

韩乐琼,韩哲,李双林.2014.不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估[J].大气科学学报,37(5):529-540.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130512001.

Han Le-qiong, Han Zhe, Li Shuang-lin. 2014. Projection of heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze River valley in the 21st century under different representative concentration pathways[J]. Trans Atmos Sci, 37(5): 529-540. (in Chinese)

不同代表性浓度路径(RCPs)下 21 世纪长江中下游强降水预估

韩乐琼^{1,2,3}, 韩哲^{2,3}, 李双林^{2,3}

(1.成都信息工程学院 大气科学学院,四川 成都 610225;2.中国科学院 气候变化研究中心,北京 100029;

3.中国科学院 大气物理研究所 竺可桢—南森国际研究中心,北京 100029)

摘要:利用政府间气候变化专门委员会第 5 次评估报告(IPCC AR5)耦合模式相互比较计划第 5 阶段(CMIP5)中所包含的 8 个模式资料,对长江中下游强降水的气候特征在 21 世纪的变化进行预估,并与此前基于第 3 阶段(CMIP3)的 7 个模式的预估结果进行了对比。所用资料既包括模式对 20 世纪的历史模拟,也包括它们在未来高、中、低三种排放情景(即 RCP8.5、RCP4.5、RCP2.6 三种代表性浓度路径)下的预估试验资料。结果表明:1)不同模式的预估结果有较好的一致性。相对于 20 世纪最后 20 a (1980—1999 年),21 世纪不仅强降水事件频次、强降水事件的平均强度增加,且年际变率也有所增强。就增加幅度而言,西部强度较小,东部强度较大。2)就不同排放情景相互比较而言,在低排放情景和高排放情景(RCP2.6 和 RCP8.5)下,降水强度和频次的增长均比在中等排放情景(RCP4.5)下大。3)与之前 CMIP3 的结果相比,尽管二者均预估未来降水强度和频次增长,但二者增加幅度的空间分布并不一致。在 CMIP5 中,表现为自西向东幅度递增的特点,而在 CMIP3 中则中部地区增幅最大。

关键词:CMIP5 试验;RCPs;长江中下游;强降水;预估

文章编号:1674-7097(2014)05-0529-12 中图分类号:P435 文献标志码:A

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130512001

Projection of heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze River valley in the 21st century under different representative concentration pathways

HAN Le-qiong^{1,2,3}, HAN Zhe^{2,3}, LI Shuang-lin^{2,3}

(1.College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;

2.Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3.Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: This paper evaluates the future projection of heavy rainfall events in the middle and lower reaches of the Yangtze River valley based on outputs of eight coupled models attending the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 (CMIP5) from IPCC AR5. The experiments under different representative concentration pathways (RCPs) are compared with each other, and with the previous CMIP3 experiments as well. The outputs from the historical simulation of CMIP5 are also utilized as a base to derive future trends. The results suggest an agreement among all the CMIP5 models, in that both the strength and the occurrence frequency of heavy rainfall events are projected to increase in the 21st century relative to the last twenty years of the 20th century (1980—1999). In contrast, the strength increase

收稿日期:2013-05-12;改回日期:2014-03-19

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006022);中国科学院战略性先导专项(XDA05090406)

通信作者:韩哲,博士,研究方向为气候变化, hanzhe@mail.iap.ac.cn.

in the east of the region is even greater than that in the west. Besides, the interannual variability of heavy rainfall events is also projected to enhance in the future. As for different RCPs, the projected increases in the strength and occurrence frequency of heavy rainfall events in RCP2.6 and RCP8.5 are greater than those in RCP4.5. In comparison to CMIP3, the projected increases in the strength and occurrence frequency are even larger, albeit a significant difference in the spatial distribution in the latter projection. The projected maximum increase in the rainfall amplitude in CMIP3 is located in the central region, while it is in the east of the region in CMIP5.

Key words: CMIP5 test; RCPs; middle and lower reaches of Yangtze River valley; heavy rainfall; projection

0 引言

长江中下游地区地形平坦,人口密集,经济和文化发达。受东亚季风的影响,该地区是我国强降水最为频发的地区之一(陶诗言,1980)。由于强降水事件常会引起洪涝灾害,认识其发生频次、强度等未来演变趋势(余锦华等,2012),对减少人民生命财产损失,减小社会可持续发展的潜在风险,制订国家中长期发展规划,有效应对气候变化等具有重要意义。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)所设气候系统模式相互比较计划,从其第3阶段(CMIP3)开始,就对工业革命以来温室气体历史演变及未来温室气体不同排放情景,开展了多个模式的历史模拟和未来百年的预估试验。这些数据为认识长江中下游强降水事件的统计特征,预估其未来变化趋势提供了可能(张文君和谭桂容,2012)。CMIP3采用的一组排放情景(SRES)是IPCC于2000年在《排放情景特别报告》中所推荐的,包括了高经济发展情景(A1)、区域资源情景(A2)、全球可持续发展情景(B1)和区域可持续发展情景(B2)等。李双林等(2012)利用这些数据,对不同排放情景下,未来长江中下游强降水事件气候特征的变化进行了预估,得到降水强度和频次在A2、A1B和B2情景下均有增加,而A2增幅最大,B2增幅相对较小等结果。

其他学者也利用该组数据,就不同地区或不同气候变量做过不少研究(例如:Min et al., 2004; 陈活泼等, 2012; 富元海, 2012)。姜大膀等(2004, 2009)研究了A2情景下未来气温的变化趋势,并分析了增幅的空间分布,显示东北和青藏高原中部地区冬季气温增幅较大。陈活泼等(2012)就三个不同的情景,分析了多个模式预估的我国夏季降水的气候演变,发现模式结果之间有较好的一致性,表现为我国东部和青藏高原地区降水均增加,而新疆地区则减少的态势。就不同排放情景相比较而言,未

来百年我国降水变化趋势特征基本一致,东部地区的增加在A2情景下最大,而在B1情景下最小。

虽然之前的SRES情景下对未来气候的预估结果较为一致,但SRES情景没有考虑到各国应对气候变化的政策对未来排放的影响。为强化排放情景对政府应对气候变化的参考作用,并在更大范围内研究潜在气候变化,IPCC第五次评估报告(IPCC AR5)提出了以稳定浓度为特征的新情景,并开展了4个不同代表性浓度路径(RCPs)下的耦合模式相互比较计划第5阶段(CMIP5)(Moss et al., 2009)。新的代表性浓度路径为模式预估未来的气候变化提供了更加丰富的数据集。到目前为止,已有不少研究利用该数据分析了东亚季风及降水气候特征的未来演变(Bao, 2012; Peacock, 2012; Xu and Xu, 2012; Jiang and Tian, 2013)。其中大多数研究显示,在21世纪中后期,相对于20世纪东亚夏季降水是增加的,而且北部降水比南部增加要多。就不同浓度路径比较而言,高排放浓度路径(RCP8.5)比低、中排放浓度路径(RCP2.6、RCP4.5)下预估的增加更大。但这种增加并不是随时间稳定不变的。在21世纪前期,尽管三种浓度路径均预估略微增加,但低浓度路径(RCP2.6)下预估结果比中、高浓度路径下(RCP4.5、RCP8.5)增加更大。这与之前基于CMIP3的结果(李双林等, 2012)不同。在CMIP3不同的SRES情景下,高、中排放情景(A2、A1B)比低排放情景(B1)下的预估结果大(李双林等, 2012)。

考虑到CMIP5模式相比之前有较大改进,分辨率有所提高,包含了更多的物理过程(Moss et al., 2009),加上它们预估的降水变化在许多地区与CMIP3不同,因此有必要利用这些最新的模拟结果,就不同浓度路径(RCPs),分析它们对长江中下游强降水未来预估情况。通过新的结果与以前CMIP3结果的对比,有助于大家更清楚认识预估结果的可靠性,增强对未来气候变化预估结果的信心。

1 资料与方法

1.1 观测资料

观测资料包括:1)中国国家气象信息中心提供的 752 站逐日降水量观测数据集,时段为 1980 年 1 月—1999 年 12 月。2)1980 年 1 月—1999 年 12 月美国环境预报中心提供的 CMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation)逐月降水量格点资料(Xie and Arki,1997)。

1.2 CMIP5 和 CMIP3 耦合模式资料

CMIP5 耦合模式资料包括:1)8 个模式模拟的 20 世纪日降水资料。2)8 个模式预估的 21 世纪逐日降水资料,即它们对 2026—2045 年在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8 三种浓度路径下逐日的降水预估。需要指出的是,尽管实际参与不同 RCP 情景预估的模式有 16 个以上,但只有其中 8 个的逐日降水资料可获取,故本文分析基于这 8 个模式。

CMIP3 耦合模式资料包括:1)7 个耦合模式模拟 20 世纪的逐日降水资料,即“20c3m”模拟。由于其中部分模式积分结束于 1999 年,所以文中气候态选取 1980—1999 年时段平均。2)7 个耦合模式在 A1B、A2、B1 三种情景下 21 世纪(2046—2065 年)的逐日降水资料。有关模式的选择见李双林等(2012)。

因为 CMIP5 和 CMIP3 两组资料所用模式不同,故对它们之间的比较基于它们各自的多模式集合平均(MME)来进行。另外,由于各模式集成员数目不同,本文仅选取其中第一组试验结果。表 1 列出了所用的 CMIP3 和 CMIP5 模式的主要信息,详见 <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>。

RCPs 是指对辐射活性气体和颗粒物排放量、浓度随时间变化的一致性预测。作为一个集合,它涵盖广泛的人为气候强迫。目前,CMIP5 已在文献中识别了 4 类 RCPs(RCP8.5、RCP6、RCP4.5 和 RCP2.6)(Van Vuren et al.,2006;Riahi et al.,2007;Meinshausen et al.,2011;Zhang,2012)。RCP8.5 为 CO₂ 排放参考范围 90 百分位的高端路径,RCP6 和 RCP4.5 为中间稳定路径,RCP2.6 是最低端的浓度路径。在中间路径中,RCP4.5 比 RCP6 优先,本文仅选取 RCP4.5 作为中间浓度路径。RCP2.6 与实现 2100 年相对工业革命之前全球平均升温低于 2℃ 的目标一致。RCP8.5、RCP6 和 RCP4.5 大致可以与 IPCC AR4 SRES 情景 A2、A1B 和 B1 相对应。

表 1 所使用的 8 个 CMIP5 海气耦合模式和 7 个 CMIP3 海气耦合模式简介

Table 1 A brief introduction to the eight CMIP5 models and the seven CMIP3 coupled models, which have their outputs analyzed in the paper

编号	模式	研发机构 或国家	大气模式分辨率
1	BCC-CSM1.1	中国	T42,L26
2	BNU-ESM	中国	T42,64×128
3	CSIRO-MK3.6.0	澳大利亚	192×96,L18
IPCC AR5	4 MRI-CGCM3	日本	320×160,L48
5	MIROC-ESM	日本	T42,L80
6	FGOALS-g2	中国	128×60,L26
7	IPSL-CM5A-LR	法国	96×95,L39
8	NorESM1-M	挪威	144×96,L26
1	GFDL-CM2.0	美国	2.0°×2.5°,L24
2	GFDL-CM2.1	美国	2.0°×2.5°,L24
3	MRI-CGCM2.3.2	日本	0.5°~2.0°×2.5°,L23
IPCC AR4	4 MIROC3.2(medres)	日本	0.5°~1.4°×1.4°,L23
5	ECHAM5/MPI-OM	德国	T63(~1.9°×1.9°),L31
6	CGCM3.1(T47)	加拿大	1.9°×1.9°L29
7	CNRM-CM3	法国	T63(~1.9°×1.9°)L45

考虑到已有大量研究对 CMIP5 的模式进行了评估,以及能获取不同 RCPs 下逐日降水资料的模式较少,这里不再筛选模式,直接评估 8 个模式的集合结果。同李双林等(2012),长江中下游范围选定为 105~122°E、27~32°N,强降水在观测资料中定义为日降水量超过 50 mm(即暴雨),在模拟资料中定义为日降水量超过 25 mm 的降水事件。

2 CMIP5 模式对气候态的模拟

通过评估模式对 20 世纪历史降水的模拟能力,可以为了解模式性能提供一些基本认识,因此首先对模拟的降水气候态进行评估。图 1 比较了不同模式模拟的 20 世纪气候态及其与观测差异。可见,8 个模式基本再现从东南沿海向北部内陆减少的降水空间分布格局。尽管如此,模拟的大值中心位置和强度与观测结果还存在一些差异,大部分模式模拟的降水值偏少,在海洋上和中国南部尤其明显。这点在它们与观测结果的差值场上很清楚(图 1)。说明 CMIP5 模式与 CMIP3 的模式存在类似的模式偏差。

上述分析无法明确相对于 CMIP3、CMIP5 模式

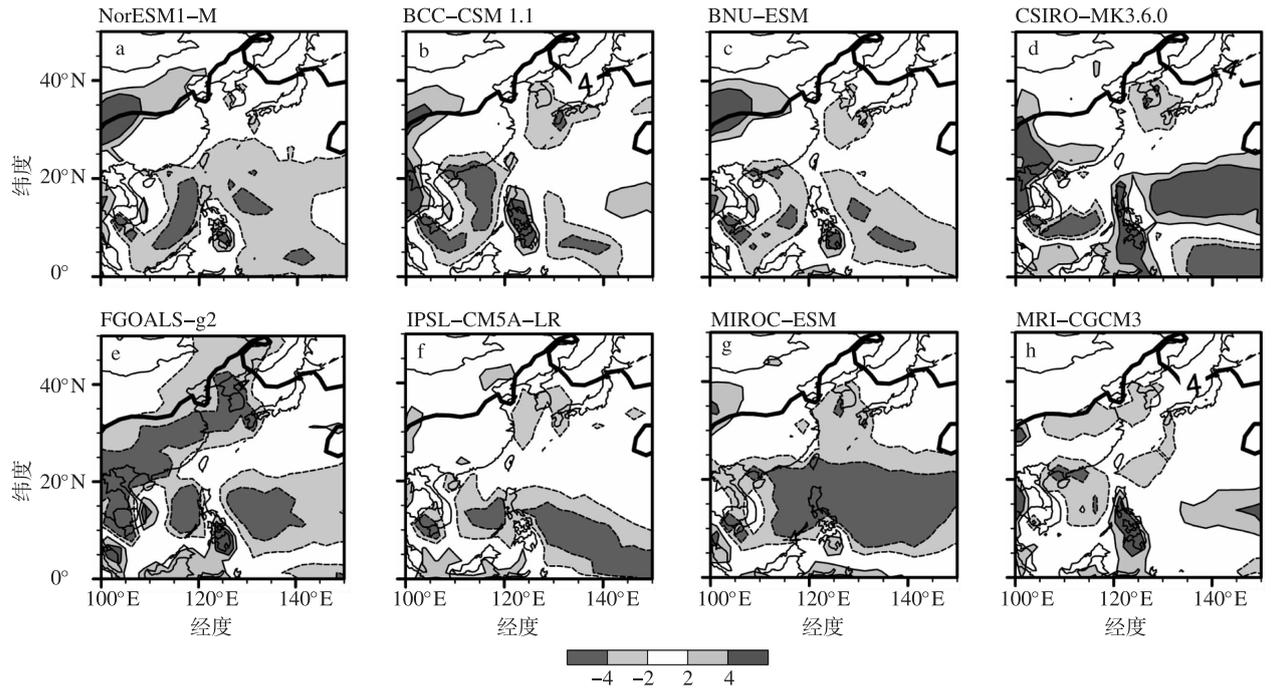


图 1 8 个 CMIP5 模式模拟的夏季平均降水与观测 (CMAP) 降水的差值 (单位: mm/d; (a) — (h) 为不同模式结果; 为便于与气候态比较, 图中另外用粗实线显示了 CMAP 气候平均态降水 4 mm/d 等值线的位置; 阴影代表几个不同差值大小 (-4, -2, 2, 4) 包含的区域)

Fig.1 Distribution of difference of climatological summer mean rainfall in the eight CMIP5 models relative to the observed (CMAP) (units: mm/d; (a) — (h) corresponds to the eight CMIP5 models. The contour of 4 mm/d of the observed climatological mean rainfall is displayed additionally. Shading represents the region contained by the contours -4, -2, 2 and 4)

的模拟结果是否有所提高。为此, 图 2 利用 Taylor 图 (Taylor, 2001), 给出了一些更定量的比较。可以看出, 在东亚区域模式降水与观测结果的空间相关系数为 0.5 ~ 0.8, 相对较好的模式有 MRI-CGCM3 和 IPSL-CM5A-LR, 而 FGOAL-g2 和 MIROC-ESM 较差。研究表明, CMIP3 模式降水与观测结果的空间相关系数大多为 0.3 ~ 0.6 (李双林等, 2012; 图 1)。说明相比 CMIP3, CMIP5 模式对东亚降水的模拟确实有明显的改善。就空间标准差而言, FGOAL-g2 和 NorESM1-M 模拟的空间标准差与观测结果很接近。MIROC-ESM 和 IPSL-CM5A-LR 的模拟值过低, 而 CSIRO-MK3.6.0 模拟的空间变率偏大。从均方根误差来看, MRI-CGCM3 和 IPSL-CM5A-LR 模拟相对较好, 而 FGOAL-g2 模拟较差, 这与降水差值场结果较为一致。此外, 相比于 CMIP3, CMIP5 的各模式的均方根误差也更小。表明 CMIP5 模式模拟的降水更接近观测结果。

下面评估 CMIP5 模式模拟的强降水事件的气候特征。这里强降水频次是就研究区域所有站点 (模式则为格点) 平均而言的, 而强降水事件的强度

则是这样确定的: 1) 将每天各站点 (模式为格点) 降水大于等于 50 mm (模式为大于等于 25 mm) 的值记录下来; 2) 把单个站点 (格点) 整个夏季的强降水量相加, 为其当年的强降水事件的降水总量, 再用强降水总量除以该站点 (格点) 的强降水频次, 记为站点 (格点) 当年的强降水强度; 3) 对区域各个站点的强降水强度做平均, 得到区域平均的强降水强度。由于个别模式中某些格点整个夏季日降水都没有达到 25 mm, 这种区域平均将不能反映局地性强的强降水事件的气候特征。

表 2 给出了观测和各模式模拟的强降水强度、频次的多年平均的比较。考虑到多模式集合平均 (MME) 比单个模式的结果更为可靠 (Lee and Wang, 2014), 在表 2 的最后一列分别给出了 CMIP5 和 CMIP3 多模式的平均值 (MME_CMIP5 和 MME_CMIP3)。可以看到, MME_CMIP5 的强降水频次平均为 2.94, 与观测值 2.63 非常接近, 而 MME_CMIP3 则为 1.76, 与观测值相比明显偏低。就强降水事件的平均降水强度而言, 也是 MME_CMIP5 高于 MME_CMIP3。这再次表明, 相比 CMIP3, CMIP5 各模式对中国降水的模拟已有一定改善。此外, 由

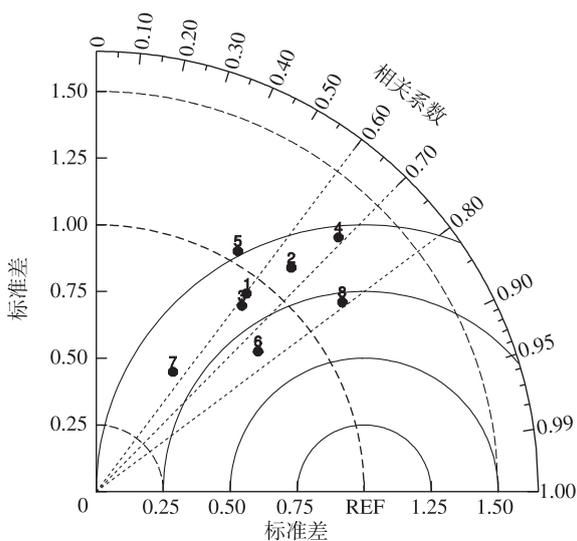


图 2 模式模拟的东亚夏季平均降水和观测 (CMAP) 降水的 Taylor 图 (“REF” 为参考点; 字符 “1”、“2”、…、“8” 分别代表模式 NorESM1-M、BCC-CSM1.1、BNU-ESM、CSIRO-MK3.6.0、FGOALS-g2、IPSL-CM5A-LR、MIROC-ESM、MRI-CGCM3)

Fig.2 Taylor diagram for the East Asian summer seasonal mean rainfall in the eight CMIP5 models and in the CMAP observations (“REF” is the reference dot, and the digitals “1”, “2”, ..., and “8” represent the models, NorESM1-M, BCC-CSM1.1, BNU-ESM, CSIRO-MK3.6.0, FGOALS-g2, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, and MRI-CGCM3, respectively)

表 2 还可见, CMIP5 多数模式模拟的强降水频次与观测结果相近(1~4 次), 但强降水事件的平均强度偏小。模拟频次较差的模式是 IPSL-CM5A-LR 和 FGOAL-g2。尽管 BNU-ESM 模式模拟的强降水频次较多, 但若按照观测强降水事件的定义标准(50 mm/d)重新计算时, 强降水频次均值降为 0.35, 还是明显低于观测值。

3 未来长江中下游强降水的预估

3.1 强降水频次的变化

考虑到不同模式空间分辨率不同, 本文对模式

表 2 8 个 CMIP5 模式模拟的强降水频次和强度的气候态与观测结果的比较 (作为参考, 最后一栏的括号中给出了 7 个 CMIP3 模式的多模式集合平均结果)

Table 2 A comparison of the climatological mean occurrence frequency and strength of heavy rainfall events in the eight CMIP5 models with those in the observed (As a comparison, the multiple model ensemble of seven CMIP3 models is displayed additionally in the parentheses of the last column)

	CMAP	IPSL-CM5A-LR	NorESM1-M	BCC-CSM1.1	BNU-ESM	CSIRO-MK3.6.0	MRI-CGCM3	MIROC-ESM	FGOALS-g2	MME/(CMIP3)
频次	2.63	0.79	2.46	4.67	5.16	4.22	3.32	2.54	0.39	2.94/(1.76)
强度	70.2	14.84	27.86	38.22	31.57	32.71	38.8	29.37	8.9	27.78/(21.52)

输出的日降水进行了空间插值。由于研究区域所包含的站点(格点)数量较少, 下面主要分析区域平均情况。图 3 给出了单个模式及多模式集合平均(MME)对未来 20 a 的强降水频次的预估。为了与过去进行对比, 图 3 还给出了“20c3m”对 1980—1999 年的模拟及 CMIP3 在三种排放情景下对未来的预估结果。

可以看到, 在 RCP2.6 下, 大部分模式预估的频次都高于 RCP4.5 和 RCP8.5, 而且更强降水事件的频次也是在 RCP2.6 下出现得多。例如, NorESM1-M 预估 RCP2.6 下的最大强降水次数达到 8.2, 远远高于“20c3m”及另外两个较大浓度路径下的预估。与 20 世纪的模拟相比, 大部分模式在该浓度路径下模拟的频次值分布相对离散, 变化幅度较大, 表现出年际变率增大的趋势。在 RCP8.5 下, 强降水频次虽然高于 RCP4.5, 但还是略低于 RCP2.6。又如 BNU-ESM 模式, 它预估在 RCP8.5 下, 2044 年前后的出现频次高达 11。而在 RCP4.5 下, 相对于前两种情景, 大部分模式预估较小的频次, 且频次分布的年际变率小。这与 Xu and Xu(2012)关于三种浓度路径下各模式预估降水结果有一致性。Xu and Xu(2012)预估在 20 世纪前期, 在 RCP2.6 浓度路径下的降水增加高于 RCP4.5 和 RCP8.5, 甚至有些模式在两个较高浓度路径下的降水反而出现下降趋势。这种降水的减小可能与强降水事件频数的减少有关。此外, FGOALS-g2 对 20 世纪的模拟和 21 世纪的预估均较小, 与之前的分析也是一致的。

从多模式集合来看, 同样的特征更为清楚(图 3i)。CMIP5 模式的预估结果在 RCP4.5 下年际变率较小, 在 RCP2.6 和 RCP8.5 下则较大。这三种排放情景模拟的年际变率相对于 20 世纪模拟结果, 均呈现增长趋势。另外, 相对于 CMIP3, CMIP5 预估的强降水频次明显偏高。

上述关于强降水频次的年际变化结果在表 3 中反映得更为清楚。首先, 未来 20 a, 在 RCP2.6 和 RCP8.5 下, 一半以上的模式预估年际变率增强, 尤

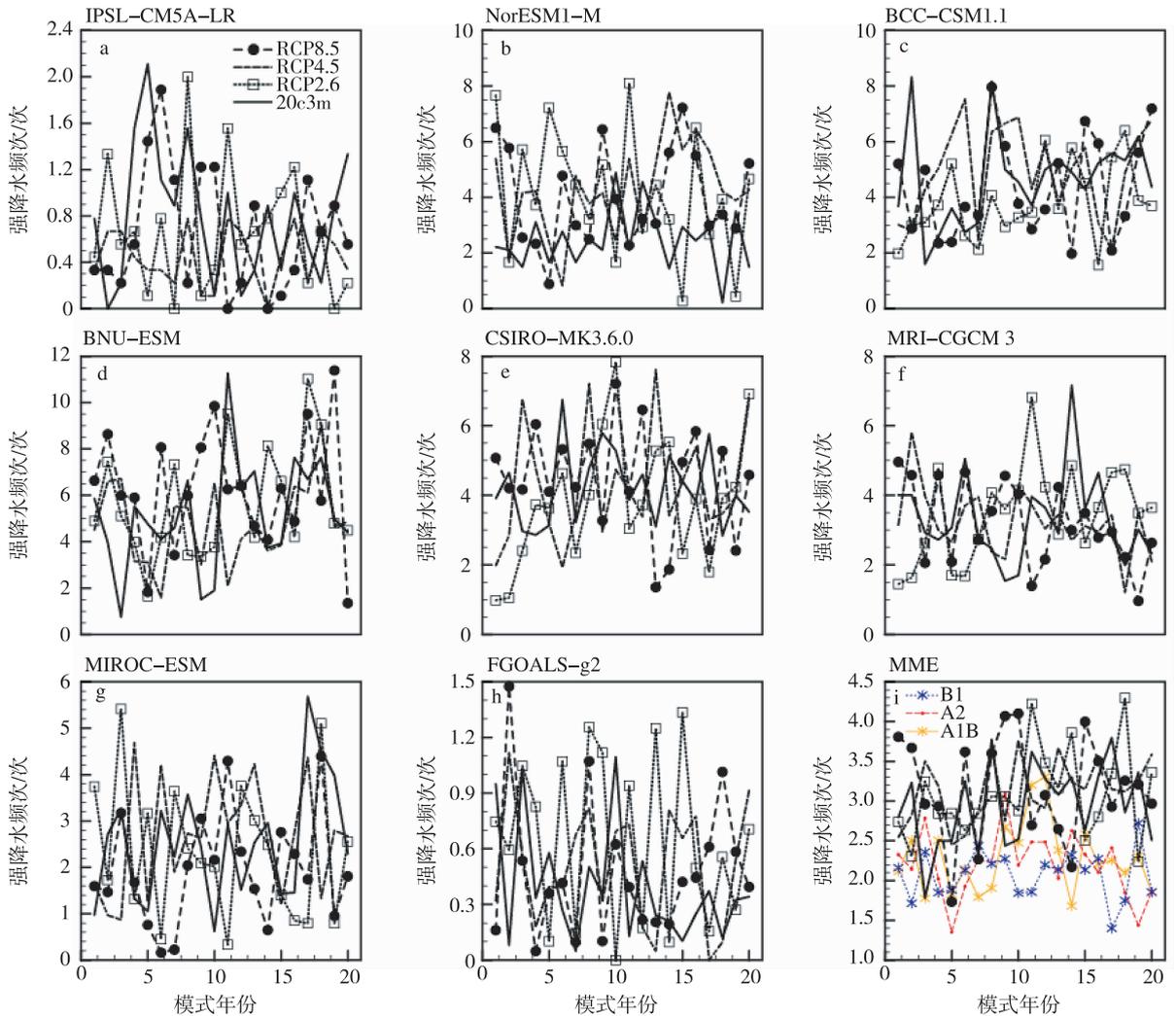


图 3 21 世纪预估试验预估的、不同 RCPs 浓度路径下未来 20 年(2026—2045 年)的强降水频次逐年演变,及与 20 世纪历史模拟试验(20c3m)后 20 a(1980—1999 年)的比较((a)—(h) 对应不同的模式,(i) 为多模式集合平均结果(MME);为了便于比较,CMIP3 不同 SRES 排放情景下的预估结果以彩色线条给出;横坐标“1—20”分别对应“1980—1999”年(历史模拟),或“2026—2045”年(未来预估))

Fig. 3 A comparison of temporal evolution of occurrence frequency of heavy rainfall events simulated in the last 20 years of the 20th century by the CMIP3 historical experiments (20c3m) with that projected for the 20 years (2026—2045) of the 21st century by the CMIP5 projection experiments((a)—(h) correspond to the eight CMIP5 models, respectively, and (i) is the multiple model ensemble(MME). For comparison, the MME projection by the seven CMIP3 models under the three SRES emissions is additionally displayed in color curves in (i). The digitals “1—20” in the horizontal axis in all the panels correspond to year 1980—1999 for historical simulations and year 2024—2045 for the future projection)

其是 NorESM1-M、CSIRO-MK3.6.0 两个模式。MME 显示,在这两种排放情景下,年际标准差相比 20 世纪增加约 20%。但在 RCP4.5 浓度路径下,只有 NORESM1-M、CSIRO-MK3.6.0 和 FGOAL-g2 等模式预估的年际变率增强,其他模式则预估减少。所以,MME 显示频次的年际变率减小。CMIP3 预估的年际变率小,可能与这些模式模拟的降水偏小有关。

图 4a—c 是 CMIP5 各模式预估的强降水频次

均值和标准差与 20 世纪模拟的均值和标准差的比值的散点图,图中分别给出了三种浓度路径下的结果。可以看到,在三种浓度路径下,大部分模式二种比值均大于 1,再次表明预估的频次和年际变率具有增加趋势。从频次标准差的比值(纵坐标)看,在 RCP2.6 和 RCP8.5 浓度路径下,频次年际变率增加趋势相对明显,其中以 NorESM1-M、BNU-ESM、CSIRO-MK3.6.0 和 FGOAL-g2 模式,特别是 NorESM1-M 最为显著。NorESM1-M 预估的标准差

表 3 20 世纪历史模拟试验(20c3m)模拟的强降水频次年际标准差及其与 CMIP5 不同模式在 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 三种浓度路径的比较(表中同时给出了 8 个 CMIP5 模式多模式集合平均(MME),及 7 个 CMIP3 模式的 MME;CMIP3 模拟所用的未来排放情景包括 A1B、A2 和 B2)

Table 3 A comparison of the standard deviation of annual averaged occurrence frequency of heavy rainfall events simulated by the 20c3m models and projected by the CMIP5 models under the three emission scenario RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 (The multi-model ensemble(MME) results for both CMIP5 and CMIP3 models are also given. The emission scenario used in CMIP3 include A1B, A2, and B2)

CMIP5	20c3m	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
IPSL-CM5A-LR	0.57	0.54	0.24	0.53
NorESM1-M	1.08	2.25	1.66	1.74
BCC-CSM1.1	1.68	1.37	1.65	1.8
BNU-ESM	2.41	2.42	1.82	2.55
CSIRO-MK3.6.0	1.11	1.83	1.68	1.55
MRI-CGCM3	1.3	1.37	0.96	1.18
MIROC-ESM	1.29	1.47	1.24	1.17
FGOALS-g2	0.31	0.45	0.32	0.36
MME_CMIP5	1.22	1.46	1.2	1.36
CMIP3	20c3m	A1B	A2	B2
MME_CMIP3	0.81	1.05	1.02	1.00

增长了一倍。而在 RCP4.5 下,强降水频次年际变率增长比在 RCP2.6 下弱,与之前的分析结果一致。有趣的是,BCC-CSM1.1 和 MME_CMIP5 的标准差和均值的两个比值相近,几乎位于同一个位置,图中只能看到一个点,说明其变率的增加与均值的增加几乎一致。

这种趋势在 MME(图 4d)中也很清楚。三种浓度路径(RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5)对应的横坐标值分别为 1.13、1.07 和 1.08,意味着频次均值将分别增加约 13%、7% 和 8%。标准差比值在 RCP2.6 和 RCP8.5 下分别为 1 和 2,即不变或增加约 10%,而在 RCP4.5 下为 0.98,意味着减小的趋势,验证了表 3 的结果。对应 CMIP3 的三种排放情景下,它们预估的频次均值相对于 20 世纪均增加了。因 CMIP5 的 RCP4.5 情景大体对应于 CMIP3 的 B1 情景。因为在 B1 情景下,年际变率增长尽管相对于 A1B 和 A2 较弱,但是相对于 20 世纪仍然是增长的。这不同于 RCP4.5 下的预估结果。在

RCP4.5 下预估是减小的趋势。这种不一致可能与 CMIP5 模式改善了物理过程,从而性能得到改进有关。

3.2 强降水强度的变化

图 5a—c 给出了 CMIP5 MME 预估的三种 RCPs 平均降水与“20c3m”的差异分布。可以看见,在三种浓度路径下,西部地区强度减小,东部地区增加。但东部地区降水强度增加的幅度和区域远远大于西部地区降水强度减小的幅度和区域,这解释了预估的降水强度从区域平均看是增加的现象。这与 CMIP3 在不同排放情景下的结果相同。另外,从三个浓度路径相比来看,RCP2.6 预估的增加较多。

图 5d—f 显示了 CMIP5 MME 在三种 RCPs 下强降水事件期间平均的降水强度分布。为了比较,图中也给出了 CMIP3 MME 在三种 SRES 情景下(A1B、B1、A2)对应的预估值。可以看到:在 RCPs 下,表现出一致的自西向东强度增强,而在 SRES 情景下则在中部出现强度大值中心,最大的是高排放的 A2 情景。与频次分析有些类似的是,与其对应的 B1 比较,RCP4.5 预估的强度更强。

此外,本文还分析了各模式“20c3m”和 RCPs 下预估的降水强度的盒须图(图略)。除了 IPSL-CM5A-LR 模式外,其他模式预估的降水强度中位数均高于“20c3m”,说明未来 20 a 强降水强度是增大的。在 RCP2.6 浓度路径下,降水强度的年际变率增大。模式 NorESM1-M 和 CSIRO-MK3.6.0 预估的强度集中在 25~35 mm/d,而 IPSL-CM5A-LR 和 FGOALS-g2 预估的强度则为 5~20 mm/d。在 RCP8.5 下,除了 IPSL-CM5A-LR 和 NOREMSM1-M 外,其余模式预估的降水强度最大值都有所增加,与 RCP2.6 相比差别不大。最明显的差异在年际变率上。大部分模式年际分布比 20 世纪更加离散,出现极值的次数多,意味着年际变率更大。在 RCP4.5 下,降水强度的年际变率最小。这与表 3 显示的频次年际变率结果类似,即 RCP4.5 预估的降水频次增加最小。

为进一步明确降水强度变化,下面分析各模式降水强度标准差和均值在 21 世纪的预估结果和 20 世纪模拟结果之比(图 6)。从标准差看,与图 4 的结果相同,在 RCP4.5 下大多数模式预估的强度年际变率减小,而在 RCP8.5 和 RCP2.6 下则增加。但有三个模式(BNU-ESM、NorESM1-M 和 MRI-CGCM3)例外,它们在三个情景下,预估的年际变率均减少。在 RCP2.6 浓度路径下,CSIRO-MK3.6.0

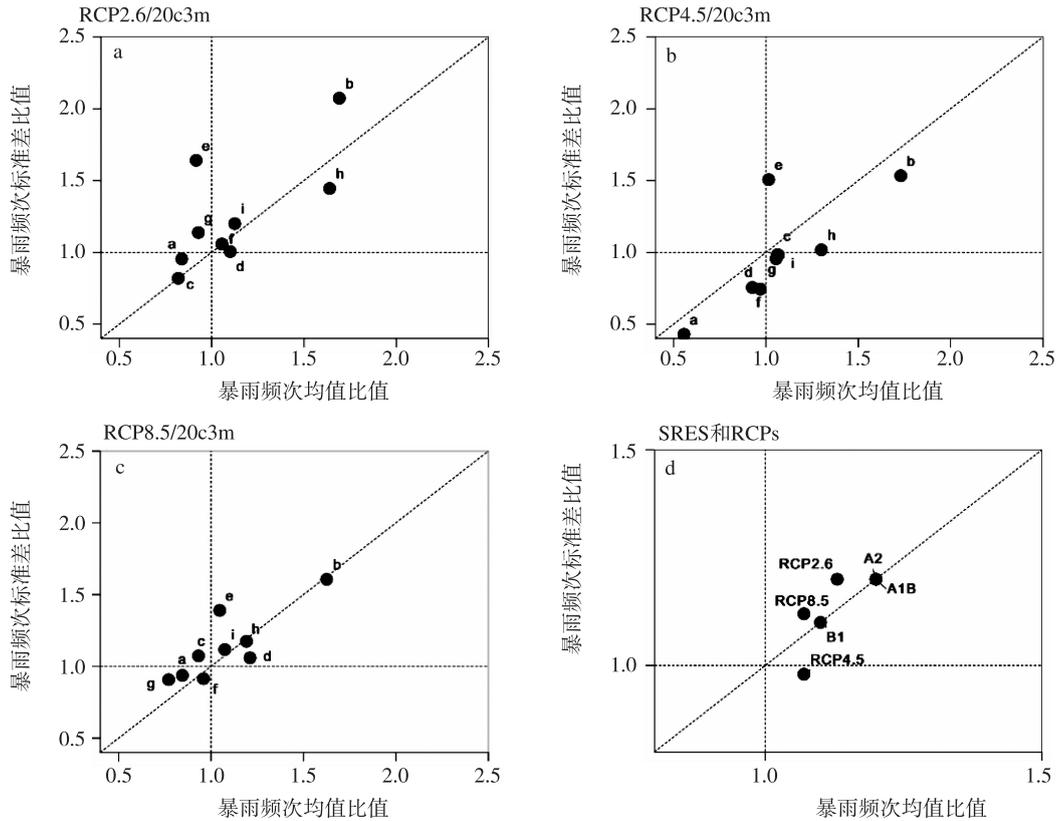


图 4 CMIP5 模式模拟的 21 世纪强降水频次(标准差)与 20 世纪强降水频次(标准差)的比值及其多模式集合平均(MME)比值的散点图(横坐标为平均值的比值,纵坐标为标准差的比值;(a)、(b)、(c)对应三种不同 RCP 情景,即 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5;其中,“a—i”各点分别对应模式 IPSL-CM5A-LR、NorESM1-M、BCC-CSM1.1、BNU-ESM、CSIRO-MK3.6.0、MRI-CGCM3、MIROC-ESM、FGOALS-g2 及 MME。(d)是集合平均后的比值;其中,“RCP2.6”、“RCP4.5”、“RCP8.5”以及“A2”、“A1B”、“B1”分别代表不同的 CMIP5 的不同浓度路径和 CMIP3 不同排放情景)

Fig.4 The scatter diagram of the ratio of occurrence frequency(standard deviation) of heavy rainfall events in the 21st century projection to that by the 20th century historical simulation (20c3m) (The horizontal axis is the ratio of occurrence frequency, and the vertical axis is the ratio of the standard deviation. (a), (b), (c) represent the three emission scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5), in which the dots marked with “a”, “b”, ..., “i” represent the models, IPSL-CM5A-LR, NorESM1-M, BCC-CSM1.1, BNU-ESM, CSIRO-MK3.6.0, MRI-CGCM3, MIROC-ESM, FGOALS-g2, and their MME, respectively. (d) depicts the ratio of their MME in both the CMIP5 and CMIP3 models. The emission scenarios used in CMIP3 include A2, A1B, and B1)

模式预估的强度年际变率增长最大,达 1.2 倍。在 RCP8.5 下,标准差之比高于 1 的模式比 RCP2.6 更多,表明了大部分模式在 RCP8.5 下预估年际变率增加比 RCP2.6 更明显。从 MME 看,除 RCP4.5 外,其余两种浓度路径下预估的年际变率都是增加的。

从均值来看,在三个浓度路径下,大部分模式预估强度均值是增加的,与图 5 的分析结果一致。但是 RCP4.5 均值增长幅度最小。MME 的降水强度均值在 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 下,分别为 1.1、1.06 和 1.07,表明增长率约为 10%、6% 和 7%。相应的年际变率比(纵坐标)分别为 1.13、0.89、

1.11,表明在 RCP2.6 和 RCP8.5 下,强度增长为 13% 和 11%,而在 RCP4.5 下,强度年际变率减小 11%。这些与 CMIP3 三种 SRES 情景既有相似之处,又有不同之处。相似之处是,降水强度都增加;不同之处是,RCP 三种情景下年际变率均增加,但在 SRES B1 情景下预估年际变率变化比 A1B、A2 的小(李双林等,2012)。

为了更清晰地认识各模式预估的 21 世纪降水强度的变化,图 7 给出了各模式及 MME 的强度概率分布。为了比较,同时给出了 CMIP3 的 MME 结果。可以看到,除了 IPSL-CM5A-LR 和 MIROC-ESM 模式外,其他 6 个模式及 MME 相对于 20 世纪

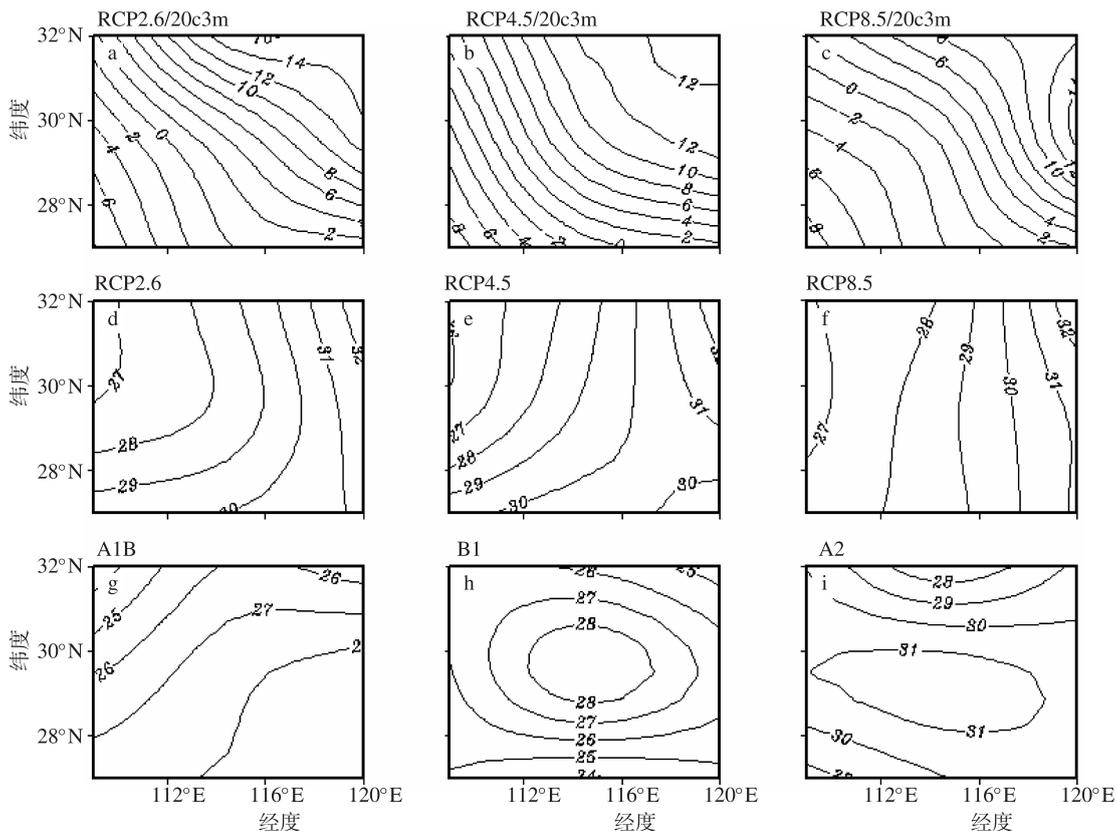


图 5 多模式集合平均后预估的 21 世纪 20 a(2026—2045 年)强降水事件的多年平均降水强度,及其与历史模拟的 20 世纪 20 a(1980—1999 年)平均强度的差值((a)、(b)、(c)分别为 CMIP5 的 3 个 RCPs 情景下与 20c3m 历史模拟的差值;(d)、(e)、(f)分别为 CMIP5 模式在 3 个 RCPs 下预估的强降水事件平均降水强度;(g)、(h)、(i)同(d)、(e)、(f),但分别为 CMIP3 模式在 A1B、B1 及 A2 排放情景下的结果)

Fig.5 The spatial distribution of the MME averaged rainfall strength of heavy rainfall events in the 21st century projection (2026—2045) and its difference relative to the 20th century simulation (1980—1999) ((a)—(c) represent the difference of the 21st century projections(2026—2045) minus the 20th century simulations (1980—1999); (d)—(f) is the averaged strength of the 21st century projection under the three RCP scenarios; (g)—(i) as (d)—(f), but for the CMIP3 under the three scenarios A1B, B1, and A2)

都呈现较为明显的右偏,即未来易于出现更强强度的强降水事件。NorESM1-M、BNU-ESM 和 MRI-CGCM3 不仅出现右偏形式,而且高值出现频率也要高出 2% 左右。NorESM1-M 预估的强度在三种浓度路径下,集中分布范围由 20 世纪的 25~30 mm/d 偏移至 30~35 mm/d。MME(图 7i)也显示降水强度分布呈现右偏状态,在大值区域分布更多。与 CMIP3 相比,RCPs 浓度路径下的强度值集中于 28~30 mm/d,高于 A1B 和 B1 情景,但小于 A2 情景。

4 结论

本文就 CMIP5 多个模式 20 世纪的降水气候态模拟与观测结果进行了对比。在此基础上,分析了在不同排放情景(RCPs)下未来 20 a(2026—2045

年)长江中下游强降水事件气候特征的变化趋势,并与以前(李双林等,2012)基于 CMIP3 的预估结果进行了比较。得到以下结论:

1)从模式对强降水事件气候态的模拟来看,大多数 CMIP5 模式模拟的强降水事件频次与观测结果相近,年均为 1~4 次。多模式集合平均为 2.94 次,比 CMIP3 多模式集合平均的 1.76 次高,更接近于实际观测的 2.63 次。从降水强度的空间分布及大小看,CMIP5 模式也优于 CMIP3 模式。这意味着 CMIP5 模式性能已有明显的提高,其对未来的预估应更可信。

2)未来 20 年长江中下游强降水事件频次呈现上升趋势。但频次年际变率依排放情景还存在一些不确定性。高和低排放情景(RCP8.5 和 RCP2.6)下,强降水频次均表现为增大趋势,但中等排放情景

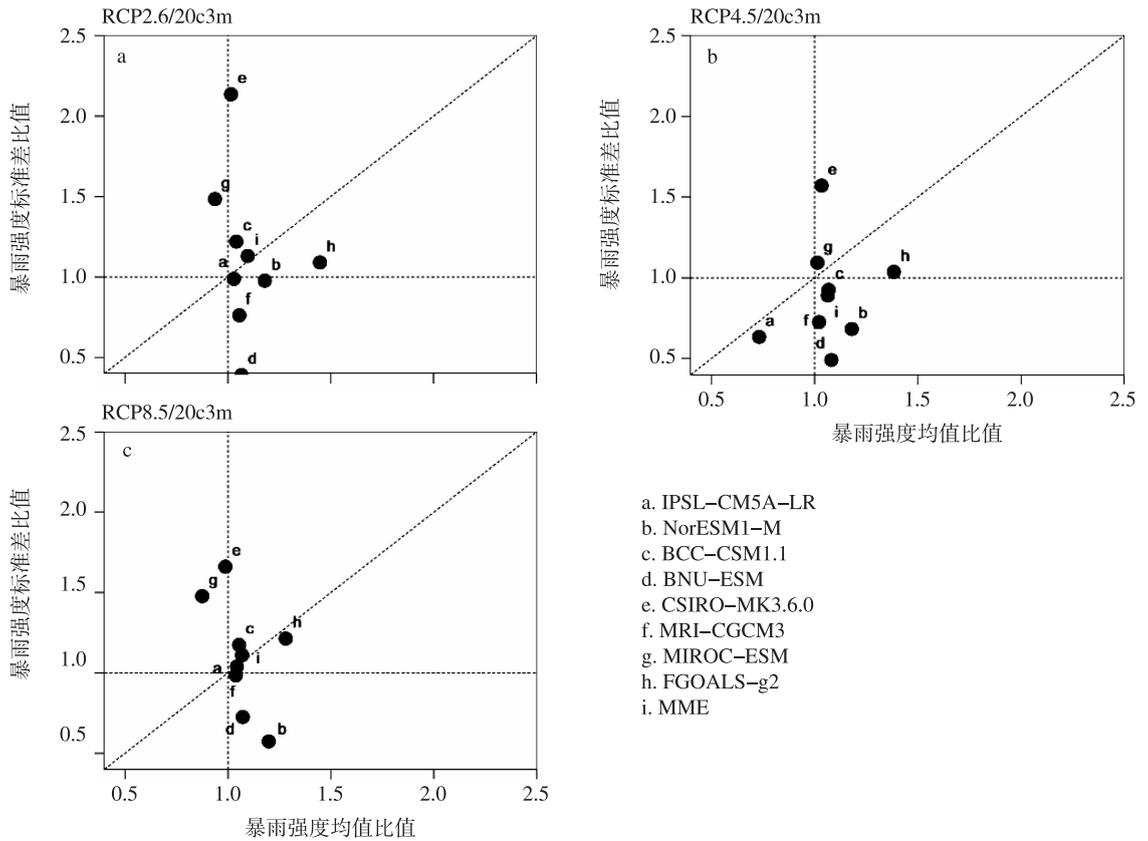


图 6 CMIP5 模式模拟的 21 世纪强降水强度 (标准差) 与 20 世纪强降水强度 (标准差) 的比值及其多模式集合平均 (MME) 比值的散点图 (横坐标为平均值的比值, 纵坐标为标准差的比值; (a)、(b)、(c) 对应三种不同 RCP 情景, 即 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5; 其中, “a—i” 各点分别对应模式 IPSL-CM5A-LR、NorESM1-M、BCC-CSM1.1、BNU-ESM、CSIRO-MK3.6.0、MRI-CGCM3、MIROC-ESM、FGOALS-g2 及 MME)

Fig.6 The scatter diagram of the ratio of rainfall strength(standard deviation) of heavy rainfall events in the 21st century projection to that by the 20th century historical simulation (20c3m)(The horizontal axis is the ratio of rainfall strength, and the vertical axis is the ratio of the standard deviation.(a), (b), (c) represent the three emission scenarios(RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5), in which the dots marked with “a”, “b”, ..., “i” represent the models, IPSL-CM5A-LR, NorESM1-M, BCC-CSM1.1, BNU-ESM, CSIRO-MK3.6.0, MRI-CGCM3, MIROC-ESM, FGOALS-g2, and their MME, respectively)

(RCP4.5)下却表现为稍减少趋势。尽管预估频次增加与 CMIP3 一致,但预估频次年际变率趋势与 CMIP3 略有区别。CMIP3 在大致对应的三种排放情景下,强降水频次的年际变率均增长。

3)在三种 RCPs 情景下,长江中下游地区强降水事件的平均降水强度变化表现出区域差异,即西部平均强度减弱,而东部平均强度增强。这与 CMIP3 的预估结果有所不同。CMIP3 预估,在大致对应的三种排放情景下,平均强度增强的大值中心都是在中部。

4)在三种 RCPs 情景下,未来强降水事件降水强度的概率分布呈现出右偏的趋势,即特别强的降水事件倾向于多发。

5)从不同排放情景的比较来看,低和高排放情景(RCP2.6 和 RCP8.5)下预估的降水强度和频次

的变化均比中等排放情景(RCP4.5)下大。这点类似于 CMIP3。CMIP3 也预估低和高排放情景(A1B 和 A2)下,降水强度和频次的增加要大于中等排放情景(B1)。Lee and Wang(2014)对一般降水预估的研究发现,21 世纪前期,在 RCP2.6 浓度路径下的降水增长大于另外两个浓度路径。这表明强降水事件中的降水强度与总降水表现出类似的趋势,在一定程度上说明本文结果可能是合理的。

无论是这里 CMIP5 的预估结果,还是以前 CMIP3 的预估结果,均体现出强降水事件强度和发生频率在未来是增加的。在全球变暖背景下,由于气温升高,空气达到饱和需要更多的水汽量,这为极端强降水事件的频繁发生提供了潜在的水汽条件。因此,从物理上看,本文的预估结果应是合理的。

需要指出的是,尽管大部分模式表现出较好的

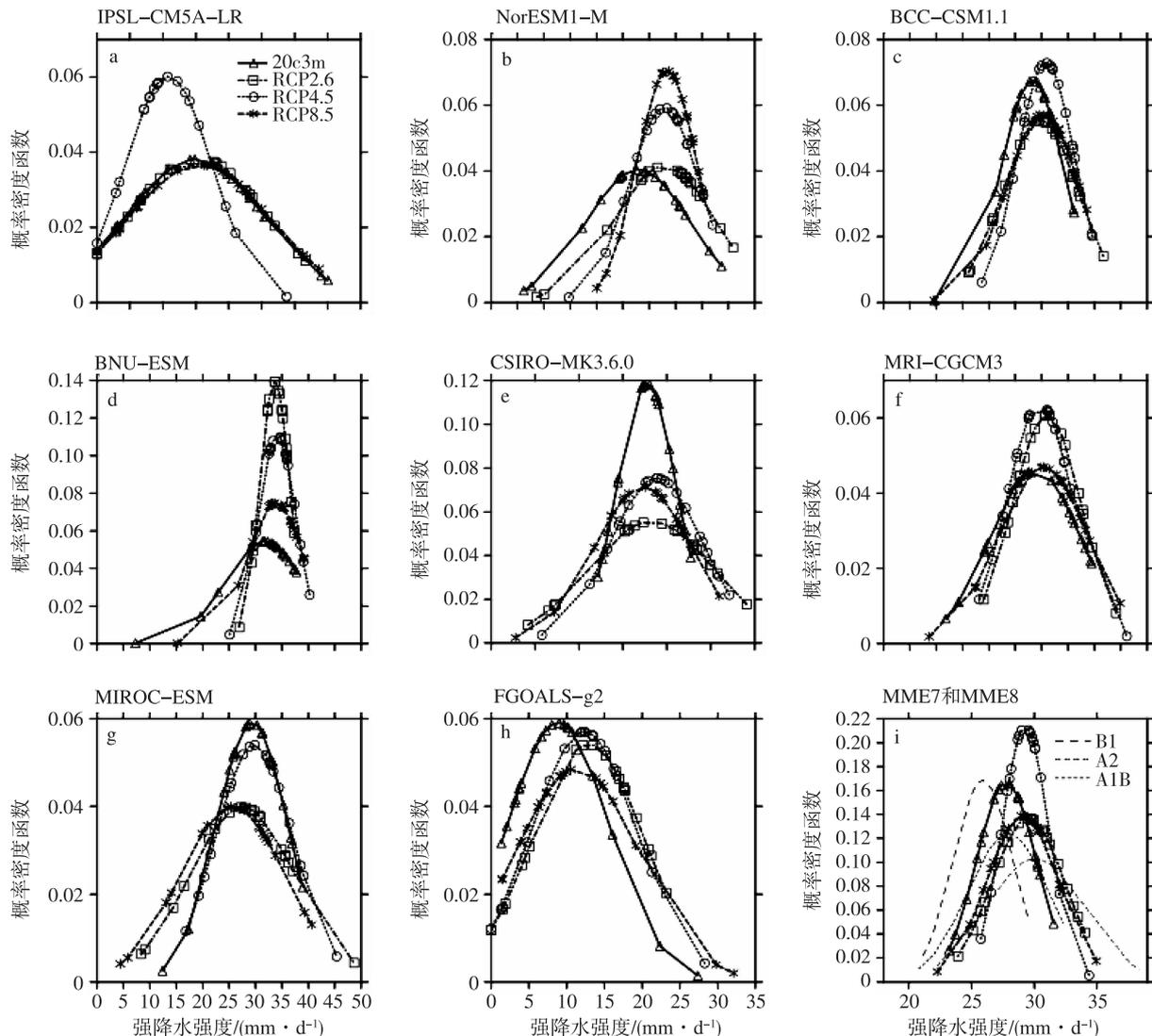


图 7 强降水事件降水强度的概率分布比较((a)—(h)为 CMIP5 模式历史模拟试验中 20 a(1980—1999 年)模拟,及 21 世纪预估试验中三种浓度路径 RCP2.6、RCP4.5、RCP8.5 下 20 a(2026—2045 年)的预估结果,(i)为 8 个 CMIP5 模式的集合平均结果(MME8)及其与 7 个 CMIP3 模式在三种排放情景(A1B、A2、B1)的比较(MME7))

Fig.7 A comparison of the probability distribution function of rainfall strength of heavy rainfall events((a)—(h) correspond to the historical simulation (20c3m) of 20 years in the 20th century(1980—1999) and the projection of 20 years in the 21st century(2026—2045) under the three RCPs.(i) is the MME of eight CMIP5 models(MME8).The MME of the seven CMIP3 models(MME7) under the three scenarios(A1B,A2,and B1) is additionally shown for comparison)

一致性,即在不同 RCPs 浓度路径下,CMIP5 预估 21 世纪强降水事件频次、强度均呈现增多、增强趋势,但并不是所有模式结果完全一致,说明还存在模式依赖性。此外,尽管 CMIP5 预估强降水频次和强度的年际变率均呈现增大趋势,与以前 CMIP3 结果(李双林等,2012)一致,但降水强度增幅却表现出西部较小、东部较大的空间差异性,这与 CMIP3 预估结果不同。其合理性及物理成因尚需进一步分析。

参考文献:

陈活泼,孙建奇,陈晓丽.2012.我国夏季降水及相关大气环流场未来变化的预估及不确定性分析[J].气候与环境研究,17(2): 171-183.

富元海,2012.CMIP3 模式预估的 21 世纪东亚夏季降水年际变率变化过程[J].中国科学:地球科学,42(12):1937-1950.

姜大膀,王会军,郎咸梅.2004.SRES A2 情景下中国气候未来变化的多模式集合预测结果[J].地球物理学报,47(5):776-784.

姜大膀,张颖,孙建奇.2009.中国地区 1~3 °C 变暖的集合预估分析[J].科学通报,54(24):3870-3877.

李双林,韩乐琼,卞洁.2012.基于 IPCC AR4 部分耦合模式结果的 21 世纪长江中下游暴雨预估[J].暴雨灾害,31(3):193-200.

- 陶诗言.1980.中国之暴雨[M].北京:科学出版社.
- 余锦华,李佳耘,丁裕国.2012.利用二维极值分布模拟我国几个代表站的强降水概率特征[J].大气科学学报,35(6):652-657.
- 张文君,谭桂容.2012.全球变暖形势下中国陆表水分的变化[J].大气科学学报,35(5):550-563.
- Bao Q.2012.Projected changes in Asian summer monsoon in RCP scenarios of CMIP5[J].Atmos Ocean Sci Lett,5(1):43-48.
- Jiang D B, Tian Z P.2013.East Asian monsoon change for the 21st century:Results of CMIP3 and CMIP5 models[J].Chin Sci Bull,58(12):1427-1435.doi:10.1007/s11434-012-5533-0.
- Lee J Y, Wang B.2014.Future change of global monsoon in the CMIP5 [J].Climate Dyn,42(1/2):101-109.doi:10.1007/s00382-012-1564-0.
- Meinshausen M, Smith S J, Calvin K, et al.2011.The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300[J].Climatic Change,109:213-241.
- Min S K, Park E H, Kwon W T.2004.Future projections of East Asian climate change from multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations[J].J Meteor Soc Japan,82:1187-1211.
- Moss R, Edmonds J, Hibbard K, et al.2009.The next generation of scenarios for climate change research and assessment[J].Nature,463:747-756.
- Peacock S.2012.Projected twenty-first-century changes in temperature, precipitation, and snow cover over North America in CCSM4[J].J Climate,25:4405-4429.
- Riahi K, Gruebler A, Nakicenovic N.2007.Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization[J].Technol Forecast Soc Chang,74(7):887-935.
- Riahi K, Rao S P, Krey V, et al.2011.RCP8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions[J].Climatic Change,109:33-57.
- Taylor K E.2001.Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram[J].J Geophys Res,106:7183-7192.
- Van Vuren D P, Eickhout B, Lucas P L, et al.2006.Long-term multi-gas scenarios to stabilise radiative forcing:Exploring costs and benefits within an integrated assessment framework [J].The Energy Journal,3:201-234.
- Xie P, Arkin P A.1997.Global Precipitation:A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs[J].Bull Amer Meteor Soc,78:2539-2558.
- Xu C H, Xu Y.2012.The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble[J].Atmos Oceanic Sci Lett,5(6):527-533.
- Zhang Y.2012.Projections of 2.0 C warming over the globe and China under RCP4.5[J].Atmos Oceanic Sci Lett,5(6):514-520.

(责任编辑:倪东鸿)