



对流可分辨尺度极端降水模拟研究综述

余弘泳^{1†}, 李普曦^{2†}, 王开存^{3*}

1. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3. 北京大学城市与环境学院, 中法地球系统模拟国际联合研究中心, 碳中和研究院, 北京 100871

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: kcwang@pku.edu.cn

2024-10-11 收稿, 2024-12-05 修回, 2025-01-07 接受, 2025-01-14 网络版发表

国家重点研发计划(2022YFF0801302)和国家自然科学基金(41930970)资助

摘要 准确描述极端降水事件的精细化特征是天气气候研究中的关键挑战. 数值模拟技术的进步使得模式可提升至对流可分辨尺度的水平分辨率(约4 km), 从而能更好地表征深对流系统的动力和热力过程及其降水. 对流可分辨尺度模拟不仅能够更好地再现极端降水事件特征, 诸如小时降水强度、造成强降水及大风的中尺度对流系统以及复杂地形下的降水分布, 还被视作一种新的工具, 用于改进降水估计和加深对水文过程的理解. 对流可分辨尺度模拟相关研究近年来呈爆发式增长, 本文系统梳理了近十年对流可分辨尺度极端降水模拟研究, 包括这些研究的主要目的、方法和结论, 发现研究区域从观测密集区域拓展到观测稀缺区域, 模拟方式朝着“多模式-多物理集合、大范围-长时间模拟”发展, 研究内容从降水特征分析深入到动力学和热力学机制研究; 总结了该领域面临的主要挑战, 包括对流参数化以外的参数化方案的复杂性、评估数据和方法的局限性, 以及大计算量和海量存储需求; 最后, 提出了对流可分辨尺度模拟研究未来发展建议, 认为应有更广泛的国内外模拟合作、更完善的评估数据与方法、更全面的区域和全球模式、更精准的下游方需求对接.

关键词 极端降水, 对流可分辨, 数值模拟, 参数化, 深对流

气候变暖导致大气的持水能力增加, 从而引发了极端降水事件的频率和强度的上升^[1,2]. 这些极端降水事件不仅带来严重的经济损失, 还对人类生命与健康构成了直接威胁. 然而, 准确模拟极端降水事件的最大降水强度、覆盖区域等特征, 仍然是天气与气候研究中的重点与难点. 地基雨量计观测通常被认为是地面真值, 但站网分布不均, 降水空间变化剧烈的复杂地形区域往往站点分布稀疏^[3], 对极端降水事件特征的捕捉能力有限^[4]. 相比之下, 卫星降水反演具有很好的空间覆盖度, 有效弥补了偏远地区和海洋上观测不足的问题. 目前卫星降水反演多结合星载红外传感器、被动

微波传感器、降水雷达数据, 并融合地基地面雨量计观测结果, 从而生成具有较高时空分辨率的全球降水产品^[5]. 然而其针对极端降水事件的反演精度有待改进^[6,7]: (1) 星载降水雷达可以提供准确的降水率估计, 但其空间覆盖范围有限; (2) 星载被动微波传感器是卫星降水反演的基础, 但存在地表和降水(云团)对辐射贡献难以有效分离的问题, 且其水平分辨率相对较低; (3) 星载红外传感器的观测频率高、空间覆盖广泛且水平分辨率精细, 但其与降水之间的关系复杂多变且通常是间接相关.

近年来, 随着计算能力提升, 对流可分辨尺度极端

引用格式: 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

Yu H, Li P, Wang K. A review on convection-permitting modeling of extreme precipitation (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/TB-2024-1061](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1061)

降水模拟得到快速发展. 相比于传统的粗水平分辨率模拟(通常大于等于10 km), 对流可分辨尺度(约4 km)模拟能精细地刻画下垫面、中尺度过程及相关反馈作用^[8,9], 可以显式解析更多的大气过程且不必依赖半经验的对流参数化方案^[10,11]. 由于更多地使用更基本的物理规律来描述地球系统内的物理过程, 从而实现了气候系统非线性现象更好的估计^[12]. 对流可分辨尺度模拟在重现极端降水事件的降水强度^[13~15]、中尺度对流系统演变^[16,17]、复杂地形区降水量等方面表现优异^[13,18,19]. 相较于传统的粗水平分辨率模拟, 对流可分辨尺度模拟的最大优势在于模拟强对流阵风过程、短时极端降水过程、夏季降水的强度和持续时间等对局地暴雨动力起着关键作用的过程^[20].

对流可分辨尺度模拟的发展极大地提高了数值模式对强降水估计的准确性, 从而为研究极端降水事件提供了一些新方法和新视角, 例如通过区域数值模式的模拟结果校正卫星降水产品对小时强降水估计的偏差^[21]、对历史上缺乏观测的极端降水事件进行重建等^[22]. 对流可分辨尺度模拟逐渐被视为一种具有潜力的新方法, 可用于辅助理解极端降水事件并提高对水文过程的认识^[23]. 但该领域亦面临着一系列挑战, 包括对流参数化方案以外参数化方案的复杂性、评估数据和方法的局限性, 以及大计算量和海量存储需求.

尽管目前已有一些文献对对流可分辨尺度模拟相关研究进行了综述, 但很少有集中在极端降水模拟的综述. 本文从对流可分辨尺度模拟的基础概念出发, 针对对流可分辨尺度极端降水研究的文献进行评述, 梳理了研究进展和发展趋势, 并提出了发展建议.

1 对流可分辨尺度模拟

1.1 起源与相关概念

区域数值模式最早被提出时水平分辨率约为60 km^[24,25], 较当时的全球数值模式的水平分辨率(约500 km)有了很大提高, 但仍然较为粗糙, 需要对许多次网格过程进行参数化. 其中, 对流参数化通过模式解析的场变量来估计积云对流过程导致的宏观影响, 从而计算积云对流引起的垂直通量、加热和加湿等过程. 这种半经验的参数化方案是降水模拟不确定性的重要来源之一, 不能很好地表征作为强降水主要来源的组织化深对流系统(例如中尺度对流系统)^[26,27]. 云和对流的一些过程在对流参数化方案中被过度简化^[28], 存在

闭合假设不恰当、主观划分不同过程的尺度等问题^[29]. 此外, 由于方案中的经验参数往往来自区域观测实验或特定假设, 在不同地区的表现可能差异明显^[30].

对流可分辨尺度模拟的相关概念最早由Weisman等人^[31]提出: 当数值模拟的水平分辨率小于等于4 km时, 模式能较好地重现对流系统中的主要过程, 从而较好地模拟强降水过程. 这一假说后来逐渐被证实, 但早期命名并不统一, 包括“对流允许”(convection-allowing)、“对流解析”(convection-resolving)、“云解析”(cloud-resolving)等. 有研究对此进行了讨论^[32]: 对流(或云)演变过程涉及各种尺度, 4 km左右的水平分辨率并不能完全显式解析这些过程, 因此不宜使用“解析”这个词. 由于提高模拟水平分辨率主要是为了更好地刻画深对流过程中主要的抬升和下沉过程, 故使用“对流可分辨”(convection-permitting)来称呼更为合适. 考虑到大气中深对流过程的能量谱从千米至米的尺度上是连续的, 并没有明显的分界点来进行尺度分割^[33], 且由于存在“灰区”问题(即4~10 km水平分辨率的模拟是否需要开启对流参数化方案、应该以4 km还是5 km作为分割的阈值等), 目前国际也建议将对流可分辨尺度模拟简称为“公里尺度模拟”(kilometer-scale modeling).

对流可分辨尺度模拟的实现方式可分为四类^[32]: 有限区域高分辨率模拟(即通过多个模拟域嵌套使研究关注区域的模拟达到对流可分辨尺度)、全球高分辨率模拟、超参数化、全球变分辨率模拟(即全球模式网格水平分辨率在空间上不均匀, 仅在特定区域达到对流可分辨尺度). 由于超参数化是对数值模式中的单个大气柱嵌入水平分辨率更高的二维云模型, 与另外三种实现方式有着较为明显的区别, 故本文不涉及超级参数化相关研究. 此外, 由于已有大量综述对对流可分辨模拟相对于粗水平分辨率模拟的增值(Added Value)和有效性进行了讨论^[9,20,32,34,35], 故本文不再对该方面进行过多叙述. 本文将水平分辨率设为小于等于5 km的数值模拟视作对流可分辨尺度模拟并进行综述.

1.2 针对极端降水事件的模拟

本文将对流可分辨尺度极端降水模拟研究分为两类: (1) 针对选定典型事件(例如“21·7河南郑州特大暴雨”)进行的模拟研究; (2) 运行可供开展具有统计意义系统分析的长时段模拟, 再根据特定标准定义极端降水事件从而进行统计分析. 对于后者, 此处的事件可以指造成强降水的降水系统(例如中尺度对流系统), 也可

以是某个固定地理位置(例如某网格点)经历的持续性强降水过程。

使用数值模式来研究极端降水事件的最大好处是其能提供与极端降水事件发生相关的对流、边界层、陆气耦合等过程,以更全面理解极端降水事件的发生和发展过程,并通过敏感性试验(例如修改地形或土地利用类型^[36]、增补或删减物理描述^[18])来研究对极端降水产生影响的因素,从而增进对地球系统过程的理解。当与降水相关变量的观测数据(例如水凝物混合比的垂直分布)有限时,若数值模式能较好重现所观测到的极端降水事件特征(例如累计降水量的空间分布),则可认为其所提供的与降水有关的过程描述是较为可靠的。由于对流可分辨尺度模拟对于极端降水事件特征的描述整体上优于传统的粗水平分辨率模拟,开展针对极端降水事件的对流可分辨尺度模拟能更好地理解极端降水事件。

针对极端降水事件的数值模拟研究多使用再分析资料作为驱动数据,但这种方式仅能研究历史极端降水事件。一些研究使用区域数值模式对全球数值模式的未来预估结果进行动力降尺度以研究未来的极端降水事件,但这种方法不仅会将全球数值模式的误差引入降尺度结果中,且全球数值模式的水平分辨率较粗糙,其输出结果的中小尺度天气特征较为缺乏^[37,38]。近年来,越来越多的研究结合对流可分辨尺度模拟与伪全球增暖法(pseudo-global warming approach)以研究极端降水事件与气候条件的关系^[39]。伪全球增暖法可以理解为将1个全球气候模式或多个全球气候模式的多个变量在未来某个时间段的气候信息与历史某个时间段的气候信息做差,得到两时段的“气候差值(climate delta)”,而后将该气候差值叠加到再分析资料上,再利用叠加了气候差值的再分析资料驱动数值模拟,从而实现了对某极端降水事件在未来气候条件下的预估^[38](即未来极端降水事件)。

本文基于一些具有代表性的对流可分辨尺度极端降水模拟研究进行综述(即本文第2节和第3节所引用的与对流可分辨尺度极端降水有关的研究),这些研究的研究区分布、对流可分辨尺度模拟的设置情况如图1所示。其中,AROME:研究到业务应用中尺度模式(applications of research to operations at mesoscale); CCLM:联合小尺度模式气候版(COSMO model in climate mode, COSMO=Consortium for Small Scale Modeling); ICON:二十面体非流体静力模式(icosahed-

ral nonhydrostatic model); GRIST:全球-区域一体化预测系统(global-regional integrated forecast system); MetUM:英国气象局一体化模式(met office unified model); MPAS:跨尺度预测模式(model for prediction across scales); RegCM:区域气候模式(regional climate model); WRF:天气研究与预报模式(weather research and forecasting model)。CFSR:气候预报系统再分析(climate forecast system reanalysis); ERA5:欧洲中期天气预报中心第5代大气再分析(ECMWF reanalysis version 5, ECMWF=European Centre for Medium-Range Weather Forecasts); ERA-Interim:欧洲中期天气预报中心第4代大气再分析(ECMWF reanalysis interim); MER-RA2:现代时代研究与应用回顾分析第2版(the modern-era retrospective analysis for research and applications version 2); NARR:北美地区再分析(North American regional reanalysis); NAM-ANL:北美中尺度预报系统分析(North American mesoscale forecast system analysis); NCEP-FNL:美国环境预报中心全球对流层分析(NCEP final global tropospheric analysis, NCEP=National Centers for Environmental Prediction); 20CR:20世纪再分析(20th Century reanalysis)。CMIP5/CMIP6:第5/6次耦合模式比较计划(coupled model intercomparison project phase 5/6)。

2 对流可分辨尺度历史极端降水事件模拟研究

2.1 研究进展

早期利用对流可分辨尺度模拟分析历史极端降水事件的研究多探究此类模拟相对于传统粗水平分辨率模拟的具体优势,但近年来一些研究开始关注对流可分辨尺度模拟对降水过程描述的局限性。针对青藏高原南坡地区强降水过程模拟的分析表明^[18],尽管对流可分辨尺度模拟能比粗水平分辨率模拟更好地模拟地形阻力导致的湍流地形拖曳过程从而刻画更真实的迎风坡降水,但其结果相对于(同水平分辨率下)使用了改进湍流地形拖曳方案的模拟结果仍有差距^[40]。除去更精细的下垫面描述仍存在局限性外,一些研究也讨论了大气过程模拟的局限性。针对我国东部地区1次梅雨锋暴雨的模拟研究指出^[41],短期对流可分辨尺度模拟对初始条件的不确定性较为敏感,会因对对流和冷气团的模拟不足而未能重现中尺度对流系统。针对亚美

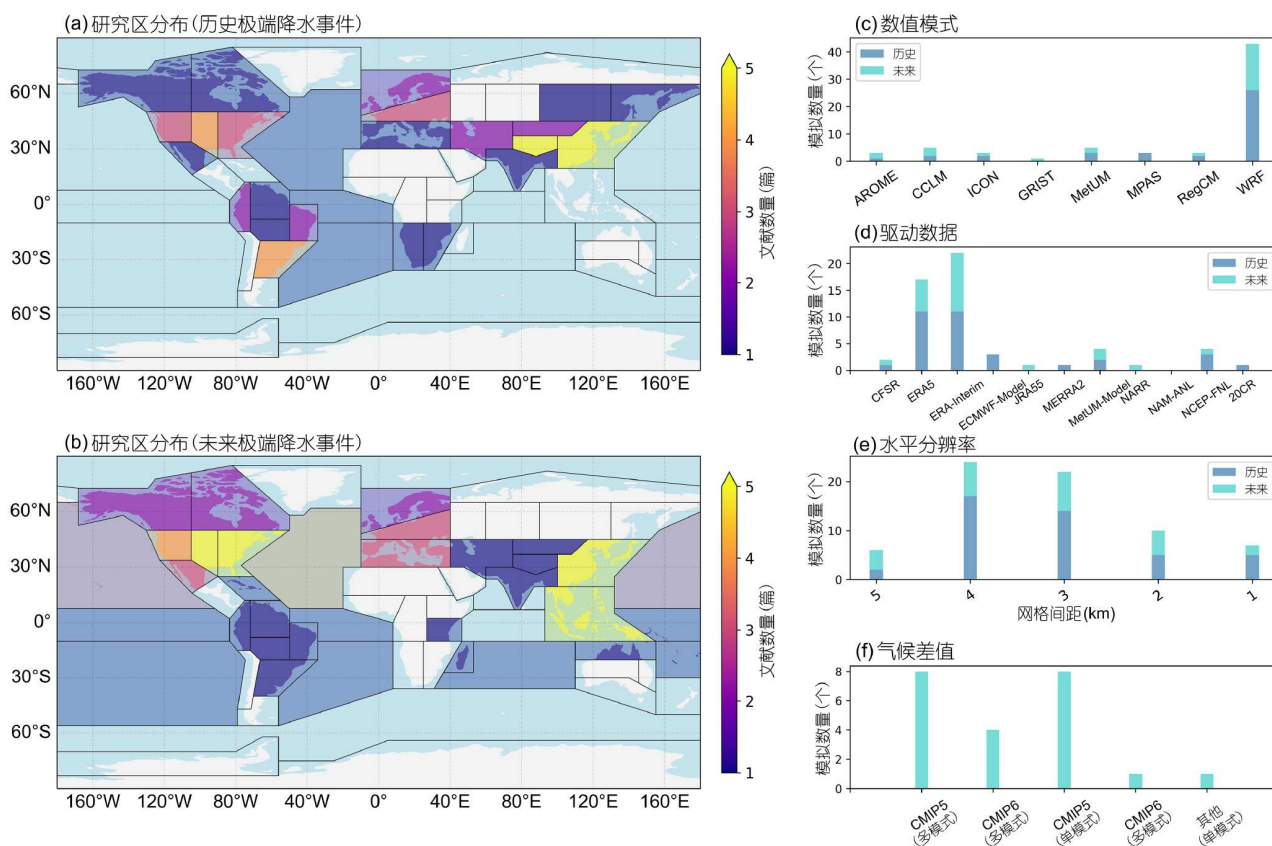


图 1 (网络版彩色)本文选取的54个代表性对流可分辨尺度极端降水模拟研究的研究区分布与这些研究中所使用的模拟的信息。针对历史极端降水事件(a)和未来极端降水事件(b)的研究文献的研究区分布。这些研究中所使用的模拟的数值模式(c)、驱动数据(d)、水平分辨率(e)和气候差值(f)。对于水平分辨率,小数点后一位不为0的水平分辨率被归为更粗一级的水平分辨率(例如2.2 km被归为3公里级)。ECMWF-Model和MetUM-Model表示直接利用全球模式的输出结果(或输出结果的分析资料)驱动模拟

Figure 1 (Color online) The spatial distribution of the study areas selected in this article for 54 representative studies on convection-permitting modeling of extreme precipitation and the information of the simulations used in these studies. (a) and (b) represent the spatial distribution of the study areas for studies on historical and future extreme precipitation events, respectively. (c)–(f) represent the numerical model, forcing data, horizontal resolution, and climate delta used in these studies, respectively. For horizontal resolution, the horizontal resolution with one decimal place not equal to 0 is classified as a coarser resolution (e.g. 2.2 km is classified as 3 km). ECMWF-Model and MetUM-Model in the forcing data indicate that the simulation is driven directly by the output of the global model (or the analysis based on the output)

尼亚地区的1次强降水过程的模拟分析指出^[42],若模拟的驱动数据为NCEP-FNL而非ERA5,那么模拟结果将无法较好地捕捉强降水过程。针对导致四川盆地洪水的1个中尺度对流系统的模拟研究则指出^[43],对流可分辨尺度模拟会因对青藏高原低涡和西风急流的相互作用刻画不足而无法重现中尺度对流系统带来的强降水。以上3个研究均指出由驱动数据或模式性能问题所导致的对特定极端降水事件模拟的局限性无法通过更改物理参数化方案消除。

一些研究通过开展长期模拟(或结合短期模拟与长期模拟)来更好地了解对流可分辨尺度模拟重现极端降水事件的能力。上述针对四川盆地中尺度对流系统

的模拟研究^[43]便结合了单个典型事件的模拟与持续1年的长期模拟,指出尽管对流可分辨尺度模拟可能无法重现特定的中尺度对流系统,但模式在季节尺度上仍对中尺度对流系统的总体统计特征呈现出较好的模拟性能。有研究指出短期模拟中用作初始条件中的低层气流的表征不如长期模拟,因为后者能更好地表征事件发生前低层气流与地形的相互作用^[44]。此外,开展长期模拟有利于进行具有统计意义的系统性评估,从而更加深入地了解对流可分辨尺度模拟描述特定极端降水事件存在的偏差以及造成偏差的原因。例如,针对我国东部地区进行的模拟研究指出模拟倾向于高估较小的中尺度对流系统的数量从而导致对整体降水的高

估^[45], 但针对美国大陆地区的模拟分析表明模拟对美国中部夏末的中尺度对流系统数量有严重低估^[17], 而针对阿根廷地区的模拟研究则指出模拟对于中尺度对流系统数量的估计与观测较为一致^[46]。以上对比说明对流可分辨尺度模拟存在的局限性因地区与诱发降水事件的大气环境不同而异。上述研究中, 针对我国东部地区的模拟研究将模拟误差归于次网格云量和气溶胶-云-辐射相互作用描述的不足, 而针对美国大陆地区的模拟研究将模拟的误差归于陆面过程描述不足导致的陆气相互作用刻画不准确问题, 但由于云动力、热力过程观测的缺乏, 尽管一些研究提出云微物理方案可能是造成此类降水系统模拟不确定性最大的方案^[23], 更具体的不确定性来源以及改善模拟性能的方法仍有待发展。

对流可分辨尺度模拟的有效性在一定程度上受到其无法显式解析的小尺度过程的限制。由于具体的4 km(或5 km)并非具有物理意义的划分阈值, 在模拟中直接关闭对流参数化方案将使得模式中缺乏对一些更小尺度对流过程(例如一些垂直混合和夹卷过程)的描述, 故一些研究探究了进一步提升模拟水平分辨率带来的增值, 因为1~2 km左右的水平分辨率理论上可以显式解析一些浅对流过程^[47]。针对南美洲东南部3次极端降水事件的研究表明4 km模拟和2.4 km模拟的结果没有显著差异^[48]。针对我国长江中下游地区1次致洪强降水事件的模拟分析结果类似^[13], 即2.2 km模拟的结果相较于4.4 km模拟的结果并无明显的系统性改进。针对地中海东部地区5次极端降水事件的模拟分析指出^[49], 尽管1 km水平分辨率的模拟表现最好, 但在一些沿海低海拔地区的表现甚至不如4 km模拟。总体而言, 尽管更高的水平分辨率至少能更好地刻画研究区的地形特征^[49], 但相比于昂贵的计算资源消耗(分辨率提升1倍, 计算资源消耗的增长约为10倍^[50]), 模拟的预期收益与计算代价的投产比有待考量。目前少有研究比较运行单个超高分辨率的对流可分辨尺度模拟和构建较低分辨率的对流可分辨尺度模拟集合的实用性。

除去进一步提高水平分辨率以显式解析更多小尺度过程外, 另一种提升模拟性能的思路为使用尺度自适应的对流参数化方案。相较于传统的对流参数化方案, 尺度自适应对流参数化方案主要是根据设置的水平分辨率来修改对流调整时间尺度来改变对流有效位能(CAPE)的消耗速度以及改进关于夹卷过程的描述, 该方法被认为能改善一些地区(例如美国大平原地区)

的强降水事件模拟^[51,52]。针对发生在韩国地区的1次极端降水事件的研究指出^[53], 尺度自适应的对流参数化方案确实能提升模拟性能, 关于夹卷过程改进描述起到的作用比修改对流调整时间尺度大。但针对美国落基山脉地区1次致洪强降水事件的研究则表明^[54], 尽管尺度自适应的方案在高水平分辨率下比传统对流参数化方案的表现更好, 其效果未能优于直接关闭对流参数化方案的模拟, 且此类参数化方案的实用性可能严重依赖于案例具体的情况。提高水平分辨率和应用尺度自适应的对流参数化方案被认为是进一步提升对流可分辨尺度模拟性能的两大手段, 何者在当下更为有效目前尚无定论。

针对历史极端降水事件中冷季强降水的模拟研究相对较少, 这是由于对流可分辨尺度模拟的优势主要在于能更好地描述深对流过程, 而冬季的强降水过程通常受深对流影响较小。这也导致了对流可分辨尺度模拟对冷季强降水的估计准确度存在不确定性。针对青藏高原及其周边地区1次强降雪过程的模拟分析指出对流可分辨尺度模拟对于强降雪事件也有较好的刻画能力^[23]。而针对我国东北地区1次寒潮强降雪的模拟分析结果进一步表明^[15], 模拟能较好地重现强降雪过程, 但改变模式物理方案对受对流不稳定性影响较小的冬季强降水事件的模拟结果影响非常小。但针对美国东北地区开展的多年模拟的分析结果指出^[55], 相对于粗水平分辨率模拟, 尽管能捕捉更多小尺度的特征(例如地形对降水的增强作用), 但对流可分辨尺度模拟对冷季的降水事件并未能产生稳固的更好的结果。亦有研究认为对流可分辨尺度模拟对于冷季强降水的模拟在表现上整体与粗水平分辨率模式相近^[20]。需要注意的是, 降雪观测资料的可靠性对模式在该方面表现的评估可能存在较大影响^[23]。

除了对局限性进行分析外, 有研究进一步探究了对流可分辨尺度模拟的有效性带来的作用, 并提出一种新观点: 对流可分辨尺度模拟可被视作一种新的独立数据源。例如, 对于缺乏观测的复杂地形区的水文过程^[56], 依据稀疏站点观测给出的估计未必优于对流可分辨尺度模拟的结果, 当二者出现差异时直接假定模拟有误差可能会误导数值模式的发展^[57]。针对青藏高原地区强降水事件的模拟研究指出^[23], 对流可分辨尺度模拟的精度已达到“观测级”。针对我国东北地区强降水事件的模拟研究亦提到^[15], 对流可分辨尺度模拟可被视作一种与卫星降水产品可信度相当数据源, 其

对区域平均累计降水量和最大小时降水量的估计优于卫星降水产品. 针对热带多个复杂地形区多个极端降水事件的对流可分辨尺度模拟研究也指出^[21], 此类模拟可用于校正通常会低估山区强降水的近实时卫星降水产品. 校正结果在多个指标上优于使用站点校正的卫星降水产品. 将模拟视作(可校正其他数据的)数据源时, 应考虑模拟可能存在的偏差, 可考虑开展观测实验或综合多源数据以了解模拟在哪些指标上较为可靠, 从而更好地利用模拟数据. 需注意的, 对流可分辨模拟的有效性催生了广泛的下游应用. 例如, 将对流可分辨尺度模拟与水文模型结合以探究山区积雪对极端洪水流量的影响^[58], 或是对缺乏历史观测的早期强降水事件进行对流可分辨尺度模拟并结合早期文字资料进行确认^[22]. 对流可分辨尺度模拟亦可被用作一种归因工具. 例如, 对强降水事件进行模拟, 并通过设置不同的气溶胶浓度分析气溶胶对降水强度的影响, 从而将极端事件与已观测到的人为气候变化建立联系^[59].

2.2 发展趋势

从研究内容角度看, 对比不同水平分辨率下模拟性能的研究数量在减少, 研究逐渐倾向于关注对流可分辨尺度模拟在特定地区对特定极端降水事件模拟存在的偏差和局限性. 尽管存在局限性, 由于对流可分辨尺度模拟在关于降水的多个指标(例如小时降水强度分布^[13,15,23])上表现优异, 催生了关于其下游应用的一系列探究, 其核心是将模拟视为一种降水估计的实用工具, 用于辅助理解水文过程^[60]. 因此, 相较于早期多被用于一些较为典型的观测资料较丰富的区域(例如美国大平原地区), 对流可分辨尺度模拟如今逐渐被用于一些缺乏足够实地观测、卫星降水产品等网格降水产品不确定性较大的区域(例如非洲地区^[61]、青藏高原地区^[23]).

目前的极端降水事件模拟研究正朝“多模式-多物理集合、大范围-长时间模拟”方向前进. 多模式-多物理集合有助于避免单模式或是单物理方案组合模拟带来的偏差. 有研究指出^[23], 一些特定的模式物理方案组合将明显地降低模拟性能. 单模式对某个/某类极端降水事件较好的重现效果可能并非源自更真实的物理过程描述, 而是因为多年发展过程中经过了大量经验参数方面的优化^[62]. 就模拟范围而言, 目前常用的嵌套模拟法的一大问题是无法将较高水平分辨率的模拟结果反馈到边界条件中, 使得对流可分辨尺度模拟的表

现受到水平分辨率较粗糙的边界条件的制约. 较大的模拟范围可避免选定研究区的降水系统因离模拟边界过近出现边界过渡问题, 进而不能产生合理的精细中小尺度结构^[50]. 除去直接设置较大的模拟范围外, 另一个选择是直接使用全球高分辨率模拟或是全球变分辨率模拟. 考虑到前者的计算资源消耗极大, 且研究者可能只关注部分区域, 因此后者逐渐被更多地发展和使用. 有研究便指出此类全球变分辨率模拟能够很好地模拟受大尺度波影响的极端降水事件的降水空间分布和强度^[63]. 关于短期模拟和长期模拟相结合, 其主要优势在于能更好地分析模式对模拟某类强降水事件存在系统偏差以及造成偏差的原因^[64], 并在一定程度上避免评估模式性能时受到水平分辨率较为粗糙的初始条件的影响. 使用长期模拟亦有助于探究极端降水事件的发生机制及后续影响, 能更好地揭示特定地区与对流相关的辐射和陆气相互作用^[9], 从而将研究从降水事件本身拓展至降水事件相关过程, 对研究区中不同子区域的异同和不同影响因素的贡献进行更具系统性的分析. 大范围-长时间的模拟方式更有利于了解特定强降水系统在地球系统过程中能量循环和水循环中扮演的角色^[32].

我国针对历史极端降水事件的对流可分辨尺度模拟研究已有诸多进展, 但主要集中在数值模式模拟性能评估以及针对特定极端降水事件发生过程和机制的研究上. 相比之下, 关于对流可分辨尺度模拟的下游应用研究仍较为匮乏, 特别是针对其作为独立数据源可行性的探讨以及基于模拟数据开发新的科学认知. 在观测密集地区(如长江中下游平原), 在充分验证模式模拟性能的基础上, 可利用模式开展敏感性试验或进一步耦合水文模型, 以深入探究极端降水的致灾机制^[36]. 同时, 在观测稀疏地区或地形复杂区(如西北地区和青藏高原), 亟需更多基于对流可分辨尺度的模拟研究, 以推动对未知大气和水文过程的认知, 并获取诸如关于观测站点网络优化布设的指导性信息^[3]. 在模拟方式方面, 我国目前已有较多比较单一数值模式不同集合成员模拟能力的研究, 也开展了基于不同数值模式的模拟工作. 然而, 系统性比较不同数值模式模拟表现的研究仍然较少. 此外, 我国亦有研究开展了大范围-长时间的对流可分辨尺度模拟^[45,65,66], 但相比国际上一些近乎涵盖整个大洲的模拟研究^[60,67,68], 模拟区域范围仍显不足. 鉴于上游区域的高分辨率模拟有助于改进下游区域极端降水事件的模拟能力^[69], 未来开展对流可

分辨尺度模拟时,可考虑将与研究重点关注区相对应的模拟区域进行进一步拓展.例如,在研究我国北方地区极端降水事件时,可将模拟范围延伸至俄罗斯和蒙古国地区;而在研究我国西南地区极端降水事件时,则可包括东南亚区域,以更全面地捕捉影响我国境内极端降水的关键大气过程及其演变特征.

3 对流可分辨尺度未来极端降水事件模拟研究

3.1 研究进展

结合对流可分辨尺度模拟与伪全球增暖法的研究的一大热点是带来大量降水的热带气旋.针对热带多个地区热带气旋的模拟分析结果表明^[70],气候变暖迄今为止已经增加了一些热带气旋导致的平均降水量和极端降水量,但并未改变热带气旋的风速,而人类活动导致的变暖将在未来使得多数热带气旋的降水量和风速大幅增加.针对日本西南部地区1次台风强降水事件的模拟研究表明^[71],未来气候变暖背景下极端降水将更强,且累积降水量的极值将更加严重,且并非最强的台风在未来降水量增加最多.针对在我国珠三角地区登陆的3个热带气旋的模拟研究指出^[72],预计在21世纪末,热带气旋的峰值强度将增强大约10%,海洋表面变暖使得海面热通量增强导致热带气旋增强,但变暖亦使得大气稳定性增强起到相反的作用.针对大量在东南亚地区登陆的热带气旋的研究亦表明^[73],21世纪末热带气旋登陆时强度将增加8%,移动速度将加快2.8%,且登陆地点将向北移动,多个地区的热带气旋带来的降水量将显著增加.以上研究均指出热带气旋产生的降水将在未来增强,但这些结论与使用水平分辨率较粗的全球数值模式得到的结果并无明显差异,这是由于捕捉热带气旋主要过程并不需要很高的水平分辨率,使用传统对流参数化方案的模拟结果亦具有足够可信度^[70,74],而对流可分辨尺度模拟主要优势在于提供更精细的热带气旋结构.

另一个热点是中尺度对流系统,其被认为是夏季主要的强降水系统,导致的降水可占热带与中纬度部分地区总降水的一半以上^[26].基于传统粗水平分辨率模式的未来预估数据难以捕捉此类对流系统,对中尺度对流系统所引发降水的估计有很大偏差^[27],故对中尺度对流系统受气候变化影响的分析也就无从谈起.结合了伪全球增暖法的对流可分辨尺度模拟使得细致

地探究气候变化引起的中尺度对流系统的改变成为可能.利用全球变分辨率模式GRIST模式对河南郑州“21·7”特大暴雨进行模拟分析的研究指出^[75],气候变暖条件下,天气系统配置使得水汽输送带前缘的对流能量和不稳定性进一步增强,导致造成极端降水的中尺度对流系统更强.针对美国中部地区8次中尺度对流系统导致的强降水事件的模拟分析指出^[76],未来中尺度对流系统中对流云区域的降水量比层状云区域的降水量增加得更多,且对于气候变化造成的中尺度对流系统降水量、面积和发生环境改变,不同案例间的差异要远强于同一案例不同模拟成员间的差异.基于美国大陆地区的13年历史和未来模拟的统计分析指出^[2],整体上未来北美夏季强中尺度对流系统的发生频率将增加3倍以上,且最大降水强度的增强和强降水影响区域扩展的综合效应将导致中尺度对流系统产生的降水量增加高达80%,且这些增加主要集中在系统降水中心周围40 km半径范围内.上述研究均认为中尺度对流系统的强度和发生频率将在未来增强,与一些基于历史观测资料的研究提出的在过去几十年里中尺度对流系统的强度和发生频率在增强吻合^[1].但由于对流可分辨尺度模拟对于中尺度对流系统的重现能力仍存在一定局限性(见2.1节),且中尺度对流系统的定义在不同的识别算法中有所差异^[77],故利用对流可分辨尺度模拟研究未来中尺度对流系统变化的可信度应结合历史模拟结果与观测资料等开展相关的不确定性分析,且导致不同类型中尺度对流系统结构变化的动力、热力过程差异仍有待进一步讨论^[78,79].

也有研究关注冷季强降水事件.如前文(2.1节)所述,对流可分辨尺度模拟对于冷季强降水存在一定的不确定性,但高分辨率的模拟结果仍可为特定分析提供重要支持.针对美国西南部山区5次由大气河事件导致的极端降水事件的模拟分析表明^[80],该地区在未来变暖情景下所有事件的降水量均有所增加,但增幅低于大气柱中水汽的增加.通常情况下,云冰含量减少而云水含量增加,表明未来暖雨过程在降水形成中的作用将更为显著.另一项针对美国东北复杂地形区的大量极端降雪事件的模拟分析指出^[81],未来气候的暖湿化将会减少沿海地区的降雪量,但整个地区的降雨量将增加.降雪与降雨的补偿性变化导致更靠南的城市总降水量有所增加.针对加拿大东部复杂地形区1次强冰暴事件的模拟研究表明^[82],尽管区域平均的冻雨量减少了约20%,但极值增加了约50%,气候变暖后水凝

物含量增加,但由于融化层更深厚,更少的降水以固态形式落至地面.整体而言,对流可分辨尺度模拟被认为在分析受对流不稳定性影响较大或发生于复杂地形区的强降雪事件时,能够提供更为有效的预估结果^[20].因此,在分析未来冷季强降水事件时,应充分考虑事件本身特征(例如受对流不稳定性影响的程度、降水发生位置及地形影响等)和研究的重点,避免单纯追求更高的水平分辨率.

还有研究结合对流可分辨尺度模拟与伪全球增暖法探究基于克劳修斯-克拉珀龙(Clausius-Clapeyron, CC)方程推导出的“每变暖1°C,降水强度增强7%”的论断^[83].由于传统粗水平分辨率模拟对降水强度的模拟存在问题,难以对此论断进行较为深入的分析.针对美国大陆地区的强降水的模拟分析指出^[67],上述CC比例在美国多个地区成立.针对非洲东部维多利亚湖的多年模拟分析表明^[84],得到的大约7%/°C的CC比例受到水汽含量增加、更弱的中尺度环流和更强的雷暴动力的共同作用.多个研究探讨了极端降水发生情况下大于7%的超CC比例(Super CC,也称EP-T关系^[85,86],即极端降水-温度关系, extreme precipitation-temperature).基于欧洲中西部地区的10年模拟数据的分析指出^[87],最极端降水事件的变化大约能达到CC比例的1.5~2倍(即10%~14%/°C).针对我国珠三角地区的模拟研究亦指出^[88],在非暖季,极端日降水量的变化可能达到CC比例的2倍.有研究开展了水平分辨率更精细(2 km)的对流可分辨尺度模拟^[89],发现极端降水在气候变暖背景下的强度变化可以达到明显的超CC比例,并指出全球变暖减弱了城市下垫面对极端降水事件的影响.综合来看,在一定温度范围区间内,降水强度随温度增加的增强可能达到超CC比例;而超过一定温度时,由于可用水分限制,降水强度随温度增加的增强变弱.极端降水事件随变暖而增强的程度和超CC比例的具体值可能因地区和选取的极端降水事件标准而异^[90].此类研究有力地促进了对未来强降水发生机制的理解.

3.2 发展趋势

总体而言,该领域的发展为从关注降水特征到动力与热力机制诊断分析,并且逐渐被用于进一步讨论关于全球变暖影响的假说.值得注意的是,对流可分辨尺度模拟对历史极端降水事件降水估计的准确度仍存在一些不足(例如2.1节中提到的对中尺度对流系统数

量估计的偏差),故将研究范围拓展到未来极端降水事件时应留意这种不足带来的不确定性.另外,对于以有限区域高分辨率模拟方式开展的模拟,其假设了不同气候情景下模拟边界条件中天气尺度变率是一致的^[91],而该假设是否合理仍有待考证,故近年来的一些研究开始使用全球变分辨率模式来对未来极端降水事件进行对流可分辨尺度模拟^[75].

目前国际上少有未来极端降水事件的对流可分辨尺度多模式-多物理集合模拟研究,对未来预估的不确定性分析较为缺乏,少数此类研究也往往从基于格点来定义的极端降水事件的角度出发^[92].这与典型降水事件(或是从降水系统角度考虑的极端降水事件)在定义上较难统一、构建模拟集合计算资源消耗大且未来模拟需要基于历史模拟有关.不同的研究者使用伪全球增暖法时的考量亦不同,包括用于计算气候差值的全球数值模式数据选取、变量选取、不同变量间物理平衡(即使用伪全球增暖法时除了将气候差值叠加到再分析资料上时还需基于不同变量间的关系对数据进行调整以避免模式出现错误响应^[39])等,这使得比较不同研究中假设的气候变化情景难以对比.此外,尽管已有研究讨论了对流可分辨尺度对历史极端降水事件的模拟下游应用价值,但少有研究探讨此类模拟对未来极端降水事件的预估结果如何被进一步地应用.结合对流可分辨尺度模拟与伪全球增暖模拟来对未来极端降水事件进行预估,比较未来极端降水事件和历史极端降水事件对应的大气环境的差异^[2]、从更丰富的视角(包含社会经济影响)分析极端降水事件的影响^[93],从而指导气候适应政策,是目前的前沿方向.

我国目前已有一些研究结合对流可分辨尺度模拟与伪全球增暖法,分析了气候变化对特定极端降水事件的影响^[94],并开展了长时间未来预估模拟并研究极端降水事件(如中国东部地区^[95]、青藏高原地区^[65]).然而,这类研究的整体数量仍然较为有限,且缺乏对预估结果的不确定性,以及这些预估结果在下游应用中的可行性探讨.考虑到我国地形和气候类型的多样性,各个区域面临的气候变化挑战各不相同.因此,推动结合对流可分辨尺度模拟与伪全球增暖法的研究具有重要意义,此类研究不仅可以进一步探究气候变化对极端降水事件的影响^[92]及相关理论在我国的适用性,还能够提供比全球数值模式预估的较粗糙水平分辨率更为精细、更具针对性的结果,从而为解决我国面临的气候变化科学问题提供更具深度的信息,包括西北地

区的暖湿化影响、东北地区水热条件变化等,为我国应对气候变化的政策制定提供更具体的参考和决策支持.

4 对流可分辨尺度极端降水模拟的挑战与机遇

尽管摆脱了造成降水不确定性主要来源的对流参数化方案,但对流可分辨尺度模拟较普遍地存在高估降水量值的问题^[13,50,96]. 云微物理方案、边界层方案、陆面模式是当下对流可分辨尺度极端降水模拟不确定性的主要来源,且对极端降水模拟性能影响因研究区、极端降水事件类型的不同而有所差异^[15,23,97,98]. 尽管我国有针对特定极端降水事件开展的对流可分辨尺度多物理过程模拟研究^[41],但多物理过程长期模拟研究相对较少,这使得参数化方案选择对极端降水模拟的影响难以得到具有统计意义的系统性评估,也使得发展适应我国不同地区特色需要的物理过程参数化方案面临挑战. 在上述三个参数化方案中均涉及大量的经验参数,而与这些经验参数相关的观测资料却非常有限. 为了解决这一问题,除了可考虑开展多物理过程的长期模拟研究和扩充相应观测资料外,近年来我国亦有研究提出使用直接求解所有尺度流动的粒子可分辨直接数值模拟(direct numerical simulation, DNS)来研究云微物理过程^[99],以及通过大涡模拟(large eddy simulation, LES)来探索与边界层相关的过程^[100],旨在为改进参数化方案的相关参数提供参考或深化对于参数化方案中物理过程的理解. 尽管这两种模拟(特别是DNS)因其更高的分辨率而导致计算成本远高于对流可分辨尺度模拟,并且只能提供有限范围和很短时间内的模拟数据用于参考,但也能对流可分辨尺度模拟的进一步改进提供有效信息. 相较而言,由于提升水平分辨率对性能提升不明确且在短期模拟中影响较小,陆面模式更缺乏足够的调试从而对一些过程的描述过于简化并缺乏对长期反馈过程进行描述的能力^[50],而陆气耦合过程中产生的对边界层不稳定性的变化将会影响湿对流的发展和降水的强度^[101]. 开发新理论和建立对于陆面过程的稳健物理理解,被认为是更好地优化陆面模式从而提升对流可分辨尺度极端降水模拟性能的策略^[102,103].

评估方法和数据的局限性亦是当前对流可分辨尺度极端降水模拟的主要挑战之一. 主要体现在如下两方面: (1) 现有的评估方法需要进一步优化. 在更精细网格下使用传统的二分法(例如威胁评分(threat score,

TS))进行评估可能会导致“双重惩罚(double penalty)”从而误判模式的模拟性能; (2) 评估所依赖的数据要求较高. 有研究提出在观测稀疏地区依靠少量站点的降水估计可能缺乏代表性且准确性不足^[57],且直接使用站点观测数据与代表网格内物理量平均的格点模拟结果进行对比也是不合理的. 针对第一个问题,国内已有研究建议采用不强调逐个格点精确匹配的邻域法(例如分数技巧评分(fractions skill score, FSS))等方法来评估对流可分辨尺度模式的模拟结果,且在评估过程中应更注重“面向物理过程”“面向(降水)对象”^[104,105]. 尽管我国有研究从降水系统的角度来分析对流可分辨尺度模拟的性能^[105,106],但结合降水以外变量对降水系统进行细分^[79]的评估方法研究较少. 针对第二个问题,国内对于对流可分辨尺度模拟的可靠性评估往往依赖于数量有限的站点观测数据,或仅只使用单一来源的降水格点产品,缺乏对观测数据不确定性的充分考量^[107]. 由于缺乏对降水系统的分类分型,现有的评估结果可能不足以满足指导数值模式精细化发展的需求. 此外,国际上有研究^[108,109]指出对流可分辨尺度模拟在小时内尺度极端降水的模拟具有一定的可靠性,但由于我国尚缺乏使用分钟级观测对长期对流可分辨尺度模拟进行性能评估的研究,因此这一结论在国内的适用性尚待验证.

对流可分辨尺度模拟的另一大挑战是大计算量和海量存储需求. 高分辨率对计算资源的消耗极大^[110]. 为此,一些数值模式已开发出了图形处理器(graphics processing unit, GPU)版本以适应更高计算需求(例如CCLM模式和ICON模式). 尽管我国在数值模式计算方面已经进行了基于中央处理器(central processing unit, CPU)+GPU异构计算架构的优化研究^[111],但在对流可分辨尺度模拟方面,国内研究仍多依赖于CPU运行的WRF模式,并且几乎没有研究通过GPU开展模拟. 这导致了开展多模式-多物理、大范围-长时间的对流可分辨尺度模拟所需的时间成本难以降低. 此外,高分辨率模拟产生的大数据量给数据的储存、处理、分发带来了巨大挑战. 例如,使用区域数值模式针对典型极端降水事件的多模式-多物理模拟的原始输出可轻松达到数十TB(太字节, terabyte),长期模拟所需储存量甚至可能达到PB(拍字节, petabyte)级^[68]. 这对科研数据共享提出了更高的要求. 国际上有研究^[9]提出采用类似CMIP数据的共享方式——提供面向用户的分发平台,并通过共享模拟的初始条件、边界条件和模拟设置替

代直接共享大量数据,以满足用户的进一步需求;还应开发更高效的编程语言、计算方式和在线分析平台,以解决减少重复模拟量和后处理的工作量,使更广泛的用户群体能够获取到满足其需求的高分辨率模拟数据. 尽管目前国内外尚无较为成熟的此类数据管理和共享平台,但对数据管理机制的完善和数据共享合作的推动将极大促进该领域的进一步发展.

尽管面临诸多挑战,全球多个气象气候的知名研究机构都在积极推动对流可分辨尺度模拟的研究,特别是利用本国开发的数值模式进行大范围-长时间的模拟. 例如,美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)开展了为期13年的美国大陆及其周边地区的历史模拟与未来预估^[112],随后又进行了40年的美国大陆及其周边的历史模拟^[60]以及22年的南美洲地区的历史模拟与未来预估^[68]. 这些模拟工作催生了一系列重要研究,极大推进了对极端降水事件的深入理解. 英国气象局Met Office在欧洲地区和非洲地区开展了10年的历史模拟和未来预估^[113,114],由于非洲地区的观测资料较为稀缺且卫星降水产品的不确定性大,这些模拟为研究该地区的极端降水事件和水文过程提供了宝贵的支持. 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)亦建立了欧洲区域的对流可分辨尺度模拟的区域模式集合. 我国在此领域与国际前沿仍存在一定差距. 因此,我国应加速对流可分辨尺度模拟的研究发展并完善相关布局,以把握这一领域的发展机遇.

5 结论与展望

利用区域对流可分辨尺度模拟来研究极端降水事

件是天气气候领域的前沿方向. 对流可分辨尺度模拟不仅能为我们提供极端降水事件较为准确的强降水估计,还能帮助获取历史上一些观测缺乏的极端降水事件的信息、预估某类极端降水事件在未来升温情景(或降温情景)下的变化并分析热力、动力过程造成的影响,应用前景甚广. 本文的核心总结如图2所示,基于发展趋势和主要挑战提出的发展建议具体如下:

(1) 更广泛的国内外模拟合作. 大计算量和海量存储需求不仅使得推进对流可分辨尺度模拟研究的代价更加昂贵,亦对科研人员与技术人员的合作提出了更高的要求,需要“前所未有的合作”^[115]. 目前协调区域气候降尺度实验(coordinated regional climate downscaling experiment, CORDEX)已推出了一些对流可分辨尺度旗舰试点研究计划(Flagship Pilot Studies),旨在构建多区域、多课题组的合作研究^[23]. 还有一些合作计划(例如欧洲气候预测系统计划(European Climate Prediction System Project, EUCP))也在推行合作式对流可分辨尺度模拟研究^[116]. 通过设定统一的模拟标准并选取典型事件(或时间段),构建可共享的多模式多物理模拟数据. 一些研究明确指出对流可分辨尺度模拟的多模式比较计划和相应合作项目的开展是数值模拟领域当下最重要的进展之一^[117]. 此外,近年来人工智能在气象领域的应用得到了许多关注,结合人工智能与数值模式从而对极端降水事件的进一步深入研究(例如利用机器学习来考虑模式无法解析的尺度的作用的影响、开展结合数值模式与神经网络的新型模拟)亦需要更广泛的合作.

(2) 更完善的评估数据与方法. 目前亟需开发时空分辨率高、质量可靠的降水资料用于模拟的评估. 在

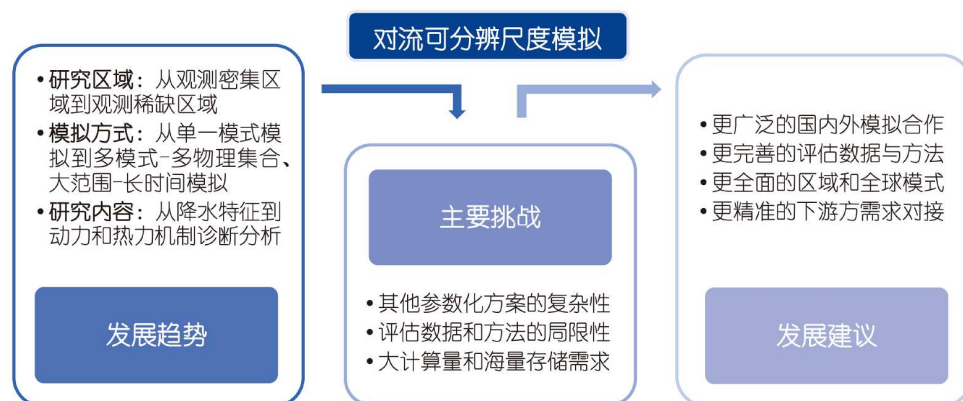


图2 (网络版彩色)对流可分辨尺度模拟的发展趋势、主要挑战及发展建议

Figure 2 (Color online) Development trends, major challenges and development strategies for convection-permitting modeling

评估数据上,除了使用雷达数据来分析强降水过程,还可以考虑结合一些新型降水观测资料,即一些随着技术发展新出现的降水观测手段,包括基于社交媒体、基于移动汽车、基于监控摄像的观测手段^[118]。通过融合更多类型降水观测资料获取到的高时空分辨率降水资料将为有效评估对流可分辨尺度模拟的有效性提供帮助。在评估方法上,目前研究对降水系统的分类正在更加细化(即更加丰富)、更加针对物理过程(即结合更多与降水过程相关的要素)^[79],可借助降水系统分类研究以开展评估从而更深入地理解数值模式对特定降水过程刻画的偏差特征。

(3) 更全面的区域和全球模式。就模拟时间而言,结合短期模拟和长期模拟对极端降水事件进行研究,采取更具有针对性的方法(例如大气现象的多对象分析法^[79]),并促进天气-气候一体化模式的进一步开发和应用,对更全面地理解极端降水事件的发生和演变过程有重要意义。就模拟范围而言,正如前文所述,仅对特定区域开展对流可分辨尺度模拟可能存在诸如无法考虑较大空间尺度过程的小尺度特征等问题。尽管因计算代价而采用模拟域嵌套和全球变分辨率模拟是当

前较为常见的两种对流可分辨尺度模拟方式,但与此同时也有一些计划在推进全球对流可分辨尺度模拟,例如基于非流体静力域的大气环流动力学模式(dynamics of the atmospheric general circulation modeled on non-hydrostatic domains, DYAMOND)计划。此外,多圈层多尺度过程相互作用更加完备的区域地球系统模式的构建也是当前该领域的前沿之一^[117,119]。

(4) 更精准的下游方需求对接。目前从对流可分辨尺度模拟的原始输出结果到同领域甚至跨领域可用的下游产品间仍有较大距离。有研究提出可基于对流可分辨尺度模拟和站点数据来构建高时空分辨率且物理自洽的气候数据集^[60,120]。还有一些研究直接将区域数值模式与其他模型(例如水文模型)进行耦合^[58],从而将对流可分辨尺度模拟对降水估计更加精准的优势扩展到其他领域。对下游用户而言,数据集、指标等是更有效的产品,这需要完善与之相关的生产体系和标准,从而实现对输出数据更高层次的整合与凝练。更精准的降水估计可能导致一系列地球系统相关过程研究的估算改进从而提升相关认知,对流可分辨尺度模拟在该方面极具潜力。

参考文献

- Li P, Song F, Chen H, et al. Intensification of mesoscale convective systems in the East Asian rainband over the past two decades. *Geophys Res Lett*, 2023, 50: e2023GL103595
- Prein A F, Liu C, Ikeda K, et al. Increased rainfall volume from future convective storms in the US. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 880–884
- Zhang Y, Wang K. Mapping the representativeness of precipitation measurements in mainland China. *Environ Res Lett*, 2023, 18: 024019
- Gu Z, Shi P, Chen J. Precipitation interpolation research over regions with sparse meteorological stations: A case study in Xilin Gole League (in Chinese). *J Nat Sci Beijing Norm Univ*, 2006, 42: 204–208 [辜智慧, 史培军, 陈晋. 气象观测站点稀疏地区的降水插值方法探讨——以锡林郭勒盟为例. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2006, 42: 204–208]
- Zhao R, Wang K, Xu X. A machine learning method to retrieve global rainfall and snowfall rates from the passive microwave observations of FY-3E. *J Geophys Res Atmos*, 2024, 129: e2024JD040731
- Li R, Wang K, Qi D. Validating the integrated multisatellite retrievals for global precipitation measurement in terms of diurnal variability with Hourly Gauge observations collected at 50,000 stations in China. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123: 10423–10442
- Li R, Wang K, Qi D. Event-based evaluation of the GPM multisatellite merged precipitation product from 2014 to 2018 over China: methods and results. *JGR Atmos*, 2021, 126: e2020JD033692
- Fosser G, Khodayar S, Berg P. Benefit of convection permitting climate model simulations in the representation of convective precipitation. *Clim Dyn*, 2015, 44: 45–60
- Schär C, Fuhrer O, Arteaga A, et al. Kilometer-scale climate models: prospects and challenges. *Bull Am Meteorol Soc*, 2020, 101: E567–E587
- Chen J, Xue J, Yan H. The impact of physics parameterization schemes on mesoscale heavy rainfall simulation (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2003, 61: 203–218 [陈静, 薛纪善, 颜宏. 物理过程参数化方案对中尺度暴雨数值模拟影响的研究. *气象学报*, 2003, 61: 203–218]
- Xu X, Ji Y, Zhou X, et al. Reducing winter precipitation biases over the western Tibetan Plateau in the Model for Prediction Across Scales (MPAS) with a revised parameterization of orographic gravity wave drag. *J Geophys Res Atmos*, 2023, 128: e2023JD039123
- Palmer T, Stevens B. The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 24390–24395
- Li P, Guo Z, Furtado K, et al. Prediction of heavy precipitation in the eastern China flooding events of 2016: added value of convection-permitting simulations. *Quart J R Meteorol Soc*, 2019, 145: 3300–3319

- 14 Guo Z, Fang J, Shao M, et al. Improved summer daily and sub-daily precipitation over Eastern China in convection-permitting simulations. *Atmos Res*, 2022, 265: 105929
- 15 Yu H, Prein A F, Qi D, et al. Kilometer-scale multi-physics simulations of heavy precipitation events in Northeast China. *Clim Dyn*, 2024, 62: 9207–9231
- 16 Yang Q, Houze R A, Leung L R, et al. Environments of long-lived mesoscale convective systems over the central United States in convection permitting climate simulations. *J Geophys Res Atmos*, 2017, 122: 13,288–13,307
- 17 Prein A F, Liu C, Ikeda K, et al. Simulating North American mesoscale convective systems with a convection-permitting climate model. *Clim Dyn*, 2020, 55: 95–110
- 18 Wang Y, Yang K, Zhou X, et al. Synergy of orographic drag parameterization and high resolution greatly reduces biases of WRF-simulated precipitation in central Himalaya. *Clim Dyn*, 2020, 54: 1729–1740
- 19 Li P, Furtado K, Zhou T, et al. Convection-permitting modelling improves simulated precipitation over the central and eastern Tibetan Plateau. *Quart J R Meteorol Soc*, 2021, 147: 341–362
- 20 Kendon E J, Ban N, Roberts N M, et al. Do convection-permitting regional climate models improve projections of future precipitation change? *Bull Am Meteorol Soc*, 2017, 98: 79–93
- 21 Zhang X, Anagnostou E N. Evaluation of numerical weather model-based satellite precipitation adjustment in tropical mountainous regions. *J Hydrometeorol*, 2019, 20: 431–445
- 22 Mahoney K, McColl C, Hultstrand D M, et al. Blasts from the past: reimagining historical storms with model simulations to modernize dam safety and flood risk assessment. *Bull Am Meteorol Soc*, 2022, 103: E266–E280
- 23 Prein A F, Ban N, Ou T, et al. Towards ensemble-based kilometer-scale climate simulations over the third pole region. *Clim Dyn*, 2023, 60: 4055–4081
- 24 Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western United States. *Clim Change*, 1989, 15: 383–422
- 25 Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain. *Mon Wea Rev*, 1989, 117: 2325–2347
- 26 Schumacher R S, Rasmussen K L. The formation, character and changing nature of mesoscale convective systems. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1: 300–314
- 27 Prein A F, Rasmussen R M, Wang D, et al. Sensitivity of organized convective storms to model grid spacing in current and future climates. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci*, 2021, 379: 20190546
- 28 Randall D, Khairoutdinov M, Arakawa A, et al. Breaking the cloud parameterization deadlock. *Bull Am Meteorol Soc*, 2003, 84: 1547–1564
- 29 Arakawa A. The cumulus parameterization problem: past, present, and future. *J Clim*, 2004, 17: 2493–2525
- 30 Giorgi F, Marinucci M R. A investigation of the sensitivity of simulated precipitation to model resolution and its implications for climate studies. *Mon Wea Rev*, 1996, 124: 148–166
- 31 Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 527–548
- 32 Prein A F, Langhans W, Fosse G, et al. A review on regional convection-permitting climate modeling: demonstrations, prospects, and challenges. *Rev Geophys*, 2015, 53: 323–361
- 33 Gage K S. Evidence for a $k^{-5/3}$ Law Inertial Range in Mesoscale Two-Dimensional Turbulence. *J Atmos Sci*, 1979, 36: 1950–1954
- 34 Lu Y, Guo Z Y, Tang J P. Research progress of convection permitting regional climate modeling (in Chinese). *Sci Meteor Sin*, 2021, 41: 818–827 [陆云, 郭子悦, 汤剑平. 对流允许尺度区域气候模拟的研究进展. *气象科学*, 2021, 41: 818–827]
- 35 Lucas-Picher P, Argüeso D, Brisson E, et al. Convection-permitting modeling with regional climate models: latest developments and next steps. *Wiley Interdiscip Rev Clim. Change*, 2021, 12: e731
- 36 Luo Y, Zhang J, Yu M, et al. On the influences of urbanization on the extreme rainfall over Zhengzhou on 20 July 2021: a convection-permitting ensemble modeling study. *Adv Atmos Sci*, 2023, 40: 393–409
- 37 Xu Z, Han Y, Yang Z. Dynamical downscaling of regional climate: a review of methods and limitations (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2018, 49: 487–498 [徐忠峰, 韩瑛, 杨宗良. 区域气候动力降尺度方法研究综述. *中国科学: 地球科学*, 2018, 49: 487–498]
- 38 Trapp R J, Woods M J, Lasher-Trapp S G, et al. Alternative implementations of the “Pseudo-Global-Warming” methodology for event-based simulations. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126: e2021JD035017
- 39 Brogli R, Heim C, Mensch J, et al. The pseudo-global-warming (PGW) approach: methodology, software package PGW4ERA5 v1.1, validation, and sensitivity analyses. *Geosci Model Dev*, 2023, 16: 907–926
- 40 Lin C, Chen D, Yang K, et al. Impact of model resolution on simulating the water vapor transport through the central Himalayas: implication for models’ wet bias over the Tibetan Plateau. *Clim Dyn*, 2018, 51: 3195–3207
- 41 Luo Y, Chen Y. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall-producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: an ensemble approach. *J Geophys Res Atmos*, 2015, 120: 10593–10618

- 42 Gevorgyan A. Convection-permitting simulation of a heavy rainfall event in Armenia using the WRF model. *J Geophys Res Atmos*, 2018, 123: 11008–11029
- 43 Kukulies J, Prein A F, Curio J, et al. Kilometer-scale multimodel and multiphysics ensemble simulations of a mesoscale convective system in the Lee of the Tibetan Plateau: implications for climate simulations. *J Clim*, 2023, 36: 5963–5987
- 44 Lavin-Gullon A, Feijoo M, Solman S, et al. Synoptic forcing associated with extreme precipitation events over Southeastern South America as depicted by a CORDEX FPS set of convection-permitting RCMs. *Clim Dyn*, 2021, 56: 3187–3203
- 45 Yun Y, Liu C, Luo Y, et al. Warm-season mesoscale convective systems over eastern China: convection-permitting climate model simulation and observation. *Clim Dyn*, 2021, 57: 3599–3617
- 46 Zhang Z, Varble A, Feng Z, et al. Growth of mesoscale convective systems in observations and a seasonal convection-permitting simulation over Argentina. *Mon Weather Rev*, 2021, 149: 3469–3490
- 47 Lancz D, Szintai B, Honnert R. Modification of a parametrization of shallow convection in the grey zone using a mesoscale model. *Bound-Layer Meteorol*, 2018, 169: 483–503
- 48 Feijoo M, Solman S. Convection-permitting modeling strategies for simulating extreme rainfall events over Southeastern South America. *Clim Dyn*, 2022, 59: 2549–2569
- 49 Zittis G, Bruggeman A, Camera C, et al. The added value of convection permitting simulations of extreme precipitation events over the eastern Mediterranean. *Atmos Res*, 2017, 191: 20–33
- 50 Kendon E J, Prein A F, Senior C A, et al. Challenges and outlook for convection-permitting climate modelling. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci*, 2021, 379: 20190547
- 51 Zheng Y, Alapaty K, Herwehe J A, et al. Improving high-resolution weather forecasts using the weather research and forecasting (WRF) model with an updated Kain–Fritsch scheme. *Mon Weather Rev*, 2016, 144: 833–860
- 52 Arakawa A, Wu C M. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 1977–1992
- 53 Park H, Kim G, Cha D, et al. Effect of a scale-aware convective parameterization scheme on the simulation of convective cells-related heavy rainfall in South Korea. *J Adv Model Earth Syst*, 2022, 14: e2021MS002696
- 54 Mahoney K M. The representation of cumulus convection in high-resolution simulations of the 2013 Colorado Front Range Flood. *Mon Weather Rev*, 2016, 144: 4265–4278
- 55 Loikith P C, Waliser D E, Kim J, et al. Evaluation of cool season precipitation event characteristics over the Northeast US in a suite of downscaled climate model hindcasts. *Clim Dyn*, 2018, 50: 3711–3727
- 56 Yu G A, Yue P, Zhang C, et al. River hydrology studies in Southeast Xizang: progress and challenges (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 394–413 [余国安, 岳蓬胜, 张晨笛, 等. 藏东南地区的河流水文研究: 进展与挑战. 科学通报, 2024, 69: 394–413]
- 57 Lundquist J, Abel M R, Gutmann E, et al. Our skill in modeling mountain rain and snow is bypassing the skill of our observational networks. *Bull Am Meteorol Soc*, 2019, 100: 2473–2490
- 58 Li L, Pontoppidan M, Sobolowski S, et al. The impact of initial conditions on convection-permitting simulations of a flood event over complex mountainous terrain. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2020, 24: 771–791
- 59 Caldas-Alvarez A, Augenstein M, Ayzel G, et al. Meteorological, impact and climate perspectives of the 29 June 2017 heavy precipitation event in the Berlin metropolitan area. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2022, 22: 3701–3724
- 60 Rasmussen R M, Chen F, Liu C H, et al. CONUS404: the NCAR–USGS 4-km long-term regional hydroclimate reanalysis over the CONUS. *Bull Am Meteorol Soc*, 2023, 104: E1382–E1408
- 61 Keat W J, Stein T H M, Phaduli E, et al. Convective initiation and storm life cycles in convection-permitting simulations of the Met Office Unified Model over South Africa. *Quart J R Meteorol Soc*, 2019, 145: 1323–1336
- 62 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
- 63 Lyra M J A, Gomes H B, Herdies D L, et al. Extreme precipitation events over the east coast of northeast Brazil: synoptic study and MPAS simulation. *Weather Clim Extremes*, 2024, 45: 100711
- 64 Li P, Furtado K, Zhou T, et al. The diurnal cycle of East Asian summer monsoon precipitation simulated by the Met Office Unified Model at convection-permitting scales. *Clim Dyn*, 2020, 55: 131–151
- 65 Zou L, Zhou T. Convection-permitting simulations of current and future climates over the Tibetan Plateau. *Adv Atmos Sci*, 2024, 41: 1901–1916
- 66 Guo Z, Fang J, Sun X, et al. Decadal long convection-permitting regional climate simulations over eastern China: evaluation of diurnal cycle of precipitation. *Clim Dyn*, 2020, 54: 1329–1349
- 67 Prein A F, Rasmussen R M, Ikeda K, et al. The future intensification of hourly precipitation extremes. *Nat Clim Change*, 2017, 7: 48–52
- 68 Dominguez F, Rasmussen R, Liu C, et al. Advancing south american water and climate science through multidecadal convection-permitting

- modeling. *Bull Am Meteorol Soc*, 2023, 105: E32–E44
- 69 Ma Y, Hu Z, Xie Q, et al. Convection-permitting modeling over the Tibetan Plateau improves the simulation of Meiyu Rainfall during the 2011 Yangtze Plain flood. *Atmos Res*, 2022, 265: 105907
- 70 Patricola C M, Wehner M F. Anthropogenic influences on major tropical cyclone events. *Nature*, 2018, 563: 339–346
- 71 Takemi T. Impacts of global warming on extreme rainfall of a slow-moving typhoon: a case study for typhoon Talas (2011). *Sola*, 2019, 15: 125–131
- 72 Chen J, Wang Z, Tam C Y, et al. Impacts of climate change on tropical cyclones and induced storm surges in the Pearl River Delta region using pseudo-global-warming method. *Sci Rep*, 2020, 10: 1965
- 73 Tran T L, Ritchie E A, Perkins-Kirkpatrick S E, et al. Future changes in tropical cyclone exposure and impacts in Southeast Asia from CMIP6 pseudo-global warming simulations. *Earths Future*, 2022, 10: e2022EF003118
- 74 Schneider T, Behera S, Boccaletti G, et al. Harnessing AI and computing to advance climate modelling and prediction. *Nat Clim Chang*, 2023, 13: 887–889
- 75 Sun W, Li J, Yu R, et al. Exploring changes of precipitation extremes under climate change through global variable-resolution modeling. *Sci Bull*, 2024, 69: 237–247
- 76 Dougherty E M, Prein A F, Gutmann E D, et al. Future simulated changes in central U.S. mesoscale convective system rainfall caused by changes in convective and stratiform structure. *JGR Atmos*, 2023, 128: e2022JD037537
- 77 Prein A F, Feng Z, Fiolleau T, et al. Km-scale simulations of mesoscale convective systems over South America—A feature tracker intercomparison. *JGR Atmos*, 2024, 129: e2023JD040254
- 78 Zhang Y, Wang K. The changing morphology of global precipitation systems during the last two decades. *Bull Am Meteorol Soc*, 2024, 105: E1861–E1880
- 79 Prein A F, Mooney P A, Done J M. The multi-scale interactions of atmospheric phenomenon in mean and extreme precipitation. *Earths Future*, 2023, 11: e2023EF003534
- 80 Singh I, Dominguez F, Demaria E, et al. Extreme landfalling atmospheric river events in Arizona: possible future changes. *JGR Atmos*, 2018, 123: 7076–7097
- 81 Chen G, Wang W C, Cheng C T, et al. Extreme snow events along the coast of the northeast United States: potential changes due to global warming. *J Clim*, 2021, 34: 2337–2353
- 82 Cholette M, Thériault J M. Precipitation type distribution and microphysical processes during the 1998 ice storm simulated under pseudo-warmer conditions. *JGR Atmos*, 2021, 126: e2020JD033577
- 83 Trenberth K E, Dai A, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation. *Bull Am Meteorol Soc*, 2003, 84: 1205–1218
- 84 Van de Walle J, Thiery W, Brogli R, et al. Future intensification of precipitation and wind gust associated thunderstorms over Lake Victoria. *Weather Clim Extremes*, 2021, 34: 100391
- 85 Lenderink G, van Meijgaard E. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nat Geosci*, 2008, 1: 511–514
- 86 Yin J, Guo S, Gu L, et al. Thermodynamic response of precipitation extremes to climate change and its impacts on floods over China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4315–4325 [尹家波, 郭生练, 顾磊, 等. 中国极端降水对气候变化的热力学响应机理及洪水效应. 科学通报, 2021, 66: 4315–4325]
- 87 Lenderink G, Vries H de, Fowler H J, et al. Scaling and responses of extreme hourly precipitation in three climate experiments with a convection-permitting model. *Transact A Math Phys Eng Sci*, 2021, 379: 20190544
- 88 Zhao R, Tam C Y, Lee S M, et al. Attributing extreme precipitation characteristics in south China Pearl River Delta Region to anthropogenic influences based on pseudo global warming. *Earth Space Sci*, 2024, 11: e2023EA003266
- 89 Doan Q V, Chen F, Kusaka H, et al. Increased risk of extreme precipitation over an urban agglomeration with future global warming. *Earths Future*, 2022, 10: e2021EF002563
- 90 Yin J, Guo S, Gentile P, et al. Does the hook structure constrain future flood intensification under anthropogenic climate warming? *Water Resour Res*, 2021, 57: e2020WR028491
- 91 Michaelis A C, Willison J, Lackmann G M, et al. Changes in winter North Atlantic extratropical cyclones in high-resolution regional pseudo-global warming simulations. *J Clim*, 2017, 30: 6905–6925
- 92 Fosse G, Gaetani M, Kendon E J, et al. Convection-permitting climate models offer more certain extreme rainfall projections. *npj Clim Atmos Sci*, 2024, 7: 1
- 93 Gensini V A, Haberlie A M, Ashley W S. Convection-permitting simulations of historical and possible future climate over the contiguous United States. *Clim Dyn*, 2023, 60: 109–126
- 94 Wang J, Chen Y, Nie J, et al. On the role of anthropogenic warming and wetting in the July 2021 Henan record-shattering rainfall. *Sci Bull*, 2022,

- 67: 2055–2059
- 95 Tang J, Lu Y, Wang S, et al. Projection of hourly extreme precipitation using the WRF model over Eastern China. *JGR Atmos*, 2023, 128: e2022JD036448
 - 96 Guo Z, Fang J, Sun X, et al. Sensitivity of summer precipitation simulation to microphysics parameterization over Eastern China: convection-permitting regional climate simulation. *JGR Atmos*, 2019, 124: 9183–9204
 - 97 Prein A F, Ge M, Valle A R, et al. Towards a unified setup to simulate mid-latitude and tropical mesoscale convective systems at kilometer-scales. *Earth Space Sci*, 2022, 9: e2022EA002295
 - 98 Lv M, Xu Z, Yang Z L. Cloud resolving WRF simulations of precipitation and soil moisture over the central Tibetan Plateau: an assessment of various physics options. *Earth Space Sci*, 2020, 7: e2019EA000865
 - 99 Liu Y, Yau M K, Shima S, et al. Parameterization and explicit modeling of cloud microphysics: approaches, challenges, and future directions. *Adv Atmos Sci*, 2023, 40: 747–790
 - 100 Zhao Y, Wang X, Liu Y, et al. Are parameterized entrainment rates as scale-dependent as those estimated from cloud resolving model simulations? *Geophys Res Lett*, 2024, 51: e2024GL110735
 - 101 Hohenegger C, Brockhaus P, Bretherton C S, et al. The soil moisture–precipitation feedback in simulations with explicit and parameterized convection. *J Clim*, 2009, 22: 5003–5020
 - 102 Jia C, Zhao P, Wang J, et al. An application of the maximum entropy production method in the WRF Noah land surface model. *JGR Atmos*, 2023, 128: e2022JD037867
 - 103 Byrne M P, Hegerl G C, Scheff J, et al. Theory and the future of land-climate science. *Nat Geosci*, 2024, 17: 1079–1086
 - 104 Wang T, Li Z, Ma Z, et al. Diverging identifications of extreme precipitation events from satellite observations and reanalysis products: a global perspective based on an object-tracking method. *Remote Sens Environ*, 2023, 288: 113490
 - 105 Chen H, Li P, Zhao Y. A review and outlook of verification and evaluation of precipitation forecast at convection-permitting resolution (in Chinese). *Adv Meteor Sci Technol*, 2021, 11: 155–164 [陈昊明, 李普曦, 赵妍. 千米尺度模式降水的检验评估进展及展望. *气象科技进展*, 2021, 11: 155–164]
 - 106 Guo Z, Tang J, Tang J, et al. Object-based evaluation of precipitation systems in convection-permitting regional climate simulation over Eastern China. *JGR Atmos*, 2022, 127: e2021JD035645
 - 107 Prein A F, Gobiet A. Impacts of uncertainties in European gridded precipitation observations on regional climate analysis. *Int J Climatol*, 2017, 37: 305–327
 - 108 Olsson J, Du Y, An D, et al. An analysis of (sub-)hourly rainfall in convection-permitting climate simulations over southern sweden from a user's perspective. *Front Earth Sci*, 2021, 9: feart.2021.681312
 - 109 Meredith E P, Ulbrich U, Rust H W. Subhourly rainfall in a convection-permitting model. *Environ Res Lett*, 2020, 15: 034031
 - 110 Gu J, Zhao C, Xu M, et al. Global convection-permitting model improves subseasonal forecast of plum rain around Japan. *Environ Res Lett*, 2024, 19: 104021
 - 111 Cao K, Wu Q, Wang L, et al. GPU-HADVPPM V1.0: a high-efficiency parallel GPU design of the piecewise parabolic method (PPM) for horizontal advection in an air quality model (CAMx V6.10). *Geosci Model Dev*, 2023, 16: 4367–4383
 - 112 Liu C, Ikeda K, Rasmussen R, et al. Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Clim Dyn*, 2017, 49: 71–95
 - 113 Chan S C, Kendon E J, Berthou S, et al. Europe-wide precipitation projections at convection permitting scale with the Unified Model. *Clim Dyn*, 2020, 55: 409–428
 - 114 Kendon E J, Stratton R A, Tucker S, et al. Enhanced future changes in wet and dry extremes over Africa at convection-permitting scale. *Nat Commun*, 2019, 10: 1794
 - 115 Slingo J, Bates P, Bauer P, et al. Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nat Clim Chang*, 2022, 12: 499–503
 - 116 Lenderink G, de Vries H, Fowler H J, et al. Scaling and responses of extreme hourly precipitation in three climate experiments with a convection-permitting model. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci, Royal Society*, 2021, 379: 20190544
 - 117 Giorgi F, Prein A F, Males J. Populated regional climate models (Pop-RCMs): the next frontier in regional climate modeling. *PLOS Clim*, 2022, 1: e0000042
 - 118 Wang X, Shi S, Zhu L, et al. Traditional and novel methods of rainfall observation and measurement: a review. *J Hydrometeorol*, 2023, 24: 2153–2176
 - 119 Zhang H, Dai Y, Zhang S. A review of regional earth system model development (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2024, 47: 216–223 [张焱, 戴永久, 张树磊. 区域地球系统模式研究进展. *大气科学学报*, 2024, 47: 216–223]
 - 120 Crespi A, Lussana C, Brunetti M, et al. High-resolution monthly precipitation climatologies over Norway (1981–2010): joining numerical model data sets and in situ observations. *Intl J Climato*, 2019, 39: 2057–2070

Summary for “对流可分辨尺度极端降水模拟研究综述”

A review on convection-permitting modeling of extreme precipitation

Hongyong Yu^{1†}, Puxi Li^{2†} & Kaicun Wang^{3*}

¹ State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

³ Institute of Carbon Neutrality, Sino-French Institute for Earth System Science, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

† Equally contributed to this work

* Corresponding author, E-mail: kcwang@pku.edu.cn

Extreme precipitation presents grand challenges for meteorological disaster prevention and water resource management, which becomes even more serious under global warming as the frequency and intensity of extreme precipitation are increasing. However, our understanding of the process and intensity of extreme precipitation remains limited. Ground-based gauge observations are generally considered the “ground truth”, but in complex terrain regions with high spatial variability in precipitation, they suffer from limited coverage and insufficient representativeness. Satellite precipitation retrievals, although offering global coverage, often underestimate the intensity of heavy precipitation and exhibit inaccurate diurnal variations. Numerical simulations of extreme precipitation events have shown their potential to improve our understanding of their occurrence and mechanisms. Advances in computational capabilities have enabled numerical models to operate at horizontal resolutions of 4 km or higher, facilitating the simulation of extreme precipitation events without relying on semi-empirical convective parameterization schemes, which is a major source of uncertainty in precipitation simulations. These simulations, known as convection-permitting modeling, more accurately capture key characteristics of extreme precipitation, such as hourly precipitation intensity, mesoscale convective systems that drive heavy precipitation and strong winds, and precipitation patterns in complex terrain, compared to traditional large-scale convection-parameterized modeling with horizontal resolution coarser than 10 km. Convection-permitting modeling has become a reliable tool for improving precipitation estimates and advancing our understanding of hydrological processes. Leading international institutions are at the forefront of research in this field, with numerous collaborative projects underway. As a result, the use of convection-permitting modeling to study extreme precipitation events has grown rapidly in recent years.

This article systematically reviews studies on convection-permitting modeling of extreme precipitation over the past decade, with a focus on their main objectives, methods, and key findings. The reliability of convection-permitting modeling has led to innovative approaches, such as using it to correct near-real-time satellite precipitation products in complex terrain or to reconstruct extreme precipitation events from the past that lacked sufficient observational data. Research on historical extreme precipitation events has advanced to address the limitations of convection-permitting modeling and explore strategies to overcome these challenges. Two common approaches to improving model performance are increasing horizontal resolution and employing scale-aware convective parameterization schemes. However, issues such as the cost-effectiveness of simulations and uncertainties in simulating heavy precipitation during cold seasons require further investigation. For future extreme precipitation events, key topics include changes in precipitation driven by mesoscale convective systems and the relationship between extreme precipitation and temperature changes under climate change. The combination of convection-permitting modeling with the pseudo-global warming approach enables the estimation of extreme precipitation events under various future climate scenarios, offering more detailed insights into the physical processes underlying these events and allowing for a more comprehensive analysis of climate change impacts. This review highlights how study areas have expanded from typical regions with abundant observations to those with limited observational data, and how simulations have increasingly incorporated “multi-model and multi-physics ensemble, wide-range and long-term simulations”. The research focus has also evolved from studying precipitation characteristics to conducting in-depth analyses of dynamic and thermodynamic mechanisms. The major challenges in this field include the complexity of parameterization schemes beyond convection processes, limitations in evaluation datasets and methods, as well as large computing and storage requirements. Finally, this review proposes strategies to advance convection-permitting modeling of extreme precipitation, including enhancing domestic and international simulation collaborations, improving evaluation datasets and methods, developing more comprehensive regional and global unified models, and better aligning with downstream application needs.

extreme precipitation, convection-permitting, numerical simulation, parameterization, deep convection