

# IPCC AR4 气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟性能评估<sup>\*1</sup>

孙颖 丁一汇  
SUN Ying DING Yihui

国家气候中心,北京,100081

National Climate Center, Beijing 100081, China

2008-02-20 收稿,2008-04-15 改回.

**Sun Ying, Ding Yihui. 2008. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon. Acta Meteorologica Sinica, 66(5):765-780**

**Abstract** Observations from several data centers together with a categorization method are used to evaluate the IPCC AR4 (Intergovernmental Panel on Climate Change, the Fourth Assessment Report) climate models' performance in simulating the interdecadal variations of summer precipitation and monsoon circulation in East Asia. Out of 19 models under examination, 9 can relatively well reproduce the 1979-1999 mean June-July-August (JJA) precipitation in East Asia, but only 3 (Category-1 models) can capture the interdecadal variation of precipitation in East Asia. These 3 models are: GFDL-CM2.0, MIROC3.2 (hires) and MIROC3.2 (medres), among which the GFDL-CM2.0 gives the best performance. The reason for the poor performance of most models in simulating the East Asian summer monsoon interdecadal variation lies in that the key dynamic and thermal-dynamic mechanisms behind the East Asian monsoon change are missed by the models, e. g., the large-scale tropospheric cooling and drying over East Asia. In contrast, the Category-1 models relatively well reproduce the variations in vertical velocity and water vapor over East Asia and thus show a better agreement with observations in simulating the pattern of "wet South and dry North" in China in the past 20 years. It is assessed that a single model's performance in simulating a particular variable has great impacts on the ensemble results. More realistic outputs can be obtained when the multi-model ensemble is carried out using a suite of well-performing models for a specific variable, rather than using all available models. This indicates that although a multi-model ensemble is in general better than a single model, the best ensemble mean cannot be achieved without looking into each member model's performance.

**Key words** Climate models, East Asian summer monsoon, Model evaluation

**摘要** 文中使用多种观测资料和分类的方法评估了 IPCC AR4(政府间气候变化委员会第4次评估报告)气候模式(亦称 Coupled Model Intercomparison Program 3, CMIP3)对东亚夏季风降水与环流年代际变化的模拟性能。结果表明,在评估的19个模式中,有9个模式可以较好地再现中国东部地区多年平均降水场,但仅有3个模式(第1类模式)可以较好地对东亚夏季风降水的年代际变化作出模拟,这3个模式是:GFDL-CM2.0、MIROC3.2(hires)和 MIROC3.2(medres),其中模式 GFDL-CM2.0 具有最好的模拟性能。进一步的分析表明,大部分模式对东亚夏季风变化模拟能力的缺乏是因为这些模式没有抓住东亚夏季风降水变化的主要动力和热力学机制,即东亚地区在过去所出现的大范围对流层变冷和变干。而第1类模式由于较好地再现了东亚地区垂直速度场(动力学因子)和水汽场(热力学因子)的变化特征,因此较好地模拟出中国东部南涝北旱的气候变化特征。

本文的评估清楚地表明,当选择不同模式进行集合时,模式对某一研究变量的模拟性能好坏极大地影响了集合的结果。当模拟性能较好的模式在一起进行集合时,所得到的结果更加接近于真实的观测结果。就特定的研究变量而言,这种集合更

\* 资助课题:国家自然科学基金(40605020),人事部留学人员科技活动项目,973项目(2006CB403604)和“十一五”国家科技支撑项目(2007BAC03A01)。

作者简介:孙颖,主要从事气候和气候变化研究。E-mail: sunying@cma.gov.cn

加优于将可得到的所有模式进行集合。这说明,虽然多模式集合一般优于单个模式的结果,但应考虑使参与集合的模式对所研究变量具有一定的模拟能力。

**关键词** 气候模式, 东亚夏季风, 模式评估

**中图法分类号** P435 P462.4<sup>+</sup>1

## 1 引言

东亚夏季风降水和环流的模拟预测一直是气候研究中的一个重点和难点问题。政府间气候变化委员会(IPCC)在2007年的最新评估(Randall, et al, 2007)中指出,当前的全球海气耦合模式(AOGCMs)对降水月平均场和全球分布的模拟误差已经减小,但在东亚季风区,由于其特殊的地理位置和季风降水物理过程的复杂性,大部分模式对季风降水的模拟效果仍然不是很好。模式不能合理地模拟出东亚夏季风主要雨带的季节北进过程,模拟的季风区降水量偏大,中国中部地区的虚假降水中心仍然存在。在Annamalai等(2007)对这些模式用于亚洲季风区降水模拟可信度的检查中发现,在检查的18个AOGCMs中,只有6个能够合理地模拟出20世纪气候平均的季风降水。在这6个模式中,模式间季风降水型的空间相关超过了0.6,而且季风降水的季节循环也模拟得较好,其中4个显示了较好的季风ENSO同期遥相关。这说明,虽然季风区降水的模拟仍然存在较大问题,但新一代气候模式对气候平均季风降水的模拟已经有所改善。

以往对东亚夏季风模拟的评估工作,大部分研究主要是讨论模式(包括全球和区域气候模式)对季风降水气候学的模拟评估(赵宗慈等,1995;Zhou, et al,2002;高学杰等,2004;Jiang Dabang, et al,2005,2008;柳艳香等,2007;冯锦明等,2007;汤剑平等,2008)和对季风季节内振荡和年际变化的模拟评估(Lambert, et al,2001; Lin Jialin, et al,2006),而很少涉及模式对夏季风年代和年代际变化模拟的评估。但是,在当前的气候变化研究中,这种评估却显得越来越重要。在过去50年中,东亚夏季风发生了明显的年代和年代际变化。这种变化以季风环流的减弱和季风雨型的显著改变为特点,中国东部盛行的西南气流和向北的水汽输送减弱(Ding Yihui, et al, 2003,2008; Yu Rucong, et al,2004,2007),中国东部夏季雨型从南旱北涝型转为近20年频繁出现

的南涝北旱型(翟盘茂等,1999; Xu Qun,2001; Ding Yihui, et al,2003)。模式是否能够合理地模拟出这种变化,不仅是对模式模拟性能检验的重要标准,也是对模式能否对未来气候变化做出合理预估的重要基础。这种对模式对当前气候年代际变化“再现能力”的评估可以在一定程度上检验对未来气候变化预估的可信度。

在IPCC 2007年的第4次评估报告中,当前国际社会正在使用的最新一代气候模式结果(IPCC AR4,也称CMIP3)被广泛用来对未来气候变化作出预估。对这些模式各种模拟性能和未来预估不确定性的讨论也成为当前研究的热点(Meehl, et al, 2007),包括对这些模式各类参数化过程的评估、对模式整体模拟性能的评估以及对用这些模式预估未来气候的不确定性研究。一般来说,在对多个模式总体性能进行评估时,多采用多模式集合(Multi-model Ensembles, MME)的方法。MME可以在一定程度上抵消各个模式的偏差,和观测结果最相似,因而更接近于真实的自然状态,因此被广泛用在模式评估和未来气候预估中(Cubasch, et al,2001)。在这一理论中,基本的假设是每个模式可以被认为是真实自然状态的一种可能现实,当参与集合的样本足够大时,气候变率的“噪音”趋于零,因此,MME的结果可以认为是对强迫所产生气候变化的最好估计。这说明,参与多模式集合的模式应该对大尺度气候态具有基本的模拟能力。

在现有的大部分研究中,虽然各个模式对基本物理变量的模拟性能存在差异,但一般都不采取加权的办法,而只是采取多个模式的简单算术平均(Cubasch, et al,2001)。但是,随着对模式性能评估的深入,一些研究已经注意到,模式对当前气候模拟的优劣将有可能影响对未来气候变化的预估结果,因此参与MME的模式应该对一些基本量或其变化具有一定的模拟能力。如Knutti等(2006)的研究指出,对具有较强的地面温度季节循环的模式而言,其气候敏感性比具有较低的地面温度季节循环的模

式要高。虽然一些更确凿的理论方法研究正处于早期阶段,但这提出了通过模拟观测性能的检验来限制或约束未来气候变化预估结果并减小其不确定性的可能。这也说明了对模式性能评估的重要性。

我们在本文中利用 IPCC AR4 19 个模式的结果,对这些模式用于东亚夏季风年代际变化的模拟性能做出评估,并对上述相关问题做出探索。采取的主要方法为多模式集合评估和分类模式集合评估,研究不同类的模式集合对东亚夏季风变化模拟的差异,以及这种差异产生的可能原因。

## 2 资料和计算方法

### 2.1 资料

本文采用的观测资料包括:

(1) 1979—1999 年 CMAP (Climate Prediction Center (CPC) Merged Analysis of Precipitation) 月平均格点降水资料 ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ) (Xie, et al,

1997);

(2) 1979—1999 年 GPCP (Global Precipitation Climatology Project, version 2) 月平均格点降水资料 ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ) (Adler, et al, 2003);

(3) 1958—1999 年中国 740 站月平均站点降水资料;

(4) 1958—1999 年 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) 月平均再分析资料 ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ) ([http://www.ecmwf.int/research/era/Project/Plan\\_/Project\\_plan\\_TOC.html](http://www.ecmwf.int/research/era/Project/Plan_/Project_plan_TOC.html));

(5) 1958—1999 年 NCEP/NCAR 月平均再分析资料 ( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ), (Kalnay, et al, 1996)。

采用的模式资料为参与 IPCC AR4 的 19 个模式 1958—1999 年(20c3m)月平均资料(表 1),这些模式的主要特点是:精度高,参数化方案更合理,采用了更新的数值方法,大多数模式没有采用通量订

表 1 本文评估的 19 个模式信息  
Table 1 19 climate models compared in the present study

| 模式名字                 | 模式所在的中心,国家  | 大气精度 (lon×lat)                           |
|----------------------|---|--|
| 1 CGCM3.1(T47)       | Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis, Canada  | $3.75^{\circ} \times \sim 3.75^{\circ}$  |
| 2 CGCM3.1(T63)       | Canadian Centre for Climate Modelling & Analysis, Canada  | $2.8^{\circ} \times \sim 2.8^{\circ}$    |
| 3 CNRM-CM3           | Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques, France  | $2.8^{\circ} \times \sim 2.8^{\circ}$    |
| 4 CSIRO              | CSIRO Atmospheric Research, Australia   | $1.88^{\circ} \times \sim 1.88^{\circ}$  |
| 5 GFDL-CM2.0         | US Dept. of Commerce/NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, United States  | $2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$         |
| 6 GFDL-CM2.1         | US Dept. of Commerce/NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, United States  | $2.5^{\circ} \times 2.0^{\circ}$         |
| 7 GISS-EH            | NASA/Goddard Institute for Space Studies, United States   | $5^{\circ} \times 4^{\circ}$             |
| 8 GISS-ER            | NASA/Goddard Institute for Space Studies, United States   | $5^{\circ} \times 4^{\circ}$             |
| 9 FGOALS-g1.0        | LASG/Institute of Atmospheric Physics, China  | $2.8^{\circ} \times \sim 2.8^{\circ}$    |
| 10 INM-CM3.0         | Institute for Numerical Mathematics, Russia   | $5^{\circ} \times 4^{\circ}$             |
| 11 IPSL-CM4          | Institut Pierre Simon Laplace, France   | $3.75^{\circ} \times 2.5^{\circ}$        |
| 12 MIROC3.2 (medres) | Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan | $2.8^{\circ} \times \sim 2.8^{\circ}$    |
| 13 MIROC3.2(hires)   | Center for Climate System Research (The University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC), Japan | $1.125^{\circ} \times \sim 1.12^{\circ}$ |
| 14 ECHAM5/MPI-OM     | Max Planck Institute for Meteorology, Germany   | $1.88^{\circ} \times \sim 1.88^{\circ}$  |
| 15 MRI-CGCM2.3.2     | Meteorological Research Institute, Japan  | $2.8^{\circ} \times \sim 2.8^{\circ}$    |
| 16 CCSM3             | National Center for Atmospheric Research, United States   | $1.4^{\circ} \times \sim 1.4^{\circ}$    |
| 17 PCM               | National Center for Atmospheric Research, United States   | $2.8^{\circ} \times \sim 2.8^{\circ}$    |
| 18 UKMO-HadCM3       | Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, United Kingdom  | $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$       |
| 19 UKMO_hadgem1      | Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, United Kingdom  | $1.875^{\circ} \times 1.25^{\circ}$      |

正方案以及一些模式包括了交互的气溶胶过程(孙颖, 2005)。模式的更多详细信息可参见 [http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about\\_ipcc.php](http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php), 关于模式中降水参数化方案的信息可参见 Sun 等(2006)和 Dai(2006)。为了研究的方便, 所有的模式被线性插值到同样的格点( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ )上。此外, 需要说明的是, 模式 CSIRO 没有提供垂直速度场的资料, 因此在本文第 3 部分垂直速度的模式集合中没有该模式的信息。而模式 UKMO-HadCM3 和 UKMO-HadGem1 没有提供整层水汽含量的资料, 因此在本文第 5 部分整层水汽含量的模式集合中没有这 2 个模式的信息。

## 2.2 计算方法

本文中模式资料的分析方法采用多模式集合评估和分类模式集合评估, 研究不同类的模式集合对东亚夏季风变化模拟的差异。基本的思路是: 以中国东部地区( $22.5^{\circ}-45^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$ )夏季(6—8月)平均降水作为分类的基本变量, 首先对模式的多年平均降水场(1979—1999年平均)模拟性能作出检验, 然后进行模式对降水变化场(1979—1999年平均减去1958—1979年平均)的模拟性能的检验, 最后以此作为分类的标准对模式进行分类。

首先考虑的是, 模式能够再现某一变量年代际变化的首要条件应该是能够正确地模拟气候多年平均场, 因此首先对模式模拟的气候平均场进行检验。考虑到在 1979 年以后的降水观测资料结合了台站和卫星等的观测, 资料质量较好, 因此使用 CMAP 和 GPCP 夏季(6—8月)1979—1999 年的平均场作为模式的比较资料。Dai(2006)的研究表明, CMAP 和 GPCP 多年平均降水场的差别主要在海洋上, 而在陆地上的差异很小, 因此二者都被用来作为检测模式性能的观测基础。

在本文中, 考虑到近 50 年东亚夏季风变化的关键区域是在中国东部, 因此选择中国东部( $22.5^{\circ}-45^{\circ}\text{N}$ ,  $110^{\circ}-120^{\circ}\text{E}$ )的区域作为研究的关键区, 而比较的方法采用常规的相关系数检验, 首先对模式在关键区降水空间分布的模拟性能做出评估, 然后以此为基础对模式进行分类讨论。

表 2 的第 3 和 4 列分别给出了模式模拟的 1979—1999 年平均中国东部夏季降水与 CMAP 和

GPCP 观测资料的相关系数, 可以看到, 有相当一部分模式对中国东部多年平均的夏季降水具有较好的模拟能力, 相关系数最高的是 0.89(UKMO-HadCM3 的模拟和 CMAP 的相关)。如果以模拟场与 CMAP 和 GPCP 的相关系数都高于 0.75 作为对模式分类的一个标准, 有 9 个模式满足这一标准, 我们将其定义为对降水气候平均场模拟较好的模式, 这 9 个模式是 GFDL-CM2.0、MIROC3.2(hires)、MIROC3.2(medres)、CNRM-CM3、CSIRO、GFDL-CM2.1、INM-CM2.0、UKMO-HadCM3 和 UKMO-HadGem1。剩下的 10 个模式, 我们定义为对降水气候平均场模拟不好的模式。在这 10 个模式中, 有些模式与观测的相关系数仅在 0.2—0.3, 所以, 就中国东部的夏季降水而言, 这些模式的模拟性能是较差的。

对模式降水年代际变化模拟的检验采用检验两个平均场差值的办法, 即用 1979—1999 年的平均减去 1958—1978 年的平均, 原因是: 1979—1980 年, 北半球的大气和海洋环流经历了较明显的突变, 这种变化在很多变量场中都得到了反映, 东亚地区的环流也在这一时期变化明显, 因此这两段时间平均场的差值可以较好地代表东亚夏季风过去的典型变化特征。对降水比对资料的选取则选取资料持续时间较长的中国地区站点降水资料, 经插值处理到  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  后和模式结果求相关。所以, 表 2 的第 5 列给出了模式模拟的降水 1979—1999 年平均与 1958—1978 年平均的差值和中国地区站点降水变化的相关。从表中可以看到, 虽然有较多的模式对中国东部多年平均季风降水具有较好的模拟能力, 但从年代际变化的模拟来看, 模式的模拟性能是较差的。有相当一部分模式和实际观测的相关为负, 这说明这些模式模拟的降水变化分布和实际观测是相反的。在上述我们定义的对降水气候平均场模拟较好的 9 个模式中, 只有 3 个模式(GFDL-CM2.0、MIROC3.2(hires)和 MIROC3.2(medres))与实际降水变化场的相关超过了正的 0.2, 而其他模式都为负相关。UKMO-HadCM3 虽然和气候平均场的相关高达 0.89, 但和变化场的相关却低至 -0.76, 得到了和实况近乎完全相反的降水变化场(图略)。这说明, 模式的基本态很合理并不能保证模式的年代际变化也是对的。

基于对上述模式模拟性能的评估,我们对模式进行了分类,即在对降水气候平均场模拟评估的基础上,以模式对降水年代际变化的模拟性能为评估标准再进行分类。第 1 类为对降水平均场和变化场都模拟较好的模式,即对降水平均场的模拟相关都超过 0.75,对降水变化场的模拟都为正,超过 0.2,第 2 类为对降水平均场模拟较好,但对降水变化场模拟不好的模式,即仅满足对降水平均场的模拟相关都超过 0.75,第 3 类为对降水平均场模拟不好的模式,即与

降水平均场的模拟相关都低于 0.75 的模式。根据这一分类标准,第 1 类模式有 3 个((GFDL-CM2.0、MIROC3.2(hires)和 MIROC3.2(medres)),第 2 类模式有 6 个(CNRM-CM3、CSIRO、GFDL-CM2.1、INM-CM2.0、UKMO-HadCM3、UKMO-HadGem1),第 3 类模式有 10 个(CGCM2.1(T47)、CGCM3.1(T63)、GISS-EH、GISS-ER、FGOALS-G1.0、IPSL-CM4、ECHAM5、MRI-CGCM2.3.2、CCSM3、PCM),详情情况请参见表 2。

表 2 模式和观测降水的相关和模式分类情况  
Table 2 Correlation coefficients between the models and observations

| 模式名称                | 模式和 CMAP<br>1979—1999 夏季<br>平均降水的相关 | 模式和 GPCP<br>1979—1999 夏季<br>平均降水的相关 | 模式和中国站点降水资料<br>1979—1999 减去 1958—1978<br>降水变化的相关 | 分类<br>情况 |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|----------|
| 1 CGCM3.1(T47)      | 0.51                                | 0.39                                | -0.52  | 3 类      |
| 2 CGCM3.1(T63)      | 0.59                                | 0.49                                | 0.31   | 3 类      |
| 3 CNRM-CM3          | 0.84                                | 0.85                                | -0.45  | 2 类      |
| 4 CSIRO             | 0.75                                | 0.76                                | -0.10  | 2 类      |
| 5 GFDL-CM2.0        | 0.83                                | 0.83                                | 0.46   | 1 类      |
| 6 GFDL-CM2.1        | 0.82                                | 0.80                                | -0.22  | 2 类      |
| 7 GISS-EH           | 0.33                                | 0.36                                | -0.50  | 3 类      |
| 8 GISS-ER           | 0.40                                | 0.44                                | -0.60  | 3 类      |
| 9 FGOALS-g1.0       | 0.24                                | 0.28                                | -0.50  | 3 类      |
| 10 INM-CM3.0        | 0.76                                | 0.70                                | 0.15   | 2 类      |
| 11 IPSL-CM4         | 0.68                                | 0.68                                | -0.42  | 3 类      |
| 12 MIROC3.2(hires)  | 0.80                                | 0.82                                | 0.38   | 1 类      |
| 13 MIROC3.2(medres) | 0.81                                | 0.76                                | 0.23   | 1 类      |
| 14 ECHAM5           | 0.71                                | 0.60                                | -0.43  | 3 类      |
| 15 MRI-CGCM2.3.2    | 0.60                                | 0.61                                | 0.43   | 3 类      |
| 16 CCSM3            | 0.57                                | 0.48                                | -0.09  | 3 类      |
| 17 PCM              | 0.28                                | 0.11                                | 0.46   | 3 类      |
| 18 UKMO-HadCM3      | 0.89                                | 0.84                                | -0.76  | 2 类      |
| 19 UKMO_hadgem1     | 0.80                                | 0.73                                | -0.16  | 2 类      |

在经过这种分类后,以后的讨论均以分别对这 3 类模式的集合和对所有 19 个模式的集合为基础。以后,我们将这 3 类模式的集合称为:第 1、2 和 3 类模式的集合,而全部 19 个模式的结合称为所有模式的集合。

### 3 降水场的模拟性能评估

图 1 给出了 GPCP 和 CMAP 1979—1999 年夏季平均的降水气候场,所有模式集合和 3 类模式集

合的气候场。可以看到,对多年平均场而言,在经过降水分类以后,不同类的模式集合与所有模式集合得到的气候场在分布上的差别不是很大,模式基本都能模拟出中国地区降水从东至西逐步减少的分布特征,所有的模式集合都在中国中部出现虚假的强降水中心。但从中国东部所选的关键区降水分布来看,第 1 和 2 类模式模拟的区域平均降水和实况的差值要小于第 3 类,说明这两类模式对中国东部降水气候平均的模拟要优于第 3 类。

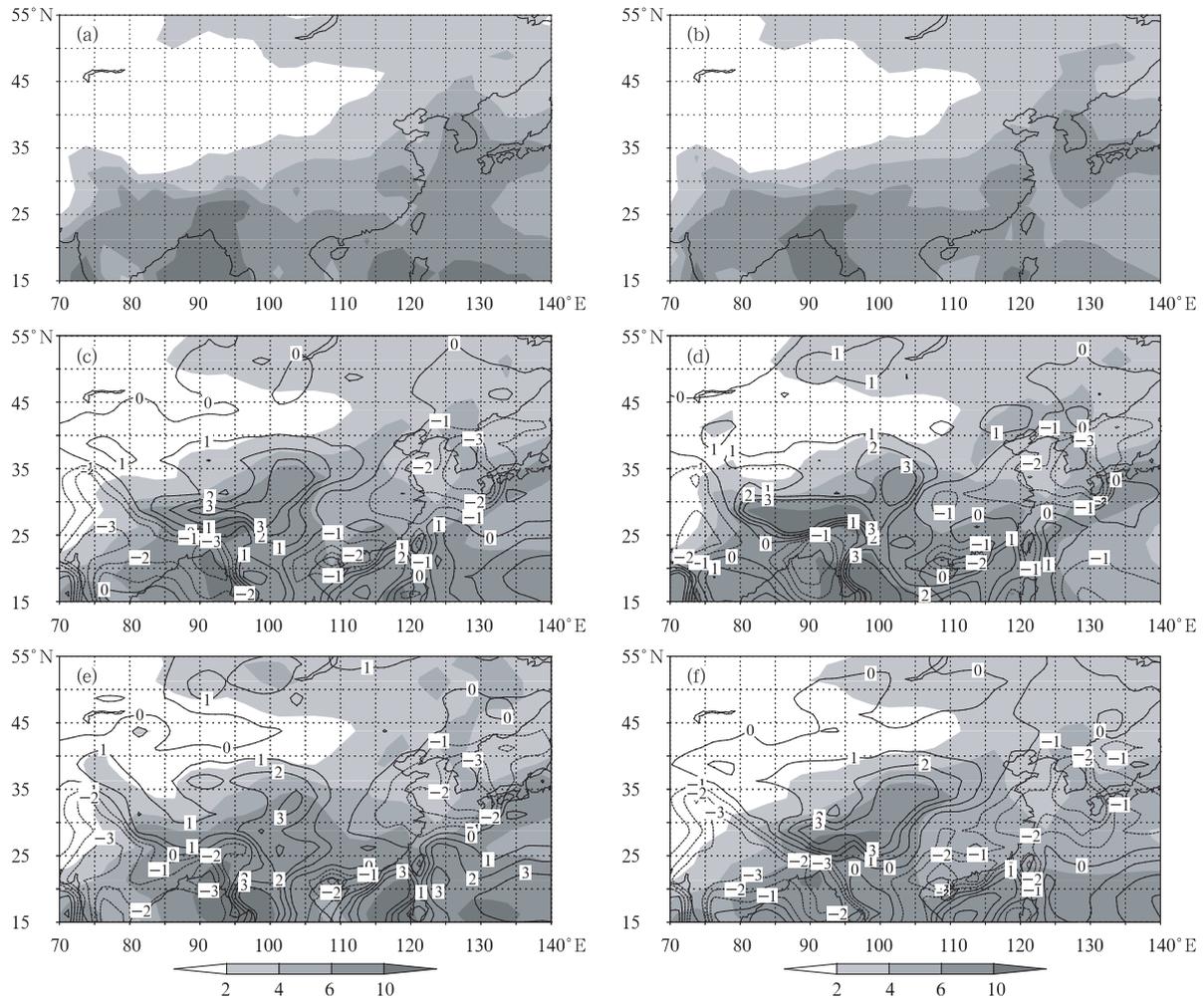


图1 1979—1999年6—8月平均降水场

(a. GPCP, b. CMAP, c. 所有模式集合, d. 第1类, e. 第2类和 f. 第3类模式集合;

图c—f中阴影区表示模式平均,等值线表示模式平均和GPCP观测场的偏差;单位:mm/d)

Fig. 1 1979—1999 June-July-August (JJA) mean precipitation based on (a) GPCP, (b) CMAP,

(c) 19-model ensemble mean, (d) Category-1 model ensemble mean, (e) Category-2

model ensemble mean and (f) Category-3 model ensemble mean

(Shaded areas in c, d, e and f indicate the model ensemble mean and contours

are the difference between model ensemble mean and GPCP; unit: mm/d)

从中国地区站点降水量的年代际差异变化图以及各类模式的集合图(图2)可以非常清楚地看到,所有类模式模拟的降水变化量级都小于实际观测。从分布上来看,所有模式的集合(图2b)和第3类模式(图2e)的集合显示了与实况场相反的分布,即华南和长江流域的降水减少,而华北的降水增多,而第2类模式(图2d)的模拟也与实况相差很大,中国大部分地区的降水都在增加。只有第1类模式(图2c)的集合显示了和实况较为一致的情形,即华北的

降水减少,长江流域的降水增加,而华南一带的降水略有减少,除此之外,东北和西北一带的降水也略有增加。应该说,第1类模式在模拟东亚季风降水的年代际变化方面,除了降水变化的量级比实际观测值小以外,模拟的分布型和实际观测是非常相似的,具有较好的模拟性能,可以认为这3个模式的集合对东亚夏季风降水的模拟具有较高的能力。

接下来的讨论将集中在评估模式对大尺度环流变化的模拟方面。为了选择较好的观测场来对此进

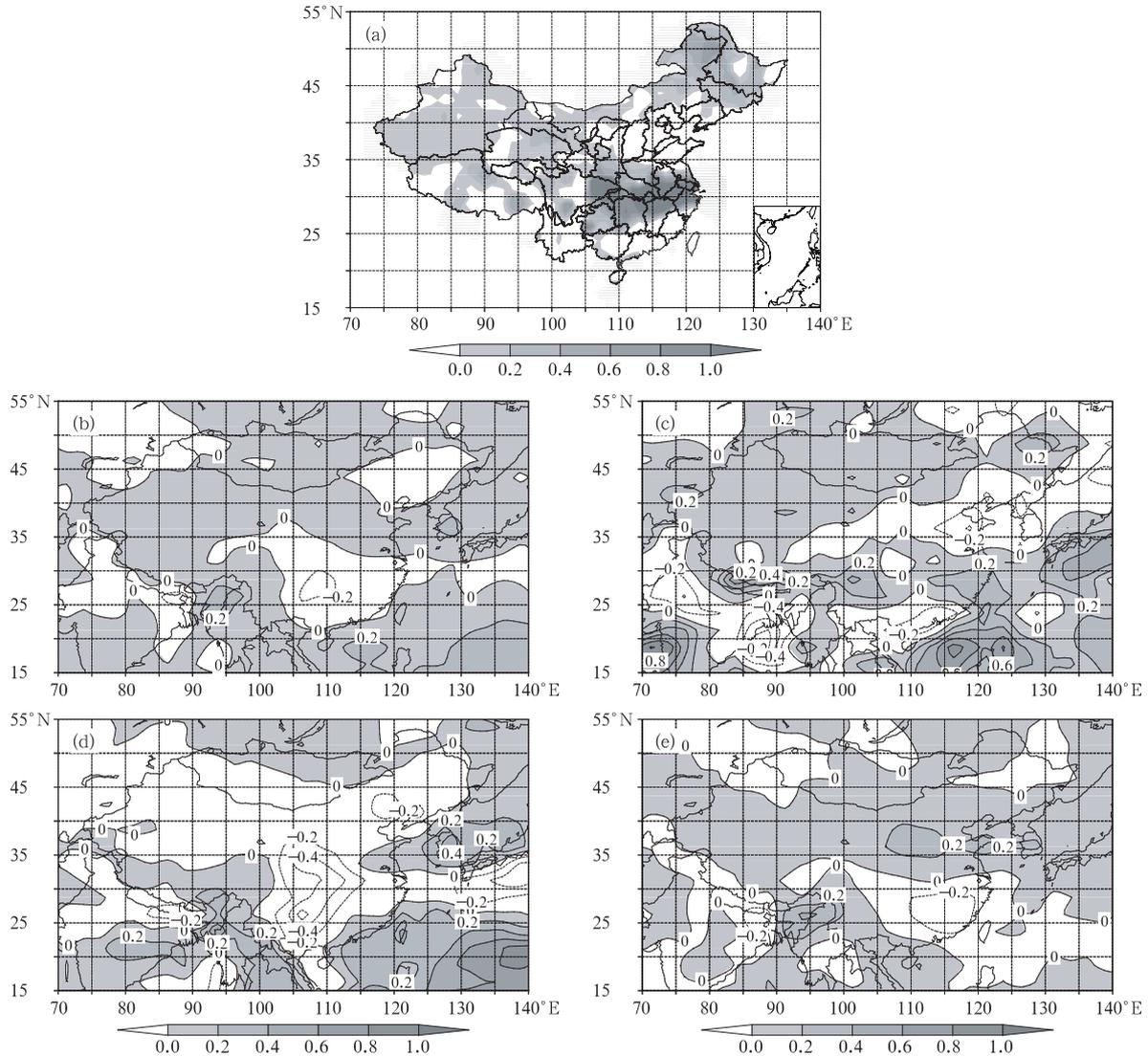


图 2 6—8 月降水年代际变化

(a. 中国站点观测资料, b. 所有模式集合, c. 第 1 类, d. 第 2 类和 e. 第 3 类模式集合;  
1979—1999 年平均减去 1958—1978 年平均)(单位:mm/d)

Fig. 2 Difference (Unit:mm/d) of JJA mean precipitation between 1979—1999 and 1958—1978 based on (a) observations from 740 stations in China, (b) 19-model, (c) Category-1 model, (d) Category-2 model and (e) Category-3 model ensemble mean

行分析,图 3 给出了 ECMWF 和 NCEP 两套再分析资料的降水年代际变化分布。对比站点观测(图 2a)来看,ECMWF 的再分析降水资料和站点观测分布基本一致,除了在西部地区的降水变化较之站点观测更大一些以外,东部的降水变化显示了明显的“南涝北旱”型,相比而言,NCEP 再分析的降水资料无论在分布型还是变化的量级上,与从站点观测得到的分布差异较大。这说明,对东亚地区而言,EC-

MWF 再分析资料在降水和环流的匹配方面和资料的质量方面要优于 NCEP 再分析资料。因此,在本文中,所有大尺度环流的观测资料将采用 ECMWF 再分析资料。

#### 4 环流场的模拟性能评估

图 4 给出了 ECMWF 再分析资料,所有模式集合与各类模式集合的 850 hPa 风场年代际变化图。

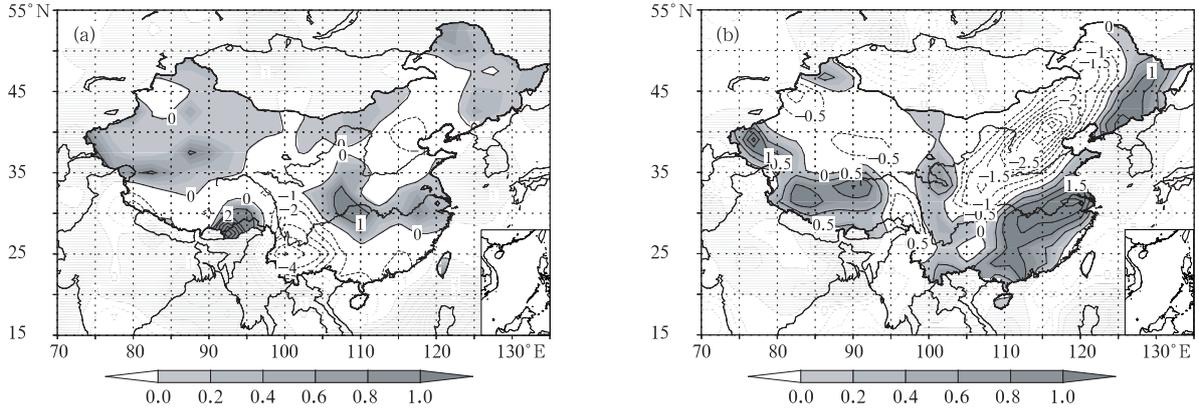


图3 ECMWF (a)和 NCEP/NCAR 再分析(b)资料的 6—8 月降水年代际变化 (1979—1999 年平均减去 1958—1978 年平均)(单位:mm/d)

Fig. 3 Difference (unit:mm/d) of JJA mean precipitation between 1979—1999 and 1958—1978 based on (a) ECMWF and (b) NCEP/NCAR

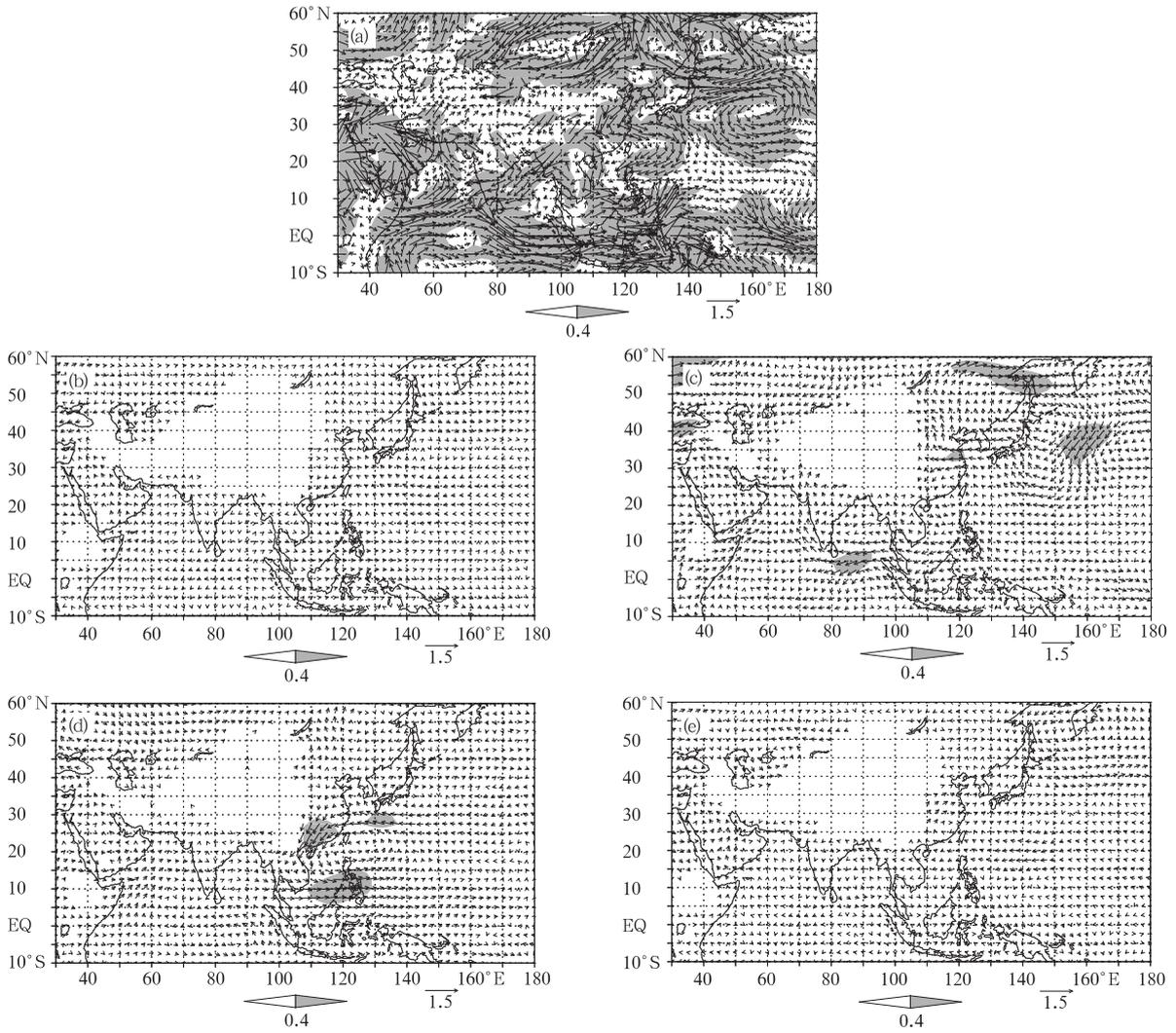


图4 ECMWF 再分析资料(a)、所有模式(b)、第1类(c)、第2类(d)和第3类(e)模式集合的 6—8 月 850 hPa 风场年代际变化 (1979—1999 年平均减去 1958—1978 年平均)(单位:m/s)

Fig. 4 Difference (Unit:m/s) of JJA mean 850 hPa winds between 1979—1999 and 1958—1978 based on (a) observations from ECMWF, (b) 19-model, (c) Category-1 model, (d) Category-2 model and (e) Category-3 model ensemble mean

从 ECMWF 观测场来看,在亚洲,过去 50 年变化的主要特征是以青藏高原和蒙古为中心盛行的反气旋流出,因此,在从东亚到孟加拉和印度半岛的地区均为异常的东北气流,说明东亚季风和印度季风环流都减弱,这与以前的研究结果一致(Ding, et al, 2003; Yu Rucong, et al, 2004)。而模式结果总的来说比观测场偏弱,风场变化的强度较之实际情形要小得多。而从分布上来看,所有的模式集合都没有模拟出大尺度亚洲季风环流的减弱。东亚,第 1 和 2 类模式在江南和华南一带出现了减弱的西南季风,但从环流的大尺度物理配置来看,这种减弱所伴随的环流型与观测场存在较大差异。

图 5 给出了 ECMWF 再分析资料,所有模式集合与各类模式集合的 500 hPa 高度场年代际变化。在实际的观测中,从蒙古到日本上空出现负变高中心,说明这些地区的位势高度减弱。但在模式中,所有的模式集合都不能再现这种位势高度场减弱的情

形,而是在整个的亚洲地区及热带印度洋和太平洋都为位势高度的增加。这表明,模式对这种分布基本没有再现能力。

中国东部(110°—120°E 平均)垂直速度场年代际变化纬度-高度剖面(图 6)表明,过去在中国东部的垂直运动发生了明显的变化。观测(图 6a)显示,华北和华南所在纬度区(约 22°—27°N 和 32°—40°N)的垂直速度变化为正,说明垂直上升运动减弱,不利于降水的出现,但华南地区的变化较小。而长江流域所在纬度(约 27°—32°N)垂直运动变化为负值,说明垂直上升运动在加强,有利于降水的发生。模式集合中,从量级上来讲所有模式的变化都要小于实际的观测。第 2 和 3 类模式的集合在长江流域一带都为正的垂直运动变化区,与观测相反。仅有第 1 类模式集合较好地再现了观测场在长江流域为负变化区,华北为正变化区的特征,说明第 1 类模式对观测场的垂直运动变化特征模拟较好。

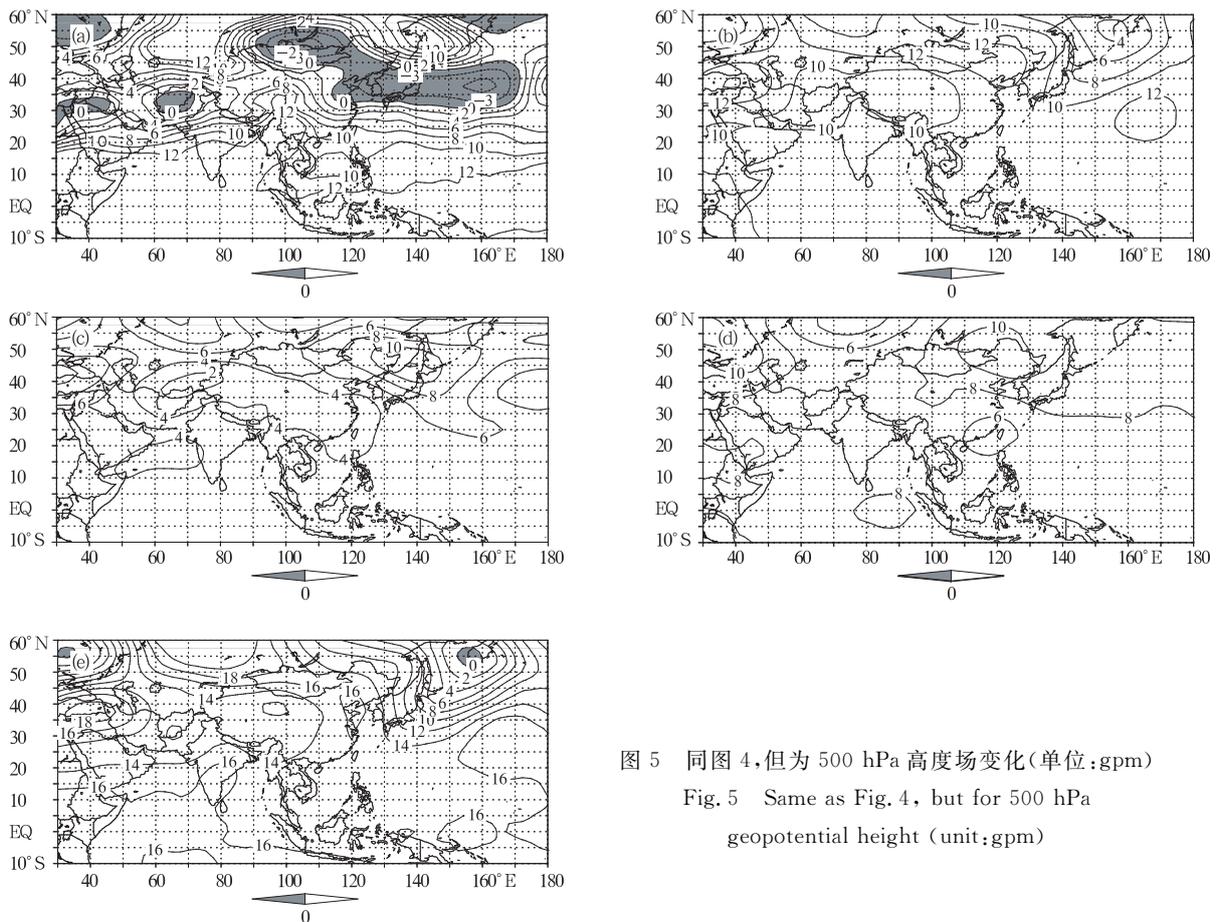


图 5 同图 4, 但为 500 hPa 高度场变化(单位:gpm)  
 Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 500 hPa geopotential height (unit:gpm)

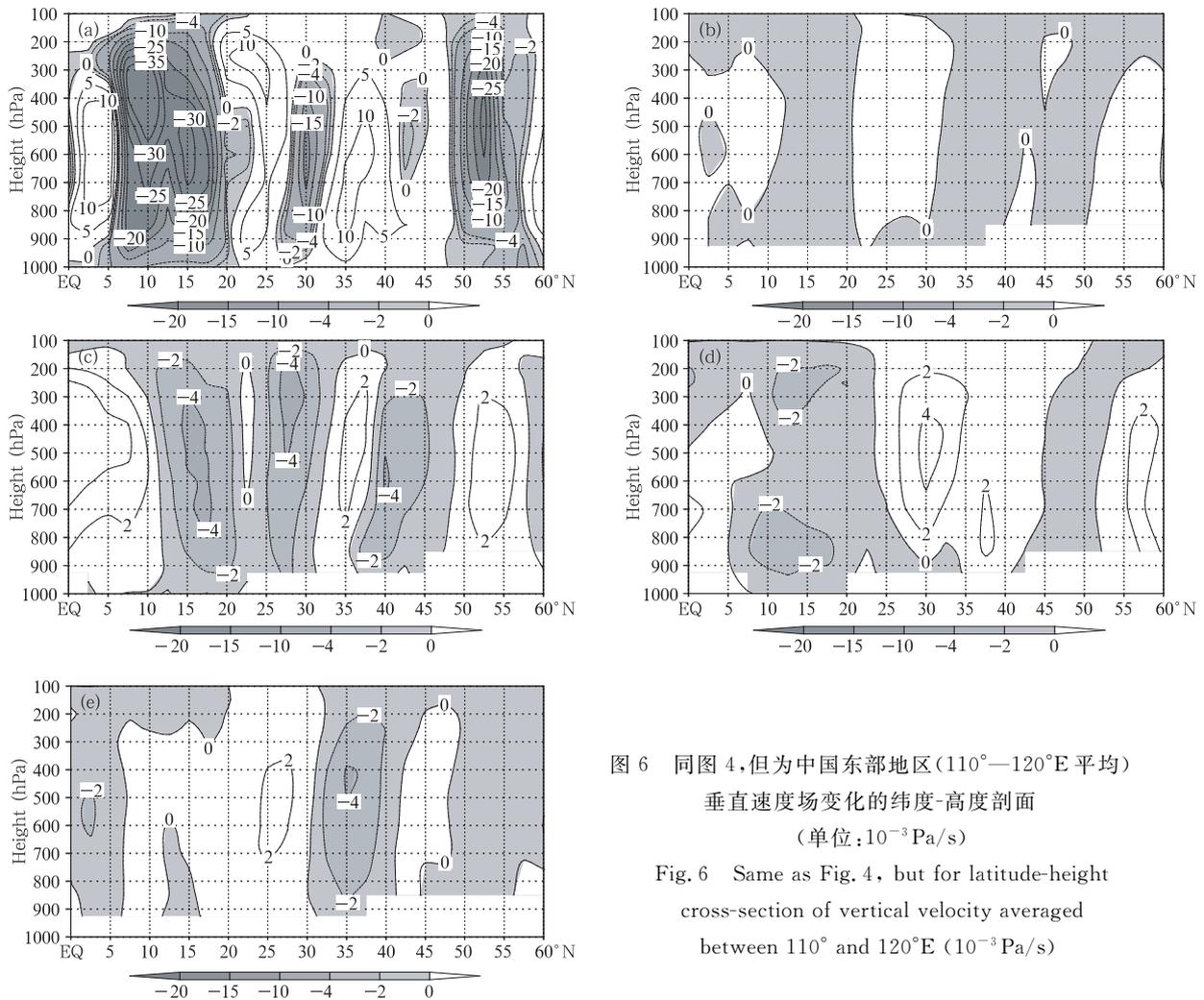


图6 同图4,但为中国东部地区( $110^{\circ}$ — $120^{\circ}$ E平均)垂直速度场变化的纬度-高度剖面(单位: $10^{-3}$ Pa/s)  
Fig. 6 Same as Fig. 4, but for latitude-height cross-section of vertical velocity averaged between  $110^{\circ}$  and  $120^{\circ}$ E ( $10^{-3}$ Pa/s)

温度场年代际变化(图7)清楚地说明了上述这些差异的原因。在实际的观测场中,过去20年在亚洲上空出现大范围的中层变冷,这种对流层中层的变冷使得气柱收缩,在相应的对流层低层气压降低,而高层气压增高,因此在850 hPa出现异常的反气旋环流(图4a),在500 hPa出现负变高中心(图5a),而在高层出现异常的气旋性环流(图略),在环流中心右侧的长江流域和华北伴有异常的垂直上升和下沉运动(图6a),但在模式中,仅有第1类模式在东亚上空出现了较弱的增温区,但仍然不能看到实际观测场中的大范围降温场。而其他模式集合都不能再现这种对流层中层的变冷,模式在所选的区域中出现的都是增温区。因此,从物理机制上来看,大部分模式里缺乏使东亚地区出现季风环流减弱的

物理机制,自然不能再现出过去50年东亚地区夏季风环流减弱的情形。应该指出的是,在单个模式的结果中,GFDL-CM2.0、GFDL-CM2.0和MIROC3.2(medres)在东亚地区上空出现了轻微变冷的区域(图10),虽然范围和强度都比实际观测场要弱得多,但这可以说明为什么第1类模式较好地再现了垂直运动场的变化特征,而其他模式都没有出现这种对流层中层变冷的情形。

最近的一些研究指出,对流层中层的变冷是东亚地区气候变化的重要原因。Ding等(2008)的分析指出,青藏高原积雪增加和热带太平洋海温的变化所引起热力差异变化可能是引起东亚上空对流层中高层变冷和季风环流减弱的一个机制。但触发这种对流层中层变冷的物理机制是否和北半球其他

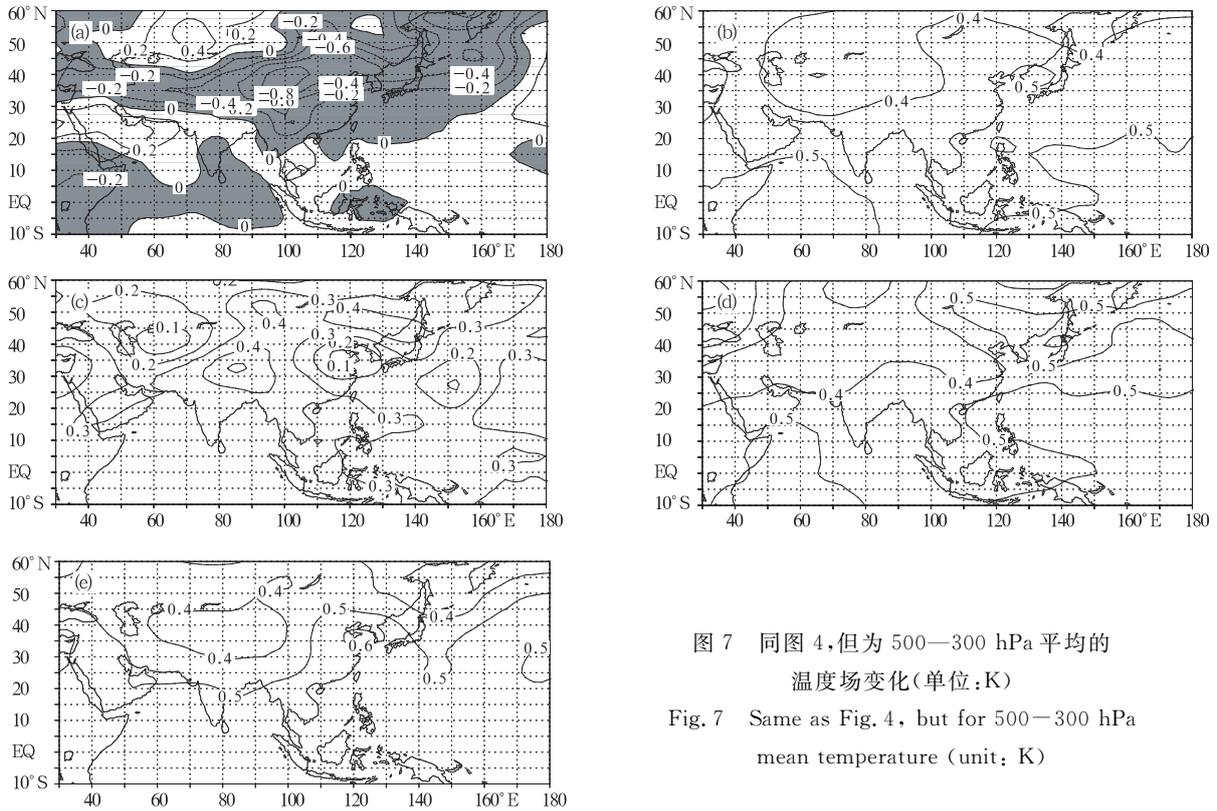


图 7 同图 4, 但为 500—300 hPa 平均的温度场变化(单位:K)

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for 500—300 hPa mean temperature (unit: K)

大尺度环流和海洋的变化有关仍是亟待研究的问题。而在模式中,除了第 1 类模式以外,大部分模式缺乏对这种大尺度温度变化的模拟能力,因此从环流场变化的物理本质来看,这基本就决定了这些模式很难再现出东亚夏季风环流场在过去的年代际变化特征。

### 5 水汽场的模拟性能评估

水汽场的变化在降水的形成中也起到了非常重要的作用。从整层水汽含量的年代际变化(图 8)来看,亚洲上空水汽含量在过去 20 年出现了一条从华北到印度半岛的明显的负值中心,说明这些地区的水汽含量出现明显的减少,尤其在华北和日本上空。这说明,华北地区降水的减少是环流变化和水汽减少共同作用的结果。但在模式中,这种亚洲上空水汽的减少仅仅在第 1 类模式中有非常轻微的体现,第 1 类模式的集合在华北上空水汽含量出现一点轻微的减少,而其他的模式,在亚洲地区的水汽含量都是增加的。

东亚地区比湿年代际变化的纬度-高度剖面(图 9)进一步说明了上述差异。对 110°—120°E 所作的纬向平均表明,实际的观测场在 30°—40°N 出现了对流层中上层的比湿负值变化区,从低层 800 hPa 一直延伸到高层,说明了华北地区上空水汽含量的减少。在模式中,第 1 类模式较好地再现了这种水汽的减少,在对流层 800—600 hPa 出现水汽变化的负值区,但是,这种负值变化的量级和范围较之实际观测要小得多。而其他模式的集合都没有能够再现这种水汽变化在东亚中纬地区的减少,而一般的特征是随着纬度和高度的增加出现水汽的减少。

### 6 讨论和结论

本文利用不同的观测资料评估了 CMIP3 19 个模式对东亚夏季风变化模拟的性能。从得到的结果来看,在评估的这些模式中,虽然有 9 个模式(GFDL-CM2.0、MIROC3.2(hires)、MIROC3.2(medres)、CNRM-CM3、CSIRO、GFDL-CM2.1、INM-CM2.0、UKMO-HadCM3 和 UKMO-HadGem1)可以较好地

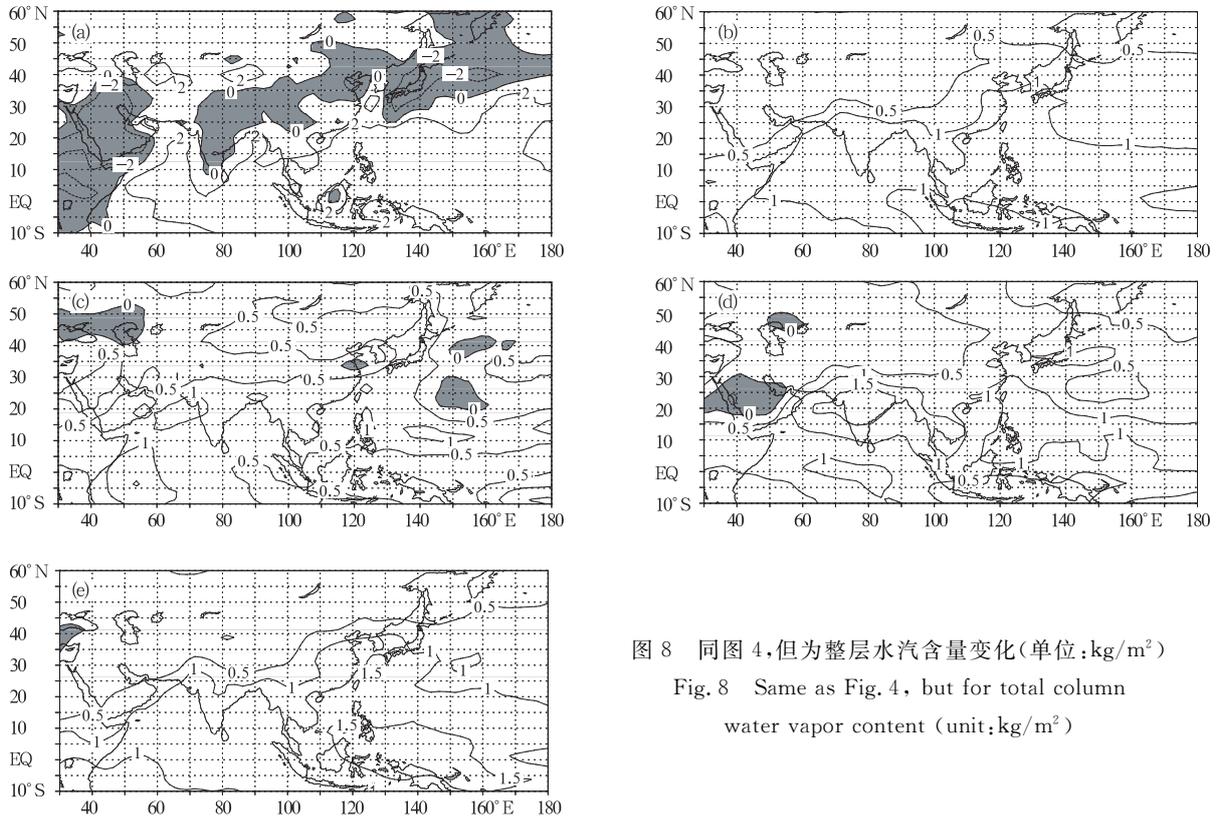


图8 同图4, 但为整层水汽含量变化(单位:  $\text{kg/m}^2$ )  
 Fig. 8 Same as Fig. 4, but for total column water vapor content (unit:  $\text{kg/m}^2$ )

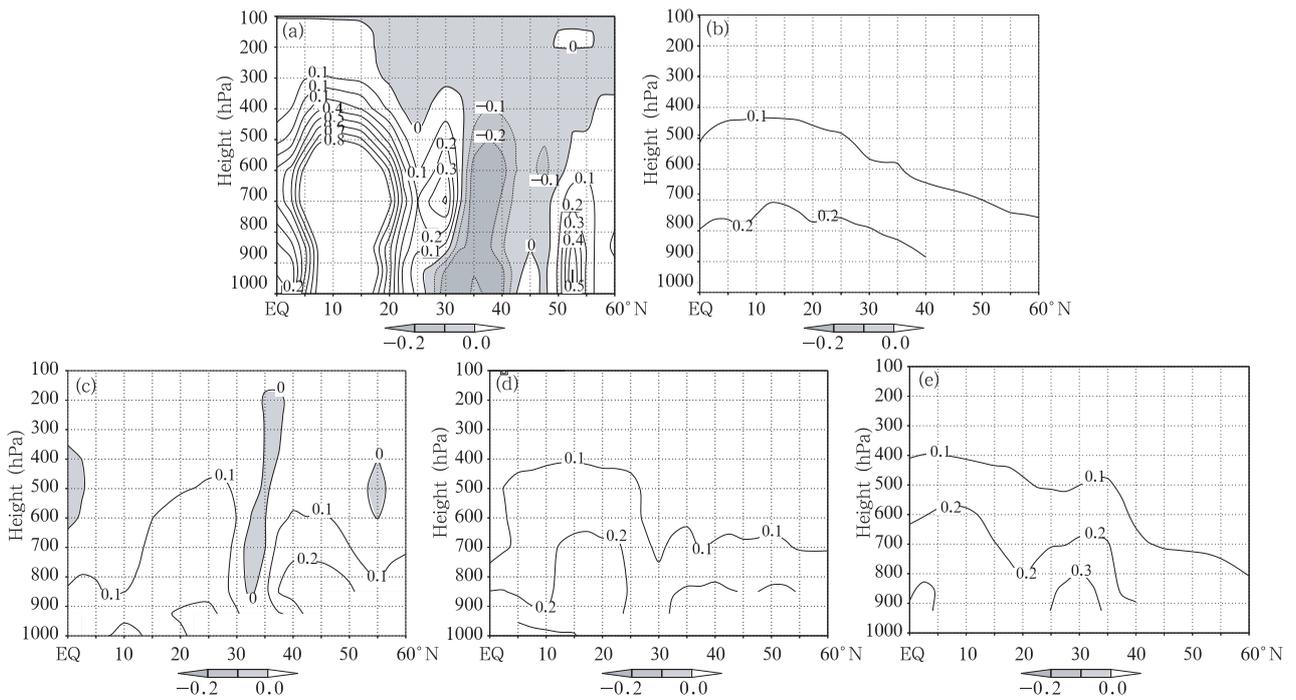


图9 同图4, 但为中国东部地区( $110^\circ-120^\circ\text{E}$  平均)比湿变化的纬度-高度剖面(单位:  $\text{kg/kg}$ )  
 Fig. 9 Same as Fig. 4, but for latitude-height cross-section of specific humidity averaged between  $110^\circ$  and  $120^\circ\text{E}$  ( $\text{kg/kg}$ )

再现中国东部地区多年平均的降水场,但仅有 3 个模式 (GFDL-CM2.0、MIROC3.2(hires)和 MIROC3.2(medres))对东亚夏季风降水和环流的年代际变化有一定的再现能力,而大部分模式不能够模拟东亚夏季风降水和环流在过去的年代际变化特征。对大尺度环流和水汽场的分析表明,模式不能够再现东亚夏季风降水变化的主要原因是模式中缺乏相应的物理机制,因而不具备使降水发生变化的动力和热力特征。

在分析中可以看到,性能较好的 3 个模式(第 1 类模式)所具备的主要特点是能够较好地再现东亚地区垂直运动场和水汽场的变化特征。这说明,第 1 类模式较好地抓住了降水变化的动力和热力学机制,因此可以较好地模拟出中国东部南涝北旱的气候变化特征。但是,在这些模式中,温度、垂直速度和水汽的变化从量级上都明显小于实际观测,因此模式中降水的变化也小于实际观测。图 10 和 11 所显示的单个模式的结果更清楚地说明了这一点。从

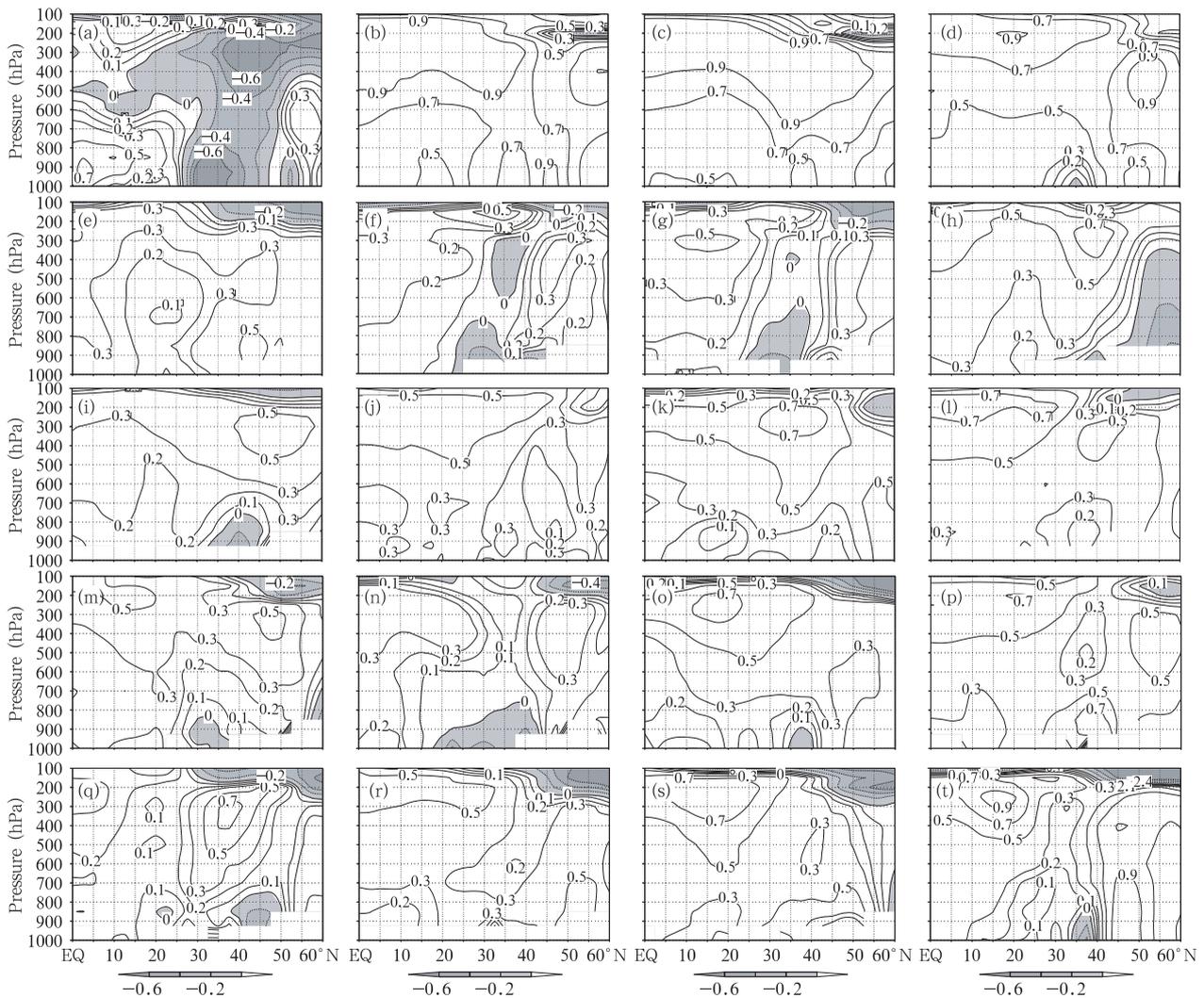


图 10 ECMWF 再分析资料和 19 个模式中国东部地区(110°—120°E 平均)温度年代际变化(1979—1999 年平均减去 1958—1978 年平均)纬度-高度剖面图(单位:K)

Fig. 10 Latitude-height cross-section of temperature difference (unit:K; 1979—1999 minus 1958—1978 averages) averaged between 110° and 120°E based on ECMWF and 19 individual models

- (a. ECMWF, b. CGCM3.1(T47), c. CGCM3.1(T63), d. CNRM-CM3, e. CSISO-MK2.0, f. GFDL-CM2.0, g. GFDL-CM2.1, h. GISS-EH, i. GISS-ER, j. FGOALS-g1.0, k. INM-CM3.0, l. IPSL-CM4, m. MIROC3.2(hires), n. MIROC3.2(Medres), o. ECHAM5/MPI-OM, p. MRI-cgcm2.3.2, q. NCARCCSM3, r. NCAR PCM, s. UKMO-HadCM3, t. UKMO-HadGEM1)

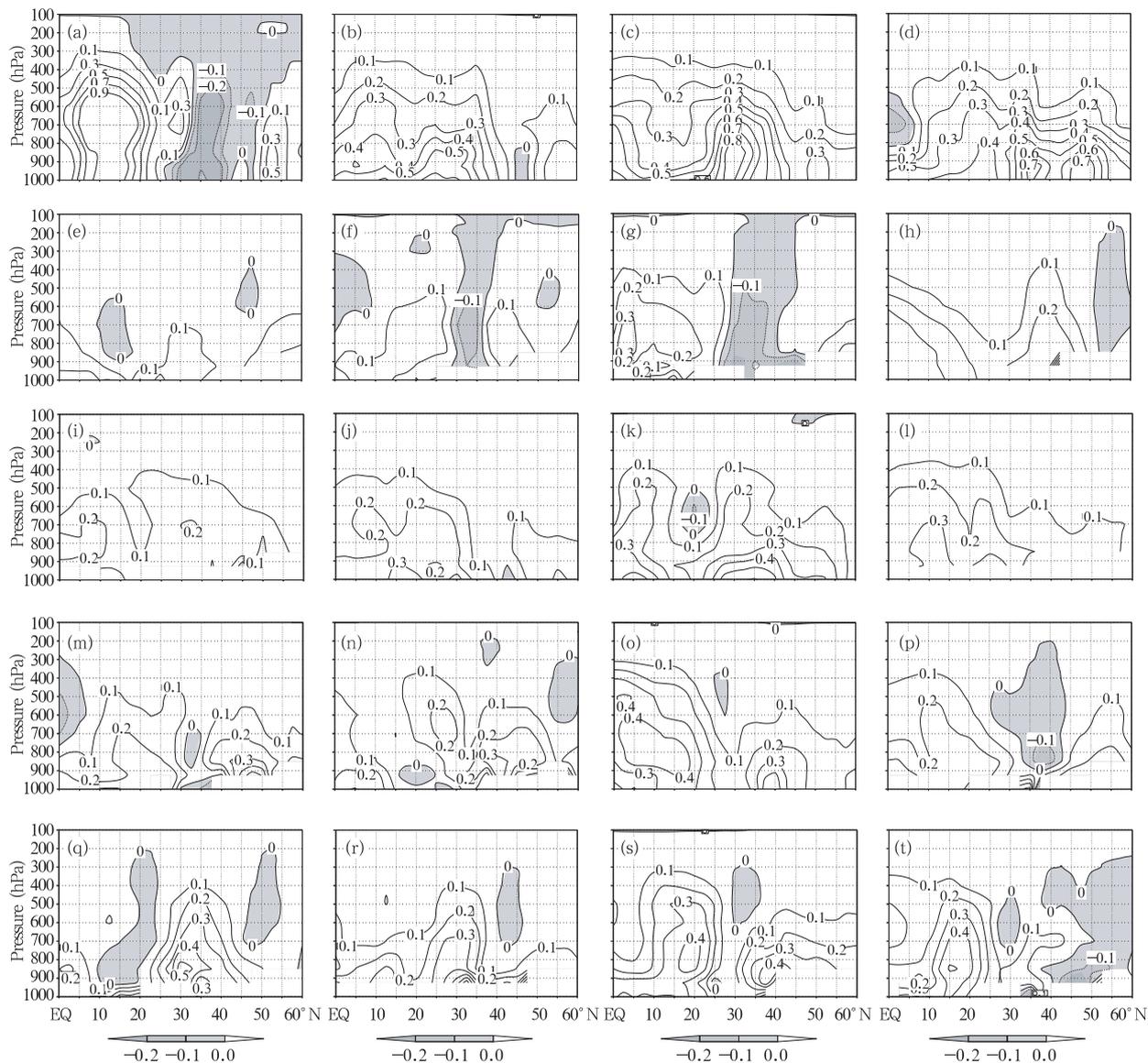


图 11 同图 10, 但为比湿年代际变化(单位: kg/kg)

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for specific humidity (unit: kg/kg)

ECMWF 和所有单个模式在东亚( $110^{\circ}$ — $122.5^{\circ}$ E) 温度和比湿年代际变化的纬度-高度剖面上可以发现, 在 ECMWF 观测资料中, 如本文前面提到的, 华北一带的上空是非常深厚的变冷区, 而对应的是整层对流层的变干, 而在模式中, 除了 GFDL-CM2.0、GFDL-CM2.1、MIROC3.2(hires) 和 MIROC3.2(medres) 外, 其他模式在相应的地区基本都是变暖和 水汽增加的。而在这 4 个模式中, GFDL-CM2.0 和 GFDL-CM2.1 很好地再现了水汽场整层变干的垂直分布特征, 但其模拟的温度场变冷较之观测范围偏小, 强度偏弱, 但由于其在对流层中层也出现了

微弱的变冷, 因此和观测还算接近。而 MIROC3.2(hires) 和 MIROC3.2(medres) 模拟的东亚一带的温度变化较之观测都偏弱, 水汽变化仅能在 MIROC3.2(hires) 看到, 变冷区和变干区垂直伸展范围都很小, 只局限在近地面层。因此, 相比较而言, GFDL-CM2.0 和 GFDL-CM2.1 在模拟东亚温度和水汽的垂直分布方面是较好的。但是, 可以发现, GFDL-CM2.1 水汽变化的纬向伸展范围比实际要大, 因此不能像 GFDL-CM2.0 一样较好地再现东亚降水变化的纬向分布特征。所以, 总的来看, 模拟东亚夏季风变化性能最好的模式是 GFDL-CM2.0,

这也解释了为什么该模式模拟的降水变化和实际观测的相关系数最高。

在本文中也可以看到,各个模式对东亚夏季风降水和环流模拟的差异很大,这可能是由多种原因引起的,模式本身的性能,参数化方案的选择,模式对强迫的不同响应机制等。而且由于造成东亚夏季风环流年代际变化的原因尚不是很清楚,造成东亚上空对流层变冷的机制可能是外强迫,也可能是气候系统内部的调整,这些关键的机制如果不能在模式中再现,就很难再现环流的变化。而降水的变化就更复杂,动力学和热力学因子的贡献都有可能引起其变化,即使对同样的强迫,降水的变化也较之温度的变化复杂得多,受到的影响因子也更多。加上东亚地区地形复杂,纬向分布的一点点差异就可能造成降水变化的较大差异,GFDL-CM2.0和GFDL-CM2.1的差别就清楚地说明了这一点。

本文的评估也清楚地表明,当选择不同模式进行集合时,模式对某一研究变量的模拟性能好坏极大地影响了集合的结果。当模拟性能较好的模式在一起进行集合时,所得到的结果更加接近于真实的观测结果。就特定的研究变量而言,这种集合更加优于将所得到的所有模式进行集合。这说明,虽然多模式集合一般优于单个模式的结果,但集合之前对所选模式性能的评估是非常重要的。如果参与集合的模式对该变量具有较好的模拟性能,抓住了该变量变化的物理机制,则这些模式的集合结果将更可信。而性能较差模式的集合则可能导致与实际观测相差甚远的结果。这说明,只有在更好地理解气候变化物理机制,并进一步对模式性能进行完善之后,当前和未来气候预测的可信度才能得到提高。

**致谢:**感谢各模式组提供的模拟结果,感谢气候模式诊断与比较计划(PCMDI)收集并存储模式输出结果,感谢JSC/CLIVAR耦合模式工作组(WGCM)组织模式资料分析工作。IPCC资料存储得到美国能源部科学办公室的支持。感谢IPCC AR4 WGI TSU在模式结果方面的技术支持。感谢ECMWF提供ERA40再分析资料。

## References

Adler R F, et al. 2003. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *J Hydrometeorol*, 4: 1147-1167

Annamalai H, Hamilton K, Sperber K R. 2007. South Asian summer monsoon and its relationship with ENSO in the IPCC AR4

simulations. *J Clim*, 20: 1071-1083

Cubasch U, Meehl G A, Boer G J, et al. 2001. Projections of future climate change // Houghton J T, et al. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 525-582

Dai A. 2006. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models. *J Climate*, 19, 4605-4630

Ding Yihui, Sun Ying. 2003. Long-term climate variability in China. WMO/TD No. 1172, 18-33

Ding Yihui, Sun Ying, Wang Zunya, et al. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes of the inter-decadal variability of the summer precipitation in China. *Int J Climatology*, accepted

Feng Jinming, Fu Congbin. 2007. Inter-comparison of long-term simulations of temperature and precipitation over China by different Regional Climate Models. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 31(5), 805-814

Gao Xuejie, Lin Wantao, Fred Kucharsky, et al. 2004. A simulation of regional climate in china by using CCM3 and observed SST. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 28(1): 78-90

Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models. *Adv Atmos Sci*, 22(4): 479-495

Jiang Dabang. 2008. Projected potential vegetation change in China under the SRES A2 and B2 scenarios. *Adv Atmos Sci*, 25(1): 126-138

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull Amer Meteor Soc*, 77:437-470

Knutti R, Meehl G A, Allen, M R, et al. 2006. Constraining climate sensitivity from the seasonal cycle in surface temperature. *J Clim*, 19: 4224-4233

Lambert S J, Boer G J. 2001. CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Clim Dyn*, 17: 83-106

Lin J L, et al. 2006. Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: Convective signals. *J Clim*, 19: 2665-2690

Liu Yanxiang, Wu Tongwen, Guo Yufu, et al. 2007. Prediction research of climate change trends over North China in the future 30 years. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(1): 45-51

Meehl G. A, et al. 2007. The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bull Amer Meteor Soc*, 1383-1394

Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. 2007. *Climate Models and Their Evaluation*// Solomons, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press

Sun Ying, Solomon S, Dai A, et al. 2006. How often does it rain? *J Climate*, 19: 916-934

Sun Ying. 2005. Introduction to analyses of climate model simulations for the IPCC AR4. *Adv Climate Change*, 1(4): 161-163

- Tang Jianping, Zhao Ming, Su Mingkai. 2008. Numerical simulation of regional climate change under IPCC A2 scenario in China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 66(1): 13-25
- Xie P, Arkin P A. 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull Amer Meteor Soc*, 78: 2539-2558
- Xu Qun. 2001. Abrupt change of the mid-summer climate in central east China by the influence of atmospheric pollution. *Atmos Environ*, 35: 5029-5040
- Yu Rucong, Wang Bin, Zhou Tianjun. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. *Geo Res Lett*, 31, L22212, doi:10.1029/2004GL021270
- Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon. *J Climate*, 20: 5344-5355
- Zhai Panmao, Ren Fuming, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 57(2): 208-216
- Zhao Zongci, Ding Yihui, Li Xiongdong, et al. 1995. Evaluation of CGCM climate simulation in East Asian region. *Quart J Appl Meteor* (in Chinese), 6(1): 9-18
- Zhou T J, Li Z X. 2002. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM. *Clim Dynamics*, 19:167-180

### 附中文参考文献

- 冯锦明, 符淙斌. 2007. 不同区域气候模式对中国地区温度和降水的长期模拟比较. *大气科学*, 31:805-814
- 高学杰, 林万涛, Kucharsky F. 等. 2004. 实况海温强迫的 CCM3 模式对中国区域气候的模拟能力. *大气科学*, 28(1):78-90
- 柳艳香, 吴统文, 郭裕福等. 2007. 华北地区未来 30 年气候变化趋势模拟研究. *气象学报*, 65(1):45-51
- 孙颖. 2005. 用于 IPCC 第四次评估报告的气候模式比较研究简介. *气候变化研究进展*, 1(4):161-163
- 汤剑平, 赵鸣, 苏炳凯. 2008. IPCC A2 情景下中国区域气候变化的数值模拟. *气象学报*, 66(1):13-25
- 赵宗慈, 丁一汇, 李晓东等. 1995. 海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估. *应用气象学报*, 6(1), 9-18
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测. *气象学报*, 57(2):208-216