

5个海气耦合模式模拟东亚区域 气候能力的初步分析*

王淑瑜 熊 喆

(中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘 要 分析了CGCM1、CSIRO MK2、ECHAM4、HadCM2和GFDL共5个海气耦合模式模拟的东亚地区地面气温和降水量的多年平均值, 并与观测值进行了比较, 以初步考察全球模式对区域气候的模拟能力。结果表明, 所有的模式对东亚地区地面气温及年变化的模拟结果均较好, 但在整个模拟区域地面气温模拟值偏低, 冬半年模拟结果较夏半年差; 模式能模拟出东亚地区降水的时空分布特征, 但模拟的区域性差别比较大, 模式对西北、东北地区的模拟效果较差, 就季节变化而言, 冬、春模拟降水偏大。比较结果显示, ECHAM4和HadCM2对东亚地区地面气温和降水场的模拟效果优于其他模式。

关键词: 海气耦合模式; 降水; 地面气温

文章编号 1006-9585 (2004) 02-0240-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

1 引言

目前利用耦合的全球模式已能比较准确地模拟大尺度运动的特征, 但气候系统既有大尺度的全球特征, 也具有中、小尺度的区域特征。我们关注的不仅是全球平均的气候变化, 还有区域尺度上的气候变化。为预测在全球变化背景下区域气候及气候变化的特征, 通常采用3种方法: 一是发展高分辨率和变网格的全球气候模式 (General Climate model, 即GCM), 以期达到对区域气候的模拟; 二是利用经验/统计和经验/动力方法; 三就是发展适用于区域气候模拟的区域气候数值模式。区域气候模式需要观测值或GCM的输出作为初始场和边界场。为预测未来20~50年我国生存环境的变化, 有必要对不同GCM的模拟结果进行检验, 以选择得到驱动区域模式所需的背景场。

东亚地区自然条件复杂, 人类活动频繁, 同时又有着特殊的季风气候背景, 利用数值模式研究东亚地区的气候大多集中在对季风的模拟研究上。例如世界气象组织(WMO)和季风数值实验组(MONEG)对5个全球海气耦合GCM模拟的亚洲季风作了比较, 这5个模式包括CWRM、ECHAM、UKMO、NCAR和MRI。模拟结果表明, 这些低分辨率模式能够模拟基本的季风特征, 但在模拟季风场(如降水、低层气流)时有显著的弱点。Grotch^[1]等比较了4种GCM模拟结果与观测之间的差别, 发现全球平均模拟的气温与观测值之差小于0.9℃, 但在不同的大陆上冬季模拟气温与实

2004-02-16收到, 2004-04-09收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目G1999043403资助

测相差 3.1~5.9 °C, 夏季两者相差达 2.3~5.1 °C。程伟等^[2]分析了 CCM1/NCAR 模式对中国东部区域气候的模拟能力。俞永强等^[3]则利用 IAP/CGCM 的模拟结果初步分析了模式对东亚区域年平均温度和降水的空间分布以及中国东部 3 个地区季节循环和异常气候的模拟能力。比较结果表明, 这些模式都有一定的模拟能力, 但同时存在着明显的系统误差。另外, 不同模式在模拟不同季节的多个变量时各有所长, 冬季的模拟结果比夏季好。

上述分析结果说明全球模式对全球平均气候态有一定的模拟能力, 但对于具有独特季风气候特征的东亚地区模拟能力较弱。近几年来 GCM 有了进一步发展, 如模式分辨率提高, 耦合了更多对气候系统有重要影响的物理过程。本文利用 IPCC 数据发布中心 (IPCC Data Distribution Centre, <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/>) 较新发布的 5 个全球海气耦合模式 (CGCM1、CSIRO MK2、ECHAM4、GFDL、HadCM2) 的高分辨率积分结果, 针对东亚地区分析全球海气耦合模式的模拟能力, 以期为进一步改进 GCM 的模拟能力提供帮助, 也为高分辨率的区域气候模式的模拟与试验设计提供依据。本文比较了 30 年 (1961~1990 年) 平均的地面空气温度和降水, 并利用 CRU (Climate Research Unit of University of East Anglia) 的实测资料^[4]对模拟结果进行了检验。

2 全球模式对东亚地区气候场的模拟

2.1 数据介绍

利用 IPCC 数据发布中心提供的 5 个全球海气耦合模式高分辨率积分所得到的月平均地面气温和降水, 与 CRU 实测资料比较, 以考察全球模式对东亚地区气候的模拟能力。

关于参加比较的 5 个海气耦合模式的详细资料见文后附录。

分析所利用的实测资料是 IPCC 数据发布中心提供的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ CRU 全球数据集 (CRU Global Climate Dataset)。数据集中包括了 1961~1990 年全球和区域的月平均气候场以及 1901~1995 年气候异常时间序列。

2.2 地面空气温度和降水的年变化

图 1 为研究所选择的区域。参照中国科学院的中国气候规划方案^[5,6], 将中国部分分为 6 个子区域, 分别为: 西北干旱区 ($35^{\circ} \sim 46.5^{\circ} \text{N}$, $78^{\circ} \sim 103^{\circ} \text{E}$); 东北地区 ($40^{\circ} \sim 53.5^{\circ} \text{N}$, $119.16^{\circ} \sim 135.3^{\circ} \text{E}$); 内蒙古半干旱地区分为 4 个部分 ($38^{\circ} \sim 43^{\circ} \text{N}$, $100^{\circ} \sim 109^{\circ} \text{E}$), ($40^{\circ} \sim 45^{\circ} \text{N}$, $109^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$), ($45^{\circ} \sim 52^{\circ} \text{N}$, $116^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$), ($35^{\circ} \sim 38^{\circ} \text{N}$, $105^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$); 华北地区 ($32^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$, $102^{\circ} \sim 112^{\circ} \text{E}$); 华中地区 ($25^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$, $103^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$); 华南地区 ($18^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$, $103^{\circ} \sim 122^{\circ} \text{E}$)。下面分别讨论各子区域内模式对 30 年平均地面气温和降水逐月变化的模拟结果。

图 2 为 6 个子区域 30 年 (1961~1990 年) 平均逐月地面气温的比较结果。可以看出, 所有模式均能反映出各个子区域内地面气温的年变化, 但模式气温普遍较实测值低; 5 个模式中, GFDL、CSIRO MK2 和 CGCM1 的模拟效果接近, 5~10 月的模拟结果优于其他月份, 冬季模式气温与实测偏差最大, 尤其在华中、华南地区, 冬季最大

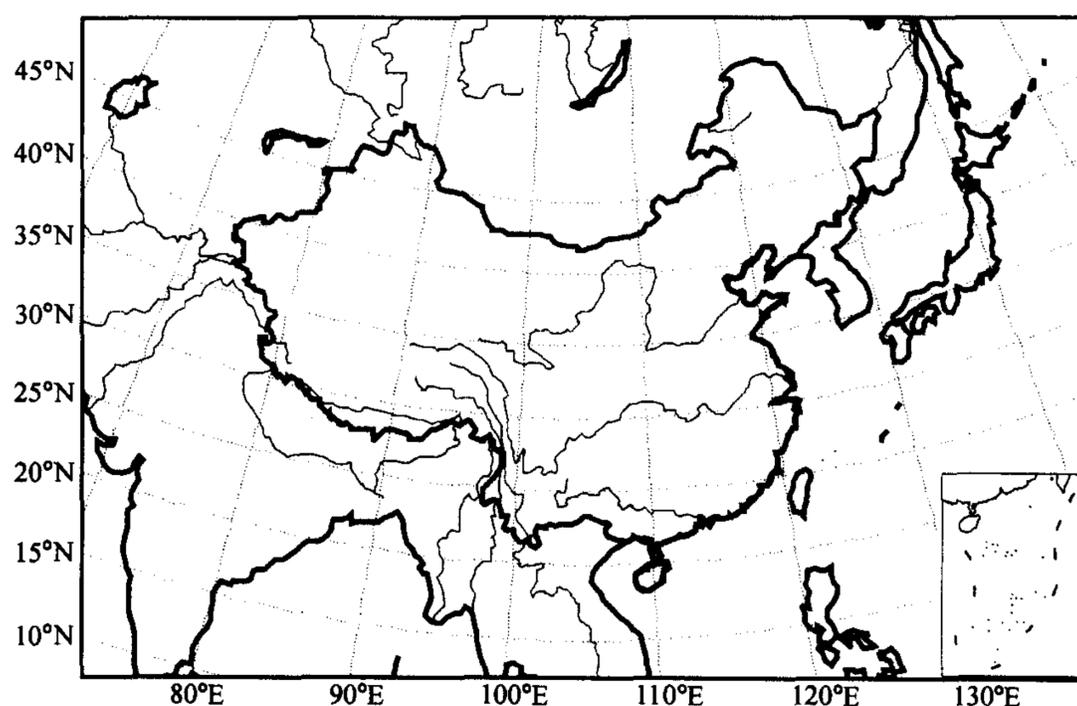


图1 比较分析区域

误差可达 -20°C 。比较而言，ECHAM4 和 HadCM2 的模拟结果与实测值比较接近，其误差绝对值不大于 5°C 。

图3是6个子区域内30年(1961~1990年)降水的逐月变化。由图可以看出模式对降水的模拟结果比温度的差，降水的季节变化也复杂得多，各个子区域的模拟效果差别较大。

模式能模拟出西北、内蒙古、华北地区降水的年变化，但未能准确描述最大降水月的出现，同时模式雨量偏大。其中，西北地区最大降水月为7月，最大日降水量为 0.8 mm d^{-1} 。HadCM2 和 ECHAM4 的最大降水月提前至5月，但对6~8月模拟结果良好；CSIRO MK2 的最大降水月与实测值符合，但全年雨量偏大，尤其在7月，峰值降水达 3.3 mm d^{-1} 。GFDL 和 CGCM1 的最大降水月提前，模拟雨量在所有时段上偏大。

华北地区最多降雨集中在7月，其次在8月，6月占第3位。没有模式模拟出如上降水特征。模拟结果显示，CGCM1 的模拟效果相对较好，但雨量略大；GFDL 的降水在所有时段上存在较大正偏差且最多降水月为6月；ECHAM4 模拟的春季降水偏多，最多雨月为4、8月；HadCM2 的最大降水月滞后，上半年降水明显偏多，且在4月出现降水次高值；CSIRO MK2 出现双雨季，分别在6月、9月，但模式对本地区冬季(12、1、2月)的模拟效果较好。

内蒙古地区的降水特征与华北相似，但降水量小。HadCM2 和 ECHAM4 模拟的本地区降水优于其他模式。但仍然存在着春季雨量偏大的情况。CSIRO MK2 和 CGCM1 模拟的降水特征与华北地区相似，如CSIRO MK2 结果具有与华北地区类似的峰值降水为6、9月的双雨季；GFDL 是所有模式中与实际偏差最大的。

模式对东北地区 and 高原地区降水的季节变化模拟较好，ECHAM4 的最大降水月滞后，且降水量偏少；其他模式的夏季降水结果较好，但其他季节降水量偏多。

华中地区(包括长江中下游地区)是全国唯一雨季不在7、8月的大面积地区。由

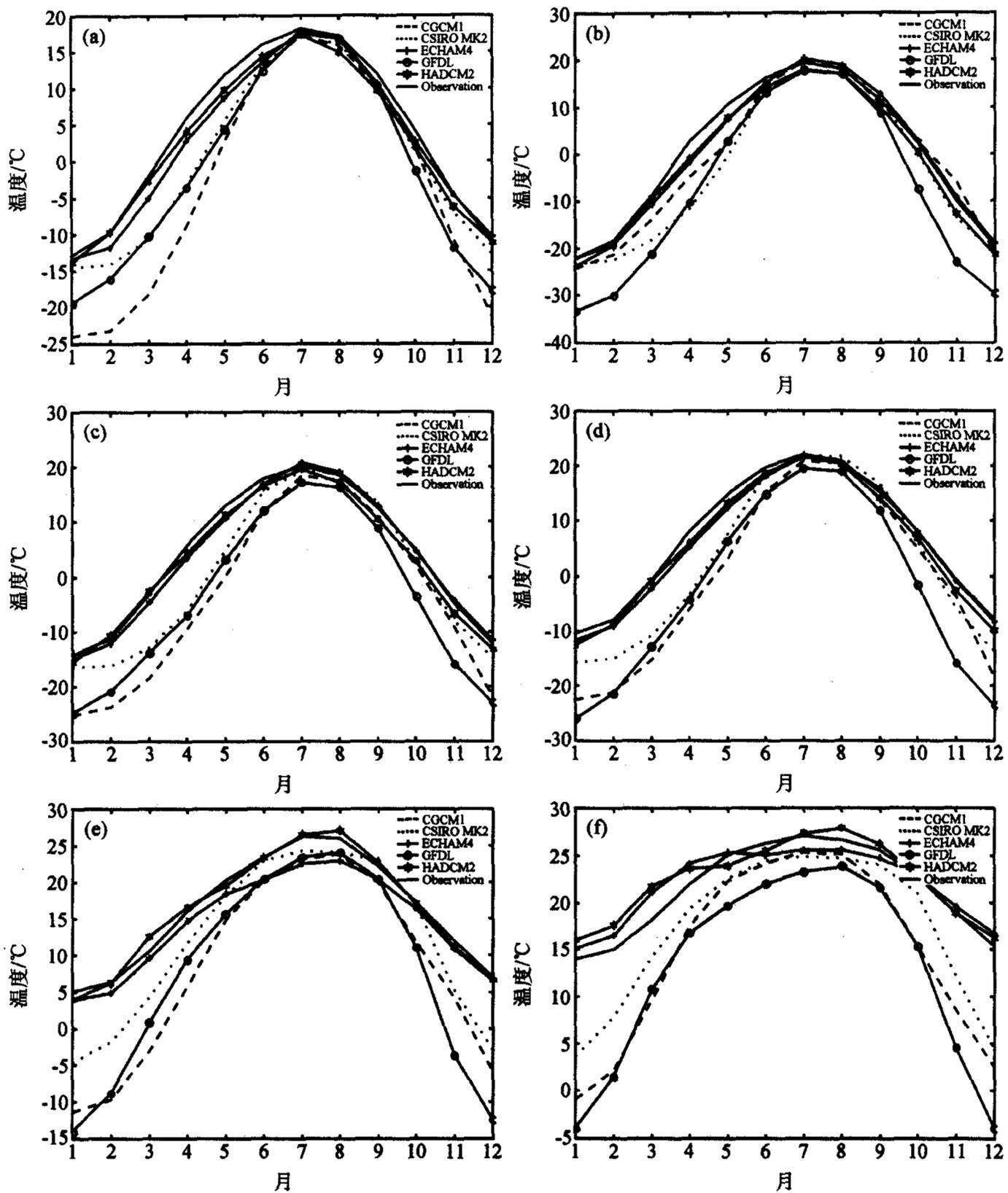


图 2 不同子区域多年平均 (1961~1990 年) 地面气温逐月变化
 (a) 西北地区; (b) 东北地区; (c) 内蒙古地区; (d) 华北地区; (e) 华中地区; (f) 华南地区

于梅雨季节的存在,本地区最多雨月为 6 月,其次是 5 月、7 月。模式对华中地区雨量的模拟较好,但模拟的雨季提前 1~2 月。HadCM2 在 1 至 4 月与实测的误差是所有模式中最大的。

5 月中旬开始,东南季风雨带在华南出现,持续至 6 月中旬,华南雨季结束。8 月下旬,东南季风雨带南撤,在华南地区停留,形成双峰型降水年变化。由图 2 可以看出,只有 CGCM1 和 CSIRO MK2 模拟出这一特征,但 4~10 月雨量偏小。ECHAM4

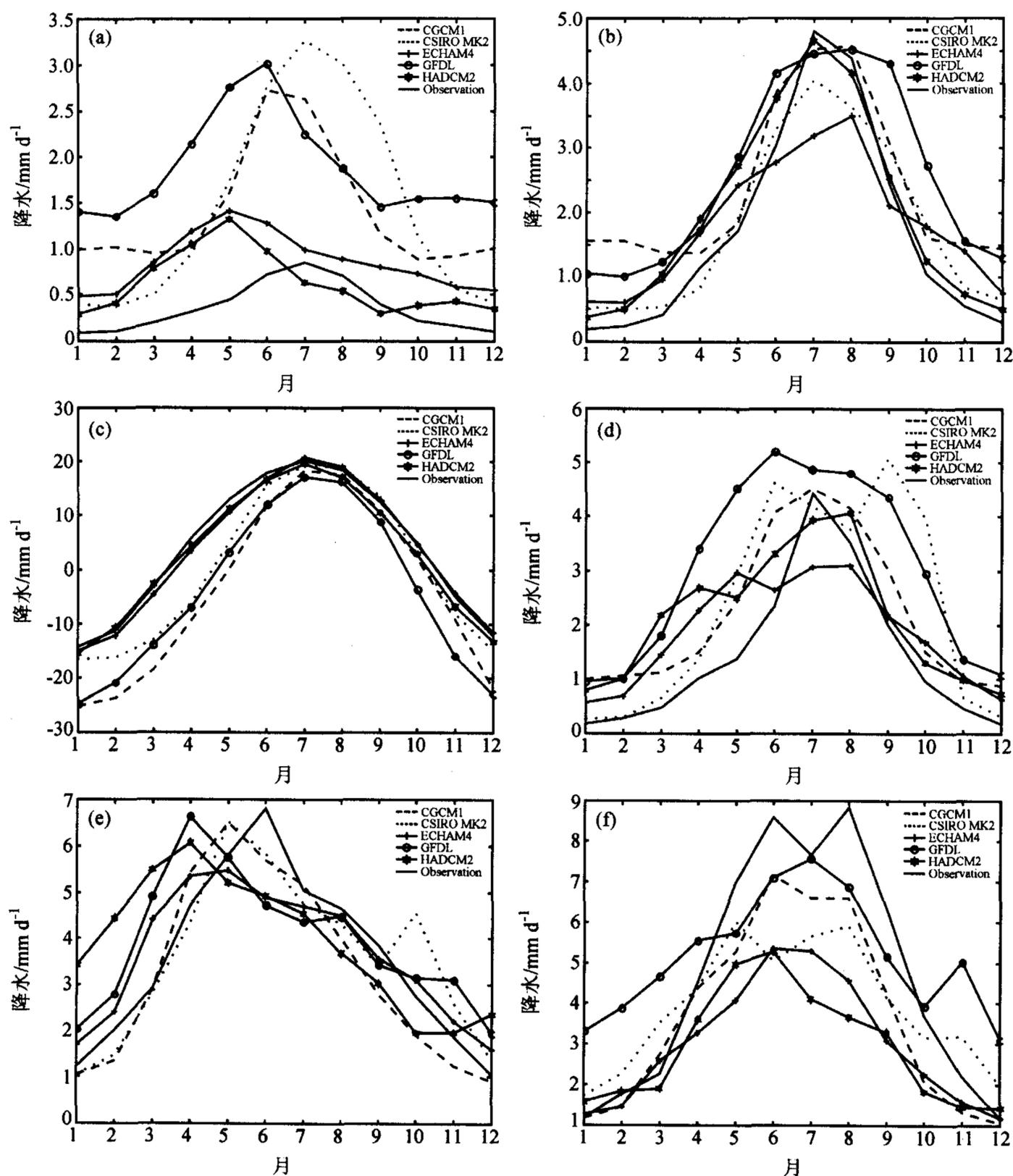


图3 不同子区域多年平均(1961~1990年)降水逐月变化

(a) 西北地区; (b) 东北地区; (c) 内蒙古地区; (d) 华北地区; (e) 华中地区; (f) 华南地区

和 HadCM2 在华南地区模拟效果最差。

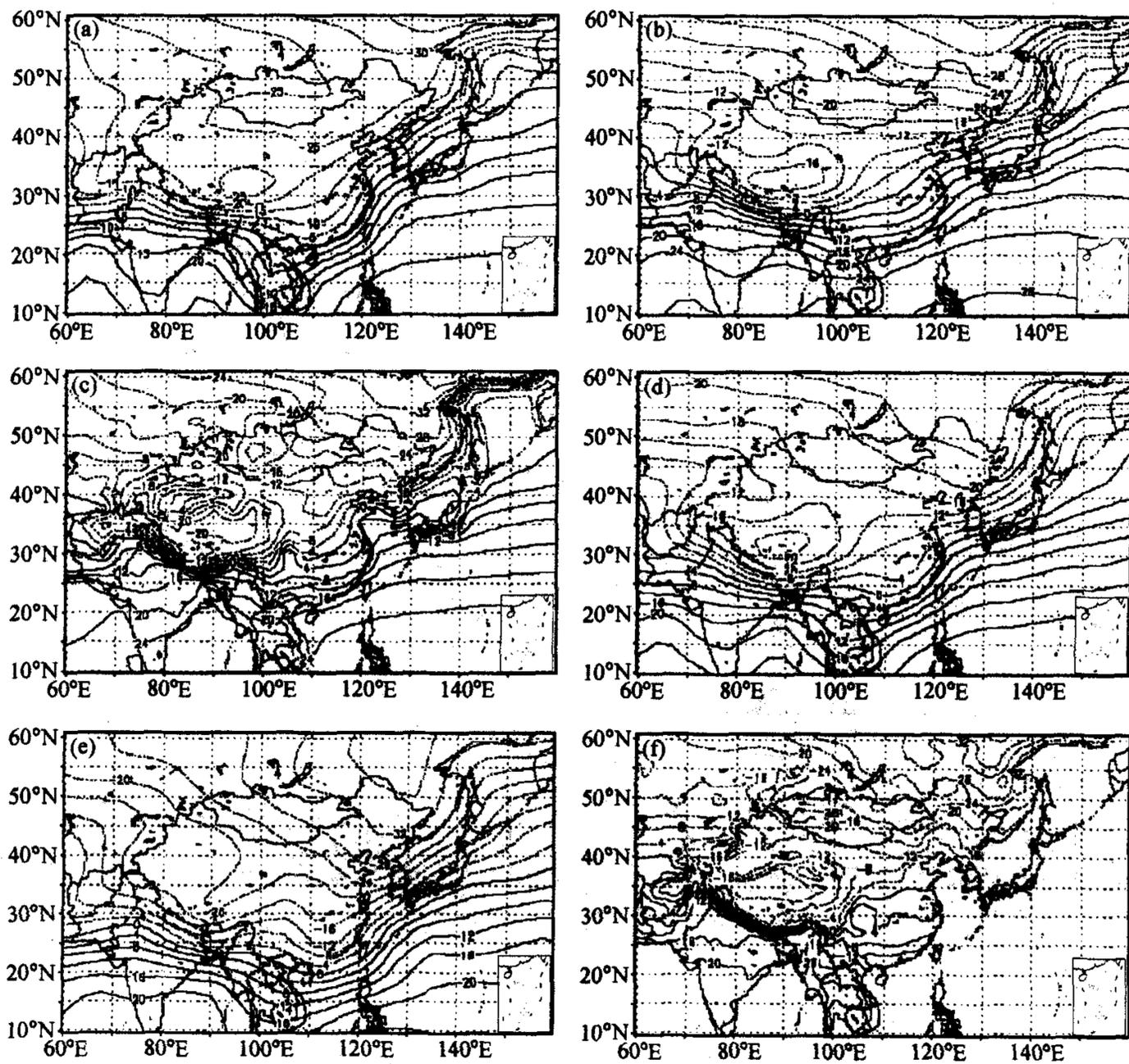
表1、表2是研究区域陆地部分各模式模拟地面气温和降水的多年平均值与实测差。由此表可以看出,模式模拟得到的地面气温偏低,除了 HadCM2,其他模式夏、秋季的模拟效果优于春、冬季。就降水而言,CGCM1和GFDL在春、冬两季的偏差大于其他模式的结果,CSIRO MK2、ECHAM4和HadCM2的夏季降水有负偏差,ECHAM4偏差最大。

表 1 多年平均模拟与观测的地面气温差

模式	CGCM1	CSIRO MK2	ECHAM4	GFDL	HadCM2
春季	-8.272	-7.596	-1.555	-7.515	-1.287
夏季	-1.185	-1.473	0.004	-0.955	-1.443
秋季	-1.405	-2.546	-0.081	-5.661	-1.506
冬季	-6.614	-3.148	-0.203	-8.336	-0.201

表 2 多年平均模拟与观测的降水差

模式	CGCM1	CSIRO MK2	ECHAM4	GFDL	HadCM2
春季	0.746	0.377	0.396	1.228	0.566
夏季	0.632	-0.086	-0.731	0.204	-0.214
秋季	0.360	0.280	-0.019	0.624	0.061
冬季	0.938	0.373	0.233	1.180	0.407

图 4 1 月份模拟和观测的地面大气温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

(a) CGCM1; (b) ECHAM4; (c) HadCM2; (d) CSIRO MK2; (e) GFDL; (f) 观测

2.3 模式对平均气候状态的模拟

以上讨论了模式模拟的中国不同地区地面空气温度和降水量与实测值的差异。下面讨论东亚区域内（陆地部分）模式模拟的气温和降水的空间分布特征。

图4为1月份模式模拟和观测的地面气温。由观测值可以看出，模拟区域内（陆地部分）贝加尔湖西北地区为一冷中心，最低气温达 -32°C 以上；在我国境内，东北最北部和青藏高原的地面空气温度低于 -20°C ，秦岭淮河以南，平均温度在 0°C 以上。 10°C 位于南岭一带，西部塔里木盆地地区的温度比同纬度相应地区高。由于分辨率较低，模式几乎无法分辨温度分布的细节，同时，模拟所得地面气温较实测值低。其中GFDL、CGCM1和CSIRO MK2所模拟的 0°C 线退出了大陆地区。HadCM2和ECHAM4较好地模拟了青藏高原和贝加尔湖东部地区的低温中心，但对中国东南部地区，这两个模式模拟的气温较实测值高。

图5为7月份模式模拟和观测的地面气温。7月份，模拟区域内最冷的地区是青藏高原和阿尔泰山脉以北地区，长江中下游地区以及南岭南部为温度最高的地区。所有

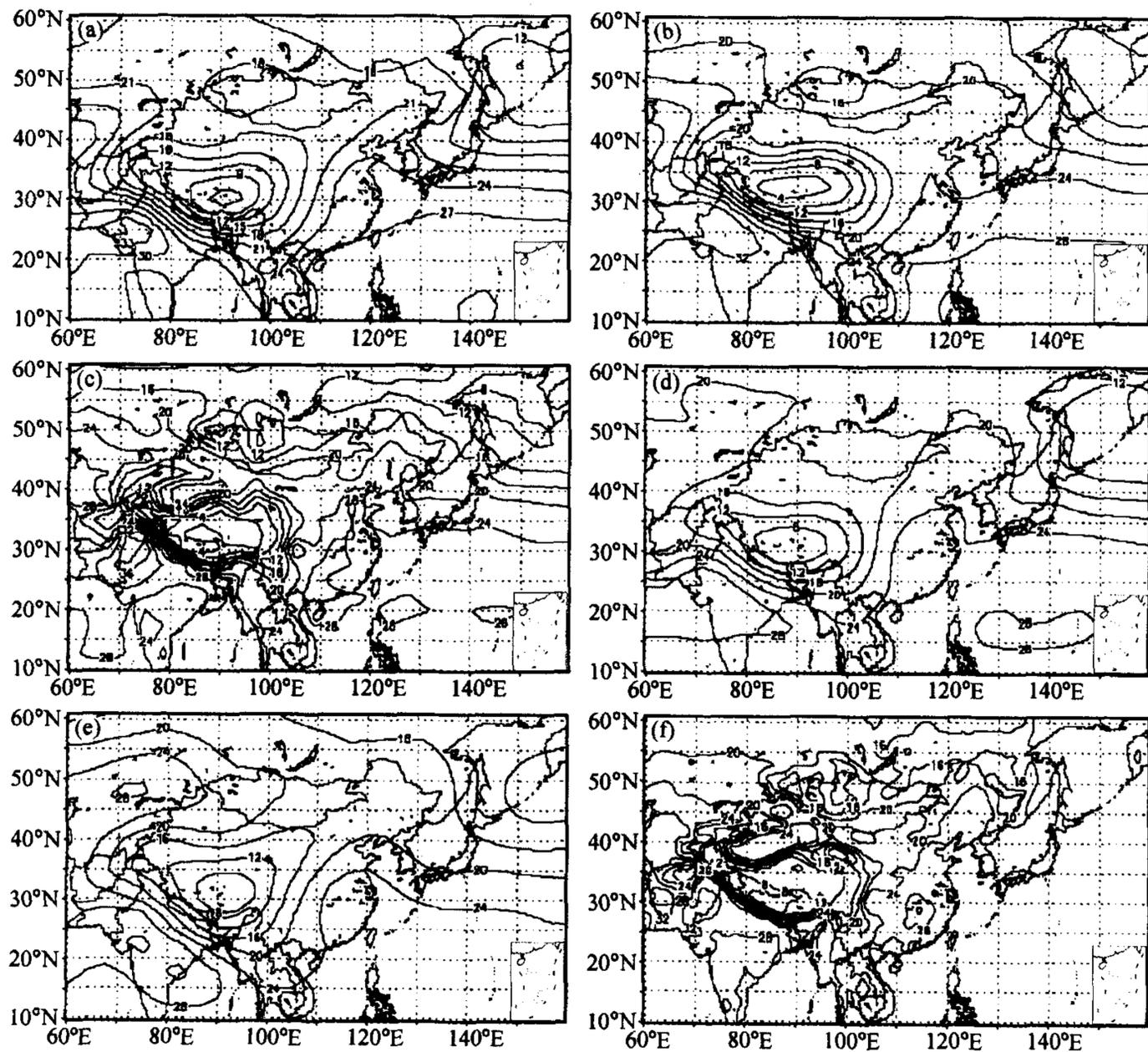


图5 7月份模拟和观测的地面大气温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）

(a) CGCM1; (b) ECHAM4; (c) HadCM2; (d) CSIRO MK2; (e) GFDL; (f) 观测

的模式均能模拟出各个高低温中心, CGCM1、CSIRO MK2、GFDL 模拟的青藏高原上气温较高, 其他地区偏低; ECHAM4 在 40°N 以北模拟的温度偏高, 以南则偏低。HadCM2 对中国东南部的模拟气温较实测高, 其他地区偏低。

图 6 为 1 月份模式和观测的降水分布。从实测的降水分布可以看出, 1 月份我国降水量的分布特征是东南多, 西北少, 从东南向西北递减。在模拟区域内长江以南、南岭以北和台湾是我国 1 月份降水最多的地区, 最大可达 2.0 mm d^{-1} 以上; 喜马拉雅山南麓、中南半岛、日本的降水丰富。所有模式都能模拟出这些降水特征, 但在降水量上有较大误差。GFDL 的降水量在模拟区域内系统性的增大, CGCM1 和 CSIRO MK2 在华东和中亚地区的降水量低于实测值, 但误差在 1 mm d^{-1} 之内, 模拟区域其他部分的降水偏多。除印度半岛和中南半岛, ECHAM4 的降水量略大于观测值, 但误差不超过 1 mm d^{-1} 。HadCM2 模式减小了印度半岛的降水, 在区域的其他部分降水量偏高, 误差最大的地区是长江中下游地区, 最大偏差约 3.5 mm d^{-1} 。

图 7 为 7 月份模式模拟和观测的降水。7 月份夏季风盛行, 最大的降水中心集中在

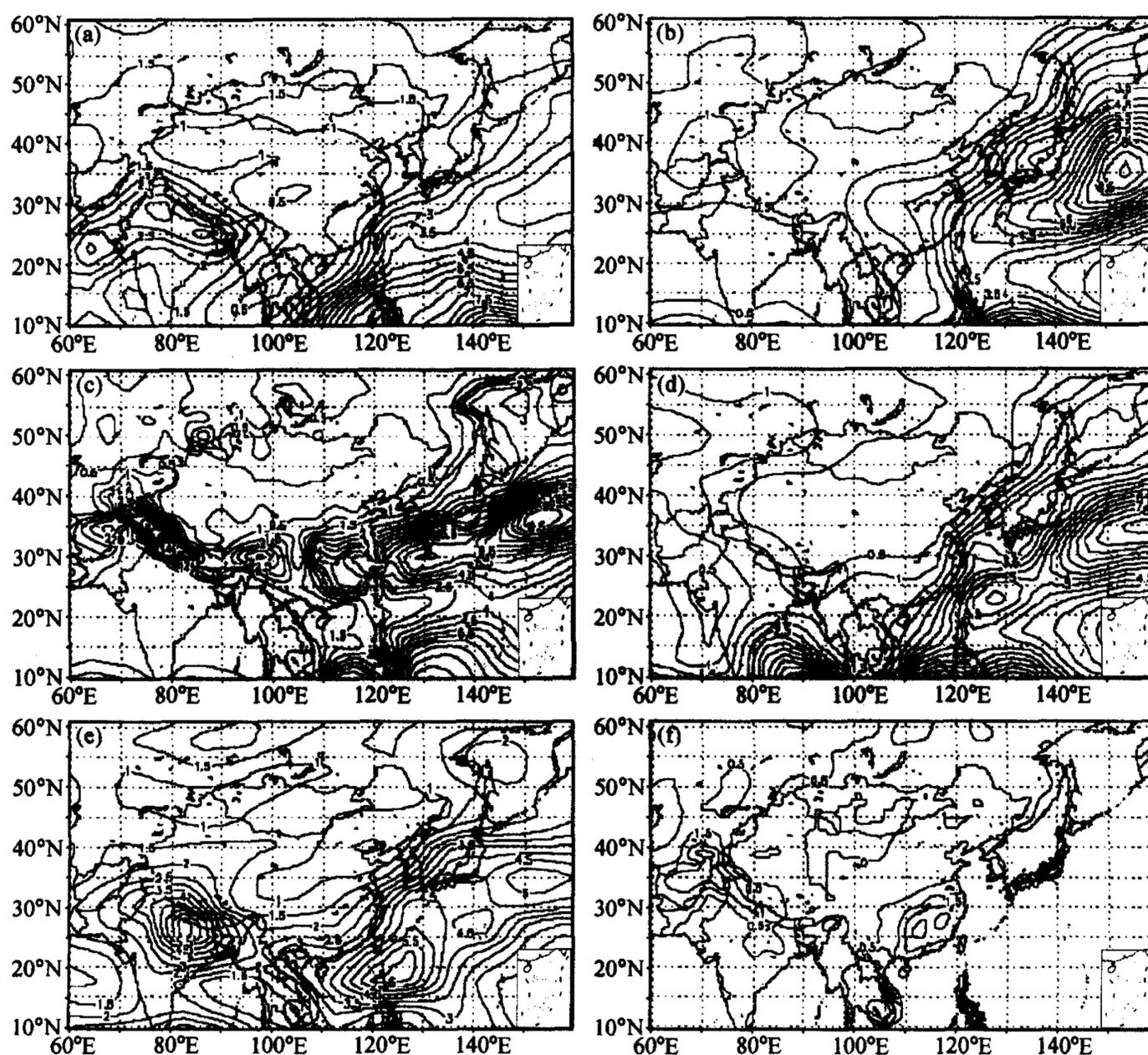


图 6 1 月份模拟和观测的降水 (单位: mm d^{-1})

(a) CGCM1; (b) ECHAM4; (c) HadCM2; (d) CSIRO MK2; (e) GFDL; (f) 观测

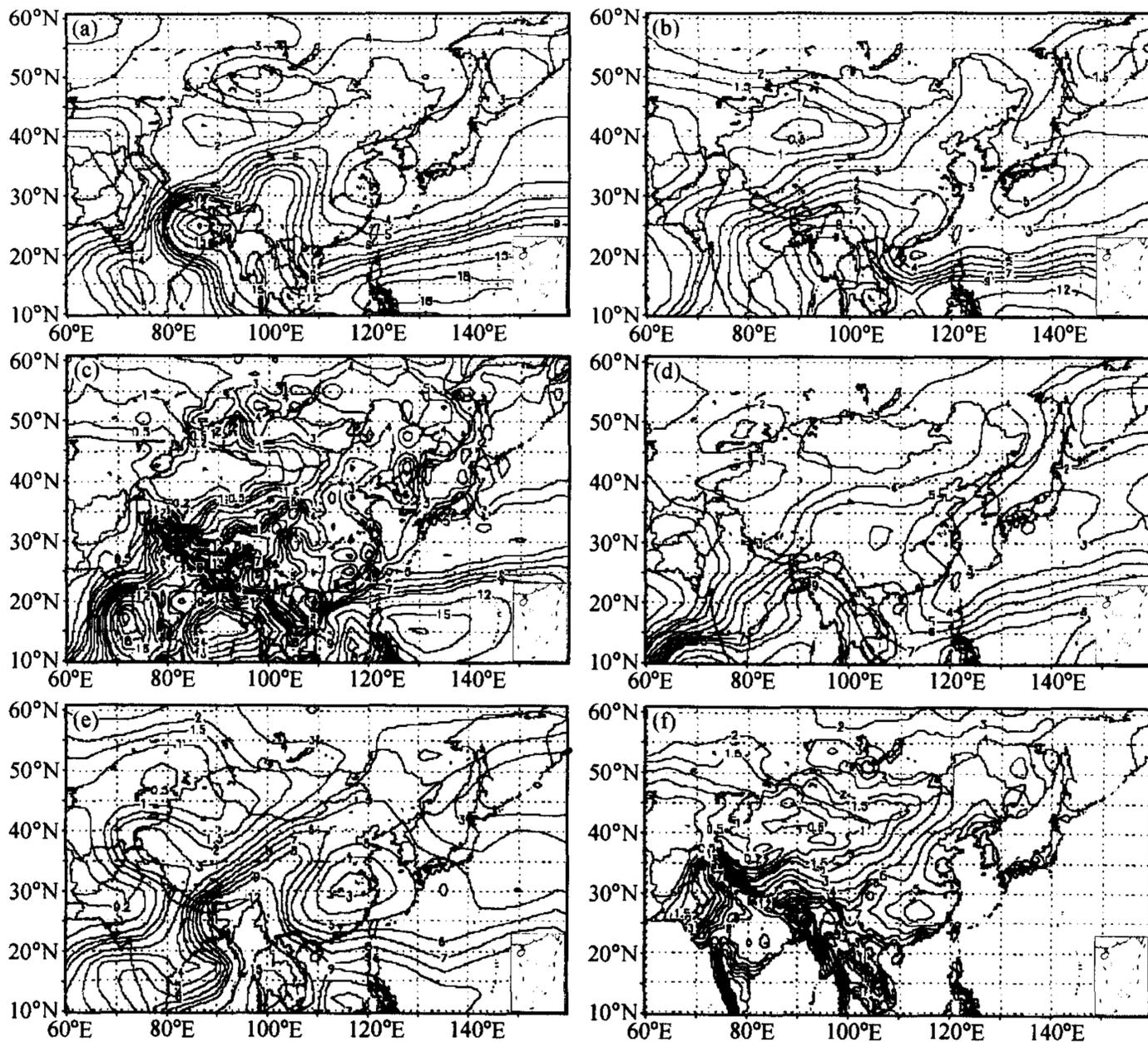


图7 7月份模拟和观测的降水(单位: mm d^{-1})

(a) CGCM1; (b) ECHAM4; (c) HadCM2; (d) CSIRO MK2; (e) GFDL; (f) 观测

印度半岛、中南半岛和马来群岛,我国境内的降水中心位于雅鲁藏布江下游、大兴安岭、川西、山东半岛、长江中下游地区。各模式均能模拟出印支半岛、中南半岛的强降水中心,但雨量偏小。模式也能模拟出我国境内雨带的东北—西南分布,CGCM1、CSIRO MK2、GFDL的模拟结果在内陆偏大,沿海偏小;HadCM2夸大了青藏高原及其周围地区的降水,其他地区的模拟效果较好;ECHAM4的高原降水较实测小;其他地区模拟效果良好,雨量偏差在 1 mm d^{-1} 之内。

3 结论

本文讨论了5个全球海气耦合模式模拟的东亚地区多年平均地面气温和降水的能力,结果表明:

(1) 各模式均能反映不同地区地面气温的年变化,但模拟气温较实测值低,除HadCM2以外,所有模式模拟的夏、秋两季结果要优于春、冬两季。

(2) 多年平均降水量的模拟结果显示模式有模拟降水季节性变化的能力,但各子

区域最多降水月和降水量都与实测值有较大偏差; 同温度类似, 模式夏、秋季的结果优于春、冬季。

(3) 各模式均能模拟出地面气温的空间分布特征, 但模式模拟的地面气温最大偏差达 10°C 左右。

(4) 模式能模拟多年平均季节降水的空间分布, 除 HadCM2 和 ECHAM4, 模式模拟的西北地区降水偏大 $0.5\sim 2\text{ mm d}^{-1}$; 模式对华北地区模拟效果较差。就整个研究区域而言, 除 ECHAM4 的夏季降水偏差较大外, 其他模式在夏、秋季的模拟效果比冬、春季好。

(5) 就总体效果而言, ECHAM4 和 HadCM2 模拟东亚地区地面气温的平均状态的能力优于其他模式; 对于降水, CSIRO MK2、ECHAM4 的效果略好。

参 考 文 献

- 1 Grotch, S. L., and M. C. MacCracken, The use of General Circulation Models to predict regional climate change, *J. Climate*, 1991, 4, 286~303.
- 2 程伟、符淙斌, 定量分析 GCM 模拟区域气候的能力——中国东部地区的试验之一, 全球变化与我国未来生存环境, 符淙斌、严中伟主编, 北京: 气象出版社, 1996, 212~234.
- 3 Yu Yongqiang, Guo Yufu, and Zhang Xuehong, Features of regional climate as simulated by IAP coupled ocean-atmosphere model, *Collected Works on Climate Changes and Its Numerical Simulation*, 1996, Vol. 2, Chen, L. X. et al., Eds., China Meteorological Press, Beijing, 1996, 192~201.
- 4 New, M., M. Hulme, and P. Jones, Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901—96 monthly grids of terrestrial surface climate, *J. Climate*, 2000, 13, 2217~2238.
- 5 席承藩、丘宝剑、张俊民、刘东来, 中国自然区划概要, 北京: 科学出版社, 1984, 70~72.
- 6 张家诚、林之光, 中国气候, 上海: 上海科学技术出版社, 1983, 467~482.

The Preliminary Analysis of 5 Coupled Ocean-Atmosphere Global Climate Models Simulation of Regional Climate in Asia

Wang Shuyu, and Xiong Zhe

(Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences;
START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029)

Abstract The monthly averaged precipitation and surface air temperature produced by 5 Coupled Ocean-Atmosphere Global Climate Models (AOGCM) are compared to the observation in order to assess AOGCMs' abilities in simulating regional climate in East Asia. The analysis results show that 5 AOGCMs can reproduce the seasonal cycle and spatial distribution of surface air temperature, but the models tend to have cold biases in whole analysis domain. AOGCMs reproduce the seasonal cycle and spatial distribution of precipitation reasonably, but overestimate the spring and winter precipitation. In West and Northeast China, AOGCMs have relatively large biases for precipitation than in other regions. Overall ECHAM4 and HadCM2's performances for surface climate in East Asia are better than other models.

Key words: Coupled Ocean-Atmosphere Global Climate Model; precipitation; surface air temperature

附录：五个全球海气耦合模式介绍

1 CGCM1 GCM

CGCM1 (Canadian Global Coupled Model) 是由加拿大气候中心 (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) 研制发展的海气耦合模式, 其中还包含一个热力学的海冰模式。大气部分采用 AGCM2 模式, 水平方向采用 T32 波截断 (经度、纬度方向水平分辨率为 $3.7^{\circ} \times 3.7^{\circ}$), 全球共有 96 (经向) \times 48 (纬向) 个网格点, 垂直方向分为 10 层。海洋模式基于 GFDL MOM1, 水平分辨率为 $1.8^{\circ} \times 1.8^{\circ}$, 垂直方向分为 29 层。

2 CSIRO MK2 GCM (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization Mark2 GCM)

CSIRO Mark2 GCM (CSIRO MK2) 是由澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 发展的全球大气海洋耦合模式, 其中还包含有海冰和生物圈子模式。大气和海洋模式水平方向采用 R21 波截断, 全球共有 64 (经向) \times 56 (纬向) 个网格点, 大气在垂直方向分为 9 层, 海洋在垂直方向分为 21 层。海洋模块中包含有热传导方案, 能够显著地减少南方海洋中的过度混合问题。耦合模式需要对热、盐和风应力等与大气-海洋相互作用有关的动量进行订正。

3 ECHAM4 模式

ECHAM4 全球大气海洋耦合模式是德国马普大气研究所 (Max Planck Institute for Meteorology) 在欧洲中尺度天气预报中心的天气预报模式 (ECMWF) 的基础上进行一系列修正发展而来的, 海洋模块为 OPYC3。大气模式水平方向为 T42 波截断, 全球共 128 (经向) \times 64 (纬向) 个网格点, 铅直方向分为 19 层。辐射方案采用二流近似, 考虑了 H_2O 、 CO_2 、 O_3 、 CH_4 、CFCs 等气体的吸收以及气溶胶的辐射效应。模式中的积云分为浅、中层和深对流 3 种, 对流参数化基于 Tiedtke 的总体质量通量的概念 (bulk mass flux concept)。行星边界层内地面通量的计算采用了 Monin-Obukhov 相似理论, 陆面过程中热量传导利用一个 5 层扩散模式计算, 水分平衡方程计算了土壤湿度、植被截流和雪, 此外还考虑植被蒸腾和对雨水、雪水的截流作用。

4 GFDL GCM

GFDL GCM 是美国国家海洋大气局地球流体动力实验室 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory of NOAA) 用于气候模拟的全球大气海洋耦合模式。大气模块的水平方向采用 R15 截断, 相当于 7.5° (经向) \times 4.5° (纬向), 全球共有 48 (经向) \times 40 (纬向) 个网格点, 垂直方向分为 14 层。模式大气动力过程基于 GFDL 动力长期预测模式 (DERF), 对辐射和铅直扩散等过程的参数化方案进行了一系列订正。

5 HadCM2 模式

HadCM2 全球大气海洋耦合模式是 Hadley 中心发展的全球格点模式, 水平分辨率为 3.75° (经向) \times 2.5° (纬向), 全球共包含 96×73 个网格点。模式大气部分垂直向分为 19 层, 海洋部分利用了 Cox 方案, 垂直方向分为 20 层, 模式的土壤分为 4 层。模式物理过程包括一个经过显式 down-draught 订正的积云对流参数化方案, 辐射通量计算采用了 Slingo 和 Wilderpin 的方案。模式对热量和水分通量进行通量订正, 以减少气候模式中的误差。