

IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估

江志红, 张 霞, 王 冀

(南京信息工程大学 江苏省气象灾害重点实验室, 南京 210044)

摘要: 利用政府间气候变化委员会 (IPCC) 第四次评估报告提供的 13 个新一代气候系统模式的模拟结果, 分析了不同情景下 (高排放 SRES A2、中等排放 A1B、低排放 B1) 中国区域未来 100 年的气候变化。结果表明, 21 世纪中国气候预估显著变暖、变湿, 世纪末变暖范围在 $1.6^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 之间, 年降水量增加 $1.5\%\sim 20\%$ 。在 A2、A1B 和 B1 情景下, 21 世纪末期增暖幅度依次为 5.3°C 、 4.3°C 和 2.8°C , 平均 3.5°C , 年降水量预估增加依次为 11% 、 9.6% 和 6.4% , 平均达 7.5% 。气温和降水变化的地理分布显示: 北方增温幅度大于南方, 降水的增加也主要集中在北方。冬季变暖最明显, 降水则在冬、春季增加较显著。模式预估结果的不确定性分析表明, 新一代全球系统模式对 21 世纪中国气候变化预估的可靠性得到了提高。

关键词: IPCC-AR4; 情景预估; 中国区域

文章编号: 1000-0585(2008)04-0787-13

1 引言

全球变暖背景下未来区域气候变化的预估引起了国内外气候学家及各级政府的高度关注。近十几年来, 我国科学家们对中国气候变化的未来预估做了大量的计算与分析研究^[1~11]。如王会军等^[1]、Guo *et al.*^[2]用全球海气耦合模式考虑人类排放二氧化碳浓度加倍导致的中国区域未来气候变化; 高学杰等^[3]用 RegCM2 区域气候模式进行了二氧化碳加倍对中国气候变化影响的数值试验, 结果显示中国区域年平均气温升高 2.5°C , 降水增加 12% ; 姜大膀等^[4]利用 IPCC 提供的 7 个气候模式在高排放 SRES A2、低排放 B1 情景下的结果, 分析了东亚区域气候 21 世纪的变化趋势, 指出中国年均气温增幅在东北、西部和华中地区较大, 21 世纪末降水量几乎全域性增加; Luo Yong 等^[5]用多模式集合预估 21 世纪中国气候, 发现增暖范围在 $1.2^{\circ}\text{C}\sim 9.2^{\circ}\text{C}$, 全国降水普遍增加。近期赵宗慈等^[12]综合了大约 80 个气候模式方案, 考虑各种人类排放情景下, 发现模式对中国未来气候变化的预估值有明显差异, 到 21 世纪后期中国气温升高最佳估计为 $1.9\sim 5.5^{\circ}\text{C}$, 其范围在 $0.7\sim 9.2^{\circ}\text{C}$ 之间。由此可见, 虽然全球变暖背景下未来中国区域气候变化的预估已有了许多工作, 但不同模式预估的变暖幅度和时空分布特征都有差别, 降水预估结果的差异则更大, 模式对未来区域气候变化的预估存在较大的不确定性。

自 IPCC 第三次评估报告^[13]以来, 全球气候系统模式得到了迅速发展, IPCC 第四次

收稿日期: 2007-12-14; 修订日期: 2008-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40675043); 江苏省高校自然科学重大基础研究项目 (07KJA17020)

作者简介: 江志红 (1963-), 女, 教授, 博导。研究领域: 气候学。E-mail: zhjiang@nuist.edu.cn

评估报告 (the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 简称 IPCC-AR4) 集中了 23 个复杂全球气候系统模式 9 种不同排放情景下的预估结果, 引起了各国学者对有关最新全球模式的模拟和预估能力的关注。报告^[14]指出, 在不同 SRES 排放情景下, 全球未来 20 年温度增幅为 $0.2^{\circ}\text{C}/10$ 年, 持续现在的或更高的温室气体排放量, 温度将进一步升高, 并引起 21 世纪全球气候系统的许多变化, 可能比 20 世纪观测到的变化还大。模式对未来气候变化及其变暖型态的预估有了更高的信度, 并给出了具有较高信度的不确定性范围, 但有关 IPCC-AR4 模式(以下简称 AR4 模式)对中国 21 世纪气候变化的预估尚缺乏系统分析, 尤其缺乏未来预估的不确定性分析。

中国地处东亚季风区, 该地区的气候变化在东亚气候变化中占有重要的地位和作用。我们在文章^①中评估了 AR4 模式对中国区域 1960~2000 年气候变化的模拟能力, 结果表明新一代模式对中国气候的模拟能力较以往模式有明显提高。在此基础上, 本文选用 13 个新一代气候系统模式在高排放 SRES A2、中等排放 SRES A1B 和低排放 SRES B1 下的模拟结果, 预估我国 21 世纪气温和降水变化特征, 分析各种情景下未来预估的可靠性, 以加深对全球持续变暖背景下中国区域气候变化的认识, 为气候变化的影响评估提供依据。

2 资料和模式简介

IPCC-AR4 的“气候模式诊断与比较计划”(Program of Climate Model Diagnosis and Intercomparison, PCMDI) 给出了 13 个模式在 SRES A2、A1B 和 B1 情景下的预估结果, 对各格点取 13 个模式的算术平均作为集合模式的结果。表 1 列出了该 13 个气候系统模式的基本信息, 其中, CSIRO-Mk3.0 和 MPI-ECHAM5 具有最高水平分辨率, 约为 $200\text{ Km}\times 200\text{ Km}$; 分辨率最低的 INM-CM3.0 和 GISS-ER, 约为 $450\text{ km}\times 550\text{ km}$; 其他模式的分辨率介于 $250\text{ km}\sim 400\text{ km}$ 之间。

表 1 13 个气候系统模式的基本信息

Tab. 1 Information of the 13 climate models

模式名称	分辨率 (经向 \times 纬向)	所属国家、研究中心缩写	参考文献
CCCMA-GCM3.1	$3.75^{\circ}\times 3.75^{\circ}$	加拿大/CCCMA	Kim <i>et al.</i> ^[15]
CNRM-CM3	$2.8^{\circ}\times 2.8^{\circ}$	法国/CNRM	Salas y M'elia <i>et al.</i> ^[16]
CSIRO-Mk3.0	$1.875^{\circ}\times 1.875^{\circ}$	澳大利亚/CSIRO	Gordon <i>et al.</i> ^[17]
GFDL-CM2.0	$2.5^{\circ}\times 2.0^{\circ}$	美国/GFDL	Delworth <i>et al.</i> ^[18]
GFDL-CM2.1	$2.5^{\circ}\times 2.0^{\circ}$	美国/GFDL	Delworth <i>et al.</i> ^[18]
GISS-ER	$5.0^{\circ}\times 4.0^{\circ}$	美国/GISS	Schmidt <i>et al.</i> ^[19]
INM-CM3.0	$5.0^{\circ}\times 4.0^{\circ}$	俄国/INM	Volodin and Diansky ^[20]
IPSL-CM4	$3.75^{\circ}\times 2.5^{\circ}$	法国/IPSL	Marti <i>et al.</i> ^[21]
MIROC3.2_medres	$2.8^{\circ}\times 2.8^{\circ}$	日本/CCSR/NIES/FRCGC	K-1 model developers ^[22]
ECHO-G	$3.75^{\circ}\times 3.75^{\circ}$	德国/MIUB	Min <i>et al.</i> ^[23]
MPI-ECHAM5	$1.875^{\circ}\times 1.875^{\circ}$	德国/MPI	Jungclaus <i>et al.</i> ^[24]
UKMO-HadCM3	$3.75^{\circ}\times 2.5^{\circ}$	英国/UKMO	Gordon <i>et al.</i> ^[25]
PCM1	$2.8^{\circ}\times 2.8^{\circ}$	美国/NCAR	Washington <i>et al.</i> ^[26]

①刘敏, 江志红. 13 个 IPCC-AR4 模式对中国区域近 40 年气候模拟能力的评估. (已投稿)

鉴于各个模式分辨率的不同,文中对所有变量的分析均采用双线性插值法,将不同分辨率资料统一插值到 $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 的网格点上。所有预估中的距平值,统一采用相对于 1961~1990 年气候场的变化值。

3 中国 21 世纪地面气温变化情景预估

3.1 区域平均气温变化的预估

表 2 给出各个模式以及它们的集合模式在三种排放情景下,对 21 世纪中国区域年平均气温线性趋势的预估结果。结果表明,三种情景下中国年平均气温都呈增加趋势,且所有模式结果都通过了信度 95% 的显著性检验。在 A2 排放方案下,增温趋势为 $3.2^{\circ}\text{C} \sim 6.0^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,平均达 $4.9^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,在 A1B 下中国未来可能变暖幅度略低于 A2 方案,平均达 $4.2^{\circ}\text{C}/100\text{a}$,变化范围 $2.7 \sim 5.6^{\circ}\text{C}/100\text{a}$;而 B1 下中国未来可能变暖幅度最低,增温趋势在 $1.7 \sim 3.7^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 变化,平均为 $2.6^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ 。与以往预估结果 (Luo Yong 等^[5]) 对比发现,AR4 各模式在同一情景下预估的增温趋势变化范围较小。

表 2 模式预估 21 世纪 (2000~2099 年) 中国气温变化的线性趋势 ($^{\circ}\text{C}/100\text{a}$)

Tab. 2 Linear tendency of temperature changes of China in the 21st century ($^{\circ}\text{C}/100\text{a}$)

模式名	A2	A1B	B1
CCMA-GCM3.1	4.6	3.0	1.7
CNRM-CM3	5.0	3.8	1.8
CSIRO-Mk3.0	3.7	3.0	1.8
GFDL-CM2.0	5.3	4.6	2.5
GFDL-CM2.1	4.7	4.4	2.2
GISS-ER	3.9	2.9	1.7
INM-CM3.0	5.1	3.6	2.4
IPSL-CM4	5.7	5.1	3.1
MIROC3.2_medres	5.4	5.0	3.2
ECHO-G	6.0	5.6	3.3
MPI-CHAM5	5.7	5.5	3.7
UKMO-HadCM3	5.7	5.0	3.3
PCM1	3.2	2.7	—
集合模式	4.9	4.2	2.6
均方差	0.8	1.0	0.7

对比不同模式预估趋势的大小,可以看到:各个模式估计的未来 100a 的变暖幅度略有差别,但无论何种情景,CSIRO-Mk3.0、PCM1 模式预估的气温升高幅度较小,MPI-CHAM5 及 ECHO-G、UKMO-HadCM3 模式预估的气温增幅相对较大。由集合模式对 21 世纪中国区域年平均气温变化的预估序列 (图略) 可以发现:21 世纪中叶,预估气温增幅在 A1B 方案下最大,A2 次之,B1 最小;到 21 世纪末,集合模式预估的气温增幅在 A2 方案下最强,A1B 次之,B1 最弱,分别为 5.3°C 、 4.3°C 及 2.8°C 。与 Xu Ying 等^[9] 的预估结果相比,IPCC AR4 预估的增温强度略低。

表 3 给出了在 A2、A1B、B1 排放情景下,中国 21 世纪不同时期年及各季节平均气温变化的模式平均预估结果。可以看出,21 世纪中叶前 (2021~2050 年) 不同情景下气

温增幅差异不大, A2、A1B、B1 情景下中国年平均气温依次增加 1.67℃、1.81℃、1.49℃; 到 21 世纪末期 (2071~2100 年) 不同情景下预估变暖的差异增大, A2 情景下增温最大, 达 4.20℃, B1 情景最小, 为 2.67℃。就季节变化而言, 在三种情景下, 两个时间段内冬季变暖幅度均最大, 夏季较低, 春、秋季基本一致。

表 3 集合模式预估 2021~2050、2071~2100 年平均与四季气温变化 (℃)

Tab. 3 Temperature change of China in different seasons in 2021~2050 and 2071~2100 (℃)

年份	排放情景	年平均 (均方差)	冬季 (均方差)	春季 (均方差)	夏季 (均方差)	秋季 (均方差)
2021~2050	A2	1.67 (0.40)	1.89 (0.59)	1.61 (0.47)	1.58 (0.47)	1.62 (0.50)
	A1B	1.81 (0.36)	2.04 (0.51)	1.66 (0.44)	1.76 (0.49)	1.79 (0.45)
	B1	1.49 (0.36)	1.63 (0.48)	1.41 (0.48)	1.45 (0.42)	1.45 (0.43)
2071~2100	A2	4.20 (0.74)	4.68 (0.95)	4.03 (0.86)	4.03 (0.90)	4.06 (0.90)
	A1B	3.74 (0.79)	4.15 (0.94)	3.59 (0.87)	3.56 (0.93)	3.67 (0.86)
	B1	2.67 (0.60)	2.98 (0.68)	2.54 (0.70)	2.57 (0.67)	2.60 (0.66)

图 1 给出了集合模式预估的中国区域 2021~2050 年和 2071~2100 年月平均气温距平 (相对于 1961~1990 年) 年变化曲线。由图可见: 集合模式预估的 21 世纪末期增温幅度高于 21 世纪中叶前, 且两个时段内均显示冬季的增温幅度最大。在 SRES A2、A1B、B1 情景下, 集合模式预估的 21 世纪中叶前增温最大月份与最小月份之差分别为 0.45℃、0.55℃、0.39℃, 21 世纪末期增温最大月份与最小月份之差分别为 0.95℃、0.75℃、0.65℃。可见, 随着冬、夏季增温幅度差异的增大, 气温的年较差将不断减小。

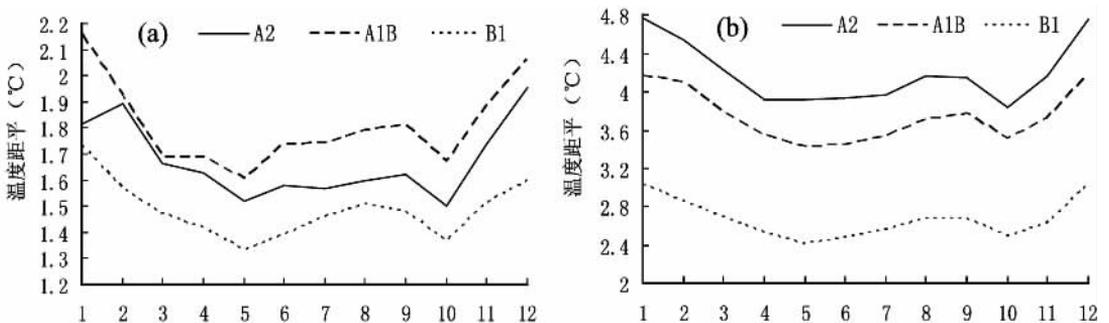


图 1 SRES A2、A1B、B1 排放情景下, 集合模式预估的中国地面气温变化的年变化曲线

(a 为 2021~2050 年, b 为 2071~2100 年, 单位:℃)

Fig.1 Annual changes of mean surface air temperature of China under SRES A2, A1B and B1

(a: 2021~2050, b: 2071~2100, unit:℃)

3.2 气温空间分布变化的预估

图 2 给出了模式预估的中国 21 世纪气温线性趋势空间分布。可以看到, 不同情景下

线性趋势的分布形势相似，都呈现出由南至北逐渐增大的特点。但 A2 情景趋势增加最大，其中东北、西北地区趋势增加最大，在 $4.5 \sim 5^\circ\text{C}/100\text{a}$ 之间，长江及其以南地区较小，在 $3.2 \sim 4.2^\circ\text{C}/100\text{a}$ 变化，其余地区变化范围为 $4.2 \sim 4.5^\circ\text{C}/100\text{a}$ 。

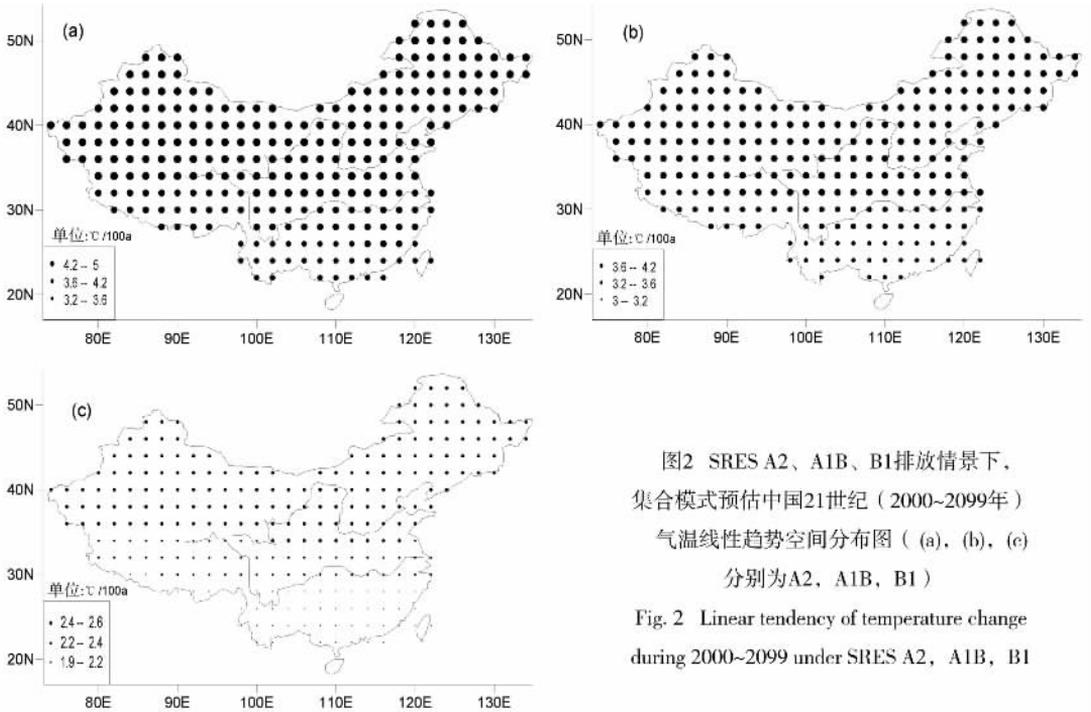
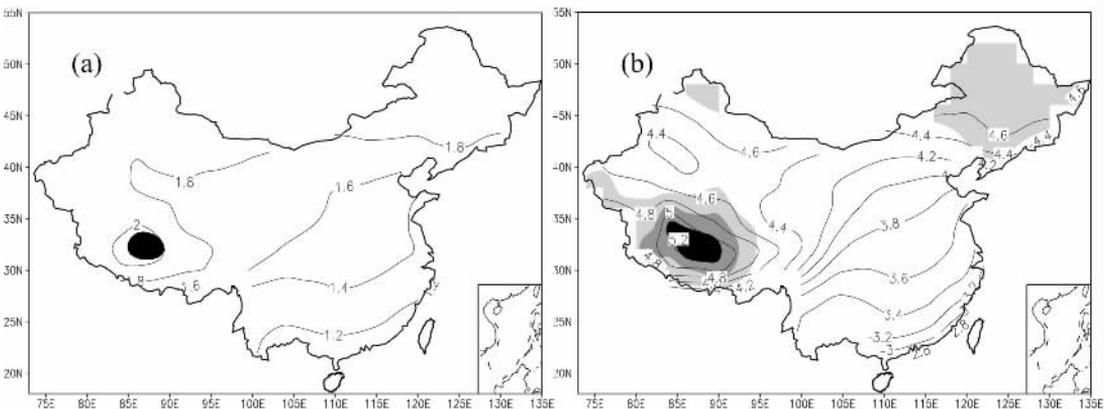


图2 SRES A2、A1B、B1排放情景下，集合模式预估中国21世纪（2000~2099年）气温线性趋势空间分布图（a）、（b）、（c）分别为A2、A1B、B1

Fig. 2 Linear tendency of temperature change during 2000~2099 under SRES A2, A1B, B1

为进一步了解 21 世纪中国气温变化的空间分布，图 3 给出了不同排放情景下 21 世纪中叶前（2021~2050 年）和末期（2071~2100 年）集合模式的年平均温度（相对于 1961~1990 年）距平分布。可以看出，各种排放情景下增温分布的形势基本一致，都呈现高原增温最大，东北、西北、华北次大，其余地区则由东南向西北递增分布。但增温幅度 A2 情景下最高，21 世纪中叶前，高原地区增温 $1.6 \sim 2^\circ\text{C}$ ，东北和华北地区升高 $1.6 \sim 1.8^\circ\text{C}$ ，长江及其以南地区增温幅度在 $1.2 \sim 1.6^\circ\text{C}$ 之间；21 世纪末期，高原地区增暖幅度 $4.6 \sim 5.2^\circ\text{C}$ ，东北、西北增温在 4.5°C 左右，其余地区维持在 $3.0 \sim 4.0^\circ\text{C}$ 之间。而 B1 情景下气温增幅最小，21 世纪中叶前，高原、西北和东北、长江及其以南地区依次增温为 $1.6 \sim 1.8^\circ\text{C}$ ， 1.6°C ， $1.2 \sim 1.4^\circ\text{C}$ ；21 世纪末期，年均气温高原地区（ $2.8 \sim 3.2^\circ\text{C}$ ）、东



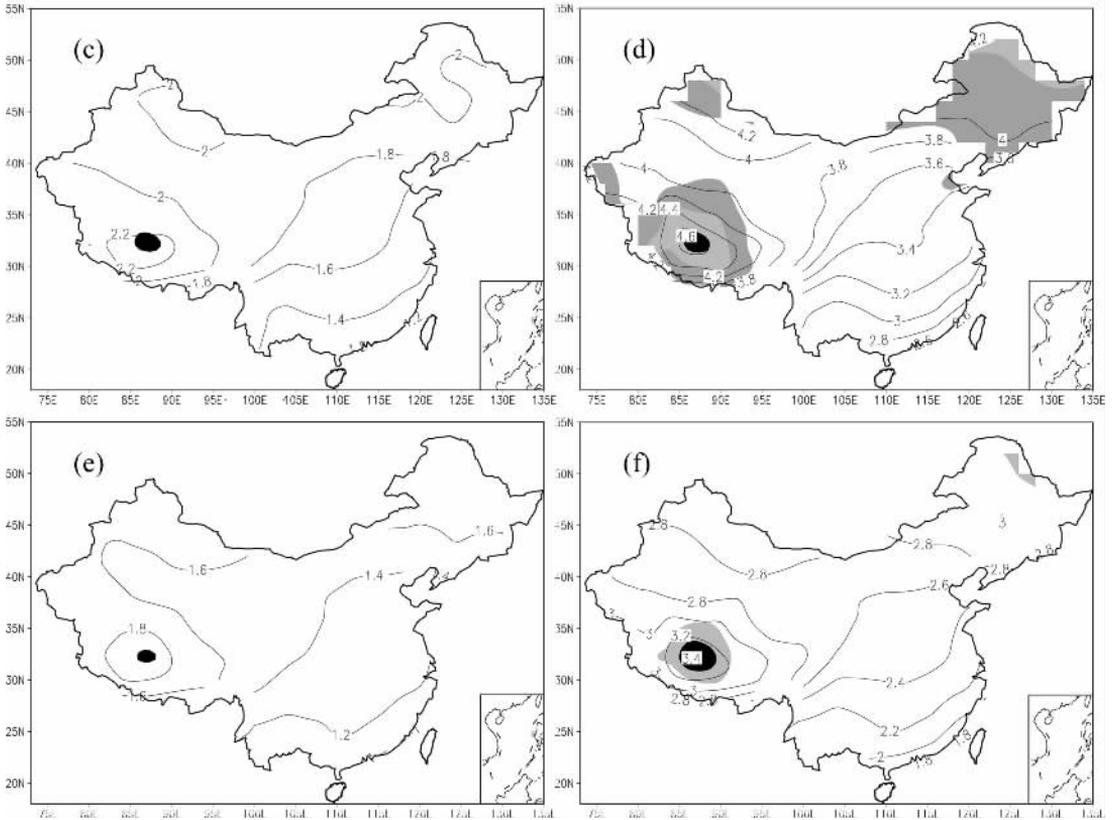


图3 SRES A2、A1B、B1 排放情景下,集合模式预估中国 2021~2050、2071~2100 年平均气温变化空间分布图(左边为 2021~2050 年,右边为 2071~2100 年,(a)(b),(c)(d),(e)(f)分别为 A2、A1B、B1,图中阴影为 13 个模式估价值间的均方差大于 0.6 的区域)

Fig. 3 Annual mean surface air temperature change during 2021~2050 and 2071~2100 under SRES A2, A1B, B1 (left: 2021~2050, right: 2071~2100, (a)(b): A2, (c)(d): A1B, (e)(f): B1, shaded: variance > 0.6) 北和西北 (2.6~2.8℃) 增温幅度较大。A1B 情景下气温增幅介于两者之间,各地区较 A2 方案略低 0.4℃。

就季节变化而言(图略),除夏季外,其余各季增温分布形式与年平均一致,夏季高原地区变暖大值区不明显,高值区位于东北、西北,呈现东南向西北递增分布,冬季增温幅度大于其他三个季节。

4 21 世纪降水变化情景预估

4.1 区域平均降水变化的预估

类似地,我们计算了各个模式以及它们的集合模式在三种排放情景下的 21 世纪中国年降水距平百分率的线性趋势(表 4)。可以看到,各模式预估的未来降水都呈增加趋势,且绝大多数模式结果通过了 95% 的信度检验,但不同模式的预估结果存在一定的差异性,线性趋势变化范围在 0.4%~22.3%/100a 之间,在 A2、A1B、B1 情景下模式平均分别达 10.7%/100a、10.4%/100a、6.8%/100a。

对比不同模式预估趋势的大小,可以看到:与气温预估结果相比,各模式对中国地区年降水模拟的一致性较差,其中 CCCMA-GCM3.1、GFDL-CM2.0 以及 UKMO-HadCM3

模式预估的降水相对其他模式结果增加较大, 其余模式预估的降水增加幅度较小。从集合模式预估中国 21 世纪年降水距平百分率序列(图略)来看, 21 世纪初期, A2 情景下预估的降水略有减少, 其他两个情景降水的增加趋势不明显; 21 世纪中期后, 降水逐渐增加, 且 A1B 情景下的增加趋势最显著; 到 21 世纪末, A2 情景下降水增加最多, 达 11%, A1B 和 B1 情景下分别为 9.6% 和 7%。与许吟隆^[9] 等结果相比, AR4 模式预估的降水距平百分率线性趋势略高一些。

表 4 模式预估 21 世纪 (2000~2099 年) 中国降水距平百分率的线性趋势及其各趋势间的均方差 (%/100a) (括号中值为降水距平的线性趋势, mm/100a)

Tab. 4 Linear tendencies of the percentage and their variance in China in the 21st century (%/100a)

模式名	A2	A1B	B1
CCCMA-GCM3.1	19 (153.7)	19 (153.7)	6.5 (52.6)
CNRM-CM3	8.8 (85.1)	9 (86.5)	4.1 (39.8)
CSIRO-Mk3.0	6.5 (40.2)	3.3 (20.4)	5.2 (32.1)
GFDL-CM2.0	15 (116.1)	17.7 (136.9)	12.6 (97.5)
GFDL-CM2.1	16.4 (124.1)	5 (37.6)	6 (45.3)
GISS-ER	10.2 (109.5)	—	5.4 (58.0)
INM-CM3.0	3.3 (31.1)	3.4 (32.1)	0.4 (3.7)
IPSL-CM4	5.6 (44.2)	8.6 (67.5)	6.6 (52.2)
MIROC3.2_medres	—	15.7 (136.1)	12.6 (108.8)
ECHO-G	—	8.7 (61.7)	5.8 (40.5)
MPI-CHAM5	4.9 (41.3)	6.9 (57.7)	0.8 (6.9)
UKMO-HadCM3	22.3 (190.2)	19.1 (162.4)	15.5 (132.1)
PCM1	6 (52.6)	8.9 (77.4)	—
模式集成	10.7 (94.7)	10.4 (85.8)	6.8 (55.8)
均方差	6.4 (35.3)	5.9 (22.7)	4.6 (25.6)

注: 表中粗体代表通过信度 95% 的显著性检验

表 5 集合模式预估 2021~2050、2071~2100 年与四季降水距平 (相对于 1961~1990 年) 百分率变化及其各模式预估量间的均方差 (%)

Tab. 5 Precipitation change and multi-model standard deviation of China in different seasons in 2021~2050 and 2071~2100 relative to the period 1961 to 1990 (%)

年份	排放情景	年平均 (均方差)	冬季 (均方差)	春季 (均方差)	夏季 (均方差)	秋季 (均方差)
2021~2050	A2	2.78 (6.20)	11.55 (19.48)	8.05 (20.62)	0.35 (10.78)	-3.15 (14.38)
	A1B	3.68 (6.26)	11.88 (19.60)	7.67 (19.15)	1.39 (11.05)	-1.11 (15.16)
	B1	3.85 (5.21)	10.21 (17.34)	8.52 (19.28)	1.33 (9.70)	-0.40 (13.69)
2071~2100	A2	9.00 (10.14)	22.56 (27.00)	15.46 (26.88)	4.90 (16.50)	1.20 (18.90)
	A1B	9.83 (9.59)	23.17 (26.25)	15.95 (25.67)	5.96 (15.51)	2.75 (17.82)
	B1	7.21 (7.67)	15.26 (19.15)	12.21 (20.30)	4.54 (12.52)	2.33 (16.86)

比较不同情景下中国 2021~2050、2071~2100 年及各季节降水距平百分率变化的模式平均预估结果 (表 5), 可以看出: 冬季的降水距平百分率增加幅度最大, 以 A2 情景为例, 21 世纪末增加了 22.56%, 春季次之, 秋季在 21 世纪中叶前呈减小趋势, 到 21 世纪末期有所增加, 但幅度最小。

图 4 给出了集合模式预估的中国区域不同时期降水距平百分率年变化曲线。由图可见, 集合模式预估的 21 世纪末期降水距平百分率高于 21 世纪中叶前。21 世纪中叶前, 各种情景下 7~11 月降水距平百分率都出现负值, 表明 21 世纪中叶 7~11 月降水减少。但不同时期降水距平百分率季节变化特征基本相同, 均显示出冬、春季降水量增加较大, 夏、秋季较小, 说明降水的年较差将呈现减小趋势。

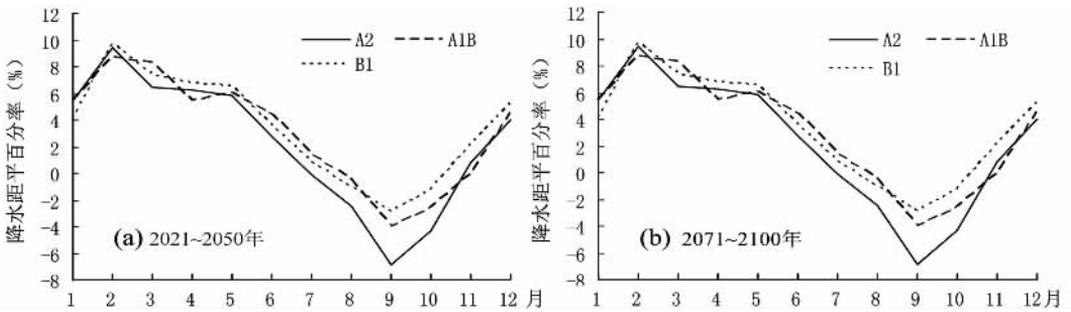


图 4 SRES A2、A1B、B1 排放情景下, 集合模式预估的中国降水距平百分率年变化曲线

Fig. 4 Annual changes of mean precipitation of China under SRES A2, A1B and B1

4.2 降水空间分布变化的预估

图 5 给出了中国 21 世纪降水距平百分率线性趋势空间分布。可以看到, 不同情景下

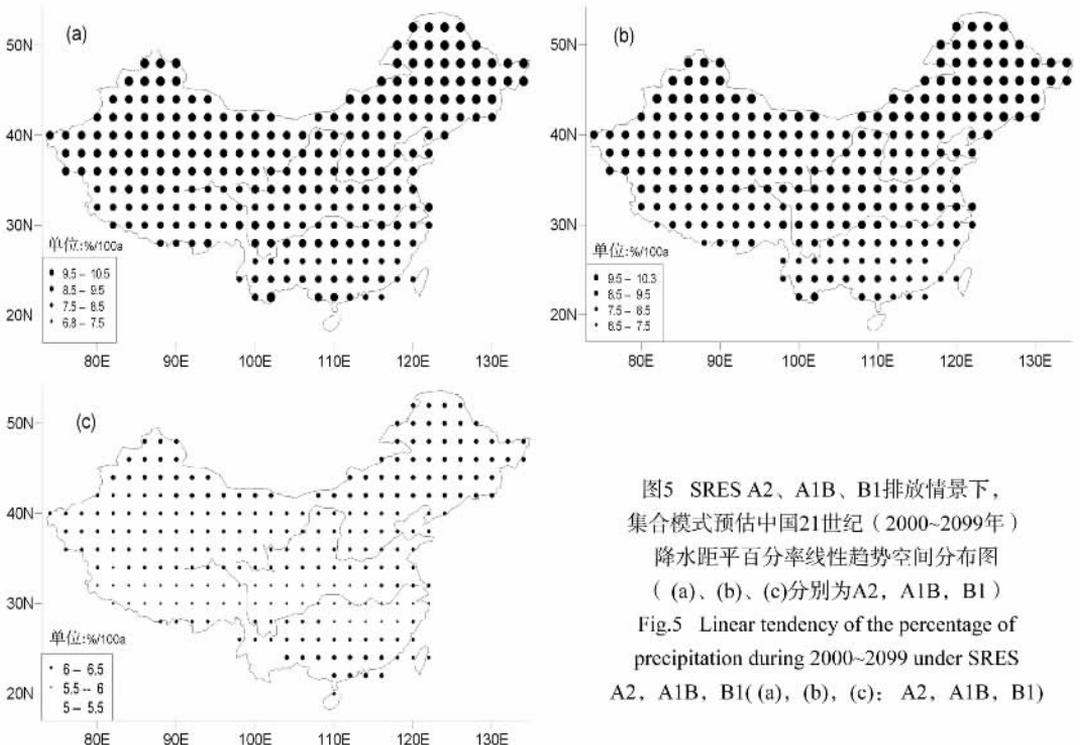


图5 SRES A2、A1B、B1排放情景下, 集合模式预估中国21世纪(2000~2099年)降水距平百分率线性趋势空间分布图 (a)、(b)、(c)分别为A2, A1B, B1)

Fig.5 Linear tendency of the percentage of precipitation during 2000~2099 under SRES A2, A1B, B1(a), (b), (c): A2, A1B, B1)

线性趋势的分布形势略有不同，A2、A1B 情景下基本呈现北方大、南方小的特点，但 B1 情景下福建沿海一带也显示出线性趋势较大。

进一步研究不同情景下 21 世纪集合模式预估的年降水距平百分率变化特征 (图 6)，可以看出：不同排放情景下，各区域年降水距平百分率基本都呈增加趋势，年降水距平百

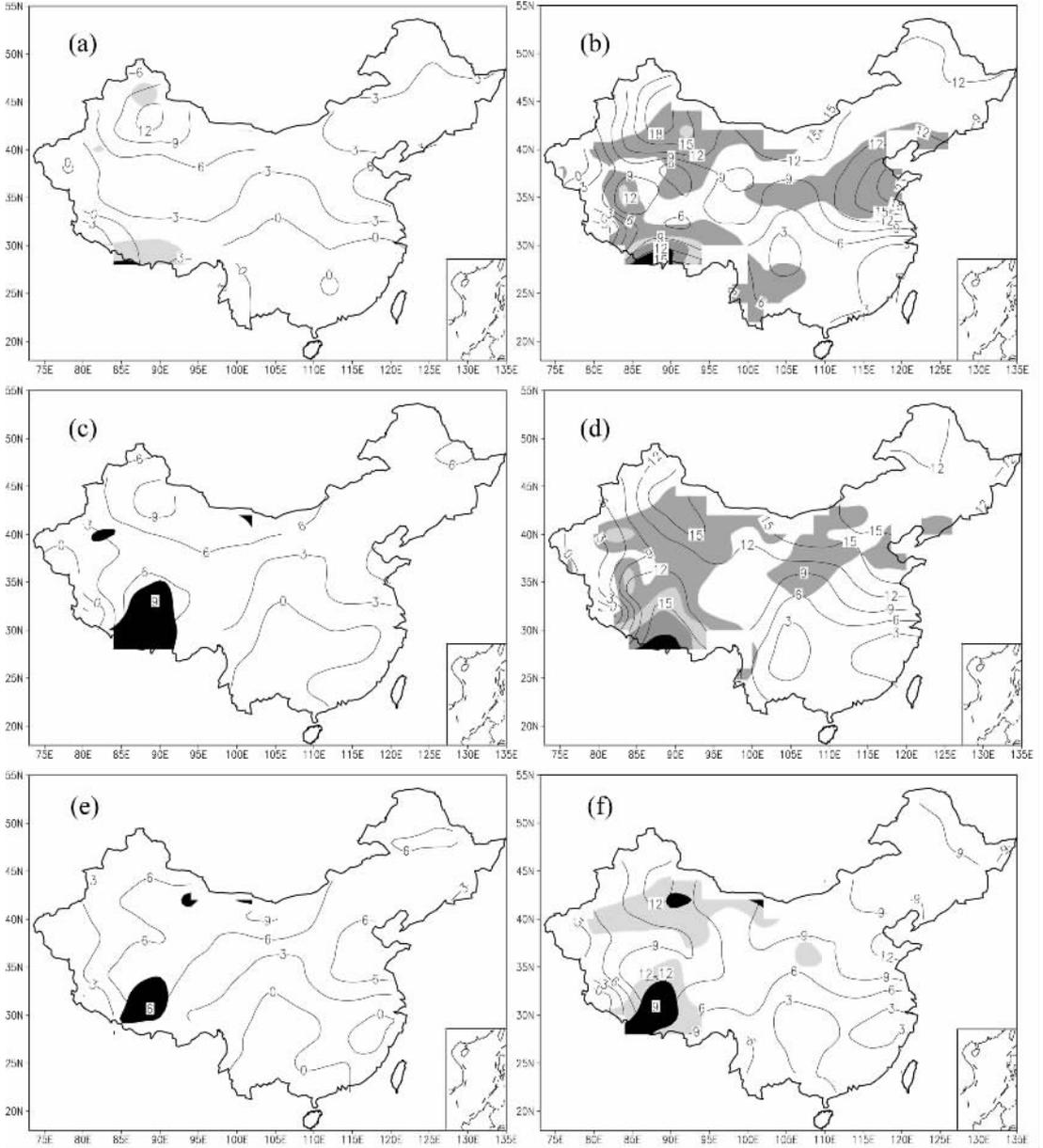


图 6 SRES A2、A1B、B1 排放情景下，集合模式预估中国 2021~2050、2071~2100 年降水距平百分率分布图 (左边为 2021~2050 年，右边为 2071~2100 年，(a) (b)、(c) (d)、(e) (f) 分别为 A2、A1B、B1，图中阴影部分为 13 个模式预估值间均方差大于 10 的区域。单位：%)

Fig. 6 Variance of precipitation during 2021~2050 and 2071~2100 under SRES A2, A1B and B1 (left: 2021~2050, right: 2071~2100, (a) (b): A2, (c) (d): A1B, (e) (f): B1, real shaded: variance>10. unit: %)

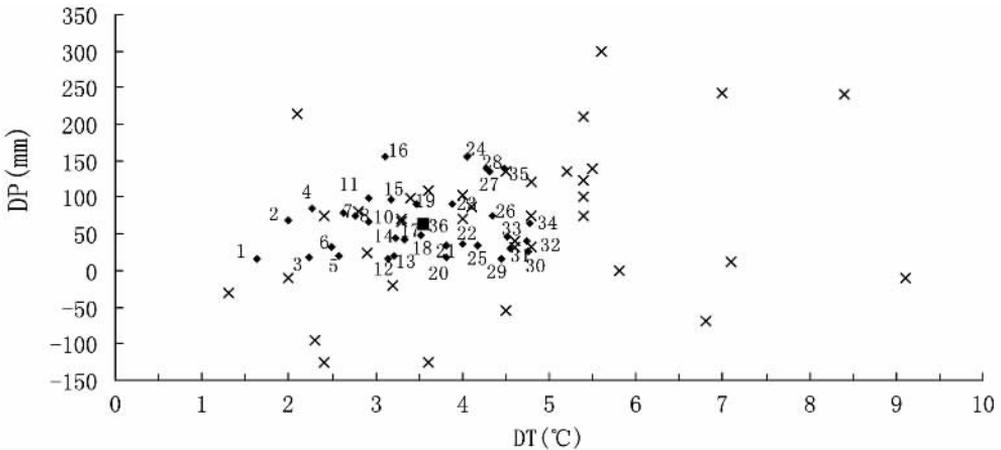
分率变化的分布也基本一致。增加显著区域为华北、西北及东北地区，长江中下游沿岸及以南地区有小幅度增加。以 A2 情景为例，21 世纪末期降水增加幅度较中叶前大，华北、西北及东北、青藏高原以南地区降水增加 12%~18%，长江中下游沿岸及以南地区增加低于 5%。

5 中国区域平均气候变化预估的不确定性分析

鉴于目前温室气体排放情景为假设状况，我们对气候系统各圈层及其相互作用还缺乏足够的了解，气候模式尚有待完善，有关未来气候预估的可信度近年来受到国内外学者的高度关注，本文通过分析各模式预估结果间的方差大小，评估 AR4 模式对未来中国气候预估中的不确定性程度。

表 2 最后一行给出了 13 个模式预估中国区域增温趋势的均方差，可以看到 A2 情形下预估趋势的变化范围 3.2~6.0°C/100a，各情景下预估趋势的均方差都较小于 1°C/100a；而文献 [5] 根据 IPCC 第三次报告的预估结果，发现该情形下预估趋势的变化范围 2.45~8.85°C/100a，相应的均方差接近 2°C/100a，表明新一代全球系统模式对 21 世纪中国区域气温预估的可靠性得到了提高。

对比各模式预估的增温幅度间的均方差的大小可以看出（表 3），21 世纪末期均方差较中期前大，同一时期相比年均方差小于季节均方差。表明随着预估的时段加大，预估结果的不确定性增大。进一步分析各模式预估增温间的均方差分布（图 3）可以看出，21 世纪中叶前各模式增温间均方差较大处位于青藏高原附近，说明由于青藏高原的特殊地形影



(1: CSIRO-Mk3.0B1, 2: GISS-ERB1, 3: CNRM-CM3B1, 4: CCCMA-GCM3.1B1, 5: CSIRO-Mk3.0A1B, 6: GFDL-CM2.1B1, 7: GFDL-CM2.0B1, 8: PCM1A1B, 9: INM-CM3.0B1, 10: PCM1A2, 11: UKMO-HadCM3B1, 12: MPI-ECHAM5B1, 13: CSIRO-Mk3.0A2, 14: IPSL-CM4B1, 15: MIROC3.2_medresB1, 16: CCCMA-GCM3.1A1B, 17: ECHO-GB1, 18: CNRM-CM3A1B, 19: GISS-ERA2, 20: GFDL-CM2.1A1B, 21: INM-CM3.0A1B, 22: GFDL-CM2.1A2, 23: GFDL-CM2.0A1B, 24: CCCMA-GCM3.1A2, 25: CNRM-CM3A2, 26: GFDL-CM2.0A2, 27: MIROC3.2_medres A1B, 28: UKMO-HadCM3A1B, 29: MPI-ECHAM5A1B, 30: INM-CM3.0A2, 31: MPI-ECHAM5A2, 32: IPSL-CM4A2, 33: IPSL-CM4A1B, 34: ECHO-GA1B, 35: UKMO-HadCM3A2, 36: total mean)

图 7 不同模式及情景下预估的 21 世纪末期中国年平均气温与降水变化 (相对于 1961~1990 年) 的散布图 (图中 × 代表 Luo Yong^[5] 等的结果)

Fig. 7 Scatter diagram of annual mean temperature and precipitation changes relative to the years of 1961-1990 in China by the end of the 21st century as projected by the climate models and scenarios

响, 各模式对该地区气温的预估结果一致性较差; 到 21 世纪末期, 青藏高原及东北地区的均方差都大于 0.6, 表明 21 世纪末预估温度变化具有较高不确定性的区域变大了。

分析各模式降水预估趋势(表 4)间差异可以看到, AR4 模式预估的趋势范围在 3.7~190.2mm/100a, A2 情景下模式线性趋势间均方差最大, 达 35.3mm/100a, 与 IPCC 第三次报告的预估结果^[5](-78mm~286mm/100a)相比差异性已明显减小, 表明新一代气候模式对降水模拟的不确定性也得到了明显改善。

由各模式预估的降水距平百分率间的均方差大小看出(表 5), 21 世纪末期均方差较中期前大, 同一时期季节均方差大于年均方差。对比不同时期均方差分布可以看到(图 6), 21 世纪中叶前, 降水变化预估不确定性高的区域位于青藏高原附近, 至 21 世纪末期降水变化预估不确定性高的范围明显加大, 华北以及西部地区均方差都较大。

图 7 给出了 IPCC 第三^[5]、第四次报告对 21 世纪末期(2071~2100 年)中国区域气候预估结果的对比。可以看到各种情景下 IPCC-AR4 所有模式都预估 21 世纪末中国将变暖、变湿, 预估变暖范围在 1.6℃~5℃之间, 平均增温为 3.5℃, 其中 70%以上模式的预估增幅为 3℃~5℃。年降水量增加范围在 14mm~155mm(1.5%~20%)之间, 平均达 62.3mm(7.5%), 而 IPCC 第三次报告预估(图 7 中用 × 表示)的变暖范围在 1.2℃~9.2℃, 降水变化范围在 -122mm~298mm, 明显较 IPCC-AR4 的预估结果离散, 气温偏高, 降水变化不确定性程度高。再次表明新一代全球系统模式对 21 世纪中国气候变化预估的不确定性减小了。

6 结论

本文利用 IPCC-AR4 提供的 13 个气候系统模式的预估结果, 进行 A2、A1B 及 B1 排放情景下中国地区 21 世纪气候变化的情景预估, 结果表明:

(1) 21 世纪中国区域气候总体预估有显著变暖、变湿。21 世纪末期变暖范围在 1.6℃~5℃之间, 平均增温为 3.5℃, 年降水量增加 1.5%~20%, 平均达 7.5%。

(2) 在 A2、A1B 和 B1 排放情景下, 21 世纪末期中国地区年均气温预估增幅依次为 5.3℃、4.3℃和 2.8℃。其中冬季的变暖最明显。各种排放情景下增温分布基本一致, 都呈现高原增温最大, 东北、西北、华北次大, 其余地区则由东南向西北递增分布, 但增温幅度 A2 情景下最高。

(3) 对应 A2、A1B 和 B1 排放情景, 21 世纪末期中国地区年降水量可能依次增加 11%、9.6%和 6.4%。其中冬、春季的降水增加较明显。各种排放情景下降水变化分布基本一致, 年降水增加显著区域为华北、西北及东北地区, 长江中下游沿岸及以南地区有小幅度增加。

(4) 与 IPCC 第三次报告的预估结果相比, AR4/IPCC 各模式预估结果间的差异性明显减小, 表明新一代全球系统模式对 21 世纪中国气候变化预估的可靠性得到了提高。

目前由于全球气候模式的分辨率还较低, 气候模式在物理及参数化过程等诸方面还有待完善, 未来可以考虑利用各种降尺度方法对该区域的气候进行预估, 并加强预估问题中的不确定性研究。

致谢: 本文采用的模式资料均由 the Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) 提供, 在此深表感谢。

参考文献:

- [1] 王会军, 曾庆存, 张学洪. CO₂ 含量加倍引起的气候变化的数值模拟研究. 中国科学(B辑), 1992, 35(6): 663~672.
- [2] Y F Guo, Y Q Yu, X Y Liu, *et al.* Simulation of climate change induced by CO₂ increasing for East Asia with IAP/ LASG GOALS model. Adv. Atmos. Sci., 2001, 18(1): 53~66.
- [3] 高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 黄荣辉. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化. 气象学报, 2003, 61(1): 29~38.
- [4] 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测. 地球物理学报, 2004, 47(4): 590~596.
- [5] Y Luo, Z C Zhao, Y Xu, *et al.* Projections of climate change over China for the 21st century. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 19(4): 401~406.
- [6] 张光辉. 全球气候变化对黄河流域天然径流量影响的情景分析. 地理研究, 2006, 25(2): 268~275.
- [7] 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估. 应用气象学报, 2002, 13(5): 513~525.
- [8] 石广玉, 王喜红, 张立盛, 等. 人类活动对气候影响的研究 II: 对东亚和中国气候变化的影响. 气候与环境研究, 2002, 7(2): 255~266.
- [9] 许吟隆. 中国 21 世纪气候变化的情景模拟分析. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 323~329.
- [10] Xu Y, Zhao Z C, Luo Y, *et al.* Climate change projections for the 21st century by the NCC/IAP T63 model with SRES scenarios. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 19(4): 407~417.
- [11] Xu Y L, Zhang Y, Lin E D, *et al.* Analyses on the climate change responses over China under SRES B2 scenario using PRECIS. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(18): 2260~2267.
- [12] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇. IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 183~184.
- [13] Houghton J T, Y H Ding, Griggs D G, *et al.* Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 1~881.
- [14] Qin D H, Solomon S. Summary for Policymakers, Climate Change 2007, the Physical Science Basis. New York: Cambridge University Press, 2007. 1~18.
- [15] Kim S J, Flato G M, Boer G J, *et al.* A coupled climate model simulation of the Last Glacial Maximum, Part 1: transient multi-decadal response. Climate Dynamics, 2002, 19: 515~537.
- [16] Salas M'elia D, Chauvin F, D'equ'e M, *et al.* Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled climate model. Climate Dynamics, submitted, 2005.
- [17] Gordon H B, Rotstayn L D, McGregor J L, *et al.* The CSIROmk3 Climate System Model, CSIRO Atmospheric Research, Tech. Rep. No. 60, 2002.
- [18] Delworth T L, Broccoli A J, Stouffer R J, *et al.* GFDL's CM2 global coupled climate models. Part 1: Formulation and simulation characteristics. Journal of Climate, 2006, 19: 643~674.
- [19] Schmidt G A, Ruedy R, Hansen J E, *et al.* Present day atmospheric simulations using GISS Model: Comparison to in situ, satellite and reanalysis data. Journal of Climate, 2006, 19: 153~192.
- [20] Volodin E M, Diansky N A. El-Nino reproduction in coupled general circulation model of atmosphere and ocean. Russian Meteorology and Hydrology, 2004, 12: 5~14.
- [21] Marti O, Braconnot P, Bellier J, *et al.* The new IPSL climate system model: IPSL-CM4, Tech. Rep. IPSLCM4. Institute Pierre Simon Laplace, Paris, 2005.
- [22] Hasumi H, Emori S. K-1 model developers: K-1 coupled model (MIROC) description, K-1 Tech. Rep. 1, Center for Climate System Research, University of Tokyo, 2004.
- [23] Min S K, Legutke S, Hense A, *et al.* East Asian climate change in the 21st century as simulated by the coupled climate model ECHO-G under IPCC SRES scenarios. Journal of the Meteorological Society of Japan, Revised, 2005.
- [24] Jungclaus, J H, Botzet M, Haak H, *et al.* Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM. Journal of Climate, 2006, 19(16): 3952~3972.
- [25] Gordon C, Cooper C, Senior C A, *et al.* The Simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. Climate Dynamics, 2000, 16: 147~168.

- [26] Washington W M, Weatherly J W, Meehl G A, *et al.* Parallel climate model (PCM) control and transient simulations. *Climate Dynamics*, 2000, 16: 755~774.

Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 Models

JIANG Zhi-hong, ZHANG Xia, WANG Ji

(Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Using the outputs as simulated by 13 GCM models provided by the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-AR4), the situation of climate change in China in the future 100 years under SRES A2, A1B and B1 greenhouse gas is analyzed. We analyzed linear tendency, time series and annual changes of temperature and precipitation in all scenarios. The results show that the climate in China has a warming and wetting tendency in the 21st century. The range of temperature changes is from 1.6°C ~ 5°C, the mean warming is 3.5°C, and precipitation is from 1.5% ~ 20% with a mean of 7.5%. Considering the effect of SRES A2, A1B and B1, the temperature in China would be increased by 5.3°C, 4.3°C and 2.8°C respectively at the end of the 21st century. The precipitation would be increased by 11%, 9.6% and 6.4% at the end of 21st century. The largest range of warming is in winter, while the increase of precipitation is larger in winter and spring. The distributions of the mean temperature and precipitation in China were analyzed in this paper. The results indicated that the distributions of temperature are almost similar in all the scenarios, the warming over the northern part is greater than that in the southern part of China, but the warmest scenario is A2. The warmest area is in plateau, the second is near northeast and northwest of China, the other areas will increase from southeast to northwest gradually. And the distributions of precipitation are almost similar in all the scenarios too. The distribution of increased precipitation in China is also in the northern part of China. Precipitation increases obviously in North, Northwest and Northeast China, and increase in the region south of the Yangtze River. Compared with results of Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC-TAR), differences among models supplied by IPCC-AR4 have been obviously reduced. The ensemble standard deviation of different models suggests that the uncertainty of the projected climate changes over China in the 21st century has been improved. But the resolution of GCM is still low currently, we could consider other methods, such as downscaling (dynamic or statistic), then estimate area climate changes in the future.

Key words: IPCC-AR4; scenarios projection; China