

CMIP3 气候模式对北疆气候变化 模拟评估及未来情景预估

陶 辉¹, 白云岗², 毛炜峰³

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008;
2. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049; 3. 新疆气候中心, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 利用北疆地区 1961~2000 年气温、降水观测数据和 CMIP3 (phase 3 of the Coupled Model Inter-comparison Project) 提供的 20 个海气耦合模式在该地区的模拟结果, 评估了各气候模式对北疆地区降水、气温的模拟效果。结果表明: 各气候模式对气温、降水模拟效果差异较大。从对气候平均态的模拟来看, 有 5 个模式对降水的模拟相对较好, 2 个模式对气温的模拟相对较好; 所有模式均能模拟出气温的年内变化特征, 其中 MPI_ECHAM5 模式结果与观测数据结果最为接近; 但各模式对降水的模拟效果均较差。在月尺度上, 一些模式结果与降水观测数据呈负相关性, 但对于月气温, 大多数模式与其相关性较好, 且各模式间月气温均方根误差变化幅度相对较小。综合来看, 大部分气候模式在该地区模拟能力比中国东部地区要弱; 气候模式的降水数据包括多模式集合数据还不适合用于未来北疆地区降水变化预估分析。最后, 采用累计分布函数法 (CDF_s) 仅对北疆地区 2011~2050 年时段的气温进行偏差校正与预估分析, 结果表明未来 40 年北疆地区气温在三种排放情景下均呈上升趋势。

关键词: 气温; 降水; 北疆地区; 气候模式; 预估

文章编号: 1000-0585(2012)04-0589-08

1 引言

由世界气候研究计划 (WCRP) 推动制定的气候模式 CMIP 计划, 即全球大气环流气候模式比较计划, 有力地推动了气候模式的发展, 并为 IPCC 第四次报告 (AR4) 的发布提供了重要信息。同时也为全球变化背景下预估未来气候变化提供了可靠的科学依据^[1~3]。该计划提供的气候模式资料激发了国内外学者在气候模式比较、未来气候情景预估以及生态水文学科的相关研究。如 Dai 利用观测数据评估了 18 个最新的耦合气候模式对全球降水频率、强度的时空变化、与 ENSO 有关的变化以及层状降水与对流性降水比例的模拟能力^[4]; Perkins 等利用概率密度函数评估了气候模式对澳大利亚极端降水、气温的模拟能力^[5]; Annan 等还对 CMIP3 的模式集合的可靠性进行了研究^[6]。在国内, 姜大膀等利用 SRES A2 情景下的多模式集合对我国大陆及东亚地区未来气温、海平面气压变化以及干湿变化进行了研究并指出未来 (2021~2030 年) 冬季气温增幅在东北、新疆

收稿日期: 2011-04-23; 修订日期: 2011-11-15

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室开放基金; 国家自然科学基金 (41101023); 水利部公益性行业科研专项 (201001066); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金联合资助

作者简介: 陶辉 (1981-), 男, 新疆昌吉人, 博士, 主要从事气候变化对水资源影响研究。

E-mail: taohui0911@yahoo.com.cn

和青藏高原中东部地区较大^[7~8]，并基于 17 个气候模式在 20 世纪气候模拟试验和不同排放情景下的数值模拟结果，通过多模式集合方法评估了 1°C、2°C 和 3°C 3 个变暖值在中国的时空分布特征^[9]；刘敏等利用 13 个最新全球气候系统模式及多模式集合对中国近 40 年地面气温和降水的模拟能力进行了分析，结果表明：最新全球模式对中国地区地面气温年变化及空间分布的模拟结果均较好，但在整个模拟区域地面气温模拟值系统性偏低，东部地区模拟效果好于中西部；对于降水，大部分模式能模拟出中国降水的年变化及空间分布特征，但模拟的区域性差别较大，多数模式对中国东部季风区夏季雨带北抬的过程有一定的模拟能力，但模拟雨带位置偏北^[10]；许崇海等分别对气候模式在东亚和我国的气候模拟能力进行了分析^[11~13]；Xu 等利用多模式的集合平均值对长江流域未来极端降水情景进行了预估分析^[14]；此外，江志红等利用 IPCCAR4 的 13 个模式对中国 21 世纪气候变化的情景进行了预估并对 7 个模式在中国地区极端降水的模拟能力进行了评估，结果表明模式集合模拟能力优于大部分单个模式，但在青藏高原地区存在虚假的极端降水高值区^[15~16]，因此，气候模式数据的评估在地形复杂地区更具有特殊的意义。

北疆地区地处西风环流带内，地形复杂，气温、降水空间变异性较大。气温、降水作为影响干旱区地表水资源的重要气候因子，对该区域水资源变化影响较大。因此，本文基于气温、降水观测数据（1961~2000 年），对 CMIP3 中的 20 个气候模式在北疆地区的气温、降水模拟性能进行了评估。最后采用模拟效果相对较好的模式对未来（2011~2050 年）北疆地区气温变化进行了预估分析。

2 数据来源与研究方法

本文观测数据采用北疆地区 44 个气象站点 1961~2000 年气温、降水逐月数据（图 1）。气候模式数据采用中国气象局国家气候中心整编的 IPCC AR4 中使用的 20 个气候模式数据（表 1）。各模式采用三种温室气体排放情景：SRES-A2（高排放，注重经济增长的区域发展），SRES-A1B（中排放，注重经济增长的全球共同发展），SRES-B1（低排放，强调环境可持续发展的全球共同发展）^[17]。各模式已经线性插值降尺度成为分辨率为 1°×1°的经纬格点数据，有 48 个格点位于北疆地区。不同 SRES 情景下所使用的模式数量不同，即：SRES-A1B 和 SRES-B1 各 17 个模式，SRES-A2 情景下 16 个模式（表 1）。

气候模式结果是否接近观测结果通常使用的方法是计算两者相关系数（Correlation Coefficient）与均方根误差（Root Mean Square Error）。相关系数侧重于两者的形态相似情况，而均方根误差则是评估两者离散程度是否接近。大多数文献对于模式的评估往往分别比较相关系数与均方根误差，Taylor 在 Program for climate Model Diagnosis and Inter-comparison (PCMDI) 的技术报告上发表了 Taylor Diagram，将相关系数与均方根误差同时描绘在了二维图上^[18]。其原理如下：

$$\text{相关系数: } R = \frac{\frac{1}{N} \pm \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sigma_f \sigma_r} \quad (1)$$

$$\text{均方根误差: } E = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\text{若 } \bar{E} = \bar{f} - \bar{r} \text{ 且 } E = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(f_n - \bar{f}) - (r_n - \bar{r})]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

表 1 气候模式信息及其对北疆地区年平均气温、降水（1961~1990）模拟结果统计

Tab 1 Summary of the climate model used in this analysis and the result of precipitation and temperature simulations in the Beijiang region

编号	气候模式	所属国家	气候情景	分辨率	平均值	
					气温（℃）	降水（mm）
B	CCCMA _3	加拿大	A1B, A2, B1	3. 75°×3. 71°	0. 3	210. 4
C	CNRMCM3*	法国	A1B, A2, B1	2. 81°×2. 79°	3. 0	457. 8
D	CSIRO _MK3	澳大利亚	A1B, A2, B1	1. 88°×1. 87°	0. 0	357. 9
E	GFDL _CM2 _0	美国	A1B, A2, B1	2. 5°×2. 0°	0. 4	225. 8
F	GFDL _CM2 _1	美国	A1B, A2	2. 5°×2. 0°	2. 9	144. 0
G	GISS _AOM	美国	A1B, B1	4. 0°×3. 0°	6. 4	299. 4
H	GISS _E _H*	美国	A1B	5. 0°×4. 0°	9. 1	160. 6
I	IAP _FGOALS*	中国	A1B, B1	2. 81°×2. 79°	2. 8	307. 8
J	INMCM3	俄罗斯	A1B, A2, B1	5. 0°×4. 0°	2. 0	349. 2
K	IPSL _CM4*	法国	A1B, A2, B1	3. 75°×2. 54°	0. 2	588. 5
L	MIROC3	日本	A1B, A2, B1	1. 13°×1. 12°	4. 9	320. 3
M	MIROC3 _H	日本	A1B, B1	2. 81°×2. 79°	4. 5	391. 7
N	MIUB _ECHO _G	德国	A1B, A2, B1	3. 75°×3. 71°	2. 2	302. 2
O	MPI _ECHAM5	德国	A1B, A2, B1	1. 88°×1. 87°	4. 6	200. 1
P	MRI _CGCM2	日本	A1B, A2, B1	2. 81°×2. 79°	3. 1	197. 8
Q	NCAR _CCSM*	美国	A1B, A2, B1	1. 41°×1. 40°	2. 6	319. 8
R	UKMO _HADCM3*	英国	A1B, A2, B1	3. 75°×2. 5°	2. 6	190. 4
S	BCCR _BCM2 _0 *	挪威	A2, B1	2. 81°×2. 79°	1. 5	425. 0
T	GISS _E _R	美国	A2, B1	5. 0°×4. 0°	8. 1	161. 9
U	NCAR _PCM*	美国	A2	2. 81°×2. 79°	0. 3	187. 2

注：* 表示该模式 20 世纪模拟数据截止期为 1999 年 12 月。

则
$$E^2 = \sigma_f^2 + \sigma_r^2 - 2\sigma_f\sigma_r R \tag{4}$$

其中， f_n 为模式数据， r_n 为观测数据， σ_f 为模式标准差， σ_r 为观测数据标准差；上标“—”为平均值， N 为北疆地区的格点数。根据余弦定理， σ_f^2 与 σ_r^2 所夹角度即为相关系数，而对边长即为均方根误差，这样就将相关系数与均方根误差同时描绘在了二维图上。

3 各模式对北疆地区气温、降水模拟能力评估

3.1 年平均气温、降水量的模拟

由于各模式 20 世纪模拟数据截止日期不同，本文在各模式对北疆地区平均气温、降水模拟能力的评估中统一采用 1961~1990 年时段的平均值进行对比分析。对北疆地区 44 站年平均气温、降水量分析表明：1961~1990 年时段年平均气温、降水量分别为 4. 4℃、174. 8mm。从表可看出大部分模式的年平均降水量要高于北疆地区的平均值，特别是法国的 IPSL _CM4 和 CNRMCM3 模式以及挪威的 BCCR _BCM2 _0 模式，与观测数据的平均值差别较大。美国的 GISS _E _R、GISS _E _H 和 NCAR _PCM，英国的 UKMO _HADCM3 模式以及日本的 MRI _CGCM2 对年平均降水量的模拟相对较好，相对误差均在 10% 以内。

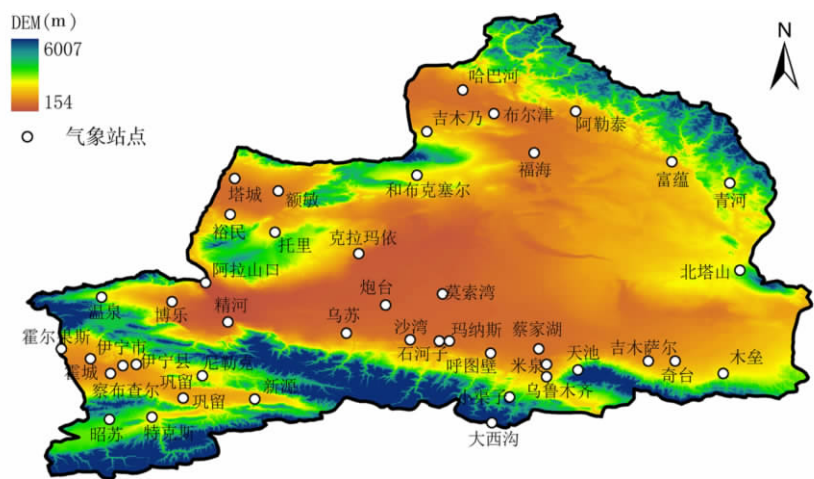


图 1 北疆地区气象站点分布示意图

Fig. 1 Location of the Beijiang Region and the meteorological stations

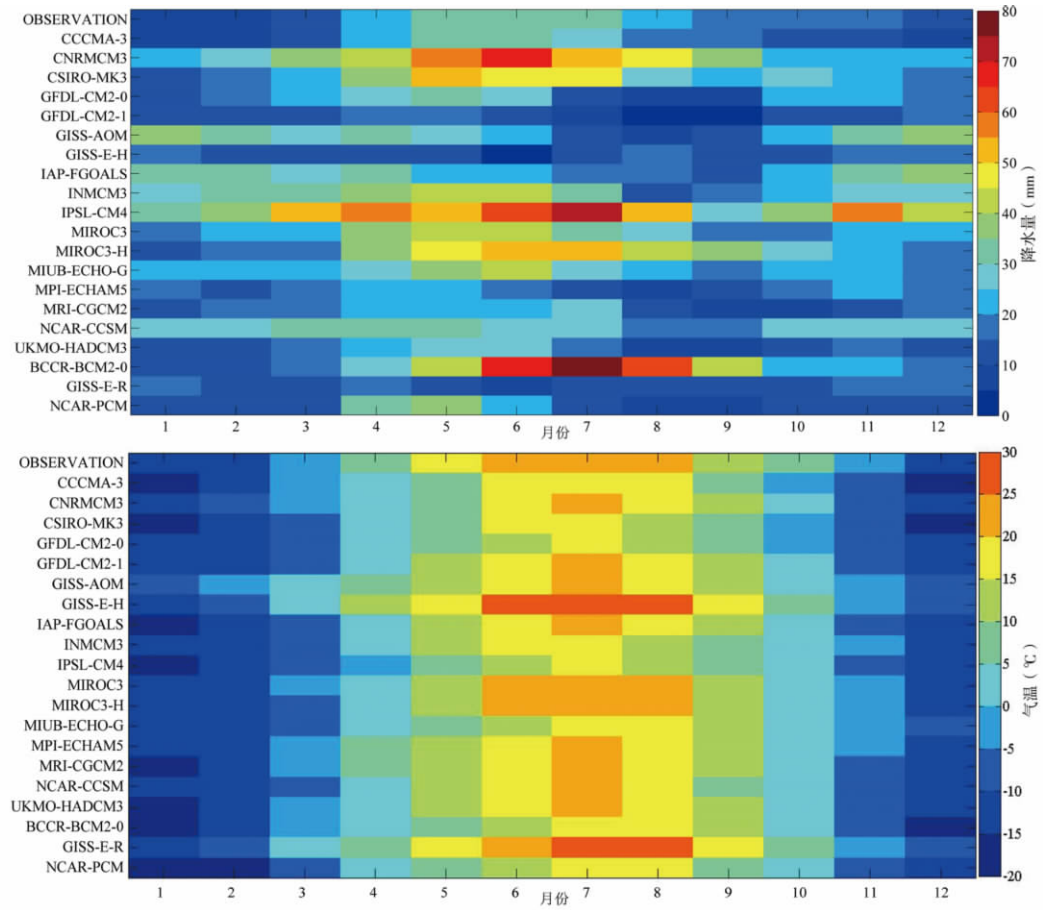


图 2 各模式输出的降水 (上图)、气温 (下图) 年内变化与观测数据比较

Fig. 2 Seasonal cycle of precipitation and temperature over the Beijiang region observed and simulated by different models

对于气温, 日本的 MIROC3 __H 模式和德国马普气象研究所的 MPI __ECHAM5 与观测数据的平均值较为接近, 相对误差在 5% 以内。而美国的 GISS __E __R 和 GISS __E __H 模式则相对较差, 值得注意的是, 这 2 个模式的原始分辨率亦是所有模式中最底的。因此可以推断气候模式的分辨率在一定程度上对该地区气温模拟产生了影响。

3.2 气温、降水年内分布模拟

对比观测数据与各模式对北疆地区的降水年际变化模拟结果来看, 观测数据的年际变化幅度较大, 大部分模式不能很好模拟。通过对降水的变差系数 (C_v) 比较可知, 仅美国的 GISS __E __H 模式的变差系数 (0.22) 与观测数据接近 (0.26), 其余模式都明显偏小。而大多数模式都能模拟出气温上升的趋势, 尤其是 20 世纪 90 年代以来的变化趋势。但对于 20 世纪 60 年代末和 80 年代中期的两个比较明显的负距平值的模拟比较差。

从各模式对降水的年内变化模拟 (图 2) 可看出, 各模式结果差异较大, 而且与观测数据反映的实际情况差异也比较大。其中美国的 GISS __E __R 和 GISS __E __H 模式的最小降水月份出现在六月; 而法国的 IPSL __CM4 模式的降水最大月份出现在四月; 美国的 NCAR __PCM 模式和日本的 MIROC3 以及德国的 MPI __ECHAM5 的最大降水月份均出现在五月, 显然与实际不符。此外, 尽管部分模式模拟出了最大降水月份, 但远高于观测值。相对于降水, 各模式都能很好的模拟出气温的年内变化情况。但美国的 GISS __E __R 和法国的 IPSL __CM4 模式与观测数据反映的各月气温相比, 分别偏高和偏低。而德国的 MPI __ECHAM5 模式与观测数据最为接近。

3.3 逐月气温、降水变化模拟

为进一步分析气候模式模拟结果与实测资料的相似性, 本文利用 Taylor 图对气候模式输出的北疆地区 1961~1990 年间月气温、降水变化也行了对比分析。从图 3 可以看出, 各模式输出的月降水量与观测数据的相关性较低, 一些模式甚至与观测数据呈负相关关系 (如模式 G: GISS __AOM 和 T: GISS __E __R), 特别是美国的 GISS __E __R 模式, 尽管

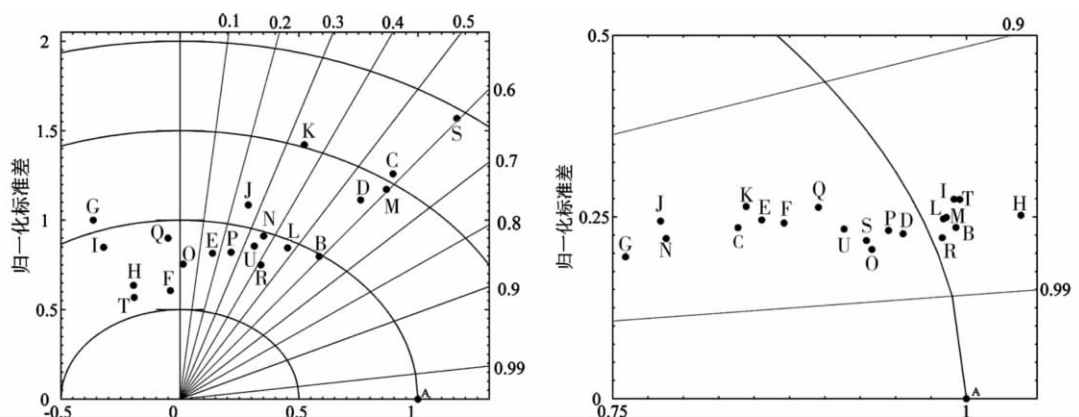


图 3 各模式输出的月降水 (左图)、气温 (右图) 与观测数据的 Tolor 图 (模式编号见表 1, A 代表观测数据结果)

Fig. 3 Taylor diagram showing correlations and standard deviation of the modelled and observed monthly precipitation (left) and temperature (right) data. (The radial coordinates display the modelled and observed correlation coefficients, while on the x axis the standard deviation is plotted, with capitalized letters shown according to the model codes in Table 1, A denotes the observed data)

其输出的年平均降水量与观测结果接近。此外，各模式均方根误差变化幅度较大，说明模式与模式之间、各模式与观测数据结果差异较大。而对于气温，各模式的月气温与观测数据的结果相关系数都比较高，其中 MPI_ECHAM5 模式的均方根误差与观测数据结果最为接近。个别模式的均方根误差明显偏小（如模式 G：GISS_AOM 和 N：MIUB_ECHO_G），总体来看，气候模式对月气温的模拟要好于对月降水量变化的模拟，这也再一次印证了 3.2 节的结果。

4 北疆地区未来气温情景预估

从 CMIP3 提供的 20 个模式对北疆气温变化模拟结果来看，无论是年际、年内还是月尺度，都明显好于对降水的模拟。综合来看，德国马普气象研究所的 MPI_ECHAM5 模式对北疆地区气温变化模拟较好。鉴于各模式对降水变化模拟能力较差，本节采用累计分布函数法（CDFs），以观测数据（1970~1999 年）为基础，仅对北疆地区未来（2011~2050 年）气温进行偏差校正（Bias Correction）及预估分析，由于篇幅所限，偏差校正具体步骤请参考文献 [19, 20]。

从气温距平的年代际变化看，2011~2030 年时段升温幅度相对于 1961~1990 年时段在 1~2℃ 之间。从升温绝对值看，2010s~2030s 阶段高排放情景即 A2 情景下气温上升幅度最大，但在 2040s 阶段，气温在 A1B 情景下上升幅度最大，而低排放情景即 B1 情景下在各个时段气温上升幅度均属最小（表 2）。

表 2 不同排放情景下未来北疆地区气温距平
年代际变化（相对于 1961~1990 年）

Tah 2 Decadal changes of bias corrected temperature in the Beijiang region
(compared with 1961-1990)

年代	△气温 (°C)		
	SRE A1B	SRE A2	SRE B1
2010s	1.13	1.66	1.08
2020s	1.88	1.90	1.85
2030s	1.96	1.02	1.60
2040s	1.26	1.24	1.92

5 结论与讨论

利用北疆地区 44 个气象站 1961~2000 年气温、降水观测数据和 CMIP3 提供的 20 个全球海气耦合模式在该地区的模拟结果，评估了各气候模式对北疆地区降水、气温的模拟效果。结果表明：

（1）5 个模式（GISS_E_R、GISS_E_H，NCAR_PCM，UKMO_HADCM3 以及 MRI_CGCM2）对年平均降水量的模拟与观测结果较为接近，相对误差均在 10% 以内；2 个模式（MIROC3_H 和 MPI_ECHAM5）的年平均气温与观测结果接近，相对误差在 5% 以内。

（2）相对于观测结果，气候模式模拟的降水、气温的年际变化幅度明显偏小，尤其

是降水。

(3) 各气候模式均能很好地模拟出气温的年内分布特征, 其中 MPI_ECHAM5 对气温年内变化的模拟相对较好; 各模式对降水的年内变化特征模拟较差。

(4) 各模式的月降水量与观测结果相关性较低, 且各模式均方根误差变化幅度较大; 而对月气温的模拟相对较好, 其中 MPI_ECHAM5 的均方根误差与观测结果最为接近。

(5) 根据气候模式偏差校正结果, 北疆地区未来气温在 3 种排放情景下均呈上升趋势。

通过以上分析可看出: 尽管气候模式在北疆地区具有一定的模拟能力, 但气候模式间差异较大, 各模式对不同时间尺度的气温模拟效果与降水相比要好, 这与国内大部分文献报道结果大体一致, 但由于北疆特殊的地理位置, 使得大部分气候模式在该地区模拟能力比中国东部地区要弱。因此, 气候模式的降水数据包括多模式集合数据还不适合用于未来北疆地区降水变化预估分析。

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了整理、分析和惠许使用。原始数据由各模式组提供, 由 WGCM (JSC/CLIVAR Working Group on Coupled Modelling) 组织 PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Inter-comparison) 搜集归类。多模式数据集的维护由美国能源部科学办公室提供资助。实测降水、气温数据由中国气象局新疆气候中心和中国气象局国家气候中心提供。

参考文献:

- [1] 王澄海, 吴永萍, 崔洋. CMIP 研究计划的进展及其在中国地区的检验和应用前景. 地球科学进展, 2009, 24(5): 461~467.
- [2] Covey C, AchutaRao K M, Cubasch U, *et al.* An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. Global Planetary Change, 2003, 37: 103~133.
- [3] Meehl G A, Covey C, Delworth T, *et al.* The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. Bulletin of American Meteorological Society, 2007, 88: 1383~1394.
- [4] Dai A G. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. Journal of Climate, 2006, 19: 4605~4629.
- [5] Perkins S E, Pitan A J, Holbrook N J, *et al.* Evaluation of the AR4 Climate Models' simulated daily maximum temperature, minimum temperature, and precipitation over Australia using probability density functions. Journal of Climate, 2007, 20: 4356~4376.
- [6] Annan J D, Hargreaves J C. Reliability of the CMIP3 ensemble. Geophysical Research Letters, 2010, 37, L02703, doi:10.1029/2009GL041994.
- [7] 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. 地球物理学报, 2004, 47(5): 776~784.
- [8] 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估. 大气科学, 2009, 33(1): 90~98.
- [9] 姜大膀, 张颖, 孙建奇. 中国地区 1~3℃ 变暖的集合预估分析. 科学通报, 2009, 54(24): 3870~3877.
- [10] 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. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 256~268.
- [11] 许崇海, 沈新勇, 徐影. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析. 气候变化研究进展, 2007, 3(5): 287~292.
- [12] 许崇海, 罗勇, 徐影. IPCC AR4 多模式对中国地区干旱变化的模拟及预估. 冰川冻土, 2010, 23(5): 867~874.
- [13] Chen Huopo, Sun Jianqi. How the "Best" models project the future precipitation change in China. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(4): 773~782.
- [14] Xu Y, Xu C H, Gao X J, *et al.* Projected changes in temperature and precipitation extremes over the Yangtze Riv-

er Basin of China in the 21st century. *Quaternary International*, 2009, 208: 44~52.

- [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. *大气科学*, 2009, 33(1): 109~120.
- [16] 江志华,张霞,王冀. IPCC AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估. *地理研究*, 2008, 27(4): 787~799.
- [17] IPCC. *Climate Change 2007: The AR4 Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [18] Taylor K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 7183~7192.

Assessment of CMIP3 climate models and projected climate changes in northern Xinjiang

TAO Hui¹, BAI Yun-gang², MAO Wei-yi³

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Xinjiang Academy of Water Resource and Hydropower, Urumqi 830049, China; 3. Xinjiang Climate Center, Urumqi 830002, China)

Abstract: Based on the observed precipitation and temperature data of 44 meteorological stations for the period 1961–2000 in northern Xinjiang(Beijiang), the projected changes of precipitation and temperature in this region in the 20th century of 20 models from the CMIP3 (phase 3 of the Coupled Model Inter-comparison Project) dataset are evaluated. The results show that large differences can be found in the simulations of precipitation and temperature. For the climate mean state, there are 5 models with better results in temperature, namely, the GISS_E_R model, GISS_E_H model, NCAR_PCM model, UKMO_HADCM model and MRI_CGCM2 model, and 2 models with better results in precipitation. On annual scale, the amplitudes of most models are bigger than observed data, all the models can reproduce the annual cycle of the temperature, and the MPI_ECHAM5 model is superior to the remaining models. The annual cycle of precipitation is poorly captured by all the models. On monthly scale, most models show a relatively high correlation coefficient with the observed data, but in terms of precipitation, some models show a negative correlation coefficient, and the amplitude of Root Mean Square Error of each model is relatively small in the monthly temperature. In conclusion, the simulations of temperature are much better than those of precipitation by climate models. Finally, the MPI_ECHAM5 model is selected to project the temperatures of northern Xinjiang region for the period 2011–2050, and the result shows that temperature will increase consistently under the three emission scenarios.

Key words: temperature; precipitation; climate models; projection; northern Xinjiang