

不同温室气体排放情景下 未来中国地面气温变化特征

闫冠华^{1,2} 李巧萍³ 邢超²

摘要

采用 20 多个参与政府间气候变化委员会第 4 次评估报告 (IPCC AR4) 的全球气候模式,在 20 世纪气候模拟试验和 SRES B1、A1B 和 A2 3 种排放情景下进行数值集合分析,结果表明未来中国大陆的气温变化有着明显的时间和空间差异.21 世纪,中国大陆年平均气温呈显著升高趋势,至 2099 年平均增温范围为 2.5~4.9℃,高于全球平均值.冬季升温明显高于其他季节,年较差呈减小趋势.21 世纪前期,变暖预估受排放情景假设或模式敏感性的影响较小,不同排放情景和不同模式之间的预估结果一致,中国大陆平均增温范围为 0.88~0.92℃,21 世纪中期以后这种差异逐渐增大,增暖范围为 2.44~4.28℃.相对于 1980—1999 年平均气候场,中国大陆平均升温值在 20 世纪 50 年代前后达到 2℃,此后,A1B 及 A2 情景下中国大陆气温快速升高,在 21 世纪 60 年代末达到或超过 3℃,但区域差异明显,升温值达 2℃ 的时间由北至南在不同排放情景下相差 10~30 a,东北、西北地区将成为未来受气温升高影响最为敏感的地区.

关键词

温室气体排放情景;地面气温;变化特征

中图分类号 P467

文献标志码 A

收稿日期 2010-08-31

资助项目 公益性行业(气象)科研专项(GYHY-200906020);国家自然科学基金(40871095);国家科技支撑计划(2007BAC29B01)

作者简介

闫冠华,男,博士生,主要从事数值预报及区域气候变化研究. yangh@cma.gov.cn

0 引言

最近的观测事实表明,1906—2005 年全球平均气温上升了 0.74℃^[1],期间我国气候变化也呈现出显著的变暖特征,与全球气候变暖的趋势一致.根据 1905—2001 年以我国东部台站为主观测到的最高和最低温度,得到的我国平均气温增加率为 0.81℃/(100 a),比全球同期增温略高.近 50 a 我国平均气温升高以北方为主,最高升温速率达 0.8℃/(10 a),最大升温出现于东北北部、内蒙古、塔里木盆地,从全球范围看,这里也是增温最显著的地区之一^[2-4],且无论是季节变化还是年变化,都具有一定的复杂性^[5].

政府间气候变化专门委员会(IPCC)2007 年发布的第 4 次评估报告(IPCC AR4)^[1]指出,全球平均地面气温升高超过 90% 的可能性是由于人为温室气体排放引起的.根据国际上 20 余个气候模式对未来气候的预估结果,在 6 种 SRES 排放情景下,到 21 世纪末,全球地表的平均增温将为 1.1~6.4℃,海平面上升 0.18~0.59 m(与 1980—1999 年相比).在未来 20 a 中,气温大约以 0.2℃/(10 a)的速度升高,即使所有温室气体和气溶胶的浓度稳定在 2000 年的水平上不变,气温也要以约 0.1℃/(10 a)的速度继续升高^[1,6].

全球气候变暖对自然生态和人类生存环境产生了显著的影响.例如:冰川湖泊范围扩大,数量增加;许多由冰川和积雪供水的河流的径流量和早春最大溢流量增大;许多地区湖水和河水温度升高,并影响到水质;永冻区地表不稳定性增加;动植物的地理分布向高纬度和高海拔地区推移;生物的物候期提前.气候变化甚至还威胁到人类健康,如热浪造成的死亡率和一些传染病的发病率有所上升^[7-8].

2004 年欧盟一些科学家率先提出了“2℃ 升温阈值”的概念,认为 2℃ 是人类社会可以容忍的最高升温.2005 年,国际气候变化特别工作组发表了一份名为《应对气候挑战》建议书,建议书中指出:如果升温幅度超过 2℃ 界限,气候突变的可能性和危险性会大大增加,如农业严重歉收,粮食安全的风险加大;水资源将严重短缺等.为此,必须控制温室气体质量分数不超过 4×10^{-4} ,由此将 2℃ 升温阈值与“气候变化危险水平”直接联系起来.这一切都为中国的减排带来了巨大的压力. IPCC AR4 第 2 工作组的报告指出:增温从 1.5℃ 到 2.0~2.5℃ 的过程中,遭受水资源短缺威胁的人口将会从目前的近 6

1 南京信息工程大学 大气科学学院,南京,210044

2 中国气象局 培训中心,北京,100081

3 中国气象局 国家气候中心,北京,100081

亿增加到 24~31 亿,这其中包括中国和印度的一些大城市;温度超过 2℃,全球遭遇沿海洪涝、饥饿、疟疾、水短缺的人数将大大增加^[7].熊伟等^[9-10]的研究也指出,从温度来看,如果不考虑肥效和相应的适应措施,平均温度升高 2.0~2.5℃左右将导致我国 3 大作物的单产水平持续下降,影响到我国未来的粮食安全.如果气温升高 3℃,在降水不变的情况下,长度不足 4 km 的青藏高原冰川将消融^[11].

尽管欧盟等提出的 2℃ 升温阈值的科学性还有待进一步研究证实,但全球地面气温的升高确实已经并将继续影响人们赖以生存的地球环境,特别是对中国这样的发展中国家来说,在应对气候变化挑战的同时,还要承受来自国际社会的减排压力.因此,未来百年,中国大陆地面气温变化及区域特征如何,所谓的温度阈值出现的时间和空间,是否存在特别脆弱的地区或区域,这些变化特征与全球平均状况有何异同,是目前需要回答的科学问题.本文借助国家气候中心整编发布的 IPCC AR4 多模式集合的全球气温资料,分析 21 世纪中国平均地面气温变化的时空特征,分析未来中国大陆及各气候分区升温幅度分别达到 2、2.5、3℃ 出现的时间和区域特征,为气候变化影响评估提供科学基础,为国家制定可持续发展计划提供决策依据.

1 资料、方法及区域划分

本文分析采用参与政府间气候变化委员会第 4 次评估报告(IPCC AR4)的全球 20 多个气候模式提供的 20 世纪气候模拟结果(1901—2000 年)及 21 世纪(2001—2099 年)在 SRES B1、A1B、A2 3 种排放情景下的预估结果(由国家气候中心整编和发布).参加 IPCC 第 4 次评估报告的模式代表了当前国际上主要先进气候模式的最新版本,较之参与 IPCC 第 3 次评估报告的模式均有较大的改进,相应的情景试验设计也更加合理.这些模式精度高,参数化方案更合理,采用了更新的数值方法,模式的更多详细信息可参见 http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php.文中所用 20 世纪气候场的模拟及 21 世纪不同情景下的预估结果是将这些单模式结果统一插值到同一分辨率下(1.0°×1.0°),并采用多模式集合的方法,即仅通过算术平均得到的多模式集合结果.不同 SRES 情景下,月平均资料模式集合平均值所用的模式数量如下:SRES A1B 共 17 个模式,SRES A2 共 16 个模式,SRES B1 共 17 个模式,这些

模式的基本特征及集合资料说明参见 <http://ncc.cma.gov.cn>.为便于与 IPCC AR4 中的全球平均变化相比较,文中采用了多模式集合的 1980—1999 年平均场作为 20 世纪基准气候场.

文中也使用了中国 743 站同期地面气温的观测资料,以检验模式对平均气候场的模拟性能.在将模式结果与观测进行比较时,将台站的观测资料插值在与模式结果相同的格点上.

为了考察模式和观测结果之间的差距,计算了模式的均方根偏差:

$$D_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i,m} - x_{i,\text{obs}})^2}. \quad (1)$$

式(1)中: $x_{i,m}$ 为模式的气候平均第 i 个月的物理量; $x_{i,\text{obs}}$ 为观测的气候平均第 i 个月的物理量; n 为资料长度; D_{RMS} 为模式结果与观测结果之间的均方根偏差.

本研究所选区域覆盖了包括青藏高原在内的整个中国大陆及周边地区,范围为 70°~140°E,15°~55°N.此外,为了全面考察中国地面气温变化的区域特性,将中国大陆分为 6 个主要气候区(图 1):A 区为东北区,主要包括东北三省和内蒙古北部;B 区为华北区,主要为华北平原;C 区为华东区,主要指长江中下游地区;D 区为华南区,包括广东、广西、湖南等地;E 区为西北区,包括内蒙古东部、陕西、宁夏、甘肃、青海和新疆等地;F 区为西南区,包括西藏、四川、云南和贵州等地.

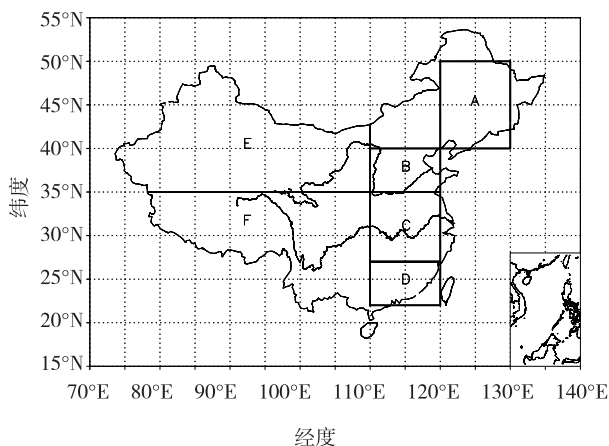


图 1 研究区域及分区

Fig. 1 Distribution of the researched regions and sub-regions

2 中国地面气温的模拟检验

关于 IPCC AR4 中采用的全球模式对中国降水、

东亚季风等的模拟性能已有较多的检验和分析^[12-15],认为大部分模式基本上能够模拟出中国东部地区降水的季节进退,但不同模式对东亚季风降水的空间分布模拟差异较大,多模式集合一般优于大部分单个模式的结果.

此处仅对模拟的地面气温进行检验. 图 2 给出了 1980—1999 年中国台站实测及 IPCC AR4 多模式集合的中国冬季、夏季平均地面气温及模式的均方根偏差. 由图 2 可见:冬季我国大陆温度梯度较大,南部平均温度可达 15 ℃,而我国最北方地区平均温

度可低至 -27 ℃,除青藏高原外,等温线基本上与纬圈平行;比较模拟场和实测场可见,模式较好地模拟出了我国冬季平均气温随纬度的阶梯分布,但模拟的温度比观测值偏冷,这也是目前模式在东亚地区模拟中普遍存在的偏差^[16-17];长江以南地区温度偏高、塔里木盆地温度偏高以及青藏高原地区温度偏低是夏季中国地表气温的几个主要特征,模式较好地模拟了夏季气温的主要区域特征. 从图 2 中给出的模式均方根误差也可看到(图 2e—f):模式对东部地区的模拟性能较好,在华北、长江中下游及华南地区的模拟偏

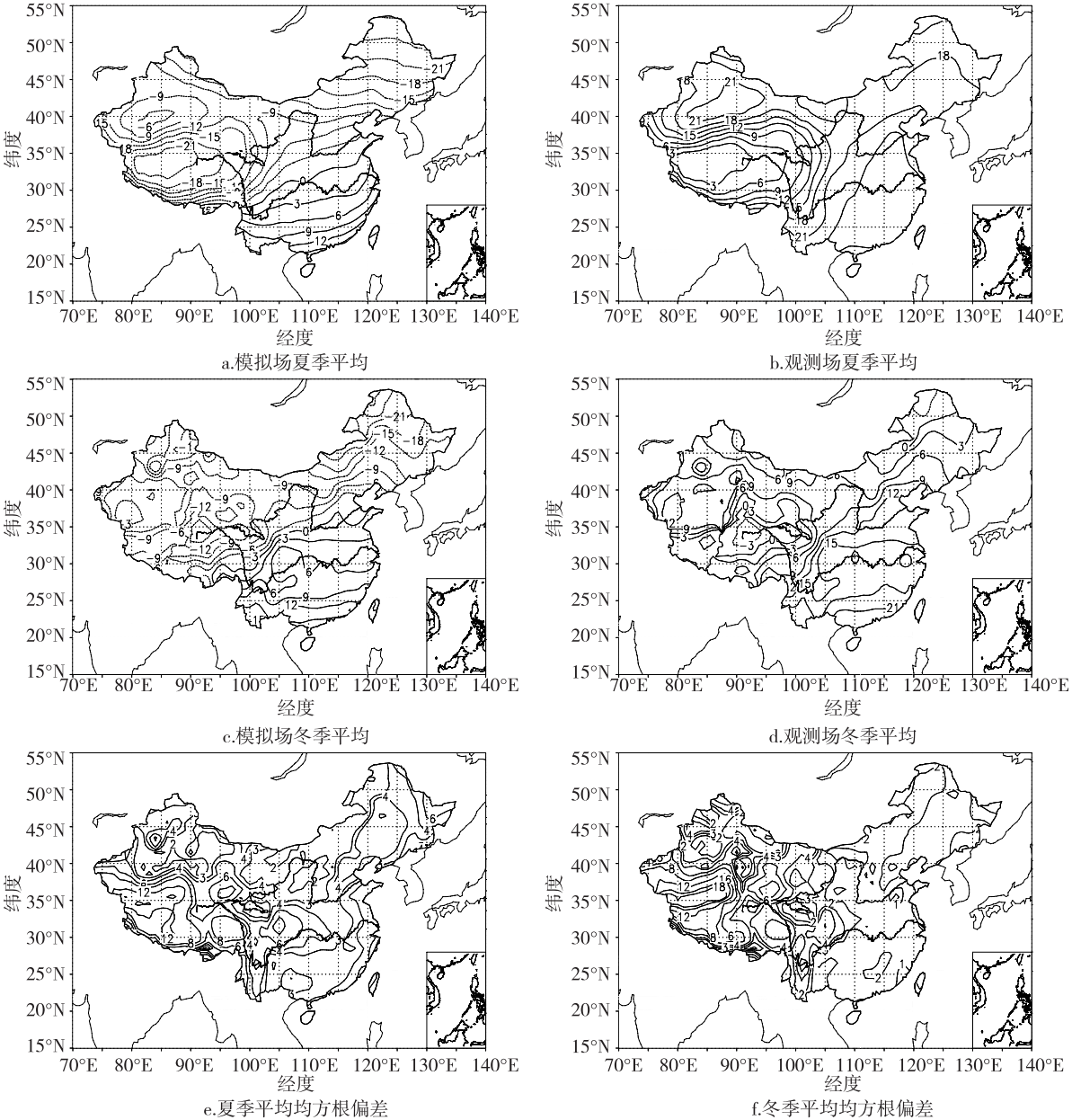


图 2 模拟和观测的 1980—1999 年地面气温及模式的均方根偏差(单位:℃)

Fig. 2 Mean surface air temperature during 1981—1999 from observation and simulation and model's root-mean-square error (units:℃)

差较小;对西部地区模拟偏差较大,特别是青藏高原地区;夏季的模拟偏差小于冬季.姜大膀等^[18]计算了17个模式及其集合结果与CRU观测资料之间的空间相关系数,最小为0.948,最高可达0.992,可见,模式对地面气温场模拟的空间差异很小,均能较好地反映模式的空间分布特征.大部分模式对地面气温年际变率及线性趋势也有一定模拟能力^[19].

3 未来中国地面气温变化特征

图3给出了中国大陆及6个分区域2001—2099年在3个主要排放情景下多模式集合的地面气温变化情况.需要说明的是,为了消除年变化的影响,本文在给出未来温度变化的时间序列演变图时对资料进行了9 a滑动平均处理.由图3可见,未来各区域平均地面气温在3种排放情景下均呈显著升温趋势.东北地区的升温幅度最大,西北地区次之,华南

地区最小.相对于模式气候场,B1排放情景下各区域平均升温速率范围为0.20~0.24℃/(10 a),区域之间的差异不明显,到2099年升温幅度为2.03~2.68℃;A1B排放情景下各区域平均升温速率范围为0.33~0.44℃/(10 a),东北地区升温速率最大,到2099年升温幅度为3.12~4.26℃;A2排放情景下各区域平均升温速率范围为0.36~0.51℃/(10 a),区域之间的差异明显增大,到2099年升温幅度为3.68~5.26℃,与江志红等^[20]的分析结果基本一致.从图3中还可以看出,A1B作为中等排放情景,尽管该情景下CO₂排放浓度仅在2030年前高于A2情景,但可能是由于气温变化对CO₂浓度具有持续或是滞后的响应,因此,该情景下中国大部分区域升温幅度在2050年前比A2情景略偏高.

从季节变化特征来看(图4给出21世纪3种排放情景下各区域月平均气温的变化曲线),东北、西

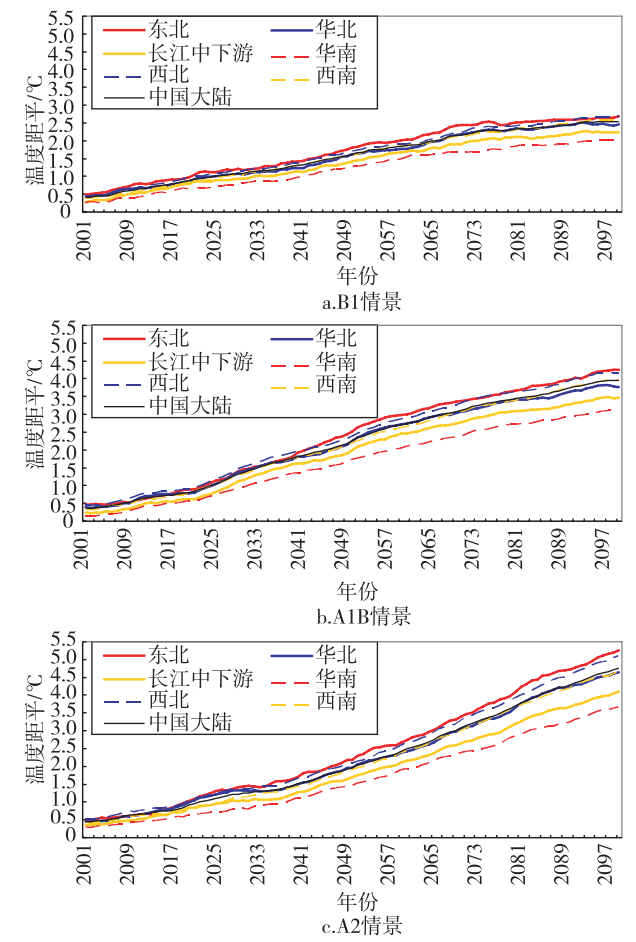


图3 21世纪区域年平均地面气温距平变化曲线
(相对于1980—1999年)

Fig. 3 Time series of regional surface air temperature departure (relative to 1980—1999)

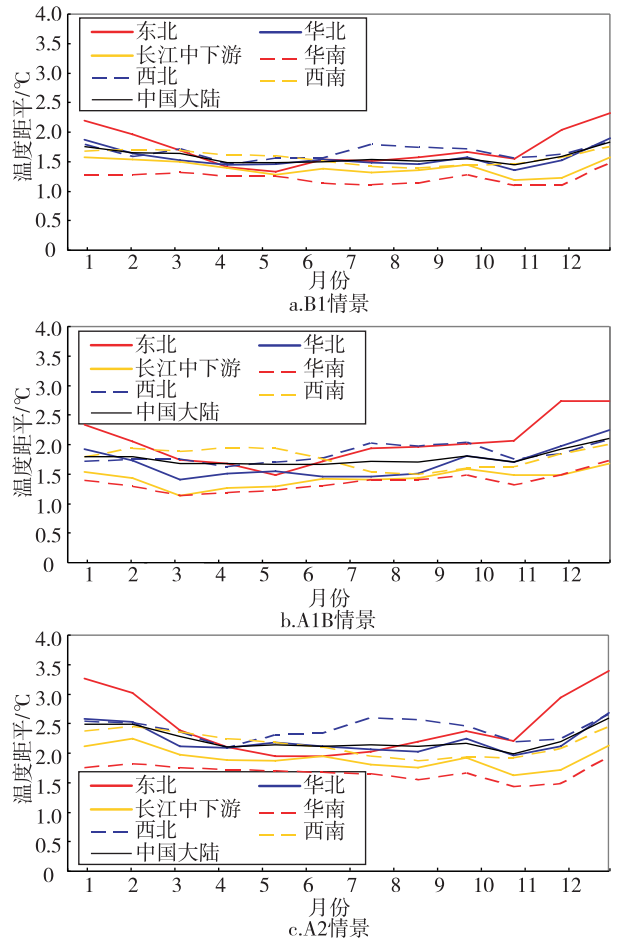


图4 21世纪区域月平均地面气温距平变化曲线
(相对于1980—1999年)

Fig. 4 Monthly mean surface air temperature departure in sub-regions (relative to 1980—1999)

北升温的季节变化较其他地区明显,华南地区升温的季节差异较小. 大部分区域冬季升温幅度明显高于其他季节,个别区域例外,如西北地区在3种排放情景下6—9月的升温幅度均高于其他月份. 需要指出的是,考察21世纪前期、中期、后期各区域平均气温变化的季节变化(图略)发现,冬季、夏季增温幅

度的差异逐渐增大,即冬季增温越来越明显于夏季,因此,未来气温的年较差将呈减小趋势.

图5、6分别给出了21世纪20年代和40年代东亚地区年平均地面气温的空间变化图. 可见,3种排放情景下地面气温距平场等值线呈经向分布,高纬度地区增温幅度明显高于低纬度地区,这一特征

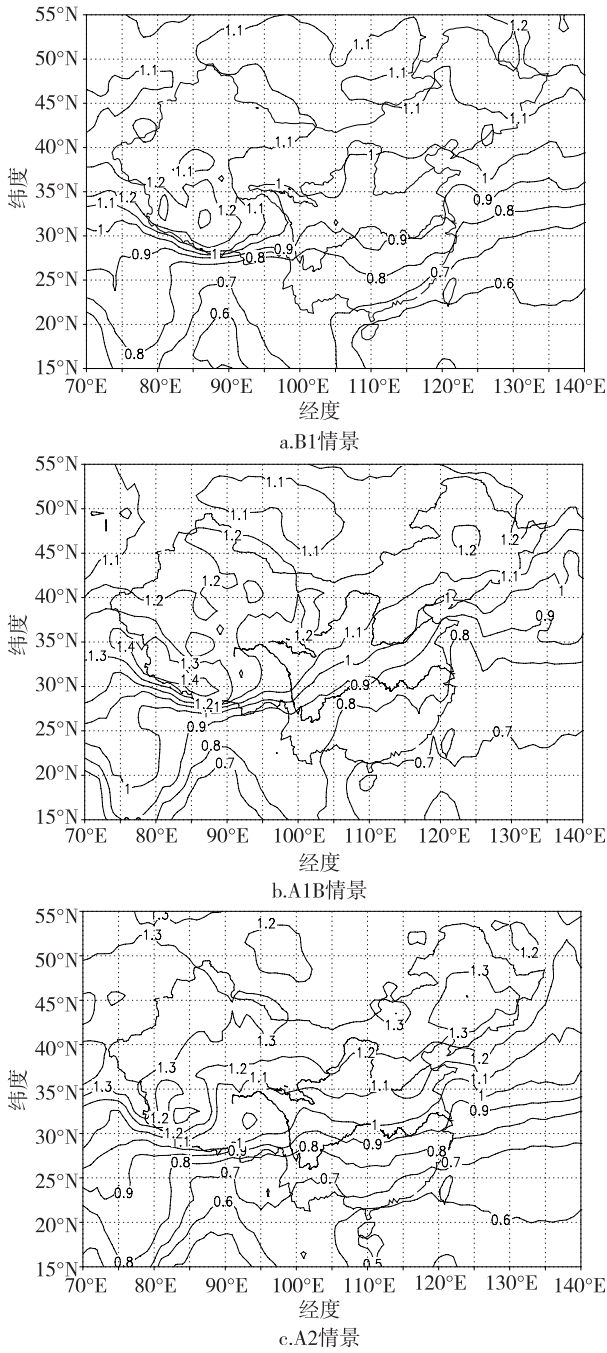


图5 21世纪20年代年平均地面气温变化
(相对于1980—1999年;单位:℃)
Fig. 5 Surface air temperature changes in 2020s
(relative to 1980—1999;unit:℃)

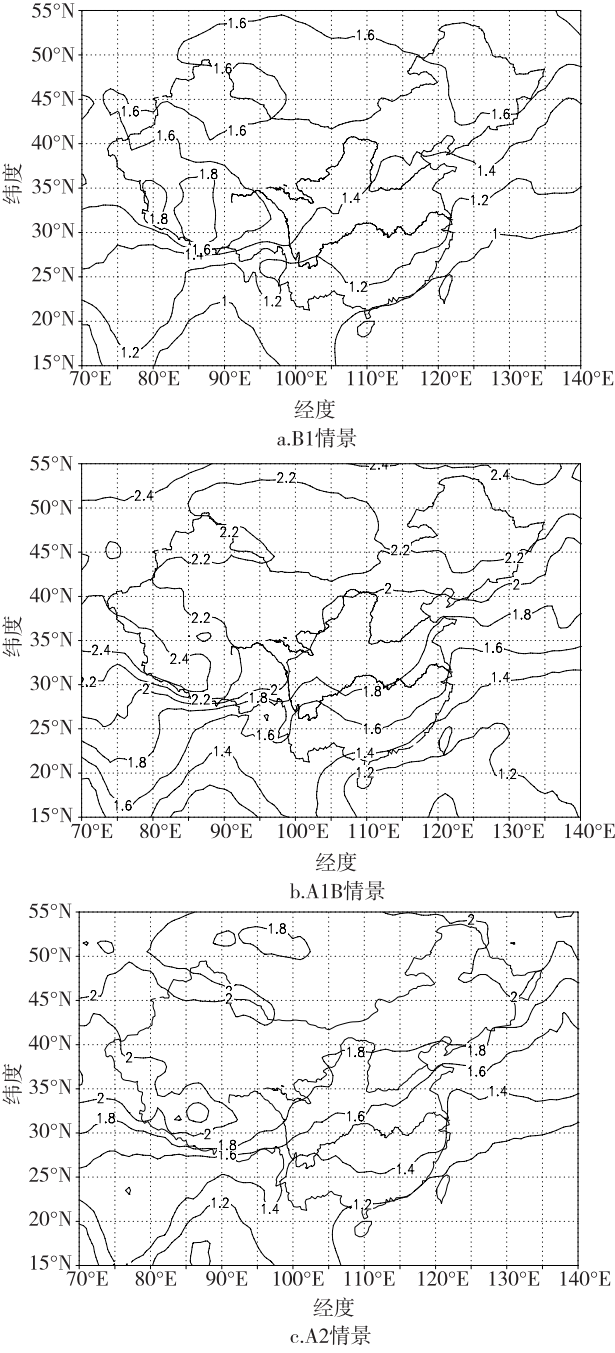


图6 21世纪40年代年平均地面气温变化
(相对于1980—1999年;单位:℃)
Fig. 6 Surface air temperature changes in 2040s
(relative to 1980—1999;units:℃)

与 IPCC AR4 的结论相一致. 21 世纪前期(2020 年前)不同情景之间升温值差别较小,黄河流域升温范围约 1.0 ~ 1.2 ℃,长江流域地区约为 0.8 ~ 1.0 ℃,华南地区略低,青藏高原地区升温较显著,新疆天山以北地区升温幅度高达 1.3 ℃. 不同季节之间温度变化存在较明显差异(图略). 冬季 3 种情景下较普遍的特征是:除黄河以南地区温度变化与年平均一致外,东北地区、华北北部地区升温幅度较年平均偏高,东北地区最高升温值可达 1.8 ℃,西部地区较年平均偏低,但夏季则表现为西部地区升温较为明显. 21 世纪 40 年代 3 种排放情景下中国大陆地面气温增值普遍在 1 ℃ 以上,高、低纬之间升温差异可高达 1 ℃,显著升温区主要位于东北、西北、西南地区,且不同情景下升温差异较大,B1 情景下升温幅度最小,A1B 和 A2 情景下升温幅度明显增大,高、低排放情景下黄河以北的大部分地区升温幅度达到 2 ℃. 冬季在 A1B 和 A2 情景下黄河流域及其以北地区升温值均达到 2 ℃ 以上,东北地区最高值可达 2.8 ℃. 夏季升温最明显的地区仍位于高原西北部及新疆地区,最高升温值可达 2.4 ℃. 与以往研究相比^[21-22],这两个阶段大陆的升温值比 IPCC 第 3 次评估报告(IPCC TAR)中多模式或单模式的结果略偏低. 参加 IPCC AR4 的模式和参加 IPCC TAR 的模式相比在物理过程参数化方案、模式空间分辨率等方面均有较大的改进,相应的情景试验设计也更加合理,因此预估结果的不确定性在一定程度上有所减小.

表 1 给出了 21 世纪前期、中期、末期全球和中国平均地面气温增暖的预估结果. 表 1 中结果为各时段年平均地面气温相对于 1980—1999 年平均的变化值,其中全球预估结果引自 IPCC AR4^[1]. 可见,所考察的 3 种排放情景下,中国平均地表增暖幅度均高于 IPCC AR4 给出的最佳估算值. 此处对中国大陆的分析结果与 IPCC AR4 给出的全球结果中一致性的特点是:21 世纪前期,变暖预估受不同排放情景假设或不同模式的敏感性的影响较小,3 种排放情景之间的升温幅度相差较小,全球平均增温范围在 0.64 ~ 0.69 ℃,中国为 0.88 ~ 0.92 ℃,但是到 21 世纪中、后期,不同排放情景下各区域升温差异逐渐明显,如 2088—2099 年,全球增温范围为 1.79 ~ 3.13 ℃,中国为 2.44 ~ 4.28 ℃,A2 高排放情景下,气温变化对二氧化碳浓度增加的响应更加显著. 由此可见,中国未来不同时期的升温幅度均高于全球平均. 中国大陆气温变化特征存在较大区域差异,至

2099 年,在 B1、A1B 和 A2 这 3 种排放情景下,各区域平均的温度增幅分别为:东北地区 2.68 ~ 5.26 ℃,华北地区 2.46 ~ 4.65 ℃,长江中下游地区 2.23 ~ 4.10 ℃,华南地区 2.03 ~ 3.68 ℃,西北地区 2.70 ~ 5.10 ℃,西南地区为 2.56 ~ 4.67 ℃. 可见,东北、西北地区与其他区域相比,未来面临地面气温大幅度增加带来的压力更大,可能成为气候变化影响更加脆弱的地区. 以往的研究也对西北地区未来气候变化较为关注^[23-24],这些研究结果均揭示了未来西北地区显著的增温趋势,尽管研究中也指出未来西北地区降水量可能增加,但在较大幅度的增温背景下未来该区仍可能面临干旱的威胁.

表 1 21 世纪全球和中国平均地表增暖预估结果
Table 1 Projected global and China averaged surface warming in the 21st century

时期	SRES	全球增暖/℃	中国增暖/℃
2011—2030 年	B1	0.66	0.88
	A1B	0.69	0.90
	A2	0.64	0.92
2046—2065 年	B1	1.29	1.76
	A1B	1.75	2.52
	A2	1.65	2.25
2080—2099 年	B1	1.79	2.44
	A1B	2.65	3.71
	A2	3.13	4.28

图 7 给出的单个模式对东北地区 21 世纪前期和后期地面气温的预估结果(其他地区图略)进一步说明:21 世纪前期,不同模式、不同排放情景之间的预估结果差异较小,气温变暖受温室气体排放假设及模式设计的敏感性较小;但随着时间的推移,21 世纪中期(图略)各情景及各单个模式之间的差别开始逐渐增大;到 21 世纪后期(图 7b),B1、A1B、A2 3 种排放情景的升温差异明显增大,不同模式之间最大升温差异也可高达 5 ℃. 这不仅体现了 21 世纪中后期地面气温对温室气体浓度值的响应差异,也揭示了预估结果不确定性的存在. 模式的个体性能及其对温室气体的敏感程度各不相同,其中,GFDL_CM2_1 的预估结果偏高,CSIRO_MK3_0 的预估结果偏低. 为了考察模式之间的差异,本文计算了不同模式结果之间的标准差,以 2011—2030 年为例,东北地区模式间的标准差在 B1、A1B 和 A2 情景下分别为 0.582、0.825 和 0.591 ℃. 由此可见,尽管多模式集合在一定程度可以减小预估结果的不确定性,

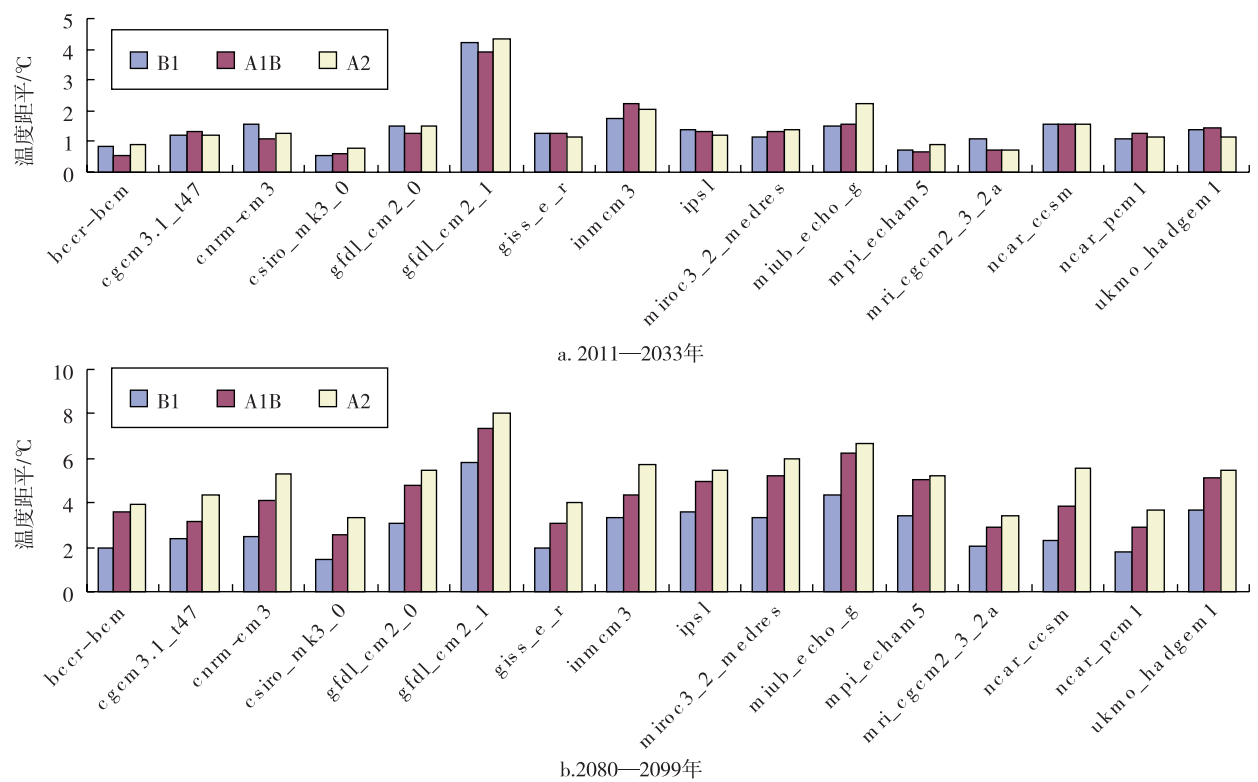


图7 单个模式对未来东北地区地面气温的预估结果

Fig. 7 Projected future temperature departure relative to 1980—1999 from each single model

但单个模式的模拟性能对集合结果的影响仍值得考虑。

4 21 世纪不同升温幅度出现的时间分析

IPCC AR4 第 2 工作组报告指出^[4], 未来全球地表平均气温的持续升高将可能引发全球气候系统的许多变化. 主要表现在淡水资源、生态系统、粮食生产、工业、人居环境、社会、健康等诸多领域. 例如, 未来气候变化对亚洲的影响主要包括: 到 2050 年, 中亚、南亚、东亚和东南亚地区的淡水供应将趋于紧张, 特别在大河流域; 沿海地区, 特别是人口密集的近海、东亚和东南亚三角洲地区, 发生洪涝的风险将极大地增加; 伴随着城市化、工业化和经济发展的加速, 气候变化将增加对自然资源 and 环境的压力; 在东亚、南亚和东南亚地区, 洪涝和干旱所引发的腹泻的发病率和死亡率将增加. 因此, 本节主要分析未来中国大陆平均气温升幅达 2、2.5 和 3℃ 的时间和区域, 为气候变化影响研究提供依据.

图 8 给出了 3 种排放情景下未来中国年平均地面气温升温值达 2℃ 的时空分布. 由图 8 可见: B1 情景下, 长江以北大部分地区升温值达 2℃ 的时间

出现在 2070 年前后, 东北、西部地区略偏早, 青藏高原地区最早, 约在 2055 年升温值达到 2℃, 华南地区升温最为缓慢, 至 2090 年以后达到 2℃; A1B 情景下, 各区升温值达 2℃ 的时间较 B1 情景明显偏早, 中国大陆在 2060 年之前全部达到 2℃, 西部地区最早, 在 2040 年前后即可达到 2℃; A2 情景下升温速率在 21 世纪中前期略缓于 A1B 情景, 大部分区域升温值到 2℃ 的时间与 A1B 情景相比滞后 5 a, 但整个大陆地区升温值仍然在 2065 年前达到 2℃. 本文也考察了不同排放情景下地面气温升高 2.5℃ 和 3.0℃ 的时间 (图 9 仅给出升温值达 2.5℃ 的情况). 可见, B1 情景下, 长江以北地区在未来百年升温值可达到或超过 2.5℃, 东北地区 and 高原地区偏早, 其余大部分地区在 21 世纪末可超过 2.5℃, 且 A1B 情景下在 21 世纪不会出现升温幅度超过 3℃ 的情况. A1B 情景下各区升温值达 2.5℃ 的时间与 A2 情景相近, 大部分地区出现 2.5℃ 的时间比 A2 情景提前 5 a 左右. 从 3℃ 升温阈值出现时间来看, A1B 情景和 A2 情景下约在 2090 年前整个大陆升温值均达到或超过 3℃, A1B 情景下东北地区和青藏高原南部地区更是在 2055 年前后就达到 3℃.

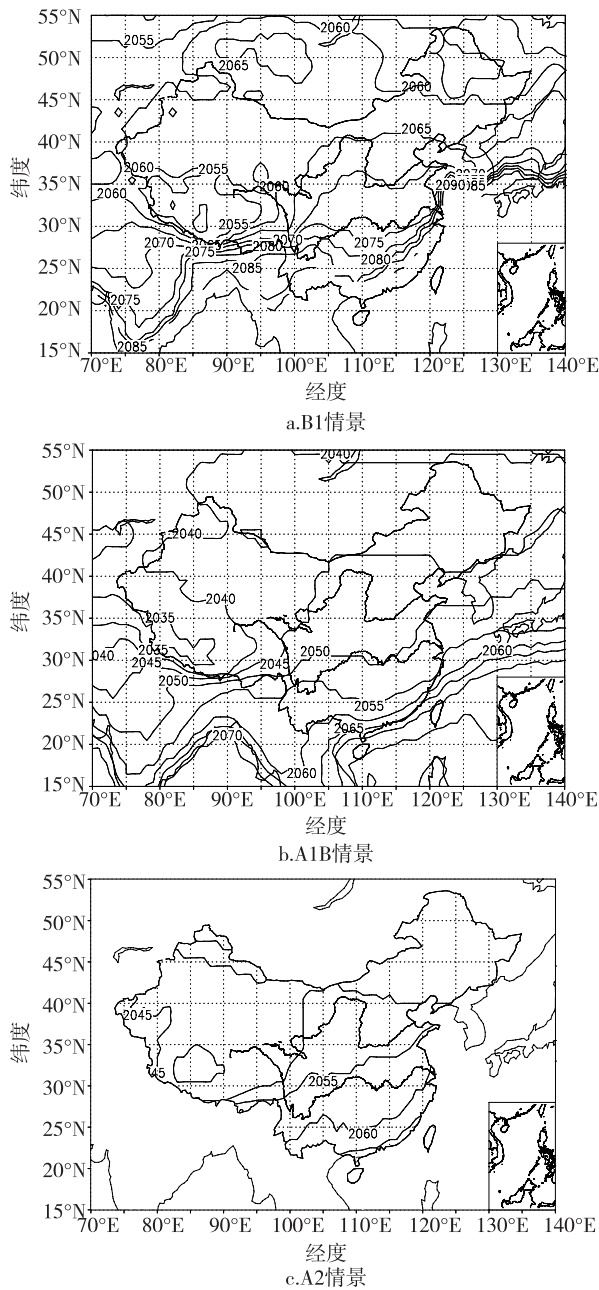


图 8 平均地面气温增温值达 2 °C 的年份

Fig. 8 The year when mean surface temperature rise by 2 °C

表 2 进一步统计了各区域未来百年升温值分别达到 2、2.5、3 °C 的时间,表中符号“—”表示在所研究的时段尚未出现.可见,B1、A1B、A2 3 种排放情景下中国大陆平均地面气温升温值达 2 °C 的时间分别在 2065 年、2046 年、2051 年,东北和西北地区偏早,华北地区、西南地区居中,华南地区最晚,由北至南相差 10 a 左右,特别是 B1 情景下,南北差异更明显. B1 情景下 21 世纪中国大陆平均气温升幅不超过 3 °C,但在另 2 种排放情景下均在 21 世纪 60 年

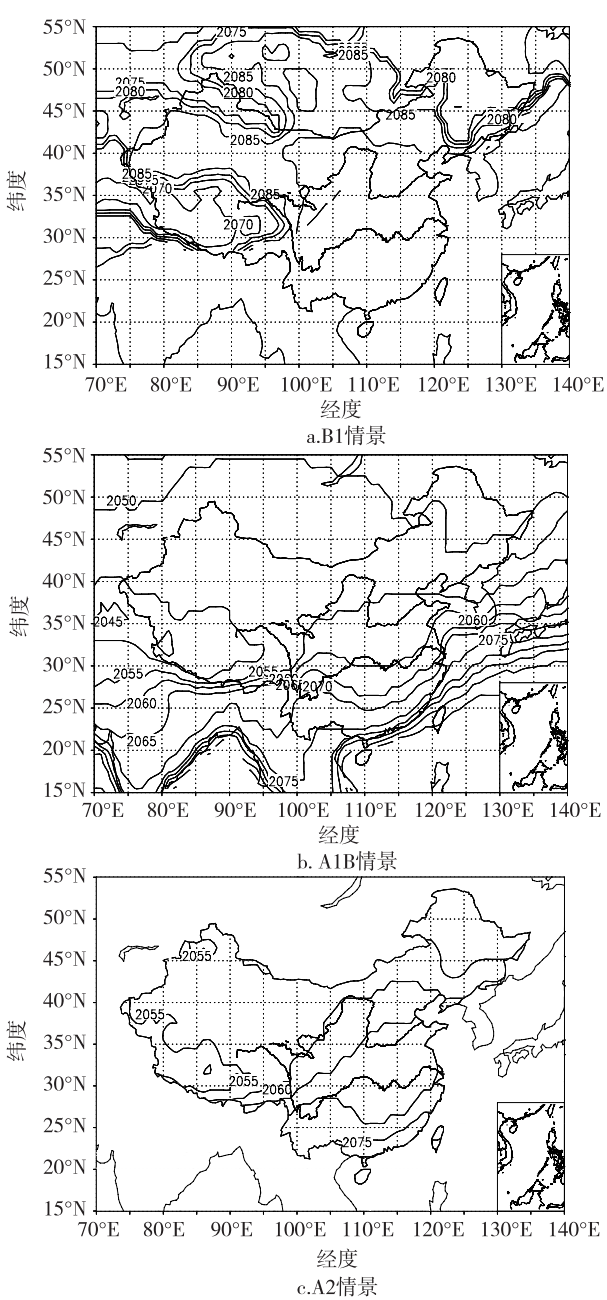


图 9 平均地面气温增温值达 2.5 °C 的年份

Fig. 9 The year when mean surface temperature rise by 2.5 °C

代末开始先后达到或超过 3 °C. 特别是东北、西北、华北地区在 21 世纪中期开始面临地面气温的显著增加,成为未来受气温升高影响最敏感的地区. 虽然气温增加在一定程度上可能延长这些地区农作物的播种期或生长期,但同时干旱、热浪及农作物害虫等方面的负面影响可能会更大,这些地区未来将可能面临气候变化引发的更加严峻的影响,需要研究未来气候变化影响与区域持续发展之间的联系,提高环境决策水平^[25].

表 2 不同排放情景下区域平均地面气温增温值
分别达到 2、2.5 和 3 ℃ 的年份

Table 2 The year of mean surface temperature rise separately
by 2, 2.5 and 3 ℃ under 3 emission scenarios

情景	区域	年份		
		增温达到 2.0 ℃	增温达到 2.5 ℃	增温达到 3.0 ℃
B1	东北地区	2059	2074	—
	华北地区	2067	2092	—
	长江中下游地区	2073	—	—
	华南地区	2093	—	—
	西北地区	2064	2087	—
	西南地区	2066	2091	—
	中国大陆	2065	2092	—
A1B	东北地区	2042	2050	2060
	华北地区	2046	2054	2069
	长江中下游地区	2051	2061	2076
	华南地区	2058	2072	2093
	西北地区	2041	2052	2063
	西南地区	2047	2055	2068
	中国大陆	2046	2054	2067
A2	东北地区	2047	2054	2065
	华北地区	2051	2062	2070
	长江中下游地区	2058	2067	2078
	华南地区	2063	2075	2083
	西北地区	2048	2058	2066
	西南地区	2052	2062	2070
	中国大陆	2051	2061	2069

5 小结

未来中国大陆气温升高对农业、经济、水资源、生态、人体健康等诸多方面有着重要的影响. 文中采用参与政府间气候变化委员会第 4 次评估报告 (IPCC AR4) 的全球 20 多个气候模式在 20 世纪气候模拟试验和 SRES B1、A1B 和 A2 3 种排放情景下数值模拟结果的集合分析表明, 未来中国大陆的气温变化有着明显的时间和空间差异. 主要结论如下.

1) 21 世纪, 中国大陆年平均气温呈显著升高趋势, 3 种排放情景下至 2099 年平均增温范围为 2.5 ~ 4.9 ℃, 高于全球平均. 东北、西北地区增温幅度较大, 华南地区最小. 从季节尺度来看, 大部分地区增温幅度都表现为冬季升温明显高于其他季节, 年较差呈减小趋势.

2) 21 世纪前期, 变暖预估受排放情景假设或模式敏感性的影响较小, 不同排放情景和不同模式之

间的预估结果一致, 中国大陆增温范围为 0.88 ~ 0.92 ℃, 但从 21 世纪中期以后这种差异逐渐增大, 21 世纪后期增暖范围为 2.44 ~ 4.28 ℃.

3) 中国大陆平均升温值在 20 世纪 50 年代前后达到 2 ℃, 随后, A1B 及 A2 情景下中国大陆气温快速升高, 在 21 世纪 60 年代末达到或超过 3 ℃, 但区域差异明显, 升温值达 2 ℃ 的时间由北至南在不同排放情景下可相差 10 ~ 30 a, 东北、西北地区将成为未来受气温升高影响最为敏感的地区.

IPCC AR4 中采用的气候模式较第 3 次评估报告已经有较大的发展, 但从目前的分析仍可以看到, 不同排放情景、不同模式之间的预估结果仍有较大差异, 特别是对于 21 世纪中、后期的预估结果, 这种差异更加明显. 未来气候变化预估的不确定性问题极其复杂, 主要包括来自模式的不确定性 (如气候模式对云反馈、海洋热吸收、碳循环反馈等过程的描述差别及模式模拟性能导致的不确定性) 以及来自未来温室气体排放情景的不确定性 (如对化石燃料排放、固定源排放、流动源排放等温室气体排放量估算的不确定性以及对与温室气体相关的各种政策影响、未来人口增长、经济增长、技术进步、新型能源开发及管理结构变化等影响估算的不确定性), 由此可见, 预估问题中不确定性的研究仍需要进一步加强. 另外, 由于全球气候模式的空间分辨率还普遍较低, 针对中国区域气候的分析还需要考虑使用各种降尺度方法得到更加详细的区域特征.

致谢: 本研究所使用的全球气候模式气候变化预估数据, 由国家气候中心研究人员对数据进行整理、分析和惠许使用. 原始数据由各模式组提供, PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) 负责搜集归类, 由 WGCM (JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling) 组织下进行, 多模式数据集的维护由美国能源部科学办公室提供资助. 在此一并表示衷心感谢!

参考文献
References

[1] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2007: The physical science basis [M] // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007

[2] 秦大河, 丁一汇, 苏纪兰, 等. 中国气候与环境演变: 上卷: 气候与环境的演变与预测 [M]. 北京: 科学出版

- 社,2005:507-555
QIN Dahe, DING Yihui, SU Jilan, et al. Climate and environment changes in China: Vol. I: Climate and environment changes in China and their projections [M]. Beijing: Science Press, 2005: 507-555
- [3] Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, 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
- [4] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 238-244
ZUO Hongchao, LÜ Shihua, HU Yingqiao. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(2): 238-244
- [5] 邓自旺, 闵锦忠, 张勇. 中国近 50 a 气候变化复杂性分析[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(2): 186-193
DENG Ziwan, MIN Jinzhong, ZHANG Yong. Complexity of climatic change in China in the last 50 years [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(2): 186-193
- [6] 秦大河, 陈振林, 罗勇, 等. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(2): 63-73
QIN Dahe, CHEN Zhenlin, LUO Yong, et al. Updated understanding of climate change sciences [J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(2): 63-73
- [7] IPCC. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability [M] // Contribution of Working Group II to the Fourth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [8] 林而达, 吴绍洪, 戴晓苏, 等. 气候变化影响的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 126-131
LIN Erda, WU Shaohong, DAI Xiaosu, et al. Updated understanding of climate change impacts [J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(3): 126-131
- [9] 熊伟, 林而达, 居辉, 等. 气候变化的影响阈值与中国的粮食安全 [J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 84-87
XIONG Wei, LIN Erda, JU Hui, et al. A study of the threshold of climate change impact on food production in China [J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(2): 84-87
- [10] 熊伟, 居辉, 许吟隆, 等. 气候变化对中国农业温度阈值影响研究及其不确定性分析[J]. 地球科学进展, 2006, 21(1): 70-76
XIONG Wei, JU Hui, XU Yinlong, et al. The threshold of temperature increase due to climate change for Chinese agriculture and its uncertainties [J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(1): 70-76
- [11] 刘奇勇, 郑景云, 葛全胜. IPCC 关于水资源风险的评估综述 [J]. 安徽农业科学, 2008, 26(32): 14267-14270
LIU Qiyong, ZHENG Jingyun, GE Quansheng. IPCC assessment on the risk of water resource [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 26(32): 14267-14270
- [12] Sun Y, Solomon S, Dai A, et al. How often does it rain [J]. Journal of Climate, 2006, 19: 916-934
- [13] 张莉, 丁一汇, 孙颖. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. 大气科学, 2008, 32(2): 261-276
ZHANG Li, DING Yihui, SUN Ying. Evaluation of precipitation simulation in east Asian monsoon areas by coupled ocean-atmosphere general circulation models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 261-276
- [14] 孙颖, 丁一汇. IPCC AR4 气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气象学报, 2008, 66(5): 765-780
SUN Ying, DING Yihui. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(5): 765-780
- [15] 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. 大气科学, 2009, 33(1): 109-120
JIANG Zhihong, CHEN Weilin, SONG Jie, et al. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(1): 109-120
- [16] Jiang D B, Wang H J, Lang X M. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2005, 22(4): 479-495
- [17] Zhou T J, Yu R C. Twentieth-century surface air temperature over China and the global simulated by coupled climate models [J]. Journal of Climate, 2006, 19(22): 5843-5858
- [18] 姜大膀, 张颖, 孙建奇. 中国地区 1~3℃ 变暖的集合预估分析 [J]. 科学通报, 2009, 54(24): 3870-3877
JIANG Dabang, ZHANG Ying, SUN Jianqi. Ensemble projection of 1-3℃ warming in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(24): 3870-3877
- [19] 刘敏, 江志红. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40 a 气候模拟能力的评估 [J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 256-268
LIU Min, JIANG Zhihong. Simulation ability evaluation of surface temperature and precipitation by thirteen IPCC AR4 coupled climate models in China during 1961—2000 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2009, 32(2): 256-268
- [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, WANG Ji. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 Models [J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 787-799
- [21] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果 [J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 776-784

JIANG Dabang, WANG Huijun, LANG Xianmei. Mutimodel ensemble prediction for climate change trend of China under SRES A2 scenario [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 776-784

[22] 许吟隆. 中国 21 世纪气候变化的情景模拟分析 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 323-329

XU Yinlong. Analyses on scenario simulations of the 21st century climate change in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(3): 323-329

[23] 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

XU Ying, DING Yihui, ZHAO Zongci, et al. A scenario of seasonal climate change of the 21st century in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 19-25

[24] 徐影, 丁一汇, 李栋梁. 青藏地区未来百年气候变化 [J]. 高原气象, 2003, 22(5): 451-457

XU Ying, DING Yihui, LI Dongliang. Climatic change over Qinghai and Xizang in 21st century [J]. Plateau Meteorology, 2003, 22(5): 451-457

[25] 殷永元. 全球气候变化对区域持续发展的影响: 研究方法探讨 [J]. 南京气象学院学报, 1999, 22(增刊 1): 465-471

YIN Yongyuan. Impact of global climate change on regional sustainable development: Discussion of research method [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1999, 22(sup1): 465-471

Future surface air temperature changes in China under different greenhouse gas emission scenarios

YAN Guanhua^{1,2} LI Qiaoping³ XING Chao²

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
2 China Meteorological Administration Training Center, Beijing 100081
3 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Based on IPCC AR4 outputs simulated by multi-model for 20th century and future projection under SRES B1, A1B and A2 green emission scenarios, the surface air temperature changes in the 21st century are analyzed. It is revealed that the surface temperature presents different spatial and temporal features over China. Annual mean temperature will rise by 2.5-4.9 °C at the end of the 21st century under 3 Scenarios, and the enhancement magnitude is larger than global mean. In addition, the warming magnitude in winter will be larger than in the other seasons, the annual range of temperature is expected to decrease in the future. The projection results are consistent between the different emission scenarios and models in the first half of the 21st century, with the warming magnitude being 0.88-0.92 °C. However, the projected temperature becomes more sensitive to the scenarios and models since mid of the 21st century. By the end of the 21st century, the temperature will increase by about 2.44-4.28 °C. Relative to 1980—1999, annual mean temperature over China will rise by 2 °C around 2050, then the temperature will increase more quickly under SRES A1B and A2 scenarios and reach or exceed 3 °C at the end of 2060s. The temperature changes differently with regions, and the year of temperature rise above 2 °C in Southern regions will be later for about 10-30 years than that in Northern regions over China. Affected by the rising temperature, Northeast China and Northwest China will be the most sensitive regions in the future.

Key words greenhouse gases emission; surface air temperature; change features