

5种CMIP5模拟降水数据在中国的适用性评估

高峰¹, 蔡万园², 张玉虎¹, 雷晓辉³, 夏富强⁴

(1. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京大学 地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 3. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038; 4. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011)

摘要:受气候变化影响, 水资源短缺现象严重, 自然灾害频发。对未来水资源状况进行有效的预测和评估, 可为水资源合理配置工作提供理论及决策参考。全球气候模式是大尺度模拟预测未来降水的主要手段, 但模式数据的模拟质量及其在不同研究区适用性需要进行系统评估。研究以1971—2000年2474个气象站点监测降水数据为基准, 对5种CMIP5模式模拟降水数据($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率)进行系统性评估, 分析CMIP5模式模拟降水数据在中国区的适用性。对比分析了1971—2000年间5种CMIP5模式模拟降水数据与中国地面监测降水数据所反映的中国降水趋势变化的时间和空间特征, 对CMIP5模式模拟月降水数据进行经验校正, 在数据相关性、误差和趋势一致性3个角度, 采用相关系数(r), 偏差均值(D_{AVE}), 相对绝对误差(E_{RA})和均方根误差(E_{RMS})4个指标和Seasonal Kendall(SK)趋势检验方法, 从时间变化和空间分布特征两个角度, 对校正后的CMIP5模式模拟降水数据在中国区域的数据质量进行系统评估。5种CMIP5模式模拟中国区年降水高于监测数据均超过20%, 通过经验校正, 在保证年降水不发生变化的情况下, 使模拟降水数据与监测数据在逐月的相关性大大提高, 误差大大降低。对5种模式模拟数据的综合评价显示, 最适合模拟中国区降水的模式是HadGEM2-ES模式。对模式数据的系统性评估, 为研究合理选择、校正和使用CMIP5数据集提供理论和技术参考。

关键词:气候变化; CMIP5模式; 干旱指数; 系统评估; 干旱时空特征; 水资源管理

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)06-0122-09

Evaluation on the Applicability of 5 Kinds of CMIP5 Simulated Precipitation Data in China

GAO Feng¹, CAI Wanyuan², ZHANG Yuhu¹, LEI Xiaohui³, XIA Fuqiang⁴

(1. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: Affected by climate change, water shortage is serious and natural disasters occurring frequently. Effective forecasting and assessment on the future state of water resources will provide theoretical and decision-making reference for the rational allocation of water resources. Global climate models are the main means of large-scale simulation and prediction for future precipitation. However, the quality of model data and the suitability of different research area need a systematic assessment. Based on the monitoring precipitation data from 2474 meteorological stations during the period from 1971 to 2000 in China, we performed the systematic assessment on the simulated precipitation data from five CMIP5 models ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$ resolution), and analyzed applicability of the simulated precipitation data of CMIP5 model in China. Comparative analysis was conducted to detect the characteristics of temporal and spatial variation trend of precipitation data of five CMIP5 model and meteorological stations in China from 1971—2000. Empirical correction on monthly precipitation data from CMIP5 models was conducted and systematic assessment of data quality of the corrected data was also performed using the correlation coefficient (r), the average deviation (D_{AVE}), relative absolute

收稿日期: 2016-12-23

修回日期: 2017-01-18

资助项目: 中国清洁发展机制基金赠款项目(2014092, 2014108); 国家科技支撑计划课题(2012BAC19B0305); 国家自然科学基金面上项目(11231010, 11471223)

第一作者: 高峰(1994—), 男, 山东省潍坊市寒亭区人, 硕士研究生, 主要从事水风险评价等方面的研究。E-mail: gfcnu2016@163.com

通信作者: 张玉虎(1975—), 男, 江苏省徐州市人, 博士, 副教授, 主要从事环境系统分析及风险评估研究。E-mail: zhang_yuhu@163.com

Error (E_{RA}) and the root mean square error (E_{RMS}) indicators in aspects of data consistency and the ability to describe the trend for China region. Annual precipitation simulated from five CMIP5 models in China was higher than the monitoring data by more than 20%, however, by empirical correction, the error of monthly precipitation data with monitoring data was greatly reduced. Results of evaluation for five CMIP5 models show that the most suitable model for China is HadGEM2-ES model. Systematic assessment for model data can provide theoretical and technical reference for the rational choice, correction and application of CMIP5 data set.

Keywords: climate change; CMIP5 model; drought index; systematic assessment; spatial and temporal characteristics of drought; water resources management

气候模式是研究气候变化机理和预测未来气候变化重要的工具,其模拟结果已被水文、生态、环境、农业等领域的研究广泛应用^[1-2]。随着科技进步,气候模式分辨率进一步提高,为进行极端气候事件的研究提供了方便,许多学者围绕全球气候模式的模拟结果进行了大量的分析。然而由于气候系统的复杂性,气候模式的结果仍然存在不确定性,且对降水模拟的不确定性更大。随着参加耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)的模式公开,这些模拟结果被各研究领域广泛应用。因此,对这些模式的模拟能力,特别是降水的模拟能力作全面、系统的评估,不仅可以为模式改进提供科学依据,更可以为多部门多领域应用气候模式的结果提供建议和参考。

为满足研究气候变化的需要,世界气候研究计划(WCRP)耦合模式工作组(WGCM)联合国际地圈—生物圈计划、地球系统集成与建模项目以及世界上20多个知名的气候模拟机构共同组织实施了国际耦合模式比较计划(CMIP)。CMIP5是2008年启动的第五阶段计划,成为目前为止最全面的气候模式^[2],被诸多学者应用于一系列水文—气象参数的区域降尺度研究^[3-6]。CMIP5模式在SRES情景的基础上进行了重大改进,结合了典型浓度路径(RCPs)去表征未来温室气体排放情景^[7]。RCPs(RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5)3种情景依据全球温室气体排放的程度,确定二氧化碳的排放范围和每个情景的辐射强度^[4],相比耦合模式比较计划第三阶段(CMIP3)的模式,CMIP5模式采用了更合理的参数化方案、通量处理方案和耦合器技术,以提高气候模式的模拟和预估能力,增强对气候系统变化的机理性认识^[8]。全球气候模式对温度变化的模拟能力较好,但各模式对中国地区平均降水模拟值偏多,部分模式不能较好地模拟出降水的空间分布特征,因而模式对降水的模拟能力还需要进一步改进^[9]。模式对中国东部降水的模拟要优于西部地区,通过比较不同季节的模拟情况发现,全年的模拟效果最好,而夏季的模拟效果最差。此外,模式对降水年际变化特征的模拟不太理想^[10]。

通过对中国地区降水主要模态的模拟评估^[11],发现模式能够一定程度上反映出降水的主要分布型^[12],但是大部分模式高估了中国地区的平均降水,对降水的时间变率模拟能力有限^[13]。评估CMIP5模式对中国降水的模拟能力,有助于更好地理解模式本身的发展和局限,也为模式开发者提供参考依据^[14]。

CMIP5模式对全球以及区域气候变化具有一定模拟和预估能力,但使用时需要对其进行系统评估。徐影等^[15]针对CMIP5模式模拟输出的降水数据,评价了模式对中国区1980—2005年一些与降水相关的特征变量的模拟效果。陈晓晨等基于若干监测降水数据与43个CMIP5模式模拟降水数据,对CMIP5模式模拟输出的多个特征变量在中国区的模拟能力进行研究^[15]。同时,应用多套监测数据,选取多个气候态变量来深入探讨并分析了46个CMIP5模式在不同时空尺度上在中国区的模拟质量^[1]。李振朝等对8个模式进行比较发现,模式对研究区降水的模拟有一定的季节特征,在年代际上,4个模式模拟的降水为增大趋势,4个为减小趋势。对青藏高原的模拟,各模式都模拟出了青藏高原的降水中心,但对降水量值的模拟相差较大^[16]。系统评估CMIP5模式对中国降水的模拟能力,改进系统评估技术,不仅有助于更好地理解模式本身的发展和局限,也为模式开发者以及模式结果的应用提供技术参考和理论依据。

1 数据与研究方法

1.1 数据

1.1.1 中国监测降水数据 中国区域监测陆面降水格点数据是由国家气象信息中心(<http://cdc.cma.gov.cn/>)网站下载的去60a的水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的中国区范围内月降水量的格点数据,本研究截取1971—2000年的月降水量用来评估5种CMIP5模式模拟降水数据。该数据是在地面2474个气象站点观测降水资料的基础上,结合GTOPO30数据,经过分幅解压、格式转换重采样,运行ANUS-PLIN软件中的selnot.exe模块,按照广义交叉验证

值最优原则选择初始结点,选择经度、纬度、海拔高度 3 个独立变量,运行 splinb. exe 模块,生成表面系数文件,运行 lapgrd. exe 模块,生成每月的 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的地面降水网格数据,同时考虑了高程对降水空间插值精度的影响^[17-18]。同时,也应用交叉验证质量检验法对降水格点数据集进行交叉验证和误差分析,经交叉验证,数据完整,质量状况良好^[19-20]。

中国幅员辽阔、区域间气候差异大、自然条件复杂。受海陆气候差异影响,气象特点在一年四季更迭。此外,青藏高原对向上气流的高空传输具有很大的影响。所有这些因素都导致了中国复杂的季风形态和不同的气候类型。根据 1961—2013 年监测平均年降水量,中国在地理空间上划分成 4 个不同的气候区:干旱区($P<200\text{ mm}$),半干旱区($200\text{ mm}<P<400\text{ mm}$),半湿润区($400\text{ mm}<P<800\text{ mm}$)和湿润区($P>800\text{ mm}$)。同时,研究考虑中国区内 10 个一级流域,即:松花江流域(SR),辽河流域(LR),海河流域(HR),黄河流域(YR),淮河流域(HuaiR),长江流域(YZR),东南诸河流域(SER),珠江流域(PR),西南诸河流域(SWR),西北内陆诸河流域(NWR)(图 1)。

在中国,年降雨量分布不均匀,南北之间显著不同。南方盆地的年平均降水量超过 800 mm,丰沛地区的年降水量甚至多于 1500 mm。在北方地区,除辽河流域以外,剩余流域的年降水量都不超过 600 mm。西北内陆河流域的平均年降水为全国最小值,约为 150 mm。不同流域之间降水量差异是造成中国水资源分布不均的主要原因之一。

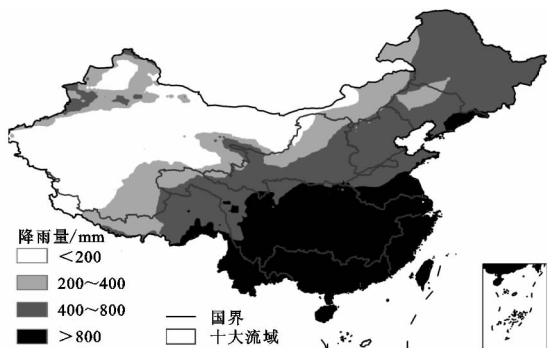


图 1 中国年降水量及 10 大流域分布

1.1.2 5 种 CMIP5 模式模拟数据 研究所用历史和未来日降水模拟数据由部门间影响模型比较计划(Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project, ISI-MIP)(<http://www.isi-mip.org>)提供的 5 种 CMIP5 全球气候模型(HadGEM3-RA, GFDL-ESM2M, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM 和 NorESM1-M)(表 1)。模拟降水量预估的时段选取 2016—2050 年,模拟历史时段选取 1971—2000 年,数据水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 。该数据由 ISI-MIP

采用双线性插值法进行空间插值,并基于概率分布的统计偏差订正方法进行订正^[21-22],最后由中国农科院环发所提取并转换为 ASC II 码。本研究选取典型浓度路径最高排放情景 RCP8.5 情景下 5 种气候模式的模拟结果进行评估。

表 1 5 种 CMIP5 模式基本信息

模式名称	单位名称及 所属国家	大气模式 分辨率	水平 分辨率
GFDL-ESM2M	NOAA GFDL, 美国	144×90	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$
HadGEM2-ES	MOHC, 英国	192×145	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$
IPSL-CM5A-LR	IPSL, 法国	96×96	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$
MIROC-ESM-CHEM	MIROC, 日本	128×64	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$
NorESM1-M	NCC, 挪威	144×96	$0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$

1.2 方法

1.2.1 系统评估方法—相关分析和误差分析 本研究对中国区域进行气候分区的基础上,计算 CMIP5 模式模拟结果与监测数据在不同分区的降水逐月变化趋势、相关系数(r),偏差均值(D_{AVE}),相对绝对误差(E_{RA})和均方根误差(E_{RMS})等指标,以此评估 CMIP5 模式模拟结果的数据质量。各指标的具体计算公式如下:

(1) 相关系数(r)。相关系数(Correlation coefficient)是以两个变量与它们的平均值的偏离程度为基础,用以反映两个变量在某一时间序列上的相关性,本研究应用相关系数反映 CMIP5 模式模拟降水数据和监测数据的相关性。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}}$$

(2) 偏差均值(D_{AVE})。偏差均值用来反映特定值与平均值的偏差的平均水平。

$$E_{AVE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)$$

(3) 相对绝对误差(E_{RA})。相对绝对误差综合了绝对误差和相对误差的优点,是绝对误差与监测值的比率,使误差度量的意义更为清晰和自然。

$$E_{RA} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right) \times 100\% \quad y \geq 1$$

(4) 均方根误差(E_{RMS})。均方根误差用来反映模式模拟结果与实际监测数据之间的方差的平均情况。

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

式中: x_i 和 y_i 分别表示 CMIP5 模式模拟值和气象站点监测值; n 为统计样本数。

1.2.2 反距离权重法 反距离权重(Inverse Distance Weight, IDW)算法于 1968 年由 Shepard 提

出,1985年Waston等将其应用于空间插值的等值线绘制^[23-24],继而IDW算法被广泛应用于各行业领域的空间分析与制图^[25]。IDW插值的基本假设是样点在插值区呈均匀分布,当样点在各方向较均匀分布时,该插值算法十分可靠^[26]。本研究,应用IDW空间插值对降水的状态和变率进行空间插值,基于分布均匀的格点数据,IDW空间插值更能准确反映变量的空间分布特征。

1.2.3 Seasonal Kendall趋势检验 在水文学和气象学中,Mann-Kendall检验(M-K检验)是最常用的时间序列趋势检验方法之一。M-K检验不要求样本变量服从相应的分布,能剔除少数异常值的干扰,适用于非正态分布数据的趋势检验^[27]。Seasonal Kendall检验(SK检验)是M-K检验应用在具有周期性变化时间序列的一种特殊情况^[28],其目的在于确定所有月降水数据集的随机变化程度,也可以理解为M-K检验对每个月份时间序列检验的集合,更适宜应用于具有周期性变化的时间序列趋势检测中^[29]。

本研究对月降水及干旱指数月值趋势性检验采用SK检验法^[30]。SK趋势检验输出结果主要包括变化率 τ 值和显著性水平 p 值, τ 值的正负表示上升下降。 $0.05 < p < 0.1$,表示在0.1显著性水平下趋势显著,变化趋势较弱; $p < 0.05$,表示在0.05显著性水平下趋势显著,变化趋势较强^[30]。

2 结果与分析

系统评估了CMIP5模式模拟降水数据在中国区的适用性。研究对比分析1971—2000年5种CMIP5模式模拟降水数据与中国地面监测降水数据所反映的中国降水趋势变化的时间和空间特征,对CMIP5模式模拟月降水数据进行经验校正,采用相关系数(r),偏差均值(D_{AVE}),相对绝对误差(E_{RA})和均方根误差(E_{RMS})4个指标,从时间变化和空间分布特征两个方面,对校正后的CMIP5模式模拟降水数据在中国区域的数据质量进行系统评估。分析5种CMIP5模式模拟数据与监测数据吻合度在区域上的质量差异,并针对相关性与误差指标,在数据一致性及对趋势性描述能力方面,对5种模式模拟数据进行综合评价,找出最适合模拟中国区降水的CMIP5气候模式。

2.1 中国区域CMIP5模式降水变化趋势

2.1.1 CMIP5模式降水变化过程的时段统计特征 首先计算2474个气象站点监测降水量与5个CMIP5模式模拟降水量在中国区的逐月平均值。5个CMIP5模式模拟的月降水量在季节性上与监测数据差距较大,考虑到月降水在中国区的特征,依据1971—

2000年监测月降水量序列与模式数据的线性关系,针对不同月份的降水量值,在不改变年降水量的前提下,使月降水的月季分布更合理,对模式模拟月降水乘以1个系数,具体系数为1月:0.23,2月:0.32,3月:0.54,4月:0.84,5月:1.30,6月:1.93,7月:2.40,8月:2.10,9月:1.29,10月:0.72,11月:0.35,12月:0.19。

监测月降水量、模式模拟月降水量以及校正后的月降水量时间序列绘于图2。可以看出,5套CMIP5模式降水数据与监测降水在均值上具有较好的一致性,在月季的变化趋势上的一致性较差,但在加入校正系数后,校正值与监测值能够较好的吻合。在1977年、1991年、1996年和1998年4个年份,模式模拟值明显偏小,而在1971年、1972年、1982年和2000年模式模拟值又明显偏大。关于1996年模拟降水数据异常问题也出现在过其他模型中,但CMIP5模式已明显优化了输入参数,1996年的降水量未出现太过跳跃性的异常。在异常情况中,GFDL-ESM2M模式对1977年的降水模拟较好,HadGEM3-RA模式在整体上与监测值的差值较小。

研究将1971—2000年平均划分为3个不同的子时段,分别为:1971—1980年、1981—1990年和1991—2000年,对5种CMIP5模式降水数据分别计算在4个气候区的平均年降水量及其与监测年平均降水量的偏差,结果见表2。可以发现:

(1)从3个时段来看,监测年降水量是逐时段上升的,可以看出历史年降水有上升的趋势,在干旱区和半干旱区,5种CMIP5模式年降水量的偏差在1991—2000年时段明显高于另外两个时段,在湿润区和半湿润区,5种CMIP5模式年降水量的偏差在1971—1980年时段的偏差较大。

(2)从4个气候区来看,在干旱区5种CMIP5模式年降水量比监测降水量偏小20%左右,在半干旱区、半湿润区和湿润区,5种CMIP5模式降水数据比监测降水数据偏高,其中,在半干旱区偏高最严重,达到了80%,在湿润区的CMIP5模式降水数据比监测降水数据偏高较小,在-0.5%~10%之间。

(3)GFDL-ESM2M在1971—1980年在湿润区比监测值的偏大幅度远超过1981—1990年的幅度,并且在1991—2000年比监测值偏小,偏小了0.5%;HadGEM3-RA与监测值的偏差比较接近平均水平,在半湿润区1991—2000年的偏差要大于另外两个时段;IPSL-CM5A-LR在湿润区1971—1980年和1981—1990年2个时段的偏差值相差较大,达到了10.7%;MIROC-ESM-CHEM和NorESM1-M整体偏差都比较大,但是在时段间的差别较小。

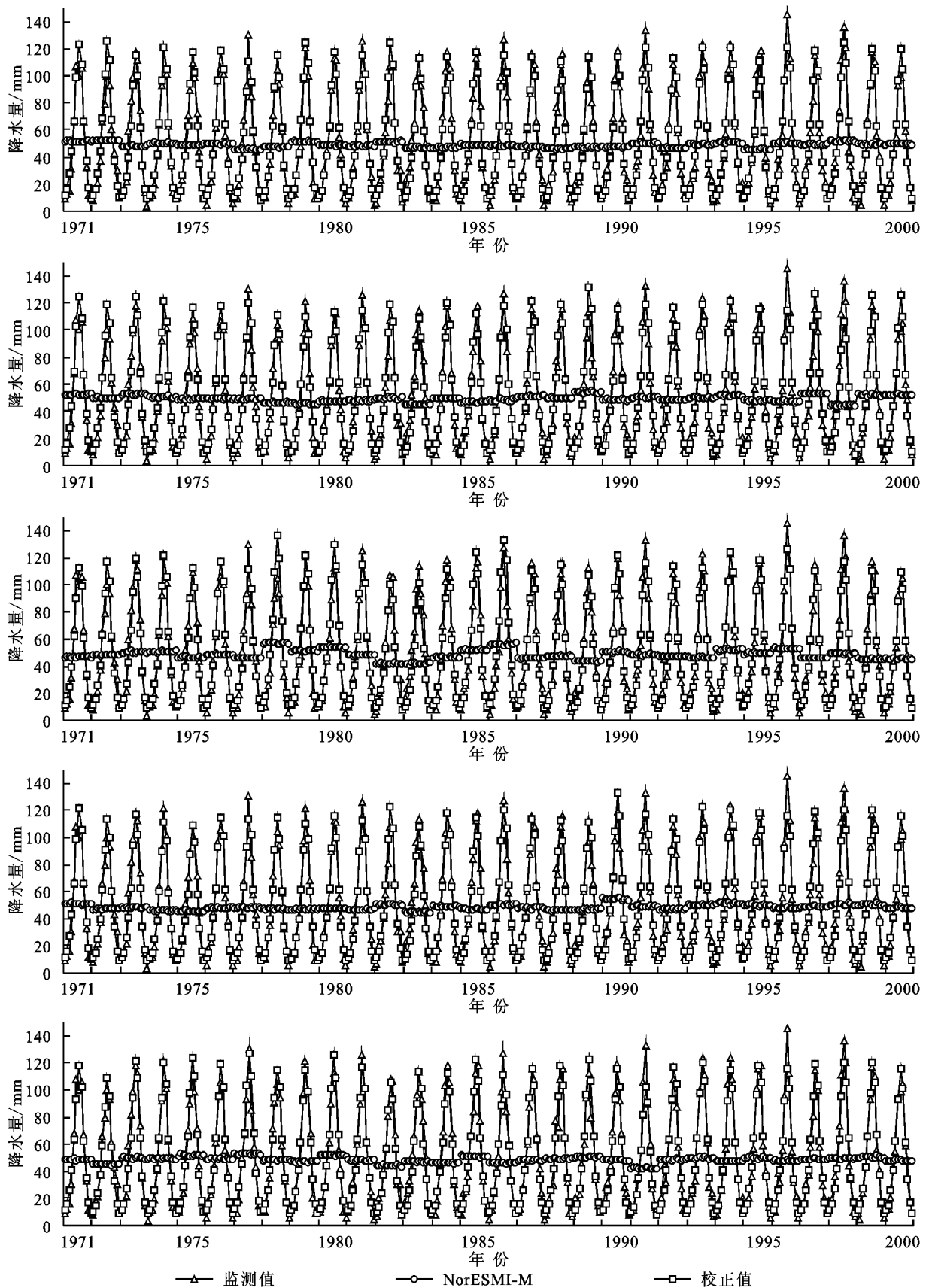


图 2 1971—2000 年 5 个 CMIP5 模式和监测中国平均逐月降水量变化

2.1.2 CMIP5 模式降水变化过程的趋势性检验 研究对 5 个 CMIP5 模式月降水数据与监测月降水数据的变化趋势进行对比分析,应用 SK 检验方法,对

1971—2000 年的 5 个 CMIP5 模式月降水数据与监测月降水数据做逐格点的趋势检验,对检验的结果进行空间插值,见图 3。可以发现,依据监测降水数据,

在 0.1 的显著性水平下, 内蒙古大部分地区以及松花江流域和辽河流域的交界处有局部的变干趋势; 在 0.05 显著性水平下, 珠江流域、新疆南部地区、长江流域和黄河流域的交界区域以及环渤海的部分地区有显著的变干趋势。整体来看, 5 种 CMIP5 模式的趋势性与监测数据的趋势性有较好的一致性, 但是在部分地区存在一定的差异。GFDL-ESM2M 模式在长江流域、西南诸河流域的南部地区、珠江流域以及内蒙古东部地区的趋势与监测数据存在较大的差异, 在这些区域的下降趋势要强于监测数据; HadGEM3-RA 模式在中国区大部分区域的趋势与监测数据保持了很好的一致性, 但是在新疆的北部地区、辽东半岛区域、环渤海区域、长三角区域以及珠江流域的部分区域与监测数据存在差异; IPSL-CM5A-LR 模式过度模拟了南方地区降水的下降趋势; MIROC-ESM-CHEM 模式在长江流域中下游地区和东北的北部地区与监测数据的趋势恰恰相反, 监测数据在这两个区域的趋势为增加, 而模式数据呈现显著的下降趋势; NorESM1-M 模式在整个南方的趋势性与监测数据的趋势呈现相反的结果, 尤其是在长江流域的西部地区和黄河流域的东部地区存在明显的趋势对立的现象, 同时在新疆北部地区, 模式数据呈现不显著的下降趋势, 而监测数据在这个区域是显著的上升趋势。

同时, 研究对 4 个气候区月降水量的平均值与监测数据均值进行了 SK 检验, 趋势检验结果见表 3。可以发现, 监测数据在干旱区和半干旱区呈现显著的上升趋势, 而在半湿润区和湿润区没有显著的变化趋势。在 4 个气候区来看, GFDL-ESM2M 模式对于干旱区的变化趋势模拟较好, HadGEM3-RA 模式在半干旱区的模拟效果更佳, 在半湿润区和湿润区, HadGEM3-RA 模式和监测数据都不存在显著的变化趋势, 一致性较好。除此之

外, GFDL-ESM2M 模式和 IPSL-CM5A-LR 模式数据在湿润和半湿润区存在着较显著的下降趋势, 与监测数据出入较大; NorESM1-M 模式在半干旱区和干旱区的变化趋势不明显, 这与监测数据显著的上升趋势是不一致的。与逐格点检验的结果一样, HadGEM3-RA 模式在中国区的大部分区域的趋势模拟效果较好, 只是在干旱区的模拟缺乏明显的显著性变化。

表 2 4 个气候区不同时段监测年降水量均值及其与 CMIP5 模式年降水量均值的偏差 mm

降水	时段	CMIP5 模式年降水量均值的偏差 mm			
		干旱区	半干旱区	半湿润区	湿润区
监测	1971—1980	94.0	304.5	468.2	1269.5
	1981—1990	99.8	301.2	490.3	1277.5
	1991—2012	103.6	302.1	473.6	1306.1
GFDL-ESM2M	1971—1980	-25.9	251.2	99.6	129.1
	1981—1990	-27.2	261.2	63.1	39.7
	1991—2000	-25.3	252.0	69.1	-5.7
HadGEM3-RA	1971—1980	-21.0	237.7	78.6	100.9
	1981—1990	-26.6	239.1	51.3	46.4
	1991—2000	-32.9	260.6	95.6	32.0
IPSL-CM5A-LR	1971—1980	-25.1	237.0	92.4	142.9
	1981—1990	-26.6	227.4	74.8	6.3
	1991—2000	-32.4	235.8	72.8	38.5
MIROC-ESM-CHEM	1971—1980	-21.8	238.9	95.2	122.9
	1981—1990	-28.2	254.2	64.9	77.5
	1991—2000	-28.8	256.7	92.6	35.3
NorESM1-M	1971—1980	-18.1	250.4	84.1	78.5
	1981—1990	-29.0	230.5	59.1	42.8
	1991—2000	-31.5	253.3	89.9	33.4

注: 偏差=CMIP5 数据-监测数据。

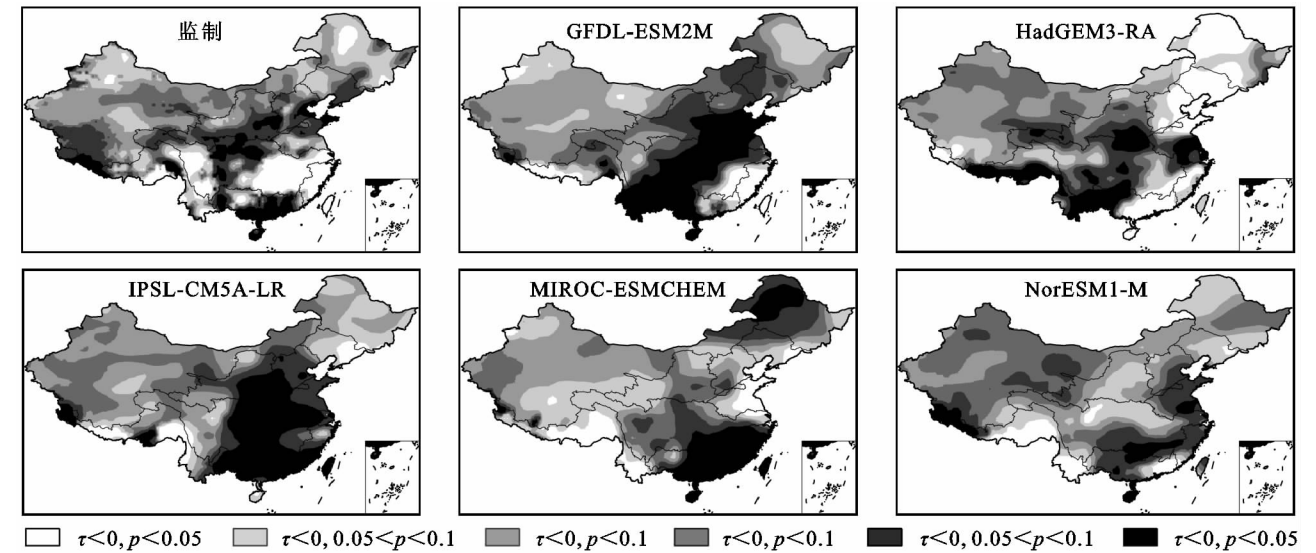


图 3 CMIP5 模式数据与监测降水数据的趋势检验结果空间分布

表 3 4 个气候区 CMIP5 模式和监测降水数据的 SK 趋势检验结果

模式	干旱区		半干旱区		半湿润区		湿润区	
	τ	p	τ	p	τ	p	τ	p
GFDL-ESM2M	0.095	0.017**	-0.075	0.099*	-0.112	0.035**	-0.196	0.059*
HadGEM3-RA	0.158	0.157	0.101	0.033**	0.036	0.217	-0.047	0.194
IPSL-CM5A-LR	0.084	0.231	-0.076	0.145	-0.134	0.057*	-0.058	0.098*
MIROC-ESMCHAM	0.065	0.334	0.083	0.043**	0.315	0.186	0.013	0.232
NorESM1-M	-0.071	0.126	0.107	0.237	0.078	0.094*	-0.052	0.121
监测	0.106	0.004**	0.091	0.012**	0.024	0.384	-0.045	0.214

注： τ 值的正负代表上升或下降； p 值的 * 表示在 0.1 显著性水平下存在趋势，** 表示在 0.05 显著性水平下存在趋势。

2.2 CMIP5 模式数据与监测数据的相关分析与误差分析

2.2.1 相关分析 在时间和空间两个尺度上,对 CMIP5 模式数据与监测数据进行相关分析,在时间上,逐月计算 CMIP5 模式数据与监测数据整个研究区降水数据的相关系数;从空间上,逐格点计算 1971—2000 年 CMIP5 模式降水数据时间序列与监测时间序列数据的相关系数,并作分析。

(1) 与监测数据相关性的时间变化特征。在相关性的时间变化特征上,首先计算了 5 个 CMIP5 模式数据和监测降水数据在整个中国区域的相关系数的逐月时间序列(图 4),对相关系数时间序列进行 SK 趋势检验和分时段均值的统计,见表 4。可以看出:(1) 5 个 CMIP5 模式数据和监测降水数据在各时间段的相关系数的平均值在 0.4 以上, HadGEM3-RA 的相关系数在不同的时段分别大于其他模式。(2) 5 个 CMIP5 模式数据和监测降水数据都有明显的季节特征,除 MIROC-ESMCHAM 模式外,其他 4 种模式在 10—3 月和 6—8 月均有较高的相关性,在 4—5 月和 9—10 月相关性较低, HadGEM3-RA 模式的各月均值高于其他模式,而 NorESM1-M 模式的季节波动幅度较小。(3) 5 个 CMIP5 模式在 1971—1980 年时段和 1991—2000 年时段的相关系数要高于 1981—1990 年的相关性。

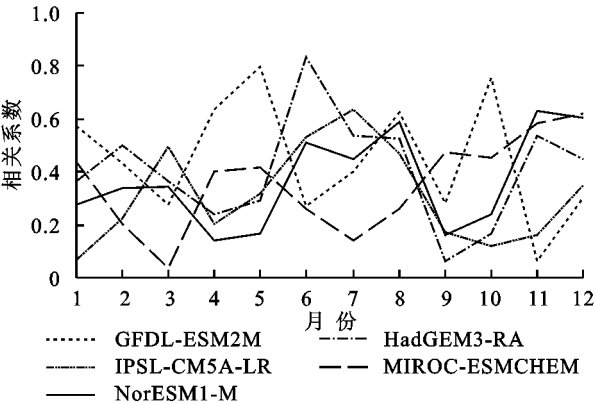


图 4 不同月份 CMIP5 模式降水数据与监测数据的相关系数

(2) 与监测降水数据相关性的空间变化特征。

在相关性的空间变化特征上,计算了 1971—2000 年 5 个 CMIP5 模式数据和监测降水数据的逐格点的相关系数,相关系数的空间分布见附图 4,可以看出,5 个 CMIP5 模式数据和监测降水数据的相关系数空间分布具有一致的格局,即由东北向西南的斜线区域较大,这一区域的相关系数基本在 0.8 以上。对于整个中国区而言,约 60% 面积的 r 值在 0.6 以上。其中, GFDL-ESM2M 模式下大部分区域的相关系数在 0.8 以上,尤其是在中部、华北和东北地区; HadGEM3-RA 模式在东部沿海地区和东北北部地区的相关系数较大; IPSL-CM5A-LR 和 GFDL-ESM2M 模式的情况比较相近,但 r 值较大的区域面积要小于 GFDL-ESM2M; MIROC-ESMCHAM 模式在内蒙古中部地区的相关系数很低; NorESM1-M 模式的整体比较平均,在西南和华北地区的相关系数比较大,在 0.8 以上。

表 4 中国区 CMIP5 模式降水数据与监测降水数据的相关系数时间序列 SK 趋势检验

CMIP5 模式	SK 检验结果		相关系数均值		
	τ	p	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年
GFDL-ESM2M	-0.32	0.13	0.52	0.54	0.56
HadGEM3-RA	-0.21	0.02**	0.87*	0.75	0.85
IPSL-CM5A-LR	-0.45	0.06*	0.67	0.43	0.64
MIROC-ESMCHAM	-0.12	0.32	0.63*	0.45	0.58
NorESM1-M	-0.13	0.25	0.64*	0.56	0.59

2.2.2 误差分析 误差分析以监测年降水数据为基准,采用 3 个指标: D_{AVE} , E_{RA} 及 E_{RMS} , 对 CMIP5 模式数据进行误差分析。与相关分析类似,也从时间与空间两个角度进行误差分析。时间上,逐月计算 CMIP5 模式数据与监测数据在整个中国区所有格点的降水数据的误差值;空间上,逐格点计算在 1971—2000 年 CMIP5 模式时间序列数据与监测时间序列数据的各误差指标。5 种 CMIP5 模式数据与监测数据逐格点的 D_{AVE} , E_{RA} 及 E_{RMS} 空间分布见附图 5—7。由于在青藏高原南侧地面气象站点较少,其监测格点数据以内陆的站点为基准辐射过去的,而青藏高原南麓受喜马拉雅山系的影响为热带气候,降水极其丰

富,因而监测数据未能真正反映其真实降水。同时CMIP5模式考虑了气候影响,在其区域模拟的降水量属正常范围,从而造成监测降水与模式模拟降水的绝对误差较大。本研究抛开青藏高原南麓区域,对内陆区域进行空间分析。

从偏差均值(D_{AVE})来看附图5,5种CMIP5模式的空间分布呈现相似的空间分布,约80%的区域偏差均值在-20~20 mm之间,且从北到南误差有逐渐减小的趋势,但是靠近海南岛的区域偏差均值较大。除青藏高原南麓区域,HadGEM3-RA模式在整个中国区的误差值较小,且误差的低值区面积占总面积的85%左右,尤其在东三省的误差较其他4种模式明显小。在长江流域和东南诸河流域地区,HadGEM3-RA模式的偏差均值较其他4种模式波动幅度较小,模拟低估东南诸河流域年降水最大可达500 mm。

从相对绝对误差(E_{RA})来看附图6,受气象站点分布的影响,出青藏高原南麓区域外,在塔克拉玛干沙漠地区,相对绝对误差也出现了极大的现象,最大可达1300%。整体而言,相对绝对误差在空间上从东南到西北呈现增加的趋势。GFDL-ESM2M模式在松花江流域的误差较小,1/2的区域处于小于0.2的范围内,而在新疆北部地区的误差高于其他模式;HadGEM3-RA模式在全国范围的误差值空间差异较小,尤其在新疆和西藏地区的误差明显小于其他模式;IPSL-CM5A-LR,MIROC-ESM-CHEM和NorESM1-M3个模式在长江中上游的误差值较小,NorESM1-M模式在西藏地区的误差较小。

从均方根误差(E_{RMS})来看附图7,5种CMIP5模式的均方根误差在空间上呈现由西北到东南沿海逐渐增大的趋势,在东南沿海的部分区域均方根误差可达到400 mm,而在西北的大部分区域均方根误差均在50 mm以内。在误差的高值区内,HadGEM3-RA和IPSL-CM5A-LR模式的误差值明显小于其他3种模式,尤其以HadGEM3-RA更优;但是在华北和东北地区,IPSL-CM5A-LR模式的误差值更小。

进一步计算了3个误差指标在中国区的逐月变化序列,由图5可以看出:从偏差均值来看,HadGEM3-RA模式最小,且各月份偏差均值均小于0,但是GFDL-ESM2M,MIROC-ESM-CHEM和NorESM1-M3种模式存在着明显的季节性差异,在6—8月份的误差值远远高于平均值,而GFDL-ESM2M模式基本在0上下浮动,且波动幅度小于0.1。从相对绝对误差来看,5种CMIP5模式均存在季节性差异,在10—3月份的相对绝对误差均在0.2以上,在5—9月份的误差均小于0.1。5种模式与监测数据的误差值区别

不大,而IPSL-CM5A-LR的偏差略高于另外4个模式,而HadGEM3-RA模式在夏秋季节的误差小于其他模式。

从均方根误差来看,5种模式在6—9月份的误差出现异常增大,而其他月份均小于7 mm。在1—2月和9—12月,5种模式的误差值相差不大;在3—5月期间,IPSL-CM5A-LR误差较小,为7~8 mm;在5—7月,HadGEM3-RA模式的误差较小,在9~11 mm之间;在7—9月,GFDL-ESM2M和NorESM1-M模式几乎没有差异,同时误差都很小,在7~10 mm范围内。

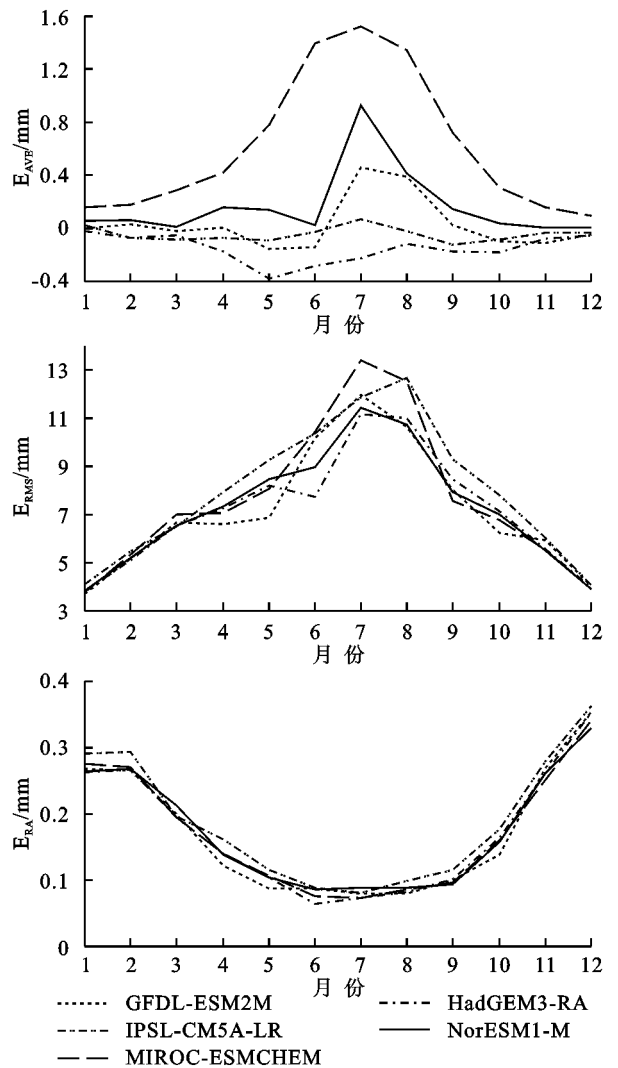


图5 CMIP5模式数据 D_{AVE} 、 E_{RA} 及 E_{RMS} 的逐月变化

2.3 CMIP5模式降水数据质量的总体评价

通过对5种CMIP5模式降水数据与监测降水数据的逐月时间序列的对比,对逐格点年降水的相关分析和误差分析,并对相关分析和误差分析的SK趋势性进行了对比分析,可以得出如下结果:5种CMIP5模式模拟年降水数据在逐格点的偏差上,较监测降水均有超过20%的高估,其中以HadGEM3-RA模式的高估率最小,为21.4%,在对年降水的应用上应对

高估部分进行处理。模式模拟月降水数据在季节上与监测降水存在明显的差异性,在引入经验系数后,这种差异明显减小,其中,校正后的月降水数据以 GFDL-ESM2M 模式最优, HadGEM3-RA 处于其次, 2 种模式的模拟月降水数据用于对未来干旱的预估较为准确。综合相关分析和误差分析的结果,对于未来中国干旱时空特征的评估,研究选取 HadGEM3-RA 模式模拟降水数据。

3 结论

研究对 5 种 CMIP5 模式模拟降水数据进行系统性评估,分析了 CMIP5 模式模拟降水数据在中国区的适用性。针对 CMIP5 模式模拟降水数据与中国地面监测降水数据所反映的中国降水趋势变化的时间和空间特征,在数据相关性、误差和趋势一致性 3 个角度,采用相关系数(r),偏差均值(D_{AVE}),相对绝对误差(E_{RA})和均方根误差(E_{RMS}) 4 个指标和 M-K 或 SK 趋势检验 2 种趋势检验方法相结合的系统评估方法能够有效地系统地评估 5 种 CMIP5 模式模拟数据与监测数据的一致性、吻合度以及在区域上的差异。

5 种 CMIP5 模式模拟中国区年降水高于监测数据均超过 20%,通过经验校正,在保证年降水不发生变化的情况下,使模拟降水数据与监测数据在逐月的相关性大大提高,不确定性大大降低。对 5 种模式模拟数据的综合评价显示,最适合模拟中国区降水的模式是 HadGEM2-ES 模式。对模式输出结果的系统性评估,为研究合理选择、校正和使用 CMIP5 数据集提供理论和技术参考。系统评估 CMIP5 模式对中国降水的模拟能力,改进系统评估技术,不仅有助于更好地理解模式本身的发展和局限,也为模式开发者以及模式结果的应用提供技术参考和理论依据。

参考文献:

- [1] 陈晓晨. CMIP5 全球气候模式对中国降水模拟能力的评估[D]. 北京:中国气象科学研究院,2014.
- [2] 张武龙,张井勇,范广洲. CMIP5 模式对我国西南地区干湿季降水的模拟和预估[J]. 大气科学,2015,39(3): 559-570.
- [3] Meehl G A, Covey C, McAvaney B, et al. Overview of the coupled model intercomparison project[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2005,86(1): 89-93.
- [4] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012,93(4):485-498.
- [5] Huo-Po C, Jian-Qi S U N, Xiao-Li C. Future changes

- of drought and flood events in China under a global warming scenario[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2013,6(1):8-13.
- [6] Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X, et al. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble[J]. Journal of Climate, 2013,119(2):345-357.
- [7] Zhang X, Tang Q, Zhang X, et al. Runoff sensitivity to global mean temperature change in the CMIP5 Models[J]. Geophysical Research Letters, 2014,41(15):5492-5498.
- [8] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012,93(4):485-498.
- [9] 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[J]. 气候变化研究进展,2007,3(5): 287-292.
- [10] 刘敏,江志红. 13 个 IPCC AR4 模式对中国区域近 40a 气候模拟能力的评估[J]. 南京气象学院学报,2009,32(2):256-268.
- [11] 鲁向晖,白桦,吕娅,等. 江西省历史气象分析及未来气候变化预测[J]. 水土保持研究,2015,22(4):293-297.
- [12] 许崇海,罗勇,徐影. 全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估[J]. 气候变化研究进展,2010,6(6):398-404.
- [13] Xu Y, Xu C H. Preliminary assessment of simulations of climate changes over China by CMIP5 multi-models[J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2012,5(6):489-494.
- [14] 梁丰,刘丹丹,王婉昭,等. 1961—2013 年东北地区夏季降水变化趋势分析[J]. 水土保持研究,2015,22(4):67-73.
- [15] 陈晓晨,徐影,许崇海,等. 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,2014,10(3):217-225.
- [16] 李振朝,韦志刚,吕世华,等. CMIP5 部分模式气温和降水模拟结果在北半球及青藏高原的检验[J]. 高原气象,2013,32(4):921-928.
- [17] Shen Yan. Interpolation Methods of China Daily Precipitation Data[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010(3):279-286.
- [18] 沈艳,冯明农,张洪政,等. 我国逐日降水量格点化方法[J]. 应用气象学报,2010,21(3):279-286.
- [19] Zhao Y, Zhu J, Xu Y. Establishment and assessment of the grid precipitation datasets in China for recent 50 years[J]. J. Meteorol. Sci., 2014,34:414-420.
- [20] 赵煜飞,朱江,许艳. 近 50a 中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. 气象科学,2014,34(4):414-420.
- [21] Piani C, Weedon G P, Best M, et al. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models[J]. Journal of Hydrology, 2010,395(S3/4):199-215.

- 测算研究[J]. 水土保持通报, 2009, 28(4): 229-234.
- [11] 封建民, 郭玲霞. 陕西省神木县土地利用格局和生态服务价值变化[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 293-298.
- [12] 孙慧兰, 陈亚宁, 李卫红, 等. 新疆伊犁河流域草地类型特征及其生态服务价值研究[J]. 中国沙漠, 2008, 22(9): 14-17.
- [13] 李琳, 林慧龙, 高雅. 三江源草原生态系统生态服务价值的能值评价[J]. 草业学报, 2016, 25(6): 34-41.
- [14] 任朝霞, 陆玉麒. 条件价值法在西安市耕地资源非市场价值评估的应用[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(3): 28-32.
- [15] 徐大伟, 荣金芳, 李亚伟, 等. 生态补偿标准测算与居民偿付意愿差异性分析: 以怒江流域上游地区为例[J]. 系统工程, 2015, 33(5): 81-88.
- [16] 唐建, 沈田华, 彭珏. 基于双边界二分式 CVM 法的耕地生态价值评价: 以重庆市为例[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 207-215.
- [17] 何勇. 基于 CVM 的岷江上游森林生态系统服务价值评估[J]. 现代农业科技, 2012, 19(3): 143-145.
- [18] 任志远, 刘焱序. 西北地区植被净初级生产力估算模型对比与其生态价值评价[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(4): 494-502.
- [19] 韩维栋, 黄剑坚, 李锡冲. 雷州半岛红树林湿地的生态价值评估[J]. 泉州师范学院学报, 2012, 30(4): 62-66.
- [20] 刘琦, 明博. GIS 支持下生态系统土壤保持生态价值评估: 以太原市城区及近郊区为例[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 456-460.
- [21] 杨悦, 李建龙, 李辉, 等. 宜兴市生态资源价值的定量评估与分析[J]. 宁夏大学学报, 2015, 36(3): 1-7.
- [22] 齐述华, 蒋梅鑫, 于秀波. 基于遥感和 ULSE 模型评价 1995—2015 年江西土壤侵蚀[J]. 中国环境科学, 2011, 31(7): 1197-1203.
- [23] 何玲, 贾启建, 李超, 等. 基于生态系统服务价值和生态安全格局的土地利用格局模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 275-284.
- [24] 钞振华, 张培栋, 王旭峰. 近 10 年来山东区域 NPP 时空变化分析[J]. 草业科学, 2013, 30(6): 829-835.
- [25] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [26] 文华英, 黄义雄, 张巧森, 等. 海坛岛沿海防护林森林生态系统间接经济价值评估[J]. 防护林科技, 2013, 134(11): 11-14.
- [27] 王举位, 张征, 安宝利. 砭砂岩区沙棘林生态服务功能价值评估[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 198-204.
- [28] 伍格致, 周妮笛. 湖南省森林碳储量及其经济价值测算研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(8): 127-132.
- [29] 刘东, 黄海清, 李艳. 浙江省森林生态服务价值估算及其逐月变异分析[J]. 地球信息科学, 2014, 16(2): 225-232.
- [30] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [31] 司今, 韩鹏, 赵春龙. 森林水源涵养价值核算方法评述与实例研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(12): 2100-2109.

~~~~~

(上接第 130 页)

- [22] Hagemann S, Chen C, Haerter J O, et al. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models[J]. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(4): 556-578.
- [23] Shepard D. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data[C]// ACM National Conference. ACM, 1968: 517-524.
- [24] Watson D F. A refinement of inverse distance weighted interpolation[J]. Geo-Processing, 1985, 2: 315-327.
- [25] 曾红伟, 李丽娟, 张永萱, 等. 大样本降水空间插值研究: 以 2009 年中国年降水为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(7): 811-818.
- [26] 李正泉, 吴尧祥. 顾及方向遮蔽性的反距离权重插值法[J]. 测绘学报, 2015, 44(1): 91-98.
- [27] Xu Z X, Takeuchi K, Ishidaira H. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation[J]. Journal of Hydrology, 2003, 279(1/4): 144-150.
- [28] Yu Y S, Zou S, Whittemore D. Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas[J]. Journal of Hydrology, 1993, 150(1): 61-80.
- [29] Kahya E, Kalayci S. Trend analysis of streamflow in Turkey[J]. Journal of Hydrology, 2004, 289(1/4): 128-144.
- [30] 符淙斌, 马柱国. 全球变化与区域干旱化[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 752-760.