

姜大膀, 富元海. 2012. 2°C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估 [J]. 大气科学, 36 (2): 234–246, doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2011.11074. Jiang Dabang, Fu Yuanhai. 2012. Climate change over China with a 2°C global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 234–246.

2°C 全球变暖背景下中国未来气候变化预估

姜大膀^{1, 2, 3} 富元海³

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

摘 要 相对于工业化革命前期, 全球年平均地表气温上升 2°C 的时间和相应的气候变化受到了广泛关注, 特别是包括欧盟成员国在内的许多国家和国际组织已经将避免 2°C 全球变暖作为温室气体减排的首要目标。为此, 本文作者基于 16 个气候模式在 20 世纪气候模拟试验和 SRES B1、A1B 和 A2 温室气体和气溶胶排放情景下的数值模拟试验结果, 采用多模式集合方法预估研究了 2°C 全球变暖发生的时间、对应的大气中主要温室气体浓度以及中国气候变化情况。根据模式集合平均结果, 三种排放情景下 2°C 全球变暖分别发生在 2064 年、2046 年和 2049 年, 大气二氧化碳当量浓度分别为 625 ppm、645 ppm 和 669 ppm (1 ppm = 10⁻⁶)。对应着 2°C 全球变暖, 中国气候变暖幅度明显更大。从空间分布形势上看, 变暖从南向北加强, 在青藏高原地区存在一个升温大值区; 就整体而言, 中国区域平均的年平均地表气温上升 2.7~2.9°C, 冬季升温幅度 (3.1~3.2°C) 要较其他季节更大。年平均降水量在华南大部分地区减少 0~5%, 而在其余地区增加 0~20%, 中国区域年平均降水增加 3.4%~4.4%, 各季节增加量在 0.5%~6.6% 之间。

关键词 2°C 全球变暖 时间 二氧化碳当量浓度 中国气候 预估

文章编号 1006–9895 (2012) 02–0234–13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006–9895.2011.11074

Climate Change over China with a 2°C Global Warming

JIANG Dabang^{1, 2, 3} and FU Yuanhai³

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Key Laboratory of Regional Climate–Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Timing and climate change with a 2°C global warming, with reference to the pre-industrial period, have been paid more attention to worldwide. In particular, many countries, including the member states of the European Union, and international organizations have set the greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. In this study, two sets of simulations performed with 16 atmospheric–ocean general circulation models, i. e., the model outputs from the 20th Century Climate in Coupled Models (20C3M) and from the Special Report on Emission Scenarios (SRES) emission scenarios B1, A1B, and A2, are used to analyze the timing, atmospheric concentra-

收稿日期 2011–04–13, 2011–06–27 收修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY200906020, 国家重点基础研究发展计划项目课题 2009CB421407, 国家自然科学基金面上项目 40975050

作者简介 姜大膀, 男, 1974 年出生, 研究员, 主要从事古气候模拟和气候动力学研究。E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

tion of greenhouse gases, and climate change over China with a 2°C global warming. Based on the multi-model ensemble mean, a 2°C global warming is expected to occur in 2064, 2046, and 2049, with equivalent atmospheric CO₂ concentrations of 625 ppm, 645 ppm, and 669 ppm, under the SRES B1, A1B, and A2, respectively. At that time, warming is stronger overall in China. Where the spatial pattern is concerned, warming is stronger towards the north and on the Qinghai-Tibetan Plateau. At the national scale, annual mean surface air temperature is elevated by 2.7–2.9°C, and the winter temperature is elevated by 3.1–3.2°C, which is the strongest among the seasons. Annual mean precipitation is reduced by 0–5% in most parts of South China, but increased by 0–20% in the rest of the country. Annual (seasonal) mean precipitation is increased on average by 3.4%–4.4% (0.5%–6.6%) over China.

Key words 2°C global warming, timing, equivalent CO₂ concentration, climate over China, projection

1 引言

随着大气中温室气体浓度的持续增加和土地利用变化,气候系统正在经历一次以变暖为主要特征的显著变化,其中 1906~2005 年全球地表气温上升了 $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ (Trenberth et al., 2007)。与此同时,气候变暖已经而且正在导致海平面上升、水圈循环变化、海洋酸化、极端天气和气候事件频率和(或者)强度增加等一系列的气候和环境变化,尤其体现在对气候变化较为敏感和脆弱的地区 (Schneider et al., 2007; Gleick et al., 2010)。全球范围内经济和社会可持续性发展与气候变化和与之紧密相连的环境恶化、生态退化、生物多样性减少、淡水资源、食物供给等问题的矛盾日益突出,气候变化及其预估研究已成为地学领域的前沿课题。

中国地域辽阔,受地理位置和区域内独特地形和地貌因素的共同影响,气候条件时空差异大,总体上可以划分为东部湿润区、中部的半湿润和半干旱区、西部干旱区。由于人均耕地面积少、自然生态环境恶劣、经济基础相对薄弱,加之作为主要产业的农业易受气候变化的影响,中国相当一部分地区是气候变化的敏感和脆弱区域。20 世纪后期以来,随着全球变暖加剧,中国气候在变暖过程中也同步发生了许多变化 (秦大河, 2003),天气和气候类灾害对社会和人民生产生活的影响日益加深,给国民经济带来了严重的损失 (张人禾, 2005; 张海东等, 2006)。特别是近几年以来,中国重大气象灾害频发,例如:2008 年初南方地区严重的低温雨雪冰冻灾害,2009 年初北方干旱,2010 年初西南大旱、5 月份之后华南大部分地区多次持续强降水过程。

有关气候变化的关键脆弱性、影响、风险性和

适应性综合评估研究表明,人类活动所引发的气候变暖已经对全球气候、环境和生态系统产生了明显影响,并将继续造成长远而巨大的影响,特别是对经济发展和社会保障水平相对落后的国家 (Schneider et al., 2007),这其中就包括中国 (Zeng et al., 2008)。为有效减缓和应对气候变暖趋势、控制温室气体排放,包括欧盟成员国在内的一百多个国家和众多国际组织已经将避免 2°C 全球变暖(相对于工业化革命前期)作为温室气体减排的目标 (Meinshausen et al., 2009),并认为一旦达到此升温阈值,气候变化将会对包括极端天气和气候事件、冰川、人体健康、粮食产量、海平面、海洋和陆地生态系统在内的多个方面产生深刻的影响 (Schneider et al., 2007),尤其是许多陆地、淡水和海洋物种相对于新近地质时期将会面临非常大的灭绝危险 (Fischlin et al., 2007)。与此相对应,避免 2°C 全球变暖已经成为国际社会有关气候变化讨论和谈判、温室气体减排、碳排放权等议题或者争论的核心内容 (Ding et al., 2009; Meinshausen et al., 2009; Gleick et al., 2010),2°C 全球变暖背景下的区域气候变化问题也开始得到特别重视 (Kaplan and New, 2006; Giannakopoulos et al., 2009)。然而,我们至今还不知道 2°C 全球变暖对于中国气候究竟意味着什么。

近些年来,中国学者在气候变化归因和预估研究领域已经开展了一些工作,其中主要包括使用观测资料分析气候变化事实 (Qian and Zhu, 2001; 赵宗慈等, 2005; Wang and Sun, 2009; Dong et al., 2010; Zhao et al., 2010)、通过数值试验就气候变化成因进行检测 (Ding et al., 2007; Gao et al., 2007; 周天军等, 2008) 并对未来气候进行预估 (Wang et al., 1993; Xu et al., 2006; Yu et al., 2008; Liu et al., 2010; Gao et al., 2011; 马洁华

等, 2011)、利用国际耦合模式比较计划 (简称 CMIP) 资料集对中国气候进行集合预估 (Chen and Sun, 2009; 江志红等, 2009; Xu et al., 2009; Lu and Fu, 2010; Sun and Ding, 2010; Sun et al., 2010), 以及有关气候变化影响和脆弱性的初步研究 (Wu et al., 2007; Yao et al., 2007; Jiang, 2008; Tao et al., 2009), 然而, 至今尚未有工作触及到 2℃ 全球变暖发生背景下中国区域的气候变化问题。根据政府间气候变化专门委员会 (简称 IPCC) 最新的预估结果, 人类活动所引发的全球变暖将会持续, 2090~2099 年全球年均地表气温相对于 1980~1999 年将会继续上升 1.1~6.4℃ (Meehl et al., 2007)。在此背景下, 中国科研人员亟待从气候预估、气候变化的经济和社会影响以及关键脆弱性和风险性研究领域开展工作, 以便为国家制定有关气候变化问题的战略决策和国际谈判策略提供基础科学数据。

鉴于以上认识, 本文使用参与 IPCC 第 4 次评估报告的多个气候模式的数值试验结果, 综合研究了在现有的科学认知水平下, 在 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 低、中等、高排放情景下 (Nakicenovic et al., 2000) 2℃ 全球变暖最

有可能在什么时间发生, 大气中主要温室气体的浓度届时会是多少, 特别关注的是与之相对应的中国气候将会如何变化。

2 模式资料和分析方法

在 CMIP 第三阶段 (简称 CMIP3) 中, 共有二十多个全球大气与海洋环流耦合模式对未来气候进行了数值模拟试验。根据 CMIP3 资料集中 20 世纪气候模拟试验 (简称 20C3M) 和 SRES 低 (B1)、中等 (A1B)、高 (A2) 温室气体和气溶胶排放情景下模式资料的可用性和完整性, 16 个气候模式的结果被用于本项研究工作。有关模式及其数值模拟试验的基本信息见表 1, 具体的相关细节请参阅 http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php [2011-06-02]。

考虑到在相同或者相似的温室气体和气溶胶浓度强迫条件下, 不同气候模式所得到的结果之间存在着差异, 而且现阶段还没有办法来科学衡量各个模式预估结果的优劣性, 特别是在区域尺度上。因此, 本文重点分析了 16 个模式在等权重系数条件下的集合平均结果, 各单个模式的结果则被用来研究预估结果的不确定性。需要指出的是, 上述研究

表 1 CMIP3 中 16 个全球大气与海洋环流耦合模式及其数值模拟试验的基本信息
Table 1 Basic information on the 16 atmosphere-ocean general circulation models in the CMIP3 (phase 3 of the Coupled Model Intercomparison Project) and their numerical experiments

模式	所属国家	大气资料水平分辨率 (纬向-经向格点数)	积分时段	20C3M 和各排放情景下数值试验个数			
				20C3M	B1	A1B	A2
1 BCCR-BCM2.0	挪威	128 × 64	1850~2099 年	1	1	1	1
2 CCSM3	美国	256 × 128	1870~2099 年	7	9	7	4
3 CGCM3.1(T47)	加拿大	96 × 48	1850~2100 年	5	5	5	5
4 CNRM-CM3	法国	128 × 64	1860~2100 年	1	1	1	1
5 CSIRO-Mk3.0	澳大利亚	192 × 96	1871~2100 年	2	1	1	1
6 CSIRO-Mk3.5	澳大利亚	192 × 96	1871~2100 年	3	1	1	1
7 ECHAM5/MPI-OM	德国	192 × 96	1860~2100 年	4	3	4	3
8 GFDL-CM2.0	美国	144 × 90	1861~2100 年	3	1	1	1
9 GFDL-CM2.1	美国	144 × 90	1861~2100 年	3	1	1	1
10 GISS-ER	美国	72 × 46	1880~2100 年	9	1	5	1
11 INM-CM3.0	俄罗斯	72 × 45	1871~2200 年	1	1	1	1
12 IPSL-CM4	法国	96 × 72	1860~2100 年	1	1	1	1
13 MIROC3.2(medres)	日本	128 × 64	1850~2100 年	3	3	3	3
14 MRI-CGCM2.3.2	日本	128 × 64	1851~2100 年	5	5	5	5
15 PCM	美国	128 × 64	1890~2099 年	4	3	3	4
16 UKMO-HadCM3	英国	96 × 73	1860~2099 年	2	1	1	1

方法在气候变化预估领域已经得到广泛接受和使用 (Meehl et al., 2007), 其合理性也已得到解释 (Annan and Hargreaves, 2010), 有关模式效能的评估工作业已表明, 多模式集合结果对于现代东亚气候总体上要较单个模式具有更为可靠的模拟能力 (Jiang et al., 2005; Zhou and Yu, 2006; 许崇海等, 2007), 而且, 相关研究显示这 16 个模式能够合理模拟出中国区域年均地表气温的主要空间分布特征。1990~1999 年 20C3M 中各模式结果与观测资料之间的相关系数均在 0.95 (41 个计算格点) 以上, 且多模式集合结果总体上表现出了更优的模拟能力 (Jiang et al., 2009), 这也进一步支持了本文采用多模式集合的研究方法。在下文中, 除特别说明以外, 模式集合结果均指 16 个模式结果的集合平均。

就气候变化预估而言, 在作为参照物的模式基准气候的选择上还存在着不同的做法, 例如采用工业化革命前期或者 20 世纪之前某一年的气候、1961~1990 年气候态、1990~2000 年气候态。鉴于备受关注的 2°C 全球变暖是相对于工业化革命前期气候而言的, 基准气候时段不应该受到 20 世纪全球变暖的影响; 同时考虑到在 20C3M 框架下模式的数值试验均始于 19 世纪后半段, 兼顾各模式积分时段选取的统一性问题 (表 1), 文中最终将基准气候选定为 1890~1900 年共 11 年的气候平均态, 这与国际上有关主要研究工作的处理方法或者推荐的处理方法是一致的 (Schneider et al., 2007)。顺便说明, 如果选择 1990~2000 年作为基准时段, 则应该对应着预估研究 1.4°C 全球变暖问题, 因为该时段全球地表气温较工业化革命前期的最优估计是变暖了 0.6°C (Schneider et al., 2007)。

由于各模式之间在试验个数上存在着不同 (表 1), 我们首先将各情景下同一模式的多个数值试验结果进行等权重平均, 从而得到模式自身的一套集合平均试验资料。而后, 将不同水平分辨率的模式资料全部统一插值到了 T42 高斯格点上 (纬向—经向格点数为 128×64 , 分辨率约为 2.8°)。为了更加客观地反映 2°C 全球变暖发生的时间及与之相对应的中国气候状况, 同时兼顾三种排放情景下模式资料的公共时段为 2004~2099 年, 在研究过程中将 2014~2095 年各模式及其集合平均资料进行了 9 年滑动平均处理, 其目的在于有效消除模式资料

中年际尺度上短期气候变率的影响, 从而获得全球年均地表气温在相对稳定变化情况下的演化趋势。

3 结果分析

3.1 2°C 全球变暖发生时间

根据 20C3M 试验, 19 世纪后半段全球年均地表气温只表现出一定幅度的年际变率, 而后则为明显的升温趋势, 特别是从 20 世纪后期以来 (图 1; 其中右侧 5 组数据依次为: 2°C 全球变暖发生的年份, 与之相对应的大气二氧化碳 (CO_2) 浓度 (单位: ppm, $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$), 甲烷 (CH_4) 浓度 (单位: ppb, $1 \text{ ppb} = 10^{-9}$), 氧化亚氮 (N_2O) 浓度 (单位: ppb), CO_2 当量浓度 (单位: ppm), 后者由大气 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、三氯氟甲烷、二氯二氟甲烷浓度换算得到), 这与观测资料的结果大体一致 (Trenberth et al., 2007)。随着三种排放情景下大气中温室气体浓度的持续增加, 全球变暖将会进一步加强。在 B1 低排放情景下, 12 个模式结果显示本世纪会发生 2°C 全球变暖, 时间集中在 2041 年 (CNRM-CM3) 至 2068 年 (MRI-CGCM2.3.2); 与此不同, BCCR-BCM2.0、CSIRO-Mk3.0、GISS-ER 和 PCM 四个模式中全球年均地表气温尽管也持续上升, 但在本世纪并未达到 2°C 升温水平; 针对模式集合结果而言, 2°C 变暖发生在 2064 年 (图 1)。

不同于 B1 情景, A1B 中等排放情景下所有模式结果中均出现了 2°C 全球变暖, 发生时间从 2032 年 [CGCM3.1(T47) 和 INM-CM3.0] 变化至 2079 年 (CSIRO-Mk2.0), 模式集合结果中为 2046 年。A2 为高排放情景, 但由于在本世纪前半段它与 A1B 情景之间在温室气体排放总量上相差并不大, 且 2020 年之前 A1B 情景下排放的总量相对还要更多一些 (Nakicenovic et al., 2000), 因此在 A2 情景下各模式中 2°C 全球变暖的发生时间与 A1B 大体一致, 集中在 2033 年 (CGCM3.1(T47)) 至 2065 年 (CSIRO-Mk3.0), 模式集合结果为 2049 年。

3.2 2°C 全球变暖时主要温室气体浓度

为避免 2°C 全球变暖, 有关温室气体减排和排放量上限的争论与研究以及随之而来的碳排放量配额等问题日益受到关注 (Schneider and Mastrandrea, 2005; Fisher et al., 2007; Ding et al., 2009; Meinshausen et al., 2009)。其中, 450 ppm CO_2 当

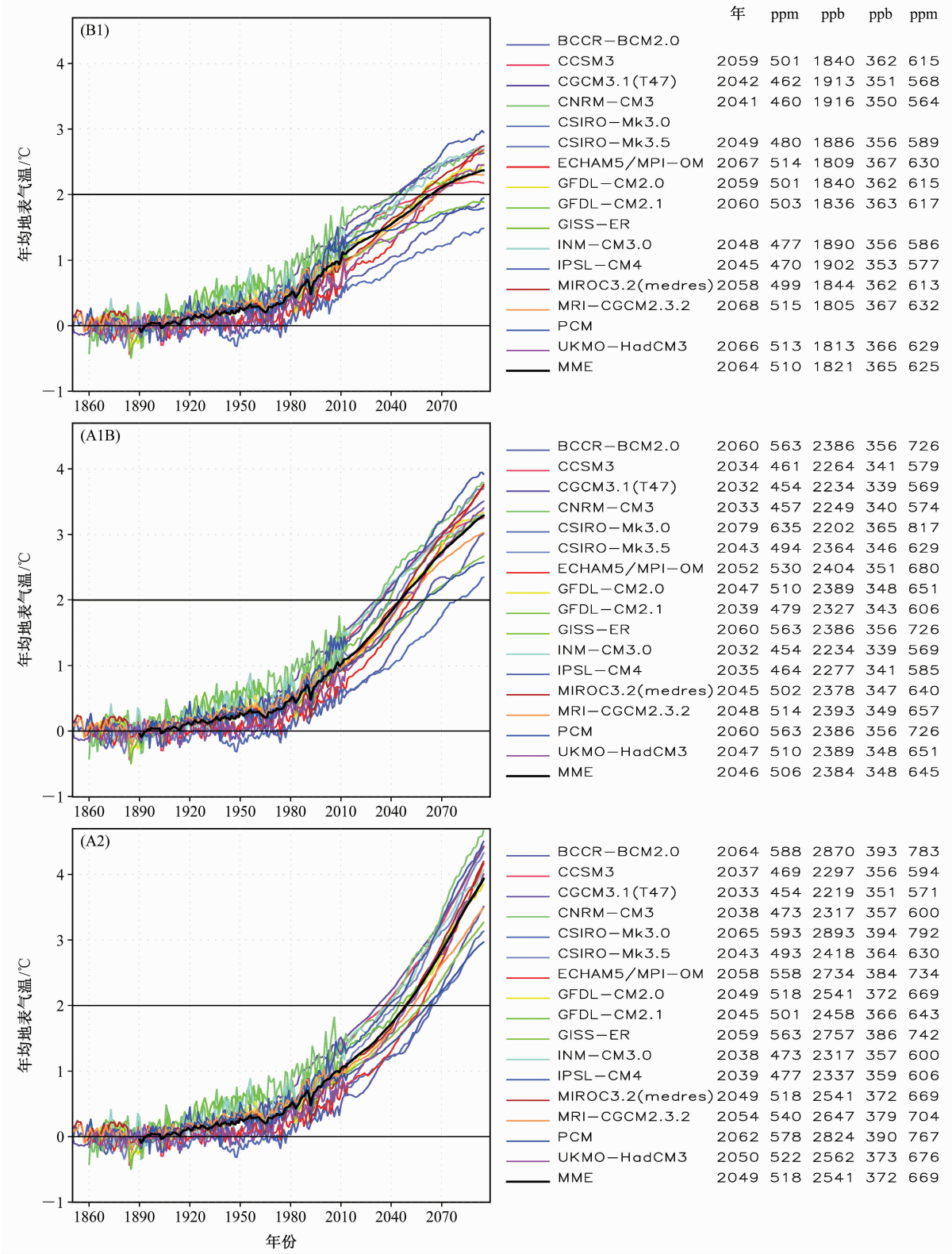


图 1 在三种排放情景下, 相对于各自 1890~1900 年基准气候, 16 个模式及其集合平均 (MME) 结果中全球年均地表气温变化 (2014~2095 年结果进行了 9 年滑动平均处理, 2000 年之前均为 20C3M 试验结果)。

Fig. 1 Global mean temperature change, with reference to the baseline climatology during 1890–1900, as derived from the 16 models and their ensemble mean under the SRES B1, A1B, and A2

量多被研究认为是避免 2℃ 全球变暖的关键值 (Ding et al., 2010)。与这方面工作不同, 本文不研究多少 CO₂ 当量能够避免 2℃ 全球变暖, 而是根据现有模式的气候变化预估结果、用于驱动模式的温室气体浓度资料 (Nakicenovic et al., 2000), 分别给出在三种排放情景下, 当 2℃ 全球变暖发生时, 所对应的大气 CO₂、CH₄、N₂O 浓度分别是多少, 综合上述三种气体和三氯氟甲烷、二氯二氟甲烷之后得到的 CO₂ 当量是多少 (Ramaswamy et al., 2001)。这些信息可为中国在气候变暖阈值和温室气体减排领域的研究工作提供一定的参考。

从模式集合结果中 (图 1) 可见, 在 2℃ 全球变暖发生时, 大气 CO₂、CH₄、N₂O、CO₂ 当量浓度在 B1 情景下分别为 510 ppm、1821 ppb、365 ppb、625 ppm, A1B 情景下为 506 ppm、2384 ppb、348 ppb、645 ppm, A2 情景下为 518 ppm、2541 ppb、372 ppb、669 ppm。由此可以看到, 尽管 B1 与 A1B、A2 情景在 2℃ 全球变暖的发生时间上分别相差了 18 年和 15 年, 但 2℃ 全球变暖时大气中主要温室气体浓度在各情景之间的差别并不大 (CH₄ 和 N₂O 浓度为十亿分之一, 所以百位上数值的变化也是非常小的量), 其中 CO₂ 当量的变幅在 44 ppm 以内。这意味着在三种排放情景下, 625~669 ppm 大气 CO₂ 当量浓度可能是 2℃ 全球变暖发生的关键值区间。另一方面, 2℃ 全球变暖时各情景下温室气体浓度和 CO₂ 当量在模式间存在着较大差异, 这说明在有关温室气体浓度阈值和相应的减排提案中, 模式依赖的不确定性客观存在, 需要加以重视。其中, 模式间在气溶胶方案方面存在着很大的不同, 气溶胶的气候效应在何种程度上会影响到 CO₂ 当量尚待确定。

3.3 2℃ 全球变暖背景下中国气候预估

为了综合评估 2℃ 全球变暖时中国气候变化状况, 我们首先依据各排放情景下 16 个模式及其集合结果中 2℃ 全球变暖发生的年份, 分别计算出该年与其前后 4 年共 9 年的气候平均态, 而后通过与其各自相对应的 1890~1900 年基准气候态的对比来得到二者之间各气候变量的差别。

3.3.1 地表气温

由图 2 所示的模式集合结果可见, 尽管三种排放情景下 2℃ 全球变暖发生的时间存在不同, 但 2℃ 全球变暖背景下中国年均地表气温变化的空间

分布却在各排放情景之间表现出了一致性。与 2℃ 全球变暖相对应, 中国气候变暖的幅度要更大, 三种排放情景下年均地表气温均上升 2.0~3.7℃。在大的空间尺度上, 变暖主要表现为从南向北加强、在青藏高原地区存在一个约 3.0℃ 以上的升温大值区, 这与先前预估研究中所示的地表气温在北方和青藏高原地区上升速度相对更快是一致的 (姜

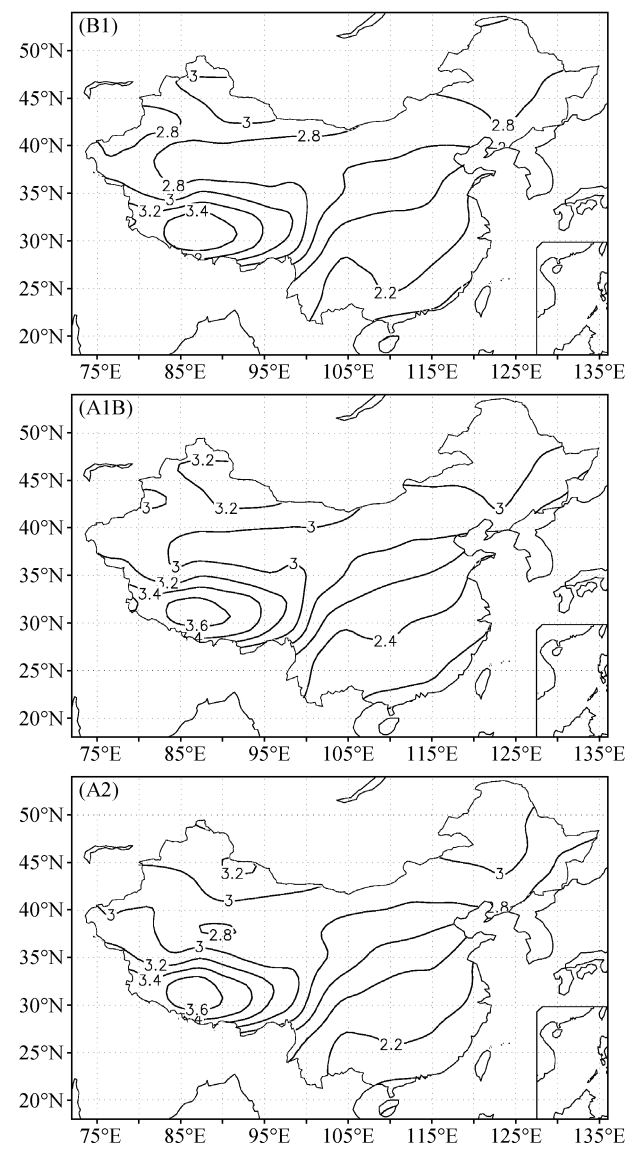


图 2 相对于 1890~1900 年基准气候, 在三种排放情景下根据 16 个模式集合结果得到的 2℃ 全球变暖时中国年均地表气温变化 (单位: °C)
Fig. 2 Annual mean surface air temperature change over China with a 2℃ global warming, with reference to the baseline climatology during 1890 - 1900, as derived from the 16-model ensemble mean under the SRES B1, A1B, and A2 (units: °C)

大膀等, 2004; Jiang et al., 2009), 它通常被认为与冰雪反照率反馈有关 (Giorgi et al., 1997)。考虑到 20 世纪后半段中国地表气温变化也表现出了类似的空间分布特征 (王遵娅等, 2004), 这就意味着以上两个地区极有可能是中国气候变暖的最敏感区域。

就区域的整体变化而言, 中国年均地表气温的升幅均要比同期 2℃ 全球变暖更大 (表 2), 这与 20 世纪及其后半段中国变暖幅度要高于全球平均的观测结果具有一致性 (Ding et al., 2007)。在 B1 情景下, 模式集合结果中中国变暖 2.7℃, 在达到 2℃ 全球变暖水平的 12 个模式中其升幅也均超过了 2℃, 从 2.3℃ (UKMO-HadCM3) 到 2.9℃ (INM-CM3.0) 不等。对应着 2℃ 全球变暖, 在模式集合结果中, A1B 和 A2 情景下中国变暖分别为 2.9℃ 和 2.8℃, 略高于 B1 情景下的值, 而且, 两种情景下各个模式中中国变暖的幅度也都大于 2℃, 分布在 2.3℃ (BCCR-BCM2.0 和 PCM) 至 3.1℃ (INM-CM3.0) 和 2.2℃ (BCCR-BCM2.0 和 MRI-

CGCM2.3.2) 至 3.1℃ (INM-CM3.0) 范围内。这说明尽管三种排放情景在 2℃ 全球变暖的发生时间上存在着不同, 但 2℃ 全球变暖时中国变暖的幅度在彼此之间却有着很好的一致性。

在季节尺度上, 2℃ 全球变暖时中国地表气温变化无论是在空间分布上、还是在幅度上均与其年均变化相似 (图略)。在空间分布上, 各季节地表气温在青藏高原和北方地区升温较大, 平均在 2.5℃ 以上, 而在南方地区要小一些, 升高 1.8~2.5℃。就幅度而言, 各季节变暖约在 1.8~4.0℃ 之间; 另外, 冬季的升温水平明显要高于其它三个季节, 这一点与过去百年的观测结果相一致 (Ding et al., 2007)。根据模式集合结果, 在 B1、A1B、A2 情景下, 2℃ 全球变暖时中国区域平均的各季节地表气温变化差别不大, 分别上升了 2.5~3.1℃、2.7~3.2℃、2.6~3.1℃, 其中冬季变暖幅度最大, 三种情景下分别为 3.1℃、3.2℃、3.1℃ (表 2)。进一步的对比分析发现, 尽管各季节中国变暖的幅

表 2 相对于各自 1890~1900 年基准气候, 16 个模式及其集合结果中 2℃ 全球变暖发生时中国区域平均的地表气温变化 (单位: ℃)

Table 2 Regionally-averaged surface air temperature change over China with a 2℃ global warming, with reference to the baseline climatology during 1890 - 1900, as derived from the 16 models and their ensemble mean (units: ℃)

模式	B1 低排放情景					A1B 中等排放情景					A2 高排放情景				
	年均	春季	夏季	秋季	冬季	年均	春季	夏季	秋季	冬季	年均	春季	夏季	秋季	冬季
BCCR-BCM2.0	/	/	/	/	/	2.3	2.6	2.2	1.8	2.7	2.2	2.2	2.1	2.1	2.4
CCSM3	2.6	2.4	2.5	2.6	2.8	2.6	2.5	2.6	2.5	2.8	2.5	2.3	2.6	2.6	2.6
CGCM3.1(T47)	2.5	2.2	2.5	2.3	3.1	2.5	2.1	2.5	2.4	2.9	2.4	2.2	2.5	2.3	2.7
CNRM-CM3	2.4	2.6	2.4	2.0	2.7	2.4	2.7	2.5	2.0	2.4	2.5	2.8	2.6	1.8	2.8
CSIRO-Mk3.0	/	/	/	/	/	2.7	2.6	2.6	2.5	3.0	2.6	2.4	2.6	2.7	2.7
CSIRO-Mk3.5	2.4	1.9	2.4	2.6	2.8	2.5	2.3	2.4	2.4	2.7	2.3	2.1	2.4	2.2	2.6
ECHAM5/MPI-OM	2.8	2.6	2.5	2.7	3.4	3.0	2.7	2.6	2.9	3.7	2.8	2.6	2.6	2.9	3.2
GFDL-CM2.0	2.8	2.5	2.3	2.7	3.9	3.0	2.7	2.8	3.1	3.5	2.5	2.3	2.5	2.5	2.8
GFDL-CM2.1	2.7	2.4	2.2	2.9	3.2	2.6	2.1	2.6	2.6	3.3	2.4	2.1	2.3	2.3	3.0
GISS-ER	/	/	/	/	/	2.5	2.4	2.2	2.5	3.0	2.7	2.5	2.4	2.7	3.2
INM-CM3.0	2.9	3.2	2.5	2.7	3.4	3.1	3.2	2.6	2.9	3.8	3.1	3.3	2.4	3.0	3.7
IPSL-CM4	2.7	3.0	2.5	2.8	2.5	2.6	2.7	2.3	2.7	2.9	2.6	3.3	2.4	2.6	2.0
MIROC3.2(medres)	2.8	2.7	2.7	3.0	3.0	2.9	3.0	2.7	3.0	3.0	3.0	3.2	2.6	2.9	3.2
MRI-CGCM2.3.2	2.5	2.3	2.2	2.5	2.8	2.5	2.3	2.3	2.6	2.7	2.2	2.0	2.1	2.3	2.5
PCM	/	/	/	/	/	2.3	1.9	2.2	2.3	2.9	2.3	2.1	2.1	2.2	2.8
UKMO-HadCM3	2.3	2.3	2.4	2.4	2.1	2.5	2.4	2.7	2.5	2.4	2.3	2.3	2.3	2.0	2.7
集合平均	2.7	2.6	2.5	2.6	3.1	2.9	2.8	2.7	2.8	3.2	2.8	2.7	2.6	2.7	3.1

注: “/” 表示相应模式未达到 2℃ 全球变暖水平; 春季为 3~5 月平均、夏季为 6~8 月平均、秋季为 9~11 月平均、冬季为 12 月至下一年 2 月平均 (下同)。

度在各模式中不同,但它主要分布在模式集合结果附近;而且,在所有的模式中冬季变暖几乎都是最强的。

3.3.2 最高和最低地表气温

作为表征地表气温变幅的两个变量,最高和最低地表气温变化因为与热浪和暖夜等极端天气和气候事件、生物适应性问题紧密相关而日益受到关注。在 CMIP3 资料集中,仅有 BCCR-BCM2.0、CCSM3、CSIRO-Mk3.0、CSIRO-Mk3.5、INM-CM3.0、MIROC3.2 (medres) 这 6 个模式提供了以上两个变量的月平均资料。根据这些模式结果,2℃全球变暖时中国区域年和季节平均最高、最低地表气温也明显上升,空间分布和幅度均与地表气温的变化相仿(图略),在北方和青藏高原地区的上升幅度相对而言也都是最大的。在 B1 情景下,除了 BCCR-BCM2.0 和 CSIRO-Mk3.0 未出现 2℃全球变暖的两个模式以外,其余 4 个模式集合结果中年均最高和最低地表气温分别上升了约 2.2~4.0℃和 1.7~4.3℃。在 6 个模式集合结果中,A1B 和 A2 情景下两个变量的变化幅度大体相同,分别为 2.2~3.8℃和 1.8~4.3℃。在季节尺度上,最高和最低地表气温变化在空间分布上与年平均情况相似,但变幅相对而言要更大一些。另外需要指

出的是,对应着 2℃全球变暖,最高和最低地表气温变化尽管在空间分布和幅度上有很好的相似性,但二者并不完全相同。三种排放情景下的共同变化特征是在青藏高原中部(30°N~35°N, 83°E~91°E)年均最低地表气温的升幅要高于最高地表气温的变化值(相差 0.0~0.6℃),而在华南大部分地区(22°N~35°N, 100°E~122°E)的情形则与此相反(相差 0.0~0.5℃)(图略)。因此,地表气温的变幅在前一个地区会减小,而在后一个地区会增大。

3.3.3 降水

根据模式集合结果,2℃全球变暖时中国降水变化的空间分布和幅度在三种排放情景之间具有一致性(图 3)。从空间分布上看,年均降水在约 30°N 以南的华南大部分地区减少 0~5%,而在其余地区增加 0~20%。其中,东北、内蒙古和约 100°E 以西的大部分地区年均降水的增幅在 6%以上,特别是在新疆的中东部地区,其增加量达到 10%~20%。就区域平均而言(表 3),在 B1 情景下,模式集合结果中中国年均降水增加 4.4%(0.10 mm/d),在 12 个达到 2℃全球变暖水平的模式中,CNRM-CM3(-3.2%)、GFDL-CM2.1(-1.2%)和 IPSL-CM4(-0.9%)中降水减少,而在其余 9 个模式中降水

表 3 同表 2,但为中国区域平均降水的百分比变化
Table 3 Same as Table 2, but for percentage change in regionally-averaged precipitation over China

模式	B1 低排放情景					A1B 中等排放情景					A2 高排放情景				
	年均	春季	夏季	秋季	冬季	年均	春季	夏季	秋季	冬季	年均	春季	夏季	秋季	冬季
BCCR-BCM2.0	/	/	/	/	/	4.0%	8.1%	4.0%	-0.4%	3.4%	5.1%	9.7%	2.3%	-0.6%	19.8%
CCSM3	7.4%	6.9%	8.1%	6.9%	6.3%	5.9%	4.1%	5.8%	9.2%	4.5%	6.0%	3.6%	6.6%	8.4%	3.9%
CGCM3.1(T47)	11.2%	14.9%	9.6%	8.3%	17.4%	10.9%	15.1%	9.2%	7.9%	14.0%	10.6%	13.8%	8.9%	9.3%	13.8%
CNRM-CM3	-3.2%	-3.1%	-0.6%	-1.9%	-16.1%	-5.5%	-10.2%	0.0%	-10.1%	-6.6%	-2.9%	-2.1%	0.5%	-6.3%	-13.0%
CSIRO-Mk3.0	/	/	/	/	/	2.2%	3.3%	1.6%	5.1%	0.5%	-0.5%	-1.0%	-0.3%	1.4%	-6.7%
CSIRO-Mk3.5	1.3%	7.5%	1.3%	-7.9%	3.1%	5.8%	12.6%	3.9%	2.4%	10.4%	3.6%	10.9%	0.4%	3.5%	-0.8%
ECHAM5/MPI-OM	1.7%	6.1%	-2.0%	0.3%	7.4%	1.2%	4.2%	-0.9%	0.3%	1.3%	1.9%	6.8%	-2.6%	0.2%	7.0%
GFDL-CM2.0	4.5%	10.8%	5.0%	-4.4%	2.7%	4.8%	9.3%	8.7%	-6.4%	-2.5%	0.0%	2.2%	1.1%	-2.5%	-7.2%
GFDL-CM2.1	-1.2%	2.7%	-4.1%	-0.5%	4.9%	-6.8%	-3.0%	-6.0%	-18.3%	-2.5%	-4.7%	-5.0%	-5.0%	-8.2%	4.7%
GISS-ER	/	/	/	/	/	8.5%	10.4%	8.7%	3.9%	9.6%	7.4%	10.9%	5.8%	5.9%	3.3%
INM-CM3.0	5.0%	10.7%	6.2%	-8.2%	6.1%	2.0%	9.5%	5.9%	-15.9%	-0.2%	3.5%	10.2%	5.1%	-8.0%	-1.0%
IPSL-CM4	-0.9%	1.9%	1.8%	-8.2%	-0.8%	-0.8%	1.5%	2.9%	-6.6%	-4.1%	-1.8%	1.6%	2.3%	-12.3%	-2.6%
MIROC3.2(medres)	3.8%	7.4%	-0.4%	5.0%	10.7%	5.5%	9.3%	2.2%	6.0%	8.7%	2.5%	6.1%	-2.0%	5.2%	7.9%
MRI-CGCM2.3.2	5.3%	9.6%	2.3%	6.4%	2.7%	3.5%	6.8%	2.2%	-1.4%	5.9%	1.1%	3.4%	0.6%	-0.2%	-0.2%
PCM	/	/	/	/	/	7.1%	9.3%	6.8%	0.3%	11.8%	6.4%	8.4%	6.8%	-0.7%	10.8%
UKMO-HadCM3	8.2%	10.0%	3.7%	10.9%	23.9%	5.5%	2.5%	2.0%	14.9%	12.5%	4.7%	7.5%	-0.7%	5.8%	20.3%
集合平均	4.4%	6.6%	3.7%	1.8%	6.0%	4.0%	6.1%	3.8%	1.1%	5.2%	3.4%	5.4%	3.0%	0.5%	5.3%

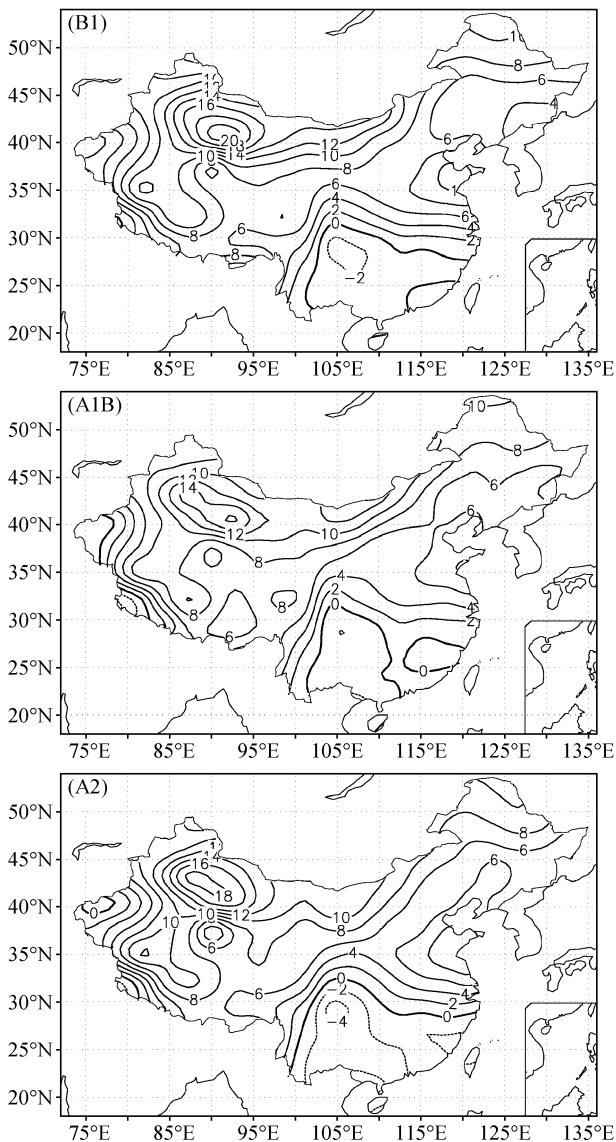


图3 相对于1890~1900年基准气候,在B1、A1B、A2排放情景下根据16个模式集合结果得到的2℃全球变暖时中国年均降水的百分比变化(单位:%)

Fig. 3 Change in annual precipitation over China with a 2℃ global warming, with reference to the baseline climatology during 1890–1900, as derived from the 16-model ensemble mean under the SRES B1, A1B, and A2 (units: %)

增加,总体变化范围是-3.2% (CNRM-CM3)至11.2% (CGCM3.1 (T47))。在A1B情景下,区域平均的年降水量在模式集合结果中增加了4.0% (0.09 mm/d); CNRM-CM3、GFDL-CM2.1和IPSL-CM4中分别减少了5.5%、6.8%和0.8%,而在其余13个模式中则增加了1.2% (ECHAM5/MIP-OM)至10.9% (CGCM3.1 (T47))不等。在

A2情景下,模式集合结果中降水增加3.4% (0.08 mm/d);其中,CSIRO-Mk3.0 (-0.5%)、IPSL-CM4 (-1.8%)、CNRM-CM3 (-2.9%)和GFDL-CM2.1 (-4.7%)中降水减少,而在另外12个模式中中国区域平均的年降水量增加,从GFDL-CM2.0的0.0% (因为四舍五入而未显示出数值)变化至CGCM3.1 (T47)的10.6%。由此可见,尽管各个模式结果之间还存在着差异,但是大多数模式结果中中国区域平均的年降水量均表现为增加,模式集合结果中的增加量为3.4%~4.4%。

在季节尺度上,各排放情景下降水变化与其年平均变化情况相仿,主要是在华南大部分地区减少,而在其余地区增加;另一方面,各季节内降水的百分比变化幅度相对于年平均而言要更大一些。根据模式集合结果(表3),三种排放情景下中国区域平均降水在四个季节都增加,而且增幅均在春季最大(5.4%~6.6%)、冬季次之(5.2%~6.0%)、而后为夏季(3.0%~3.8%)、秋季相对最小(0.5%~1.8%)。在三种排放情景下,各模式模拟到的季节降水变化无论是在空间分布上、还是在量值上都与模式集合结果有所差别,主要表现在降水变化的空间分布多样化、幅度更大,但大多数模式中季节降水变化都以增加趋势为主,变化幅度在模式间也没有很大的差别,多集中在-10%至10%之间。

3.4 2℃全球变暖背景下中国未来气候变化预估的不确定性分析

气候模式间在动力框架、物理—化学—生物过程、参数化方案、时空分辨率等方面存在着不同程度的差异,这使得同一排放情景下所得到的预估结果之间存在着不同。为了加深理解2℃全球变暖时中国气候变化状况,除了以上给出的多模式集合结果之外,我们还需要进一步了解各模式结果之间的差异究竟有多大,即多模式集合预估结果的不确定性程度如何。因此,在各排放情景下我们逐一计算了16个模式分别预估的2℃全球变暖时中国区域各要素的变化,而后通过16个模式预估结果之间的算术平均和标准差来衡量其离散度。在以下这部分,我们仅给出了A1B中等排放情景下的结果作为代表。

在2℃全球变暖背景下,中国年均地表气温上升2.0~3.4℃(图4a),通过与前文所示A1B情景

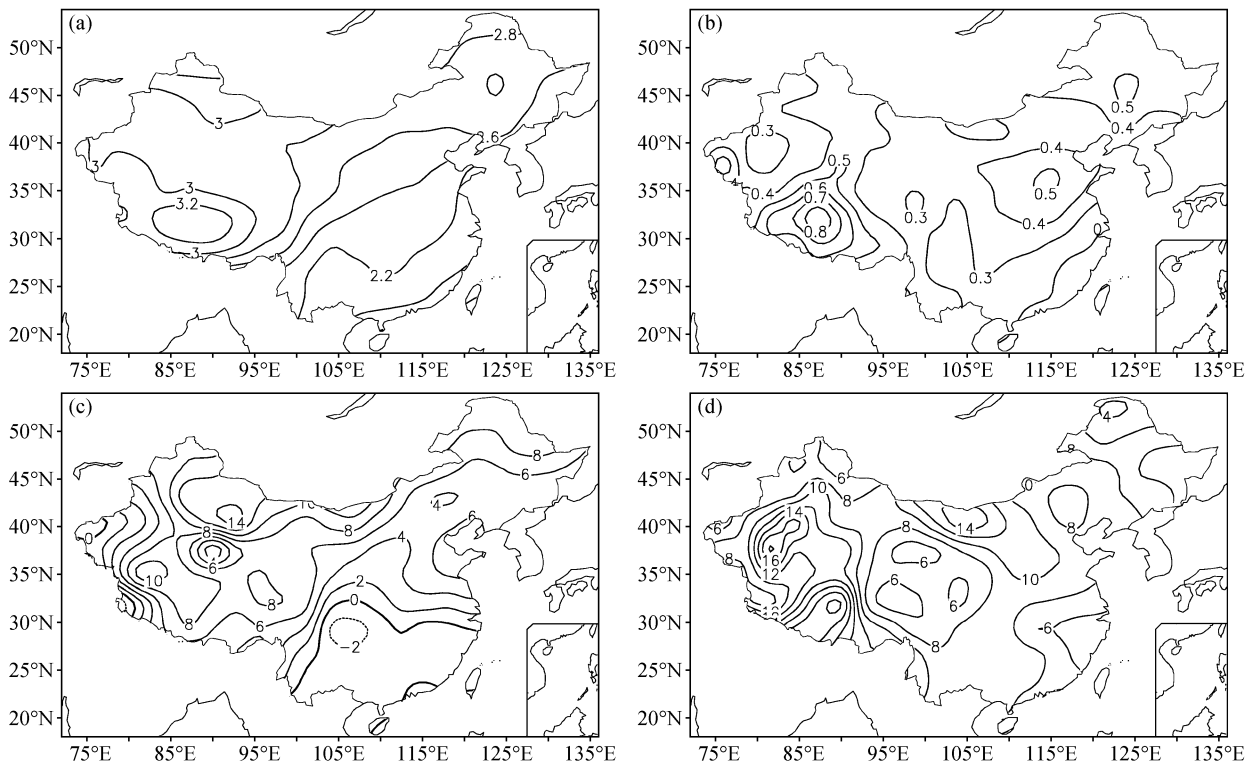


图4 在A1B排放情景下,根据16个模式分别模拟到的2℃全球变暖时气候要素场的变化(相对于各模式自身的1890~1900年基准气候),通过集合平均得到的中国年均(a)地表气温变化(单位:℃)和(c)降水百分比变化(单位:%)、以及模式结果间的(b)地表气温(单位:℃)和(d)降水(单位:%)标准差。图a(图c)中所有区域都通过了(没有通过)95%信度水平的学生*t*检验

Fig. 4 Change of (a) annual temperature (units: °C) and (c) precipitation (units: %) over China with a 2°C global warming, with reference to the baseline climatology during 1890–1900, as derived from the ensemble mean of the 16 individual model results under the SRES A1B. Also shown are the corresponding standard deviation of (b) annual temperature (units: °C) and (d) precipitation (units: %) between the individual model results. All changes in panel a (c) are statistically significant (insignificant) at the 95% confidence level in terms of the Student's *t* test

下变暖情况(图2)的对照可以发现,二者之间在空间分布上是相似的,幅度也差别不大(在约0.2℃以内)。这说明,无论是前文遵循惯例先对16个模式进行集合平均而后进行预估研究,还是此处先计算16个模式的单独预估结果而后对其进行集合平均,2℃全球变暖时中国地表气温的预估结果具有一致性。另一方面,各个模式预估结果之间也存在着差异,年均地表气温的标准差在0.1~0.9℃之间(图4b)。其中,在约45°N以北的东北大部、华中大部(32°N~38°N, 103°E~120°E)以及约95°E以西大部分地区模式结果之间的差别较大,平均在0.4~0.9℃之间,尤其是在西藏地区。然而,相对于年均地表气温的平均变化而言,标准差的值仍是一个小量,这就说明2℃全球变暖背景下中国年均地表气温变化的预估结果在模式之间具有

很好的一致性(通过了95%信度水平检验),因此具有很高的可信度。

与地表气温的情况相似,年均降水的百分比变化(图4c)与前文图3中A1B情景下所示的结果一致,均表现为华南大部降水减少、而其余地区降水增加。与此相对应的是,模式结果之间的标准差介于3%~18%之间,其中在内蒙古中部、新疆南部、青藏高原大部分地区的标准差相对要更大(图4d)。进一步的对比分析发现,模式结果之间的标准差要大于相应的16个模式单独结果的集合平均变化,即各模式结果的集合平均变化值要小于它们之间的离散度,因此其信号可信程度较低(图4c中所示数值变化均未通过95%信度水平检验)。这应与全球大气与海洋环流耦合模式对东亚降水的模拟能力偏低有关(Jiang et al., 2005; 许崇海等, 2007; 张莉

等, 2008; Chen and Sun, 2009), 同时也进一步说明模式之间在本世纪中国降水的预估结果上还存在较大的不确定性 (Ding et al., 2007)。

4 结论

本文使用 CMIP3 中 16 个气候模式在 20C3M 和 SRES B1、A1B、A2 温室气体和气溶胶排放情景下的数值模拟试验结果, 预估研究了相对于工业化革命前期 2°C 全球变暖发生的时间、与之相对应的大气中主要温室气体浓度以及中国气候变化情况, 主要结论是:

(1) 根据模式在 SRES B1、A1B、A2 三种排放情景下的集合结果, 2°C 全球变暖分别发生在 2064 年、2046 年和 2049 年, 对应的大气 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 当量浓度分别为 506~518 ppm、1821~2541 ppb、348~372 ppb、625~669 ppm。

(2) 在 2°C 全球变暖背景下, 中国气候变暖的幅度要更大。在模式集合结果中, 区域平均的年均地表气温上升 $2.7 \sim 2.9^{\circ}\text{C}$, 降水增加 $3.4\% \sim 4.4\%$, 各季节内也均为增加趋势。

(3) 各情景下的预估结果存在模式依赖的不确定性, 地表气温的预估结果具有很高的可信度, 降水结果的可信度较低。

综合而言, 当 2°C 全球变暖发生时, 中国区域三种排放情景相互间各要素变化的差别较小, 这说明温室气体浓度相对于排放路径而言, 对于气候变化的影响更为重要。最后需要说明的是, 20 世纪以来的全球变暖已经被广泛接受, 并认为它已经而且正在对全球气候、环境、生态系统、生物多样性以及经济和社会各领域产生深刻影响, 然而在全球变暖的幅度、成因、空间分布及其未来变化上还有着不同的意见, 这主要是由于观测资料不足, 气候系统及相关反馈过程、温室气体的气候效应及其作用机理还有待进一步认识, 气候模式的有效性和可靠性还有待提高, 未来温室气体的排放情景仍须完善 (秦大河, 2003; Schneider et al., 2007; Trenberth et al., 2007; Gleick et al., 2010)。

致谢 感谢两位审稿人的宝贵评阅意见, 感谢各模式组提供模拟结果、气候模式诊断与比较计划 (PCMDI) 收集并存储模式资料、世界气候研究计划 (WCRP) 下的耦合模式工作组 (WGCM) 组织模式资料分析工作。WCRP 下的耦合模式比较计划第 3 阶段 (CMIP3) 的多模式资料集由美国能源部科学办公室支持。

参考文献 (References)

- Annan J D, Hargreaves J C. 2010. Reliability of the CMIP3 ensemble [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L02703, doi: 10.1029/2009GL041994.
- Chen H P, Sun J Q. 2009. How the “best” models project the future precipitation change in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 773–782.
- Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: an overview of recent progress [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24: 954–971.
- Ding Z L, Duan X N, Ge Q S, et al. 2009. Control of atmospheric CO_2 concentrations by 2050: A calculation on the emission rights of different countries [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52: 1447–1469.
- Ding Z L, Duan X N, Ge Q S, et al. 2010. On the major proposals for carbon emission reduction and some related issues [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 53: 159–172.
- Dong W J, Jiang Y D, Yang S. 2010. Response of the starting dates and the lengths of seasons in Mainland China to global warming [J]. *Climatic Change*, 99: 81–91.
- Fischlin A, Midgley G F, Price J T, et al. 2007. Ecosystems, their properties, goods, and services [M]//*Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 211–272.
- Fisher B S, Nakicenovic N, Alfsen K, et al. 2007. Issues related to mitigation in the long term context [M]//*Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change*. Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 170–250.
- Gao X J, Zhang D F, Chen Z X, et al. 2007. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 50: 620–628.
- Gao X J, Shi Y, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 54: 462–472.
- Giannakopoulos C, Le Sager P, Bindi M, et al. 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2°C global warming [J]. *Global and Planetary Change*, 68: 209–224.
- Giorgi F, Hurrell J W, Marinucci M R, et al. 1997. Elevation dependency of the surface climate change signal: A model study [J]. *J. Climate*, 10: 288–296.

- Gleick P H, Adams R M, Amasino R M, et al. 2010. Climate change and the integrity of science [J]. *Science*, 328: 689–690.
- 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 2004. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测 [J]. *地球物理学报*, 47: 590–596. Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2004. East Asian climate change trend under global warming background [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 47: 590–596.
- Jiang D B. 2008. Projected potential vegetation change in China under the SRES A2 and B2 scenarios [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 25: 126–138.
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22: 479–495.
- Jiang D B, Zhang Y, Sun J Q. 2009. Ensemble projection of 1–3°C warming in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54: 3326–3334.
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 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*, 33: 109–120. Jiang Zhihong, Chen Weilin, Song Jie, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33: 109–120.
- Kaplan J O, New M. 2006. Arctic climate change with a 2°C global warming: Timing, climate patterns and vegetation change [J]. *Climatic Change*, 79: 213–241.
- Liu Y X, Li X, Zhang Q, et al. 2010. Simulation of regional temperature and precipitation in the past 50 years and the next 30 years over China [J]. *Quaternary International*, 212: 57–63.
- Lu R Y, Fu Y H. 2010. Intensification of East Asian summer rainfall interannual variability in the twenty-first century simulated by 12 CMIP3 coupled models [J]. *J. Climate*, 23: 3316–3331.
- 马洁华, 王会军, 张颖. 2011. 北极夏季无海冰状态时的东亚气候变化数值模拟研究 [J]. *气候变化研究进展*, 7: 178–183. Ma Jiehua, Wang Huijun, Zhang Ying. 2011. Simulation of the East Asian summer climate change in the “Free Arctic” condition [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 7: 178–183.
- Meehl G A, Stocker T F, Collins W D, et al. 2007. Global climate projections [M]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 748–845.
- Meinshausen M, Meinshausen N, Hare W, et al. 2009. Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C [J]. *Nature*, 458: 1158–1162.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. 2000. IPCC Special Report on Emissions Scenarios [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 599pp.
- Qian W H, Zhu Y F. 2001. Climate change in China from 1880 to 1998 and its impact on the environmental condition [J]. *Climatic Change*, 50: 419–444.
- 秦大河. 2003. 气候变化的事实与影响及对策 [J]. *中国科学基金*, 17: 1–3. Qin Dahe. 2003. Facts, impact, adaptation and mitigation strategy of climate change [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China (in Chinese)*, 17: 1–3.
- Ramaswamy V, Boucher O, Haigh J, et al. 2001. Radiative forcing of climate change [M]// *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 349–416.
- Schneider S H, Mastrandrea M D. 2005. Probabilistic assessment of “dangerous” climate change and emissions pathways [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102: 15728–15735.
- Schneider S H, Semenov S, Patwardhan A, et al. 2007. Assessing key vulnerabilities and the risk from climate change [M]// *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry M L, Canziani O F, Palutikof J P, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 779–810.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, et al. 2010. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China and their possible change [J]. *J. Geophys. Res.*, 115: D16110, doi: 10.1029/2009JD013541.
- Sun Y, Ding Y H. 2010. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 53: 284–300.
- Tao F L, Yokozawa M, Liu J Y, et al. 2009. Climate change, land use change, and China’s food security in the twenty-first century: an integrated perspective [J]. *Climatic Change*, 93: 433–445.
- Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. 2007. Observations, surface and atmospheric climate change [M]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 236–336.
- Wang H J, Sun J Q. 2009. Variability of Northeast China river break-up date [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 701–706.
- Wang H J, Zeng Q C, Zhang X H. 1993. The numerical simulation of the climatic change caused by CO₂ doubling [J]. *Science in China (Series B: Chemistry)*, 36: 451–462.

- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 62: 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62: 228–236.
- Wu S H, Dai E F, Huang M, et al. 2007. Ecosystem vulnerability of China under B2 climate scenario in the 21st century [J]. Chinese Science Bulletin, 52: 1379–1386.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. 气候变化研究进展, 3: 287–291. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3: 287–291.
- Xu Y, Xu C H, Gao X J, et al. 2009. Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze River basin of China in the 21st century [J]. Quaternary International, 208: 44–52.
- Xu Y L, Zhang Y, Lin E D, et al. 2006. Analyses on the climate change responses over China under SRES B2 scenario using PRECIS [J]. Chinese Science Bulletin, 51: 2260–2267.
- Yao F M, Xu Y L, Lin E D, et al. 2007. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China [J]. Climatic Change, 80: 395–409.
- Yu Y Q, Zhi H, Wang B, et al. 2008. Coupled model simulations of climate changes in the 20th century and beyond [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25: 641–654.
- Zeng N, Ding Y H, Pan J H, et al. 2008. Climate change—the Chinese challenge [J]. Science, 319: 730–731.
- 张海东, 罗勇, 王邦中, 等. 2006. 气象灾害和气候变化对国家安全的影响 [J]. 气候变化研究进展, 2: 85–88. Zhang Haidong, Luo Yong, Wang Bangzhong, et al. 2006. Impacts of meteorological disaster and climate change on national security [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2: 85–88.
- 张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 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, 32: 261–276. Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. 2008. Evaluation of precipitation simulation in East Asian monsoon areas by coupled ocean–atmosphere general circulation models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32: 261–276.
- 张人禾. 2005. 我国南方致洪暴雨监测与预测的理论和研究方法研究 [J]. 中国科技奖励, (1), 74–77. Zhang Renhe. 2005. Research on theories and methods of monitoring and predicting of heavy rainfall in South China [J]. China Awards for Science and Technology (in Chinese), (1), 74–77.
- Zhao P, Yang S, Yu R C. 2010. Long-term changes in rainfall over eastern China and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming [J]. J. Climate, 23: 1544–1562.
- 赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 2005. 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, 10: 808–817. Zhao Zongci, Wang Shaowu, Xu Ying, et al. 2005. Attribution of the 20th century climate warming in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10: 808–817.
- Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models [J]. J. Climate, 19: 5843–5858.
- 周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 2008. 气候变化的归因和预估模拟研究 [J]. 大气科学, 32: 906–922. Zhou Tianjun, Li Lijuan, Li Hongmei, et al. 2008. Progress in climate change attribution and projection studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32: 906–922.