林朝晖, 杨笑宇, 吴成来, 等. 2018. CMIP5 模式对中国东部夏季不同强度降水气候态和年代际变化的模拟能力评估 [J]. 气候与环境研究，23 (1): 1−25. Lin Zhaohui, Yang Xiaoyu, Wu Chenglai, et al. 2018. Capability assessment of CMIP5 models in reproducing observed climatology and decadal changes in summer rainfall with different intensities over Eastern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (1): 1−25, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9585.2017.16207.

CMIP5 模式对中国东部夏季不同强度降水气候态和年代际变化的模拟能力评估

林朝晖 [1, 2, 3]　杨笑宇 [1, 2]　吴成来 [1]　王雨曦 [1, 2]　陈红 [1]

1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心，北京 100029
2 中国科学院大学，北京 100049
3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

摘　要　利用东亚地区逐日降水资料，评估了 17 个 CMIP5 气候模式对中国东部夏季不同强度降水的时空分布、不同强度降水对 1970 年代末中国东部夏季总降水量年代际转折的贡献的模拟能力。从夏季不同强度降水占总降水的比重来看，在中国东北和华北地区，小雨和中雨占主导；而在华南和江淮地区，大雨和暴雨则相对更为重要。CMIP5 模式可大致模拟出中国东部小雨、大雨和暴雨占总降水比重的空间分布，但对中雨占比的空间分布模拟较差。总体说来，多数 CMIP5 模式高估了小雨和中雨的比重，但低估了大雨和暴雨的比重，从而导致大多数模式高估东北和华北的总降水量，而低估华南和江淮的总降水量。对 1970 年代末我国华北和江淮地区夏季降水量的年代际转折，观测资料表明该转折主要体现为大雨和暴雨雨量的年代际转折；仅有少数 CMIP5 模式能模拟出华北大雨和暴雨年代际减少的特征，使得这些模式对华北地区总降水的年代际变化也有较好的模拟能力。对于江淮区域，由于大雨和暴雨的比重被严重低估，尽管部分模式能模拟出夏季总降水量年代际增加的特征，但却多以小雨、中雨的年代际变化为主。多模式集合并不能显著提高模式对不同强度降水的空间分布的模拟能力，尤其是降水年代际变化的模拟能力。

关键词　CMIP5 模式　降水强度　年代际变化　模式评估
文章编号　1006-9585（2018）01-0001-25　　**中图分类号**　P435.2　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16207

Capability Assessment of CMIP5 Models in Reproducing Observed Climatology and Decadal Changes in Summer Rainfall with Different Intensities over Eastern China

LIN Zhaohui[1, 2, 3], YANG Xiaoyu[1, 2], WU Chenglai[1], WANG Yuxi[1, 2], and CHEN Hong[1]

1 *International Center for Climate and Environment Sciences*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
2 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
3 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

收稿日期　2016-11-23；**网络预出版日期**　2017-09-13
作者简介　林朝晖，男，1968 年出生，博士，研究员，从事地球系统模式研制及气候水文模拟与预测研究。E-mail: lzh@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点研发项目 2016YFC0402702，国家自然科学基金项目 41575095、41575080，中国科学院国际合作一带一路专项 134111KYSB20160010
Funded by　National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFC0402702), National Natural Science Foundation of China (Grants 41575095 and 41575080), Chinese Academy of Sciences “The Belt and Road Initiatives” Program on International Cooperation (Grant 134111KYSB20160010)

Abstract The capabilities of 17 CMIP5 models for simulating the intensity distribution of summer rainfall over eastern China are evaluated based on daily observational data. The decadal changes of rainfall with different intensities in the later 1970s and their relative contributions to the decadal change in total rainfall for both observation and model simulations are further analyzed and compared. Observations indicate that the total rainfall is mainly composed of light and medium rainfall over northern and northeastern China, while heavy rainfall account for a large proportion of the total rainfall over southern China and the Yangtze-Huai River basin (YHRB). In general, the CMIP5 models are able to capture the observed spatial distribution of proportion of light and heavy rainfall to total rainfall amount in Eastern China, except for medium rainfall. Most models have a bias toward an overestimation of the light and medium rainfall events, and an underestimation of heavy rainfall events. Therefore, these models overestimate the amount of total rainfall over northern and northeastern China and underestimate the amount of total rainfall over southern China and the YHRB. Our analysis indicates that the observed decadal changes in total rainfall over northern China and the YHRB in the late 1970s are mainly attributed to changes in heavy rainfall events. Over northern China, a few CMIP5 models reproduced the observed decadal decrease in both heavy rainfall and total rainfall. Over the YHRB, several models can reproduce the observed decadal increase in total rainfall. However, these models failed to reproduce the increase in heavy rainfall amount due to the model bias of a severe underestimation of heavy rainfall. The authors also find out that multi-model ensemble technique cannot significantly improve the model performance in simulating the spatial distribution of rainfall intensity, especially its decadal changes.

Keywords CMIP5 models, Precipitation intensity, Decadal variability, Model evaluation

1 引言

作为水分循环过程的重要组成部分，降水与蒸发、径流、土壤水含量等其他水循环要素紧密关联并相互影响。我国地处东亚季风区，东亚季风系统和青藏高原大地形等多重因素的共同作用导致我国东部夏季降水有着独特的区域特征及复杂的变率(Lin and Zeng, 1997; 江志红等，2009；Tian et al., 2015)，中国东部夏季降水的模拟与预测也成为气候研究重点关注的问题 （Lin et al., 2005; Yang et al., 2008; 李宏毅等，2012；Luo et al., 2013; 陈晓晨等，2014）。

气候模式作为研究气候历史演变规律和预估未来气候变化的有力工具，其对降水和温度等关键气候要素的模拟能力是模式性能优劣的重要指标，而模式性能的评估也可为进一步改进和完善气候系统模式提供科学依据。Hagemann et al. (2006) 在评估ECHAM5模式对区域降水模拟能力的基础上，指出模式垂直分辨率的提高可有效改善模式对区域性降水强度气候态与季节循环的重现能力；Yao and Zhang (2010)的分析表明，耦合区域气候模式RegCM3-POM 对中国夏季雨带分布的模拟要明显优于单独的大气模式，对长江流域及华南降水强度的模拟性能改进尤为明显，同时耦合模式可更为真实地刻画出中国东部汛期雨带的移动过程；Zhang and Zhou (2014)通过对全球季风降水强度的模拟结果评估，指出改进后的FGOALS（FGOALS-s2）较其前一个版本（FGOALS-s1）在热带及全球季风区降水强度及其年际变率等方面均有所改善。

耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) 致力于全球耦合气候模式模拟性能的比较与评估，参与该计划的模式为国际上不同阶段最为先进的各类气候系统模式，CMIP 模式对全球以及东亚区域降水的模拟能力，也是该耦合模式比较计划重要的内容之一。基于第三次耦合模式比较计划（CMIP3）的多模式模拟结果，Dai (2006)指出CMIP3模式总体上对全球降水强度空间分布及年际变率有着较好的重现能力；许崇海等（2007）的研究表明，多数 CMIP3 模式对东亚地区温度的模拟偏低，模拟的降水强度偏强，总体而言CMIP3模式对温度模拟效果要优于降水；刘敏和江志红（2009）的研究则指出，多数CMIP3模式虽然能够再现中国降水强度年变化和空间形态特征，对东部季风区雨带北抬具有一定的刻画能力，但模式对雨带位置的模拟偏北；Tu et al. (2009)的评估研究指出，CMIP3模式对中国西南、东北地区的季风降水强度季节循环有一定模拟能力，但是低估了江淮流域梅雨强度。CMIP5作为最新的耦合模式比较计划，无论是参与该计划的气候模式的物理过程参数化方案、模式分辨率等，还是其情景试验设计，均比其前一期耦合模式比较计划（CMIP3）更加合理 (Taylor et al., 2012)。基于CMIP5模式的模拟结果，评估现阶段全球气候系统模式对东亚以及中国降水模拟能力的工作也有很多。例如，Qu et

al. (2014) 指出 CMIP5 模式可以在一定程度上模拟出现阶段东亚地区大范围降水强度空间分布，对相关的大气环流、水汽输送等也有较好模拟能力；陈晓晨等（2014）的研究指出，和 CMIP3 模拟结果类似，多数 CMIP5 模式能够模拟出中国降水由西北向东南递增的分布特点，但是，华北、东北地区，90%以上模式模拟降水偏多；对华南地区，50%以上的模式模拟的降水偏少；赵宗慈等（2015）也指出，大部分 CMIP5 模式能够较好地模拟出东亚地区雨季降水量的空间分布特征，就东亚地区平均而言，冬半年降水量模拟值普遍偏高，夏半年模拟值往往偏低，冬半年降水模拟效果优于夏半年。

已有研究表明，全球变暖背景下未来中国地区不仅年平均降水量将可能增加，与降水相关的极端事件（如强降水事件的发生频率和强度）也都将显著增加，且随温度升高这些变化将更加显著（江志红等，2009；姜大膀和富元海，2012）。显然利用气候模式对中国区域未来极端降水事件变化的预估结果的可信程度，很大程度上取决于模式对中国区域过去极端降水事件的模拟能力。利用 CMIP5 多模式的模拟结果，吴佳等（2015）分析了中国区域平均降水、95%百分位以上的强降水和 99%百分位以上的极端降水对全球变暖的响应，结果表明，CMIP5 多模式集合模拟的当代中国区域平均降水对增温的响应与观测相比偏弱，而极端降水的响应则偏强。Jiang et al. (2015) 利用降水总量、持续干旱日数、降水强度、95%百分位以上的强降水比重 4 个指数，分析了 31 个 CMIP5 模式对中国地区极端降水的模拟性能，指出尽管多数 CMIP5 模式模拟的 1960～2005 年中国东部降水强度偏弱，但模式模拟的雨日往往偏多，进而导致绝大多数模式模拟的总降水量偏多；模式对中国东部地区降水总量和降水强度空间模态的模拟技巧优于持续干旱日数和 95%百分位以上强降水比重，对中国东部地区降水总量、强度以及极端降水比重这 3 个指标的年际变化也有一定模拟能力。不过 Jiang et al.(2015) 的工作虽然初步探讨了 CMIP5 模式模拟的中国东部地区降水量和降水日数之间的关系，但并未对中国东部进行分区予以细化分析。就降水强度的划分方法而言，除基于百分位的定义方法，在气象预报业务中通常按照日雨量的大小，将降水区分为小雨、中雨、大雨和暴雨 4 个不同的等级（韩振宇和周天军，2012）。李红梅等（2008）利用上述定义，结合中国区域 740 个气象台站的降水资料，分析了中国大陆 7 月、8 月小雨、中雨、大雨和暴雨的演变规律，指出长江流域的降水总量、频率和暴雨强度在过去 40 年有所加大，华北则相反。基于上述不同强度等级的标准，陈活泼（2013）将降水细化分级，并基于 CMIP5 模式预估了 21 世纪末期不同强度等级降水量值及日数的演变情形，指出 21 世纪末中国区域中雨、大雨和暴雨频次都明显增加，强度加强，且东北和华北地区中雨的增加对年降水量增加的贡献最大；南方地区年降水量的增加主要是由于大雨和暴雨显著增加的结果。

如前所述，东亚夏季风及其降水存在着复杂的不同时间尺度的变化特征，伴随着东亚夏季风在 20 世纪 70 年代末的年代际转折，中国东部季风降水也存在着显著的年代际变化（黄荣辉等，2006）。气候模式对东亚夏季风及其降水年代际变化的模拟能力，也已成为现阶段气候模式性能评估的重要方面。利用 CMIP3 多模式模拟结果，孙颖和丁一汇（2008）研究了 CMIP3 模式对东亚夏季风降水强度 1970 年代末期前后年代际变化的模拟情形，指出大多数模式没能充分抓住降水强度年代际变化特征，主要原因在于模式难以准确刻画夏季风降水变化的动力及热力机制；顾薇和李崇银（2010）的分析表明，CMIP3 模式对 20 世纪中国东部夏季降水量值年代际变化模拟结果并不理想，仅对 70 年代中期的降水量值的年代际突变有一定模拟能力，且模式对引发降水年代际变率的环流因子，如太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Osicillation, PDO)、北大西洋振荡 (North Atlantic Osicllation, NAO) 的模拟技巧要高于降水。陈红（2014）对 38 个 CMIP5 模式的模拟结果评估表明，仅有少数 CMIP5 模式能再现出中国夏季降水强度在 1978 年前后的年代际变化，这主要归因于上述模式对相应的环流场变化以及 PDO 模拟效果较好的缘故。但已有研究并未给出气候模式模拟的中国东部夏季不同强度降水对 1970 年代末中国东部夏季总降水量年代际转折的相对贡献，且 CMIP5 模式对中国东部夏季不同强度降水的年代际变化的模拟也有待细致分析。

在本文的研究中，我们将采用气象预报业务中基于日雨量大小划分降水强度的规范，将降水区分为小雨、中雨、大雨和暴雨 4 个不同的强度等级，系统评估 CMIP5 模式对中国东部不同强度等级降水的模拟能力，以及不同强度等级降水的模拟偏差

对中国东部总降水模拟偏差的贡献。此外，本文还将针对 1970 年代末中国东部夏季降水存在的年代际转折，分析不同强度等级降水对总降水量年代际变化的相对贡献，以及 CMIP5 模式的模拟能力。

2 数据和方法

本文采用的观测降水是基于 2200 多个台站观测分析得到的东亚地区逐日降水资料，简称 EAG (Xie et al., 2007)，其中中国区域数据来自于中国气象局和黄河水利委员会。该资料的空间分辨率为 0.5°（纬度）×0.5°（经度），时段为 1962～2007 年。

本文分析中选取了 17 个参加 CMIP5 计划的全球耦合气候模式的历史模拟试验结果的日降水资料，模拟时段为 1850～2005 年。上述 17 个 CMIP5 模式中，大气模式分辨率最高为 1.1°（纬度）×1.1°（经度）（MRI-CGCM3），最低为 2.8°（纬度）×2.8°（经度）（BCC-CSM1-1），模式基本信息介绍可参见表 1。历史模拟试验中模式由观测的温室气体含量、气溶胶、土地利用、火山和太阳辐射等自然或人类活动强迫场驱动(Tian et al., 2015)。多模式集合(Multi-Model Ensemble, MME)结果则由等权重算术平均计算而得。

表 1 17 个 CMIP5 气候模式基本信息简介

Table 1 Description of the 17 CMIP5 climate models used in the present study

模式简称	空间分辨率	研发国家
ACCESS1.0	1.3°（纬度）×1.9°（经度）	澳大利亚
BCC-CSM1.1	2.8°（纬度）×2.8°（经度）	中国
BNU-ESM	2.8°（纬度）×2.8°（经度）	中国
CanESM2	2.8°（纬度）×2.8°（经度）	加拿大
CCSM4	0.94°（纬度）×1.3°（经度）	美国
CSIRO-MK3.6.0	1.9°（纬度）×1.9°（经度）	澳大利亚
FGOALS-g2	3.0°（纬度）×2.8°（经度）	中国
IPSL-CM5A-LR	1.9°（纬度）×3.8°（经度）	法国
IPSL-CM5A-MR	1.3°（纬度）×2.5°（经度）	法国
IPSL-CM5B-LR	1.9°（纬度）×3.8°（经度）	法国
MIROC5	1.4°（纬度）×1.4°（经度）	日本
MIROC-ESM	2.8°（纬度）×2.8°（经度）	日本
MIROC-ESM-CHEM	2.8°（纬度）×2.8°（经度）	日本
MPI-ESM-LR	1.9°（纬度）×1.9°（经度）	德国
MPI-ESM-P	1.9°（纬度）×1.9°（经度）	德国
MRI-CGCM3	1.1°（纬度）×1.1°（经度）	日本
NorESM1-M	1.9°（纬度）×2.5°（经度）	挪威

为便于模式与观测数据的对比，本文将 CMIP5 模式模拟的降水数据双线性插值到 EAG 的 0.5°（纬度）×0.5°（经度）空间分辨率，并只分析中国大陆的情形，分析时段取为 1962～2005 年，降水气候态的计算年份也为 1962～2005 年。此外，在分析中国东部夏季降水时，本文将中国东部划分为 4 个子区域，分别为：东北地区（42°N～54°N，117°E～135°E）、华北地区（34°N～42°N，110°E～120°E）、江淮流域（27°N～34°N，111°E～122°E）和华南地区（18°N～27°N，105°E～120°E）。

关于降水强度的分级，本研究采用气象预报业务中降水强度的划分标准，亦即：0.1 mm＜日降水量≤10.0 mm，为小雨；10.0 mm＜日降水量≤25.0 mm，为中雨；25.0 mm＜日降水量≤50.0 mm，为大雨；日降水量＞50.0 mm，为暴雨。对于总降水量及总降水日数的计算，则对应于日降水量＞0.1 mm 的情形。

3 CMIP5 模式对我国东部夏季降水的模拟评估

3.1 我国东部夏季降水总量及日数的模拟评估

图 1 给出了观测和 CMIP5 模式模拟的中国东部 1962～2005 年平均的夏季降水量的空间分布。从观测可以看到，中国东部夏季降水呈现自南向北逐次递减的特征，就区域多年平均而言，华南地区夏季降水量为 693.4 mm、江淮地区为 535.2 mm、华北地区为 350.6 mm，而东北地区则为 324.3 mm。比较 CMIP5 多模式模拟结果可以发现，大多数模式均能较好地再现出中国东部夏季雨带从南到北逐渐减少的特征，尤其是 MME 结果，这与前人已有的分析结果相一致（陈晓晨等，2014；赵宗慈等，2015）。但 CSIRO、MRI-CGCM3、IPSL-CM5B-LR、IPSL-CM5A-MR 模式对江淮、黄淮地区夏季雨量的模拟与观测相比显著偏少，导致这些模式模拟的我国东北、华北区域的夏季降水要多于黄淮和江淮区域； BCC、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM 模式则对我国华南地区夏季降水的模拟与观测相比显著偏少，从而导致这些模式模拟的华南地区的夏季降水要小于江淮流域的降水。

鉴于已有的研究并没有详细评估不同 CMIP5 模式对我国东部不同区域夏季降水的模拟性能，本研究将针对前述对我国东部的 4 个不同分区进行分析。从图 1 可以发现，对于我国东北地区而言，除东北东南部夏季观测降水在 400 mm 以上外，其它地区的降水大都在 350 mm 以下。ACCESS1.0、

BCC、BNU 模式对我国东北地区夏季降水的模拟与观测较为接近；但多数 CMIP5 模式模拟的东北地区夏季降水与观测相比偏多，尤其是 CCSM4、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5A-LR、MIROC5、NorESM-M、MPI-ESM-P 等模式的模拟偏差可达 100 mm 以上，MME 模拟结果比观测实况偏多。

对于华北地区，观测夏季降水呈东多西少的分布特征，东部多年平均夏季降水可在 400 mm 以上，黄淮之间部分地区降水在 500 mm 以上，而华北西部则大都在 350 mm 以下。CMIP5 MME 模拟的华北大部分地区降水均在 350 mm 以上，相对而言在华北西部有所高估，但在黄淮之间 MME 模拟的夏季降水小于 400 mm，较观测偏少。几乎所有 CMIP5 模式均未能模拟出华北地区观测的夏季降水分布特征，且大部分 CMIP5 模式模拟的我国华北地区夏季降水较观测偏多，尤其是 NorESM1-M、MIROC5、CCSM4、BNU 模式模拟的偏多最为显著，其中 NorESM1-M、MIROC5 模拟的华北大部分地区降水均在 500 mm 以上。但也有少数模式模拟的华北地区夏季降水较观测实况偏弱，包括 MRI-CGCM3、IPSL-CM5B-LR、ACCESS1.0 等，其中 MRI-CGCM3 模拟的华北地区夏季降水大都在 250 mm 以下。

对于江淮区域，夏季降水呈现南多北少的分布特征，整个区域夏季平均降水约为 535 mm，其中江淮地区南部夏季降水均在 550 mm 以上，部分地区可达 700 mm 以上。从多模式平均结果来看，MME 结果可以较好地再现出江淮流域夏季降水南多北少的特征，区域平均夏季降水量约为 468 mm，相对观测实况偏少 12%左右。从图 1 可以发现，ACCESS1.0、CSIRO、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P、MRI-CGCM3 等 9 个模式均能模拟出淮河流域夏季降水南多北少的空间分布特征，但 ACCESS1.0、MIROC5 模式模拟的江淮南部区域的降水均在 700 mm 以上，与观测相比显著偏强，而 MRI-CGCM3、IPSL-CM5B-LR 模拟的江淮地区北部的降水与观测相比则显著偏少，均在 300 mm 以下。BCC、CanESM2、FGOALS-g2、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM 等模式则未能模拟出江淮地区夏季降水南多北少的特征。

我国华南地区夏季观测降水大都在 550 mm 以上，其中沿海地区降水可达 700 mm 以上。MME 模拟的华南降水也都在 550 mm 以上，但降水大于 700 mm 的区域则要远小于观测，从而导致 MME 模拟的华南区域平均夏季降水量为 620 mm，小于观测的区域平均值 693 mm。从图 1 可以发现，IPSL 的 3 个模式（IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR）对我国华南地区夏季降水具有较好的模拟能力，CSIRO、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 模式对华南地区夏季降水的模拟与观测也较为接近。但 ACCESS1.0、MIROC5 模拟的华南夏季降水均在 700 mm 以上，且有大部分地区降水在 1000 mm 以上，与观测相比显著偏多。参加 CMIP5 的 3 个中国模式（BCC、BNU、FGOALS）对华南地区夏季降水的模拟则显著偏少，其中 FGOALS-g2 模拟的华南地区夏季降水在 350 mm 以下。此外，CanESM2、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MRI-CGCM3 等模式模拟的华南地区夏季降水也较观测偏少。

综合上述基于 CMIP5 模式的模拟结果分析可以发现，相对于华北和江淮区域，CMIP5 模式对我国华南地区夏季降水的模拟能力较强，且模式对我国东北地区夏季降水也有一定的模拟能力。虽然没有一个 CMIP5 模式可以模拟出我国东部所有区域夏季降水的分布特征，但 CMIP5 多模式集合模拟结果与观测最为接近，说明多模式集合可以在一定程度上提高模式对我国东部夏季雨带的模拟能力。

气候模式对观测降水量的模拟性能，同时取决于模式对降水日数以及降水强度的模拟能力。图 2 给出了观测和 CMIP5 模式模拟的中国东部夏季降水日数的空间分布，从基于 EAG 降水资料的分析可以发现，我国东部夏季雨日呈现南方和东北多、黄淮少的分布特征。其中我国长江以南的东部地区夏季雨日相对偏多，华南大部分地区夏季雨日可达 60 d 以上；江淮流域南部夏季雨日在 50～60 d 左右，江淮流域北部为 45～50 d；对于华北东部，夏季雨日在 45～50 d，而河套东部区域大致在 50～60 d 之间；在我国东北的东南和北部地区，夏季雨日可达 55 d 以上，东北的西南区域则在 45～55 d 之间。与观测降水量（图 1）对比可以发现，在观测夏季降水偏多的华南、江淮流域南部、东北的东南部区域，相应的夏季总降水日数也相对较多。但对于黄淮区域、华北大部、东北北部区域，夏季雨量的多寡与总雨日之间并不存在很好的对应关系，比如华北北部夏季雨量相对其东南部区域显著偏少，但该区域

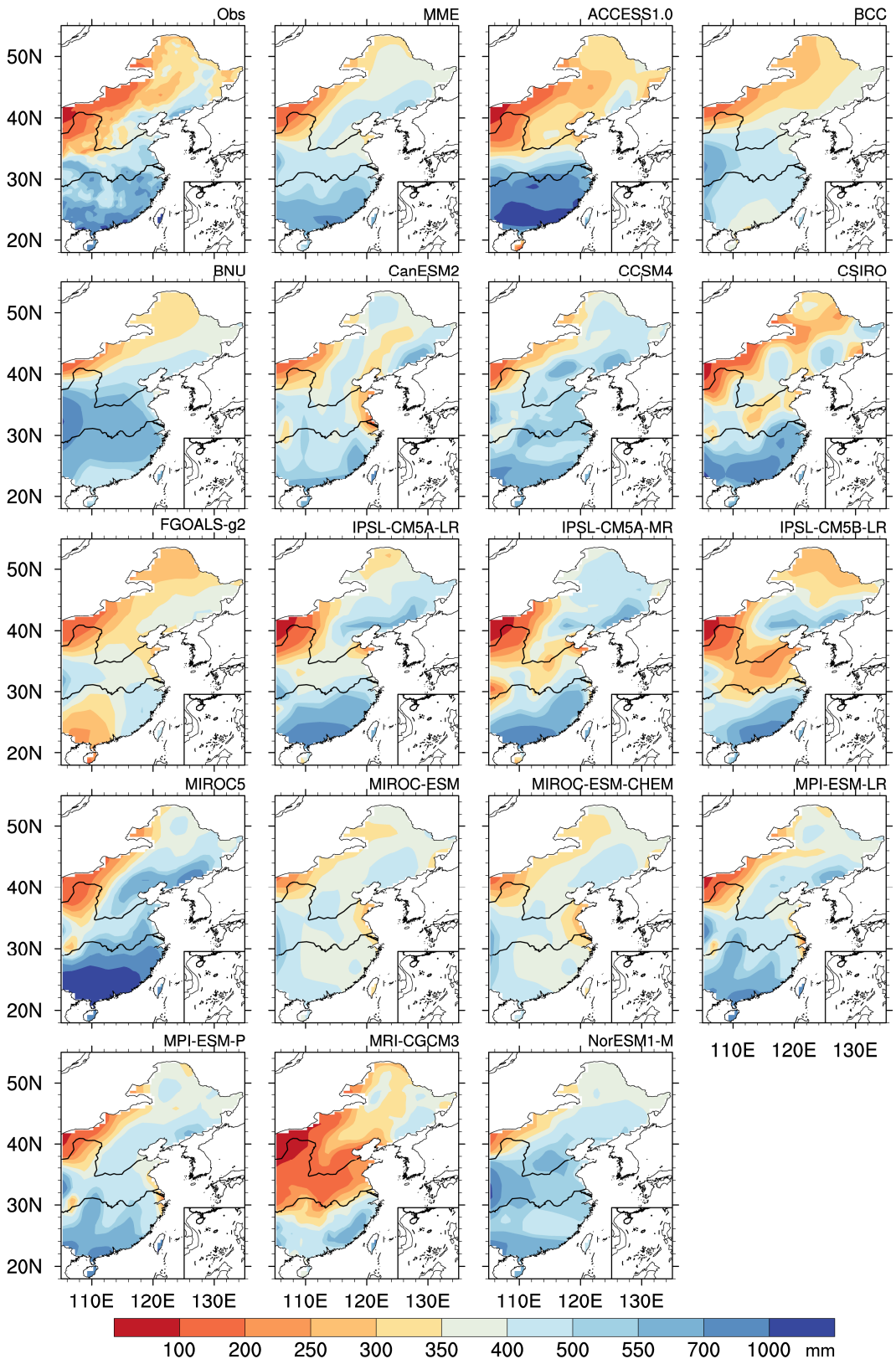

图 1 1962～2005 年观测与 17 个 CMIP5 模式模拟的中国东部夏季平均降水总量空间分布（Obs 代表观测，MME 代表多模式集合）

Fig. 1 Summer mean total rainfall from CMIP5 models and observations averaged during 1962−2005 over eastern China (Obs denotes observations and MME is for multi-model ensemble)

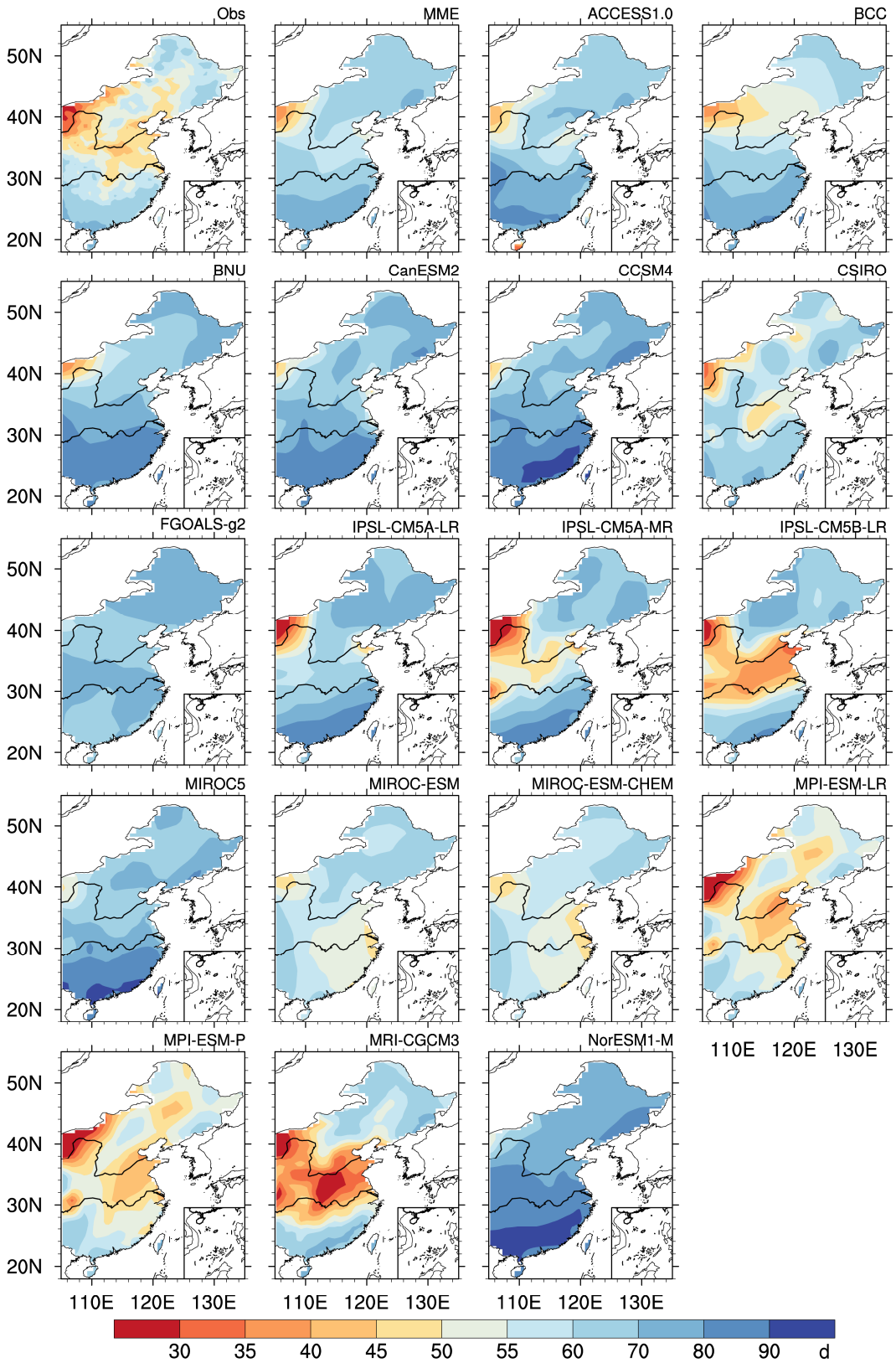

图 2　同图 1，但为平均降水日数

Fig. 2　Same as Fig. 1, but for the summer total rainy days

夏季的降水日数却与其东南部区域基本一致。

比较 CMIP5 模式的模拟结果可以发现，CSIRO、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 和 MRI-CGCM3 模式可以大致模拟出我国夏季雨日南方和东北多、黄淮少的空间分布特征，但 MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 模式对我国南方夏季雨日的模拟明显偏少，MRI-CGCM3 模拟的我国黄淮区域夏季雨日显著偏少，而 IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR 模式对我国东北地区夏季雨日的模拟则较观测相对偏多。其它的 11 个 CMIP5 模式则未能模拟出观测的夏季雨日的空间分布特征，且多模式集合整体高估了我国东部的夏季降水日数。

具体说来，在中国东北地区，绝大多数 CMIP5 模式模拟的降水日数均在 60 d 以上，比观测偏多，尤其是 CanESM2、CCSM4、FGOALS、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、MIROC5、NorESM1-M 模式模拟的东北地区夏季雨日均在 70 d 以上。只有 MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 两个模式模拟的东北区域夏季雨日较观测偏少。

对于华北区域，大多数模式模拟的雨日显著多于观测，从而导致多模式集合模拟的华北区域夏季雨日也较观测显著偏多。其中 NorESM1-M 模式模拟的雨日均在 70 d 以上，远多于观测。但 IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 模式对华北区域夏季雨日的模拟与观测则较为接近。

17 个 CMIP5 模式中，仅有 CSIRO、IPSL-CM5A-MR 两个模式可以较好地模拟出江淮流域夏季雨日的分布特征。其中有 9 个 CMIP5 模式对江淮区域夏季雨日的模拟比实际观测显著偏多，以 NorESM1-M 模式偏多最为显著，BNU、CanESM2、CCSM4 模拟的雨日偏多也较为显著；IPSL-CM5B-LR、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P、MRI-CGCM3 等 6 个模式模拟的江淮流域夏季雨日与观测相比显著偏少。就多模式集合而言，MME 模拟的华北区域夏季雨日较观测显著偏多。

MME 模拟的华南地区夏季雨日为 70～80 d，显著多于观测实况。从图 2 可以发现，CSIRO、IPSL-CM5B-LR 和 MRI-CGCM2 模式对华南夏季雨日的模拟与观测最为接近；NorESM1-M、CCSM4、MIROC5 模式模拟的夏季雨日均在 80～90 d，偏多最为显著，其他如 ACCESS1.0、BNU、CanESM2、BCC、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR 模拟的夏季雨日也较观测偏多。但 MIROC 的两个模式（MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEN）和 MPI 的两个模式（MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P）模拟的华南区域夏季雨日与观测相比显著偏少，大致在 45～60 d 之间。

对比 CMIP5 模式对中国东部夏季雨量与雨日的模拟偏差可以发现，一般说来，CMIP5 模式模拟的雨日与观测相比偏多，对应着雨量模拟也会较观测偏大，反之亦然。比如对于中国东北区域，对应于 CMIP5 模式雨日模拟的偏多（如 CCSM4、MIROC5、NorESM1-M），大多数模式对东北区域夏季雨量的模拟也相应偏多。但雨日与雨量模拟偏差的这种对应关系随不同的模式和区域也不尽相同。如对江淮区域，虽然 BCC、FGOALS-g2、CanESM2、CCSM4 等模式模拟的雨日较观测偏多（图 2），但上述模式对江淮地区夏季雨量的模拟却比观测偏少（图 1）；对于 CCSM4 模式，与观测相比模式对我国东部区域夏季雨日的模拟均显著偏多，尤其是在我国华南区域，但该模式模拟的夏季雨量仅是在东北和华北地区较观测偏多，在江淮流域、华南地区，模式模拟的夏季雨量反而较观测偏少。基于 MME 模拟结果的分析可以发现，MME 在中国东北和华北模拟的雨日多于观测，对应的 MME 在中国东北和华北模拟的夏季雨量较观测偏多；但在江淮和华南区域，虽然 MME 模拟的夏季雨日多于观测雨日，MME 模拟的夏季雨量却均小于观测。显然，气候模式对区域降水量的模拟偏差，除了与模式模拟的雨日偏差有关外，还取决于模式对降水强度的模拟偏差。因此本文将进一步分析模式对不同强度等级降水的模拟能力。

3.2 我国东部夏季不同强度等级降水的模拟评估

图 3 给出了观测和 CMIP5 模式模拟的中国东部夏季小雨总量的空间分布，从图中可以发现我国东部夏季观测的小雨雨量分布呈现“南北多，中部少”的空间特征，华南、江淮、华北、东北 4 个区域平均的小雨量值分别为 135.8 mm、102.8 mm、99.1 mm、125.0 mm。从图 4 给出的我国东部夏季小雨量值占总降水量百分比的空间分布图可以发现，中国北方地区的小雨雨量比重要高于南方，东北地区小雨的比重均在 30%以上，最高可达 50%，其区域平均为 38.5%；华北地区小雨雨量占总降水

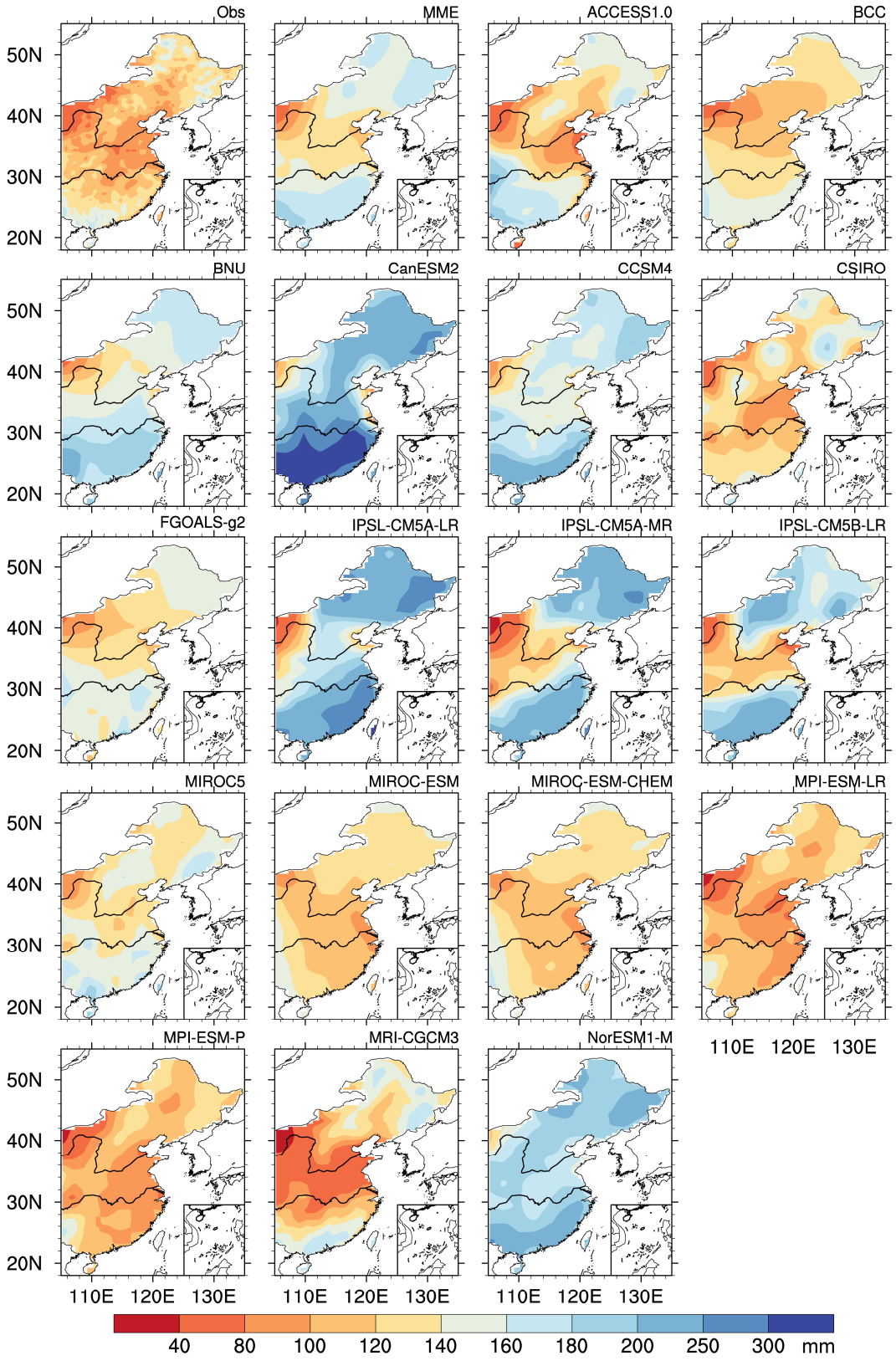

图 3　同图 1，但为平均小雨总量

Fig. 3　Same as Fig. 1, but for the summer mean light rainfall

量的比例约在 20%～50%之间，其区域平均为28.3%；而江淮和华南区域小雨雨量的占比大都在25%以下，其区域平均的小雨比重分别为 19.2%和19.6%。

从图 3 可以发现，MME 对我国华南、江淮、华北、东北 4 个区域小雨总量的模拟均有所高估，其中 MME 对江淮流域的小雨量值模拟的正偏差最为显著，区域平均高估可达 41.6%，对华南、华北、东北区域平均的高估则在 28%左右。进一步分析可以发现，导致 MME 对小雨量值系统性高估的主要原因是 BNU、CanESM2、CCSM4、IPSL-CM5A-LR、NorESM1 等模式对中国东部小雨雨量的严重高估，其中 CanESM2 模拟的华南大部分地区和江淮地区的小雨雨量分别在 300 mm 和 250 mm 以上，而华南地区观测的小雨雨量在 120～160 mm 之间，江淮流域则在 100 mm 左右。在东北地区，BNU、CanESM2、CCSM4、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR、NorESM1-M 等模式模拟的小雨雨量在160～180 mm以上，较观测的100～140 mm也显著偏多。

比较分析观测和 CMIP5 模式模拟的我国东部夏季小雨量值占总降水量百分比的空间分布，可以发现 MME 较好地模拟出我国东部小雨雨量占总雨量比重呈北高南低的空间特征，其中 MME 模拟的东北、华北、江淮和华南地区小雨比重分别为 42.4%、33.8%、31.1%、28.1%，但 MME 对江淮、华南区域平均小雨雨量的比重约高估10%。

对于我国东北地区，大多数模式均能模拟出小雨雨量占比相对较大的观测特征，但 MIROC 的 3 个模式（MIROC5、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM）、MPI 的两个模式（MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P）模拟的我国东北地区小雨雨量占比与实况相比则相对偏小。对我国华北和江淮地区，大多数情况下模式模拟的小雨雨量占比则相对偏多，仅有 ACCESS1.0、CSIRO、MIROC5 模拟的结果与观测较为接近。对于我国华南区域，除 ACCESS1.0、CSIRO、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 五个模式模拟的小雨雨量比例与观测较为接近外，其他模式均显著高估了南方地区的小雨雨量的比重，其中 CanESM2 在中国东部大部地区的小雨比重均在 60%以上，显著高估了我国东部地区小雨雨量的占比，这与该模式大幅高估江淮和华南区域小雨量值的模拟偏差相一致。

图 5 给出了观测和 CMIP5 模式模拟的中国东部夏季中雨雨量的空间分布。从图中可以发现，观测的华南区域平均的夏季中雨雨量约为 205.2 mm，江淮地区为 150.1 mm、华北为 114.6 mm、东北为124.7 mm，基本上呈现南方多、北方少的空间分布形态。CMIP5 多模式集合 MME 基本上可以模拟出中雨量值南多北少的分布特征，但均高估了中国东部各区域的中雨量值，其中华南地区中雨雨量的高估为 15.8%，江淮、华北和东北地区中雨雨量的偏差百分率分别为 11.0%、15.6%和 13.2%。导致中雨量值出现系统性正偏差的主要原因，是 BNU、CCSM4、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、MIROC 系列、MPI 系列以及 NorESM1-M 等超过半数的模式对我国东部大部分区域模拟的中雨雨量与观测相比显著偏多。尤其在中国华南地区，CSIRO、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 模式模拟的中雨雨量大都在 250 mm 以上，明显多于 180～200 mm 的观测实况。

图 6 还给出了观测和 CMIP5 模式模拟的中雨雨量占总降水量比重的分布图，从图中可以发现观测的中雨雨量占比呈北高南低的分布特征，其中东北地区中雨雨量占比的区域平均值为 38.5%，和小雨比重相近；华北地区中雨雨量占比为 32.7%，比小雨比重高 4.4%；江淮地区中雨占比为 28.1%，比小雨比重高 8.9%；华南中雨比重为 29.6%，比小雨比重高 10.0%。由此可见，在中国东北和华北，中雨雨量的比重和小雨相当，而在江淮和华南地区，中雨的比重则显著高于小雨。

从图 6 可以发现，MME 模拟的东北、华北、江淮和华南 4 个区域中雨雨量占总降水量的比例分别为 37.4%、35.0%、35.6%、38.3%，并没有呈现出北高南低的分布特征。MME 对我国东北、华北地区中雨占比的模拟结果与观测相近，但却显著高估江淮、华南地区中雨雨量的占比。进一步分析可以发现，MME 对南方中雨雨量比重的高估，主要可归因于 BNU、CSIRO、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 等模式对华南和江淮流域中雨雨量比例的高估，尤其是 IPSL 两个模式（IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR）模拟的中雨雨量的占比在长江以南区域均高于 50%，远大于观

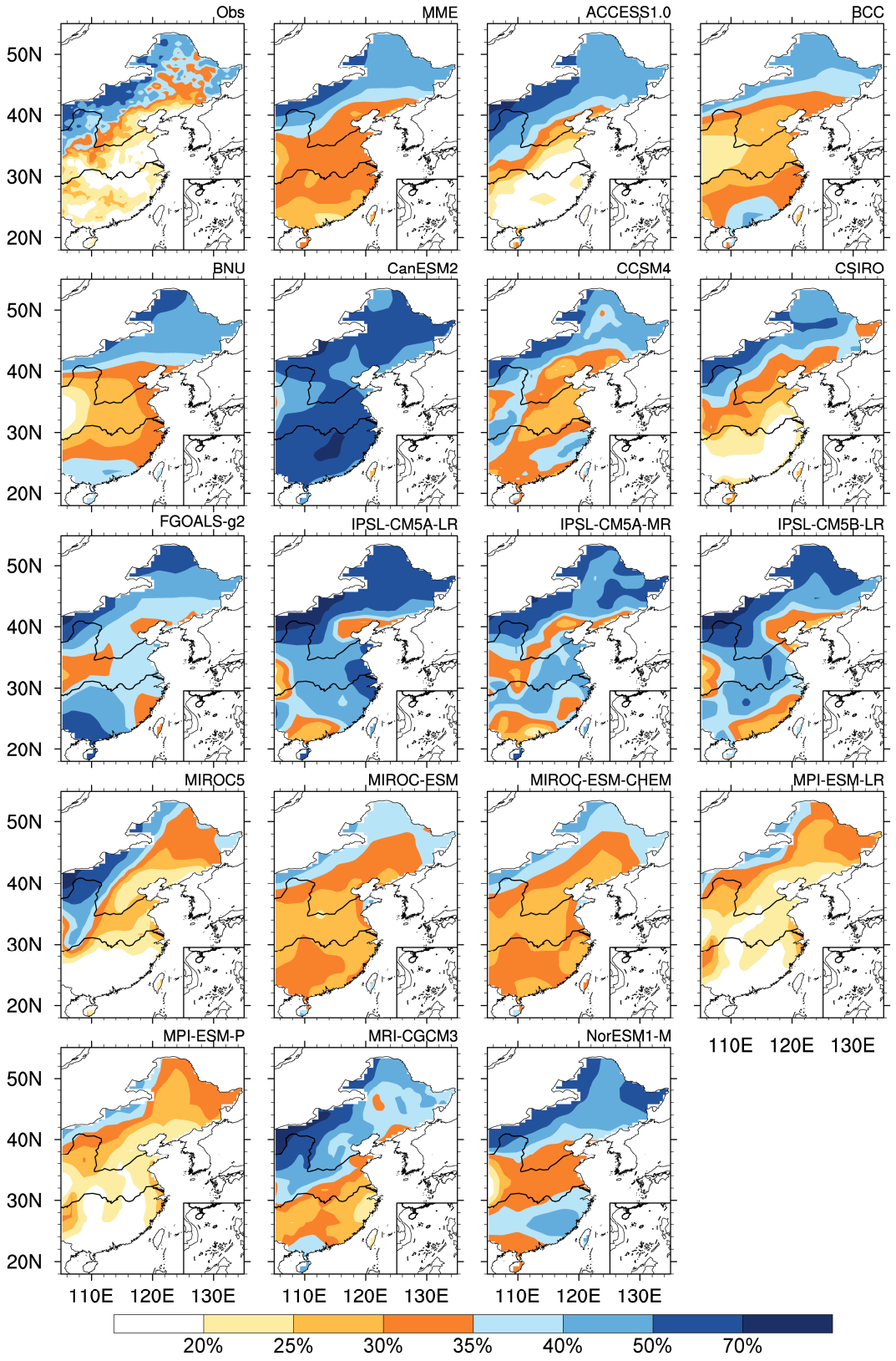

图 4　同图 1，但为平均小雨总量占降水总量的比重

Fig. 4　Same as Fig. 1, but for the percentage of summer mean light rainfall in the total rainfall

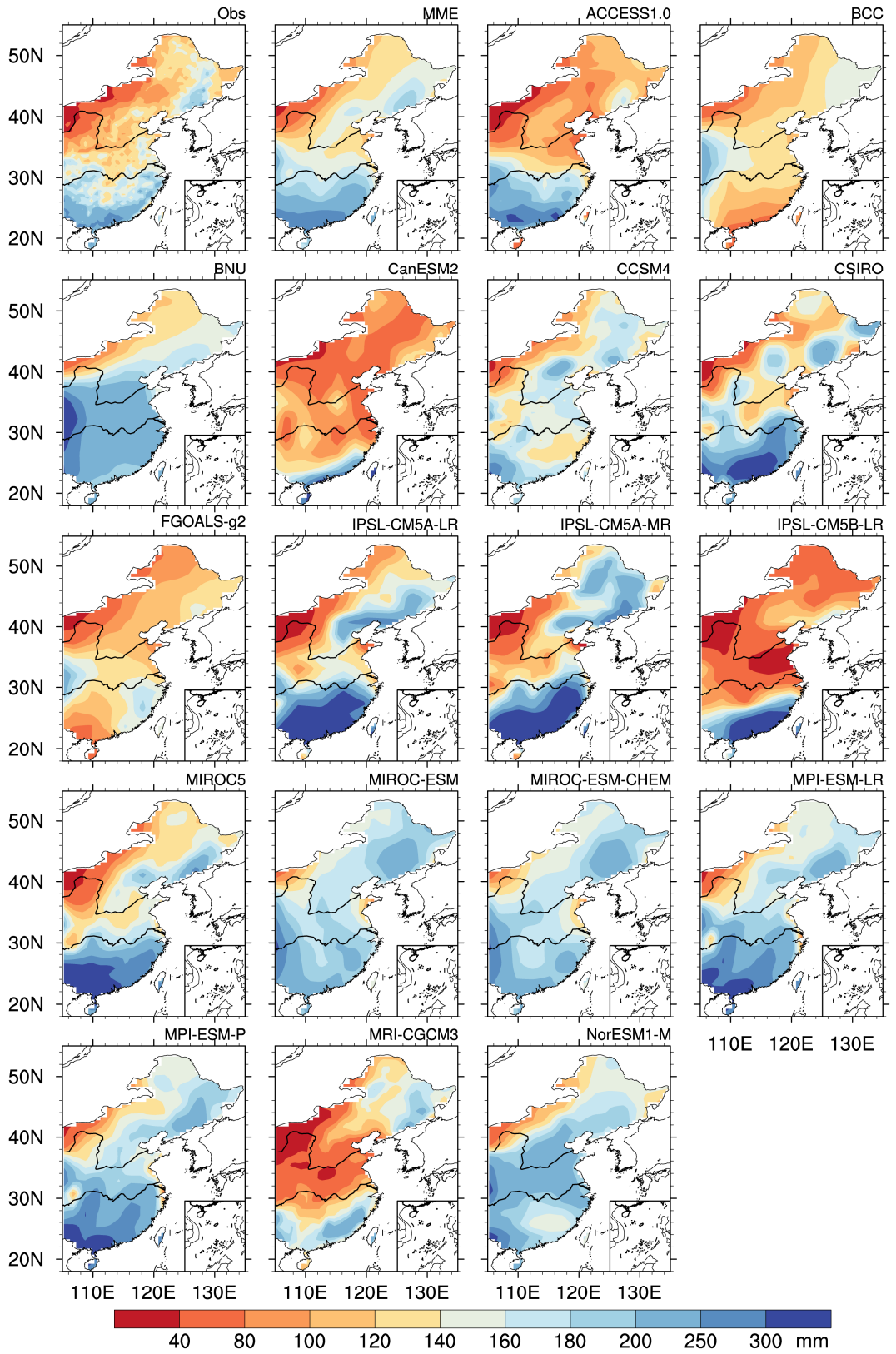

图 5 同图 1，但为平均中雨总量

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for the summer mean medium rainfall

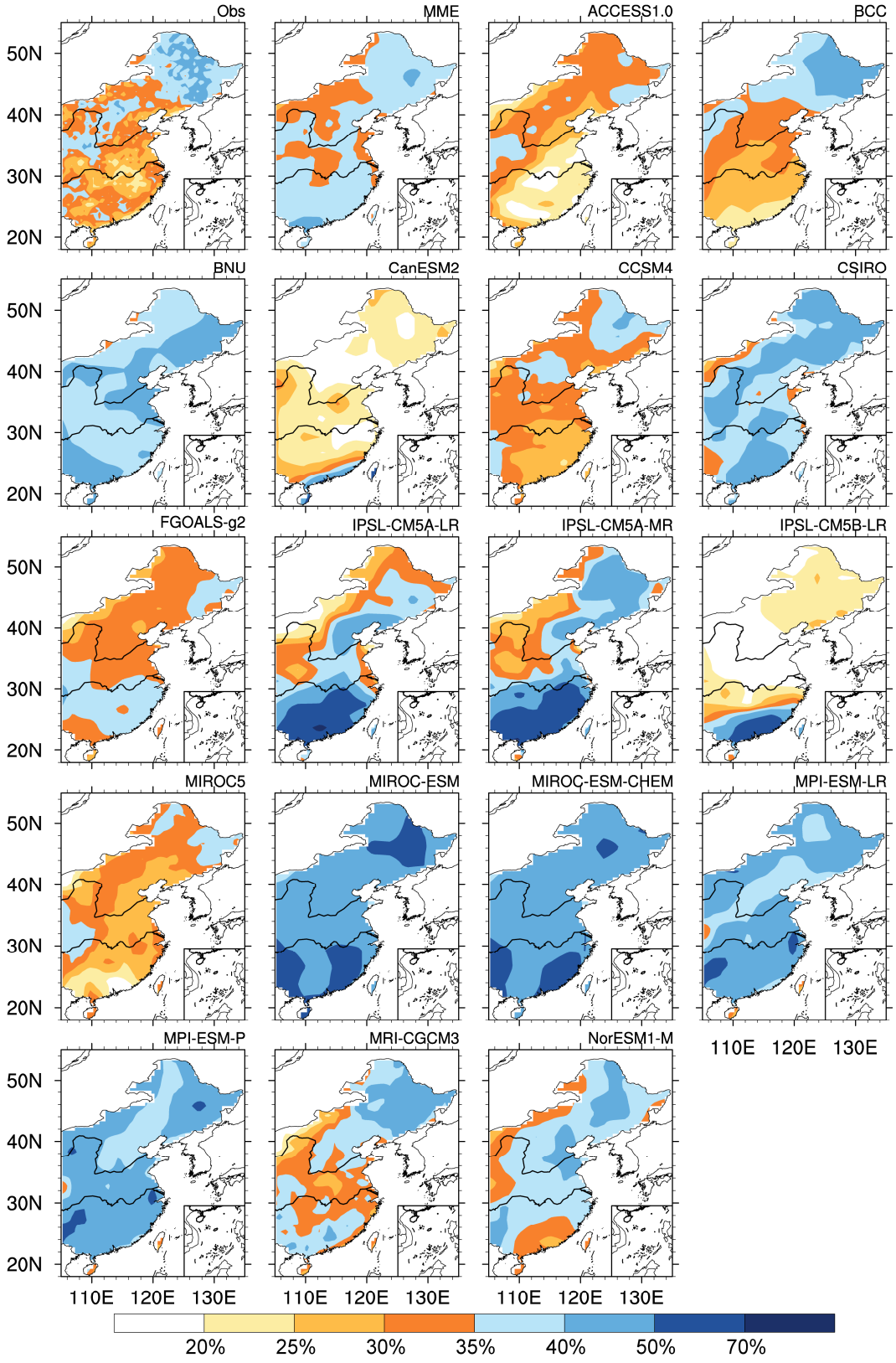

图 6　同图 1，但为平均中雨总量占降水总量的比重

Fig. 6　Same as Fig. 1, but for the percentage of summer mean medium rainfall in the total rainfall

测的中雨雨量的占比。

中国东部夏季大雨雨量的分布呈现从南向北逐渐减少的分布特征（图 7），其南北分布形态和总雨量较为一致，其中华南地区夏季大雨雨量为 195.5 mm，江淮区域平均为 155.8 mm，而华北和东北地区区域平均结果分别为 88.3 mm 和 60.0 mm。多模式集合 MME 模拟的东北区域大雨量值为 60.6 mm，与观测较为吻合；但 MME 对其他区域大雨量值的模拟均要小于观测实况，其中 MME 对江淮和华南区域平均的大雨雨量的低估可达 32%。

从图 7 可以发现，仅有 ACCESS1.0、CSIRO、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 五个模式模拟出华南的大雨雨量的大值区，其它 12 个模式对华南地区大雨雨量的模拟均显著偏少；而对于江淮流域存在的雨量大值区，仅有 ACCESS1.0、CSIRO、MIROC5、BNU 模式具有一定的模拟能力。从图 7 还可以发现，CanESM2、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR 三个模式模拟的我国江淮和华南地区夏季大雨的雨量均少于 40 mm，远远小于观测的 180～200 mm。

图 8 给出了大雨雨量占总降水量的比重的空间分布，从图中可以发现，大雨雨量的占比呈南高北低的分布特征，与中雨、小雨的占比分布相反。在华南地区，大雨雨量的占比为 27.6%，在江淮和华北区域分别为 29.1%、25.2%，而在东北区域，大雨雨量的占比大致为 18.5%。MME 对应的各区域大雨雨量占比均比观测偏低，分别是 21.3%、22.4%、21.5%、16.1%，但也在一定程度上体现了大雨雨量占比南多北少的分布特征。从图中还可以发现，仅有 CSIRO、MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 模式可以较好地再现出大雨雨量占比从南向北逐渐减小的分布特征，但 MIROC5、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P 模式对东北地区大雨量值占比的模拟较观测偏大。此外，从图 8 还可发现，IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR 模拟的中国东部大雨量值占比大都在 10%以下， CanESM2 模拟的我国江淮和华南地区大雨量值占比均在 10%以下，IPSL-CM5B-LR 模拟的我国华南区域大雨量值占比均在 10%以下，均显著低于观测实况，这与上述模式模拟的大雨量值的偏差相对应（图 7）。

图 9 给出了观测和 CMIP5 模式模拟的多年平均夏季暴雨雨量的空间分布，从图中可以看到，中国东部观测的夏季平均暴雨量值呈现自南向北逐渐减少的特征，其中华南区域夏季平均暴雨量值为 161 mm，江淮区域为 126.3 mm，而华北及东北区域仅为 48.6 mm 和 14.6 mm。MME 模拟的暴雨量值在江淮流域和华南地区的偏少分别可达 60%和 53%，在华北地区也比观测偏少 24%。绝大多数模式模拟的夏季平均暴雨量均在 80 mm 以下，且很多模式（BNU、FGOALS-g2、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MPI-ESM-LR、MPI-ESM-P、NorESM1-M）模拟的暴雨量均在 40 mm 以下，说明绝大多数 CMIP5 模式对暴雨的模拟能力较差。但从图 9 还可以发现，ACCESS1.0 模拟的江淮和华南区域的暴雨量值可达 300 mm 以上，远高于观测实况；此外，MIROC5 模式模拟的华南区域的暴雨量值也在 300 mm 以上，比观测显著偏多。

综上分析可知，在中国东北和华北地区，小雨和中雨占主导地位；而在江淮和华南地区，大雨、暴雨相对更加重要。MME 可以较好地模拟出夏季中国东部小雨、大雨和暴雨雨量占总降水量比重的空间差异分布特征，但对中雨占比的模拟在空间上过于均匀，与观测不符。此外，MME 对中国东部小雨、中雨占比的模拟总体偏高，而模拟的大雨、暴雨的占比总体偏低，模式在南方地区的模拟偏差一般高于北方地区。从不同强度降水的模拟偏差对总降水模拟偏差的贡献来看，东北和华北地区总降水量模拟偏多是由小雨、中雨模拟偏多引起的；江淮和华南总降水量的模拟偏少，则主要是由于模式对大雨和暴雨的模拟偏少导致的。

4 1970 年代末中国东部不同强度降水年代际变化的模拟评估

中国东部夏季风及其降水在 1970 年代末发生了一次显著的年代际转折，江淮流域的夏季降水自 1970 年代末变多，而同期我国北方区域的夏季降水则开始变少（黄荣辉等，2006）。基于 CMIP3、CMIP5 的气候模式模拟评估结果表明，大多数 CMIP 模式均未能充分抓住中国东部夏季降水在 1970 年代末的年代际变化特征（顾薇和李崇银，2010；陈红，2014）。

如前所述，对于 CMIP5 模式对中国东部夏季降水总量的模拟偏差，不同强度等级降水的模拟偏差的贡献，在华北、江淮等不同区域是各不相同的。为此，本节将首先分析 CMIP5 模式对华北和江淮地区不同强度等级降水量的年代际差异的模拟偏

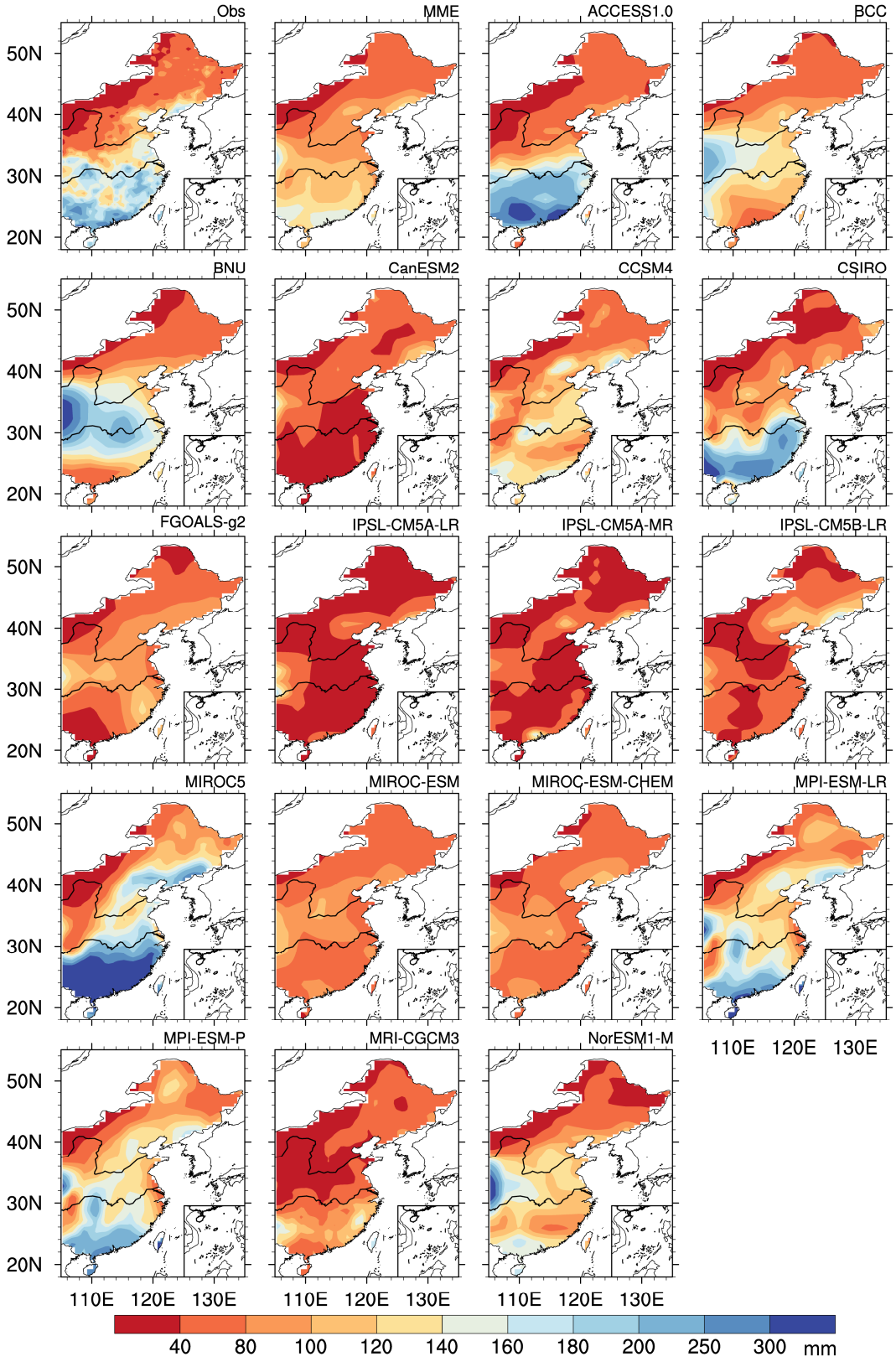

图 7　同图 1，但为平均大雨总量

Fig. 7　Same as Fig. 1, but for the summer mean large rainfall

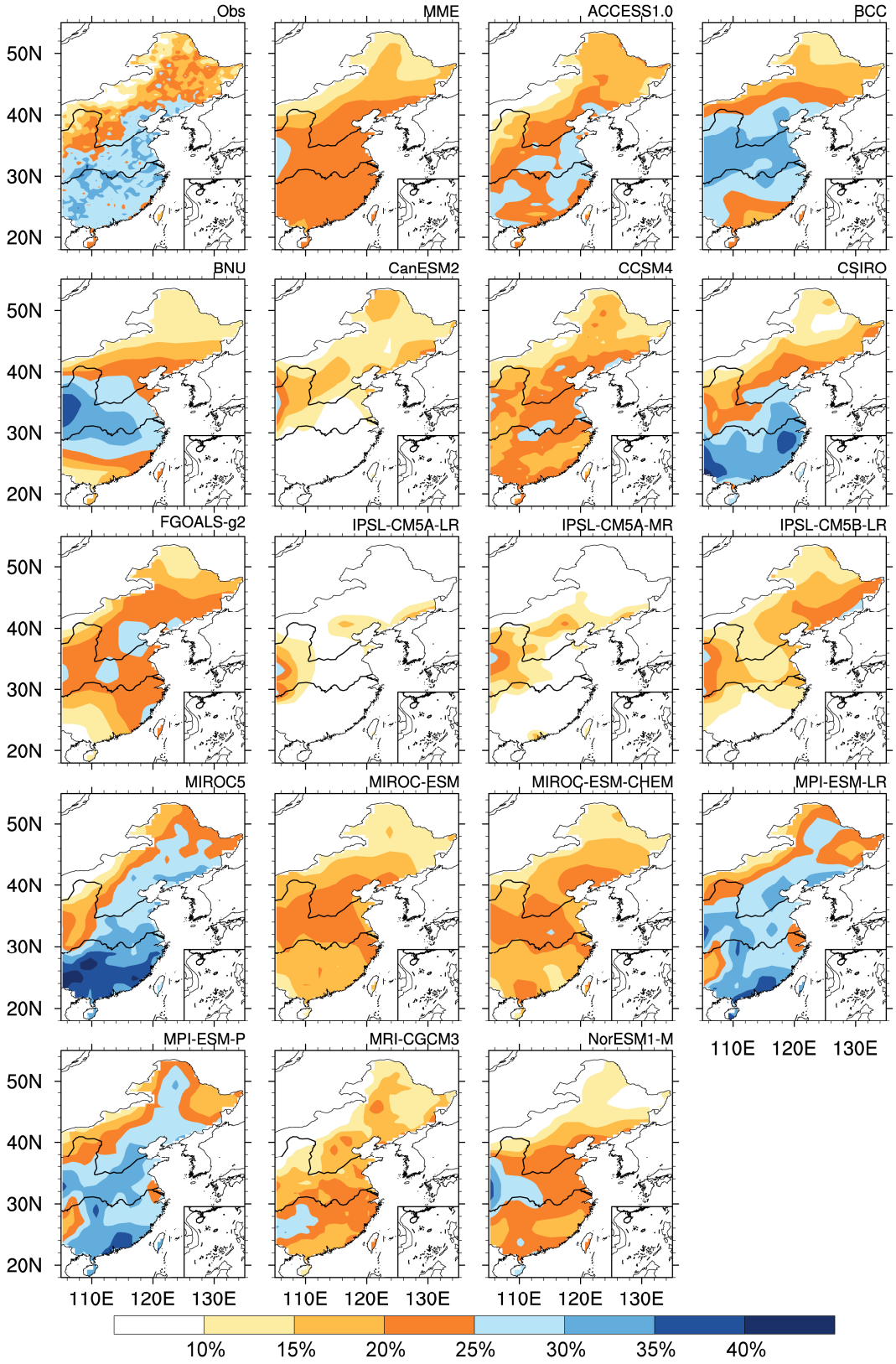

图 8 同图 1，但为平均大雨总量占降水总量的比重

Fig. 8 Same as Fig. 1, but for the percentage of summer mean large rainfall in the total rainfall

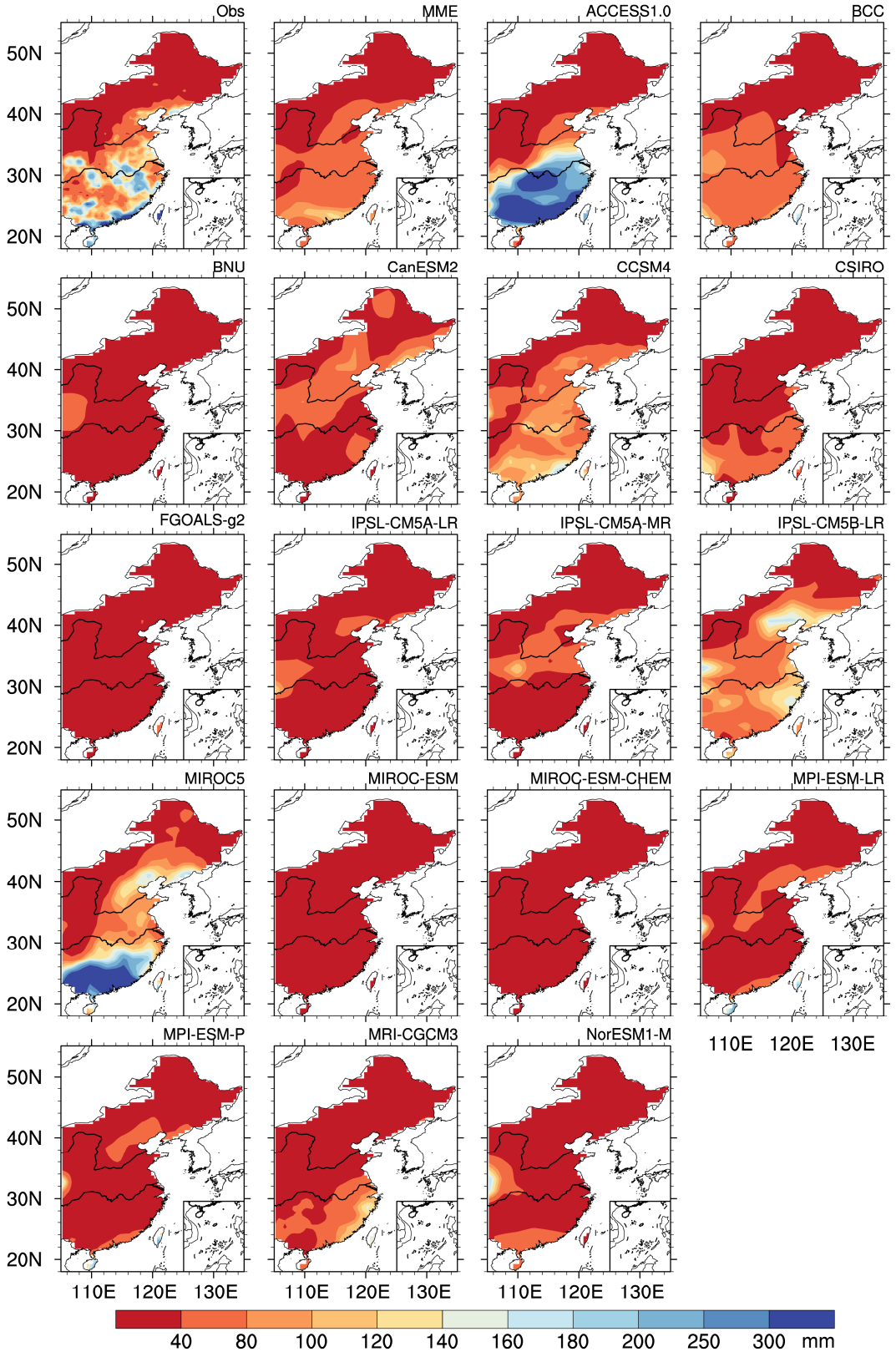

图 9　同图 1，但为平均暴雨总量

Fig. 9　Same as Fig. 1, but for the summer mean heavy rainfall

差，进而分析上述偏差对 CMIP5 模式模拟中国东部夏季总降水年代际变化的影响。

图 10 中给出了观测与 17 个 CMIP5 模式模拟的华北区域夏季不同强度等级降水量的时间变化。从图中可以发现，1962～2005 年期间，我国华北地区夏季观测总降水量呈现出一定的减少趋势 [约为 13.7 mm (10 a)$^{-1}$]，大致有一半的 CMIP5 模式模拟出这种减少趋势，但幅度较为微弱；其它 CMIP5 模式模拟的华北区域夏季降水量则呈现增加的趋势，与观测相反。

针对 1970 年代末中国东部雨带的年代际变化，本文选取 1978/1979 年为年代际变化的转折点，分别选取 1962～1978 年和 1979～1995 年代表年代际转折前后的两个时段。从图 10 可以发现，中国华北区域夏季总降水在 1970 年代末期确实存在显著的年代际减少。为进一步分析不同强度等级降水在

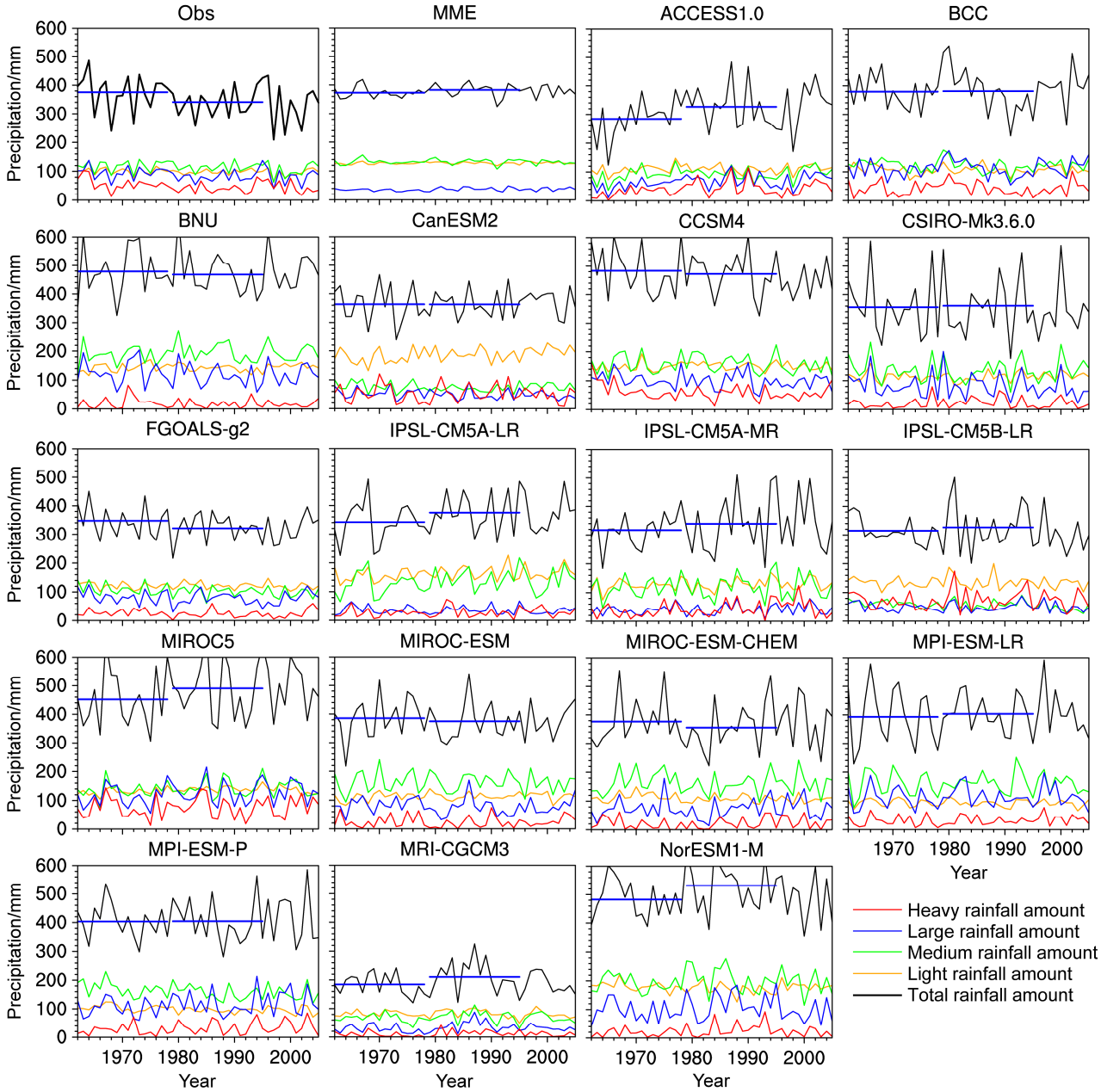

图 10 观测和 CMIP5 模式模拟的 1962～2005 年夏季华北地区不同等级降水量的时间序列（黑色曲线为总降水；橘色曲线为小雨；绿色曲线为中雨；蓝色曲线为大雨；红色曲线为暴雨。两段蓝色直线分别为总降水 1962～1978 年和 1979～1995 年夏季均值线）

Fig. 10 Time series of summer mean total (black curved line), light (orange curved line), medium (green curved line), large (blue curved line), and heavy (red curved line) rainfall from observations and CMIP5 models over North China during 1962−2005 (bold blue lines in the figures show the average values of total summer rainfall during 1962−1978 and 1979−1995, respectively)

总降水量年代际转折中的贡献，表 2 同时给出了华北地区在 1962～1978 年和 1979～1995 年两个时段平均的夏季不同强度等级的降水量，及上述两个时段各降水量的差值。从表 2 可以看到，华北区域 1962～1978 年夏季平均降水总量为 375.6 mm，其中不同强度等级降水量的占比分别为，中雨占 31.8%、小雨占 27.1%、大雨占 25.8%、暴雨占 15.3%；在 1979～1995 年期间，夏季平均总降水量为 341 mm，其中中雨雨量占总雨量比为 33.8%，小雨、大雨和暴雨雨量的占比分别为 29%、24.7%、12.4%。

对比前后两个时段，可以发现华北区域夏季观测的总降水量减少为 34.6 mm，且不同强度等级的降水量均减少。其中大雨雨量的年代际减少为 12.7 mm，占总降水量减少的比例为 36.7%，暴雨雨量的年代际减少为 15.2 mm，减少的占比为 43.9%，这说明华北地区夏季总降水量的年代际减少，主要是由于大雨和暴雨雨量的年代际减少造成的。

比较不同 CMIP5 模式的模拟结果可以发现，对于 1970 年代末华北夏季总降水量的年代际减少，仅有 BNU、CCSM4、FGOALS-g2、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM 五个模式可以在一定程度上予以模拟，其中 FGOALS-g2、MIROC-ESM-CHEM 模式模拟的减少幅度大于 20 mm，BNU、CCSM4、MIROC-ESM 模拟的年代际减少为 11 mm 左右，均小于观测幅度。大多数 CMIP5 模式，模拟的华北区域 1979～1995 年夏季总降水量要多于 1962～1978 年期间，与观测实况相反。

从表 2 可以发现，FGOALS-g2 对华北地区 1970 年代末夏季降水年代际转折的模拟相对最好，模式模拟的总降水减少的量级与观测最为接近。模式也很好地模拟出不同强度等级降水量的一致减少，以及大雨雨量的年代际减少最为主要的观测特征。不过 FGOALS-g2 模拟的中雨雨量的年代际减少的比重要大于暴雨雨量减少的比重，则与观测略有不符。

CCSM4、MIROC-ESM 两个模式虽然都可以模拟出大雨和暴雨雨量的年代际减少，但模式模拟的小雨和中雨的雨量却是增多，与观测实况相反，从而导致模式模拟的夏季总降水量的年代际减少的量值在 11 mm 左右，仅为实况的 1/3。对于 MIROC-ESM-CHEM 模式，虽然模拟的夏季总雨量的减少为 21.4 mm，与观测较为接近，但是该模式模拟的雨量年代际减少主要体现在小雨和中雨，且模拟的 1979～1995 年的暴雨雨量要大于 1962～1978 年期间的暴雨雨量。

大多数 CMIP5 模式模拟的华北区域 1979～1995 年夏季总降水量要多于 1962～1978 年时段，与观测相反。从表 2 可以发现，ACCESS1.0、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR、MIROC5、MPI-ESM-LR、MRI-CGCM3、NorESM1-M 模式模拟的 1970 年代末以后大雨和暴雨雨量的年代际增加最为主要，其中 NorESM1-M 模拟的夏季大雨雨量年代际增加幅值为 30 mm，暴雨雨量增加幅植为 14.2 mm; ACCESS1.0 模式模拟的 1979～1995 年平均的夏季大雨雨量较 1962～1978 年的偏多 17.3 mm，暴雨雨量则偏多 21.6 mm。这说明正是由于模式对大雨和暴雨雨量年代际变化的模拟偏差，导致上述 CMIP5 模式未能模拟出 1970 年代末前后我国华北地区夏季雨量年代际减少的观测特征。

图 11 中给出了 1962～2005 年观测与 17 个 CMIP5 模式模拟的江淮区域夏季不同强度等级降水量的时间变化。从图中可以发现，1962～2005 年期间，我国江淮地区夏季观测总降水量呈一定的增加趋势，其增加幅度约为 25.5 mm $(10\ a)^{-1}$。比较观测与 CMIP5 模式模拟结果可以发现，大致有 7 个 CMIP5 模式可以在不同程度上模拟出 1962～2005 年期间江淮区域夏季降水量增加的趋势，而其它 10 个 CMIP5 模式模拟的江淮区域夏季降水量则呈现减少的趋势，与观测相反。

对应于 1970 年代末中国东部雨带的年代际变化，从图 11 可以发现中国江淮区域夏季总降水量存在较显著的年代际增加。为进一步分析不同强度等级降水在总降水量年代际转折中的贡献，表 3 同时给出了江淮地区在 1962～1978 年和 1979～1995 年两个时段平均的夏季不同强度等级的降水量，及上述两个时段各降水量的差值。

从表 3 可以看到，江淮区域 1962～1978 年夏季平均降水总量为 492.5 mm，不同强度等级降水总量的占比大致接近，其中中雨雨量占比相对最大，为 29.1%；大雨次之，为 28.3%；暴雨的比例为 22.1%，而小雨的比例相对最小，为 20.6%。1979～1995 年期间，江淮流域夏季平均雨量为 543.8 mm，其中雨量占比相对最大的为大雨雨量，为 29.5%，比 1962～1978 年期间的占比有所提高；中雨次之，为 28%；暴雨的比例较 1962～1978 年时段也有所增加，为 23.5%；另外小雨的比例相对最小，为 19.1%。

对比前后两个时段，可以发现江淮区域多年平

表 2　华北地区各类降水量值年代际变化

Table 2　Decadal variabilities of total, light, medium, large, and heavy rainfall over North China

	1962～1978 年降水量均值/mm					1979～1995 年降水量均值/mm					降水量年代际差异/mm				
	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨
观测	375.6	101.6	119.3	97.1	57.6	341.0	98.9	115.3	84.3	42.4	−34.6*	−2.7	−4.0	−12.7*	−15.2*
		(27.1%)	(31.8%)	(25.8%)	(15.3%)		(29.0%)	(33.8%)	(24.7%)	(12.4%)		(7.9%)	(11.6%)	(36.7%)	(43.9%)
ACCESS1.0	284.7	108.9	89.2	56.5	30.2	326.9	109.5	91.8	73.8	51.8	42.2*	0.6	2.6	17.3*	21.6*
BCC-CSM1.1	380.0	106.4	125.2	106.9	41.1	381.2	106.5	119.5	111.4	43.9	1.2	0.1	−5.7	4.5	2.8
BNU-ESM	478.4	143.4	185.2	128.5	21.2	467.8	140.4	197.5	113.0	16.8	−10.6	−3.0	12.3	−15.5	−4.4
CanESM2	363.4	178.0	79.4	54.7	51.3	363.1	185.6	70.0	49.8	57.7	−0.3	7.6	−9.4*	−4.9	6.4
CCSM4	483.3	147.6	159.0	106.9	69.7	472.3	153.6	164.5	99.3	54.9	−11.0	6.0	5.5	−7.7	−14.8
CSIRO-MK3.6.0	355.9	114.0	138.1	84.5	19.2	361.1	112.9	134.2	87.4	26.5	5.2	−1.1	−3.9	2.9	7.4
FGOALS-g2	347.5	122.6	111.5	85.3	28.1	321.3	122.5	102.4	74.1	22.3	−26.2	−0.1	−9.1	−11.2	−5.8
IPSL-CM5A-LR	342.0	155.8	124.3	36.5	25.3	375.3	165.5	146.1	35.8	27.9	33.3	9.7	21.8*	−0.7	2.5
IPSL-CM5A-MR	317.1	124.4	118.5	39.8	34.4	340.0	130.3	124.5	40.4	44.4	22.9	5.9	6.0	0.6	10.0
IPSL-CM5B-LR	314.8	135.3	62.0	49.6	67.9	326.7	138.3	58.7	49.5	80.3	11.9	3.0	−3.3	−0.1	12.4
MIROC5	452.1	130.3	136.5	113.7	71.5	490.3	140.2	143.8	129.6	76.7	38.2	9.9*	7.3	15.9	5.2
MIROC-ESM	385.6	111.2	161.5	86.2	26.8	374.6	115.1	166.6	73.0	19.9	−11.0	3.9	5.1	−13.2	−6.8
MIROC-ESM-CHEM	377.1	115.5	167.6	73.8	20.2	355.7	107.1	156.9	70.6	21.1	−21.4	−8.4*	−10.7	−3.2	0.9
MPI-ESM-LR	392.7	94.4	159.2	109.3	29.8	403.6	93.4	163.4	116.0	30.8	10.9	−1.0	4.2	6.6	1.0
MPI-ESM-P	403.3	104.8	170.7	103.7	24.1	404.3	94.7	157.1	117.8	34.7	1.0	−10.1*	−13.6	14.1	10.6
MRI-CGCM3	184.6	82.4	66.9	27.1	8.2	210.7	83.7	72.6	38.8	15.5	26.1	1.3	5.7	11.7*	7.3*
NorESM1-M	482.0	181.6	190.2	93.0	17.3	531.6	169.8	207.2	123.1	31.5	49.6*	−11.8*	17.0	30.1*	14.2*
多模式集合	373.2	126.9	132.1	79.8	34.5	382.7	127.6	133.9	82.6	38.6	9.5	0.7	1.8	2.8	4.1*
		(34.0%)	(35.4%)	(21.4%)	(9.2%)		(33.3%)	(35.0%)	(21.6%)	(10.1%)		(7.4%)	(18.9%)	(29.5%)	(43.2%)

*表示通过了 90%显著性检验，括号内的数字是分级降水量值占总降水的百分比。

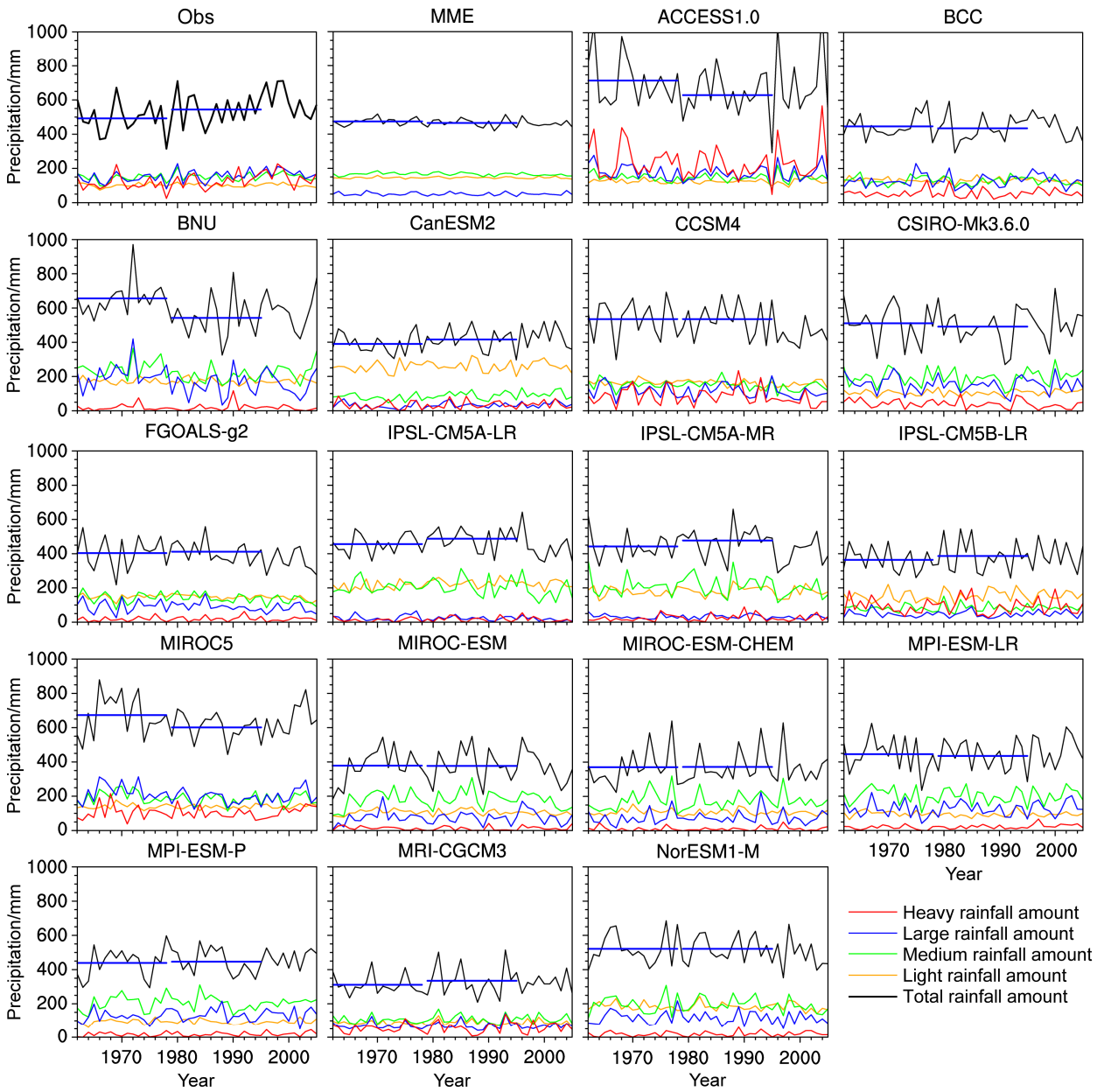

图 11　同图 10，但为江淮地区

Fig. 11　Same as Fig. 10, but for Yangtze-Huaihe River basin

均夏季观测的总降水量增加了 51.3 mm，其中降水量的增加以大雨雨量增加最为显著，为 21.1 mm，占总降水量增加的比例为 41.2%；暴雨雨量的增加次之，为 19.2 mm，占总雨量年代际增加的 37.5%。此外，中雨、小雨雨量也均有所增加，其中中雨雨量增加的占比为 17.4%。总体说来，20 世纪 70 年代末江淮区域总降水的增加，主要是由于大雨和暴雨雨量年代际增加的缘故。

比较不同 CMIP5 模式的模拟结果可以发现，对于 1970 年代末江淮夏季降水量的年代际增加，仅有 CanESM2、FGOALS-g2、MPI-ESM-P、MRI-CGCM3 以及 IPSL 模式（包括 IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR、IPSL-CM5B-LR）具有一定程度的模拟能力。其中 IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR 模拟的江淮地区夏季降水的年代际增加幅值在 30 mm 以上，与观测值最为接近；CanESM2、IPSL-CM5B-LR、MRI-CGCM3 模拟的年代际增加的幅值在 20 mm 以上，而 FGOALS-g2、MPI-ESM-P 两个模式模拟的降水总量增加的幅度均小于 10 mm，与观测幅值存在一定的差异。

表 3　江淮地区各类降水量值年代际变化

Table 3　Decadal variabilities of total, light, medium, large, and heavy rainfall over the Yangtze-Huaihe River basin

	1962～1978 年降水量均值/mm					1979～1995 年降水量均值/mm					降水量年代际差异/mm				
	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨	总降水	小雨	中雨	大雨	暴雨
观测	492.5	101.6	143.1	139.2	108.6	543.8	103.6	152.0	160.3	127.8	51.3*	2.0	8.9	21.1*	19.2
		(20.6%)	(29.1%)	(28.3%)	(22.1%)		(19.1%)	(28.0%)	(29.5%)	(23.5%)		(3.9%)	(17.4%)	(41.2%)	(37.5%)
ACCESS1.0	716.4	125.3	150.3	185.8	255.0	631.3	124.1	142.5	162.3	202.4	−85.1*	−1.2	−7.8	−23.5	−52.6*
BCC-CSM1.1	447.5	132.2	131.4	127.8	56.1	435.8	131.3	129.0	124.3	51.2	−11.7	−0.9	−2.4	−3.6	−4.9
BNU-ESM	655.9	173.8	250.8	212.2	19.2	542.7	173.6	200.3	147.8	21.0	−113.2*	−0.2	−50.5*	−64.4*	1.9
CanESM2	389.9	253.6	77.7	27.1	31.5	415.2	258.8	89.1	33.4	34.0	25.3	5.2	11.4	6.3	2.5
CCSM4	534.7	166.9	154.7	122.3	90.8	534.7	162.5	156.7	122.0	93.5	0.0	−4.4	2.0	−0.4	2.7
CSIRO-MK3.6.0	510.5	105.4	195.0	161.6	48.5	491.2	105.6	190.8	151.4	43.5	−19.2	0.2	−4.2	−10.3	−5.0
FGOALS-g2	403.2	148.8	143.0	94.4	17.0	411.7	150.8	144.5	94.2	22.2	8.5	2.0	1.5	−0.2	5.2
IPSL-CM5A-LR	456.3	209.8	206.7	26.6	13.2	487.8	232.8	215.3	22.6	17.1	31.5	23.0*	8.6	−4.0	3.9
IPSL-CM5A-MR	442.2	175.9	211.3	32.5	22.4	477.3	187.1	228.8	33.6	27.9	35.1	11.2	17.5	1.1	5.4
IPSL-CM5B-LR	364.2	146.8	80.2	46.6	90.7	386.3	160.2	86.2	46.0	93.8	22.1	13.5	6.1	−0.6	3.2
MIROC5	672.8	140.5	199.1	226.5	106.7	601.4	137.7	179.1	186.3	98.3	−71.4*	−2.8	−20.0	−40.2*	−8.4
MIROC-ESM	378.5	107.5	180.8	75.8	14.3	377.0	109.1	189.0	69.6	9.4	−1.4	1.5	8.2	−6.2	−4.9
MIROC-ESM-CHEM	370.4	111.6	173.9	73.5	11.4	371.6	106.8	175.0	80.3	9.6	1.3	−4.8	1.1	6.8	−1.8
MPI-ESM-LR	445.1	101.1	205.4	121.3	17.3	435.2	92.3	198.9	124.9	18.9	−10.0	−8.8	−6.5	3.7	1.6
MPI-ESM-P	438.7	94.7	204.8	123.1	16.1	445.9	91.9	204.6	133.3	16.1	7.1	−2.8	−0.2	10.2	0.0
MRI-CGCM3	311.4	86.7	103.3	68.5	52.9	334.7	90.2	110.6	73.9	60.0	23.3	3.5	7.3	5.5	7.1
NorESM1-M	521.4	185.7	196.5	121.0	18.2	521.3	183.6	202.4	116.4	18.9	0.0	−2.1	5.9	−4.5	0.6
多模式集合	474.1	145.1	168.5	108.6	51.8	464.8	147.0	167.2	101.3	49.3	−9.3	1.9	−1.3	−7.3*	−2.6
		(30.6%)	(35.5%)	(22.9%)	(10.9%)		(31.6%)	(36.0%)	(21.8%)	(10.6%)		(−20.4%)	(14.0%)	(78.5%)	(28.0%)

*表示通过了 90%显著性检验，括号内的数字是分级降水量值占总降水的百分比。

对于江淮区域不同强度等级降水量的年代际变化，CMIP5 模式中仅有 CanESM2、IPSL-CM5A- MR、MRI-CGCM3 三个模式可同时模拟出观测的小雨、中雨、大雨和暴雨雨量的年代际增加，但上述 3 个模式模拟的雨量年代际增加均以中雨最为显著，与大雨和暴雨年代际增加占比最大的观测特征有所不符。此外，上述 3 个模式对雨量年代际增加占比最小的模拟也各不相同，其中 CanESM2 模式中雨量年代际增加最少为暴雨，IPSL-CM5A-MR 模式中为大雨雨量，而 MRI-CGCM3 模式中则是小雨雨量的年代际增加最少。

对于 FGOALS-g2、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5B-LR、MPI-ESM-P 四个模式，虽然可模拟出江淮流域夏季总雨量在 1970 年代末以后的年代际增加，但对不同强度等级雨量的年代际变化，模式模拟与观测相比存在较大偏差。其中 FGOALS-g2 模式模拟的暴雨雨量的年代际增加最为显著，其次是小雨和中雨；IPSL-CM5A-LR 和 IPSL-CM5B-LR 模拟的雨量年代际增加最显著为小雨，其次是中雨雨量的增加；这些与江淮流域夏季雨量年代际增加最显著为大雨和暴雨的观测事实不符。此外，IPSL-CM5A-LR 和 IPSL-CM5B-LR 两个模式模拟的大雨雨量在 1970 年代末之后减少，MPI-ESM-P 模拟的小雨和中雨雨量在 1970 年代末以后减少，这些也与观测的年代际变化事实相反。

其他的 CMIP5 模式均未能模拟出江淮流域在 1970 年代末之后总雨量年代际增加的观测特征。从表 3 可以看到，ACCESS1.0、BNU、MIROC5 模拟的夏季总降水量在 1970 年代之后呈显著的年代际减少，其减少的量值分别可达 85.1 mm、113.2 mm、71.4 mm，而 BCC、CSIRO、MPI-ESM-LR 模式模拟的江淮流域夏季雨量也呈年代际减少，这些均与观测实况相反。CCSM4、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、NorESM1-M 等模式模拟的江淮流域夏季雨量在 1970 年代末前后基本上保持不变，也与观测事实不符。

针对 CMIP5 模式对江淮区域总雨量年代际变化的模拟偏差，我们分析了不同强度降水模拟偏差的贡献。从表 3 可以发现，ACCESS1.0 模式模拟的暴雨雨量呈现显著的年代际减少，大雨雨量的减少也相当显著，其幅值分别为 52.6 mm、23.5 mm。BNU 和 MIROC5 模式模拟的江淮流域大雨雨量的年代际减少最为显著，分别可达 64.4 mm 和 40.2 mm；两个模式模拟的中雨雨量的年代际减少也相当显著，其量值分别为 50.5 mm、20 mm。显然，上述模式对 1970 年代末前后大雨雨量年代际变化的模拟偏差，是模式模拟的江淮流域夏季降水年代际变化与观测相反的主要原因，而中雨、暴雨雨量年代际转折的模拟偏差也有重要贡献。

20 世纪 70 年代末中国东部夏季降水发生了显著的年代际转折，其中我国华北地区总降水显著减少，江淮区域总降水则显著增加，且均以大雨和暴雨变化的贡献为主。总体说来，CMIP5 模式对上述中国东部夏季降水年代际转折的模拟能力较差，仅有少数模式能在一定程度上模拟出总降水量的年代际变化。进一步分析表明，在华北区域，能较好模拟出大雨和暴雨年代际变化的模式，也能较好地模拟出总降水的年代际变化，反之亦然；而在江淮地区，虽然部分模式能模拟出总降水量的年代际变化，但其主要贡献以中雨和小雨雨量的年代际变化为主，与观测并不符合，而这与多数 CMIP5 模式明显低估江淮地区大雨和暴雨的比重有关。

对于 1962～2005 年期间我国东部夏季降水的变化趋势，MME 模拟的华北夏季总降水量微弱增加，幅值为 1.6 mm $(10\ a)^{-1}$，同期江淮夏季总降水略有减少，量值为 3.7 mm $(10\ a)^{-1}$，MME 模拟的华北和江淮流域的降水总量的变化趋势均与观测相反。针对 1970 年代末中国东部夏季降水存在的年代际变化，MME 模拟的华北地区总降水量为年代际增加，量值约为 9.5 mm；江淮流域夏季降水量则呈现年代际减少，量值为 9.3 mm，显然 MME 模拟的华北和江淮区域夏季总降水量的年代际转折均和实际相反。这说明简单等权重平均的多模式集合方法并不能提高模式对降水时间变化特征的模拟能力。

5 总结

本文采用气象预报业务中降水强度的划分标准，结合东亚地区逐日降水量观测资料，首先定量评估了 17 个 CMIP5 全球气候模式对中国东部夏季不同强度降水量及降水日数的模拟性能及偏差；随后针对 1970 年代末中国东部夏季降水的年代际转折，进一步分析了 CMIP5 模式对不同强度等级降水年代际变化的模拟偏差，及其对夏季总降水量年代际变化模拟性能的影响。

研究结果表明，大多数 CMIP5 模式均能较好地再现出中国东部夏季雨带从南到北逐渐减少的

特征。就多年平均的夏季降水量而言，CMIP5 对我国华南地区的模拟能力较强，而对华北和江淮区域降水的模拟能力则相对偏弱。没有一个 CMIP5 模式可以模拟出中国东部不同区域夏季降水的分布特征，但 CMIP5 多模式集合结果与观测最为接近，说明多模式集合可以在一定程度上提高模式对中国东部夏季雨带空间分布的模拟能力。夏季降水日数在我国东部呈现南方和东北多、黄淮区域少的分布特征，多数 CMIP5 模式能模拟出观测雨日的空间分布，但总体上有系统性的高估。CMIP5 模式对中国东部夏季雨量与雨日的模拟偏差间存在一定的对应关系，一般说来，对应于模式模拟的雨日偏多，模式模拟的雨量也会相对偏大，反之亦然。但雨日与雨量模拟偏差的这种关系随不同的模式和区域也不尽相同，这说明气候模式对区域降水量的模拟能力，不但取决于模式对雨日的模拟性能，同时还取决于模式对不同等级降水强度的模拟技巧。

在中国东部，夏季不同强度等级的降水对总降水量的相对贡献随区域而不同。在东北和华北地区，小雨和中雨占主导地位；而在江淮和华南地区，大雨和暴雨相对更加重要，虽然小雨和中雨的总占比也接近 50%。就空间分布而言，MME 可以较好地模拟出夏季中国东部小雨、大雨和暴雨雨量占总降水量比重的空间差异，但对中国东部中雨占比空间差异的模拟则有较大偏差。就不同强度降水的占比量值而言，多数 CMIP5 模式高估了小雨和中雨的比重，而低估大雨和暴雨的比重，因此 MME 多模式集合对中国东部小雨、中雨占比的模拟也是总体偏高，而模拟的大雨、暴雨的占比总体偏低，且模式在南方地区的模拟偏差要高于北方地区。从不同强度降水的模拟偏差对总降水模拟偏差的贡献来看，东北和华北地区总降水量模拟偏多是由小雨、中雨模拟偏多造成的；而江淮和华南总降水量模拟偏少则与模式对该区域大雨和暴雨模拟偏少直接相关。

对应于 1970 年代末中国东部夏季降水量的年代际转折，观测资料分析表明大雨和暴雨雨量的年代际变化是我国华北和江淮区域降水量发生年代际变化的主要原因。仅有少数 CMIP5 模式能在一定程度上模拟出总降水量的年代际变化，而大多数 CMIP5 模式均未能模拟出。总体说来，在中国华北区域，能较好模拟出大雨和暴雨年代际变化的模式，也能较好地模拟出总降水的年代际变化；而在中国江淮地区，由于多数 CMIP5 模式明显低估了江淮地区大雨和暴雨的比重，因此虽然部分模式能模拟出江淮流域夏季总降水量的年代际变化，但其主要贡献却是以中雨和小雨雨量的年代际变化为主。显然，模式对不同强度降水的占比及其年代际变化的模拟偏差，都会直接影响模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟能力。

以往在评估气候模式对降水的模拟能力时，大都侧重于模式对总降水或极端降水的模拟性能评估，本文则是从暴雨、大雨、中雨和小雨 4 个不同降水强度等级出发，较为系统地评估了 CMIP5 模式对不同强度降水及其对总降水贡献的模拟能力，结果表明在中国东部不同区域，显著影响模式对总降水及其变率模拟偏差的主导降水等级各不相同。由于不同强度等级降水的成因和机理各不相同，取决于不同的天气系统及环流背景，与之相关的物理过程也不完全相同。显然弄清气候模式对不同强度降水的模拟偏差，将有利于揭示气候模式中关键物理和动力过程数学表述的缺陷，进而为模式的改进和完善提供依据。

参考文献 (References)

陈红. 2014. CMIP5 气候模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 773−786. Chen Hong. 2014. Validation of the CMIP5 climate models in simulating decadal variations of summer rainfall in eastern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 773–786, doi:10.3878/j.issn.1006-9585. 2014.13174.

陈活泼. 2013. CMIP5 模式对 21 世纪末中国极端降水事件变化的预估 [J]. 科学通报, 58 (8): 743–752. Chen Huopo. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (12): 1462–1472, doi:10.1007/s11434-012-5612-2.

陈晓晨, 徐影, 许崇海, 等. 2014. CMIP5 全球气候模式对中国地区降水模拟能力的评估 [J]. 气候变化研究进展, 10 (3): 217–225. Chen Xiaochen, Xu Ying, Xu Chonghai, et al. 2014. Assessment of precipitation simulations in China by CMIP5 multi-models [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 10 (3): 217–225, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.03.011.

Dai A G. 2006. Precipitation characteristics in eighteen coupled climate models [J]. J. Climate, 19 (18): 4605–4630, doi:10.1175/JCLI3884.1.

顾薇, 李崇银. 2010. IPCC AR4 中海气耦合模式对中国东部夏季降水及 PDO、NAO 年代际变化的模拟能力分析 [J]. 大气科学学报, 33 (4): 401–411. Gu Wei, Li Chongyin. 2010. Evaluation of the IPCC AR4 climate models in simulating the interdecadal variations of the East China summer precipitation, PDO and NAO [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 401–411, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.04.003.

Hagemann S, Arpe K, Roeckner E. 2006. Evaluation of the hydrological cycle in the ECHAM5 model [J]. J. Climate, 19 (16): 3810–3827,

doi:10.1175/JCLI3831.1.

韩振宇, 周天军. 2012. APHRODITE 高分辨率逐日降水资料在中国大陆地区的适用性 [J]. 大气科学, 36 (2): 361–373. Han Zhenyu, Zhou Tianjun. 2012. Assessing the quality of APHRODITE high-resolution daily precipitation dataset over contiguous China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 361–373, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11043.

黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730–743, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.02.

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. Jiang Dabang, Fu Yuanhai. 2012. Climate change over China with 2 °C global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 234–246, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11074.

Jiang Z H, Li W, Xu J J, et al. 2015. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation [J]. J. Climate, 28 (21): 8603–8619, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0099.1.

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 (1): 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 (1): 109–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.01.10.

Lin Z H, Zeng Q C. 1997. Simulation of east Asian summer monsoon by using an improved AGCM [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 14 (4): 513–526, doi:10.1007/s00376-997-0069-y.

Lin Z H, Levy J K, Xu X K, et al. 2005. Weather and seasonal climate prediction for flood planning in the Yangtze River basin [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 19 (6): 428–437, doi:10.1007/s00477-005-0007-4.

李红梅, 周天军, 宇如聪. 2008. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析 [J]. 大气科学, 32 (2): 358–370. Li Hongmei, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. Analysis of July−August daily precipitation characteristics variation in Eastern China during 1958–2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 358–370, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.14.

李宏毅, 林朝晖, 陈红. 2012. 我国华南 4、5 月份降水年代际变化的特征及其与中西太平洋海温的可能关系 [J]. 气候与环境研究, 17 (4): 481–494. Li Hongyi, Lin Zhaohui, Chen Hong. 2012. Characteristics of the interdecadal variability of precipitation in April and May over South China and possible relationship with the mid-West Pacific SST [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 481–494, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.11040.

Luo L F, Tang W, Lin Z H, et al. 2013. Evaluation of summer temperature and precipitation predictions from NCEP CFSv2 retrospective forecast over China [J]. Climate Dyn., 41 (7–8): 2213–2230, doi:10.1007/s00382-013-1927-1.

刘敏, 江志红. 2009. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40 a 气候模拟能力的评估 [J]. 南京气象学院学报, 32 (2): 256–268. Liu Min, Jiang Zhihong. 2009. Simulation ability evaluation of surface temperature and precipitation by thirteen IPCC AR4 Coupled Climate Models in China during 1961–2000 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 32 (2): 256–268, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.02.013.

Qu X, Huang G, Zhou W. 2014. Consistent responses of East Asian summer mean rainfall to global warming in CMIP5 simulations [J]. Theor. Appl. Climatol., 117 (1–2): 123–131, doi:10.1007/s00704-013-0995-9.

孙颖, 丁一汇. 2008. IPCC AR4 气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气象学报, 66 (5): 765–780. Sun Ying, Ding Yihui. 2008. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 765–780, doi:10.11676/qxxb2008.070.

Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (4): 485–498, doi:10.1175/BAMS-D-11-00094.1.

Tian D, Guo Y, Dong W J. 2015. Future changes and uncertainties in temperature and precipitation over China based on CMIP5 models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32 (4): 487–496, doi:10.1007/s00376-014-4102-7.

Tu K, Yan Z W, Zhang X B, et al. 2009. Simulation of precipitation in monsoon regions of China by CMIP3 models [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (4): 194–200, doi:10.1080/16742834.2009. 11446803.

吴佳, 周波涛, 徐影. 2015. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5 模式模拟评估和预估 [J]. 地球物理学报, 58 (9): 3048–3060. Wu Jia, Zhou Botao, Xu Ying. 2015. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58 (9): 3048–3060, doi:10.6038/cjg20150903.

Xie P P, Chen M Y, Yang S, et al. 2007. A gauge-based analysis of daily precipitation over East Asia [J]. J. Hydrometeor., 8 (3): 607–626, doi:10.1175/JHM583.1.

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 (5): 287–292. 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 (5): 287–292, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.05.008.

Yang S, Zhang Z Q, Kousky V E, et al. 2008. Simulations and seasonal prediction of the Asian summer monsoon in the NCEP climate forecast system [J]. J. Climate, 21 (15): 3755–3775, doi:10.1175/2008JCLI1961.1.

Yao S X, Zhang Y C. 2010. Simulation of China summer precipitation using a regional air−sea coupled model [J]. Acta Meteorologica Sinica, 24 (2): 203–214.

Zhang L X, Zhou T J. 2014. An assessment of improvements in global monsoon precipitation simulation in FGOALS-s2 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 31(1): 165–178, doi:10.1007/s00376-013-2164-6.

赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 2015. CMIP5 和 CMIP3 对东亚降水和全球热带气旋模拟效果的评估 [J]. 气候变化研究进展, 11 (6): 443–446. Zhao Zongci, Luo Yong, Huang Jianbin. 2015. Evaluation of precipitation in East Asia and global tropical cyclones simulated by CMIP5 and CMIP3 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 11 (6): 443–446, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2015.06.009.