



近百年气候变暖的不确定性分析

赵宗慈,王绍武,罗 勇,江 滢

中国气象局气候研究开放实验室,北京 100081

摘要 百年时间尺度全球和中国气候变暖存在不确定性,以中国为例,前 50 年观测资料不足可能造成百年变暖趋势的不确定性,后 50 年城市化进程热岛效应可能在增暖中占到 25%。贡献于近 50 年中国气候的变暖,不仅来自人类排放增加,而且城市化,气温自然的准周期性和年代际变率,地面接收太阳辐射的减少(变暗)或增加(变明),以及其他外部强迫如火山活动和太阳活动与气候系统内部作用等。全球气候模式的不确定性和未来情景设计中的问题都将影响对变暖的原因分析,并使得 10~20 年预测的可信度较低。这些问题有待进一步研究解决。

关键词 百年时间尺度;气候变暖;不确定性

中图分类号 P467

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)23-0041-08

Uncertainty Analysis of Climate Warming During the Last 100 Years

ZHAO Zongci, WANG Shaowu, LUO Yong, JIANG Ying

Open Laboratory for Climate Research, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract As mentioned in the IPCC report, the linear trend of the global annual mean surface air temperature during the last 100 years (1906 to 2005) is 0.74°C (in the range of 0.56 to 0.92°C). The warming trend in China is 0.53~0.86°C during the same period. But it should emphasized that there are some uncertainties and gaps in the information about the recent climate warming, especially in some special regions such as in China. The uncertainties of climate warming in China come from both lack of the observed data during the first half of the 20th century and the urbanization process (heat island effects) during the second half of the 20th century that might contribute 25% of the total warming. The climate warming in China during the last 50 years is not only contributed by the human activity, but also by the urbanization, the natural periodicity and decadal variability, dimming and brightening of the solar radiation, as well as other forcing factors such as solar activity, volcanic activity and interactions inside the climate system. The fractional uncertainties of the future climate prediction and projections vary due to internal variability of the global climate system, climate

model uncertainty and scenario uncertainty. The global climate models do not have adequately fine resolutions due to the lack of high speed computers, with inveteracious simulations by the models, especially in the regional scales. The parameterizations of the physical, chemical and biological processes in the global climate system are complicated. The present climate models can hardly describe those processes, interactions and the feedback mechanisms, such as clouds-aerosols-radiation feedbacks. The future climate changes will be caused by both natural and anthropogenic forcing factors. It is difficult to predict solar and volcanic activities in a long period. The human activities in future are provided as some scenarios, not the real human emissions. Therefore, the reliability of climate change prediction and predictions in China for the next decade will not be very high. More research should be conducted in future for narrowing the uncertainties.

Keywords last 100 years; climate warming; uncertainty

0 引言

根据 20 世纪以来已有的气象仪器的观测记录,近百年(1906~2005 年)气候变暖的速度大约为 0.74°C/100 a(范围:0.56~0.92°C/100 a),尤以近 50 年变暖明显,线性趋势是 0.13°C/10 a(范围:0.10~0.16°C/10 a)^[1]。中国气候也在变暖,近百年(1906~2005 年)变暖约 0.53~0.86°C/100 a,近 50 年变暖更明显,线性趋势是 0.20~0.30°C/10 a,高于全球平均值,其中冬季变暖和最低温度变暖更显著^[2-3]。

进一步探究气候变暖的原因,利用全球气候模式考虑自

收稿日期:2009-10-20

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY 200806009);发展改革委员会和财政部“风能详查和评价工作”和欧盟-中国能源和环境项目(Europe Aid/123310/D/SER/CN)

作者简介:赵宗慈,研究员,研究方向为气候变化与模拟预测、人类活动评估,电子信箱:zhaozc@cma.gov.cn



然强迫(如太阳活动和火山活动)和人类活动强迫(包括人类排放,土地利用和人口社会经济变化等)在百年时间尺度气候变化中的作用,利用气候模式的模拟结果与观测序列进行对比,从而分析哪些强迫可能是造成全球和中国气候变暖的主要影响因素。归因分析表明,人类活动很可能在近50年全球和中国气候变暖中起了明显的作用^[1-7]。

但是,在全球和中国近百年和近50年气候变暖研究中尚存在不确定性。本文着重分析对近百年中国气候变暖的不确定性,主要包括观测资料检测的不确定性,变暖原因的不确定性和10~20年时间尺度预测的不确定性。

1 观测资料的不确定性

近百年全球气温观测资料的主要问题有:资料序列长度不够长,观测台站分布不均匀,一些台站迁站1次或多次,观测时次的改变,观测仪器的变更,观测场周围环境的变化,城市化影响,自动观测与人工观测的差异等。对中国观测资料的质疑主要在两个方面:一是在1950年以前的50年中国的气象台站稀少,观测资料不足;二是近几十年城市化进程明显,如人口增加、经济发展、环境改变等所带来的对观测气温记录的影响。此外,台站位置分布不均,东部密集,西部稀少;资料序列在1950年前多有间断;再加上许多台站历史上有迁站甚至多次迁站和观测仪器和观测时次变更;这些都造成了观测资料的不确定性。

1.1 1950年前观测资料的不足

由于中国在1950年前的50余年观测台站很少且覆盖范围小,观测台站最少时期如1906年中国大陆只有11个台站,台湾有7个台站,较多的时段也不足100个台站(见图1,图2),而且仅有的台站资料又常有发生中断的时期,因此带来作为参照物的观测资料序列本身存在较大的不确定性^[4,8-9]。在绘制观测的近百年全国年平均气温变化曲线时,不同的研究者由于对前50年的补救办法不同,造成气温曲线的差异很大,计算曲线间的相关系数表明,后50年4条曲线(Jones(PJOBSCN),王绍武、龚道溢(WGOBSCN),任国玉、唐国利(OBS105CN),林学椿等(OBSLYT))^[2]的两两相关系数非常显著,达0.96~0.99,而前50年的相关系数只有0.62~0.84,相关性明显不如后50年^[2];近年发表文献的另一套5条曲线(王绍武等(WYG),唐国利等(TR,TD),林学椿等(LYT),Jones等(CRU))对比也得到类似结论^[9]。计算的近百年和近50年中国年平均气温距平变化的线性趋势表明,4条曲线(图3)给出

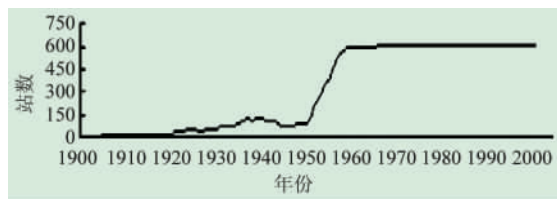


图1 近百年用于计算中国年平均气温变化的观测台站数
Fig. 1 Observed station numbers in China



图2 中国大陆1954年有数据的台站(535个)位置和1906年有数据的台站位置(大陆11个,台湾7个)示意图
Fig. 2 Locations of the observed stations in China for 1954 by dots and for 1906 by cross (Mainland 11, Taiwan 7)

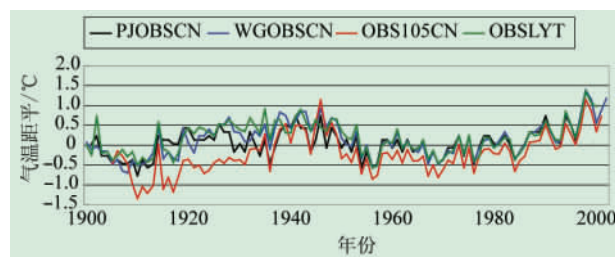


图3 近百年4条中国年平均气温距平变化曲线(相对于1961-1990年平均)
Fig. 3 Evolution of annual average temperature anomalies in China (relative to 1961-1990) by four sets of the observed data

1900~1999年变暖 $0.19\sim0.72^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,1950~1999年变暖 $0.64\sim0.92^{\circ}\text{C}/50\text{a}$ ^[2],5条曲线(图4)给出1906~2005年变暖 $0.34\sim1.20^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ ^[9]。所有研究一致表明中国近百年有气候变暖趋势,并且近50年有明显变暖的趋势。需要强调指出的是,不同的研究给出的具体变暖趋势值差异较大,主要原因是前50年资料差异较大。

1.2 城市化热岛效应的影响

城市化热岛效应的定量衡量,一种方法是把观测台站按照所在城市人口数来划分级别,对应其不同年代人口的变化进行计算;另一种方法是选取城市观测站与临近的处在大气背景相同的农村观测站(或邻近海温)的温度差表示城市化热岛效应的影响。以中国为例,由于中国的许多观测台站在城郊区,因此受到城市化进程的影响越来越明显,城市化热岛效应影响到观测气温虚假的“增暖”。一些研究给出城市化对观测气温的贡献,较早的研究给出1951~1989年中国的气候每10年平均变暖 0.06°C ,注意到城市化人口增加平

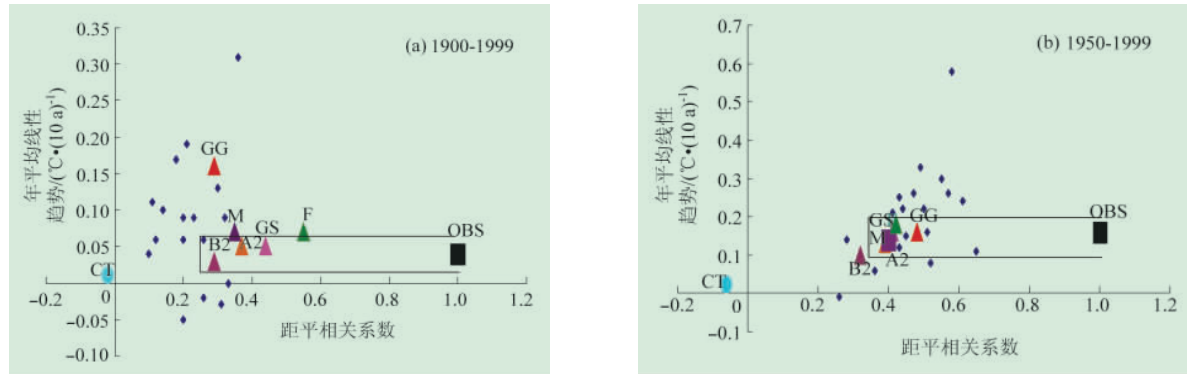


图 5 20 世纪 (1900–1999 年) (a) 和近 50 年 (1950–1999 年) (b) 中国年平均气温距平变化线性趋势与相关系数散布图

Fig. 5 Scatter of anomalous correlation coefficients and linear trends for 1900–1999 (a) and 1950–1999 (b)

活动特别是人类排放温室气体增加可能起了主要的作用。⑤ 不论近百年或是近 50 年气候模式考虑人类活动模拟的年平均气温距平与观测的相关系数都低于 0.65, 由此表明尚存在明显的不一致性和不确定性。⑥ 气候模式考虑自然和人类联合或单独强迫模拟的变暖趋势与观测的不一致性, 说明气候模式的不确定性, 以及模拟设计方案尚存在不确定性。

2.2 气温准周期性振动的原因分析

从观测到的近百余年北半球和中国年平均气温的变化注意到, 除了存在变暖的长期趋势外, 还具有其他特征, 即冷暖相间的准周期性振动 (见图 6)。计算表明, 20 世纪 00–10 年

代的 20 年气温处在冷时段中, 平均距平为 -0.24°C , 但是气温有略增加趋势, 线性趋势为 $0.05^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$; 20–40 年代处于明显暖阶段, 30 年平均距平 0.43°C , 线性趋势是 $0.19^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$; 50–70 年代为冷时期, 20 年平均距平 -0.10°C , 线性趋势 $-0.15^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$; 80 年代以来更明显变暖, 29 年平均距平为 0.58°C , 线性趋势是 $0.52^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ (见表 2 中的观测一列)。这种冷暖相间的变化特征如果只考虑气候的自然变化 (CT) 是无法解释的 (见表 2 CT 一列)。只用人类活动来解释也是很不够的, 几种人类活动情景均未模拟出 1920–1950 年的明显变暖, 例如 GG 模拟的是处在很冷期向正常变化, 模拟最暖的 B2 也远远低于观测

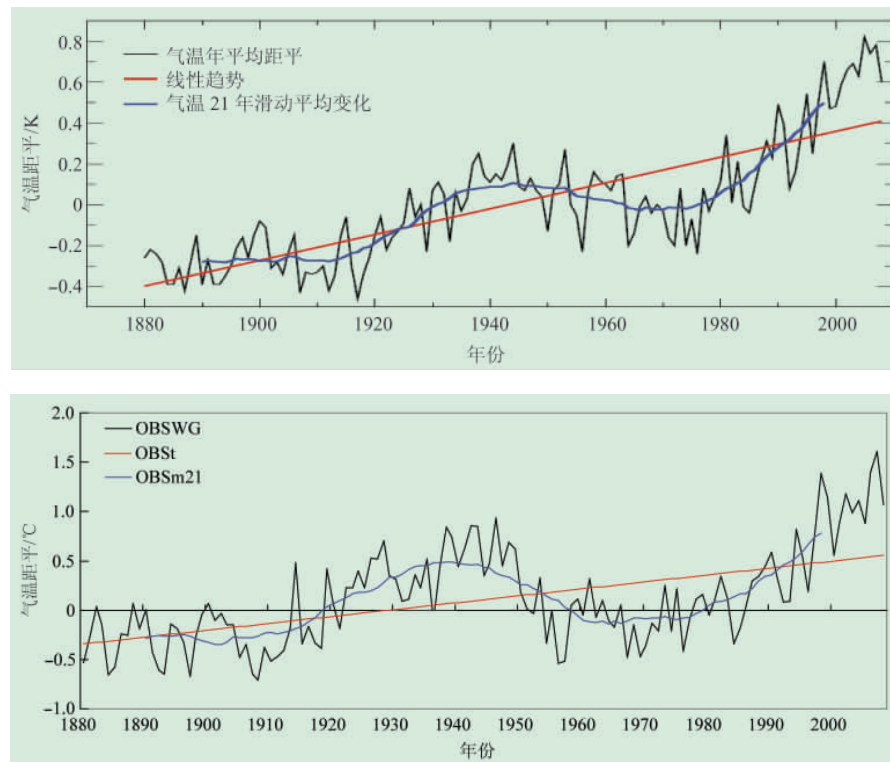


图 6 观测近百余年北半球 (a) 和中国 ((b), 根据龚道溢、

王绍武提供的资料计算绘制) 年平均气温距平变化

Fig. 6 Observed annual average temperature anomalies in Northern hemisphere (a) and in China ((b), calculated by Gong and Wang data)

表 2 中国 4 个时段气温距平平均值 (单位:℃)
Table 2 Mean anomalies (unit: ℃)

年份	观测	CT	GG	GS	A2	B2	M(GG+GS+A2+B2)/4	F(AR4 20C3M+A1B)
1900–1919	–0.24/0.05	–0.09/–0.06	–0.84/0.26	–0.03/–0.09	–0.19/0.06	–0.03/0.01	–0.27/0.06	–0.40/0.08
1920–1949	0.43/0.19	–0.06/–0.08	–0.51/0.10	0.06/–0.01	0.03/0.06	0.17/0.05	–0.06/0.05	–0.22/0.07
1950–1970	–0.10/–0.15	–0.02/0.08	–0.42/0.03	–0.02/–0.25	–0.15/–0.07	–0.10/–0.11	–0.17/–0.10	–0.14/–0.08
1980–2008	0.58/0.52	0.01/–0.03	0.74/0.48	0.64/0.45	0.36/0.27	0.36/0.31	0.53/0.38	0.39/0.26

注: 变化趋势,单位:℃/10 a,相对于 1961–1990 年,根据文献[2]、[4]、[17]、[20]计算;M 为人类排放增加,即(GG+GS+A2+B2)平均,观测由龚道溢,王绍武,王永光提供,个人通信。
Notes: linear trends, unit: ℃/10 a, relative to 1961–1990, temperature in China for four periods (based on Ref. [2], [4], [17], [20]; M is mean of GG+GS+A2+B2, observed data provided by Gong, Wang, Wang, through personal communication.

的变暖值。注意到多数人类情景能够模拟出 1950–1970 年的变冷期, 尽管有的模拟过低或过高估计变冷的程度。对于 1980 年以来的更明显的变暖, 可以模拟出多数人类排放情景,但是 GG 和 GS 模拟过暖,A2 和 B2 模拟偏低。而近期的研究考虑人类和自然的共同作用 F (AR4)(见表 2 最后一列), 虽然模拟出 1920–1949 年时段的变暖趋势,但未模拟出正处在暖期中,对 1950–1970 年变冷趋势和处在冷时段模拟得较好,但对于 1980–2008 年的明显变暖阶段模拟的变暖程度不够。

这就提出,近百年气温除了人类活动贡献以外可能还存在其他的原因:第 1 种观点认为,自 19 世纪末期开始到 20 世纪,正处在气候自然的从小冰期以后转入回暖期^[21]。第 2 种观点认为, 中国年平均气温存在自然的年代际变率和准 60 年周期,20 世纪大致经过了冷/暖/冷/暖相间的变化,近 30 年属于周期性的出现暖期^[22–23]。第 3 种观点认为,近 50 年中国的城市化和热岛效应是不可忽略的造成变暖的因子,尤其近 20 年的明显变暖,与城市化的快速发展有密切联系^[14]。第 4 种观点认为,观测的中国地面接受的太阳辐射在 1961–1990 年期间有明显的变暗(减少)趋势,对应 1950–1970 年中国气温降温,而后 1991 年以来有略变明(增加)的趋势,而自 1990 年以来增暖极为明显,变明可能起了一定的作用,其变暗与变明可能与人类排放气溶胶和水汽的变化有一定联系^[24–25]。第 5 种观点认为,1950–1970 年期间, 中国大部分地区多水多洪涝,阴云多,造成夏季最高温度偏凉,年平均气温偏低;近 20 年大部分地区多干旱,造成夏季多炎热,年平均气温偏高^[4]。第 6 种观点认为,20 世纪 20–40 年代的偏暖是由于火山活动少所致^[4,22]。这些分析有待更多的证据来证实,但是都说明变暖的原因是复杂的, 人类活动不是近 50 年变暖的唯一的原因。

综上所述, 气候模式考虑各种人类强迫不能模拟出百年时间尺度气温变化的冷暖准周期性振动, 反映出气候模式的不确定性和排放方案的设计都存在问题。另一方面气候的自然变化如气温存在 50–60 年的准周期性振动和年代际振动可能是造成冷暖准周期性振动的主要原因之一。

3 近 20 年气温预测中的不确定性

IPCC 前 3 次评估报告利用气候模式做人类活动各种情景对未来全球年平均气温变化的预估一般开始在 1990 年,到 2008 年已经做了 19 年的预测, 因此可以将预测结果与观测值进行对比,进一步看气候模式考虑人类活动情景的预测能力。IPCC 第 4 次评估报告用改进后的气候模式考虑人类活动的高、中和低排放 3 种情景,从 2000 年开始做预测,到 2008 年也已经做了 9 年预测,同样可以与观测值对比检查预测效果。图 7 和图 8 分别给出对全球和中国年平均气温预测的检验^[1,18,26]。图 7 中,粗黑线是观测值,绿色范围是 IPCC 第 1 次评估报告 FAR 预测值,紫色范围是 IPCC 第 2 次评估报告 SAR 预测值,浅蓝色范围是 IPCC 第 3 次评估报告 TAR 预测值,红色、绿色、深蓝和橙色粗线是 IPCC 第 4 次评估报告 AR4 分别考虑 SRES A2、A1B、B1 及承诺排放情景预测值^[1],其中 2006–2008 年观测气温值由 Jones 提供(个人通信)。图 8 中,1990–2008 年观测值用粗黑线表示(龚道溢、王绍武、王永光提供),其他曲线是多模式集成模拟值(1960–1990 年)和集成预估值(1991–2030 年),粗绿线是多模式控制试验(没有人类活动)的平均(GCM-ct),粗红线是多模式考虑 GG+GS+A2+B2 的平均,粗蓝线是多模式考虑 7 类强迫的平均,粉红线是多模式考虑温室气体排放增加的平均(GCM7G),橙线是多模式考虑

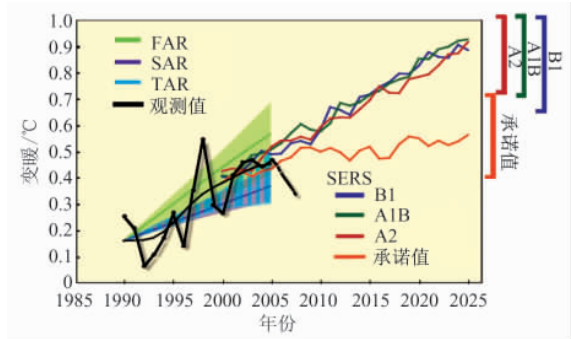


图 7 1990–2025 年多个气候模式考虑多种人类排放情景预测全球年平均气温距平变化

Fig. 7 Evolution of global annual average temperature anomalies as predicted by the climate models with the human emission scenarios for 1990–2025 (unit: ℃)

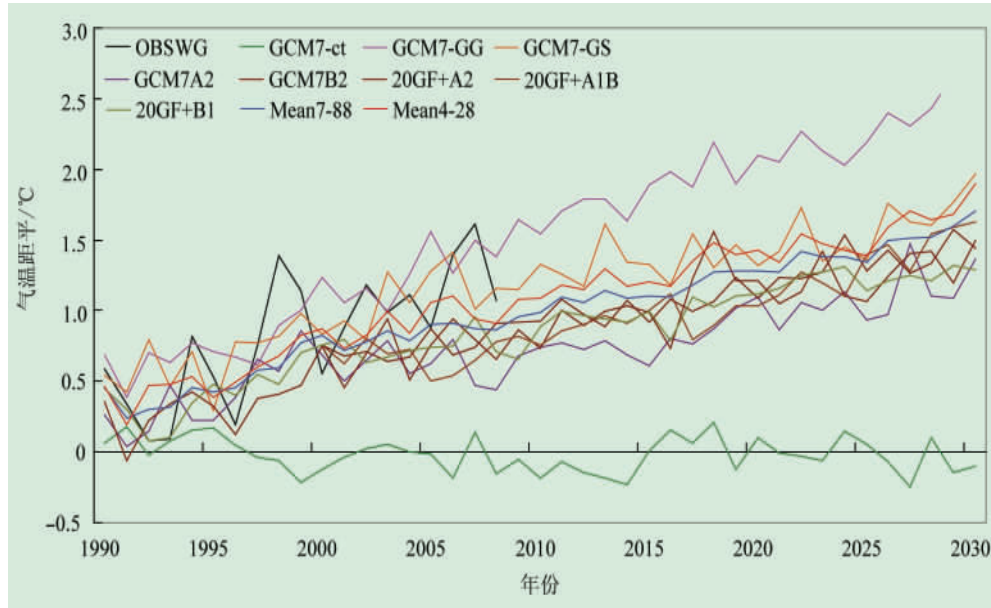


图8 80余个气候模式和不同的辐射强迫与人类排放方案多集成
预估的1990–2030年中国年平均气温距平变化(相对于1961–1990年)

Fig. 8 Annual mean temperature anomalies in China for 1990–2030 as predicted
by 80 and more climate models with the various forcing factors (relative to 1961–1990)

温室气体和硫酸盐气溶胶同时增加的平均(GCM7S),紫罗兰线是多气候模式考虑SRES A2,梅红线是多模式考虑SRES B2,深红线是多模式考虑所有辐射强迫模拟1990–1999年,然后考虑SRES A2,褐线是多模式考虑所有辐射强迫模拟1990–1999年,然后考虑SRES A1B,深黄线是多模式考虑所有辐射强迫模拟1990–1999年,然后考虑SRES B1(其中,20GF见文献[17],20个模式计算结果由周天军提供;SRES A2、A1B、B1见文献[20],13个模式计算结果由江志红提供)[18,26]。

对比气候模式考虑各种人类活动强迫,得到结果如下。

1) 气候模式考虑多种人类活动情景,可以预测出1990–2008年(或2000–2008年)全球和中国年平均气温增暖趋势,其中计算观测的1990–2008年的19年中国年平均气温相对于1961–1990年平均的距平是增暖 0.82°C ,但是有些情景预测过高(例如GG和GS,分别为 0.97°C 和 0.86°C),有些预测过低(其他情景在 $0.33\sim 0.71$ 之间),计算模式考虑各种强迫的中国年平均气温变化的预测值与观测值的相关系数为 $0.57\sim 0.78$,绝大多数达到99%显著性检验水平(0.57)。

2) 自2003–2008年观测的全球年平均气温有下降趋势,但是4次评估报告所有气候模式考虑人类强迫预测是继续增暖趋势,都没有预测出下降(增暖幅度减小)的趋势。因此,提出这5年是否自然强迫起了一定作用,或人类强迫的增暖值预测过大。

3) 气候模式考虑人类强迫没有分别预测出1992、1996和2000年全球增暖幅度很低的特征以及1998年增暖幅度很高的特征,同样提出,自然的气候变化在模式预测中没有反映出来。

4) 注意到中国年平均气温距平变化幅度很大,时而增暖明显,时而增暖值很小,气候模式考虑人类强迫并没有预测出气温变化的这种特征,城市热岛效应和自然因素可能有明显影响。

因此,从气候模式考虑人类强迫预测的19年(或9年)全球和中国年平均气温变化与观测对比检测证实,影响近50余年气温变化的因素不仅只人类强迫,必然还存在自然强迫如太阳活动和火山活动的作用和全球气候系统内部的相互作用与反馈的复杂过程。

4 结论和讨论

综上所述,百年时间尺度中国变暖特别是近50年明显变暖中的不确定性主要来自:

1) 气象仪器观测资料在前50年的不足以及覆盖范围小,后50年城市化进程明显,城市热岛效应增加了变暖趋势。

2) 近百年北半球和中国气温变化特征除了有变暖趋势外,还有自然的准周期振动和年代际变率,气候模式考虑人类活动和自然强迫联合或单独作用,可以模拟出变暖趋势,但是都难于模拟出准周期振动和年代际变率这个特点。证据表明,人类活动,城市化热岛效应(在中国对近50年变暖的贡献大约占 $1/4$),自然的准周期振动和年代际变率,变暗和变明以及其他外强迫如太阳活动和火山活动与气候系统内部相互作用等共同贡献于近50年中国的变暖。

3) 全球气候模式由于在区域尺度的分辨率显得较低,以及区域尺度一些物理过程的参数化(如云、气溶胶等)存在较大问题,因此带来对变暖原因分析的不确定性。

4) 10~20 年的气候预测中,只考虑了人类强迫主要是温室气体排放增加,其情景预估与真实的排放存在较大差异,增暖值不同模式和不同情景差异较大。预测中没有考虑自然强迫的预测,因此带来预测与观测的不一致性。

5) 最近的一篇研究^[27]讨论了在未来预估全球和各区域年平均气温变化中来自 3 个来源 (气候模式的不确定性、未来情景的不确定性和气候系统内部变率)造成的不确定性所占比例,注意到随着时间推移,气候模式的不确定性从占主导地位转为未来情景的不确定性占主导地位,这种特点在全球比区域(例如中国)更明显,还注意到气候系统内部变率的作用也从开始很明显转为后期很不明显(见表 3 和图 9)。

表 3 评估 IPCC AR4 预估的 2010 和 2090 年全球和中国年平均气温变化的不确定性贡献百分数

Table 3 Fractional uncertainties of temperature predictions associated with internal variability, climate models uncertainty, and scenario uncertainty for the global and Chinese scales in 2010 and 2090, respectively (unit: %)

预估参数	2010 年		2090 年	
	全球	中国	全球	中国
气候模式	65	48	17	25
未来情景	2	10	81	70
内部变率	33	42	2	5

注: 由文献^[27]的图表计算得出。

Note: Calculated from Ref. [27].

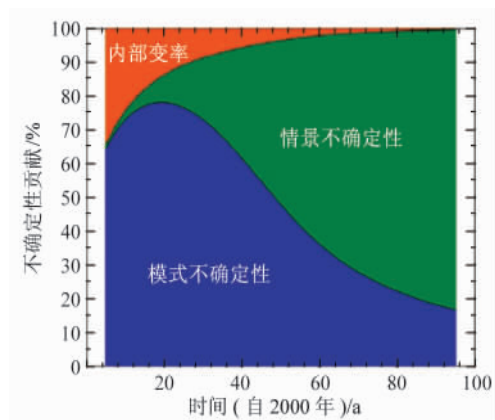


图 9 评估 IPCC AR4 预估的 21 世纪全球年平均气温变化的不确定性贡献百分数

Fig. 9 Fractional uncertainties of temperature predictions associated with: internal variability (orange region), climate models uncertainty (blue region), and scenario uncertainty (green region) for the global scale in 2000–2100

地球气候正在变化,其变化程度有多大以及人类的作用有多大,是政策制定者和公众关心的重要问题,虽然近 20 年 IPCC 评估报告总结评估了世界各国科学家的大量研究成果,

但是仍然存在许多不确定性和认识的空白,本文综述的中国近百年变暖的不确定性提出了许多需要进一步研究的问题,科学家们必须进一步做出更科学和更可靠的评估。

参考文献 (References)

- [1] Solomon S, Qin Dahe, Manning M, *et al.* Climate change 2007: The physical science basis [R]. IPCC WG1 AR4 Report, Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 996.
- [2] 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 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 808–817.
Zhao Zongci, Wang Shaowu, Xu Ying, *et al.* Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 808–817.
- [3] 气候变化国家评估报告编委会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 80–105.
Editorial Board on China's National Assessment Report on Climate Change. China's national assessment report on climate change [M]. Beijing: Science Press, 2007: 80–105.
- [4] Wang Shaowu, Li Weijing. Climate of China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 428.
- [5] Ding Yihui, Ren Guoyu, Zhao Zongci, *et al.* Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24 (6): 954–971.
- [6] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇. IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 183–184.
Zhao Zongci, Wang Shaowu, Luo Yong. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 183–184.
- [7] 周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 气候变化的归因和预估模拟研究 [J]. 大气科学, 2008, 32(4): 906–922.
Zhou Tianjun, Li Lijuan, Li Hongmei, *et al.* *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 906–922.
- [8] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 五十年来中国大陆近地面气候变化的基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942–956.
Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, *et al.* *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942–956.
- [9] 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国近百年温度曲线的对比分析 [J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 71–78.
Tang Guoli, Ding Yihui, Wang Shaowu, *et al.* *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(2): 71–78.
- [10] Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, *et al.* Changes in wind speed over China during 1956–2004 [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, doi: 10.1007/s00704-009-0152-7.
- [11] 中央气象局/中国科学院地球物理研究所联合资料室. 中国气温资料 [M]. 北京: 气象出版社, 1954.
China Meteorological Administration/Geophysics Institute of China Science Academy, Surface air temperature in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1954.
- [12] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响 [J]. 气象, 1991, 17 (4): 14–17.
Zhao Zongci. *J Meteorology*, 1991, 17(4): 14–17.
- [13] Hulme M, Zhao Z C, Jiang T. Recent and future climate change in East Asia[J]. *International Journal of Climatology*, 1994, 14: 637–658.
- [14] Ren G Y, Chu Z Y, Zhou J X, *et al.* Urbanization effects on observed surface air temperature in North China[J]. *Journal of Climate*, 2008, 21: 1333–1348.
- [15] Jones P D, Lister D H, Li Q. Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China [J]. *Journal of*

- Geophysical Research – Atmosphere*, 2008, 113: D16122, doi: 10.1029/2008JD009916.
- [16] 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 我国地面气温变化趋势中的城市化影响偏差[J]. 气象学报, 2009, 待发表.
Zhang Aiyong, Ren Guoyu, Guo Jun, *et al. Acta Meteorologica Sinica*, 2009, in press.
- [17] Zhou T, Yu R, The 20th century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19: 5843–5858.
- [18] 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 未来 20 年中国气温变化预估 [J]. 气象与环境学报, 2008, 24(5): 1–5.
Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying, *et al. Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(5): 1–5.
- [19] Latif M. Inter-decadal variability of temperature [R/OL]. World Climate Conference–3, Geneva, Switzerland, Aug.31–Sept. 4, 2009, <http://www.wmo.int/wcc3/>.
- [20] 江志红, 张霞, 王冀. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 787–799.
Jiang Zhihong, Zhang Xia and Wang Ji. *Geographical Research*, 2008, 27(4): 787–799.
- [21] Singer S F. Nature, not human activity, rules the climate [R]. Chicago, IL: The Heartland Institute, 2008.
- [22] 王绍武, 赵宗慈, 龚道溢, 等. 现代气候学概论[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
Wang Shaowu, Zhao Zongci, Gong Daoyi, *et al. Conspectus on Modern Climatology*[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.
- [23] 王永光, 龚振淞, 许力, 等. 中国温度, 降水的长期气候趋势及其影响因子分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(增刊): 86–91.
Wang Yongguang, Gong Zhensong, Xu Li, *et al. Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(suppl): 86–91.
- [24] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化, 影响因子及其可能的气候效应最新研究进展[J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 915–923.
Shen Yanbo, Zhao Zongci, Shi Guangyu. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 915–923.
- [25] Zhao Z, Luo Y, Jiang Y, *et al.* Impacts of dimming and brightening on warming in China[J]. *Scientific Research Monthly*, 2009, 8: 34–37.
- [26] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇, 等. 气候变暖中自然和人类强迫的联合估算[J]. 科技创新导报, 2009, 18: 137–138.
Zhao Zongci, Wang Shaowu, Luo Yong, *et al. Science and Technology Innovative Review*, 2009, 18: 137–138.
- [27] Pirani A, Meehl G, Bony S. WCRP/CLIVAR working group on coupled modeling (WGCM) activity report: Overview and contribution to the WCRP crosscut on anthropogenic climate change [R]. CLIVAR Newsletter Exchanges, 2009, 14(2/3, 49/50).

(责任编辑 朱宇)



中国科学技术协会

青年科学家论坛

促进学科交叉和融合
启迪新的学术思想
创立新的学术观点
培育新的学科生长

主办单位: 中国科协学会学术部
联系单位: 中国科协学会服务中心
联系电话: 010-62125017
电子信箱: xshdzzc@cast.org.cn