

近54年中国地面气温变化

任国玉^{1,2} 徐铭志^{1,2} 初子莹^{1,2} 郭军³
李庆祥⁴ 刘小宁⁴ 王颖⁴

- 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 天津市气象局气候服务中心, 天津 300074
- 4 中国气象局国家气象信息中心气候资料室, 北京 100081

摘要 采用国家基准气候站和基本气象站地面月平均气温资料, 在严格质量控制和非均一性订正的基础上, 分析了1951年以来中国大陆地区近地表年和季节平均气温演化的时间与空间特征。结果表明, 我国近54年来年平均地表气温变暖幅度约为 1.3°C , 增温速率接近 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 比全球或半球同期平均增温速率高得多。全国大范围增暖主要发生在近20余年。气温变化的季节差异和空间特征与前人分析结论基本一致, 冬季增温速率高达 $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 春季为 $0.28^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 秋季 $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 夏季增温速率最小, 但也达到 $0.15^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。我国20世纪80年代初期开始的明显增暖主要表现在冷季, 但进入90年代以来夏季增暖也日趋明显。从区域上看, 中国大陆地区最明显的增温发生在北方和青藏高原地区, 而西南的四川盆地和云贵高原北部仍维持弱的降温趋势。值得提出的是, 作者给出的结果尚未考虑城镇化对地面气温观测记录的影响。

关键词 地面气温 气候变化 全球变暖 区域气候

文章编号 1006-9585 (2005) 04-0717-11 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

Changes of Surface Air Temperature in China During 1951—2004

REN Guo-Yu^{1,2}, XU Ming-Zhi^{1,2}, CHU Zi-Ying^{1,2}, GUO Jun³,
LI Qing-Xiang⁴, LIU Xiao-Ning⁴, and WANG Ying⁴

- 1 *Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081*
- 2 *National Climate Center, Beijing 100081*
- 3 *Climate Service Center, China Meteorological Administration, Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074*
- 4 *National Meteorological Information Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract A data set from 726 stations was used to analyze surface air temperature change in Mainland China. The data set has been processed more carefully, and the main in-homogeneities existing in the monthly mean temperature data have been checked and corrected. The widely accepted procedures for creating area-averaged climatic time series and for calculating linear trend have been used. Analyses have been made for annual and monthly mean temperature. Annual mean surface air temperature in Mainland China as a whole rose by about 1.3°C for the last 54 years, with a warming rate of about $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. The warming is more rapid than the average values of the world and the Northern Hemisphere. The most evident warming occurred in winter and spring as expected. Northeast China, North China and Northwest China experienced more significant warming in terms of annual mean tempera-

收稿日期 2005-07-26 收到, 2005-11-06 收到修定稿

资助项目 国家“十五”科技攻关项目课题 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

ture, while a cooling trend for southwestern China reported in earlier studies is still continuing. Summer mean temperature in the middle and lower reaches of the Yangtze River also decreased in the last 55 years. We have also tentatively analyzed the possible causes for the observed change in temperature.

Key words temperature, climate change, global warming, regional climate

1 引言

20 世纪 80 年代以来,国内学者对中国器测时期的气候变化进行了很多研究,取得了大量成果^[1-12]。这些研究表明,中国近百年温度变化与全球或北半球相似,均显示出 20 世纪 30~40 年代和 80 年代以来两个显著增温期,但相对于北半球中国 30~40 年代的温暖期更为明显,同时中国一些地区的夏季气温具有不同程度的降低趋势。

近 50 年来我国地面气候观测资料空间覆盖面和数据质量均较 1950 年以前有明显改善。利用这些资料,国内学者对中国近 50 年来的气候特别是气温变化开展了很多分析工作。例如,张兰生等^[13]对中国气候变化的区域特征进行了研究;李克让等^[14]分析了近 40 年来中国气温的长期变化趋势;宋连春^[15]根据全国 336 个站逐旬地面气温资料,分析了中国 40 余年气温时空变化特征;翟盘茂和任福民^[16]利用中国 1951~1990 年的实测资料,分析了中国最高、最低温度的时空变化趋势特点;陈隆勋等^[17]利用 400 余站资料,对 40 多年来中国气候变化时空特征作了系统研究;屠其璞等^[18]利用 160 站的温度资料建立了 1951~1996 年中国年平均气温序列;沙万英等^[19]分析了我国 20 世纪 80 年代以来的变暖及其热量带迁移问题;曲建和等^[20]对黄淮海地区近 40 年内温度变化特征进行了研究;李栋梁等^[21]分析了兰州温度变化的气候特征;张顺利等^[22]分析了拉萨年温度的变化特征;杜军^[23]利用西藏 1961~2000 年月平均气温、最高和最低气温资料,分析了近 40 年内西藏高原气温的变化趋势。

对近 50 年地面气温变化的研究获得了许多有价值的成果,增进了对我国器测时期气候变化规律的认识。但是,对这个时期气候变化的研究还需要深化,特别是,在现有的中国温度序列中,资料的非均一性问题仍比较突出,而在全国或区域性近地面平均气温序列建立过程中,多数研究

对此还没有给予妥善处理。城市热岛效应对地面气温记录和区域温度序列的影响也是一个没有解决的问题。此外,为了增强可比性,气温序列的建立需要采用国际上的标准方法。

本文应用国家基准气候站和基本气象站观测网资料,对中国大陆地区近 54 年来近地面气温变化重新进行了分析。这项工作更新了原有的气候要素时间序列。由于使用了比较密集的台站观测资料,而且在资料的质量检验、均一性处理以及区域平均的统计方法等方面做了更细致的考虑,使得新序列的可靠性得到提高。

2 资料

资料来源于中国气象局国家气象信息中心资料室提供的中国 740 个测站 1951~2004 年的逐年平均和逐月平均资料,这些站绝大部分属于国家基准气候站和基本气象站,个别为一般气象站。

在所用气温资料中,20 世纪 50 年代初站点较少,1951 年只有 128 个,1956 年就达到 433 个,而 1960 年的站点数量已经接近 650 个,之后直到现在,各年的站点数量变化不大,基本上都介于 650~700 之间。在这份资料中,具有 30 年以上连续记录的台站数有 666 个,35 年以上连续记录台站数 647 个,40 年以上连续记录的台站数 625 个,45 年以上连续记录的台站数 492 个,而具有连续 54 年温度记录的台站数仅有 98 个站。20 世纪 50 年代初期站点数量不仅少,而且空间分布也很不均匀,西部地区除了新疆有少量台站外,其他地区鲜有记录;50 年代中期以后西部的站点也逐渐增多,至 1956 年中国西部所有省区都有了观测站。本文采用具有 35 年以上连续记录的 647 个台站资料计算平均气温距平和气温趋势。

在现有的地面气温资料中,一个突出的问题就是各种人为因素引起的非均一性现象。引起温度资料非均一性的一个主要原因是观测地点的迁移。全国气象观测站观测时次、观测仪器和观测

高度也曾有变化，这可能在温度序列中引起额外的非均一性问题。为了解决这个问题，对 1951~2001 年的月平均气温资料进行了非均一性检验和订正。参考 Easterling 等^[24]的方法，对全部基准站和基本站的月平均气温序列中的明显断点进行了排查，并根据排查和台站历史沿革记录资料检验结果，对确认的人为偏差进行了订正，即将检测出的断点或不连续点去除，使包含不连续点的时间序列变得“相对均一”。但是，由于城市化和增强的热岛效应引起的非均一性不存在明显的不连续点，在这项研究中没有给予订正。通过订正，使得包括台站迁移、仪器换型、观测方法改变、计算方法变化甚至台站周围环境的变化对资料均一性的影响尽可能减少到最小^[25]。由于订正是以最新记录为标准进行的，即把资料订正到断点以后的序列上来，这为序列的更新延长提供了便利。

3 方法

在建立全国平均地面气温序列时，采用 Jones 等^[26]提出的计算区域平均气候时间序列的方法，把中国整个区域按经纬度划分网格，网格尺寸为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ；然后将每个网格内所有站点的数据做算术平均，得到各网格的平均值；最后应用面积加权法计算所有网格点的平均值，获得全国平均的气温时间序列。计算距平值的参考气候期是 1971~2000 年。

具体步骤是：首先求各站温度距平值，然后划分 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 等经纬度的网格，再求每一个网格内所有台站温度距平的算术平均值；最后按网格面积求所有网格温度距平的加权平均值。计算全部网格面积加权平均值的公式为

$$\hat{Y}_k = \frac{\sum_{i=1}^m (\cos \varphi_i) \times Y_{ik}}{\sum_{i=1}^m \cos \varphi_i} \quad (1)$$

式中 \hat{Y}_k 为第 k 年全国平均值， $i = 1, 2, \dots, m$ (m 为网格数)， Y_{ik} 为第 i 个网格中第 k 年的平均值， φ_i 为第 i 个网格中心的纬度。

按上述方法，分别建立了 1951~2004 年全国平均的年、四季（春、夏、秋、冬）温度时间序列。季节采用气象季节划分方法，即上年 12 月至

当年 2 月为冬季，3~5 月为春季，6~8 月为夏季，9~11 月为秋季。年平均值为当年 12 个月值的算术平均。

气温变化趋势的性质和幅度可以用趋势系数、变化速率以及前后两段时期平均值的差等来表示。气温趋势系数的计算公式为

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (2)$$

它实质上为 n 个时刻的气温与自然数列 1, 2, 3, ..., n 的相关系数。其中 n 为年份序号。 x_i 是第 i 年的气温平均值， \bar{x} 为多年平均值。 $\bar{t} = (n+1)/2$ 。趋势系数 (r) 为正 (负) 时，表示气温在所统计的时间内有线性增加 (减少) 的趋势。用这种办法分别计算了年和四季气温趋势系数。

气温变化速率就是采用最小二乘法计算获得的气候要素值与时间的线性回归系数，即：

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (t_i y_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n t_i}{\sum_{i=1}^n t_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n t_i)^2} \quad (3)$$

式中， y_i 为各气温时间序列， t_i 为时间 ($t_i = 1, 2, \dots$)， n 为时间序列长度 (年数)。称 $10 \times$ 为气温变化速率，单位为 $^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ 。

4 气温时间序列

图 1 给出了年平均气温距平序列。从 1951 年到 2004 年，中国年平均气温整体的上升趋势非常明显，温度变化速率达 $0.25 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$ ；54 年平均气温上升了约 $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 。增温主要是从 20 世纪 80 年代中期开始的。80 年代中以前，中国气温始终在较小的范围内上下波动，以后气温就一直呈明显的上升趋势。因此，近 54 年我国近地面气温的增暖主要是发生在最近的 20 余年内。

从各个年代平均气温距平和偏暖年份看，80 年代中以后的增温也十分明显 (表 1)。80 年代以前的 30 年，年代平均气温距平均为负值；而 80 年代、90 年代和近 4 年平均气温距平均为正值，且越来越高。除 1973 年外，80 年代之前所有年份气温距平值均为负值，1973 年的正距平值也接近

表 1 全国 20 世纪各年代平均气温距平及气温正距平年数

Table 1 Average anomalies and years with positive temperature anomalies for each decade

	50 年代 1950s	60 年代 1960s	70 年代 1970s	80 年代 1980s	90 年代 1990s	近 4 年 last 4 yrs
平均气温距平 Average anomalies/ 气温正距平年数 Years with positive anomalies	- 0. 60 0 (0)	- 0. 42 0 (0)	- 0. 26 1 (10)	- 0. 09 5 (50)	0. 35 7 (70)	0. 79 4 (100)

注: 括号内为气温正距平年数所占分析时段内总年数的百分比

Note: Numbers bracketed indicate the percentage of years with positive anomalies

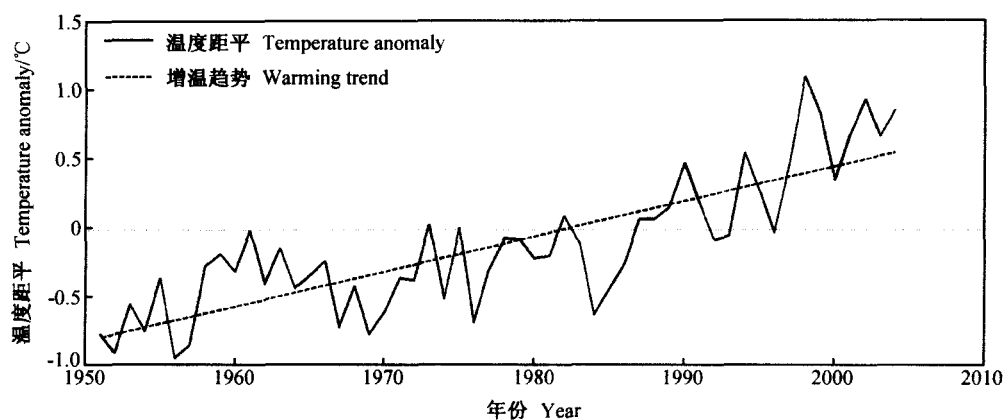


图 1 1951~2004 年中国大陆年平均气温距平

Fig. 1 Annual mean surface temperature anomalies over China during 1951—2004

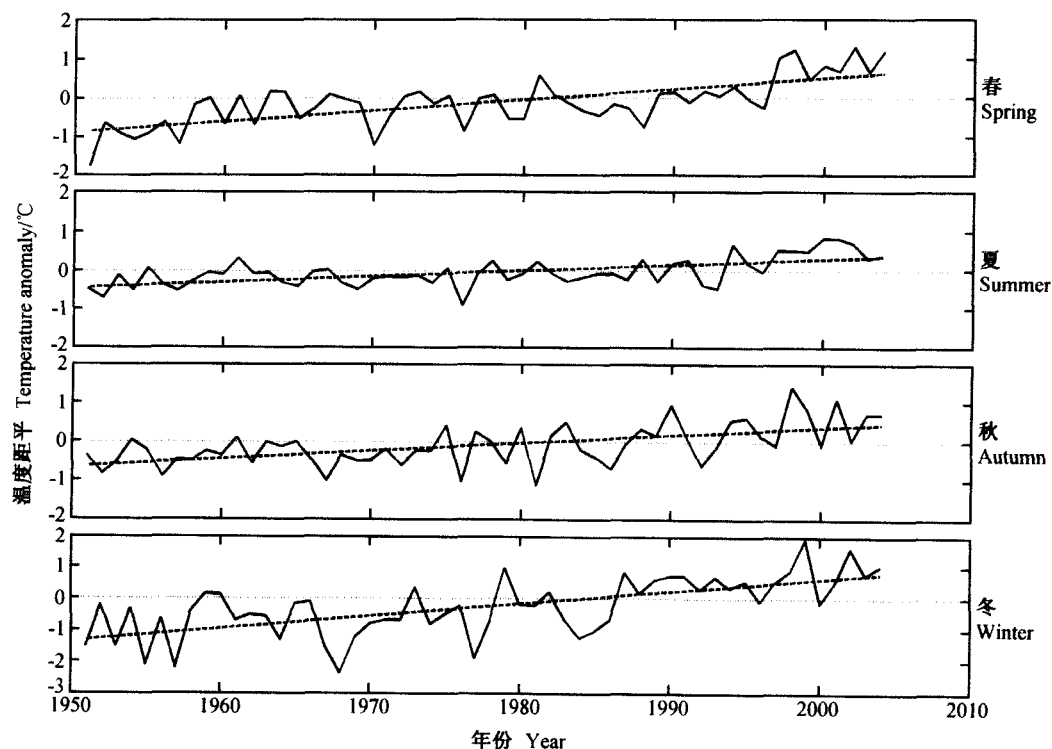


图 2 1951~2004 年中国大陆季节平均气温距平

Fig. 2 Seasonal mean surface temperature anomalies over China during 1951—2004

0 ; 而 80 年代以后却出现了 13 个偏暖(距平值在 0 以上)年份,且温暖的程度也越来越大。1998 年平均气温距平值达 1.09 ,为有记录以来最暖的 1 年。

中国四季平均气温整体上都呈上升趋势,但增温幅度有所不同(图 2)。在近 54 年中,冬季平均气温上升 2.11 ;春季上升 1.51 ;秋季上升 1.08 ;夏季上升 0.81 。因此,冬季温度上升趋势最为明显,增温速率高达 0.39 /10 a;春季次之,增温速率为 0.28 /10 a;秋季增暖趋势较小,增温速率为 0.20 /10 a;夏季变暖最不明显,增温速率仅为 0.15 /10 a。

从多年波动来看,四季平均气温的变化也各有千秋。秋季和冬季的变化较相似,两个季节从 80 年代初开始都呈现出明显的上升趋势,1987 年以后,二者的上升趋势都有了进一步加快的迹象。春季和夏季的变化较相似,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,二者都有一个比较明显的跳跃,开始上升。从波动幅度看,春、夏、秋季的波动都比较平稳,冬季波动幅度较大。

在 80 年代初之前的 30 年中,春季有 7 个偏暖年份(最大距平为 1963 年的 0.16),夏季有 5 个偏暖年份(最大距平为 1961 年的 0.31),秋季有 6 个偏暖年份(最大距平为 1975 年的 0.39),冬季有 4 个偏暖年份(最大距平为 1979 年的 0.98);在此后的 24 年中,春季有 14 个偏暖年份(最大距平为 2002 年的 1.29),夏季有 14 个偏暖年份(最大距平为 2000 年的 0.83),秋季有 15 个偏暖年份(最大距平为 1998 年的 1.40),冬季有 17 个偏暖年份(最大距平为 1999 年的 1.89)。可见,20 世纪 80 年代初以来,中国 4 个季节都有很大程度的增暖表现;特别值得指出的是,冬季是自 80 年代初以来偏暖年份最多的季节,增温速率也最快。

5 气温变化空间特点

图 3 给出了 1951~2004 年中国年平均气温的趋势系数等值线。全国范围内,除四川盆地和川、滇交界地带较小的气温下降趋势外,其他地方均表现为增暖。我国北方(秦岭、淮河一线以北

地区)和青藏高原的广大地区、海南、云南南部、东南沿海地带以及江淮地区,年平均气温变化的趋势系数都超过了 0.4,增温趋势显著(信度在 0.01 以上)。其中新疆东南、青海西北、西藏中部、内蒙大部、黑龙江大部、辽宁、河北北部、北京、海南以及云南南部,年平均气温变化的趋势系数更大于 0.6,增温趋势非常显著。

西南地区北部,包括四川盆地东部和云贵高原北部,年平均气温呈下降趋势,但并不是很显著。这个区域的降温现象早在多年前就已发现^[13, 15, 27],90 年代中开始略有回暖,但在所分析的时段内仍然表现为弱的降温趋势。

我国北方和青藏高原,除了塔里木盆地,其他地区一年四季气温普遍上升(图 4)。东北地区,除秋季外的其他季节增温都比较明显;内蒙古各个季节的增温也都比较明显;新疆冬季增温明显,南疆地区的春、夏、秋季平均气温略有下降;青藏高原秋、冬季的增温最为显著,其中青海西北部是全国秋、冬季增温最快的地区。

包括华东和华中的长江中下游地区、淮河流域夏季平均气温有一定下降趋势,但春、秋、冬季都存在增温趋势,特别是在江北、苏南和上海地区,增温趋势比较明显。华南地区,除了广西和福建部分地区在春季有一定降温趋势外,其余地区一年四季呈微弱增温趋势,其中珠江三角洲地区夏、秋季增温明显,海南四季的增温都比较明显。西南地区和四川盆地四季平均气温都有一定下降,春季降温尤为明显。云南南部一年四季的增温都很明显。

因此,我国四季增暖在北方最为显著,其中春季的增暖主要在东北地区,秋、冬季的增暖主要在华北和西北地区。从春季经夏、秋到冬季,主要增暖区域有自东向西转移并扩大的趋势;全国季节性的降温区域主要发生在南方,春季和夏季的变凉比较明显,其中春季的降温主要出现在西南地区,而夏季的变凉主要发生在长江中下游地区。从春季到夏季,我国南方的降温地区有从西向东迁移趋势。

6 讨论

本文的分析表明,近 54 年我国年平均气温的

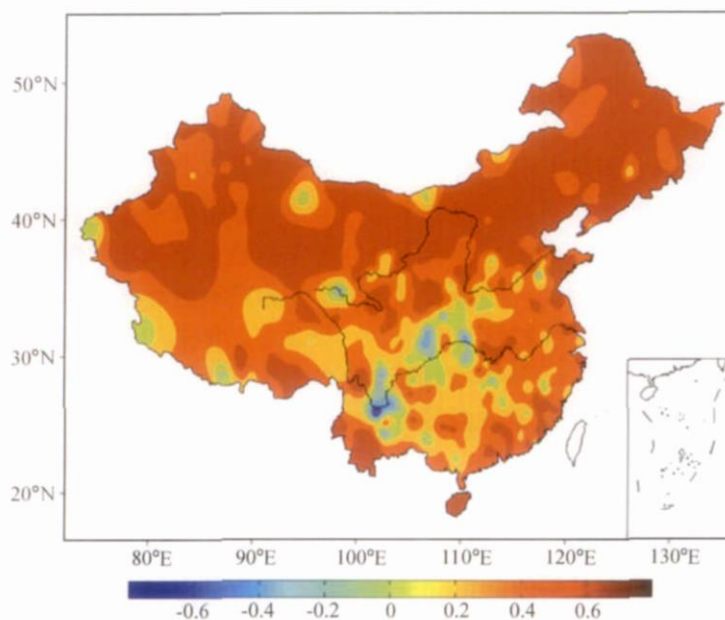


图3 1951~2004年中国大陆年平均气温的趋势

Fig. 3 Tendency of annual mean temperature in China in 1951—2004

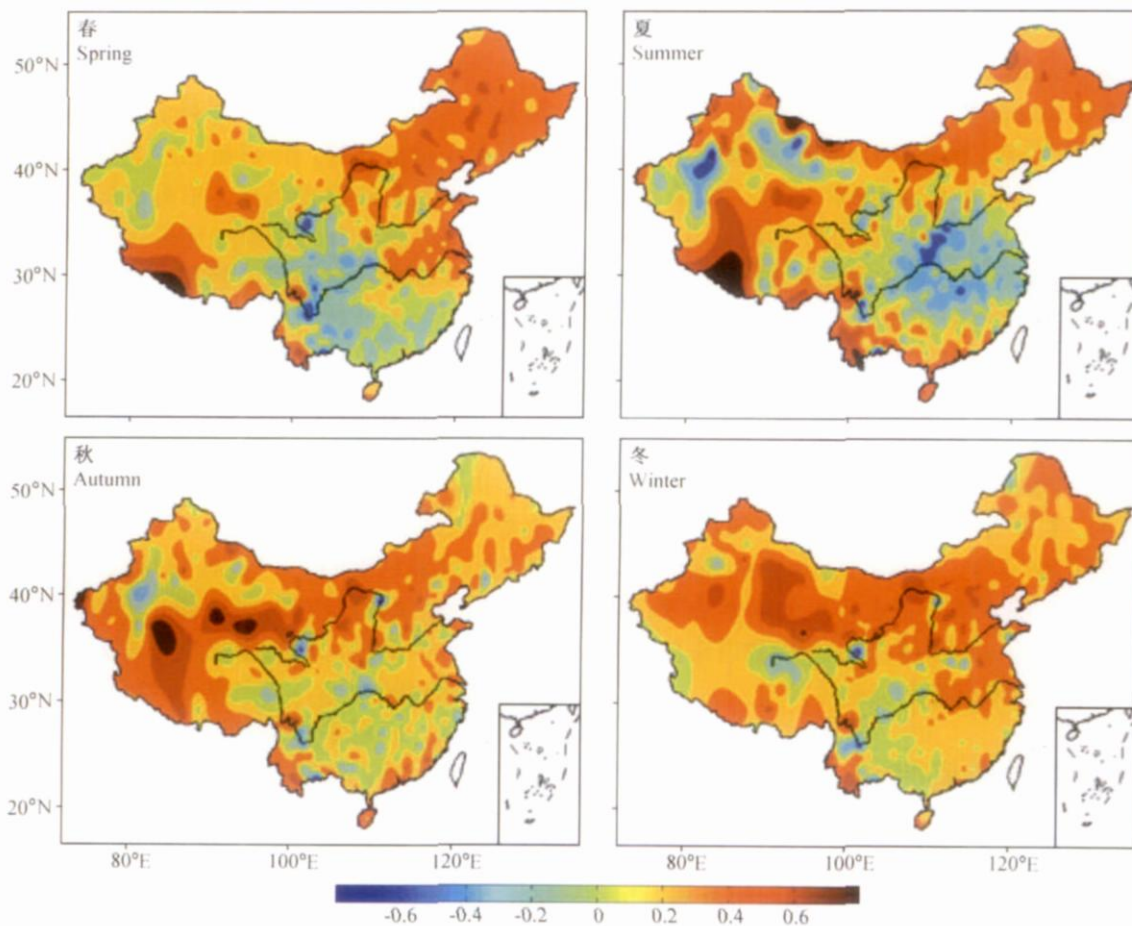


图4 1951~2004年中国大陆季节平均气温的趋势

Fig. 4 Tendency of seasonal mean temperature in China in 1951—2004

变暖速率比同期全球或北半球平均高得多^[28, 29], 成为全球变暖最明显的地区之一。变暖的空间和季节特征与北半球情况相似^[17, 30]。由于春、秋季的明显增暖, 中国大陆大范围地区的气候或温度生长期已经显著变长^[31, 32]。冬季和春、秋季温度的明显增暖也导致冷空气和寒潮活动的显著减弱, 对经济社会生活和生态系统产生了不可忽视的影响。

值得提出的是, 本文给出的全国平均温度变化趋势或速率比过去分析结果要大。例如, 根据陈隆勋等^[17]的估计, 1951~1995 年期间全国年平均气温增加速率为 0.13 /10 a 左右; 王绍武等^[33]估计, 1951~2002 年间全国年平均气温增加速率为 0.17 /10 a 左右; 任国玉等^[34]给出的 1951~2001 年间年平均气温增加速率是 0.22 /10 a; 而本文获得的 1951~2004 年期间年平均气温增加速率达到 0.25 /10 a。造成这种差别的原因主要有两个: 一是全国范围增暖在近些年非常明显, 本文序列由于采用了最新的资料, 包含最显著的增温阶段, 所获得的温度上升趋势也就更加显著; 二是采用经过非均一性订正的资料建立全国平均温度序列, 所获得的平均气温变化趋势一般比原始资料分析结果更为明显。这是因为, 温度资料的非均一性检验主要是针对台站迁移引起的不连续点, 订正也主要是对台站由城镇建城区向郊区迁移所引起的误差进行纠错, 这一过程往往恢复了单站城镇化影响造成的地面气温上升趋势。

对于造成我国年代以上尺度气温变化的原因, 目前还难以给出明确的结论。多数气候学者相信, 近百年、特别是近 50 年的增暖可能主要是由增强的温室效应所引起的^[35, 36]。尽管有关冬季和春季温度重建的研究指出, 最近我国东部的冬季增暖在近 2000 年历史气候序列中可能不是独特的, 过去有比目前还温暖的时期^[37], 秦岭地区近 50 年春季温度在过去 300 多年里也是比较低的^[38], 但在青海祁连山地区的树轮气候分析表明, 20 世纪特别是近 50 年来的增暖可能确实是过去 1 000 年内所没有的^[39], 说明自然的气候因子可能不是祁连山地区近期变暖的主要原因。最近, 国内开展的气候模式模拟工作也表明, 当考虑了大气中温室气体浓度、气溶胶浓度、太阳辐射和火山活动等

强迫因子变化的影响时, 模式模拟的 20 世纪中国近地面平均气温与观测的气温变化比较一致, 说明增强的大气温室效应可能是我国气候变暖的主要原因^[40~42]。

但是, 在根据地面观测资料和模式分析识别气温变化原因的过程中, 还有很多问题需要解决。其中一个重要的问题是, 城镇热岛效应增强的影响究竟在多大程度上还保留在目前的近地面气温序列中。一些研究指出, 我国城镇化过程对地面气温记录的影响是比较显著的^[43~45]。当然, 也有研究认为, 从大范围来看, 由于城镇化或局地环境变化对气温序列的影响是微弱的^[25, 46]。最近对我国部分地区的分析表明, 在国家基准气候站和基本气象站的记录中, 1961~2000 年期间, 由于城镇化影响引起的近地面气温上升对观测到的年平均气温增加趋势的贡献非常明显, 北京地区甚至达到 70% 左右^[47], 天津和山东地区至少也有 20%~30%^[48, 49], 华北地区作为一个整体接近 40%^[50]。如果剔除城镇化对近地面气温的影响, 1961~2000 年期间北京地区的背景年平均气温可能仅上升 0.25 , 增温速率降为 0.06 /10 a; 但 1979~2000 年期间北京地区背景年平均温度上升仍达 0.75 , 增温速率为 0.35 /10 a。

显然, 全国其他城镇测站可能也在不同程度上存在这个问题。如果这一点得到证实, 本文给出的全国平均气温变化趋势的估计值就将明显偏高, 但预计这种偏差可能不会超过一半以上。假如华北地区的分析结果对于全国有代表性, 则剔除城市化影响后, 近 54 年全国年平均气温上升值当为 0.78 , 增温速率约 1.5 /10 a。为了有效检测中国地区对可能由人为温室效应增强引起的全球气温变化的响应程度和速率, 城镇化造成的观测点升温问题需要进行深入研究, 并从全国或区域平均的温度序列中予以剔除。

与城镇热岛效应增强有联系的是区域尺度上的土地利用变化, 后者可能也对近地面气温记录产生一定影响。尽管我国基本的土地利用方式和土地覆盖分布格局早在 20 世纪以前就已经形成了^[51], 1950 年以来仍发生一定变化^[52, 53]。气候模式敏感性分析表明, 当土地利用和土地覆盖出现明显变化时, 近地面气温等气候要素也将改变, 夏季和年平均温度可能增加^[54]。显然, 目前从观

测的温度序列中分离土地利用和土地覆盖变化的影响还十分困难,但不能排除其对现有近地面气温记录产生一定影响的可能性。

另一个重要问题是海气系统年代以上尺度的低频涛动,这种低频振荡得到观测分析的证实。例如,北大西洋涛动(NAO)或北极涛动(AO)对北半球特别是欧亚大陆气候具有重要影响^[55],在其正位相阶段中高纬度欧亚大陆近地面平均气温一般也显著偏暖^[56]。自1985年以来,NAO正处于强的正位相阶段,显然已经对北半球特别是欧亚大陆的增暖起了不小的作用。太平洋年代际涛动(PDO或IPO)及其与之相联系的ENSO年代变率也十分重要,IPO的正位相阶段一般对应全球和北半球的偏暖时期,据估计,在年代尺度上PDO或IPO大致可以解释一半左右全球表面温度的变率^[28]。1978年以来IPO处于正位相阶段,表现为西南和西北太平洋表层海温偏冷,但热带、副热带中西太平洋和赤道东太平洋表层海温偏暖。现在还不清楚,太平洋海温的低频变化对我国近地面气温有什么影响。

但是,近50年来东亚或我国的季风强度已经出现了变化,并且可能对我国近地面气温变化造成重要影响^[57,58]。季风的变化不仅可能与NAO或AO有关,而且可能与太平洋的年代以上尺度涛动存在某种联系。如果这种联系存在,太平洋海表水温的变化就同样可能对我国近地面气温的年代或多年代变化产生影响。

当然,目前有一种观点认为,即使能够证明海气系统的低频波动在全球或北半球近地面气温变化中起到重要作用,仍不能排除人类活动影响的主导作用,因为增强的温室效应可能已经改变了海气系统涛动的正常模式^[28,59,60],这种可能性是存在的。但是,目前对古海洋和古气候代用资料的分析似乎不支持这一观点,一些代用资料分析表明,类似目前这样的海气系统涛动模式在过去不是罕见的现象,因而现在至少还不能排除当前的变化仍然是低频自然振动一部分的可能性。

此外,有关各种外强迫因子变化的真实历史以及气候系统对于这些辐射强迫(特别是太阳辐射和火山喷发产生的气溶胶)变化的敏感性,目前仍没有很好解决;用于研究过去气候变化原因的气候模式也不很成熟,还有很大的改进余地。

所有这些都进一步增加了器测时期气候变化原因识别的难度。

7 结论

根据对经过非均一性检验和订正的国家基准/基本站温度资料分析,我国1951~2004年期间年平均地表气温变暖幅度约为1.3,增温速率约为0.25/10a,比全球或半球同期平均增温速率高得多。我国大部分地区的气候都在变暖,其中北方和青藏高原地区增温最明显,而在四川盆地及其西南仍然维持着一个降温区域。冬季和春季平均气温上升更明显,夏季增温趋势最弱。从20世纪80年代后期开始,中国以冷季增暖为主要特点的变暖,有向全年性增暖过渡的趋势。在上述变暖数值中,仍包含着城市化对地面气温记录的影响,同时区域性土地利用和土地覆盖变化的影响也不能排除。在开展气候变化原因识别之前,仍有大量工作需要去做。

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 Xiaoquan. Some features of air temperature change over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1982, 40: 198~208
- [2] 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.
- [3] 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
- [4] 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). Qin Dahe, Ed. Beijing: Science Press, 2002. 29~70
- [5] 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
- [6] 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* (in Chinese), 1994, **20** (12): 19~26
- [7] 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
- [8] 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*, 1995, **19** (5): 525~534
- [9] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际气候变化特征. 气象学报, 1995, **53** (4): 431~439
Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. Decadal variation of climate during the past 100 years over China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1995, **53** (4): 431~439
- [10] 谢庄, 曹鸿兴, 李慧, 等. 近百余年北京气候变化的小波特征. 气象学报, 2000, **58** (3): 362~369
Xie Zuang, Cao Hongxing, Li Hui, et al. Wavelet characteristics of climate change in Beijing since the 19th century. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (3): 362~369
- [11] 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.
- [12] 魏凤英, 曹鸿兴. 20 世纪 80~90 年代我国气候增暖进程的统计事实. 应用气象学报, 2003, **14** (1): 79~86
Wei Fengying, Cao Hongxing. Climatic warming process during 1980s—1990s in China. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14** (1): 79~86
- [13] 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
- [14] 李克让, 林贤超, 王维强. 近四十年来我国气温的长期变化趋势. 地理研究, 1990, **9** (4): 26~37
Li Kerang, Lin Xianchao, Wang Weiqiang. Long-term trend of temperature change of China over the last 40 years. *Geographical Research* (in Chinese), 1990, **9** (4): 26~37
- [15] 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
- [16] 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.
- [17] 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
- [18] 屠其璞, 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
- [19] 沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响. 中国科学 (D 辑), 2002, **32** (4): 317~326
Sha Wanying, Shao Xuemei, Huang Mei. Temperature change since 1980s in China and its effect on natural area boundary. *Sciences in China* (Ser. D) (in Chinese), 2002, **32** (4): 317~326
- [20] 曲建和, 孙安健. 黄淮海地区近 40 年来温度变化特征的研究. 应用气象学报, 1991, **2** (4): 423~428
Qu Jianhe, Sun Anjian. Studies on temperature change over the past 40 years in Huanghe, Huaihe and Haihe River Basin. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 1991, **2** (4): 423~428
- [21] 李栋梁, 彭素琴. 兰州温度变化的气候特征. 高原气象, 1993, **12** (1): 18~26
Li Dongliang, Peng Suqin. The climatological characteristics of temperature change in Lanzhou. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1993, **12** (1): 18~26
- [22] 张顺利, 黄晓清. 拉萨 40 余年温度变化的气候特征. 高原气象, 1997, **16** (3): 312~318
Zhang Shunli, Huang Xiaoqing. The climatological characteristics of temperature variation more than 40 years in Lhasa. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1997, **16** (3): 312~318
- [23] 杜军. 西藏高原近 40 年的气温变化. 地理学报, 2001, **56** (6): 682~690
Du Jun. Temperature change over the past 40 years on the

- Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, **56** (6): 682~690
- [24] Easterling D R, Peterson T C. A new method for detecting and adjusting for undocumented discontinuities in climatological time series. *Int. J. Climatol.*, 1995, **15**: 369~377
- [25] Li Q X. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21** (2): 260~268
- [26] Jones P D, Hulme M. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *Int. J. Climatol.*, 1996, **16**: 361~377
- [27] 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬, 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 Qingfen, 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
- [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
- [29] Jones P D, Moberg A. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001. *J. Climate*, 2003, **16**: 206~223
- [30] Zhao, Zongci, Xu Ying. Detection and projection of temperature change in East Asia for the 20th and 21st centuries. *Review of World Resources (USA)*, 2003, **9**: 223~234
- [31] 陈效速, 张福春. 近 50 年北京春季物候的变化及其对气候变化的响应. *中国农业气象*, 2001, **22** (1): 1~5
Chen Xiaosun, Zhang Fuchun. Spring phenological change in Beijing in the last 50 years and its response to the climatic changes. *Chinese Journal of Agrometeorology* (in Chinese), 2001, **22** (1): 1~5
- [32] 徐铭志, 任国玉. 近 40 年中国气候生长期的变化. *应用气象学报*, 2004, **15** (3): 306~312
Xu Mingzhi, Ren Guoyu. Change in climatic growth period over China: 1061—2000. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2004, **15** (3): 306~312
- [33] 王绍武, 伍荣生, 杨修群, 等. 中国的气候变化. 见: 秦大河、丁一汇、苏纪兰主编, 中国气候与环境演变 (第二章). 北京: 科学出版社, 2005. 63~103
Wang Shaowu, Wu Rongsheng, Yang Xiuqun, et al. Climate change of China. In: *Changes of Climate and Environment in China* (Vol. 2) (in Chinese), Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, Eds. Beijing: Science Press, 2005. 63~103
- [34] 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
- [35] 丁一汇, 张锦, 徐影, 等. 气候系统的演变及其预测. 北京: 气象出版社, 2003. 137
Ding Yihui, Zhang Jin, Xu Ying, et al. *Climate System Change and its Projection* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press. 2003. 137
- [36] 赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近 100 年我国地表气温趋势变化的可能原因. *气候与环境研究*, 2005, **10** (4): 808~817
Zhao Zongci, Wang Shaowu, Xu Ying, et al. Attribution of the 20th century climate warming in China. *Climate and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (4): 808~817
- [37] 葛全生, 郑景云, 方秀琪, 等. 冬季半年温度重建 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
- [38] 刘洪滨, 邵雪梅. 采用秦岭冷杉年轮宽度重建陕西镇安 1755 年以来的初春温度. *气象学报*, 2000, **58** (3): 220~229
Liu Hongbin, Shao Xuemei. Reconstruction of early-spring temperature at Zhenan from 1755 using tree ring chronology. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **22** (3): 220~229
- [39] 刘晓宏, 秦大河, 邵雪梅, 等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. *中国科学 (D 辑)*, 2004, **34** (1): 89~95
Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei, et al. Temperature change in the middle of Qilian Mountain area over the past 1000 years, using tree-ring data. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 2004, **34** (1): 89~95
- [40] 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
- [41] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II. 中国区域气候的可能变化. *气象学报*, 2003, **61** (1): 29~38
Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by regional climate model. Part II: Climate change. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (1): 29~38
- [42] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 人类活动引起的我国西北地区 21 世纪温度和降水变化情景分析. *冰川与冻土*, 2003, **25** (3): 327~330

- Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. Projection of temperature and precipitation change in 21th century induced by human activities over Northwest China. *Journal Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2003, **25** (3): 327~330
- [43] 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
- [44] 张人禾, 刘晶淼, 等. 海洋和陆地过程对中国气候与环境的作用. 见: 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰等主编, 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, et al. Eds. Beijing: Science Press, 2005. 319~357
- [45] 林学椿, 于淑秋. 北京地区气温的年代际变化和热岛效应. *地球物理学报*, 2005, **48** (1): 39~45
- Lin Xuechun, Yu Suqiu. Interdecadal changes of temperature in the Beijing region and heat island effect. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2005, **48**: 47~54
- [46] Jones P D, Groisman Y P, Coughlan M, et al. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 1990, **347**: 169~172
- [47] 初子莹, 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 Ziying, 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
- [48] Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Tang Guoli, et al. Climate changes of the past 100 years in Mainland China. *Climate Change Newslette* (2003/2004), 2004, 4~5
- [49] 张爱英, 任国玉. 城市化对山东省区域平均温度序列的影响. *气候与环境研究*, 2005, **10** (4): 754~762
- Zhang Aiyang, 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
- [50] 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
- [51] 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, 苏纪兰等主编, 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, et al. Eds. Beijing: Science Press, 2005. 455~506
- [52] 刘纪远, 张增祥, 庄大方, 等. 20 世纪 90 年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. *地理研究*. 2003, **22** (1): 1~12
- Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang, et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **22** (1): 1~12
- [53] 葛全胜, 赵名茶, 郑景云. 20 世纪中国土地利用变化研究. *地理学报*, 2000, **55** (6): 698~706
- Ge Quansheng, Zhao Mingcha, Zheng Jingyun. Land use change of China during the 20th century. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2000, **55** (6): 698~706
- [54] Fu Congbin. Land Use and the East Asian Monsoon. *Global Change Conference*, Amsterdam, 10—13 July, 2001
- [55] Thompson D W J, Wallace J M. Regional climate impacts of the northern Hemisphere annular mode and associated climate trends. *Nature*, 2001, **293**: 85~89
- [56] Thompson D W J, Wallace J M, Heger G C. Annual modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, 2000, **13**: 1018~1036
- [57] 龚道溢, 王绍武. 中国近一个世纪以来最暖的一年. *气象*, 1998, **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.
- [58] 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, 苏纪兰等主编, 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, et al. Eds. Beijing: Science Press. 2005. 398~454
- [59] Shindel D T, Miller R L, Schmidt G A, et al. Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse gas forcing. *Nature*, 1999, **399**: 452~455
- [60] Timmermann A, Oberhuber J M, Bacher A, et al. Increased El Niño frequency in a climate model forced by future greenhouse warming. *Nature*, 1999, **398**: 694~696