

魏培培, 董广涛, 史军, 等. 2019. 华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估 [J]. 气候与环境研究, 24 (1): 86–104. Wei Peipei, Dong Guangtao, Shi Jun, et al. 2019. Dynamical downscaling simulation and projection of extreme precipitation over East China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (1): 86–104, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17169.

华东地区极端降水动力降尺度模拟及未来预估

魏培培^{1,2} 董广涛² 史军^{1,2} 张博文^{1,2}

¹ 上海应用技术大学, 上海 201418

² 上海市气候中心, 上海 200030

摘要 利用 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)数据集中的全球模式 IPSL-CM5A-LR 及其嵌套的区域气候模式 WRF (Weather Research and Forecasting), 分别评估了模式对 1981~2000 中国华东区域极端降水指标的模拟能力, 并讨论了 RCP8.5 排放情景下 21 世纪中期 (2041~2060 年) 中国华东极端降水指标的变化特征。相比驱动场全球气候模式, WRF 模式更好地再现了各个极端指数空间分布及各子区域降水年周期变化。在模拟区域气候特点方面, WRF 模拟结果有所改进, 并在弥补全球模式对小雨日过多模拟的缺陷起到了明显的作用。21 世纪中期, 华东区域的降水将呈现明显的极端化趋势。WRF 模拟结果显示年总降雨量、年大雨日数、平均日降雨强度在华东大部分区域的增幅在 20%以上; 年极端降雨天数、连续 5 d 最大降水量的增幅在华东北部部分区域分别超过了 50% 和 35%, 同时最长续干旱日在华东区域全面增加; 且变化显著的格点主要位于增加幅度较大的区域。未来华东区域会出现强降水事件和干旱事件同时增加的情况, 降水呈现明显的极端化趋势, 且华东北部极端化强于华东南部。

关键词 中国华东 区域气候模式 动力降尺度 极端降水 气候模拟和预估

文章编号 1006-9585 (2019) 01-0086-19

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17169

Dynamical Downscaling Simulation and Projection of Extreme Precipitation over East China

WEI Peipei^{1,2}, DONG Guangtao², SHI Jun^{1,2}, and ZHANG Bowen^{1,2}

¹ Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418

² Shanghai Climate Center, Shanghai 200030

Abstract Based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model driven by the global model IPSL-CM5A-LR results that are included in the model output archive of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, this study has assessed the model ability for simulating extreme precipitation indices and analyzed possible future changes in the mid-21st century (2041–2060) under the RCP8.5 scenario over East China. Results indicate that WRF performs well in the simulation of extreme precipitation indices. Compared with IPSL-CM5A-LR model, WRF model can better reproduce the spatial distribution and annual cycle of precipitation over East China and the sub-regions. In particular, the simulation of regional features is improved in WRF and the problem in global model to overestimate light precipitation has been overcome. Prediction results show that East China will experience an obvious trend of extremeness on precipitation. WRF simulation

收稿日期 2017-12-01; **网络预出版日期** 2018-07-10

作者简介 魏培培, 女, 1991 年出生, 硕士, 主要从事极端事件观测及模拟研究。E-mail: 2215233668@qq.com

通讯作者 董广涛, E-mail: gtdong@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41571044, 上海市气象局研究型业务专项 YJ201502, 中国气象局气候变化专项 CCSF201716

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41571044), Special Fund of Research Business in Shanghai Meteorological Bureau (Grant YJ201502), Special Fund of Climate Change in China Meteorological Administration (Grant CCSF201716)

results show that indices of annual total wet-day precipitation (PRCPTOT), number of heavy precipitation days (R10mm), and simple daily intensity index (SDII) indices in most regions of East China will increase by more than 20%, the increases of extreme wet days (R95d) and max 5-d precipitation (Rx5day) indices in the northern part of East China will be more than 50% and 35%, and consecutive dry days (CDD) overall will increased in East China. Model grids with significant changes are mainly located in areas with large increases. There will be an extremalization in precipitation with increases in both strong precipitation and drought events, and the degree of extremalization is stronger in the north than in the south of East China.

Keywords East China, Regional climate model, Dynamical downscaling, Extreme precipitation, Climate simulation and projection

1 引言

相对于气候平均态, 极端气候事件的变化经常会对社会经济、生命财产和自然生态系统等造成更大的影响 (Easterling et al., 2000; 高学杰, 2007; Sun et al., 2010), 并吸引越来越多的关注。在全球气候变暖、极端热事件增多的背景下, 中纬度大部分陆地地区的极端降水强度很可能加大 (IPCC, 2013)。相关研究表明, 极端降水事件将会在强度和频率上加强 (Zhai et al., 2005; 江志红等, 2009; You et al., 2011; 陈活泼, 2013; Sun and Ao, 2013; Ma et al., 2015)。因此正确评估极端降水事件的变化特征及未来趋势, 对于提高区域灾害性天气气候的风险预警能力及制定社会经济可持续发展战略都具有十分重要的意义。

全球气候模式是进行气候模拟和未来气候变化情景预估的重要工具, 被广泛用于探索和预测气候变化。基于新一代全球气候模式 CMIP5 模拟结果, 在极端降水气候变化评估与预估方面开展了一系列工作 (陈活泼, 2013; Sillmann et al., 2013a, 2013b; 陈晓晨等, 2015; Li et al., 2016; 吴蔚等, 2016)。但由于粗糙的分辨率 (Taylor et al., 2012), 全球气候模式在区域气候模拟方面效果不太理想, 不能描述详细降水的时空变化, 而且高估了中国大部分区域的年降水和夏季降水 (Wang et al., 2012; Chen and Frauenfeld, 2014)。Huang et al. (2013) 发现 CMIP5 模式在模拟中国东部夏季降水气候态和年际变化方面存在较大的不确定性。针对此问题, 可以通过区域气候模式降尺度方法来优化。主要的降尺度方法有两种, 一是统计降尺度 (Benestad et al., 2008), 另一个是动力降尺度 (Gao et al., 2011, 2012; Bao et al., 2015)。其中动力降尺度方法使用区域气候模式, 并利用全球气候模式作为初始和横向边界条件, 已成为区域气候研究的一个重要工具。

与全球模式相比, 区域气候模式由于具有较高

分辨率和较完善的物理过程, 能够改进模式对局地要素的描述和更好地模拟出区域气候变化特征, 从而被广泛用于区域气候变化以及极端事件研究 (Gao et al., 2008, 2012; Koo and Hong, 2010; Zhang et al., 2011; Qin et al., 2014; Bao et al., 2015; 胡海洋等, 2015; Yu et al., 2015; 孔祥慧和毕训强, 2016; Qin and Xie, 2016; Guo et al., 2017)。王树舟和于恩涛 (2013) 使用区域气候模式 WRF 单向嵌套全球气候模式 MIROC 检验了 WRF 对中国气候变化的模拟性能, 结果表明 WRF 模拟能力相对 MIROC 具有一定改进。

在中国, 之前以动力降尺度用于极端降水模拟和预估的研究中, 多基于 CMIP3 的输出结果和旧的排放情景 (Zhang et al., 2006; 杨金虎等, 2008; Xu et al., 2012; Qin et al., 2013, 2014; 徐集云等, 2013; Zou and Zhou, 2013)。最新的 CMIP5 数据集公布后, 关于降水平均态的研究较多而极端降水较少 (Gao et al., 2013; 陈红, 2014; Ma et al., 2015); 同时对全国或部分区域的极端降水模拟及未来预估研究大多直接分析 CMIP5 中的各个全球气候模式结果, 使用 CMIP5 中的全球气候模式驱动区域气候模式对全国或部分区域的极端降水进行模拟和未来预估的工作还不多。本文使用 CMIP5 数据集中的 IPSL-CM5A-LR 全球气候模式驱动区域气候模式 WRF 对中国华东区域历史时期 (1981~2000 年) 进行极端降水的动力降尺度模拟, 对比站点观测资料分别评价 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式对中国华东 8 个极端降水指数的模拟能力, 以及预测 RCP8.5 新情景下 21 世纪中期 (2041~2060 年) 中国华东极端降水的变化特征。

2 模式、数据和方法

2.1 观测资料和模式数据介绍

本文选取的区域模式为 3.1.1 版本的 WRF, 为

非静力中尺度天气预报系统, 已被广泛的运用于区域气候模拟研究, 且在中国气候平均态和极端气候模拟的能力已经被测试和验证 (Yuan et al., 2012; Sato and Xue, 2013)。本文中 WRF 模式的物理过程参数化方案选项分别是 KF 积云对流参数化方案 (Kain and Fritsch, 1990)、YSU 边界层参数化方案 (Hong et al., 2006)、Noah 陆面过程方案 (Chen and Dudhia, 2001)、CAM 长波和短波辐射参数化方案 (Collins et al., 2004)。运行区域模式所需的初始场和每 6 小时一次的边界场由 CMIP5 中的 IPSL-CM5A-LR 全球气候模式模拟结果提供, 海温场也由 IPSL-CM5A-LR 全球气候模式提供。WRF 模式水平分辨率设置为 50 km, 积分范围覆盖中国大陆及周边区域 (见图 1)。其中, CMIP5 中各个全球模式模拟历史参考时段为 1951~2005 年, 本文选取其中 1981~2000 年作为本文研究的历史参考时段, 通过与观测资料对比, 检验模式对当代各极端降水指数的模拟能力; 同时选取 21 世纪中期 2041~2060 年作为未来时段, 预估极端降水指数在此未来时段内相对于历史参考时段的变化特征, 并使用独立样本 t 检验方法在各格点上对历史模拟序列和未来预估序列进行差异显著性检验 (Abbott, 2016)。

观测资料选取华东地区 (山东、江苏、安徽、上海、浙江、福建、江西) 经过质量控制的 454 个气象站 1981~2000 年逐日降水资料, 来检验模式输出结果对极端降水指数的模拟能力。分别对各气象站点和模式格点计算相关极端降水指数, 并使用线性插值方法插值到统一的 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 分辨率, 以用于对气候模式结果的模拟评估。

2.2 极端降水指数

本文选取的 9 个极端降水指数详见表 1, 其中 Rx5day、PRCPTOT、R10mm、SDII 和 CDD 由气候变化检测和指标专家组 (Expert Team on Climate

Change Detection and Indices, ETCCDI) 提供, 这些指数在强度、频率和持续性方面评估了极端降水特征, 并被广泛用于国内外极端降水的气候变化、模拟和预估研究 (Alexander et al., 2006; You et al., 2011; 陈活泼, 2013; Sun and Ao, 2013; Sillmann et al., 2013a, 2013b)。除了 ETCCDI 指数, 我们借鉴其他相关研究 (Gao et al., 2011; Liu et al., 2013), 另选取了 4 个极端降水指数: R95t、R95d、V95p 和 wet days。从而能够集中反映模式对极端降水的模拟能力, 并从降雨日方面评估 WRF 模式相对 IPSL-CM5A-LR 模式的改善能力。

3 模式对当代气候与极端降水指数的模拟检验

3.1 模式模拟结果的空间分布

观测 (图 2a) 中, 年总降雨量在华东地区从北到南依次增多, IPSL-CM5A-LR 模式对年总降雨量的模拟结果在华东东南部主要呈现高于 10% 的负偏差 (图 1b), 其余地区的偏差在 $\pm 10\%$, 对华东东北部的模拟较好。WRF 模式模拟结果的空间分布与 IPSL-CM5A-LR 存在较大差异 (图 2c), 负偏差的程度整体比 IPSL-CM5A-LR 小, 主要分布在安徽、山东南部 and 江西北部 and 江苏北部区域; 在山东北部以及东南沿海地区 WRF 模式模拟出了超过 10% 的正偏差 (图 2c)。

观测数据的年降雨日的空间分布 (图 2d) 和年总降雨量相似, 最低值区域在山东北部, 最高值区域在华东东南部, 由南向北递减。IPSL-CM5A-LR 模式模拟结果在华东区域全部呈现正偏差 (图 2e), 且超过了 10%, 由华东中部向北向南增加, 最大偏差区域分布在山东和福建南部区域, 超过了 50%; WRF 模式模拟结果在大部分区域偏差不超过 10% (图

表 1 极端降水指数定义

Table 1 Definitions of extreme precipitation indices

指数名称	英文缩写	定义	单位
连续 5 d 最大降水量	Rx5day	一年中连续 5 d 降水量之和的最大值	mm
最长连续干旱日	CDD	一年之中连续日降水量 < 1.0 mm 的天数的最大值	d
年总降雨量	PRCPTOT	一年中日降水 ≥ 1.0 mm 的降雨量之和	mm
平均日降雨强度	SDII	年总降水量/有雨日数 (≥ 1 mm)	mm/d
年大雨日数	R10mm	一年中日降水量 > 10 mm 的天数	d
极端降水阈值	V95p	日降水量 = 1981~2000 年期间 95 % 分位点	mm
年极端降雨日	R95d	一年中日降水量 $\geq 1981\sim 2000$ 年期间 95 % 分位点的天数	d
年降雨日	wet days	一年之中日降水量 $\geq R10mm$ 的天数	d
极端降雨贡献率	R95t	极端降水量 (日降水量 $\geq 1981\sim 2000$ 年期间 95 % 分位点) 之和占该年总降水量的百分率	

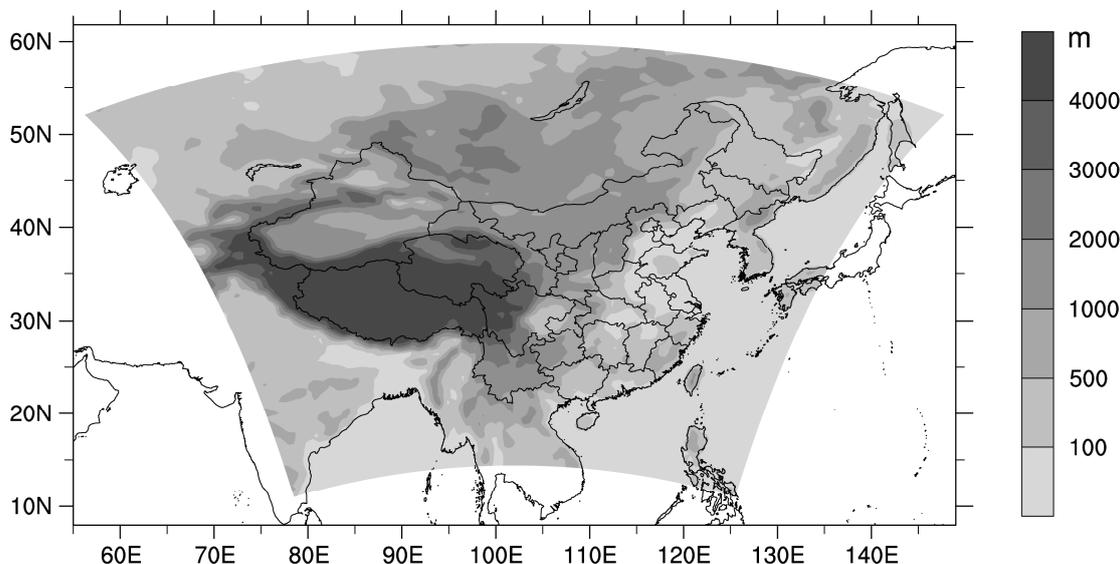


图 1 WRF 模式的模拟范围及地形分布
Fig. 1 Simulation domain of the WRF model and topography

2f), 山东和福建南部存在超 10%的正偏差, 且由内陆向沿海增加, 相比之下, WRF 的模拟结果较好, 对 IPSL-CM5A-LR 的模拟结果有较大的改进, 有效地减少了高估误差。

观测数据的年大雨日数分布结果与年降雨日的空间分布类似(图 2g)。模式 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 的模拟的正负偏差空间分布有所差异(图 2h 和 2i)。WRF 模拟的负偏差集中分布在安徽省内, IPSL-CM5A-LR 模式主要存在华东南部区域。IPSL-CM5A-LR 和 WRF 对年大雨日数超过 10%的高估模拟分别主要分布在山东西部、北部和福建沿海区域。

对于平均日降雨强度, IPSL-CM5A-LR 模式的模拟结果在华东区域内全部低于观测结果(图 2k), 大部分区域的低估误差超过了 30%, 这与前面所述低估了年总降水量, 而高估了降雨日数的结果一致; 与之相比, WRF 模式对平均日降雨强度的模拟结果有很大改进(图 2l), 明显降低了华东全区域的模拟误差。尤其在江苏南部、上海、浙江、福建以及江西地区, 模式模拟误差在 ±10% 以内。在其他区域, WRF 模式明显降低了低估误差, 大部分区域的下估误差低于 30%。

图 3 为极端降水阈值 (V95p)、极端降雨贡献率 (R95t)、最大 5 d 连续降雨量 (Rx5day) 和最长连续干旱日 (CDD) 的观测平均态和模式与观测的偏差百分比空间分布结果图。

与观测结果相比, IPSL-CM5A-LR 模拟结果低

估了华东区域的极端降水阈值(图 3b), 而且华东南部 and 北部的大部分地区的低估偏差超过了 40%, 部分区域超过 60%。此结果与前面分析的 IPSL-CM5A-LR 模式高估降雨日, 低估大雨日数的结果吻合; WRF 模式的模拟结果相比 IPSL-CM5A-LR 较好(图 3c), 全面降低了研究区域的模式模拟的低估误差, 偏差空间分布与 SDII 的模拟结果相似。其中江西南部、福建、浙江以及上海区域的模拟结果最接近观测, 偏差在 ±10% 之内。其他区域存在明显的低估误差, 但与 IPSL-CM5A-LR 相比, WRF 模式对极端降水阈值的模拟能力有很大的提升, 低估误差在华东中部和南部区域降低到 20% 以下, 在北部大部分区域低于 40%。

对于极端降雨贡献率的观测结果, 华东北部的观测结果比华东南部较大(图 3d), 东南沿海区域也相对较高。IPSL-CM5A-LR 的模拟结果(图 3e)则在华东大部分地区呈现低估偏差, 除了上海, 山东和浙江部分地区的偏差在 ±10% 之内, 其他区域低估偏差都超过了 10%, 部分区域超过 30%。与之相比, WRF 模式的模拟结果与观测结果更加接近(图 3f), 华东大部分区域的偏差都在 ±10% 之内; 正偏差主要分布在沿海区域, 但大部分区域不超过 20%。

对于最大 5 d 连续降雨量, IPSL-CM5A-LR 模式的模拟结果(图 3h)在山东地区出现超过 10% 的高估偏差, 且山东北部地区超过 50%; 在其余地区出现高于 10% 的低估偏差, 大部分区域超过了 40%。

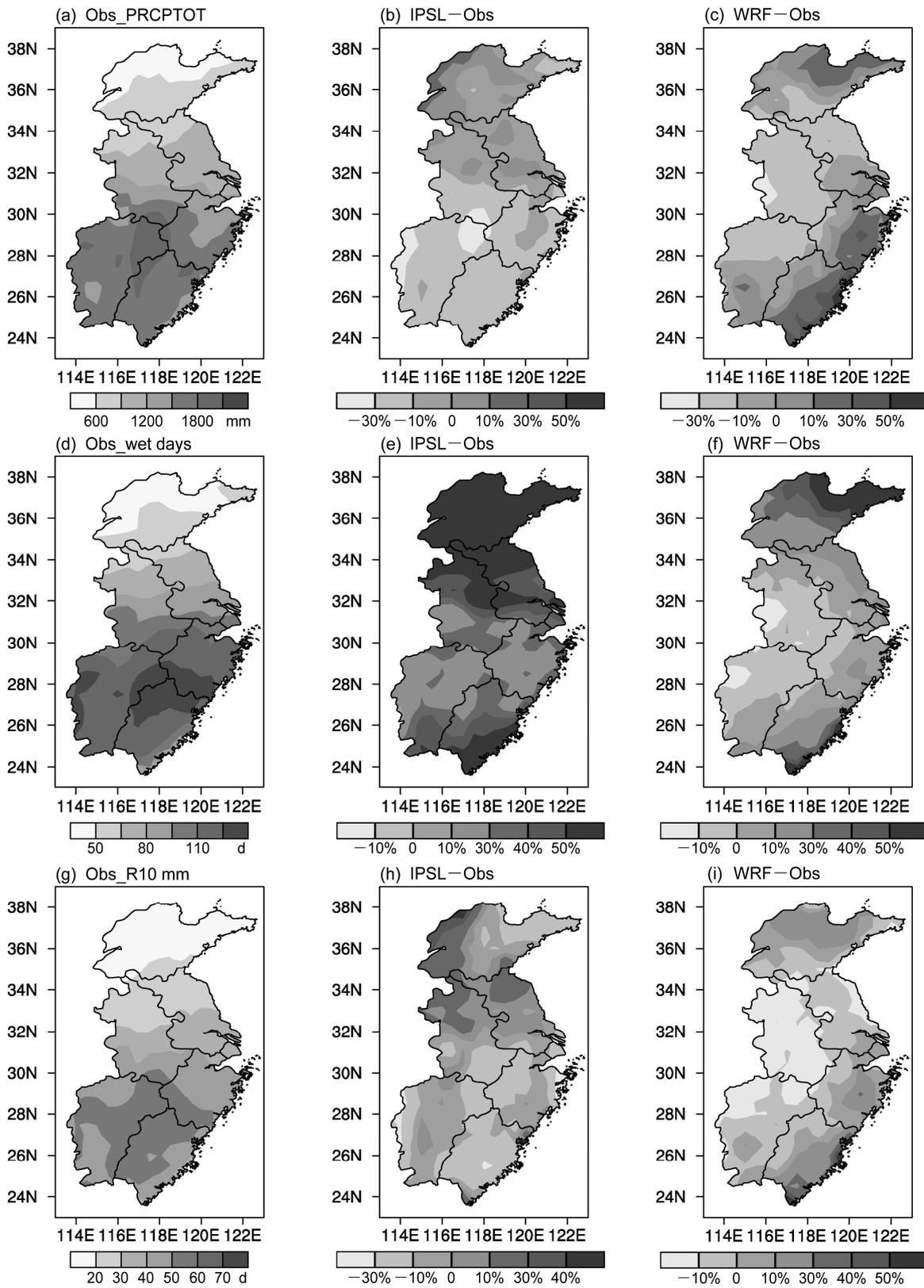


图2 1981~2000年(a, b, c)年总降雨量(PRCPTOT)、(d, e, f)年降雨日(wet days)、(g, h, i)年大雨日数(R10mm)、(j, k, l)平均日降雨强度(SDII)的观测平均态(左列)和模式(中列: IPSL-CM5A-LR; 右列: WRF)相对观测的偏差百分比的空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of annual means from observations and the bias ratios of model simulations with respect to observations for indices of (a, b, c) annual total wet-day precipitation (PRCPTOT), (d, e, f) wet days, (g, h, i) number of heavy precipitation (R10mm), and (j, k, l) simple daily intensity index (SDII) over East China during 1981–2000

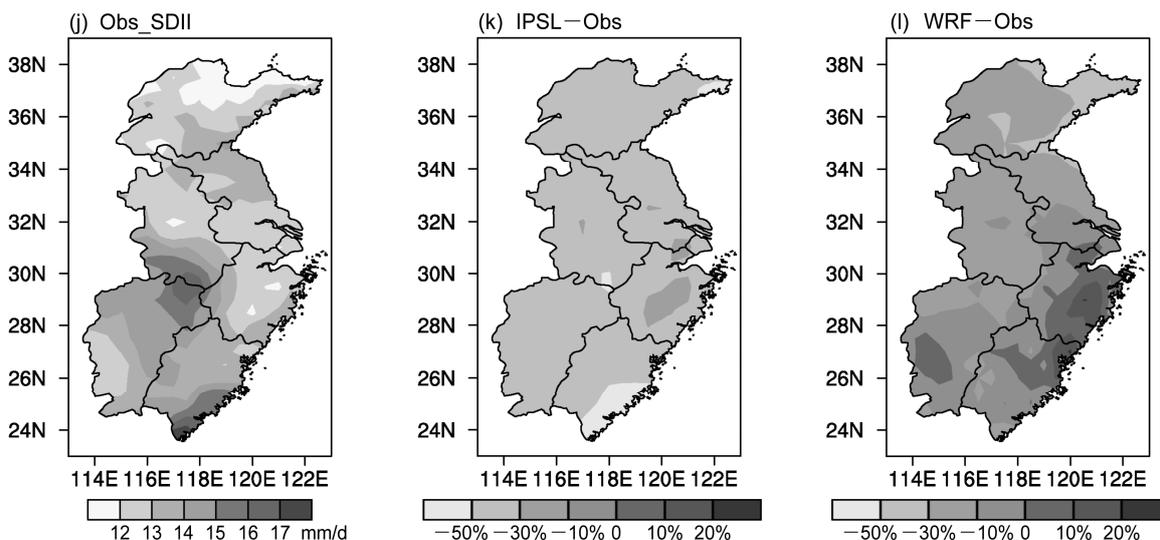


图2 (续)
Fig. 2 (Continued)

WRF 模式的模拟结果在山东、江苏、上海、浙江沿海、福建东部和南部以及江西南部存在高估模拟偏差，大部分区域超过了 20% (图 3i)；其他区域大部分区域的偏差为 ±10%，另外低估偏差区域与 IPSL-CM5A-LR 相比，区域小且强度弱。

对于最长连续干旱日，IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模拟结果相对于观测的偏差空间分布大致相同 (图 3k 和 3l)，在华东中部和南部区域主要为高估模拟偏差，山东东部和福建南部主要为低估模拟偏差，其中 WRF 的高估模拟偏差程度相对更大 (图 3l)。基于以上对比分析，区域气候模式 WRF 对极端降水指标的模拟情况相对较好，改进了全球气候模式 IPSL-CM5A-LR 对指数的模拟能力。尤其对指数 wet days、SDII、V95p 和 R95t，WRF 模拟结果在华东全区域降低了模拟误差。究其原因，主要是全球模式 IPSL-CM5A-LR 为静力平衡模式且分辨率较粗 (水平分辨率 200 km 左右)，导致其模拟的大范围大尺度弱降水较观测偏多，尤其在 7 月和 8 月较观测偏多最为明显，进而导致其年降水强度 (SDII)、95% 百分位极端降水阈值 (V95P) 等极端指标在华东大部分地区均较观测明显偏低，这也与其他对全球模式华东地区极端降水模拟评估结论一致 (Jiang et al., 2015; 吴蔚等, 2016)；而 WRF 模式为中尺度非静力平衡模式且分辨率较高 (50 km)，与观测年降雨日的误差明显减小，相应的平均日降雨强度、极端降水阈值与观测的误差也明显减小。

为了更直观地探讨模式对华东区域极端降水指数的模拟偏差，将在华东子区域上分析区域平均模拟偏差 (SEC: 华东南部, 23°N~28°N; CEC: 华东中部, 28°N~35°N; NEC: 华东北部, 35°N~38°N)。图 4 为极端降水指数区域平均偏差百分比结果。如图所示，IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式对年降雨日的模拟结果在华东各个子区域呈现高估模拟，而对指数平均日降雨强度和极端降水阈值呈现低估模拟。对于指数极端降雨贡献率，除了 WRF 模式在华南区域呈现正偏差外，在其他区域两气候模式都呈现负偏差。总体上，WRF 模式对各指数的模拟能力优于 IPSL-CM5A-LR，在一定程度上减少了相对误差。尤其对于指数年降雨日、平均日降雨强度、极端降水阈值和最大 5 d 连续降雨量，WRF 模式在子区域上都具有更低的相对误差。对于其他指数，WRF 模式的模拟能力在个别子区域上低于 IPSL-CM5A-LR，加大了相对误差程度。如在华北区域，WRF 对于年总降雨量，年大雨日数和最大 5 d 连续降雨量指数模拟结果偏差大于 IPSL-CM5A-LR 的模拟结果。总体而言，WRF 模式对 IPSL-CM5A-LR 模式模拟能力具有明显提升。

3.2 模式对降水和降雨日的模拟

由于模式对指数年总降雨量和年降雨日的模拟结果也潜在影响了其他相关指数，接下来将进一步分析两气候模式对降雨量和降雨日的模拟能力。

图 5 分别显示了华东 3 个子区域观测和两气候

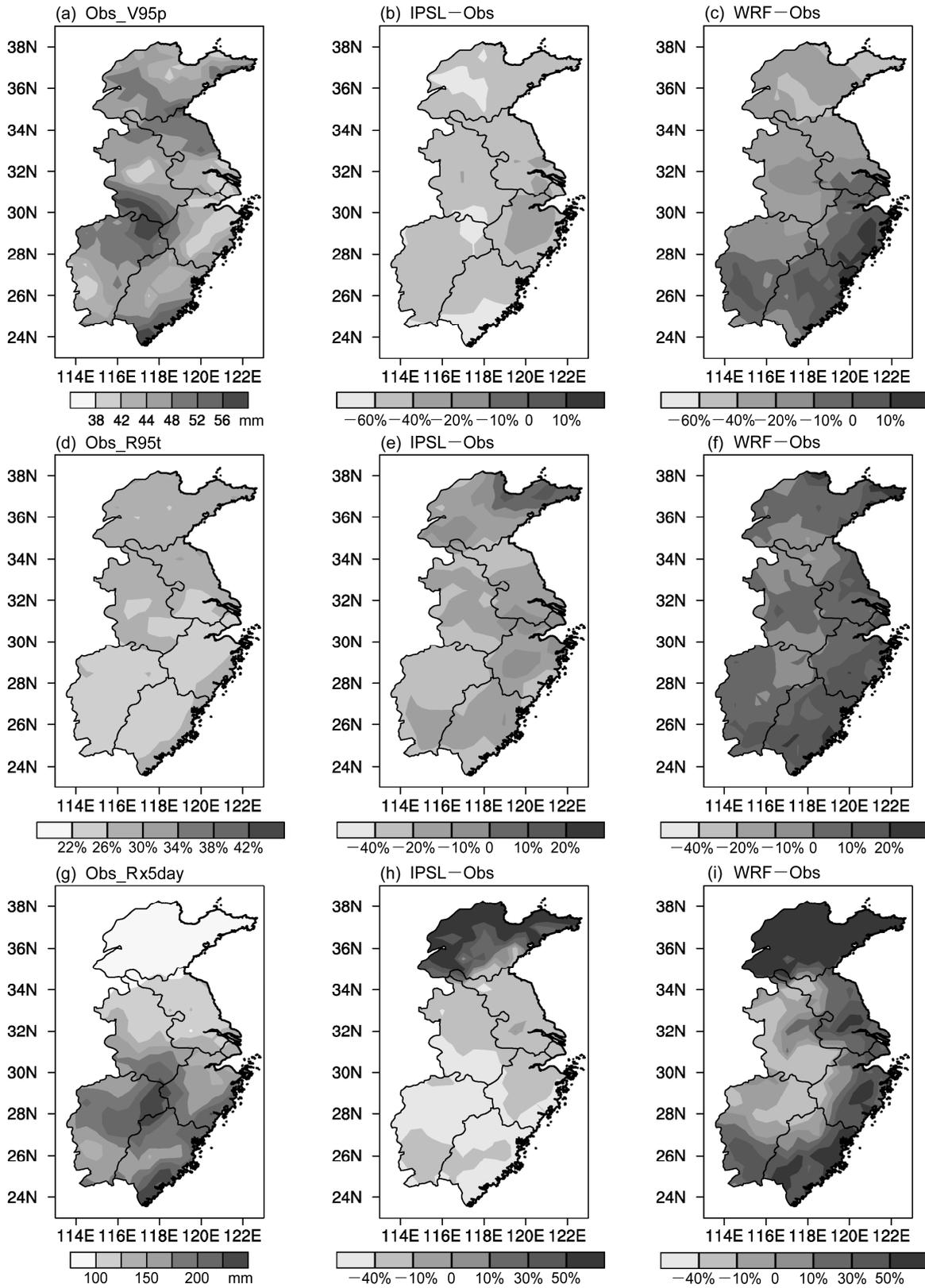


图3 同图2, 但为极端降水指数 (a、b、c) 极端降水阈值 (V95p)、(d、e、f) 极端降雨贡献率 (R95t)、(g、h、i) 最大5 d连续降雨量 (Rx5day) 和 (j、k、l) 最长连续干旱日 (CDD)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for indices of (a, b, c) extreme precipitation threshold (V95p), (d, e, f) extreme rainfall contribution rate (R95t), (g, h, i) max 5-d precipitation (Rx5day), and (j, k, l) consecutive dry days (CDD)

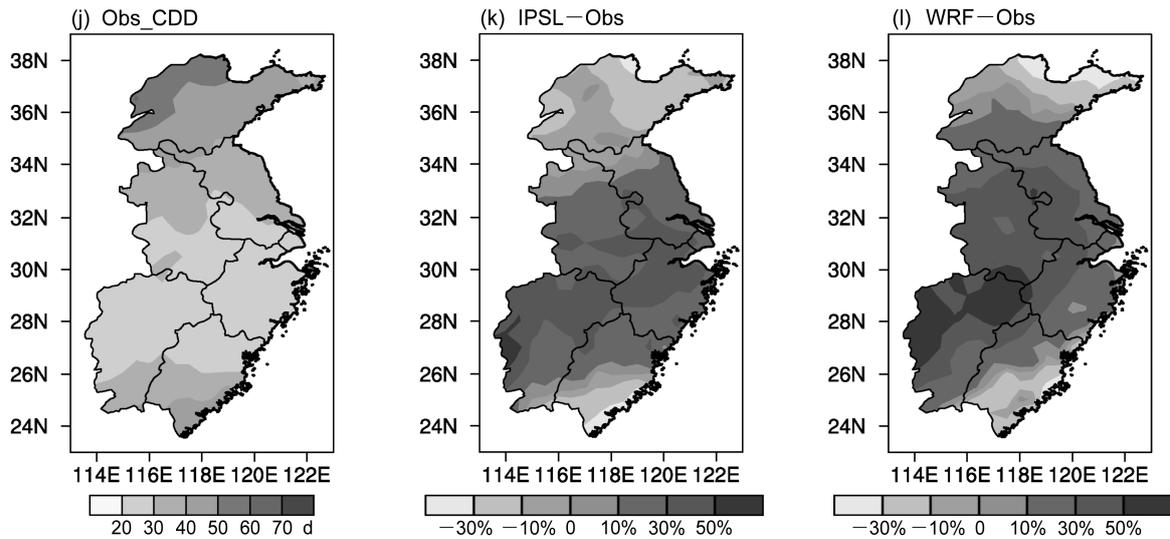


图3 (续)
Fig. 3 (Continued)

model	sub-region	PRCPTOT	wet days	R10mm	SDII	V95p	R95t	Rx5day	CDD
IPSL	SEC	-20.53%	39.42%	-11.36%	-43.19%	-56.25%	-13.57%	-44.51%	7.18%
	CEC	-14.24%	37.65%	-7.13%	-37.46%	-47.88%	-10.87%	-35.88%	22.86%
	NEC	0.16%	75.17%	3.53%	-42.52%	-55.39%	-11.40%	43.28%	-12.69%
WRF	SEC	10.64%	11.09%	7.25%	-1.15%	-0.98%	6.82%	31.71%	12.38%
	CEC	-5.31%	0.55%	-6.04%	-11.01%	-15.96%	-1.76%	6.81%	33.31%
	NEC	3.63%	43.22%	7.63%	-27.06%	-35.67%	-3.99%	115.30%	-2.44%

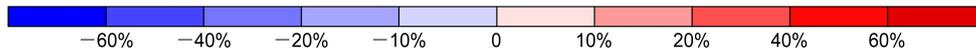


图4 模式模拟的1981~2000年极端降水指数各子区域的区域平均气候态偏差百分比 (SEC: 华东南部, 23°N~28°N; CEC: 华东中部, 28°N~35°N; NEC: 华东北部, 35°N~38°N)

Fig. 4 Regionally averaged bias ratios of precipitation indices over the sub-regions during 1981~2000 from models (SEC: South East China, 23°N~28°N; CEC: Central East China, 28°N~35°N; NEC: North East China, 35°N~38°N)

模式1981~2000年降雨量和降雨日的年周期变化。对比观测结果,两气候模式很好地模拟出了降雨在夏季较多、冬季较少的季节性特点。在华东南部,IPSL-CM5A-LR模式对降雨量的模拟整体低于观测(图5a),只在7月明显高于观测以及11月、12月略高于观测;与IPSL-CM5A-LR相比,WRF模式的模拟结果在春季具有更低的模拟偏差,更接近观测值,提升了全球气候模式的模拟能力;但在冬、夏季节增加了模拟偏差。在华东中部(图5b),两气候模式都明显低估了秋季以及6月的降雨量,其中WRF模式只在2月、9月和12月的模拟结果更接近观测。在华东北部,两气候模式均呈现对夏秋季节降水模拟不足,春冬季节模拟过剩的特点。在华东南部(图5d),两气候模式在1~3月对降雨日

的模拟明显低于观测值,且WRF模式的模拟误差更大。在其他月份,WRF模式对IPSL-CM5A-LR的模拟结果有所优化。在华东中部,两气候模式对降雨日的模拟在全年均高于观测值,但除了4月,WRF模式的模拟误差均低于IPSL-CM5A-LR(图5e)。在华东北部,WRF气候模式在大部分月份对降雨日的模拟更接近于观测值(图5f)。

图6和图7分别为华东区域观测数据和模式模拟降雨量和降雨日的纬度—时间剖面图。由观测(图6a)可见,雨带大值中心维持在28°N附近。4月开始,雨带开始向北移动,6月初到达30°N,分别在24°N和28°N出现两个强降雨带,且达到最大值11mm/d。之后继续北移,7月初到达33°N,8月雨带开始南移。WRF和IPSL-CM5A-LR模式对

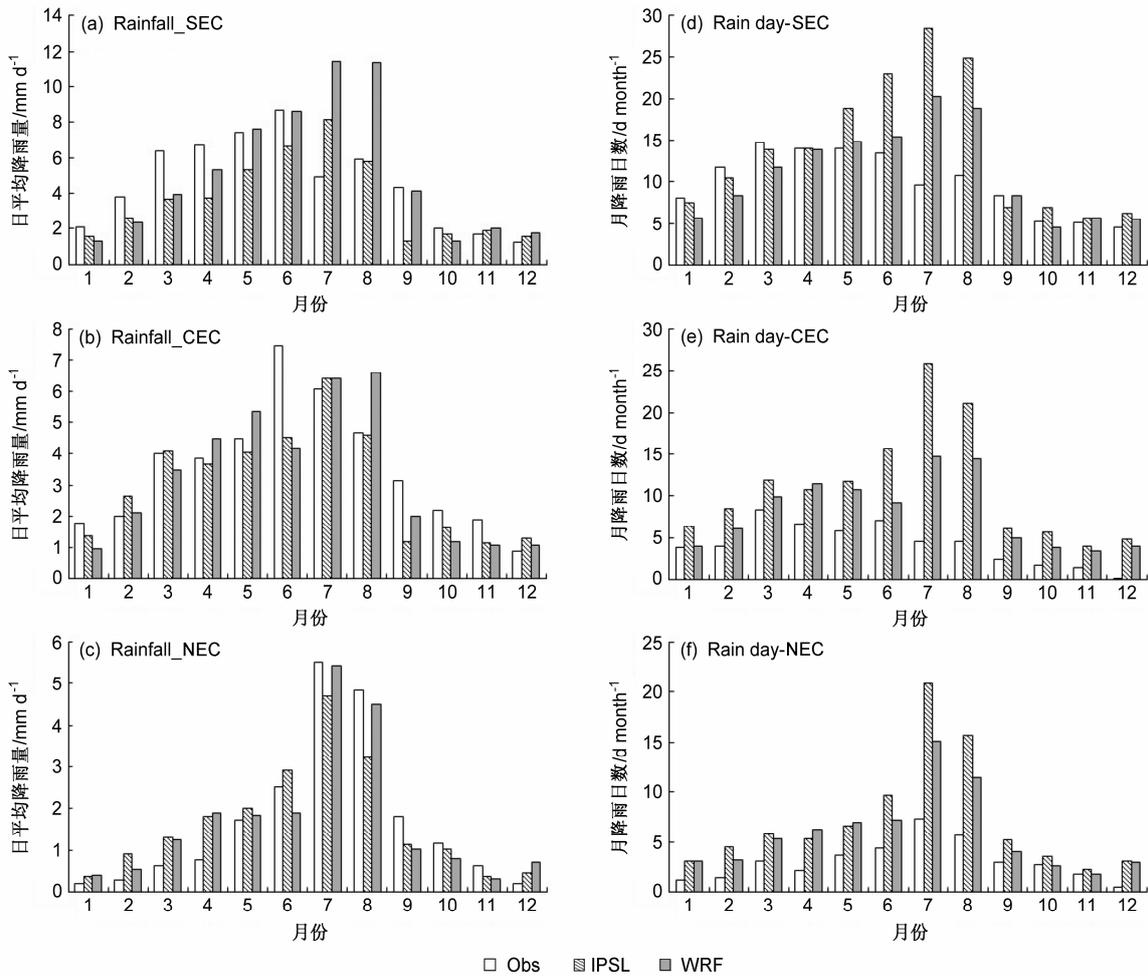


图 5 1981~2000 年观测数据和气候模式的平均降雨量和降雨日数年周期变化

Fig. 5 Annual cycles of mean daily precipitation and monthly rainy days from observations and model simulations during 1981-2000

华东降水演变再现结果如图 6b、6c 所示，相比之下，IPSL-CM5A-LR 模式模拟结果较好，很好地再现了雨带和降水中心演变，只是强降雨带的出现时间为 7 月。WRF 模式的模拟结果与观测相比有所差别，强降雨带的时间和空间跨度更大。由图 6d 和 6e 可以看出，IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式都对华东南部夏季降水有所高估，其中 WRF 模式的偏差强度和跨度更大(图 6e)；但 WRF 模式明显降低了 IPSL-CM5A-LR 模拟结果对华东 24°N~32°N 春季降水的低估。

通过图 7 分析可知，WRF 和 IPSL-CM5A-LR 的模拟结果与观测相比均有偏差(图 7b 和 7c)，其中 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 明显高估了华东夏季降雨日(图 7d 和 7e)，且 IPSL-CM5A-LR 的偏差强度和跨度远远大于 WRF，WRF 对 IPSL-CM5A-LR 对降雨日的过多模拟有明显的改进。

基于以上对降雨量和降雨日年周期变化和维

度—时间演变的进一步研究发现，WRF 对降雨量和降雨日具有更好的模拟性能。尤其是对降雨日的模拟，很好地优化了 IPSL-CM5A-LR 对降雨日过高模拟的缺点。

3.3 模式对指数趋势率的模拟

IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式对华东区域极端降水指数 1981~2000 年的趋势率的模拟结果如图 8 和图 9 所示，图像呈现的结果为真实趋势率的 10 倍。观测结果(图 8a)表明，年总降雨量在华东区域内的时间变化主要为增加趋势，但 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式对年总降雨量的趋势模拟与观测结果相差较大(图 8b 和 8c)。其中 IPSL-CM5A-LR 华东南部的模拟结果与观测结果趋势一致，但趋势大小比观测低。WRF 模式对年总降雨量的趋势模拟结果在上海及其周边以及浙江东北部区域与观测结果较为一致。同样，WRF 模式对年降雨日的趋势模拟结果在上海及其周边区域与观测结果较为一

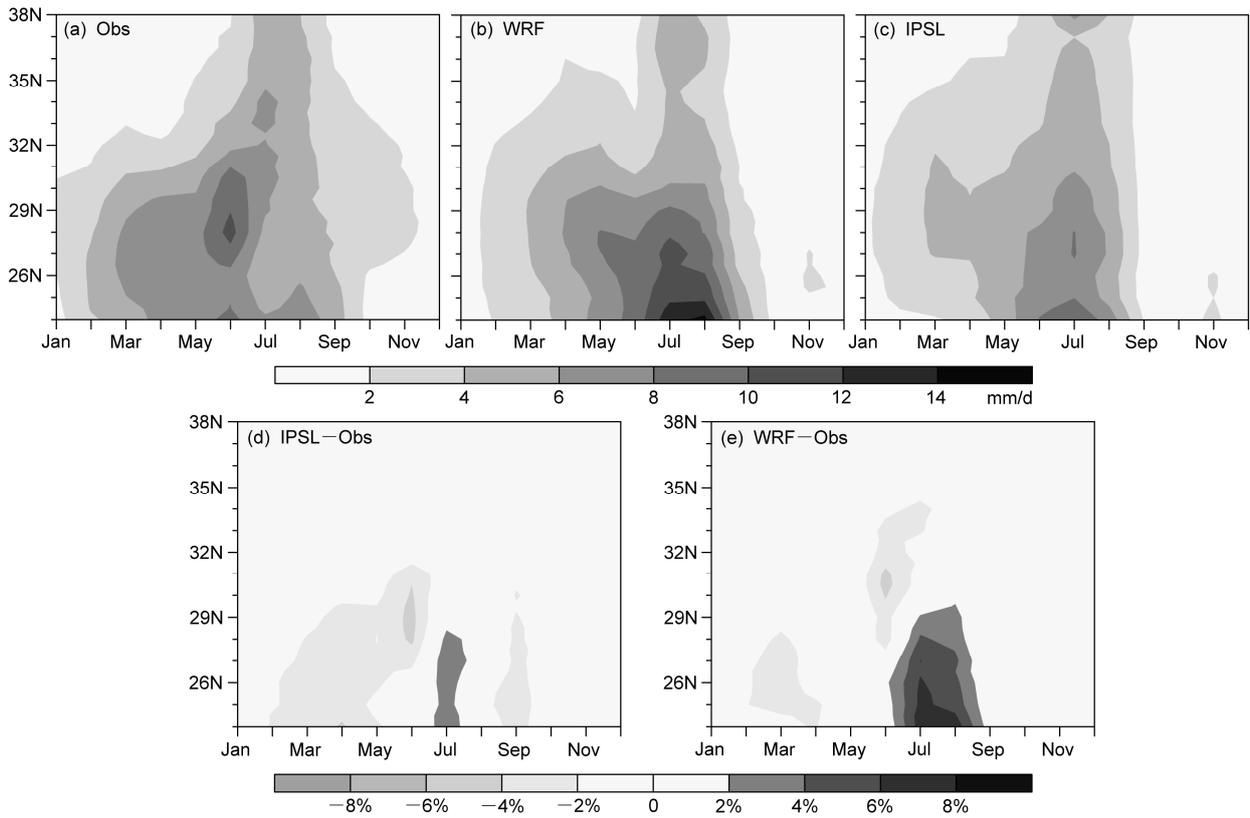


图 6 观测与气候模式的日降雨量（上）和模式相对于观测的模拟误差（下）

Fig. 6 Daily precipitation from (a) observations, (b-c) models, and (d, e) the relative errors between models and observations

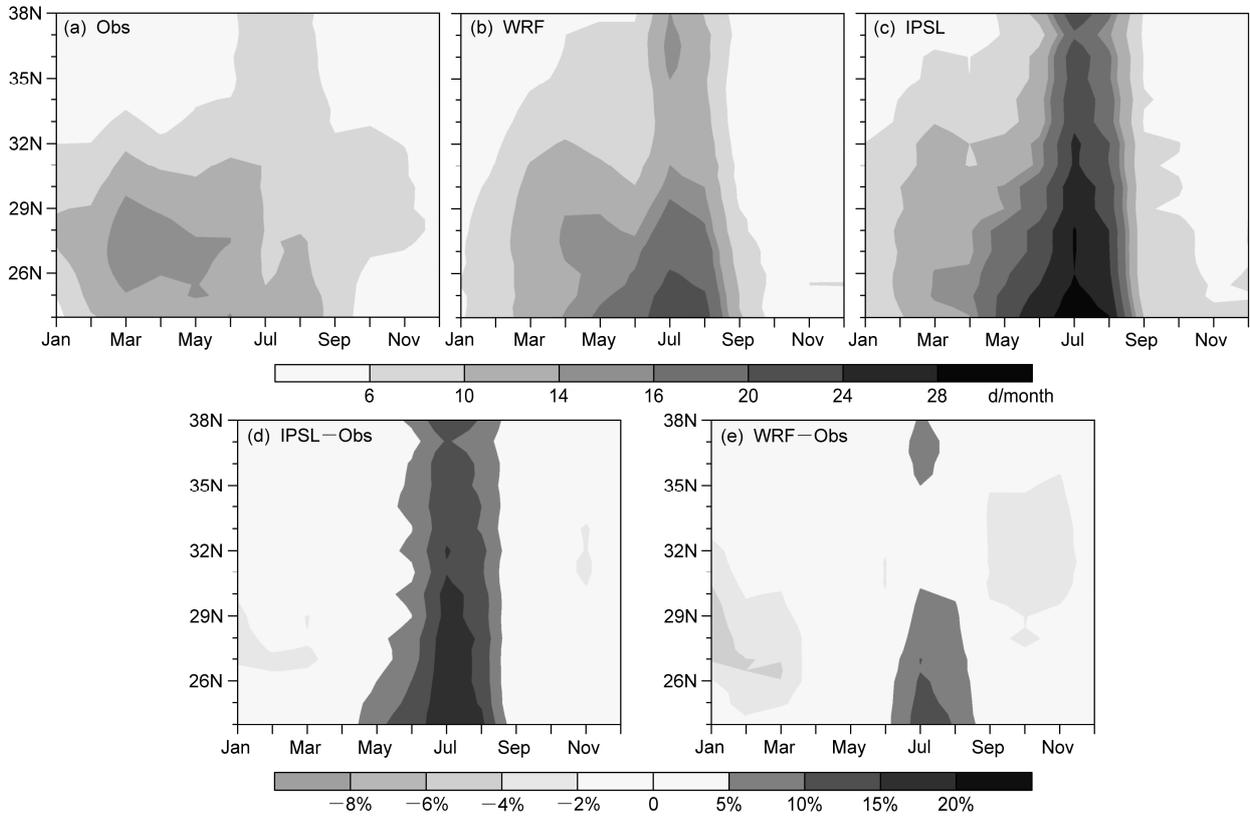


图 7 观测与模式的月降雨日（上）和模式相对于观测的模拟误差（下）

Fig. 7 Monthly rainy days from (a) observations, (b-c) models, and (d, e) the relative errors between models and observations

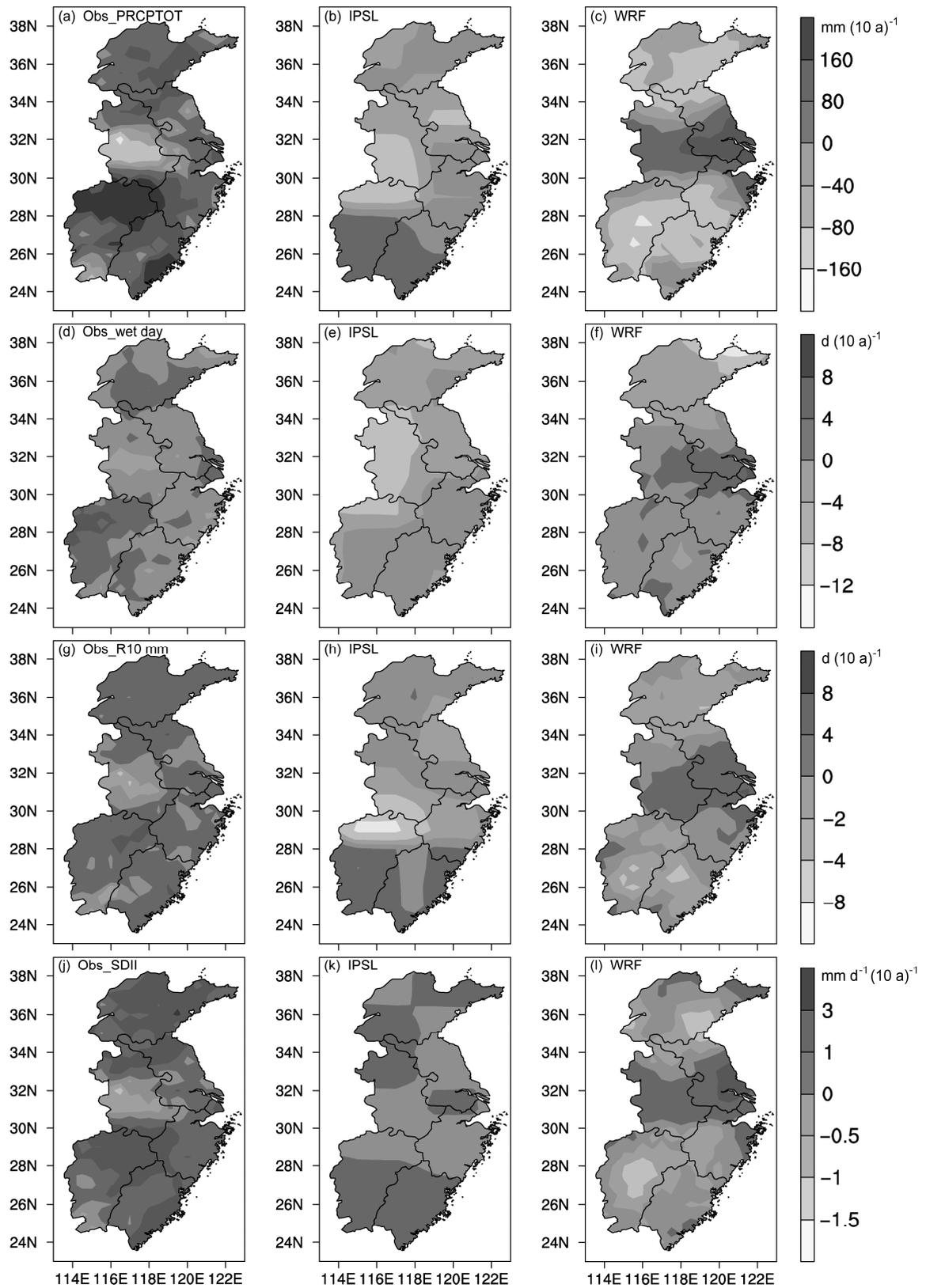


图 8 观测和模式模拟的 1980~2000 年华东区域极端降水指数趋势率的空间分布: (a, b, c) 年总降雨量; (d, e, f) 年降雨日; (g, h, i) 年大雨日; (j, k, l) 平均日降雨强度

Fig. 8 Spatial patterns of trend rates of extreme precipitation indices over East China during 1980–2000 from observations and model simulation: (a, b, c) PRCPTOT; (d, e, f) wet days; (g, h, i) R10mm; (j, k, l) SDII

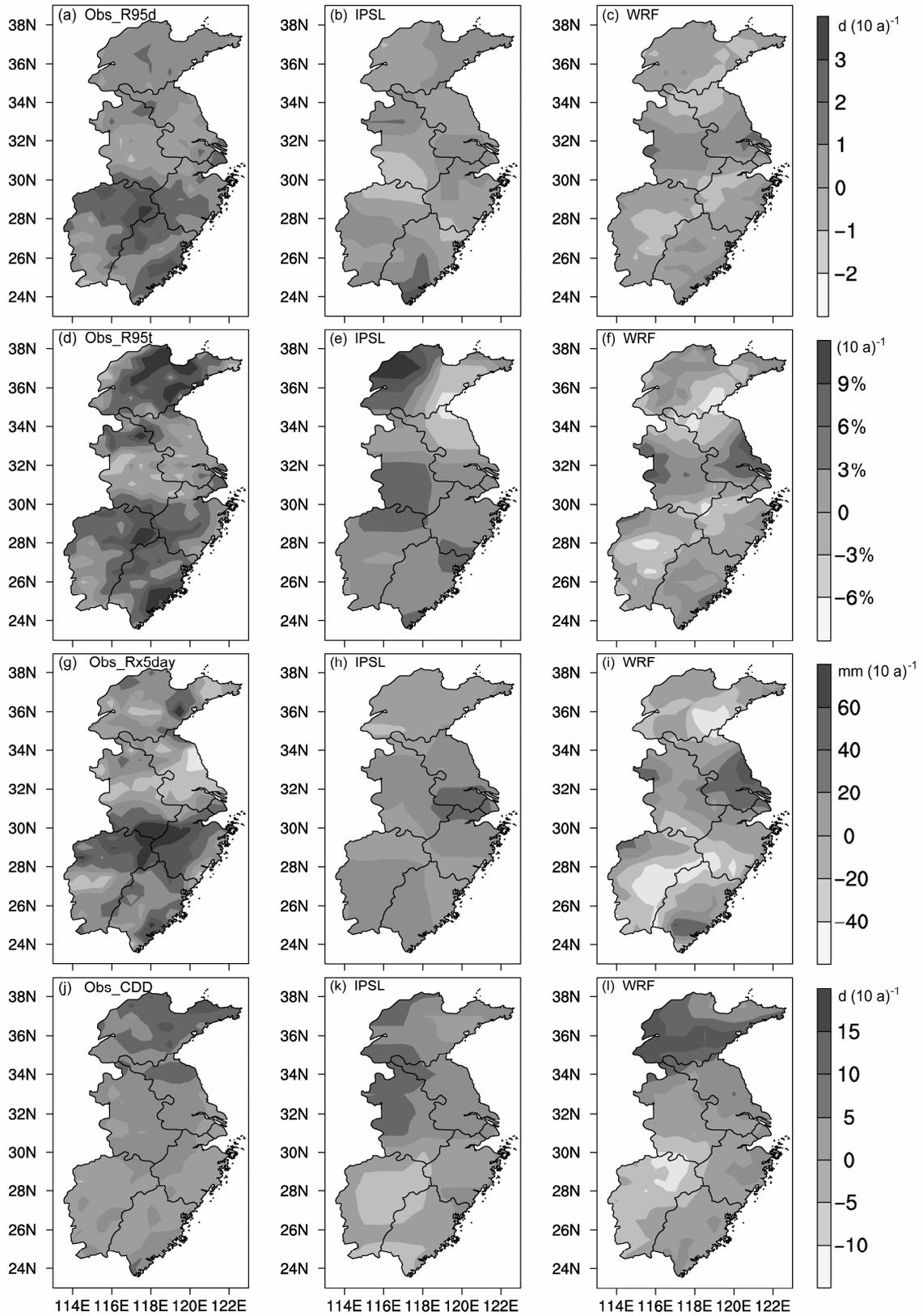


图9 同图8，但为极端降水指数 (a, b, c) 年极端降雨日、(d, e, f) 极端降雨贡献率、(g, h, i) 连续5 d最大降雨量和 (j, k, l) 最长连续干旱日

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for indices of (a, b, c) R95d, (d, e, f) R95t, (g, h, i) Rx5day, and (j, k, l) CDD

致 (图 8f)。对于指数年大雨日数和平均日降雨强度, IPSL-CM5A-LR 对趋势率的模拟结果在华东南部区域与观测结果较为近似 (图 8h 和 8k); 而 WRF 模式的模拟结果在上海及其周边区域与观测结果较为接近 (图 8i 和 8l)。对于指数年极端降水与日和极端降水贡献率, IPSL-CM5A-LR 对趋势率的模拟结果与 WRF 相比在更大区域范围内与观测结果一致 (图 9b、9c、9e 和 9f)。对于指数连续 5 d 最大降水量和最长连续干旱日, 相比之下, IPSL-CM5A-LR 的表现更好 (图 9h 和 9k), 模拟结果与观测结果一致的区域要多于 WRF 模式模拟结果 (图 9i 和 9l)。

由上分析可以看出 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模

式对极端降水指数趋势的模拟与观测结果相比有较大差别, WRF 对 IPSL-CM5A-LR 的改善主要存在于降水指数年总降雨量、年降雨日、年大雨日和平均日降雨强度在上海以及周边区域的模拟结果。整体来说 WRF 模式在趋势率模拟方面对 IPSL-CM5A-LR 的改善不太明显, 且气候模式对趋势率的模拟存在较大的不确定性。

4 RCP8.5 情景下预估的极端降水变化

图 10 和图 11 为 RCP8.5 排放情景下, 气候模式 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 预估的华东地区极端降

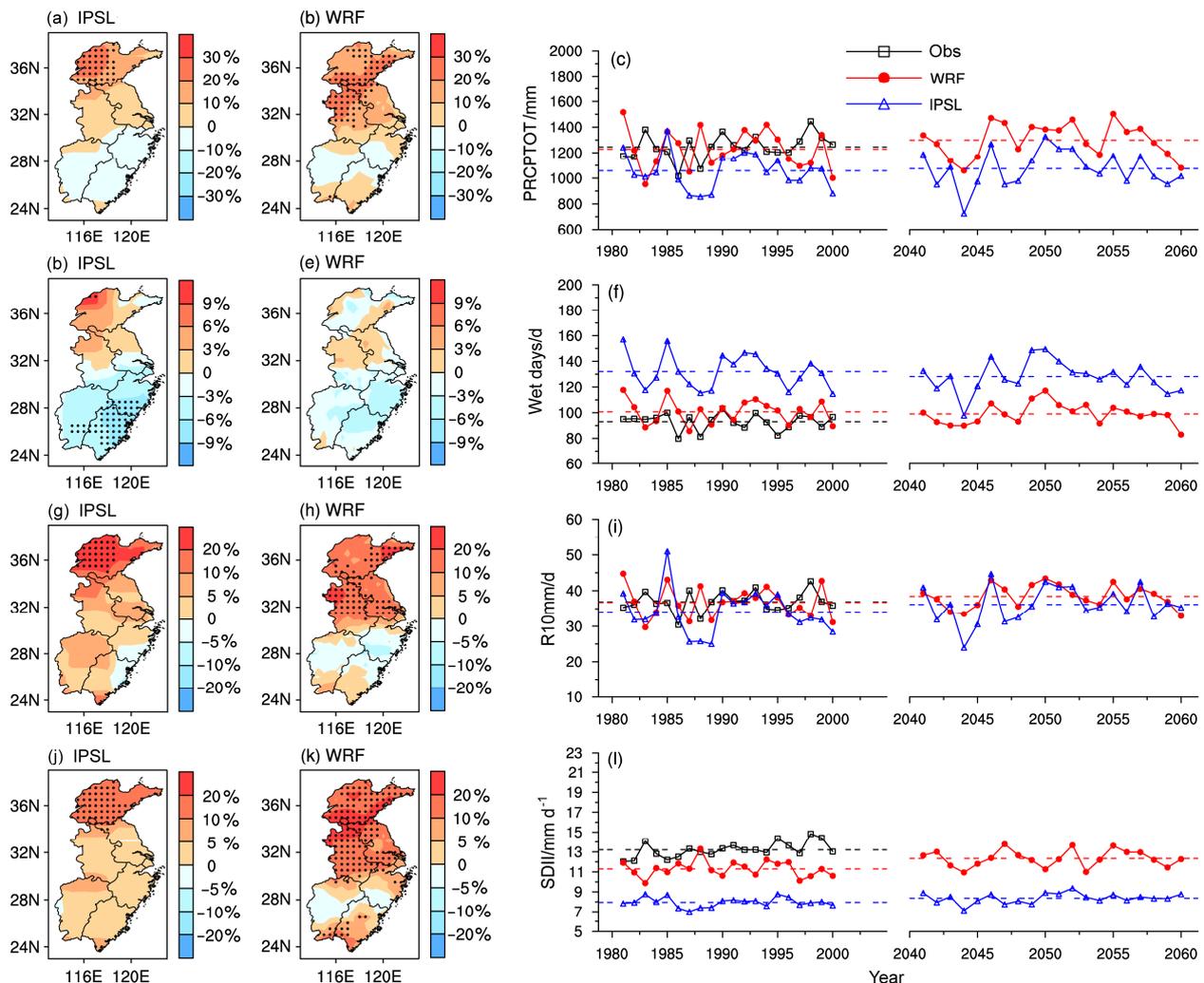


图 10 RCP8.5 情景下模式 IPSL-CM5A-LR (左列) 和 WRF (中列) 预估极端降水指数 (a、b、c) 年总降雨量、(d、e、f) 年降雨日、(g、h、i) 年大雨日、(j、k、l) 平均日降雨强度在 21 世纪中期 (2041~2060 年) 相对于参考时段 (1981~2000 年) 的气候态变化的空间分布以及独立样本 t 检验结果 (左列和中列黑点代表模式未来预测值相对于历史模拟值的变化在 0.05 水平显著) 和时间序列变化特征 (右列)

Fig. 10 Changes in the mean states of precipitation indices during 2041–2060 under the RCP8.5 scenario relative to those during 1981–2000 and the independent sample t test results (black dots in left and middle panels represent a significant change at 0.05 level between the future predicted values of model and historical simulated values): (a, b, c) PRCPTOT; (d, e, f) wet days; (g, h, i) R10mm/d; (j, k, l) SDII. The left column shows the results from IPSL-CM5A-LR, the middle column shows the results from WRF, and the right column shows the time series

水指数在 21 世纪中期 (2041~2060 年) 相对于参考时段 (1991~2000 年) 变化的空间分布和差异显著检验结果 (其中黑色格点代表模式未来预测值相对于历史模拟值的变化显著), 以及区域平均值的时间序列图。

在 21 世纪中期, IPSL-CM5A-LR (图 10a) 对年总降雨量的预估在山东、江苏、上海、安徽境内将增加, 且增加幅度由南向北增加。在华东北部区域, 增加幅度在 10% 以上, 且这种增加在山东西部区域通过了 0.05 显著水平检验; WRF (图 10b) 对年总降雨量预估呈现增加的区域比 IPSL-CM5A-LR 多, 且强度相对更大, 且增加显著的格点主要位于增加幅度大于 20% 的区域, 主要分布在山东东南部和南部、安徽北部和江苏西北部区域。对于时间序列, 在两个时间段内, WRF 模式的平均值分别都大于 IPSL-CM5A-LR 模式; 在两个时段的对比中, WRF 模式平均值的增幅明显大于 IPSL-CM5A-LR 模式。

对于年降雨日, IPSL-CM5A-LR 模式 (图 10d) 预估在华东北部增多, 中部和南部减少, 且向北、向南分别逐渐增多和减少。其中减少显著的格点主要分布在浙江南部和福建中部和北部, 且这些区域的减少幅度相对较大, 超过了 9%。WRF 模式 (图 10e) 在华东大部分区域预测年降雨日减少, 增加趋势主要在安徽和江苏的中部和北部、山东西北部和东南局部区域, 且增加或减少变化没有通过显著检验。整体上, IPSL-CM5A-LR 预估的增加或减少变化的幅度更大。通过时间序列图的对比分析 (图 10f), 两个模式在未来时段的平均值相对于历史时段都为减少; 且在未来时段, IPSL-CM5A-LR 模式预估的平均值远远高于 WRF 模式。

IPSL-CM5A-LR (图 10g) 预估年大雨日在华东大部分区域都为增加, 最大增幅在华东北部地区, 增幅超过 20%, 在浙江和福建局部沿海区域预估减少, 降幅在 5% 以内, 其中变化显著的格点主要为增加幅度大的区域, 分布在山东西部区域。WRF 模式 (图 10h) 预估在华东大部分区域增加, 增幅以 10%~20% 为主, 少数局部区域超过 20%; 在浙江、福建北部和江西中部部分区域减少, 预估降幅在 10% 以内。另外变化显著的格点主要分布在山东东部和西南部、安徽中部和北部以及江苏南部, 且均为增加变化。两时段时间序列图 (图 10i) 显示两气候模式在未来时间段的平均值同为增加; 且未来时段 IPSL-CM5A-LR 模式平均值的增幅明

显高于 WRF 模式。

对平均日降雨强度的预估, IPSL-CM5A-LR 气候模式的预估结果在华东区域均为增加 (图 10j), 山东增幅较大, 超过了 10%, 且大部分格点的增加变化通过了 0.05 的显著性检验, 其他区域的增幅以 0~10% 为主。WRF 模式的预估在华东大部分区域增加 (图 10k), 增幅以 10%~20% 为主, 增幅强度整体比 IPSL-CM5A-LR 预估结果稍大, 且山东、安徽和江苏大部分区域格点上的增加变化显著; 预估减少的区域主要分布在江西中部和浙江南部, 减幅在 -5%~0 之间。对比两时段时间序列图 (图 10l), 两气候模式在未来时间段的平均值同为增加, 且 WRF 模式平均值的增幅明显高于 IPSL-CM5A-LR 模式。

根据以上两气候模式年总降雨量、年降雨日、年大雨日、平均日降雨强度的预估, 可以得出未来华东年总降雨量、年大雨日、平均日降雨强度可能增加, 年降雨日将会减少, 降雨将呈现极端化, 且华东北部极端化强度大于华东南部, 这在平均日降雨强度的预估结果中也得到了证实。

对于极端降雨日的预估, IPSL-CM5A-LR (图 11a) 预估在上海、浙江、福建中部和北部、江西西部以及江西中部地区减少, 减幅在 -20%~10%, 浙江部分区域的减幅超过了 20%; 在其他区域预估增加, 山东大部分地区增幅超过 50%, 且此区域内格点上的增加变化显著。WRF (图 11b) 模式预估在浙江中部和南部、江西和福建北部部分区域减少, 其他区域增多, 主要分布在华东北部和中部, 且北部增幅较大, 最大增幅超过 50%, 且变化显著的格点主要分布在增幅超过 50% 的区域, 集中于山东、江苏北部和安徽北部区域。对比两时段时间序列图 (图 11c), WRF 模式时间序列的平均值无明显变化, 而 IPSL-CM5A-LR 模式有较小增加; 且未来时段 IPSL-CM5A-LR 模式平均值明显高于 WRF 模式。

IPSL-CM5A-LR 对极端降雨贡献率的预估在江苏沿海局部、浙江、福建中部和北部以及江西中部区域减少 (图 11d), 在其他区域增加。其中山东西部的增加和浙江南部的减少变化显著。WRF (图 11e) 模式在江西、浙江、上海、安徽南部和江苏南部的大部分区域存在超过 50% 的增加预估, 在山东大部分区域的增加预估低于 30%, 其中变化显著的格点主要分布在山东区域内。对比两时段时间序列 (图 11f), 两气候模式时间序列的平均

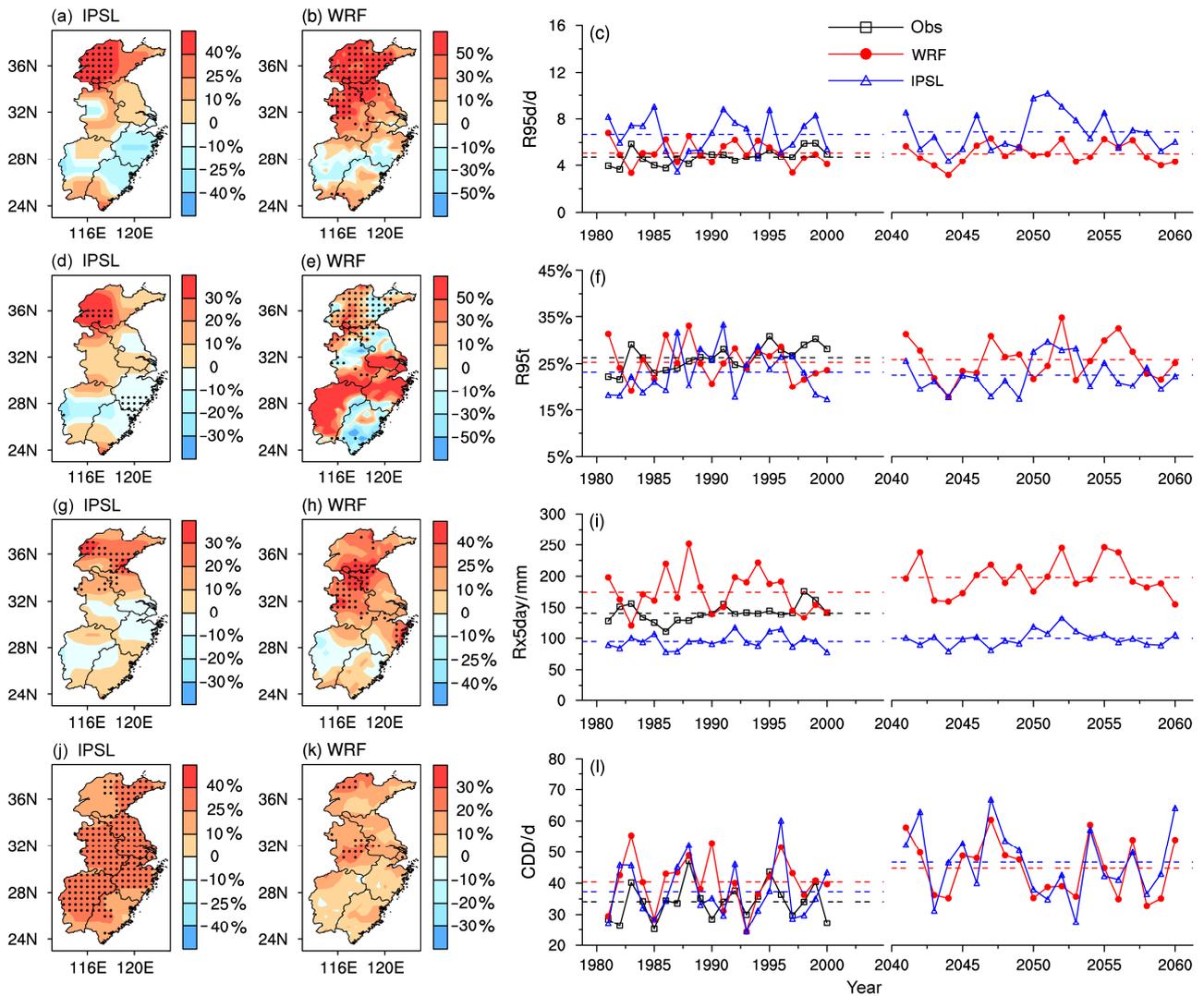


图 11 同图 10, 但为极端降水指数 (a, b, c) 年极端降水日、(d, e, f) 极端降水贡献率、(g, h, i) 连续 5 天最大降水量和 (j, k, l) 最长连续干旱日
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for indices of (a, b, c) R95d, (d, e, f) R95t, (h, i, j) Rx5day, and (j, k, l) CDD

值无明显变化。

对于连续 5 d 最大降水量, IPSL-CM5A-LR (图 11g) 在上海全部、江苏南部、安徽中部、浙江和江西中部、福建西部预估减少, 大部分区域减幅在 $-10\% \sim 0$ 之间; 模式在其他区域预估增加, 且华东北部增幅较大, 大部分区域超过 15% , 且变化显著的格点主要分布在增加幅度较大的区域, 主要位于山东省内。WRF 模式对连续 5 d 降水量的预估在华东大部分增加 (图 11h), 只在江西中南部、浙江南部和福建部分区域预估减小。其中变化显著的格点主要分布在山东南部、安徽中部和北部、江西西北部以及浙江南部, 且这些区域的增加幅度也较大, 超过了 25% 。时间序列图 (图 11i) 显示, WRF 模式的序列平均值具有较为明显的增加, 且在

未来时段 WRF 模式平均值明显高于 IPSL-CM5A-LR 模式。

IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式对最长连续干旱日的在华东区域内的预估趋势几乎一致 (图 11j、11k), 都为增加, 只是增幅不同, 整体上 IPSL-CM5A-LR 预估增幅比 WRF 预估增幅大, 这一点从时间序列图 (图 11l) 上也可以看出, 且增加幅度超过 25% 的区域的大部分格点均通过差异显著检验。WRF 模式预估显著增加的格点主要位于增加幅度较大的区域, 分布在安徽中部和山东北部。对比两时段时间序列 (图 11l), 两气候模式时间序列的平均值均有明显增加, 但未来时段 IPSL-CM5A-LR 模式平均值明显高于 WRF 模式。

对于以上 4 个指标的预估分析, 可以明确得到

华东地区降水具有极端化的趋势,除了年极端降雨日和极端降雨贡献率的预估增加,连续 5 d 最大降水量的增加和最长连续干旱日的增加同样表明,未来降雨呈现频率的减少但强度增加的极端化趋势。且显著性检验显示,变化显著的格点主要为增加幅度较大的区域。

5 小结和结论

使用 IPSL-CM5A-LR 全球模式输出结果驱动区域气候模式 WRF 对华东地区极端降水指数进行模拟,并讨论了在 RCP8.5 排放情景下 21 世纪中期(2041~2060 年)华东区域极端降水的变化情况。结果表明:与 IPSL-CM5A-LR 模式相比,WRF 区域气候模式可以更好地再现各个极端指数空间分布及数值,对 IPSL-CM5A-LR 全球模式具有很大程度的改进。

对于年总降雨量和年降雨日,WRF 模拟结果明显地优化了 IPSL-CM5A-LR 在华东南部对年总降雨量的低估以及在华东全区域对年降雨日的高估(Gao et al., 2011; Liu et al., 2013; Zou and Zhou, 2013)。在降雨日的年周期变化方面,WRF 明显降低了 IPSL-CM5A-LR 对华东区域降雨日的高估偏差,尤其是在夏季,这在之后的月降雨日分析中也有所体现,总体上弥补了 IPSL-CM5A-LR 模拟过多降雨日的缺陷。

对于其他极端降水指数,WRF 模拟结果同样显现出明显的优势。WRF 在中国华东大部分区域更合理地模拟出了各极端降水指数结果,尤其是平均日降雨强度、极端降水阈值和极端降雨贡献率。对于连续 5 d 最大降水量和最长连续干旱日,WRF 模式在局部区域有所优化。总体上,WRF 对极端降水指数的模拟结果在空间分布模式以及数值大小上与观测资料相比更加接近,优化了 IPSL-CM5A-LR 的模拟结果。在之前的研究中(Gao et al., 2008; Wang et al., 2012; Liu et al., 2013; Zou and Zhou 2013; Bao et al., 2015),同样表明区域气候模式相比其使用的驱动模式,在极端降水指数方面有较好的表现力。Qin and Xie (2016) 发现区域气候模式不管是在平均降雨量还是其他极端降水指数(R99p、Rx5day、CWD、SDII、CDD 和 R20mm)的模拟能力都要优于使用的全球气候模式。Yu et al. (2015) 表明,WRF 能够更好地再现中国大陆区域降水的空间分布,年

周期变化以及季节变化,具有更好地显示年降水变化趋势的能力。在极端气候指数方面,WRF 同样表现出了更好的再现能力。由此可见,基于区域气候模式的动力降尺度技术在未来中国区域气候的模拟中有着一定的必要性。

但 IPSL-CM5A-LR 和 WRF 模式对极端降水指数趋势率的模拟与观测相比有所差别,且 WRF 模式对 IPSL-CM5A-LR 的改善不明显,两者之间也存在较大差异(Jiang et al., 2012; 王树舟和于恩涛, 2013; 彭冬冬等, 2016)。

在 RCP8.5 未来情境下,两气候模式均预估未来华东中部和北部区域年总降雨量明显升高,华东南部大部分区域年降雨日有所下降。年大雨日和平均日降雨强度在华东区域整体呈现增多趋势。这表明在气候变暖的环境下,华东大部分地区的弱降水频率减少,降水强度将增加(Bao et al., 2015)。其中年总降雨量、年大雨日和平均日降雨强度都呈现在华东北部的增加幅度大于华东中部,由此可见,华东北部的极端化程度可能大于华东中部以及南部。对于极端降雨贡献率和连续 5 d 最大降水量,WRF 模式的模拟结果在空间分布上与其模拟的年总降雨量、年大雨日和平均日降雨强度相似,在华东北部、中部和南部沿海区域都呈现增加趋势,南部部分区域减少;IPSL-CM5A-LR 的模拟结果与 WRF 相似,也模拟出了华东大部分区域极端降水将在未来增加,主要分布在华东东北部和南部,且北部的增加幅度最大。WRF 和 IPSL-CM5A-LR 对最长连续干旱日的模拟具有相同的增加趋势,表明未来在华东区域会出现强降水事件和干旱事件同时增加的情况。另外,独立样本 t 检验结果显示,变化显著的格点主要分布在增加或减少幅度较大的区域。

WRF 和 IPSL-CM5A-LR 模式对极端降水指数预估的空间分布模式有所差异,但总体上,都预估未来华东大部分区域的降雨强度、极端降雨总量呈现增加趋势,且在华东北部的增加幅度更大。在华东南部部分区域年总降雨量、年极端降雨日以及极端降雨贡献率有所下降(Zou and Zhou, 2013)。这种预估未来极端降水增加在中国的其他区域也被证明(Zhang et al., 2006; Xu et al., 2012; Sun and Ao, 2013; Zou and Zhou, 2013; Bao et al., 2015; Qin and Xie, 2016)。

基于本文中的评估,模式模拟对降水的模拟依然存在不确定性,在气候平均态方面的模拟要优于

变异性趋势模拟 (Gao et al., 2011; Jiang et al., 2012; Liu et al., 2013; 王树舟和于恩涛, 2013; 彭冬冬等, 2016)。这些不确定性包括未来温室气体排放情景的不确定性、气候模式发展水平的限制、用于检验气候模式结果的高分辨率观测资料不足以及人类对气候系统认知程度尚存在很大局限性等。这些不确定性不止区域气候模式本身具有的也包括全球气候模式传递的。这些不确定性同样存在于对气候变化的预估中。Knutti et al. (2010) 指出, 现在时期的模拟和未来时期的预估之间的明确关系还没有被批准。本文使用了单一的全球气候模式驱动单一的区域气候模式, Gao et al. (2011) 指出多模式集合是减少不确定性的一个重要方面。未来需要在改进模式的基础上, 进行多全球—多区域模式的模拟, 以得到中国华东地区未来极端降水变化更多和更可靠的信息, 并最终为气候变化的影响评估和适应服务。

参考文献 (References)

- Abbott M L. 2016. Independent sample *T* test [M]//Abbott M L. Using Statistics in the Social and Health Sciences with SPSS® and Excel®. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 207–254.
- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D5): D05109, doi:10.1029/2005JD006290.
- Bao J W, Feng J M, Wang Y L. 2015. Dynamical downscaling simulation and future projection of precipitation over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 120(16): 8227–8243, doi:10.1002/2015JD023275.
- Benestad R E, Hanssen-Bauer I, Chen D L. 2008. Empirical-Statistical Downscaling [M]. Hackensack, NJ: World Scientific Publishing Company, 300pp.
- Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State–NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 129(4): 569–585, doi:10.1175/1520-0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2.
- 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.
- Chen L, Frauenfeld O W. 2014. A comprehensive evaluation of precipitation simulations over China based on CMIP5 multimodel ensemble projections [J]. *J. Geophys. Res.*, 119 (10): 5767–5786, doi:10.1002/2013JD021190.
- 陈晓晨, 徐影, 姚遥. 2015. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估 [J]. *大气科学*, 39(6): 1123–1135. Chen Xiaochen, Xu Ying, Yao Yao. 2015. Changes in climate extremes over China in a 2°C, 3°C, and 4°C warmer world [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39 (6): 1123–1135, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14224.
- Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. 2004. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0) [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-464+STR, 226pp.
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81 (3): 417–426, doi:10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2.
- 高学杰. 2007. 中国地区极端事件预估研究 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (3): 162–166. Gao Xuejie. 2007. Researches in projection of extreme events in China [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 3 (3): 162–166, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.03.008.
- Gao X, Shi Y, Song R, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 100 (1–4): 73–86, doi:10.1007/s00703-008-0296-5.
- Gao Y H, Xue Y K, Peng W, et al. 2011. Assessment of dynamic downscaling of the extreme rainfall over East Asia using a regional climate model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (5): 1077–1098, doi:10.1007/s00376-010-0039-7.
- Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. 2012. Uncertainties in monsoon precipitation projections over China: Results from two high-resolution RCM simulations [J]. *Climate Research*, 52: 213–226, doi:10.3354/cr01084.
- Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 6(5): 381–386, doi:10.1080/16742834.2013.11447112.
- Guo J H, Huang G H, Wang X Q, et al. 2017. Investigating future precipitation changes over China through a high-resolution regional climate model ensemble [J]. *Earth's Future*, 5(3): 285–303, doi:10.1002/2016EF000433.
- 胡海洋, 胡轶佳, 钟中, 等. 2015. WRF 模式对中国夏季降水的动力降尺度模拟研究 [J]. *气象科学*, 35(4): 413–421. Hu Haiyang, Hu Yijia, Zhong Zhong, et al. 2015. Double nested dynamical downscaling research on summer precipitation over China with WRF model [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 35(4): 413–421, doi:10.3969/2014jms.0041.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341, doi:10.1175/MWR3199.1.
- Huang D Q, Zhu J, Zhang Y C, et al. 2013. Uncertainties on the simulated summer precipitation over eastern China from the CMIP5 models [J]. *J. Geophys. Res.*, 118(16): 9035–9047, doi:10.1002/jgrd.50695.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York,

- NY, USA: Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- 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.
- Jiang Z H, Song J, Li L, et al. 2012. Extreme climate events in China: IPCC-AR4 model evaluation and projection [J]. Climatic Change, 110, 385–401, doi:10.1007/s10584-011-0090-0.
- 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.
- Kain J S, Fritsch J M. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. J. Atmos. Sci., 47(23): 2784–2802, doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2784:AODEPM>2.0.CO;2.
- Knutti R, Furrer R, Tebaldi C, et al. 2010. Challenges in combining projections from multiple climate models [J]. J. Climate, 23(10): 2739–2758, doi:10.1175/2009JCLI3361.1.
- 孔祥慧, 毕训强. 2016. 利用区域气候模式对我国南方百年气温和降水的动力降尺度模拟 [J]. 气候与环境研究, 21(6): 711–724. Kong Xianghui, Bi Xunqiang. 2016. Simulation of temperature and precipitation during the last 100 years oversouthern China by a regional climate model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(6): 711–724, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16079.
- Koo M S, Hong S Y. 2010. Diurnal variations of simulated precipitation over East Asia in two regional climate models [J]. J. Geophys. Res., 115(D5): D05105, doi:10.1029/2009JD012574.
- Li W, Jiang Z H, Xu J J, et al. 2016. Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part II: Probabilistic projection [J]. J. Climate, 29(24): 8989–9004, doi:10.1175/JCLI-D-16-0377.1.
- Liu S Y, Gao W, Liang X Z. 2013. A regional climate model downscaling projection of China future climate change [J]. Climate Dyn., 41(7–8): 1871–1884, doi:10.1007/s00382-012-1632-5.
- Ma J H, Wang H J, Fan K. 2015. Dynamic downscaling of summer precipitation prediction over China in 1998 using WRF and CCSM4 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32(5): 577–584, doi:10.1007/s00376-014-4143-y.
- 彭冬冬, 周天军, 邹立维, 等. 2016. FGOALS-g2 模式模拟和预估的全球季风区极端降水及其变化 [J]. 大气科学, 40(5): 1059–1072. Peng Dongdong, Zhou Tianjun, Zou Liwei, et al. 2016. The FGOALS-g2 simulation of global monsoon extreme precipitation and future projection [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40(5): 1059–1072, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15243.
- Qin P H, Xie Z H. 2016. Detecting changes in future precipitation extremes over eight river basins in China using RegCM4 downscaling [J]. J. Geophys. Res., 121(12): 6802–6821, doi:10.1002/2016JD024776.
- Qin P H, Xie Z H, Yuan X. 2013. Incorporating groundwater dynamics and surface/subsurface runoff mechanisms in regional climate modeling over river basins in China [J]. Adv. Atmos. Sci., 30(4): 983–996, doi:10.1007/s00376-012-2095-7.
- Qin P H, Xie Z H, Wang A W. 2014. Detecting changes in precipitation and temperature extremes over China using a regional climate model with water table dynamics considered [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 7(2): 103–109, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0060.
- Sato T, Xue Y K. 2013. Validating a regional climate model's downscaling ability for East Asian summer monsoonal interannual variability [J]. Climate Dyn., 41(9–10): 2411–2426, doi:10.1007/s00382-012-1616-5.
- Sillmann J, Kharin V V, Zhang X, et al. 2013a. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate [J]. J. Geophys. Res., 118(4): 1716–1733, doi:10.1002/jgrd.50203.
- Sillmann J, Kharin V V, Zwiers F W, et al. 2013b. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections [J]. J. Geophys. Res., 118(6): 2473–2493, doi:10.1002/jgrd.50188.
- Sun J Q, Ao J. 2013. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1395–1401, doi:10.1007/s11434-012-5542-z.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, et al. 2010. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China and their possible change [J]. J. Geophys. Res., 115(D16): D16110, doi:10.1029/2009JD013541.
- 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.
- Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection [J]. Meteor. Z., 21(3): 279–304, doi:10.1127/0941-2948/2012/0330.
- 王树舟, 于恩涛. 2013. 基于 MIROC/WRF 嵌套模式的中国气候降尺度模拟 [J]. 气候与环境研究, 18(6): 681–692. Wang Shuzhou, Yu Entao. 2013. Dynamical downscaling simulation over China using the nested MIROC/WRF model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18(6): 681–692, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12068.
- 吴蔚, 穆海振, 梁卓然, 等. 2016. CMIP5 全球气候模式对上海极端气温和降水的情景预估 [J]. 气候与环境研究, 21(3): 269–281. Wu Wei, Mu Haizhen, Liang Zhuoran, et al. 2016. Projected changes in extreme temperature and precipitation events in Shanghai based on CMIP5 simulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(3): 269–281, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.14225.
- Xu J Y, Shi Y, Gao X J. 2012. Changes in extreme events as simulated by a high-resolution regional climate model for the next 20–30 years over China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5(6): 483–488, doi:10.1080/16742834.2012.11447044.
- 徐集云, 石英, 高学杰, 等. 2013. RegCM3 对中国 21 世纪极端气候事件变化的高分辨率模拟 [J]. 科学通报, 58(8): 724–733. Xu Jiyun, Shi Ying, Gao Xuejie, et al. 2013. Projected changes in climate extremes over China in the 21st century from a high resolution regional climate model (RegCM3) [J]. Chinese Science Bulletin, 58(12): 1443–1452, doi:10.1007/s11434-012-5548-6.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征 [J]. 气候与环境研究, 13(1): 75–83. Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. Climatic and Environmental Research (in

- Chinese), 13(1): 75–83, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2008.01.10.
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2011. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003 [J]. *Climate Dyn.*, 36(11–12): 2399–2417, doi:10.1007/s00382-009-0735-0.
- Yu E T, Sun J Q, Chen H P, et al. 2015. Evaluation of a high-resolution historical simulation over China: Climatology and extremes [J]. *Climate Dyn.*, 45(7–8): 2013–2031, doi:10.1007/s00382-014-2452-6.
- Yuan X, Liang X Z, Wood E F. 2012. WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008 [J]. *Climate Dyn.*, 39(7–8): 2041–2058, doi:10.1007/s00382-011-1241-8.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *J. Climate*, 18(7): 1096–1108, doi:10.1175/JCLI-3318.1.
- Zhang J Y, Wu L Y, Dong W J. 2011. Land–atmosphere coupling and summer climate variability over East Asia [J]. *J. Geophys. Res.*, 116(D5): D05117, doi:10.1029/2010JD014714.
- Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. 2006. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33(24): L24702, doi:10.1029/2006GL027229.
- Zou L W, Zhou T J. 2013. Near future (2016–40) summer precipitation changes over China as projected by a regional climate model (RCM) under the RCP8.5 emissions scenario: Comparison between RCM downscaling and the driving GCM [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(3): 806–818, doi:10.1007/s00376-013-2209-x.