

中国气候变化的检测及预估

丁一汇,任国玉,赵宗慈,徐影,罗勇,李巧萍,张锦
(国家气候中心,北京 100081)

摘要: 对近5a来中国科学家在气候变化的检测及预估等方面的研究工作及主要成果进行了总结:采用最新的器测时期资料和代用温度资料对中国地区近50a、100a的温度和降水变化规律进行再分析,初步重建了中国过去1000a的地表温度序列;对20世纪中国气候变化进行了检测,分析了中国气候变化的原因;预估了中国21世纪气候变化。结果表明:近百年中国气候变化的主要特征与全球气候变化的趋势一致。中国近百年增暖的幅度为0.5~0.8℃,比全球同期增温略高。近50a中国平均气温升高以北方为主,升温速率达0.8℃/10a,远大于北半球平均的升温速率。中国雨型的年代际变化明显,西北西部从20世纪80年代中降水明显增多,以新疆最为显著。中国东部则由70年代末以前的北涝南旱型转为以后的南涝北旱型。气候变暖后,中国的极端天气和气候事件的发生频率和强度也出现了变化。

关键词: 观测到的气候变化;检测和归因;气候模式;预估

中图分类号:P467 文献标识码:A 文章编号:1002-0799(2007)01-0001-10

Detection, Attribution and Projection of Climate Change over China

DING Yi-hui, REN Guo-yu, ZHAO Zong-ci, XU Ying, LUO Yong, LI Qiao-ping, ZHANG Jing
(National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China)

Abstract: This article summarizes the main results and findings of the studies conducted by Chinese scientists in the past five years. The change of surface air temperature and rainfall in recent 50 and 100 years has been re-analyzed. Besides, a 1000-year annual mean temperature series has been reconstructed preliminarily. Researches also concentrate on the detection and attribution of climate warming in China for the 20th century. Projections for future climate have been undertaken by using climate models. It is shown that observed climate change in China bears a large similarity with that of global average. The country-averaged annual mean surface air temperature increase by 0.5~0.8℃ for the past 100 years, slightly larger than the global temperature increase in the same periods. Northern China witnessed the largest increase in surface air temperature by 0.8℃/10a for the past 50 years, it's far larger than that the velocity of Northern Hemisphere. Obvious change of rainfall pattern has been found in inter-decadal scales. In western of Northwest China the precipitation has started increasing significantly since mid-1980's, especially in Xinjiang. In eastern China underwent from the pattern of northern-waterlog and south-drought since end-1970's to south-waterlog and north-drought. Some analyses show that frequency and intensity of extreme weather and climate events also underwent significant changes behind climate warming in the past 50 years or so.

Key words: observed climate change in China; detection and attribution; climate models; projection

收稿日期:2007-02-26

作者简介:丁一汇(1938-),男,中国工程院院士,现从事气候变化与气候预测,亚洲季风,灾害性天气与气候等研究。E-mail:dingyh@cma.gov.cn

1 前言

在过去的20多年，国家连续资助了一系列涉及气候变化及其影响问题的重大科技项目，其中包括国家攻关项目“全球气候变化预测、影响和对策研究”、“全球气候变化与环境政策研究”和“全球环境变化对策与支撑技术研究”等，国家攀登计划项目和973项目“我国未来20~50a生存环境变化趋势的预测研究”、“我国重大气候和天气灾害形成机理与预测理论研究”和“我国生存环境演变和北方干旱化趋势的预测研究”等，基金委重大项目“中国气候与海平面变化及其趋势和影响的研究”、“中国陆地生态系统对全球变化反应模式研究”和“中国农业生态系统与全球变化相互作用的机理研究”等，中国科学院重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”和中科院西部行动计划项目“西部生态环境过程与水土资源可持续利用研究”等。在这些科技项目的支持下，中国的气候变化基础科学和适应领域研究取得了一系列进展，对全球气候变化科学和全球变化科学的发展以及国家适应与减缓行动计划的制定做出了独特的贡献。

国家“十五”重点科技攻关项目“全球环境变化对策与支撑技术研究”设立了有关气候变化的检测、预测和影响评价等方面课题，目的是进一步了解中国地区气候变化的基本历史事实及其可能原因，评价人为因素对气候变化的影响信号，模拟未来全球和中国区域气候变化趋势，评价未来气候变化的可能影响，并提出响应的适应性措施^[1]。在过去的5a，研究人员评估、增补了我国近1000a、100a和50a气候变化历史序列^[1~4]；评估了人类活动和自然强迫因子的历史变化及其对中国地区气候变化的可能影响^[5]；完成了复杂的耦合气候模式和区域气候模式模拟研究^[1,6~8]；提出了我国自己的全球和中国区域未来50a、100a的气候情景方案，并系统评价了气候变化对中国农业、水资源、海岸带和生态系统的影响。

当然，当前气候变化研究，特别是未来区域尺度气候变化趋势的预估结果仍有一定的不确定性。产生不确定性的因素很多，但气候系统观测资料的缺乏、对自然气候变化规律的认识不足，对气候系统各种关键的过程和反馈机制还没有充分了解，以及气候模式本身还不很完善等，都是造成目前不确定性的主要因素。

本文主要目的是对近5a的气候变化研究成果作个简要总结。这个总结主要依赖国家“十五”重点科技攻关课题“全球与中国气候变化的检测和预测”的成果和中国国家气候变化评估报告的相关内容。

本文第一部分为前言，第二部分总结有关中国地表气候观测研究的主要成果，第三部分讨论区域气候变化的可能原因，第四部分介绍对未来气候变化趋势模拟的基本结论，最后是主要结论。

2 地面气候的变化

2.1 地面气温

使用全国726个地面站的月平均观测记录，对1951—2001年和1905—2001年的中国温度变化趋势做了分析（相对于1971—2000年的气候背景场）。为了解决由于台站迁移、观测时次改变、观测仪器和观测高度变化等引起的资料非均一性问题，对资料进行了均一性检验和订正，使非气候因素对资料均一性的影响减少到最低。

1951—2001年，中国年平均气温整体的上升趋势非常明显，温度变化达0.22°C/10a；51a平均气温上升了约1.1°C。增温主要从80年代开始，且有加快趋势。图1给出了1905—2001年的全国平均温度变化情况。可以看到，中国年平均温度呈现明显的上升趋势，97a中上升了0.79°C，平均增温速率约为0.08°C/10a^[2]。这一变化略高于全球平均的增温幅度，也高于国内其他学者的估计值。过去50a，明显增暖主要发生在20世纪20~40年代和80年代中期以后两个时段，90年代和40年代分别比平均值偏高0.37°C和0.36°C。1998年是最暖的1年，相对1971—2000年平均值高出1.13°C，第二个最暖年发生在1946年。两个明显的偏凉时期是20世纪10~20年代和50~60年代，早期的偏凉程度尤其突出。

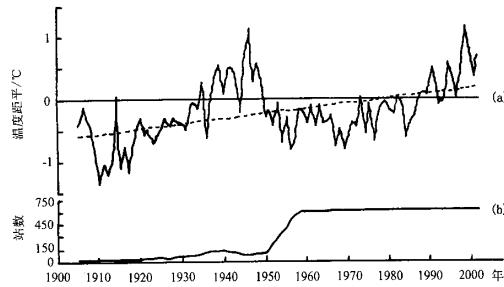


图1 中国近百年来年平均地表气温变化
(1905—2001年，(a)为温度距平；(b)为台站数量)

新的分析结果与早期研究^[9~15]的差别，主要起源于对资料的处理方法。由于新的分析采用根据月平均最高和最低气温得到的月平均气温^[2~3]，使得近100a来的相对偏凉时期平均气温更低，而相对偏暖时期平均气温更高。但是，根据包括中国西部平均温度观测资料和代用资料综合分析表明，1880—2002

年中国气温增暖速率为 $0.58^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ^[2],比上述方法给出的增温速率略小。综合不同资料和方法得出的结果,目前大体可以认为,中国近百年增温幅度为 $0.5\sim0.8^{\circ}\text{C}$,增温速率为 $0.05\sim0.08^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

中国1951—2001年春季、夏季、秋季、冬季平均气温都呈上升趋势,其中冬季上升趋势最明显,变化速率高达 $0.36^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;春季和秋季增温也很显著,夏季增温幅度最小。春季和夏季温度变化特征相近,主要的增温开始于20世纪90年代中期,秋、冬季明显的增温始于20世纪80年代早期,1987年后增温有加快趋势。

全国范围内,除局部地区有较小的气温下降趋势外,其它地方均呈上升趋势。我国北方(秦岭、淮河一线以北地区)和青藏高原的部分地区年平均气温升高明显;但西南地区北部,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。这个区域的降温现象早在十几年前就已经被发现,目前仍然在持续。季节平均温度分析显示降温主要发生在春、夏季。长江中下游地区在近50a来也表现出夏季降温的趋势。我国西南地区的降温可能与增加的污染物排放及其引起的酸雨有一定关系^[15-16]。

全国台站中的城市站均可能存在城市热岛效应增强的问题。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,城市化影响十分明显^[17]。中国其它地区的国家基准、基本站可能也在不同程度上存在这个问题^[2]。此处给出的全国和区域气温变化趋势包含着城市化和城市热岛效应增强因素的影响,今后需要对此影响作更准确的订正。

通过对代用温度资料的综合研究,对中国过去1000a的地表温度序列进行了初步重建^[18]。重建主要以树轮年表资料为基础,结合东部的历史文献资料,分区重建了不同时间分辨率的温度序列,再合成具有30a分辨率的1000a全国温度序列^[19]。重建温度序列表明,我国过去1000a可能确实存在中世纪暖期与小冰期。其中东部地区对中世纪暖期的体现要较西部地区明显,温暖阶段主要发生在11世纪与13世纪,12世纪相对寒冷;而西部地区尽管在公元1100年左右亦相对温暖,但可能无法达到与现代相当的温暖程度。在相当于小冰期阶段,15、17、19世纪的三次寒冷阶段在东西部及全国序列中均有一定表现,其中17世纪最为寒冷,19世纪的冷阶段最为漫长,但西部序列对19世纪冷阶段的表现较弱。这一重建结果与前人研究既具有相似之处,也存在明显差异。其中关于早期的相对温暖和小冰期的降温等特点与前人研究结果相近。

2.2 降水

全国平均来看,近47a来年降水量呈现小幅增加趋势。但是,降水量变化对计算所取的时间区段比较敏感,如果取1951—2000年,则全国平均的降水量几乎没有趋势性变化。在1956—2002年期间,降水最多的年份是1998年,最少的年份是1986年。1990年以来,大部分年份的降水量均高于常年,而1960年代多数年份则低于常年值^[20]。

近50a来中国东北东部、华北中南部的黄淮海平原和山东半岛、四川盆地以及青藏高原部分地区年降水变化出现不同程度的下降趋势,其中山东半岛的负趋势最显著(见图2)。黄河、海河、辽河和淮河流域平均年降水量从1956—2002年约减少了50~120mm。在全国的其余地区,包括西部地区的大部分、东北北部、西南西部、长江下游和东南丘陵地区,年降水量均呈现不同程度的增加,其中长江下游、华南沿海和西北地区的增加比较显著。长江中下游和东南地区年降水量从1956—2002年平均增加了60~130mm,西部大部分地区的年降水量从相对意义上说也有比较明显的增加,东北北部和内蒙古大部分的降水有一定程度增加。可见,20世纪90年来以来黄河中下游流域和华北平原的持久干旱及长江中下游地区的频繁洪水均有其长期降水气候变化背景。年平均降水变化具有明显的区域差异,特别是20世纪80年代以来,由于东亚夏季风较弱,中国降水分布呈典型的南涝北旱现象^[21]。

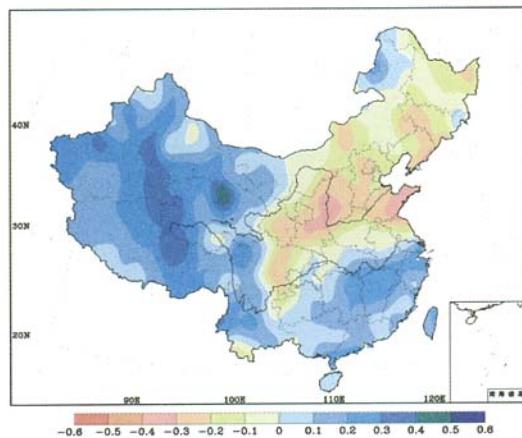


图2 1956—2002年中国年降水量趋势

(正值表示降水增加,负值表示减少。绝对值越大,趋势越显著)

由树木年轮资料重建的过去1000a降水资料显示,在历史上20世纪的气候偏湿,与20世纪相比,15世纪中晚期、17世纪后期及18世纪早期发生了更多的严重干旱^[22]。历史文献记录也显示过去几十

年来华北地区发生了相对于小冰期更加严重的干旱。

2.3 其他气候因子

对过去 50a 来的日照时数、蒸发、风速等变化进行了分析。1956—2002 年期间全国年平均日照时数具有明显的下降趋势，其变化速率为 $-38 \text{ hrs}/10a$ （见图 3），19 世纪 60 年代中期至 80 年代后期下降趋势显著，1966—1993 年期间变化速率为 $-50 \text{ hrs}/10a$ ，1993 年达到历史最低值，以后日照时数减少趋势停顿下来，甚至有止降回升迹象。从变化趋势空间分布看，除青藏高原东部、甘肃以及内蒙古西部、东北北部的小兴安岭等地区存在不很明显的增加外，全国大部分地区年日照时数呈现减少趋势^[20]。

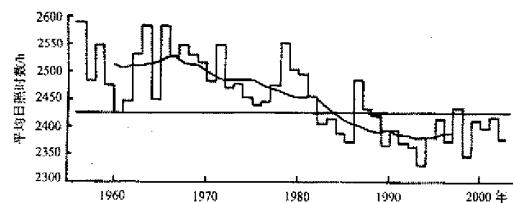


图 3 1956—2002 年全国年平均日照时数变化曲线

1956 年以来，全国年平均水面蒸发量减少迅速，其变化速率为 $-35 \text{ mm}/10a$ ，整个时期年水面蒸发量约减少 6% 左右。20 世纪 60、70 年代中国水面蒸发量均在 1971—2000 年 30a 平均值以上变化，80 年代下降到平均值以下，1993 年达到历史最小值。近年来，蒸发量略有上升趋势。全国大部分地区水面蒸发量呈减少趋势，其中华北、华东、华南以及西南部呈明显的减少趋势，西部的新疆东部、青海和甘肃北部为减少趋势最大区域，其中新疆东部和甘肃北部尤其明显^[3,23]。

在过去的 50a 来，全国年平均风速也表现出明显减小趋势，明显的减小开始于 20 世纪 70 年代中期，而且风速并没有像日照时数及水面蒸发一样在 20 世纪 80 年代后期或 90 年代早期停止减小。西北地区风速减小最大，西南地区和东北北部地区风速减小幅度较弱。

2.4 极端气候事件

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 $0.12^\circ\text{C}/10a$ ，且温度升高主要发生在最近的 10 余年^[24]。近 52a 来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，北方地区上升更显著，且上升速率有随纬度增加趋势。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。

近 50a 中国极端降水值和极端降水平均强度都有一定增强趋势，极端降水事件趋多，尤其在 1990 年代，极端降水量比例趋于增大。华北地区年降水量趋于减少，极端降水值和极端降水平均强度趋于减弱，极端降水事件频数显著减少。西北西部总降水量趋于增多，极端降水值和极端降水强度并未发生显著变化，但极端降水事件趋于频繁^[24]。长江及长江以南地区年降水量和极端降水量都趋于增加，极端降水值和降水事件强度都有所加强，极端降水事件增多。

近 50 多年西北太平洋热带气旋活动没有明显的增多和减少趋势，但却表现出显著的年代际和年际的气候振动，1960 年代中期到 1970 年代初期为热带气旋活动频繁期，1950 年代和 1980 年代初期为热带气旋活动较少时期，但 1980 年代中期开始热带气旋活动又逐渐增多，而且热带气旋的年频数和登陆中国的热带气旋数在这期间出现了 3 次气候突变。1957 年以来热带气旋给中国陆地带来的降水总量表现出显著的减少趋势。20 世纪 80 年代后期以来，登陆中国的台风数量也明显减少^[25]。

近 50a 来中国北方地区的沙尘暴天气出现日数总体上呈减少趋势，上世纪 50 年代后期和 70 年代沙尘暴出现日数较多，80 年代以来沙尘暴出现日数逐渐减少，但 1997 年以后发生频率又有一定增多趋势。

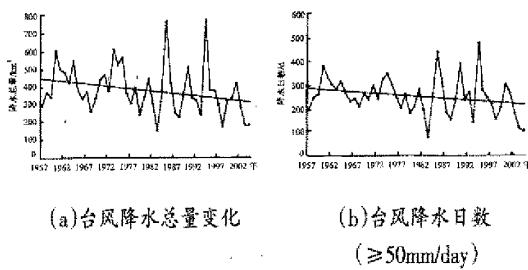


图 4 台风降水的变化^[25]

3 20 世纪中国气候变化的检测和可能原因

气候变化的检测和成因分析是国际研究热点问题^[26]，近 10a 来在中国的研究也有了较大的进展。类似于国际的研究内容，中国的研究也集中在 20 世纪中国的气候变暖的检测和原因，以及近 50a 地面太

阳辐射减少的检测和原因,还有些分析侧重于中国近几十年的一些气候分布变化如夏季“南涝凉北旱热”的原因分析等。在原因分析中,既考虑自然强迫,也考虑人为强迫。检测和成因分析的主要工具和方法是气候模式和数理统计方法^[1,5,8,26-27]。

3.1 20世纪中国气温变化的检测和成因分析

20世纪中国的变暖,特别是近50a的变暖已经引起政策制订者、科学家以及公众的广泛关注。从国内外可收集到的4组科学家的研究工作表明^[4,10,28-29],和全球变化一样,中国在20世纪近百年也确实变暖,特别是最近的50a。由于我国20世纪前50a缺少观测资料,因此4条曲线在前50a的差异较大,但4条中国气温序列之间具有较高的一致性,相关系数高达0.76~0.90。从4根曲线计算得到的20世纪(1900—1999年)气温变化的线性趋势分别为0.35°C/100a,0.39°C/100a,0.72°C/100a和0.19°C/100a;20世纪后50a(1950—1999年)分别为0.73°C/50a,0.77°C/50a,0.92°C/50a和0.64°C/50a^[27]。所有证据均证实中国近百年确实在变暖,尤以近50a变暖更明显。

20世纪的变暖在近千年中的地位是检测中的一个重要问题。中国学者根据代用资料开展了近千年气候变化的研究。研究表明,近千年中国的暖期与北半球是基本一致的,即20世纪的变暖在近千年中可能是最暖的百年^[27]。由于受资料所限,目前只能大致确定中国20世纪是近千年中偏暖的百年,但还不能完全肯定它是最暖的百年,这主要是由于对中世纪温暖期的温度值的重建尚有较大的不确定性所致,这有待于用更多的资料进行验证。

图5a给出大约40个气候模式和多种人类排放情景模拟的20世纪中国年平均气温距平的变化。为了对比,图5a中还给出7个全球气候模式不考虑人类排放的控制试验模拟20世纪中国年平均气温变化,注意到,不考虑人类排放的控制试验没有模拟出中国20世纪的变暖趋势,更没有模拟出近50a的明显变暖趋势。对比模式的模拟结果与观测值的变化表明,利用大约40个气候模式考虑不同的人类排放情景(其中9个中国的模式和排放情景),较好地模拟了20世纪中国的变暖,特别是近50a的明显变暖趋势,气候模式考虑不同情景与观测的相关系数平均为0.47,平均模拟气温变化的线性趋势分别是0.71°C/100a和0.90°C/50a^[30],与相应时段计算的观测气温的线性趋势较为一致(见表1),特别是近50a,由此说明中国20世纪的变暖特别是近50a的明显变暖很可能与人类排放温室气体等的浓度增加有关。

表1 三组试验与观测20世纪中国年平均气温的相关系数和线性趋势^[30]

数值试验E	距平相关系数	20世纪线性趋势	近50a线性趋势	1960—1970年趋势	1980—1999年趋势
CT(7模式控制试验)	-0.02	0.11°C/100a	0.11°C/50a	0.10°C/10a	-0.02°C/10a
E1(大约40个模式和人类排放强迫)	0.47	0.71°C/100a	0.90°C/50a	-0.07°C/10a	0.38°C/10a
E2(19个模式,自然与人类强迫综合)	0.55	0.70°C/100a	0.85°C/50a	-0.06°C/10a	0.24°C/10a
E3(观测海温和海冰,12个成员的集合)	0.50	0.33°C/100a	0.01°C/50a	-0.12°C/10a	0.21°C/10a
观 测		0.4~0.8°C/100a	0.5~0.9°C/50a	-0.55°C/10a	0.53°C/10a

注:E2试验中的距平相关为16个耦合模式的集合平均结果,线性趋势是19个模式的集合平均结果

中国科学家最新的研究利用IPCC第四次科学评估报告给出的23个模式组考虑自然和人为的所有辐射强迫因子,计算对中国20世纪变暖的贡献,其中有两个是中国的模式(BCC_CM1和FGOALS_g1.0)。这些数值试验考虑的辐射强迫因子有太阳辐射变化、火山活动气溶胶、温室气体、硫酸盐气溶胶、黑碳气溶胶、臭氧和土地利用覆盖等的变化等(见图5b)^[30-31]。19个模式的集合平均结果和观

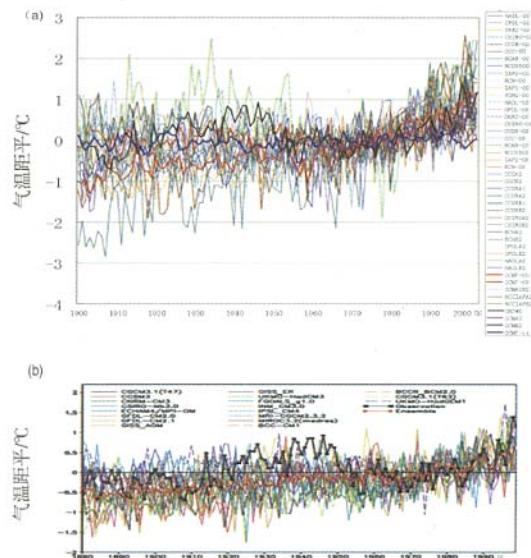


图5 观测与模拟中国20世纪年平均气温距平变化曲线

((a)为大约40个气候模式和试验设计模拟的20世纪东亚和中国年平均表面气温距平的变化以及相应的观测变化(相对于1961—1990年),图中粗红线为GCM7-GG,粗杏黄线为GCM7-GS,粗深紫色线为GCM7-SRESA2,粗浅紫色实线是GCM7-SRESB2,粗黑实线是观测值;(b)为观测(带实心方框的黑线)和19个模式考虑所有强迫试验模拟的20世纪中国年平均气温距平变化(相对于1961—1990年)^[30-31])

测的相关系数为 0.55^[30], 比仅考虑人类排放的相关系数要高一些, 说明太阳活动、火山活动及海气相互作用等也可能是 20 世纪后 50a 中国温度变化的原因。

有的研究利用 Hadley 中心的观测海温和海冰强迫 NCAR CAM2 模式, 计算 12 个成员的集合数值模拟, 得到 20 世纪中国的气温变化^[30-31]。研究表明, 模式较好的模拟出 1900—1915 年及 20 世纪 70 年代的相对冷期和 20 世纪 40 年代的相对暖期, 但是试验没有再现近 50a(1949—1999 年)中国气温明显变暖的线性趋势(见表 1)。

综合人类排放及所有辐射强迫的数值试验都不能较好模拟出中国 20 世纪最近几十年的变暖, 说明模式综合结果低估了这段时间真实的变暖趋势, 同时模式也没能模拟出 1920—1930 年期间的相对暖期。

3.2 近 50a 中国气候变化中可能的人为信号

近 50a 中国有了较为翔实的观测记录, 因此可以进行更多的中国气候变化中可能的人为信号的检测和成因分析^[2,27,29,32-35]。

中国科学家的观测资料计算指出, 即中国 122 个观测站经过质量检测订正后的 1957—2000 年中国年平均地面总辐射变化^[34-35], 中国 574 个观测站计算的 1956—2002 年中国年平均日照时数变化^[20](见图 6a,b), 从 1961 到 1990 年中国地面太阳辐射和日照时数在减少(变暗), 而自 1990 年以后又开始增加(变亮), 但仍然低于 20 世纪 60 年代^[2,27,34-35], 这一现象在世界其他国家也有发现^[28]。

一些研究探讨了总云量、大气中水汽含量及沙尘等的变化引起的物理过程反馈及其与太阳辐射的关系。根据 466 个观测站计算的 1961—2000 年中国年平均总云量变化表明, 近 45a 中国年平均总云量有减少的趋势, 其中从 1977 到 1995 年总云量减少 0.4 成(见图 6c)^[32]。这就意味着, 地面太阳辐射和日照的减少不是由于总云量变化造成的。其次, 从中国大约 600 个观测站计算的年平均沙尘日数得到, 近 50a 年平均沙尘日数减少(国家气候中心气候评价室, 个人通信), 线性趋势为 -13.3d/52a, 因此, 地面太阳辐射减少似乎也不是沙尘造成的。第三, 根据 1970—1990 年中国地面和探空观测 378 个站的资料计算的年和各季大气中水汽含量(可降水)的变化得到, 在中国, 大气中的水汽含量有明显增加趋势(见图 6d), 其线性趋势为 1.2%/10a, 与同期表面气温变暖的相关系数高达 0.61^[32]。由此表明, 由于变暖, 中国上空大气中的水汽含量明显增加。但水汽含量的变化主要影响长波辐射, 对于太阳辐射也会

有一定影响, 是否它可能是造成地面接受的太阳辐射减少的主要原因之一尚需进一步研究。

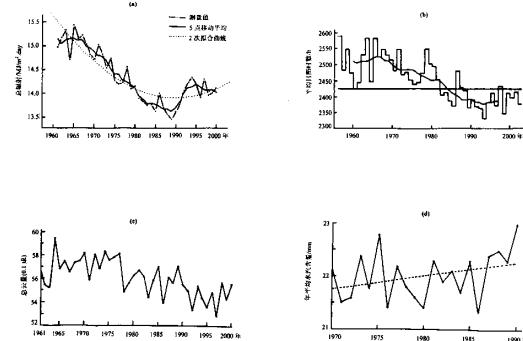


图 6 (a)1957—2000 年中国年平均地面总辐射变化
(单位: MJ/m²) (b)1956—2002 年中国年平均日照时数变化
(单位:h), (c)1961—2000 年中国年平均总云量变化
(单位: 0.1 成), (d)1970—1990 年中国大气中年平均水汽含量变化(可降水, 单位: mm)^[32]

另一方面注意到, 几十年来随着经济发展, 工业排放增加, 造成空气污染物的增加以及大气成分的变化, 即大气中硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶等明显增加, 大气气溶胶光学厚度明显增大^[27,29]。1990 年后, 由于重视环境保护和减排, 工业排放到大气中的污染物减少。因此, 人类排放造成的污染物增加, 可能是造成 1961—1990 年中国地面太阳辐射减少的原因。中国地面太阳辐射减少的成因分析, 有待利用全球和区域气候模式和大气化学模式的数值模拟实验来做进一步证实。

20 世纪后 25a 观测到的中国东部“南涝凉北旱热”的气候变化特征, 引起国内外科学家们的广泛注意, 多数研究集中分析气候的自然变化, 如中国气温和降水自身的周期性振荡和转折性特征, 东亚夏季风的年代际和多年代际变率, 气候在 20 世纪 70 年代的快变, ENSO, NAO, AO, AAO, PDO 以及雪盖变化的影响等, 表 2 上部综合了这些研究结果^[26,27]。

一些研究集中在人类活动对这一气候特征的可能贡献分析, 部分研究是对观测资料进行分析, 多数是用全球和区域气候模式考虑硫酸盐气溶胶, 黑碳气溶胶, 有机碳等进行成因分析, 也有些成因分析还联合气溶胶和温室气体的共同作用^[27,29,33,36]。以 3 个模式的模拟研究为例表明, 由于人为排放气溶胶增加造成的强迫作用, 使大气气溶胶光学厚度增大, 如四川盆地光学厚度达到 0.6~0.8, 长江流域和江南的一些地区气温变凉可达 -0.2~0.5°C(2 个模拟), 或

较少变暖(1个模拟),但是2个模式并没有模拟出华北地区的变热,只有考虑人为温室气体和气溶胶强迫联合作用,才模拟出华北的变热(见图7左)。至于降水的模拟,2个模式考虑人为气溶胶强迫,没有再现长江流域和江南的多雨以及华北的持续严重干旱特征,1个模式考虑人为温室气体和硫酸盐气溶胶的联合作用,大致模拟出降水的分布特征,但是山东省等的严重干旱以及长江流域的多雨程度并没有模拟出来(见图7右)。

表2下部给出综合多个模式考虑人为强迫模拟,对亚洲夏季风和中国夏季气候变化的可能贡献。值得提出的是,温室气体增加对亚洲夏季风是增强的贡献,对中国年平均气温和降水的影响是变暖变湿,黑碳气溶胶以及土地利用变化使亚洲季风减弱,夏季南涝凉北旱的分布,硫酸盐气溶胶增加,贡献于亚洲夏季风减弱,长江流域低温多洪涝。因此,人为气溶胶可能是引起1976—2000年中国东部的南方夏季多洪涝偏凉,华北夏季干旱蒸发量减少和炎热潮自然原因之外的可能的人为因子之一,但尚需做更多的模拟试验进行进一步的物理成因分析。

表2 综合自然和人为造成1976—2000年中国夏季南涝凉北旱热的可能原因(相对于1961—1990年的距平)^[27]

自然气候变率	对亚洲夏季风贡献	对中国气候变化影响
PDO+ENSO	偏弱	中国夏季南涝北旱
春季AO	偏弱	强降水在中国长江流域和日本南部
中国温度和降水的周期性和转折	偏弱	中国夏季南涝凉北旱热
20世纪70年代气候突变	偏弱	长江流域洪涝
IOD	不确定	不明显
欧亚雪盖	偏强	不一致
青藏高原雪盖	偏弱	中国夏季南涝北旱
人为因子	对亚洲夏季风贡献	对中国气候变化影响
温室气体增加(全球变暖)	偏强	中国平均暖湿
硫酸盐气溶胶增加	偏弱	长江流域低温多洪涝
黑碳气溶胶增加	偏弱	中国夏季南涝凉北旱
温室气体+气溶胶(棕色云)增加 1976—2000年偏弱	中国夏季南涝凉北旱热	
土地利用变化(植被退化)	偏弱	中国夏季南涝北旱

总结对比20世纪中国观测和气候模式考虑人类活动的各种模拟结果的检测和归因分析,提供了近50a中国气候变化的一些人为信号,例如人类排放温室气体增加造成变暖及其更多的证据。又如地面太阳辐射减少可能与人类排放气溶胶增加有联系。但是降水分布,洪涝与干旱,东亚季风,台风等的变化尚需更多的研究来探讨人类活动的可能影响。

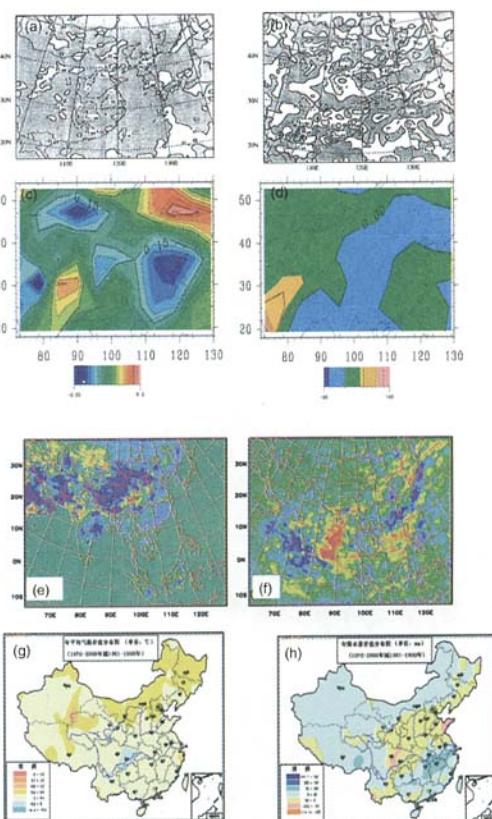


图7 观测和气候模式考虑人为强迫模拟中国气温和降水变化

(其中(a),(b)图为区域气候模式考虑人为硫酸盐气溶胶的模拟(敏感试验减控制试验^[29]);(c),(d)图为CCSR/NIES全球大气海洋环流模式考虑温室气体,硫酸盐气溶胶和黑碳气溶胶等的模拟(1976—2000减1961—1990^[30]);(e),(f)图为温带东亚气候中心区域气候模式考虑黑碳气溶胶的模拟(敏感试验减控制试验^[31]);(g),(h)图为观测的中国气温和降水距平分布(1976—2000减1961—1990,翟盘茂,个人通信))

4 未来中国气候变化趋势预估

4.1 未来中国地面温度的变化

近些年来各国的全球气候模式考虑温室气体的气候效应(GG),温室气体加硫酸盐气溶胶的直接效应(GS),SRES A2与B2排放方案,分别作了21世纪全球气候变化的预估。我国科学家选用其中的一些国外全球气候模式的模拟结果进一步计算了中国的气候变化^[6-7,36-41]。近年来,我国科学家利用发展的我国自己的全球气候模式NCC/TAP T63也作了类似的模拟研究^[37-38]。

图8给出大约40个气候模式和排放方案(GG, GS, A2, B2)计算的中国20世纪和21世纪气温变化。对20世纪中国气温变化的检测表明,考虑排放

模拟与观测的相关系数分别为 0.1~0.7(1900—1999 年), 0.2~0.7(1950—1999 年), 大多数模拟结果达到 95% 信度水平, 远远高于控制试验的相关系数(接近 0)。另一方面考虑 GG, GS, A2, B2 模拟与观测的线性变暖趋势也与观测的变暖较为接近。由此表明, 近百年中国的变暖可能受到人类活动的影响, 尤近 50a 更明显。到 2020 年我国气温将可能变暖 1.5~2.1℃, 2050 年变暖 2.3~3.3℃, 2100 年变暖 3.9~6.0℃*。与全球和东亚地区未来 100a 的线性趋势相比, 中国温度变化的线性倾向比全球的高, 比东亚地区的略低。

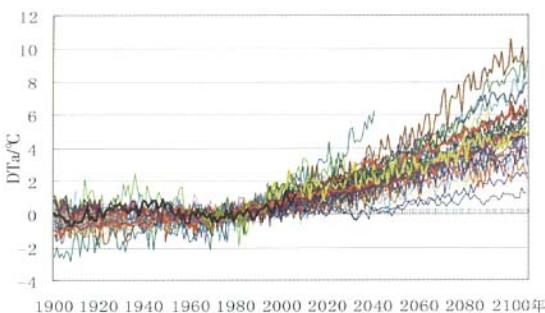


图 8 气候模式和排放设计对 20 世纪和 21 世纪中国气温变化的模拟和预估

(气候模式和排放设计包括: CCC-GG, CCSR/NIES-GG, CSIRO-GG, DKRZ-GG, GCM7-GC, GFDL-GG, HADL-GG, LASG/IAP2-GG, NCC/IAPT63-GG, NCAR-GG, CCC-GS, CCSR/NIES-GS, CSIRO-GS, DKRZ-GS, GCM7-GS, GFDL-GS, HADL-GS, LASG/IAP2-GS, LASG/IAP2-GSS, NCC/IAP T63-GS, NCAR-GS, RegCM/CN-GG, RegCM/CN-GS, CCSR/NIES2-A1, CCSR/NIES2-A2, CCSR/NIES2-B1, CCSR/NIES2-B2, CCSR/NIES2-SRES4, CCC-A2, CSIRO-A2, ECHAM4/OPYC-A2, GFDL-A2, HADL3-A2, NCAR-A2, CCC-B2, CSIRO-B2, ECHAM4/OPYC-B2, GFDL-B2, HADL3-B2, NCAR-B2, GCM-SRES, NCC/IAPT63-A2, NCC/IAPT63-B2; 粗黑线表示观测值, 王绍武, 龚道溢提供, 粗红线表示 GG 平均, 粗杏黄线表示 GS 平均, 粗褐线表示 A2, B2 平均, 粗黄线表示 NCC/IAPT63)

对于中国地区各个季节来说, 在 SRES 排放情景 A2 和 B2 下, 21 世纪我国各个季节的温度都将增加, 其中冬季和春季温度增加最明显, 夏季和秋季次之; 到 21 世纪末期, 整个中国的年平均温度将分别增加 5.6℃ 和 4.0℃。

对模式平均的 2020 年左右、2050 年左右和 2070 年左右年平均气温变化的地理分布的分析表明, 2020 年左右模式平均整个中国的增温 GG 时

在 1.2~1.8℃ 之间, 东北地区和西部增温最大; GS 时增温幅度比 GG 时减小, 范围在 1.0~1.5℃ 之间, 最大增温区域在华北、西北和东北北部, A2 时为 0.6~1.8℃, B2 时为 0.9~2.1℃, 2050 年时增温的幅度加大, GG 时为 2.4~3.9℃, GS 时为 1.5~3.0℃, A2 和 B2 时分别为 1.8~3.9℃ 和 1.8~3.3℃, 比 2020 年增加将近一倍, 最大的增温地区仍然是华北、西北和东北。

四个季节整个中国都一致增暖, 增暖的南北差异明显, 北方地区的增温明显大于南方地区, 沿海地区等值线的东北—西南走向表明, 在同一纬度上, 东部沿海地区平均温度的增加小于内陆地区。

4.2 未来中国降水的变化

与气温相比, 人类活动对 21 世纪中国降水的影响则较为复杂, 不同模式和排放方案得到的结果差异较大, 尤其是考虑硫酸盐气溶胶的影响(GS)后。但总的来说, GG、A2 和 B2 情景下大部分模式模拟的未来降水都呈增加趋势, 到 21 世纪末 GG 和 A2 情景下我国的年平均降水将增加 20% 左右, B2 情境下将增加 10% 左右。这从图 9 中给出的 7 个模式和 4 种排放方案预估的 21 世纪中国降水的变化图中可以看出。从图中我们注意到多数模式和方案预估 21 世纪中国降水可能增加, 尤以 GG 和 B2 明显, 但是有些模式和方案预估降水可能减少, 特别是 21 世纪的前 50a。

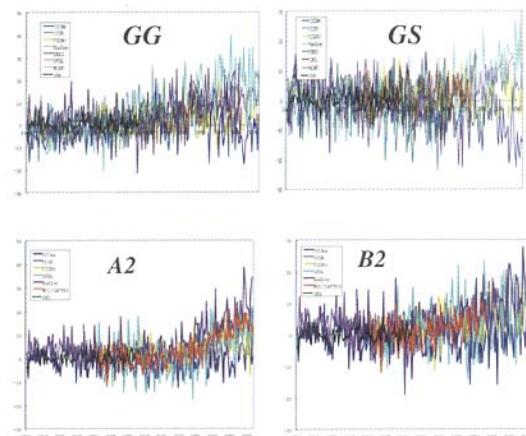


图 9 IPCC 一些模式在 4 种排放方案下模拟的 21 世纪中国地区降水变化(单位:%)

5 主要结论

(1) 与全球气候变化的趋势一致, 近百年中国气候变化的主要特征也表现为气候变暖。根据以中国

* 此结果根据 2005 年的数据得到, 但根据 IPCC AR4 的最终结果(国内外模式的预测), 新的增温幅值为: 2020 年 0.5~0.7℃, 2050 年 1.2~2.0℃, 2100 年 2.2~4.2℃。

东部为主的 1905—2001 年台站观测到的最高和最低温度,平均得到的中国气温增加率为 $0.81^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,根据包括中国西部的日平均气温观测资料和代用资料的综合分析,得到 1880—2002 年中国增暖率为 $0.58/100\text{a}$,由于不同作者选用的资料不同,以及分析方法不同,彼此有一定差别。大体上可以认为中国近百年增暖的幅度为 $0.5\sim0.8^{\circ}\text{C}$,比全球同期增温略高。在这个时期,中国出现了两个明显的暖期:20世纪 20 年代至 40 年代与 20 世纪 80 年代以后的两个时期。

(2) 近百年中国东部降水量无长期变化趋势。但从 50 年代中期至今,中国的降水量表现出微弱的增加趋势,与全球趋势一致。中国雨型的年代际变化明显,由 20 世纪 50 年代至 70 年代北方多雨,南方少雨转变为 20 世纪 80 年代至 90 年代的北方少雨,南方多雨。另外,1900s,1920s,1940s,1960s,1980s 降水量偏少,而其它 5 个 10a 降水量偏多。因此,大体上讲,中国全国的降水量变化以年代际变化为主,20a 和 80a 左右的周期有显著的优势。中国西北西部从 20 世纪 80 年代中降水明显增多,以新疆最为显著,最大达到 $10\% \sim 15\% / 10\text{a}$ 。

(3) 气候变暖后,中国的极端天气和气候事件的发生频率和强度也出现了变化。这包括极端最低气温上升,温度日变化减少,极端降水事件趋多、趋强。尤其是 20 世纪 90 年代,长江及长江以南地区降水量和极端降水量、降水事件强度都趋于增加。另外,夏季高温热浪增多,霜冻日数下降,寒潮明显减少,雪灾发生机率增加,沙尘暴趋于减少。

(4) 不论观测还是多个模式的模拟都表明,20 世纪中国气温和极端温度都升高,多个模式和排放方案计算表明,21 世纪由于人类排放增加,中国将继续变暖,尤以北方和冬季明显。21 世纪全国大范围可能变湿,尤以东北和西北明显,21 世纪中国气候特征将与上世纪明显不同。

中国将继续变暖,变暖幅度为 $3\sim5^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,较 20 世纪更明显,特别是中国北方和西北地区。到 2020 年我国的年平均气温将可能变暖 $1.5\sim2.1^{\circ}\text{C}$,2050 年变暖 $2.3\sim3.3^{\circ}\text{C}$,2100 年变暖 $3.9\sim6.0^{\circ}\text{C}$ 。综合各种排放情景,21 世纪全国大范围可能变湿,尤以东北和西北明显,中部部分地区则可能变干,如 2020 年左右,4 种排放情景下都是西部地区降水增加最明显,东部沿海地区降水略有减少,特殊的是在考虑气溶胶硫酸盐的影响下,西北地区的降水将增加 20%,而长江以南大部地区降水将减少,2050 年左右,排放增加的情况下西部地区降水增加更加明显,尤其是西北的新疆地区,降水将增加 $15\%\sim40\%$ 。

由于人类排放增加,东亚冬季风将可能继续减弱,夏季风将可能加强。

致谢: 参加本文研究的尚有其他一些专家,他们在相关课题研究中做出了积极贡献,在此表示谢意。恕不一一列名。

参考文献:

- [1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告(I):中国气候变化的历史和未来趋势 [J].气候变化研究进展,2006,(2):3-8.
- [2] 任国玉,徐铭志,初子莹,等.中国气温变化研究的最新进展[J].气候与环境研究,2005, 10(4):701-716.
- [3] 任国玉,郭军.中国水面蒸发量的变化[J].自然资源学报,2006,21(1):31-44.
- [4] 唐国利,任国玉.近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J].气候与环境研究,2005,10(4):791-798.
- [5] 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分析 [J].气候与环境研究,2005,10(4):808-817.
- [6] Zhao Zong -ci, Akimasa Sumi, Chikako Harada et al. Projections of extreme temperature over East Asia for the 21st century as simulated by the CCSR/NIES2 coupled model, eds by WMO and CMA, Proceedings of International Symposium on Climate Change [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003:158-164.
- [7] 徐影,罗勇,赵宗慈,等. BCC-AGCM1.0 模式对 20 世纪气候变化的检测 [J]. 气候变化特别评估报告,2005,6:1-6.
- [8] 罗勇,丁一汇,赵宗慈,等.第十章未来人为气候变化的评估[M].中国气候与环境演变,上卷,气候与环境的演变及预测,秦大河.北京:科学出版社, 2005:507-555.
- [9] 丁一汇,戴晓苏.中国近百年来的温度变化 [J].气象,1994,20 (12): 19-26.
- [10] 林学椿,于淑秋,唐国利.中国近百年温度序列[J].大气科学,1995,15(5):525-534.
- [11] 陈隆勋,朱文琴.中国近 45 年来气候变化的研究[J].气象学报,1998, 56(3): 257-271.
- [12] 王绍武,叶瑾琳,龚道溢,等.近百年中国年气温序列的建立[J].应用气象学报,1998,9(4): 392-401.
- [13] 王绍武,董光荣.中国西部环境特征及其演变[M].秦大河.中国西部环境演变评估(第一卷).北京:科学出版社, 2002:29-70.
- [14] Zeng Z, Yan Z, Ye D. Regions of most significant temperature trend during the last century [J]. Advance in Atmospheric Science, 2001, 18(4): 481-496.
- [15] Hu, Z. -Z., S. Yang, R.R. Wu. Long -term climate variations in China and global warming signals[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108, No. D19, 4614.
- [16] Li, X. W., X. J. Zhou, W. L. Li et al. The cooling of Sichuan Province in recent 40 years and its probable mechanisms[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 5357-68.
- [17] 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[J].气象学报,2005,63(4):534-540.
- [18] 初子莹,任国玉,邵雪梅,等.我国过去千年地表温度序列的初步重建[J].气候与环境研究,2005,10(4):826-836.
- [19] Ge, Q.-S., Jingyun Zheng, Xiuqi Fang 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 [J]. The Holocene, 2003, 13: 995-1002.
- [20] 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[J].气象学报,2005,63:942-956.
- [21] 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[M].见:秦大河、丁一汇、苏纪兰.中国气候与环境演变(上卷),北京:科学出版社,2005.
- [22] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨等.柴达木东缘山地若干祁连圆柏树轮第一主成分重建德令哈千年降水量变化[J].中国科学(D),2004,34(2):145-153.
- [23] 郭军,任国玉,黄、淮、海河流域蒸发量变化特征及其可能原因[J].水科学进展(印刷中).
- [24] Zhai, P., A. Sun, et al. Changes of climatic extremes in China[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 203-219.
- [25] Ren, F.M., Wu, G.X., Dong, W.J., et al. Change in tropical cyclone precipitation over China. Geophy. Research Letters, in press.
- [26] 王绍武.现代气候学研究进展.[M] 北京:气象出版社,2001:458
- [27] Zhao Zong-Ci, Ding Yihui, Luo Yong et al. Recent studies on attributions of climate change in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 19: 389-400.
- [28] IPCC. Climate Change 2001 [M]. The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. eds. By J.T.Houghton and Y.Ding, et al., Cambridge University Press, Cambridge, 2001:881.
- [29] 王喜红,石广玉.东亚地区人为硫酸盐气溶胶气候效应的数值研究[J].高原气象,2001,20(3):258-263.
- [30] 周天军,赵宗慈.20世纪中国气候变暖的归因分析[J].气候变化研究进展,2006(2):28-31.
- [31] Zhou Tianjun, Yu Rucong. 20th century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. J.Climate, 2006, 19 (22): 5843-5858.
- [32] Zhai P. and R.E.Eskridge. Atmospheric water vapor over China[J]. J.Climate, 1997,10:2643-2652.
- [33] Wu Jian, Jiang Weimei, Fu Congbin et al. Simulation of the radiative effect of black carbon aerosols and the regional climate responses over China [J]. Advances in Atmospheric Science, 2004, 21:637-649.
- [34] Che, H.Z., G.Y.Shi, X.Y.Zhang et al. Analysis of 40 years of solar radiation data from China, 1961~2000[J].Geophy. Res. Lett., 2005, 32, L06803, doi: 1029/2004GL022322.
- [35] Zhao Zong-ci, Akimasa Sumi, Chikako Harada et al. Detection and projections of floods/droughts over East Asia for the 20th and 21st centuries due to human emission [J]. World Resource Review (USA), 2004, 16 (3):312-329.
- [36] Zhao Zong-ci and Ying Xu. Detection and projection of temperature change in East Asia for the 20th and 21st centuries [J]. Review of World Resources (USA), 2002, 9:223-234.
- [37] 徐影.人类活动对气候变化影响的数值模拟研究[D].中国气象科学研究院博士学位论文,北京,2002.
- [38] 丁一汇,徐影.未来气候变化的预估.“十五”攻关项目总结报告,北京,2003.
- [39] 徐影,丁一汇,赵宗慈,等.我国西北地区21世纪季节气候变化情景分析[J].气候与环境研究,2003,8(1):19-25.
- [40] 徐影,丁一汇,赵宗慈,等.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 [J].冰川冻土,2003, 25(3):327-330.
- [41] 徐影,丁一汇,赵宗慈,等.长江中下游地区21世纪气候变化情景预测[J].自然灾害学报,2003,13(11):25-31.

科技信息

《新疆气象手册》简介

中华人民共和国成立后,新疆气象事业几乎是从无到有,从小到大,从大到强。其蓬勃发展是新疆“老中青三代”气象人满怀豪情、艰苦奋斗、顽强拼搏、开拓创新的辉煌业绩。新疆气象局、中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所为了全面、系统地总结新疆气象科技进步取得的成果和新疆气象事业发展取得的经验,充分发挥一批退休气象学家和技术专家的作用,组织编写《新疆气象手册》。经过两年多时间的辛勤努力,该书已于2006年12月由气象出版社出版发行,全书100万字。

《新疆气象手册》分为3篇:引论,新疆的气象状况,新疆的气象活动。本书附录提供了很多实用的气象及相关专

业的资料和参考图表。

《新疆气象手册》贯穿了科学发展观和“公共气象、安全气象、资源气象”的理念,既概括了长期积累的新疆天气气候及其应用的基本认识,又针对地方领导、部门、社会各界、院校和研究院所、各级气象科技人员的需求,与时俱进地阐述了新疆气象事业的当前状况和发展前景。该书结构严谨、视野开阔、文字朴实、图文并茂,既是一本关于气象(特别是新疆气象)的高级科普读物和适用的工具书,也是一本关于对气候系统与可持续发展知识认识的实用教材和参考书。

(张学文,张家宝)