



全球模式FGOALS-f和NICAM16大气分量模式水平分辨率提高对亚洲季风区极端降水模拟的影响

何编^{1*}, 刘潇喻^{1,2}, 包庆^{1,4}, 刘屹岷^{1,3}, 吴国雄^{1,3}

1. 中国科学院大气物理研究所, 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2. 广东海洋大学海洋与气象学院, 湛江 524088

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

4. 中国科学院大学应急管理学院, 北京 100049

* 联系人, E-mail: heb@lasg.iap.ac.cn

2024-10-28 收稿, 2025-01-23 修回, 2025-04-07 接受, 2025-09-10 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFF0802003)和国家自然科学基金(42288101, 42475020)资助

摘要 本文介绍了中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)最新研发的FGOALS-f气候系统模式的大气分量模式FAMIL 12.5 km高分辨率版本以及参加CMIP6的日本NICAM16系列版本模式对极端降水的模拟情况, 揭示了全球大气模式水平分辨率提高到10 km左右后对亚洲季风降水模拟的影响. 主要结果表明, 西太平洋暖池区的降水模拟对分辨率的提高最为敏感. 提高分辨率减少了FGOALS-f模式西太平洋降水模拟的正偏差, 并能够较好地模拟300~500 mm d⁻¹量级的极端降水. 两个模式都能够较好的模拟出中国地区持续性极端降水的空间分布和强度特征, 并且10 km的高分辨率版本对这三个指数的模拟技巧最高, 表明了提高模式水平分辨率是提高模式对中国地区极端降水的长期模拟和预估准确率的有效途径. 值得注意的是, NICAM16高分辨率模式模拟的极端降水强度偏强, 而FGOALS-f偏弱. 这说明进一步研发与分辨率相适应的物理过程是提高模式模拟能力的关键.

关键词 高分辨率, 大气模式, 极端降水, 气候变化, FGOALS-f

数值模式是研究气候系统演变规律和开展天气气候预测的最核心工具. 在提高模式的模拟和预测技巧上, 模式水平分辨率的提高具有重要作用. 分辨率提高后能够更准确的捕获中小尺度对流和复杂地形区的环流特征, 有助于提高极端降水的模拟和预测^[1~4]. 因此, 21世纪以来, 高分辨率大气模式研发逐渐成为国际最前沿和热点的发展方向. 在最新的第六届的国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)子计划, 高分辨率模式比较计划(High Resolution Model Intercomparison Project, HighResMIP)中^[5], 共有全球17个模式参加, 其中7个模式水分辨率达

到了25 km, 而高分辨率的非静力二十面体大气模式(nonhydrostatic ICosahedral atmospheric model, NICAM16)模式水平分辨率达到了10 km左右(version 9S), 是参加该计划分辨率最高的大气模式.

中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)研发的25 km版本的高分辨率气候系统模式(the finite volume version of flexible global ocean-atmosphere-land system model, CAS FGOALS-f3-H)参加了CMIP6 HighResMIP, 其有限体积大气环流模式(finite-volume atmospheric model of IAP LASG, FAMIL)水平分辨率达到了25 km左右,

引用格式: 何编, 刘潇喻, 包庆, 等. 全球模式FGOALS-f和NICAM16大气分量模式水平分辨率提高对亚洲季风区极端降水模拟的影响. 科学通报, 2025, 70: 6153–6163

He B, Liu X, Bao Q, et al. The impact of increased horizontal resolution in the atmospheric components of global models FGOALS-f and NICAM16 on the simulation of extreme precipitation in the Asian monsoon region (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 6153–6163, doi: [10.1360/TB-2024-1123](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1123)

并在青藏高原陡峭地形区降水、热带季节振荡,以及西太平洋台风的模拟上表现出较高的模拟能力^[6].在面向下一届CMIP7的模式比较计划研发过程中,我们进一步将大气模式的水平分辨率提高到了12.5 km左右,并在近期完成了1979~2021年近40多年的大气模式比较计划(AMIP)标准试验.为了理解模式分辨率提高对极端降水的模拟的影响,本文选取了中国和日本两个分辨率最高(10 km左右)的模式,比较了两个模式从低分辨率(100 km左右)到高分辨率几组AMIP试验的模拟结果.为进一步理解高分辨率模式模拟偏差和提高模拟技巧的途径提供科学依据和参考.

1 数据、方法、模式和试验介绍

1.1 观测降水和模式试验数据

本文将全球降水计划(GPM)卫星IMERG降水产品作为降水的观测数据,其中IMERG V06 Final经过全球降水气候中心(GPCC)站点校正及算法处理,对卡尔曼滤波方法和指标质量进行了改进,具有更高的准确性^[7],数据可从NASA官网(<https://pmm.nasa.gov>)获得.本文选用2001~2010年的IMERG V06 Final数据产品,水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为30 min.

本文所采用的站点小时降水资料来源于中国气象局(<https://data.cma.cn/en>)提供的中国2481个国家级地面气象站小时降水数据集,选用时段为2001~2010年.该数据集经过了严格的质量控制,包括异常值识别、内部一致性检查、空间和时间一致性检查,以及对可疑和错误数据的人工检查和修正,确保了数据的高可靠性和准确性.

1.2 极端降水指数定义

持续降水事件的阈值(1 mm)根据气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)对湿日的定义来确定.对每个站点或格点,仅当从某日开始,连续 n 天($n \geq 2$ d)的日降水量都大于等于1 mm,则认为出现一次持续时间为 n 天的降水事件,以出现降水的第一天作为持续降水事件的开始.各持续降水事件相互独立,避免重复计算.取2001~2010年每年夏季(6~8月)持续时间最长的降水事件作为该年的极端持续降水事件.本研究考虑了三个极端降水指数:持续湿日指数(CWD)、极端持续性降水的总降水量(TPA)和日降水强度(DPI).

(1) CWD: CWD指数由ETCCDI推荐,定义为每年

夏季极端持续降水事件的持续天数(单位: d).

(2) TPA: TPA定义为每年夏季极端持续降水事件的总降水量(单位: mm).若该年夏季多次出现最大持续降水事件,则只考虑总降水量最大的事件:

$$\text{TPA} = \text{Max} \left| \sum_{i=1}^{\text{CWD}} \text{pre}_i \right|, \quad (1)$$

其中, i 表示天, pre_i 表示该次持续降水事件在第 i 天的日降水量.

(3) DPI: DPI定义为每年夏季极端持续降水事件的日降水强度(单位: mm d^{-1}):

$$\text{DPI} = \frac{\text{TPA}}{\text{CWD}}. \quad (2)$$

1.3 FGOALS-f和NICAM16 系列版本模式和试验介绍

FGOALS-f是LASG开发的全球气候模式.FGOALS-f耦合模式版本包含低分辨率FGOALS-f3-L、高分辨率FGOALS-f3-H和超高分辨率FGOALS-f3-HH三个版本,模式及数据描述详见^[6,8,9].其大气分量是FAMIL^[10,11],采用立方球面网格静力平衡框架,大气模式中每个网格单元包含的网格数分别为96个(C96)、384个(C384)和768个(C768),对应水平分辨率分别为 1° (~100 km)、 0.25° (~25 km)和 0.125° (~12.5 km).垂直方向模式采用混合坐标系32层,模式层顶为2.16 hPa(~45 km).模式的物理过程主要包括尺度自适应的显示对流计算方案^[12]、基于湍流动能(turbulent kinetic energy, TKE)诊断的边界层方案^[13]、单参数的云微物理方案^[14]、RRTMG辐射传输方案^[15]以及重力波拖曳方案^[16]等.对比这三个分辨率版本,除了提高分辨率所必要的减少模式积分时间步长以满足Courant-Friedrichs-Lewy判据(CFL Criterion)以外,在物理过程上没有进一步修改,以满足参加CMIP6 HighResMIP的试验要求.

NICAM16由日本国立海洋研究开发机构、大气与海洋研究所、东京大学、理化学研究所联合开发^[17].模式基于正二十面体网格非静力平衡框架,包含三种水平分辨率,分别为NICAM16-7S(56 km网格)、NICAM16-8S(28 km网格)和NICAM16-9S(14 km网格),物理方案、参数以及初始和边界条件在不同的水平分辨率间保持一致.模式采用混合坐标系,垂直方向共有38层,模型顶部高度约为40 km.

根据CMIP6试验要求,本文所有AMIP试验都采用观测的海温和海冰进行强迫.另外,包括温室气体等在

内的所有外强迫场随时间变化。除NICAM16-9S以外,所有试验数据都为2001~2010十年的结果。由于数据源本身限制, NICAM16-9S为1951~1960年十年的结果,但从气候态的角度看,十年平均有一定的代表性。

2 高分辨率模式对气候平均降水和极端降水的模拟

图1给出了观测和不同分辨模式模拟的北半球夏季(6~8月)十年气候平均的小时平均降水率空间分布图。从观测的总体分布上看,降水的极大值中心主要位于孟加拉湾北部和青藏高原南部,以及赤道东太平洋地区。受亚洲夏季风系统的影响,全球强降水区域主要位于印度洋、海洋性大陆以及西太平洋地区。此外,赤道略偏北存在热带辐合带的条状降水分布型。从两个模式的低分辨率模拟结果上看(图1(b1), (b2)),两个模式都基本能够模拟出全球降水的主要分布型。然而,模式也存在较为系统性的偏差。例如两个模式的偏差场(图1(e1), (e2))都表现为高估了西太平洋以及热带太平洋地区的降水,而低估了亚洲大陆及热带印度洋、海洋性大陆以及北美大陆和南美大陆北部的降水。相比较而言, FGOALS-f3-L模式对西太平洋地区的降水明显模拟偏强,是主要的模拟偏差,而NICAM16-7S模式对西太平洋降水的模拟量级与观测相当,但是分布上南北半球两个降水中心较为分散,存在“双热带辐合带”模拟现象。此外, NICAM16-7S模式对热带太平洋地区和热带大西洋地区降水的模拟明显高估。

两个模式的分辨率提高到25 km左右后(图1(c1), (c2)),高分辨率模式对全球降水分布的模拟在大尺度分布上没有太大变化,而局部降水分布的细节上模拟更加突出。此外,在西太平洋地区,两个高分辨率模式的降水模拟量级都有所减少。从偏差场上(图1(f1), (f2))可以看出, FGOALS-f3-H在西太平洋地区模拟的降水正偏差相比低分辨率模式有所减少,而NICAM16-8S相比其低分辨率版本在西太平洋出现了较为明显的负偏差。观测当中西太平洋的降水中心,在25 km的版本当中没有很好的模拟出来(图1(c2))。当模式分辨率进一步提高到10 km左右时(图1(d1), (d2)), FGOALS-f3-HH模式模拟的降水大尺度分布相对于低分辨率版本基本没有发生变化,而西太平洋的降水模拟正偏差进一步减少(图1(g1))。而NICAM16-9S模拟的全球大尺度降水分布与低分辨率版本出现了较大差异,热带印度洋和海洋性大陆地区降水几乎消失,出现了较大的负偏差分

布(图1(g2))。两个高分辨率模式的模拟差异可能跟模式分别采用静力平衡假设和非静力平衡假设方案相关。NICAM16模式的非静力平衡假设方案在模式水平分辨率提高后对热带强降水的模拟影响很大。

有不少研究表明模式水平分辨率对极端降水的模拟性能较为敏感,提高模式分辨率应有助于模式对极端降水能力的提高^[5,18-21]。我们计算了两个模式不同分辨率的降水极值(分别标注于图1(a), (b1), (b2), (c1), (c2), (d1), (d2)中右上角)。相比于GPM卫星观测的 1.43 mm h^{-1} , FGOALS-f系列模式模拟的降水极值随着分辨率增加明显增多,相比观测偏强。即使是100 km低分辨率的FGOALS-f3-L,其最大降水强度也达到了 1.65 mm h^{-1} 。对NICAM16系列模式来说,其最大降水强度也有类似特征:其50 km低分辨率版本降水极值达 1.74 mm h^{-1} ,而其25 km版本的降水极值却略有所下降为 1.5 mm h^{-1} ,其10 km左右版本迅速增加到 2.42 mm h^{-1} ,表现出较为明显的非线性变化。

为了进一步理解两个模式对亚印太季风区极端降水模拟的特征,图2中计算了观测和模式对降水模拟的概率分布特征。从图中可以看出,对于暴雨级别以上($\geq 50 \text{ mm d}^{-1}$)的降水模拟,在50~200 mm d^{-1} 的降水强度上, FGOALS系列模式和NICAM16-9S都低估了降水发生的频次。此外, FGOALS-f3-L严重低估了200 mm d^{-1} 以上的降水频次,而分辨率提高到25和12.5 km后,极端降水频次的模拟得到很大的改进,更加接近于观测,仅在500 mm d^{-1} 以上略有低估。相反的, NICAM16系列模式在200 mm d^{-1} 以上的降水频次都有所高估,其分辨率提高到14 km后(9S),反而是降低了极端降水的模拟频次,减少了模拟偏差。

对于中国地区的极端降水模拟来说,考虑到站点资料一般作为最接近真实的观测资料,故我们采用了站点观测资料来更准确的分析中国地区极端降水观测特征。基于模式数据计算极端降水指数时首先在原始格点分辨率上进行计算,再将格点数据得到的指数统一双线性插值到站点位置进行模式评估。此外,我们计算了3个极端降水指数(CWD、TPA、DPI),从降水的持续时间(CWD)、总降水强度(TPA)和平均日降水强度(DPI)这三个维度来评估模式的模拟能力。图3给出了观测和FGOALS模式不同分辨率模拟的结果。从CWD的观测和模拟上看,观测中主要表现为沿西藏东南侧和云南西部地区存在持续时间较长的降水,以及我国大陆东南部沿海省份存在CWD大值区(图3(a))。100 km

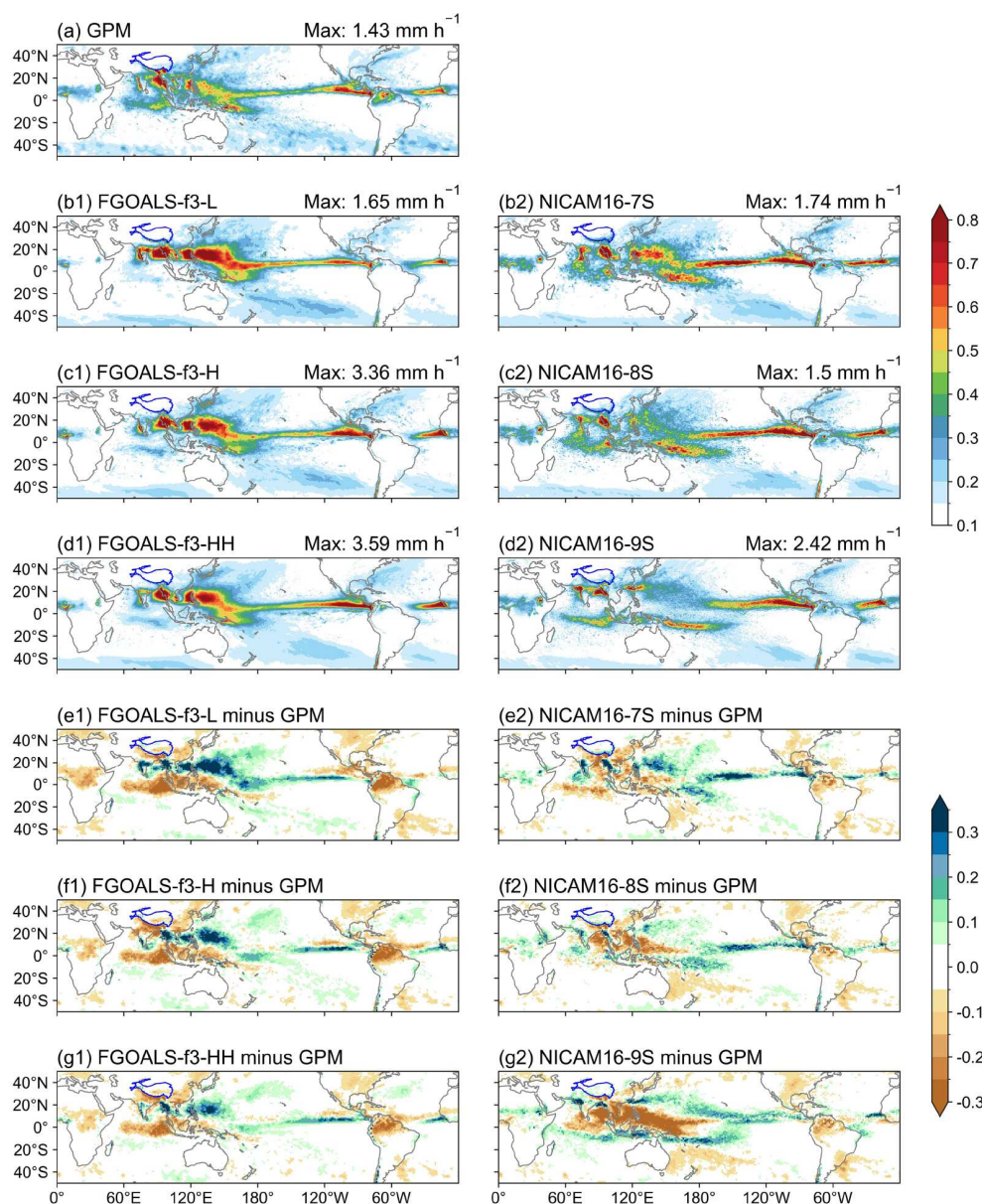


图 1 2001~2010年北半球夏季(6~8月)逐小时分辨率(mm h^{-1})的气候平均降水空间分布和模拟偏差图. (a) 卫星观测(GPM)的结果; (b1) FGOALS-f3-L AMIP试验(100 km)的结果; (c1) FGOALS-f3-H AMIP试验(25 km)的结果; (d1) FGOALS-f3-HH AMIP试验(12.5 km)的结果; (b2) NICAM16-7S AMIP试验(50 km)的结果; (c2) NICAM16-8S AMIP试验(25 km)的结果; (d2) NICAM16-9S AMIP试验(14 km)的结果. (e1) FGOALS-f3-L AMIP试验模拟偏差; (f1) FGOALS-f3-H AMIP试验模拟偏差; (g1) FGOALS-f3-HH AMIP试验模拟偏差; (e2) NICAM16-7S AMIP试验模拟偏差; (f2) NICAM16-8S AMIP试验模拟偏差; (g2) NICAM16-9S AMIP试验模拟偏差

Figure 1 Spatial distribution of climatology of precipitation (mm h^{-1}) in summer during 2001–2010 in the Northern Hemisphere and simulation biases. (a) Satellite observation (GPM); (b1) FGOALS-f3-L AMIP experiment (100 km); (c1) FGOALS-f3-H AMIP experiment (25 km); (d1) FGOALS-f3-HH AMIP experiment (12.5 km); (b2) NICAM16-7S AMIP experiment (50 km); (c2) NICAM16-8S AMIP experiment (25 km); (d2) NICAM16-9S AMIP experiment (14 km). (e1) Bias of FGOALS-f3-L AMIP experiment; (f1) bias of FGOALS-f3-H AMIP experiment; (g1) bias of FGOALS-f3-HH AMIP experiment; (e2) bias of NICAM16-7S AMIP experiment; (f2) bias of NICAM16-8S AMIP experiment; (g2) bias of NICAM16-9S AMIP experiment

的版本可以较好的模拟CWD的空间分布特征, 空间相关系数达0.62, 均方根误差为1.87(图3(d)). 分辨率分别

提高到25和12.5 km后(图3(g, j)), 模式对CWD空间分布的模拟有一定的提升能力, 12.5 km版本空间相关系

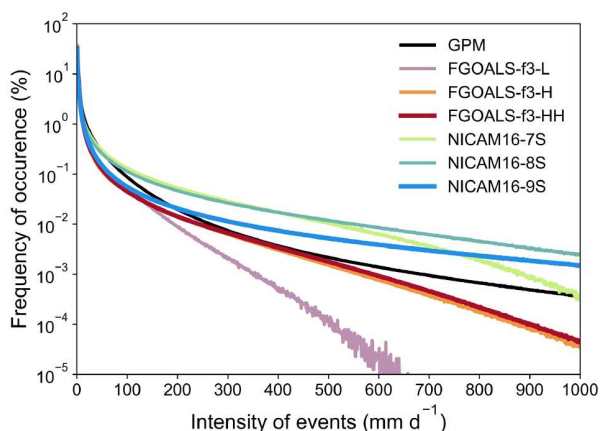


图2 不同分辨率模式模拟的亚印太季风区(20°S~30°N, 60°E~180°E)降水发生概率分布图

Figure 2 Probability distribution of precipitation occurrence in summer in the Asian-Australian monsoon region (20°S~30°N, 60°E~180°E) simulated by models with different horizontal resolutions

数提高到0.64。但是,从均方根误差上看,分辨率提高后,模式模拟的CWD均方根误差变大了,这表明分辨率提高对极端降水的持续时间会更加高估。

从观测的总降水强度(TPA)上看(图3(b)),强降水主要发生在中国的中部和南部地区,特别是两广地区的强度最大。FGOALS低分辨率版本(图3(e))可以较好的模拟出中国南部沿海地区的持续性降水强度,但是中部地区的持续性强降水模拟能力偏低。分辨率提高后(图3(h), (k)),东南沿海局部地区的总降水强度模拟得到改善,其中12.5 km的版本空间相关系数为0.64,均方根误差为47.36,相比低分辨率版本都有所提高。我们进一步分析了模式对日降水强度(DPI)的模拟能力(图3(c), (f), (i), (l))。结果表明,观测的DPI分布与TPA总体较为相似,而模式对DPI的总体模拟能力要高于对TPA的模拟。12.5 km的高分辨率版本(图3(l))较好地模拟出了DPI的空间范围和强度特征,其空间相关系数最高,均方根误差也最低。

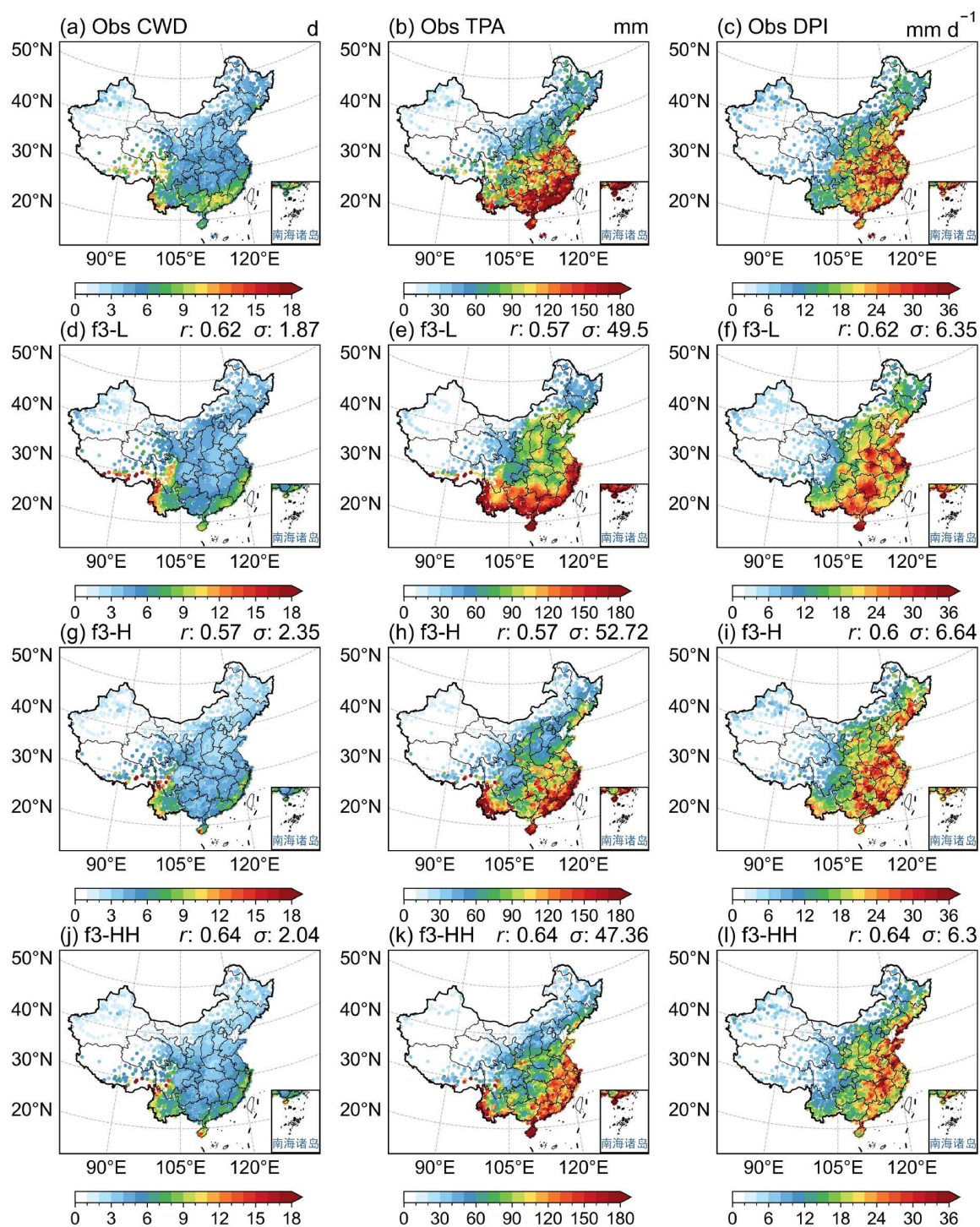
图4给出了NICAM16系列版本对这三个指数的模拟技巧。从降水的持续时间模拟上看,NICAM16系列版本能够抓住CWD的大尺度分布特征,但是中国南部沿海地区的CWD大值区在中低分辨率版本没有很好的模拟出来(图4(d), (g)),而14 km左右的高分辨率版本的模拟能力有一定程度提高(图4(j)),但是高分辨率版本在中国中东部对CWD有所低估,因此空间相关系数相比中低分辨率有所降低。对总降水强度的模拟来说

(图4(b)),不同分辨率的NICAM16可以模拟出东南沿海的TPA大值区,但是受持续时间(CWD)的模拟偏差影响,中国中部及东部地区的TPA没有很好的模拟出来。25 km的高分辨率版本(图4(h))的空间相关系数为0.61,均方根误差为46.76,甚至比14 km的版本要好(图4(k)),说明提高分辨率并不能在所有极端降水指标上的有所提高。这一点在日降水强度(DPI)的模拟结果上也是类似的。25 km的模拟结果(图4(i))表现出了最好的模拟水平。

从图3, 4的对比可知,FGOALS-f模式和NICAM16模式在CWD和TPA这两个指数的空间分布上模拟结果还是比较接近的,而对于DPI的模拟具有一定的差异。例如,FGOALS-f3-HH (图3(l))模拟的DPI大值区主要位于中国东部,相比观测偏弱一些,而NICAM16-9S (图4(l))模拟的DPI大值区主要位于我国华南以及华北地区,强度相比观测有所偏强。造成这种差异的可能原因在于NICAM16模式采用了非静力平衡假设,因此其垂直速度的模拟在分辨率提高的情况下可以迅速增强,导致极端降水强度的模拟偏强。而FGOALS-f模式采用静力平衡假设,其垂直运动的模拟基于诊断,因此该模式模拟的极端降水强度相比NICAM16偏弱。我们在图5中比较了两个模式10 km左右高分辨率版本模拟的500 hPa垂直速度以及850 hPa水汽的空间分布特征。可以明显看出,NICAM16-9S模式模拟的垂直速度(图5(b))在中国地区明显强于FGOALS-f3-HH的模拟结果(图5(a))。此外,在低层的水汽分布上,NICAM16-9S模式模拟的水汽大值区集中于中国东部地区(图5(d)),也与图4(l)中极端降水强度分布较为一致,而FGOALS-f3-HH模拟的水汽(图5(c))在中国东部地区明显少于NICAM16-9S模式。因此,水汽条件和垂直运动差异是两个模式极端降水模拟强度差异的直接原因。

3 结论和讨论

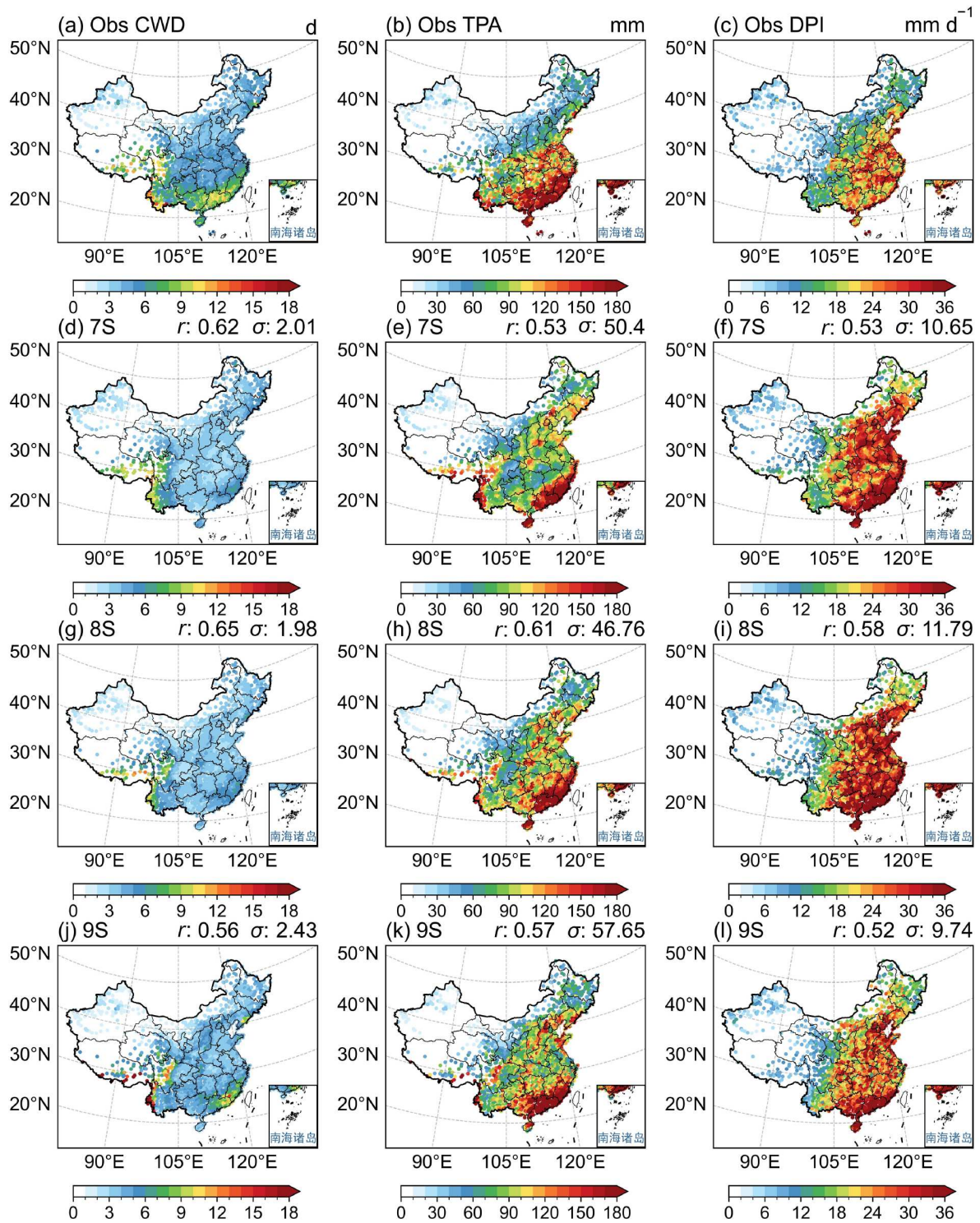
本文通过比较FGOALS-f和NICAM16系列版本的AMIP试验揭示了全球大气模式水平分辨率从100 km左右提高到10 km左右,对全球及亚洲夏季季风区极端降水模拟的影响。主要结果表明,随着分辨率的提高,两个模式极端降水量的极大值都有所提高,但是强度上比观测要偏强。从大尺度空间分布上来说,分辨率提高减少了模拟的西太平洋暖池区降水。FGOALS-f模式在该区域存在的降水正偏差在分辨率提高到12.5 km后明显减小,而NICAM16模式分辨率提高到14 km后,该区



审图号: GS京(2025)1104号

图 3 观测和FGOALS模式不同分辨率模拟的中国地区极端降水指数。(a) 观测的CWD; (b) 观测的TPA; (c) 观测的DPI。(d, e, f)分别与(a, b, c)相同,但为FGOALS-f3-L的模拟结果。(g, h, i)分别与(a, b, c)相同,但为FGOALS-f3-H的模拟结果。(j, k, l)分别与(a, b, c)相同,但为FGOALS-f3-HH的模拟结果。 r 为空间相关系数, σ 为均方根误差

Figure 3 Extreme precipitation indices over China based on observations and FGOALS simulations with different model resolutions. (a) Observed CWD; (b) observed TPA; (c) observed DPI. (d, e, f) As in (a, b, c), but for FGOALS-f3-L; (g, h, i) as in (a, b, c), but for FGOALS-f3-H; (j, k, l) as in (a, b, c), but for FGOALS-f3-HH. r denotes the spatial correlation coefficient, and σ the root-mean-square error (RMSE)



审图号: GS京(2025)1104号

图 4 观测和NICAM16模式不同分辨率模拟的中国地区极端降水指数。(a) 观测的CWD; (b) 观测的TPA; (c) 观测的DPI; (d~f) NICAM16-7S AMIP试验(50 km)的结果; (g~i) NICAM16-8S AMIP试验(25 km)的结果; (j~l) NICAM16-9S AMIP试验(14 km)的结果

Figure 4 Extreme precipitation indices over China based on observations and NICAM16 simulations with different model resolutions. (a) Observed CWD; (b) observed TPA; (c) observed DPI. (d~f) Results from the NICAM16-7S AMIP experiment (50 km); (g~i) results from the NICAM16-8S AMIP experiment (25 km); (j~l) results from the NICAM16-9S AMIP experiment (14 km)

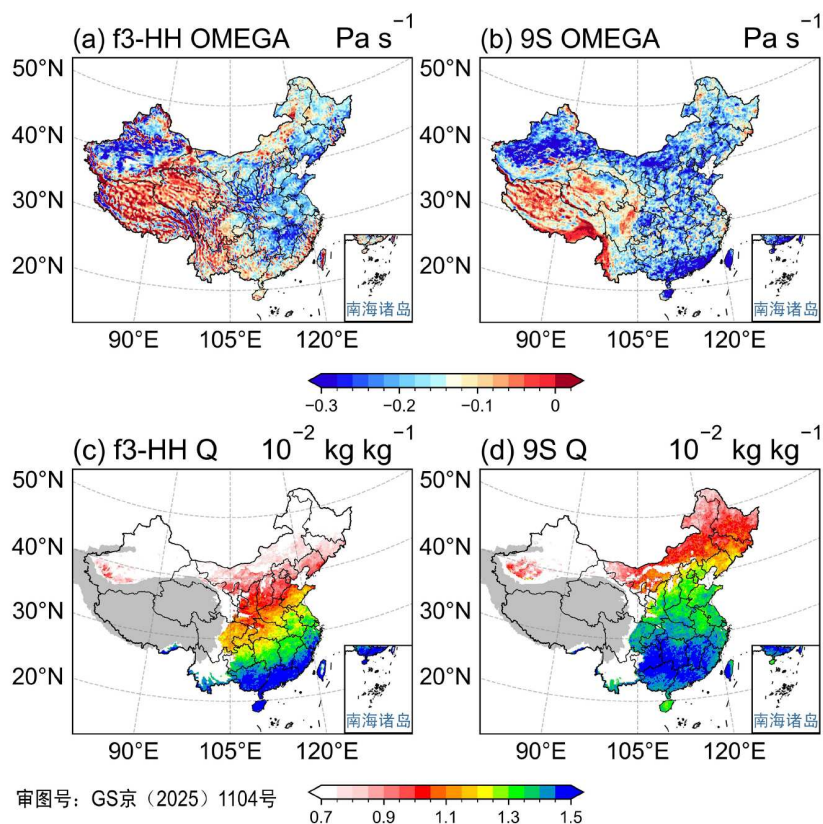


图5 极端降水事件合成的500 hPa垂直速度(Pa s^{-1})以及850 hPa比湿(kg kg^{-1})的模拟结果. (a) FGOALS-f3-HH模拟的垂直速度; (b) NICAM16-9S模拟的垂直速度; (c) FGOALS-f3-HH模拟的比湿; (d) NICAM16-9S模拟的比湿

Figure 5 Simulated vertical velocity (Pa s^{-1}) at 500 hPa and specific humidity (kg kg^{-1}) at 850 hPa for extreme precipitation events. (a) Vertical velocity from FGOALS-f3-HH; (b) vertical velocity from NICAM16-9S; (c) specific humidity from FGOALS-f3-HH; (d) specific humidity from NICAM16-9S

域的主降水雨带几乎消失. 从亚印太地区降水的概率分布上看, FGOALS-f模式25和12.5 km版本能够较好的模拟 $300\sim 500 \text{ mm d}^{-1}$ 量级的极端降水, 而低估 500 mm d^{-1} 以上的极端降水. 相反, NICAM16系列版本都高估了该区域的极端降水, 14 km分辨率的版本在 200 mm d^{-1} 量级以上更加接近观测. 从中国区域的3个极端降水指数的模拟上看, 两个模式都能够较好的模拟出这三个指数的空间分布特征, 其中FGOALS-f 12.5 km的高分辨率版本对这三个指数的模拟技巧相比低分辨率都有所提高, 表明了水平分辨率提升有助于提高模式对中国地区极端降水的长期模拟和预估准确率.

本文评估了FGOALS-f大气分量模式FAMIL和日本NICAM16模式不同分辨率下AMIP试验对亚洲季风区极端降水的模拟能力. 值得注意的是, 无论从气候平均态还是极端降水概率分布的模拟上来说, 虽然两

个模式高分辨率AMIP试验的模拟结果有一定改进, 但仍旧存在一些模拟偏差, 这说明提高模式分辨率仅是改进极端降水模拟的条件之一, 发展与分辨率相适应的物理过程方案, 解决对流“灰区问题”是改进高分辨率极端降水模拟能力的重要途径^[22~25]. 此外, 还应关注天气-次季节过程的模拟, 例如在西太平洋地区, 夏季台风的路径和强度模拟是导致西太平洋和中国东部地区极端降水成因的关键因素^[26~30], 因此加强台风等天气-次季节系统的机理和模拟研究也是提高亚洲季风区极端降水模拟和预测能力的重要途径之一. 最后, 本文仅评估了AMIP试验的模拟结果, 然而固定SST无法真实模拟海气界面交换的过程. 有研究表明, 海气耦合过程对MJO, 台风等次季节过程的准确模拟有重要作用^[31~34]. 因此, 利用海气耦合模式开展高分辨率模拟也是提高亚洲季风区极端降水模拟的另一重要途径.

致谢 感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供计算资源支持。

参考文献

- 1 Huang Z L, Wu X F, Mao J Y. An Evaluation for impacts of the horizontal resolution of CMIP6 models on simulating extreme summer rainfall over southwest China (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2021, 40: 1470–1483 [黄子立, 吴小飞, 毛江玉. CMIP6模式水平分辨率对模拟我国西南地区夏季极端降水的影响评估. *高原气象*, 2021, 40: 1470–1483]
- 2 Chen Q L, Liu H, Hu M, et al. A review of the studies on extreme precipitation in the complex terrain region on the eastern side of the Tibetan Plateau (in Chinese). *Torrent Rain Disast*, 2024, 43: 255–265 [陈权亮, 刘皓, 胡森, 等. 青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展. *暴雨灾害*, 2024, 43: 255–265]
- 3 Covey C, Gleckler P J, Doutriaux C, et al. Metrics for the diurnal cycle of precipitation: toward routine benchmarks for climate models. *J Clim*, 2016, 29: 4461–4471
- 4 Song J, Song F, Feng Z, et al. Realistic precipitation diurnal cycle in global convection-permitting models by resolving mesoscale convective systems. *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL109945
- 5 Haarsma R J, Roberts M J, Vidale P L, et al. High resolution model intercomparison project (HighResMIP v1.0) for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 2016, 9: 4185–4208
- 6 Bao Q, Liu Y, Wu G, et al. CAS FGOALS-f3-H and CAS FGOALS-f3-L outputs for the high-resolution model intercomparison project simulation of CMIP6. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2020, 13: 576–581
- 7 Jin D, Oreopoulos L, Lee D, et al. Cloud-precipitation hybrid regimes and their projection onto IMERG precipitation data. *J Appl Meteor Climatol*, 2021, 60: 733–748
- 8 He B, Bao Q, Wang X, et al. CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 historical atmospheric model intercomparison project simulation. *Adv Atmos Sci*, 2019, 36: 771–778
- 9 He B, Yu Y, Bao Q, et al. CAS FGOALS-f3-L model dataset descriptions for CMIP6 DECK experiments. *Atmos Ocean Sci Lett*, 2020, 13: 582–588
- 10 Zhou L, Bao Q, Liu Y, et al. Global energy and water balance: characteristics from Finite-volume Atmospheric Model of the IAP/LASG (FAMIL1). *J Adv Model Earth Syst*, 2015, 7: 1–20
- 11 Li J, Bao Q, Liu Y, et al. Evaluation of FAMIL2 in simulating the climatology and seasonal-to-interannual variability of tropical cyclone characteristics. *J Adv Model Earth Syst*, 2019, 11: 1117–1136
- 12 Bao Q, Li J. Progress in climate modeling of precipitation over the Tibetan Plateau. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 486–487
- 13 Bretherton C S, Park S. A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. *J Clim*, 2009, 22: 3422–3448
- 14 Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J Clim Appl Meteor*, 1983, 22: 1065–1092
- 15 Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes. *J Quantit Spectr Radiative Transfer*, 2005, 91: 233–244
- 16 Palmer T N, Shutts G J, Swinbank R. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parametrization. *Quart J R Meteorol Soc*, 1986, 112: 1001–1039
- 17 Kodama C, Ohno T, Seiki T, et al. The nonhydrostatic icosahedral atmospheric model for CMIP6 HighResMIP simulations (NICAM16-S): experimental design, model description, and impacts of model updates. *Geosci Model Dev*, 2021, 14: 795–820
- 18 Wehner M F, Reed K A, Li F, et al. The effect of horizontal resolution on simulation quality in the Community Atmospheric Model, CAM 5.1. *J Adv Model Earth Syst*, 2014, 6: 980–997
- 19 Roberts M J, Camp J, Seddon J, et al. Impact of model resolution on tropical cyclone simulation using the HighResMIP–PRIMAVERA multimodel ensemble. *J Clim*, 2020, 33: 2557–2583
- 20 Kinter Iii J L, Cash B, Achuthavarier D, et al. Revolutionizing climate modeling with project Athena: a multi-institutional, international collaboration. *Bull Am Meteorol Soc*, 2013, 94: 231–245
- 21 Bador M, Boé J, Terray L, et al. Impact of higher spatial atmospheric resolution on precipitation extremes over land in global climate models. *JGR Atmos*, 2020, 125: e2019JD032184
- 22 Sun Y, Yi L, Zhong Z, et al. Performance of a new convective parameterization scheme on model convergence in simulations of a tropical cyclone at grey-zone resolutions. *J Atmos Sci*, 2014, 71: 2078–2088
- 23 Kramer M, Heinzeller D, Hartmann H, et al. Assessment of MPAS variable resolution simulations in the grey-zone of convection against WRF model results and observations. *Clim Dyn*, 2020, 55: 253–276
- 24 Tomassini L, Willett M, Sellar A, et al. Confronting the convective gray zone in the global configuration of the Met Office Unified Model. *J Adv*

- [Model Earth Syst](#), 2023, 15: e2022MS003418
- 25 Yu H Y, Li P X, Wang K C. A review on convection-permitting modeling of extreme precipitation (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 6137–6152 [余弘泳, 李普曦, 王开存. 对流可分辨尺度极端降水模拟研究综述. *科学通报*, 2025, 70: 6137–6152]
- 26 Cao J, Zhao H, Wang B, et al. Hemisphere-asymmetric tropical cyclones response to anthropogenic aerosol forcing. *Nat Commun*, 2021, 12: 6787
- 27 Cao J, Wang H, Zhao H, et al. Reversed and comparable climate impacts from historical anthropogenic aerosol and GHG on global-scale tropical cyclone genesis potential. *Environ Res Lett*, 2022, 17: 094027
- 28 Moon Y, Kim D, Wing A A, et al. An evaluation of tropical cyclone rainfall structures in the HighResMIP simulations against satellite observations. *J Clim*, 2022, 35: 7315–7338
- 29 Shan K Y, Yu X P, Song F F. Global warming is advancing the seasonal cycle of intense tropical cyclones (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 4885–4886 [单楷越, 余锡平, 宋丰飞. 全球变暖导致超强台风季节提前. *科学通报*, 2023, 68: 4885–4886]
- 30 Lee M, Min S K, Cha D H. Convection-permitting simulations reveal expanded rainfall extremes of tropical cyclones affecting the Republic of Korea due to anthropogenic warming. *npj Clim Atmos Sci*, 2023, 6: 176
- 31 Li H, Sriver R L. Impact of air–sea coupling on the simulated global tropical cyclone activity in the high-resolution Community Earth System Model (CESM). *Clim Dyn*, 2019, 53: 3731–3750
- 32 Pegion K, Kirtman B P. The impact of air–sea interactions on the simulation of tropical intraseasonal variability. *J Clim*, 2008, 21: 6616–6635
- 33 Hiron L C, Klingaman N P, Woolnough S J. The impact of air–sea interactions on the representation of tropical precipitation extremes. *J Adv Model Earth Syst*, 2018, 10: 550–559
- 34 Dong W J, Yan X D, Chou J M. The comment and prospect of research on coupling models of human–Earth system dynamics (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 3454–3465 [董文杰, 延晓冬, 丑洁明. 人–地系统动力学耦合模型研究的评述与展望. *科学通报*, 2024, 69: 3454–3465]

Summary for “全球模式FGOALS-f和NICAM16大气分量模式水平分辨率提高对亚洲季风区极端降水模拟的影响”

The impact of increased horizontal resolution in the atmospheric components of global models FGOALS-f and NICAM16 on the simulation of extreme precipitation in the Asian monsoon region

Bian He^{1*}, Xiaoyu Liu^{1,2}, Qing Bao^{1,4}, Yimin Liu^{1,3} & Guoxiong Wu^{1,3}

¹ State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

² College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

³ College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

⁴ School of Emergency Management Science and Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* Corresponding author, E-mail: heb@lasg.iap.ac.cn

Extreme precipitation events over the Asian monsoon region have profound societal and ecological impacts; however, accurate simulations of these events remain a major challenge in current climate modeling. Increasing horizontal resolution in atmospheric general circulation models (AGCMs) has emerged as a promising pathway for enhancing model fidelity in capturing small-scale convective processes and orographic effects. In this study, we assess the influence of resolution refinement on extreme precipitation simulations using two advanced AGCMs: the finite-volume atmospheric model of the IAP LASG (FAMIL), a component of the Chinese FGOALS-f climate system model, and the non-hydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM16), which was developed in Japan. Each model performs three AMIP simulations at various horizontal resolutions –100, 25, and 12.5 km for FGOALS-f and 56, 28, and 14 km for NICAM16. The analysis focuses on climatological precipitation patterns, frequency distributions of extreme rainfall, and three diagnostic indices—consecutive wet days (CWDs), total precipitation amount (TPA), and daily precipitation intensity (DPI)—with a particular focus on the Asian summer monsoon region and the mainland of China.

Our findings indicate that increasing the resolution markedly improves the simulations of the spatial structure and intensity distribution of extreme precipitation. The FGOALS-f model substantially reduces the long-standing positive rainfall bias over the western Pacific warm pool as the resolution increases from 100 to 12.5 km and shows an improved ability to simulate events in the 300–500 mm d^{−1} range. In contrast, NICAM16 tends to overestimate extreme precipitation at its finest resolution (10 km), especially over the Indo-Pacific and Chinese subregions, suggesting strong sensitivity to the model’s non-hydrostatic core and physical parameterizations. Over China, both models capture the spatial pattern of persistent heavy rainfall, but the 12.5-km version of FGOALS-f consistently demonstrates greater skill across all three indices. This includes better spatial correlation and lower root-mean-square errors than coarser configurations. NICAM16 shows improvements by increasing the resolution across all three extreme precipitation indices, with the 25-km version exhibiting the best overall performance, surpassing even the 10-km version. These discrepancies are likely linked to model dynamics: NICAM16’s non-hydrostatic dynamics yield stronger vertical velocities and higher low-level moisture convergence, amplifying extreme rainfall intensity, whereas FGOALS-f, which is based on a hydrostatic framework, presents more conservative estimates. These findings indicate that increasing the model horizontal resolution is an effective approach for improving the long-term simulation and projection accuracy of extreme precipitation in the Chinese region. Notably, NICAM16 tends to overestimate the intensity of extreme precipitation, whereas FGOALS-f tends to underestimate it, especially at high resolution. This contrast highlights the need for continued development of resolution-aware physical schemes tailored to different model dynamics, which is crucial for improving the ability to simulate extreme rainfall events.

This study provides a comprehensive evaluation of how horizontal resolution affects extreme precipitation simulations in FGOALS-f and NICAM16. Although increased resolution improves model performance, both FGOALS-f and NICAM16 still exhibit biases in the context of simulating climatological means and extreme precipitation, indicating that refined physics is essential for credible projections. Future efforts should prioritize the development of resolution-aware physical schemes that are suitable for the convective “grey zone” emerging at kilometer-scale resolutions. Additionally, improving the simulation of weather-to-subseasonal processes—particularly tropical cyclones—is vital, as typhoon track and intensity directly influence extreme rainfall over the western Pacific and East Asia. An enhanced representation of these systems and their interactions with monsoonal circulations will benefit regional prediction efforts. Finally, moving beyond atmosphere-only simulations by employing high-resolution coupled ocean-atmosphere models is crucial for capturing key processes such as the Madden-Julian oscillation and tropical cyclone genesis. The incorporation of air-sea interactions will significantly improve the simulation and forecasting of extreme precipitation in a changing climate.

In summary, the findings of this study provide empirical support for the necessity of high-resolution climate modeling in the upcoming CMIP7 framework. This study also provides practical insights for improving extreme precipitation projections and risk assessments in monsoon-affected regions.

high resolution, atmospheric model, extreme precipitation, climate change, FGOALS-f

doi: [10.1360/TB-2024-1123](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1123)