $0.11\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 外, 其他季节平均温度均呈微弱降低趋势。

对流层上层年平均温度的年代变化特征与中下层相似, 但趋势变化呈明显下降现象, 变化速率为 $-0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。对流层上层各个季节平均温度变化趋势均为负, 其中夏季温度变冷最明显。平流层下部温度长期趋势与对流层上层大体一致, 也呈明显减少, 减少速率达到 $-0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, 其

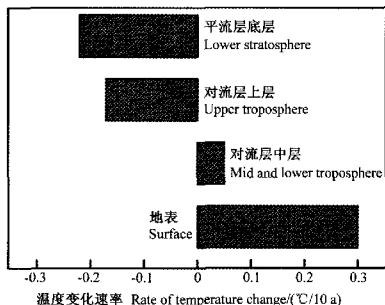


图 2 1961~2004 年期间中国高空各个层次及地面年平均气温变化速率

Fig. 2 Rates of annual mean temperature change at surface, lower and mid troposphere, upper troposphere and lower stratosphere over China from 1961 to 2004

表 4 1961~2004 年期间中国高空各个层次平均温度变化速率

Table 4 Tendency of mean temperature at lower and mid troposphere, upper troposphere and lower stratosphere over China from 1961 to 2004

	年 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
地面 Surface	0.30	0.34	0.18	0.24	0.46
对流层中下层 Lower and mid troposphere	0.05	-0.04	0.03	-0.02	0.11
对流层上层 Upper troposphere	-0.17	-0.13	-0.23	-0.17	-0.16
平流层底层 Lower stratosphere	-0.22	-0.24	0.19	-0.16	-0.25

注：地面季节平均气温变化趋势根据年值和国家基准、基本站分析结果推算
Note: Surface temperature trends for seasons are obtained through calibration against the analysis results of national reference and basic station data set

中冬季和春季降温最明显，其他季节降温也较显著。

从我国高空各个层次年平均温度变化速率来看，对流层中下层变冷区域主要分布在东北东部和南部、黄淮海河平原、西北东部与青藏高原东南部等地区，而变暖区域主要发生在长江流域及其以南地区、内蒙古大部分和西北地区（见文献[40] 中图 4）；对流层上层除内蒙古东部、长江中下游部分地区和青藏高原部分地区有微弱增温或变化不明显外，其余地区年平均温度均呈显著减少趋势；平流层底层年平均温度在绝大部分地区都明显下降，青藏高原和西北地区变冷更显著。

对流层中下层^[1]地面年平均气温变化存在重要差异（见表 4 及文献 [40] 中图 5）。二者在年际和年代变化上存在很高的相似性，相关系数达到 0.64，通过了 99% 的信度检验。20 世纪 60 年代后期和 70 年代的相对低温以及 80 年代以后的明显变暖在对流层中下层和地面都表现得很清楚。1998 年不仅是地面气温，而且也是对对流层中下层最暖的一年。但从趋势上看，1961~2004 年我国探空站地面年平均气温升高速率达 0.30℃/10 a，而对流层中下层同期温度变化却十分微弱，变化速率仅为 0.05℃/10 a，比地面低 1 个数量级。在各个季节，地面的增温主要发生在冬季和春季，对流层中下层的增温也主要出现于这两个季节，夏季有微弱降温趋势，秋季温度则几乎保持稳定。如果考虑整个对流层情况，则其年平均温度趋势为 -0.06℃/10 a，与地面气温变化趋势完全相反。

对流层温度变化的特点进一步证实，地面气温记录在很大程度上包含着城市热岛效应增强因素或局地环境变化的影响。这种影响的相对量值在暖季里（特别是夏季）尤其明显。冬季对流层

中下层温度呈一定增加趋势。尽管城市化造成的地面气温增加绝对数值比较高，但其对冬季全部增温的贡献并不是很大，说明冬季背景气候的显著增暖是真实的，这和高空的变化一致。

我国高空温度变化的特点与全球或北半球平均情况大体相似^[41~44]。当前科学界十分关注的对流层中下层平均温度变化趋势在我国同样不明显，与地面气温变化之间的差异显著。这一事实对区域和全球气候变化的检测分析提出了挑战，因为根据气候模式分析，在人为原因造成的大气中温室气体浓度增加的情况下，在全球以及像中国这样较大的区域尺度上，地面和对流层中下层平均温度都是显著增加的^[42, 45]。模式的发展和检验依赖观测资料。因此，出现这一矛盾的根本原因可能还在于地面观测资料的偏差。

4 近 1 个世纪地面气温变化

利用国家气象信息中心气候资料室整理的逐年、逐月气温资料，对中国地区近 100 来年的地面气温变化规律进行了再分析。这套资料的情况比较复杂，早期台站数量很少，空间分布也不均匀，西部地区非常稀疏。1950 年前观测时制与时次以及日值统计方法也不统一，造成了严重的资料序列非均一性。采用最高、最低气温平均值来取代原来的平均气温，有效地避免了由于观测时制、时次及日值统计方法不统一产生的序列非均一性。这样做也提高了与目前国际上几条主要地面平均气温序列的可比性。

在过去的近 100 年内，中国年平均温度呈现明显的上升趋势，增暖幅度达到 0.79℃，平均增温速率约 0.08℃/10 a，略高于同期全球平均增温

表 5 1905~2001 年中国平均地面气温变化幅度和速率

Table 5 Tendency of mean surface temperature over China from 1905 to 2001

	年平均 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
幅度 Magnitude/℃	0.79	1.32	-0.16	0.43	1.64
速率 Rate of change/ (℃/10 a)	0.08	0.14	-0.02	0.04	0.17

(见表 5 及文献 [46] 中图 2)。在近百年中, 20 世纪 40 年代和 80 年代中期以后是两段温暖时期, 1990 年代和 1940 年代气温距平值分别为 0.37°C 和 0.36°C 。两个偏暖期的气温距平值没有明显差异, 因此中国近 20 年的增温不像全球或北半球平均情况那样异常。总体来看, 中国近百年地面平均气温的年代变化和线性趋势与北半球平均情况大体一致, 但表现出更大的波动性, 存在明显的双峰现象和波动上升特点。

各季节的温度趋势存在较大差异, 但变化特点与近 50 年来非常接近。冬、春、秋三季气温上升, 而夏季则略微下降, 其变化幅度分别为 1.64 、 1.32 、 0.43 和 -0.16°C (表 5)。增温明显的季节是冬季和春季。从温度变化的季节特征看, 1940 年代和 1990 年代虽同为暖期, 但其特点并不完全一致, 因为前者的最大距平值出现在夏季, 而后者则出现于冬季。由于早期资料空间覆盖不好, 对于气温变化的空间差异没有进行分析。

因此, 最新的分析给出了高于前人的增暖趋势估计值, 这主要是由于我们采用平均最高、最低气温统计月平均气温引起的。这种方法避免了因观测时次、时制及日值统计方法不一致所造成的资料序列非均一性, 也同国际上采用的几个主要全球历史气候资料集所用方法一致, 其计算结果与国际上广泛引用的全球或半球平均气温序列具有可比性, 因此在中国地面气温变化分析中具有较强的优越性与合理性, 需要在未来的研究中进一步完善和推广。

值得提出的是, 新的近百年气温序列同样没有剔除城市化的影响。如果考虑到城市化对近 50 年来地面气温观测记录的影响, 20 世纪 80 年代以来的快速增温以及 90 年代的偏暖期将不再像现在这样显著, 并可能没有 30~40 年代的增温明显。同时, 根据上述近百年气温序列获得的增温速率也应该是最高估计值。当然, 对于 20 世纪前半叶的地面气温记录, 同样不能排除其城市化影响的可能性。考虑到当时的观测绝大部分集中于中国

东部, 且主要开展于大中城市里, 城市热岛效应增强因素的影响可能也是存在的。但是, 由于严重缺乏背景站或对比站观测资料, 目前还无法评估这种影响。如果这种影响同样明显存在, 则 20 世纪 40 年代和 90 年代两个暖期的相对地位可能不会有很大变化。

另外, 20 世纪 50 年代以前的资料空白区还很广, 由于站址迁移和仪器变化等原因引起的资料非均一性问题也还没有给予适当考虑。因此, 这里给出的近百年地面平均气温序列中早期部分的可靠性还需进一步验证。

5 近千年地面气温变化

千年左右全球和区域平均气温序列可以把现代的增暖放在历史变化背景上加以考察, 有助于认识现代的变化是否已经异常以及是否可能是由于人类活动引起的等关键科学问题。中国学者对近千年地面气温变化进行了许多研究。一些工作表明, 20 世纪中国的平均气温在近千年内可能是最暖的, 但也有一些研究结果不支持这一看法。

在根据器测资料做出中国气温变率分区的基礎上, 利用西部现有的 10 余条树轮年表, 分别重建了新疆内蒙古 1000~1989 年地面气温序列、青藏高原区 1603~1994 年地面气温序列以及东北地区 1602~1994 年气温序列。借鉴葛全胜等^[21]中国东部冬温序列, 取其具有 10 年分辨率的 1500~2000 年部分和具有 30 年分辨率的 1000~2000 年部分, 采用面积加权平均方法, 分别合成了具有 10 年、30 年时间分辨率的近 400 年与 1000 年全国年平均地面气温序列 (见文献 [47] 中图 3、4)。北疆与华南两个分区没有可用的代用资料, 未参与全国平均气温序列的建立。图 3 给出了每百年平均的气温距平。

在这条重建气温序列上, “中世纪温暖期”有一定程度表现, 其中 11 世纪末和 13 世纪中的温暖程度可能都超过了 20 世纪 30~50 年代。自公

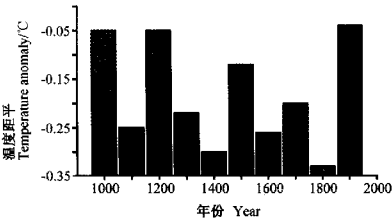


图3 近千年来每百年平均的气温距平
Fig.3 Temperature anomalies of every century for mainland China for the last 1 000 years

西部地区气温序列在 20 世纪以前展示了更为平缓的变化，与东部地区主要依据历史物候资料重建的气温序列存在比较明显的差异。西部气温序列的加入冲淡和模糊了全国平均气温序列上“中世纪温暖期”和“小冰期”的表现和特色。

但是，从这条新的序列看，“中世纪温暖期”的两个温暖阶段平均气温确实相似或略高于 20 世纪任何时期。这表明，20 世纪的增暖可能并不是史无前例的。这个结论同目前国际上流行的观点存在着重要差别。值得注意的是，这条序列没有试图把近百年地面气温序列与其接合起来，因为它们本来不属于同一类型资料。代用资料序列已经大大地过滤了高频气候变化特征，这种过滤还不仅仅是在进行多年代平均过程中实现的，更和代用记录固有的特点及单点序列建立过程有关。简单地代用资料序列同器测资料序列接合起来是欠妥的。新的千年序列所依据的代用资料多数截止到 20 世纪 80 年代以前，对我国 1990 年以来的快速增温现象反映不充分。不过，代用资料序列可以很好地指示 20 世纪 30~40 年代的温暖期，而这个阶段的平均气温从近 1000 年来看并非最高。如果剔除近 50 年来明显的城市化影响，1990 年代的温暖程度可能没有 20 世纪 30~40 年代高，或者与后者相当。因此，1990 年代中国的平均气温可能也没有超过“中世纪温暖期”的两个温暖阶段。

由于高分辨率的长序列缺乏，以及古气候代用资料固有的缺陷，新的全国千年平均气温序列及由此获得的初步认识还需要经深入研究的检验。

6 极端气温事件的变化

更新的分析表明，全国年平均最高气温在 1951~2002 年中有较明显的增加，增加速率为 0.12℃/10 a，且温度升高主要发生在最近的 10 余年（见表 6 及文献[47]中图 4,5）。近 52 年来

元 1000 年开始，气温逐步上升，到 11 世纪晚期达到最高，平均距平值可达 0.25℃；至 12 世纪中气温又迅速下跌，降幅达 0.4℃；此后气温再回升，13 世纪中期气温距平值高于现代。“中世纪温暖期”大体结束于 13 世纪末。“小冰期”持续的时间可能比较长，从 14 世纪初一直延续到 19 世纪末，但最冷阶段出现在 17 世纪中晚期和 19 世纪，气温距平低至-0.4℃左右。15 世纪中晚期也比较冷。

近千年地面气温变化研究的焦点集中在“中世纪温暖期”和“小冰期”两个特征时段。早期的研究表明，近代的增暖与此前的两个特征时段气温变化都是全球性的。然而，由于代用资料的可靠性较低、资料覆盖面小，加上气候变化研究和评估活动中非科学因素的介入，近年来对于“小冰期”和“中世纪温暖期”是否具有全球性或北半球较大范围内存在，以及早期的增暖是否接近或超过了 20 世纪晚期等问题，一直存在相当大的争议。

新建立的序列表明，中国地区“中世纪温暖期”和“小冰期”可能确实存在，但其界限似乎没有早期研究认定的那样清晰，冷暖变化程度特别是“中世纪温暖期”的温暖程度也没有过去认为的那样明显。这主要因为根据树轮资料重建的

表 6 1951~2002 年中国年和季节平均最高、最低气温变化幅度速率
Table 6 Tendency of annual and seasonal mean maximum and minimum temperature over China from 1951 to 2002

	年平均 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
最高气温 Maximum/ (℃/10 a)	0.12	0.10	0.03	0.09	0.25
最低气温 Minimum/ (℃/10 a)	0.28	0.28	0.15	0.22	0.49
日较差 Daily range/ (℃/10 a)	-0.17	-0.18	0.13	-0.13	-0.23

平均最高气温北方增加明显,南方变化不显著,甚至表现弱的下降趋势;增加最多的地区包括东北北部、华北北部和西北北部,青藏高原的增加也很明显。就季平均最高气温来看,冬季的增加最为明显,对年平均最高气温的上升贡献最大;夏季平均最高气温增加最弱。

全国年平均最低气温上升趋势远较年平均最高气温变化明显,近52年上升速率达到 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。北方地区上升更显著,且上升速率有随纬度增加趋势(见文献[48]中图1、2)。与年平均气温变化趋势相似,年平均最低气温增加最明显的地区也是东北、华北、西北北部和青藏高原东北部等地区。各季平均最低气温均呈增加趋势,冬季增加速率达到 $0.49^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,春季 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,秋季 $0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,夏季增 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。冬季平均最低气温的增加对年平均最低气温的上升贡献最大。

青藏高原的平均最高气温在秋、冬季为弱的增加趋势,夏季无明显变化,而春季则表现出明显的降低。另一方面,平均最低温度在各季都呈现整体的增温趋势,秋、冬季最为明显,春、夏季稍弱。无论对于最高气温还是最低气温,3000 m以上的地区增加趋势都弱于3000 m以下地区。

由于最低气温增加比最高气温快,我国年平均日较差呈总体下降趋势。下降幅度较大的地区主要在东北、华北东北部、新疆北部和青藏高原。全国各季平均日较差均呈下降趋势,但冬季的下降趋势最为明显。

近40~50年中国极端最高气温的变化表现为,夏季黄河下游、江淮流域和四川盆地出现显著的下降趋势,西北西部和青藏高原南部出现显著上升趋势,其余地区变化不明显;冬、春、秋季北方地区均为明显的上升趋势;而南方地区四季变化趋势不明显。与平均最低气温变化相似,我国极端最低气温也呈明显上升趋势。其中冬、秋和春季上升趋势较强。各季极端最低气温的变化趋势均大于极端最高温度,表明我国的极端气温变化正趋于缓和。

我国的极端温度事件也出现显著变化。自20世纪50年代开始,全国大范围的寒潮活动逐渐减弱,尤其是在80年代和90年代初,寒潮影响尤其微弱。大部分地区的低温日数也趋于减少。在

中国东部,日最高气温高于某一界限的高温日数明显减少。就全国平均而言,近40~50年日最高气温大于 35°C 的高温日数略呈减少,长江中下游一些地区的下降更为显著;日最低气温小于 0°C 的霜冻日数减少也更显著,下降速率约为 $2.4\text{d}/10\text{a}$ 。我国霜冻日数减少最快的时期是80年代中期以后。此外,全国平均的热日和暖夜频率显著增加,而冷日频率减少,冷夜减少趋势更为明显。

因此,在最近的40~50年间,我国与温度相关的极端事件强度和发生频率一般呈现降低趋势或稳定态势,与低温有关的极端事件强度和频率明显减弱,而与高温相关的极端事件强度和频率没有明显增强。全国范围内的地面气温正在趋向温和与少极端。

地面气温极端性的弱化在很大程度上可能也是城市化对观测环境影响的反映。最近的分析指出,与人口少的台站比较,大中城市站地面气温序列的方差明显减小^[49]。国家基本、基准站多数都是城镇站,其中很多也是中等以上的城市站。基于国家基本、基准站资料获得的地面气温极端性减弱的结论与城市站地面气温序列方差趋于缩小的事实是一致的,可能在很大程度上是台站附近城市热岛效应增强或大气中气溶胶含量增加的结果。

7 气温变化的可能原因

对于20世纪全球气候变暖的原因,目前一般认为与大气中温室气体浓度的增加有关^[28]。这一结论来自采用气候模式所做的检测和归因分析。这些模式分析考虑自然强迫因子如太阳活动和火山活动,同时考虑人类排放的温室气体和硫化物气溶胶含量变化,模拟20世纪全球年平均气温的变化。当气候模式只考虑自然强迫时,模拟不出20世纪的全球变暖;当只考虑人类活动时,可基本上模拟出20世纪全球变暖的趋势,但20世纪前50年模拟与观测差异较大;当考虑所有辐射强迫时,模拟的与观测的近百年气温变化最为一致。研究者因而认为,影响20世纪的主要因子有太阳活动、火山活动和人类活动以及海气相互作用,而人类排放引起的大气中温室气体浓度增加是20世纪特别是近50年全球变暖的主要原因。

近年来,我国学者也开展了中国或东亚地区气候变化的检测和归因分析。例如,利用中国科学院大气物理研究所的模式 GOALS/LASG,有研究者对中国地区地面气温变化进行了模拟试验。试验考虑了太阳活动、火山活动和人类活动(包括温室气体和气溶胶排放)。在3个数值试验中,以考虑温室气体+硫酸盐气溶胶+太阳活动的试验结果与观测的气温相关系数为最高,表明20世纪中国气温的变暖可能主要与这些因子的影响有关^[50]。此外,利用英国气象局模式和国家气候中心模式进行了类似模拟试验,给出了相似的结果,并指出近50年中国地区的变暖主要是增强的温室效应作用的结果^[5, 13]。

但是,目前仍不能排除自然因子和其他区域性人类活动对中国现代地面气候变暖产生主要影响的可能性。图4给出了可能影响中国近50年或100年地面气温变化的主要因子。其中,太阳活动、火山活动及气候系统内部的振荡等都可能是重要的影响因子。由于太阳辐射和火山活动历史序列资料的可靠性及气候系统对太阳辐射变化敏

感度认识的限制,目前还无法准确评价其对中国气温变化的影响程度。海洋-大气系统年代以上尺度的低频振动,如北大西洋涛动(NAO)、北极涛动(AO)、太平洋年代涛动(PDO)或ENSO的多年代振动对中国的气温可能具有重要影响^[10, 51]。近50年来中国东部的冬季风也已明显减弱,成为引起我国冬半年地面气温升高的直接影响因素^[52]。此外,土地利用和土地覆盖变化及气溶胶含量增加对地面气温的影响也受到很多研究者的关注。这些自然和人类因子或者单独地、或者结合地影响中国地区地-气系统的热量收支,应该可以对近地面气温变化造成影响,并可能在一定程度上解释观测到的全国范围特别是北方地区的气温上升现象。

特别值得提出的是,上述有关城市化对地面气温序列的影响、近百年气温变化的时间特征、对流层温度变化与地面增温的对比、以及近千年气温序列的初步重建等研究结果,每一个都在某种程度上与增强的温室效应解释存在矛盾。其中,关于城市化影响的结果并没有否定中国气候变暖

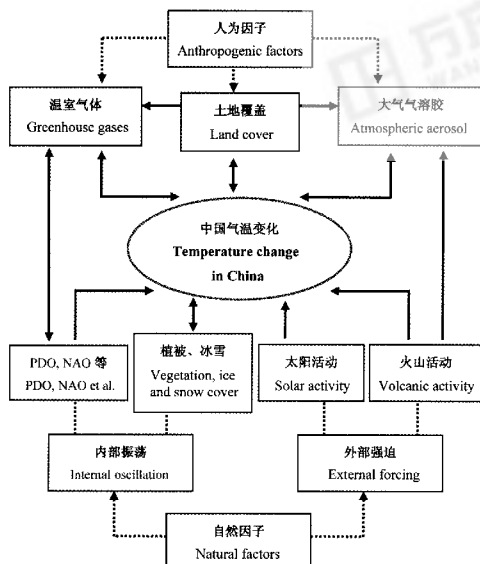


图4 影响中国年代以上尺度气温变化的主要因子

Fig. 4 Factors potentially influencing temperature of China on decadal and longer time scales

的认识,但确实在相当程度上削弱了背景地面气温升高的幅度;自由大气特别是对流层中下层温度升高不明显的事实,实际上印证了城市化引起观测台站附近地面气温明显上升的分析结果,同时也与气候模式模拟温室气体变化影响的结果不一致;近千年来气温序列则没有表明20世纪增暖的异常性质,至少无助于排除自然气候控制因子影响的可能性。

总之,气候模式模拟与观测资料的对比分析表明,中国20世纪气温变化时间特征与空间型式在很大程度上一致,说明增强的温室效应对我国现代气候增暖可能产生了一定影响。但是,很多其他研究,包括本文和本刊给出的最新分析结果,与这一解释存在着一定的矛盾。气候变化的检测和归因是学术界争论很大的问题,这种争论是研究中存在较大不确定性的客观反映。从最近的研究结果看,在短时间内明显减小或消除气候变化检测和归因研究中的不确定性尚有很大难度。

8 结论、问题与展望

中国近百年来年平均地面气温已明显增暖,升高幅度约 0.8°C ,增温速率约为 $0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,与同期全球平均相当或略强。但是,20世纪80年代初以来的增温似乎不比30~40年代明显,而10~20年代和50~60年代的变冷却比全球或北半球显著。和全球平均一样,近100年的增温主要发生在冬季和春季,夏季却有微弱变凉趋势。近54年我国年平均地表气温升高 1.3°C ,增温速率 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,明显高于全球或北半球同期平均水平。根据气温观测资料获得的我国气候生长期也已明显增长,北方和青藏高原增长更明显。

在最近的50年来,中国地面气温的增加主要是平均最低气温明显上升的结果,全国范围内极端最低气温也明显升高,而极端最高气温升高不显著。我国与温度相关的极端事件强度和发生频率一般呈现降低趋势或稳定态势,与低温有关的极端事件强度和发生频率明显减小,而与高温有关的极端事件强度和发生频率并没有明显增强。全国范围内的地面气温正在趋向温和,气温的极端性趋向弱化。

城市热岛强度加大对我国多数地面观测站近50年平均气温记录具有显著的影响。在增温明显的华北地区,1961~2000年间城市化引起的年平均气温增加值达到 0.44°C ,占全部增温的38%。如果华北地区的城市化影响有代表性,则剔除这种影响后,中国近50多年平均气温增加速率可能在 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 左右。由于现在给出的国家基本、基准站观测的地面气温变化中城市热岛增温贡献率是最低估计值,全国实际背景增暖速率低于这个数值的可能性更大。显然,城市化因素对中国极端气温事件强度和频率变化可能也具有重要影响,但这方面分析还没有系统开展。

中国高空温度变化特点引人瞩目。20世纪60年代初以来,中国对流层中下层温度变化趋势不明显,仅为 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,增温主要发生在冬季(1月),其他季节温度均表现微弱降低;对流层上层年平均温度呈明显下降趋势,变化速率达到 $-0.17^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中夏季变冷最明显;平流层下层温度下降速率达到 $-0.22^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其中冬季和春季降温最明显。1961~2004年我国探空站地面年平均气温升高速率明显高出对流层中下层,二者相差1个数量级。对流层中下层温度变化的特点说明,地面气温记录确实在很大程度上受到城市化等局地人为活动因素的影响。但是,根据目前的分析结果,仅城镇化因素不能完全解释地面气温趋势和对流层中下层温度趋势之间的差别。中国对流层中下层平均温度变化趋势不明显以及自由大气与地面气温变化之间的显著差异等特点,在区域气候变化的检测和归因研究中需要给予合理的解释。

新建近千年来气温序列证实了有关中国地区可能存在“中世纪温暖期”和“小冰期”的早期研究结论,但“中世纪温暖期”的温暖程度似乎没有原来认为的那样明显。现有的西部地区气温序列在20世纪以前展示了更为平缓的变化,与东部重建的气温序列存在较明显的差异。在“中世纪温暖期”内,11世纪末和13世纪中的温暖程度可能都超过了20世纪30~40年代暖期,推测也超出80年代中以来的暖期。因此,中国地区20世纪的增暖可能并不是史无前例的。这个结论同目前国际上流行的观点存在着重要差别。

20世纪的增暖可能不完全由自然因素引起。

一些迹象表明, 人类活动引起的大气成分变化可能已经对中国的地面气温变化产生了影响。这一判断得到气候模式模拟结果的支持。考虑了所有当前已经认识的强迫因子后, 模式模拟与观测的 20 世纪气温变化时空特点比较一致, 说明中国 20 世纪的地面气温变化可能在一定程度上是对增强的温室效应及其全球变化的响应。同时, 尽管“中世纪温暖期”有的阶段气温可能比 20 世纪高, 但近百年的增暖可能是过去 7 个世纪所没有的, 说明大气中温室气体浓度增加可能产生了一定作用。但是, 太阳活动及其太阳辐射变化的影响有可能比目前所认识到的要大。气候系统内部的低频振动对观测到的晚 20 世纪近地面气候变暖也有可能具有更多的贡献。此外, 对于区域土地利用与土地覆盖变化和人类排放的气溶胶等气候效应, 目前了解还不很深入。

因此, 当前对气候变化的检测和原因分析还存在着相当大的不确定性。不确定性主要源自: 高质量古气候代用资料点稀少; 20 世纪中期以前的高质量器测资料稀缺, 资料序列的非均一性问题难以订正; 城市化对地面气温记录的影响难以完全分离, 早期资料这种影响的分离尤其困难; 区域土地利用对地面气温变化的确切影响还不很了解; 气候系统内部年代以上尺度变化对现代区域平均地面气温上升的作用不够清楚; 对于大气中气溶胶含量的时空变化及其辐射强迫的认识还非常粗浅; 对太阳活动和太阳输出辐射的变化及其气候效应缺乏足够了解; 气候模式的模拟能力还不够强, 特别是模式的敏感性还存在很大不确定性。将来, 这些方面的研究应得到进一步加强, 以推动气候变化的检测和归因分析。

致 谢 本文第一作者感谢丁一汇、李泽椿、王绍武、陈隆勋、孙安健、林学椿的支持和建设性意见, 感谢刘小宁、李庆祥、张洪政在近 50 年地面气温资料非均一性检验和订正方面的工作, 也感谢张锦、朱界平女士在课题管理工作中的辛勤劳动。

参考文献

[1] 张先恭, 李小泉. 本世纪我国气温变化的某些特征. 气象学报, 1982, 40, 198~208
Zhang, Xiangong, Li Xiaquan, et al. Some features of air

temperature change over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, 40, 198~208

- [2] 张兰生, 方修琦. 中国气温变化的区域分异规律. 北京师范大学学报 (自然科学版), 1988, (3): 78~85
Zhang Lansheng, Fang Xiuqi. Regional difference of surface air temperature change in China. *Journal of Beijing Normal University* (Natural Version) (in Chinese), 1988 (3): 78~85
- [3] 张兰生, 方修琦, 任国玉编. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2000. 1~341
Zhang Lansheng, Fang Xiuqi, Ren Guoyu. *Global Change* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000, 341pp
- [4] 王绍武, 姚檀栋. 近百年中国年气温序列的建立. 应用气象学报, 1998, 9 (4): 392~401
Wang Shaowu, Yao Tandong. Construction of China's annual mean temperature series of the last 100 years. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 9 (4): 392~401
- [5] 王绍武, 谢志辉, 蔡静宁, 等. 近千年全球平均气温变化的研究. 自然科学进展, 2002, 12: 1145~1149
Wang Shaowu, Xie Zhihui, Cai Jingning, et al. Study on change of global average temperature in the past thousand years. *Advance in Natural Sciences* (in Chinese), 2002, 12: 1145~1149
- [6] 王绍武, 董光荣. 西部环境特征及其演变. 见: 秦大河主编, 中国西部环境演变评估 (第一卷). 北京: 科学出版社, 2002, 29~70
Wang Shaowu, Dong Guangrong. Features and evolution of environment in western China. In: *Assessment of Environmental Change of Western China*. (Vol. 1) (in Chinese), Qin Dahe Ed. Beijing: Science Press, 2002, 29~70
- [7] 陈隆勋, 朱文琴. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 56 (3): 257~271
Chen Longxun, Zhu Wenqin. Study on climate change of China over the past 45 years. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1998, 56 (3): 257~271
- [8] 陈隆勋, 邵永宁, 张清芳, 等. 近四十年我国气候变化的初步分析. 应用气象学报, 1991, 2 (2): 164~173
Chen Longxun, Shao Yongning, Zhang Qingfang, et al. A preliminary analysis of climate change of China over the last 40 years. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1991, 2 (2): 164~173
- [9] 龚道溢, 王绍武. 1998 年: 中国近一个世纪以来最暖的一年. 气象, 1999, 25 (8): 3~5
Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1998 as the warmest year of the past century. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1999, 25 (8): 3~5
- [10] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. 地理学报, 1999, 54 (2): 125~133

- Gong Daoyi, Wang Shaowu. Change in Siberia High and its association with global warming. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1999, **54** (2): 125~133
- [11] 丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. *气象*, 1994, **20** (12): 19~26
- Ding Yihui, Dai Xiaosu. Temperature change during the recent 100 years over China. *Meteorological Monthly*, 1994, **20** (12): 19~26
- [12] 翟盘茂, 任福民. 中国近四十年最高最低温度变化. *气象学报*, 1997, **55** (4): 418~429
- Zhai Panmao, Ren Fumin. Changes in maximum and minimum temperatures of the past 40 years over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (4): 418~429
- [13] 赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因分析. *气候与环境研究*, 2005, **10** (4): 808~817
- Zhao Zongci, Wang Shaowu, Xu Ying, et al. An analysis of possible causes of China surface air temperature change in the past 100 years. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 808~817
- [14] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响. *气象*, 1991, **17** (4): 14~17
- Zhao Zongci. Temperature change of the past 39 years and the impact of urbanization on it. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1991, **17** (4): 14~17
- [15] 任国玉, 周薇. 辽东半岛本世纪气温变化初步研究. *气象学报*, 1994, **52** (4): 493~498
- Ren Guoyu, Zhou Wei. A preliminary study of 20th century temperature change on the Liaodong Peninsula. *China. Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (4): 493~498
- [16] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近五十年来中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, **63** (6): 942~956
- Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. Climate changes of Mainland China over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (6): 942~956
- [17] 姚檀栾. 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. A record of climatic environment over the past 2000 years from Guliya ice core, China. *Science of Quaternary* (in Chinese), 1997, (1): 52~61
- [18] 张德二. 我国“中世纪温暖期”气候的初步推断. 第四纪研究, 1993, (1): 7~14
- Zhang De'er. A preliminary analysis of the Medieval Warm Period climate in China. *Science of Quaternary* (in Chinese), 1993 (1): 7~14
- [19] 唐其琛, 邓自旺, 周晓兰. 中国气温异常的区域特征研究. *气象学报*, 2000, **58** (3): 288~296
- Tu Qipu, Deng Ziwan, Zhou Xiaolan. Study on regional feature of China temperature variation. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (3): 288~296
- [20] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列. *大气科学*, 1995, **19** (5): 525~534
- Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. Temperature series of the past 100 years for China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1995, **19** (5): 525~534
- [21] 葛泉生, 郑景云, 方兴齐, 等. 冬季半年温度重建对黄河中游及长江中下游地区, 中国, 过去 2000 年. *The Holocene*, 2003, **13**, 995~1002.
- Ge Quansheng, Zheng Jingyun, Fang Xingqi, 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. *The Holocene*, 2003, **13**, 995~1002.
- [22] 宋连春. 近 40 年我国气温时空变化特征. *应用气象学报*, 1994, **5** (1): 119~124
- Song Lianchun. Spatial and temporal change of China surface air temperature over the past 40 years. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1994, **5** (1): 119~124
- [23] 钱维宏, 陈德亮, 林祥, 等. 全球变化下的中国区域气温一降水趋势. *气候变化通讯*, 2004, **3** (3): 8~9
- Qian Weihong, Chen Deliang, Lin Xiang, et al. Change trends of regional temperature and precipitation over China under background of global change. *Climate Change Newsletter* (in Chinese), 2004, **3** (3): 8~9
- [24] 唐国利, 林学椿. 1921~1990 年我国气温序列及变化趋势. *气象*, 1992, **18** (7): 3~6
- Tang Guoli, Lin Xuechun. Temperature series and change trend of 1921~1990 over China. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1992, **18** (7): 3~6
- [25] 胡志忠, 杨少武, 吴荣. 长期气候变化在中国和全球变暖信号. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (19): 4614
- Hu Z Z, Yang S, Wu R. Long-term climate variations in China and global warming signals. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (19): 4614
- [26] 曾志, 严志, 叶德. 最近一个世纪中我国气温变化趋势. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (4): 481~496
- Zeng Z, Yan Z, Ye D. Regions of most significant temperature trend during the last century. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (4): 481~496
- [27] 杨宝, Braenning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (9): 1324. doi:10.1029/2001GL014485, 2002
- Yang Bao, Braenning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (9): 1324. doi:10.1029/2001GL014485, 2002
- [28] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge: The Press Syndicate of Cambridge University, 2001. 365
- IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al., Eds. Cambridge: The Press Syndicate of Cambridge University, 2001. 365
- [29] 王绍武. 近百年我国及全球气温变化趋势. *气象*, 1990, **16** (2): 11~15
- Wang Shaowu. China and global temperature change trends in recent 100 years. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 1990, **16** (2): 11~15
- [30] Zhao Zongci, Xu Ying. Detection and scenarios of temperature change in East Asia. *World Resource Review* (USA),

- 2002, **15**: 321~333
- [31] 任国玉, 徐德应, 石广玉, 等. 人类活动在中国气候演变中的作用. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰主编, 中国气候与环境演变 (第九章). 北京: 科学出版社, 2005. 455~506
- Ren Guoyu, Xu Deying, Shi Guangyu, et al. Human's roles in change of China climate. In: *Changes of Climate and Environment in China* (Vol. 9) (in Chinese), Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, Eds, Beijing: Science Press, 2005. 455~506
- [32] 徐铭志, 任国玉. 近 40 年中国气候生长长期的变化. 应用气象学报, 2004, **15** (3): 306~312
- Xu Mingzhi, Ren Guoyu. Change in climatic growth period over China: 1961—2000. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (3): 306~312
- [33] 初子荣, 任国玉. 北京地区城市热岛强度变化对区域温度序列的影响. 气象学报, 2005, **63** (4): 534~540
- Chu Ziyong, Ren Guoyu. Effect of enhanced urban heat island magnitude on average surface air temperature series in Beijing region. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (4): 534~540
- [34] 张爱英, 任国玉. 山东省城市化对区域平均温度序列的影响. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 754~762
- Zhang Aiying, Ren Guoyu. Urban heat island effect and its influences on the temperature series in Shandong Province. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 754~762
- [35] 陈正洪, 王海军, 薛铃, 等. 湖北省城市热岛强度变化对区域气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 771~779
- Chen Zhenghong, Wang Haijun, Xue Ling, et al. Effect of enhanced urban heat island magnitude on average surface air temperature series in Hubei Province, China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 771~779
- [36] 刘学锋, 于长文, 任国玉. 河北省城市热岛强度变化对区域地表平均气温序列的影响. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 763~770
- Liu Xuefeng, Yu Changwen, Ren Guoyu. Change in urban heat island magnitude and its effect on surface mean air temperature record in Hebei region. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 763~770
- [37] 白虎志, 任国玉, 张爱英. 城市热岛效应应对甘肃省温度序列的影响. 高原气象, 2006, **25** (1)
- Bai Huzhi, Ren Guoyu, Zhang Aiying. Effect of urban heat island on average surface air temperature trend in Gansu Province of China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2006, **25** (1)
- [38] 周雅清, 任国玉. 华北地区城镇化对地表气温记录的影响. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 743~753
- Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Identifying and Correcting Urban Bias for Regional Surface Air Temperature Series of North China over Period of 1961—2000. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 743~753
- [39] Jones P D, Groisman P Ya, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 1990, **347**: 169~172
- [40] 王颖, 任国玉. 中国高空温度变化初步分析. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 780~790
- Wang Ying, Ren Guoyu. Change in free atmospheric temperature over China during 1961—2004. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 780~790
- [41] Angell J K. Comparison of Surface and Tropospheric Temperature Trends. *Geophysical Research Letters*, 1999, **26** (17): 2761~2764
- [42] National Research Council (NRC). *Reconciling Observations of Global Temperature Change*. National Academy Press, Washington, D C. 2000. 50~57
- [43] Mcars C A, Schabel M C, Wentz F J. A reanalysis of the MSU Channel Tropospheric Temperature Record. *J. Climate*, 2003, **16**: 3650~3664
- [44] Christy J R, Norris W B. What may we conclude about global tropospheric temperature trends. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31** (6): L06211, doi: 10.1029/2003GL019361, 2004
- [45] Parker D E. Temperatures high and low. *Science*, 2000, **287**: 1216~1217
- [46] 唐国利, 任国玉. 近百年来我国地表气温变化的再分析. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 791~798
- Tang Guoli, Ren Guoyu. Reanalysis of surface air temperature change of the past 100 years over China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 791~798
- [47] 初子荣, 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
- Chu Ziyong, Ren Guoyu, Shao Xuemei, et al. A preliminary reconstruction of mean surface air temperature over the past 1000 years in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 826~836
- [48] 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 中国平均最高, 最低气温及日较差变化: 1951~2002. 气候与环境研究, 2005, **10** (4): 728~735
- Tang Hongyu, Zhai Panmao, Wang Zhenyu. On Change in mean Maximum temperature, Minimum Temperature and Diurnal Range in China: 1951—2002. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 728~735

- [49] Li Q, Zhang H, Liu X, Huang J. UHI Effect on Annual Mean Temperature during Recent 50 Years in China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2004, **78** (3-4): 156~165
- [50] 马晓燕. 外部强迫因子对气候变化影响的数值试验研究. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 2002, 137pp
Ma Xiaoyan. Modeling study on effect of extra forcings on climate change. Ph. D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002, 137pp
- [51] 张人禾, 刘晶淼, 等. 海洋和陆面过程对中国气候与环境的作用. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰主编, 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 科学出版社, 2005. 319~357
Zhang Renhe, Liu Jingmiao, et al. Roles of oceanic and terrestrial processes in China climate and environmental changes. In: *Changes of Climate and Environment in China* (Vol. 1) (in Chinese). Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, Eds. Beijing: Science Press, 2005. 319~357
- [52] 丁一汇, 董文杰, 何金海, 等. 亚洲季风及其与中国气候和环境变化的关系. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰主编, 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 科学出版社, 2005. 398~454
Ding Yihui, Dong Wenjie, He Jinhai, et al. Asian monsoon and its effect on China climate and environmental changes. In: *Changes of Climate and Environment in China* (Vol. 1) (in Chinese). Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, Eds. Beijing: Science Press, 2005. 398~454

