

中小尺度对流系统的高分辨率数值模拟近况和未来挑战

黎慧琦^{1, 2} 张大林^{2, 3}

(1 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州510640; 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 美国马里兰大学大气海洋系, 马里兰 20742)

摘要: 随着高速、大容量、并行计算能力的迅速增长和中尺度数值模式的不断完善, 近年来不断涌现使用1 km乃至次千米网格距开展中、小尺度对流系统的数值模拟研究。这些数值模拟工作展现出目前观测手段还无法得到的动力学一致的高分辨率气象信息, 大大提高了对一些中、小尺度对流系统内部结构和演变的理解。但高分辨率数值模拟的未来发展也面临着不少问题和挑战。首先回顾提高模式分辨率至1 km乃至次千米模拟中、小尺度对流系统的进展, 并综述目前在高分辨率数值模拟中的资料同化和物理过程处理方法, 同时指出中尺度模式中处理积云对流、大气边界层和辐射过程时值得注意的分辨率“灰色区”, 然后介绍使用1 km和次千米分辨率模拟中、小尺度对流系统的几篇有代表性的工作。最后讨论高分辨率数值模拟的未来发展和挑战。

关键词: 中小尺度对流系统, 高分辨率数值模拟, 资料同化, 物理过程灰色区

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.010

High-Resolution Modeling of Convective Storms: Progress and Future Challenges

Li Huiqi^{1, 2}, Zhang Dalin^{2, 3}

(1 Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510640
2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081
3 Department of Atmospheric and Oceanic Science, University of Maryland, College Park, MD, USA 20742)

Abstract: With the rapid growth of fast, massive parallel computing power and steady improvement in mesoscale numerical models, there have been a growing number of numerical modeling studies of mesoscale convective systems (MCSs) using kilometer and sub-kilometer grid resolutions. These simulations have provided tremendous high resolution, dynamically consistent meteorological information that could not be obtained from current observations, and they have greatly improved our understanding of the internal structures and evolution of MCSs. However, some significant challenges remain in the future development of high-resolution numerical modeling. This paper reviews the progress that has been made in modeling convective storms with progressively increasing spatial resolution to one kilometer and sub-kilometer, and then introduces convective-scale data assimilation techniques and the approaches to the implementation of some important physical processes into mesoscale numerical models, including the “gray zone” problem associated with moist convection, planetary boundary layer, and radiation processes. Some typical studies on high-resolution (kilometer or sub-kilometer scale) simulations of convective storms are also presented. The future development and challenges in high-resolution simulation are finally discussed.

Keywords: mesoscale convective system, high-resolution modeling, data assimilation, gray zones in physics parameterizations

0 引言

自从1922年Richardson提出以流体力学为基础的

数值天气预报概念, 数值模式逐渐成为大气科学中一个重要的领域。尤其20世纪80年代以来, 随着高性能计算机的迅速发展, 模式分辨率不断提高, 模式次网格尺度物理过程的逐步改进, 加上越来越多观测资料的同化, 大大提高了全球和区域数值天气预报精度, 使得数值天气预报已成为现代天气预报业务的基础和天气预报业务发展的主流方向。可以说, 数值天气预报所取得的成就是近百年来物理学科各领域中最具革命性的^[1]。此外, 这些成就还带动了海洋、水文、环

收稿日期: 2020年12月8日; 修回日期: 2021年6月29日
第一作者: 黎慧琦(1990—), Email: lihq529@163.com
通信作者: 张大林(1952—), Email: dalin@umd.edu
资助信息: 国家重点科技攻关项目(2018YFC1507400);
中国气象科学研究院科学发展基金(2020KJ022);
灾害天气国家重点实验室开放课题(2019LASW-B03)

境、生态预测或预报等其他领域的发展。同时，数值模式作为一项重要的工具，能为天气现象机理研究提供动力学、热力学一致的四维数据集，以补充观测网未能捕捉的信息。借助数值模式还能开展敏感性试验和动力、热力诊断分析，区分不同的物理过程或影响因子的作用^[2]。

业务模式的数值天气预报和物理机制研究为主所进行的数值模拟是有差别的。对于后者又分为实际个例模拟和理想数值试验。实际个例模拟采用实际的初始和侧边界条件，通常是从全球再分析数据获得，模拟的结果需要先和观测进行对比验证，然后用于特定问题的研究。理想数值试验使用随高度变化的标准探空启动试验。而业务模式和数值模拟研究的主要目的也不同。前者主要用于预报气温、湿度、风和降水等气象要素，后者主要研究天气系统的三维结构、演变及其物理机制。总之，深入理解天气演变机理和提高气象预报（模拟）能力是发展数值天气预报模式的两个主要目标。

到20世纪末，对积云对流、云微物理、边界层过程等相关物理过程认识有所加深，相应的参数化方案得以不断完善，同时得益于计算机的高速发展，数值模式的分辨率已得到显著提高。早期的业务模式分辨率在380 km左右，而到90年代，区域模式已达5~10 km。众多业务中心逐渐从采用原始方程模式发展到采用非静力模式。21世纪以来，不少国家地区的非静力业务模式的水平分辨率已逐步达到1~3 km，例如美国使用3 km的高分辨率快速更新系统（HRRR）^[3]，英国使用1.5 km版本的MetUM^[4]，瑞士使用1.1 km的COSMO模式^[5]，我国GRAPES-Meso模式分辨率也发展至3 km。

近十年来，越来越多的研究尝试使用分辨率小于1 km，甚至几十米的大涡数值模拟来探讨更精细的物理过程，这些研究所用的数值模式包含的可供选择的物理方案比业务模式丰富。本文将对中、小尺度对流系统（如飏线、中尺度对流复合体、热带气旋和锋面系统中的对流、龙卷风暴、超级单体）的高分辨率（主要关注1 km左右以及次千米级）模拟涉及的重要方面进行梳理。第1~3节分别讨论在对某些中、小尺度对流系统进行数值模拟时，模式分辨率从12 km提高到1 km以下的作用，改善初始条件的方法及重要性，以及不同分辨率下使用不同物理方案的影响。第4节给出几个1 km和次千米级的高分辨率模拟例子。最后一节总结中、小尺度对流系统高分辨率数值模拟面临的挑战和未来展望。

1 模式分辨率的影响

大气运动从上万千米行星环流到毫米量级湍流输送，横跨12个量级尺度。随着计算机能力的不断提升，人们总是设法模拟更小尺度的大气现象，这就使得数值模拟的分辨率不断提高。一般来说，要模拟更小尺度的天气现象或梯度大的气象变量，尤其由复杂地形、非均匀地表所产生的大气运动，需要使用更高的分辨率。我们可以认为，这主要因为使用高分辨率网格距虽然仍存在次尺度物理参数化的问题，但可减小由重要物理过程（如对流、边界层）参数化产生的严重不确定性，从而更好地显示可分辨尺度各物理定律对大气运动的控制。在当前的计算机条件下，大多高分辨率数值模拟仍需要采用多重嵌套网格^[6]。在使用同样的初始条件和物理方案的前提下，主要有以下两个途径改善业务预报：一个是通过提高分辨率改善中、小尺度对流系统的确定性预报结果，另一个是采用更多成员的集合预报以避免单个模式预报的不确定性^[7-10]。业务预报单位往往需要考虑重点将计算资源分配在哪个途径。而对数值模拟研究来说，大量研究显示提高水平分辨率有利于改善地形环流，城、郊以及水、陆差异，中尺度对流系统的结构，台风和降水的强度等的模拟。可以认为，提高分辨率的正效果也可能与复杂微物理方案模拟得到网格尺度的潜热释放有关。

Weisman等^[11]采用12~1 km的分辨率模拟飏线，发现分辨率越高，模拟的飏线结构和演变更接近真实。Bryan等^[12]分析使用更高分辨率（1~0.125 km）对飏线模拟的影响，他们的研究发现1 km的模拟不能合理重现湍流动能特征，而更高分辨率的模拟（如0.125 km）能更好地描述湍流特征（图1），这使得使用两种分辨率所模拟的飏线在系统相速度、云层厚度、对流组织化、降水量等方面有明显差异。Bryan等^[13]利用4、1、0.25 km三种分辨率对飏线的模拟研究指出，较低分辨率的模拟由于模拟的对流单体偏大，缺乏夹卷中层空气，使得云顶发展得偏高，产生偏多降水，而较高分辨率的模拟由于可分辨湍流的发展，有更多的云水蒸发。在很多情况下，分辨率主要是影响上升气流的模拟，从而影响水汽凝结或云水蒸发过程。Verrelle等^[14]使用中层较湿的初始探空启动模拟，则发现总降水量随着分辨率的降低而减少。Potvin等^[15]对超级单体的模拟研究显示4 km分辨率不能合理模拟超级单体，导致单体过早衰亡，3 km的模拟能更好地模拟超级单体的低层旋转等特征，1 km的模拟能进一步改善对低层旋转强度的模拟。Sobash等^[16]分别

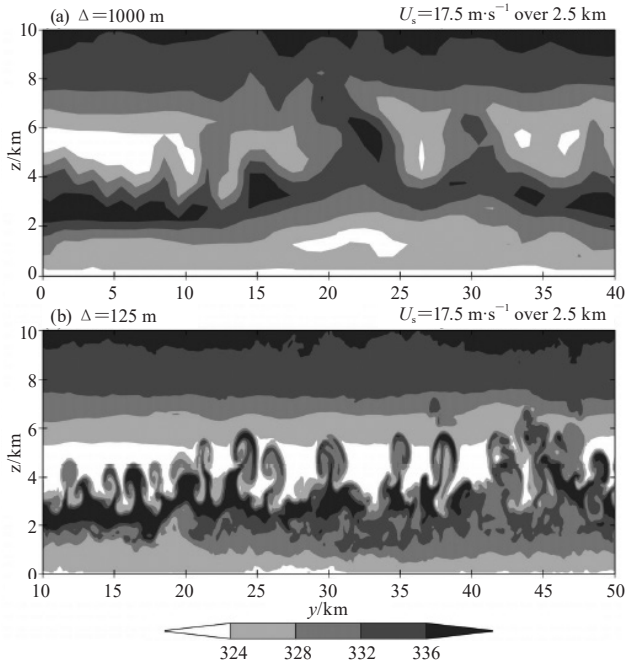


图1 使用分辨率分别为1 km (a) 和 0.125 km (b) 所模拟的沿飑线深对流区的相当位温剖面 (摘自Bryan等^[12])

Fig. 1 Along-line cross sections of equivalent potential temperature from simulations of a squall line using 1 km (a), and 0.125 km (b) grid spacing (from Bryan等^[12])

使用3 km和1 km分辨率的模式对497个强天气事件进行预报, 评估发现相比3 km分辨率, 使用1 km分辨率的预报输出能诊断获得更准确的龙卷的相关指标 (如低层0~1 km的上升螺旋度), 这主要是由于1 km分辨率能更好地预报小尺度对流过程。最近, Squitieri等^[17]使用3、1、0.333 km三种分辨率对14个中尺度对流系统的结构进行模拟, 其研究也发现1 km分辨率模拟产生的对流冷池堆大小、系统传播速度、3 h降水率以及9 h降水范围较为接近实际观测。水平分辨率对地形降水的影响相对较易理解。在这方面, Heim等^[18]通过使用4.4~1.1 km分辨率对阿尔卑斯山区湿对流连续9天的模拟显示, 地形细节对白天的降水分布影响不是很明显, 只是延迟对流的触发, 影响降水量日变化的幅度, 但对夜间山谷中对流冷池触发的降水强度和持续时间影响十分重要。除了确定性预报以外, Schwartz等^[10]评估了3 km集合预报和1 km集合预报32 d的降水概率预报结果, 发现1 km的集合预报质量通常优于3 km的集合预报 (图2), 即虽然二者预报偏差相似, 但前者在大多时刻的ETS评分和可测概率 (POD) 都比后者高, 误报率也比后者低。

在热带气旋的模拟研究中, 对比Liu等^[19]对飓风Andrew (1992) 的6 km分辨率的模拟, Yau等^[20]的研究展现了使用2 km分辨率能更好地模拟飓风Andrew

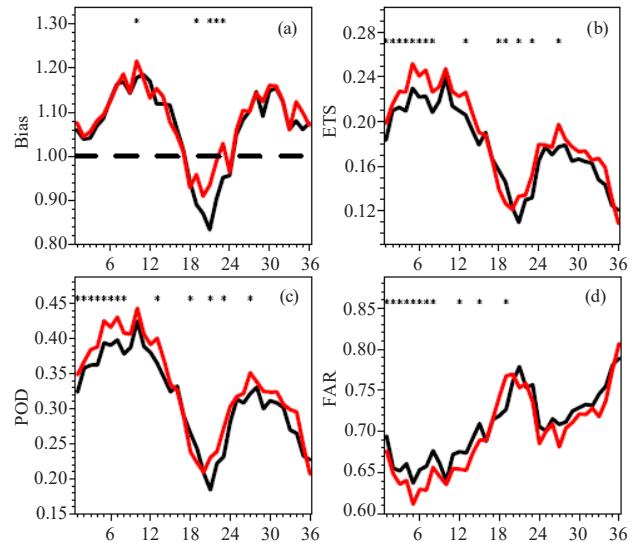


图2 分别用3 km (黑实线) 和1 km (红实线) 分辨率对2013年5月15日—6月15日发生在美国中西部的降水的集合预报试验结果 (摘自Schwartz等^[10])

(a) 偏差; (b) ETS; (c) 可测概率 (POD); (d) 误报率 (FAR)

Fig. 2 Bias (a), ETS (b), POD (c), and FAR (d) of ensemble precipitation forecasts with 3 km (black) and 1 km (red) grid spacing for the central and eastern portions of the United States between 15 May and 15 June 2013 (from Schwartz等^[10])

(1992) 的螺旋雨带。同样, Li等^[21]使用1.33 km分辨率能模拟出台风“龙王” (2005) 在登陆时由埃克曼泵吸和非绝热加热产生的具有14 h生命史的螺旋雨带。Gentry等^[22]比较了8~1 km对飓风Ivan (2004) 的模拟结果, 显示越高分辨率所模拟的飓风最强风半径越小, 眼墙越窄, 强度越强。他们还发现格距小于4 km的模拟中开始出现多边形眼墙 (图3), 这可能是因为高分辨率模拟能分辨出眼墙内由切变涡度产生的更小尺度的涡旋结构和演变过程。事实上, 一些数值模拟研究^[23-24]显示高分辨率网格距的使用能使热带气旋的强度达到甚至超过Emanuel^[25]所提出的最大理论强度 (MPI)。飓风Patrica (2015) 的强度创东太平洋热带气旋强度的历史纪录, Qin等^[26]使用333 m水平分辨率、55垂直层能模拟出其强度和增强速率, 模拟的最大地面风达到92 m·s⁻¹, 地面最低中心气压达到884 hPa, 每小时地面风速增强速率达2.5 m·s⁻¹, 中心气压降低速率达4.5 hPa, 最强风半径小于10 km。

相较于水平分辨率对数值模拟影响的研究, 关于提高垂直分辨率的研究较少。但早在20世纪90年代, 已有学者提出水平分辨率和垂直分辨率需要协调一致, 模拟预报结果才能更合理^[27-31]。使用与水平分辨率不协调的垂直分辨率, 可能会产生更多“噪声”。

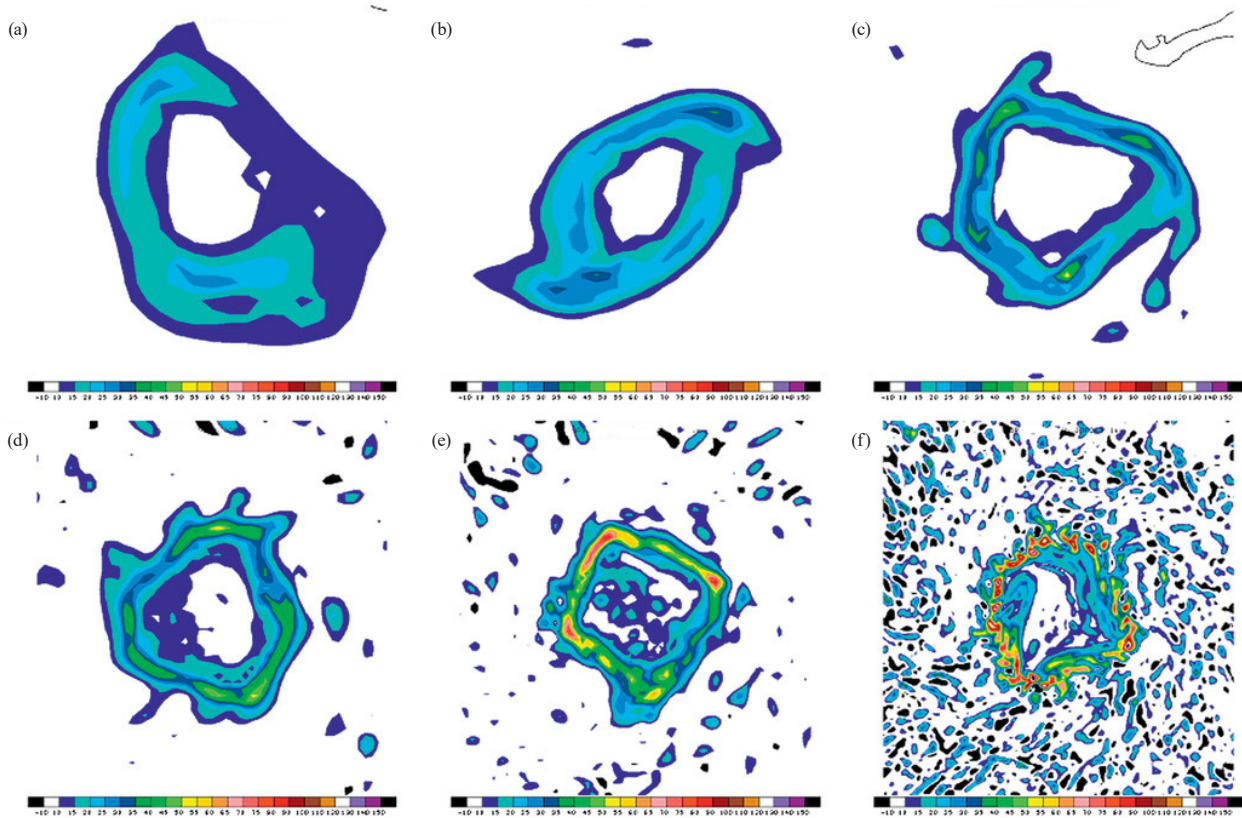


图3 使用分辨率分别为8 km (a), 6 km (b), 4 km (c), 3 km (d), 2 km (e) 和1 km (f) 对台风所作WRF模拟的850 hPa位涡 (PV), 位涡特征与影响台风强度的对称或非对称过程密切相关 (摘自Gentry等^[22])

Fig. 3 Horizontal distribution of potential vorticity (PV) at 850 hPa from the 8 km (a), 6 km (b), 4 km (c), 3 km (d), 2 km (e), and 1 km (f) simulations of a tropical cyclone. The characteristics of PV are associated with the symmetric and asymmetric processes crucial to TC intensity (from Gentry et al^[22])

目前, 很多模拟研究已采用超过70垂直层和几百帕的模式层顶。Aligo^[32]关于垂直分辨率对美国中西部降水预报的研究指出, 增加不同高度的垂直分辨率会产生不同的影响, 增加低层分辨率有助于边界层通量模拟, 增加融化层以上的垂直分辨率有助提高降水预报。但同时增加不同高度的分辨率可能会由于边界层过程和云微物理过程共同作用导致降水预报评分并不一定提高。Zhang等^[33-34]对飓风模拟的研究发现增加低层垂直分辨率会增加水汽辐合, 影响较高层的潜热释放, 从而增加模拟飓风的强度。他们认为增加低层垂直分辨率与增加水平分辨率一样, 有利于增强低层辐合。

总之, 提高水平、垂直分辨率往往能更好地模拟中小尺度结构特征。但提高分辨率和改善模拟、预报并非简单的线性关系, 还存在不确定的结论^[9], 尤其是当分辨率提高到次千米以下。这其中一个重要原因是当前的各种物理方案是依赖于网格分辨率的, 不考虑物理方案所包含的假设而简单地提高模式分辨率是不合理的, 在第4节中, 我们将针对这个问题进行

进一步讨论, 同时还讨论当模式水平分辨率位于积云对流和湍流显式或隐式处理的所谓“灰色区”时的问题。此外, 在不同的地理区域, 由于地形复杂程度及其对降水触发的强迫作用不同 (如Heim等^[18]), 提高分辨率对降水预报的影响也不同^[35]。

2 模式初始条件的重要性

模式初始条件的质量对中、小尺度对流系统的可预报性十分重要。实际个例模拟的初始条件通常是从全球分析资料插值得到的。全球分析资料是以全球预报场为初猜场, 然后利用多种气象观测, 包括辐射形式的遥感资料改善初猜场。但是所用到的气象观测资料分辨率一般较低, 遥感资料则不容易直接用于数值模式, 而另一些特别的观测 (如雷达) 只能覆盖小部分区域, 存在不同程度的观测误差, 且动力一致性有所欠缺。一般来说, 模拟的最初阶段主要依赖于初始场的质量, 其中包括观测和分析误差。如对在初始或临近时刻已发生的对流事件, 初始场中与之有关的大气稳定度、湿度、水凝物以及对流尺度环流直接影响到对流系统的大小、强度和未来的发展。如对流

系统是在模式起步一段时间后产生，初始条件的质量将决定它产生的时间和地点的可预报性。随着进一步时间积分，模式动力和物理过程的合理、准确度才显得越来越重要。另外，模式初始化过程需要将低分辨率的分析场插值到高分辨模式格点上，这存在动力场的“spin up”问题，即产生合理的垂直环流和水汽分布。

资料同化是提高初始场质量，将中小尺度信息融入初始场，缩短“spin up”时间的有效方法，特别是热带气旋的模拟^[36]。盛春岩等^[37]探讨了雷达资料同化和提高模式水平分辨率对一次华北暴雨过程预报的影响，结果显示18 km分辨率试验中使用雷达资料同化的预报结果比不使用雷达资料同化的3 km试验结果要好，但提高分辨率对强降水预报也十分重要。使用经过资料同化改善的较粗分辨率的分析场驱动高分辨率模拟能有效提高高分辨率模拟水平，更好的初始条件也能使提高分辨率至1 km在降水预报方面的优势更显著^[35]。由此可见，合理运用资料同化能有效改善高分辨率数值模拟。

由于高分辨率数值模拟能分辨包括对流尺度等更多尺度的现象，因此资料同化也必须协调处理不同尺度的特征。对于对流尺度，误差增长往往会更快，而且还存在非线性等问题。四维变分^[38]和集合卡尔曼滤波(EnKF)^[39-41]技术是目前较先进的同化方法，更适合对流尺度同化。

多普勒雷达资料时空分辨率高，能够反映对流

的结构特征，是对流尺度资料同化的重要观测来源。早期，学者根据雷达反射率估计水凝物含量、潜热等，然后通过潜热松弛逼近法(nudging)^[42-43]、云分析^[44-46]等方法进行间接同化。这些方法往往依赖于经验关系，在对流尺度数值模拟中有一定的局限性。变分方法^[47-52](图4和图5)和EnKF技术较适用于对流尺度同化，采用变分方法或EnKF还能直接同化雷达反射率和径向风。大量研究采用三维变分(3DVar)直接同化雷达反射率和径向风^[46-48, 52]。相比3DVar，四维变分(4DVar)能使用到同化时间窗里的观测，将时间倾向项作为约束，因此可以更好地捕捉对流的演变特征。但4DVar所需计算资源较多。Sun等^[53-54]应用4DVar技术设计了变分多普勒雷达分析系统(VDRAS)，借助该系统可以反演得到与对流相关的三维高分辨率风场、热力场和微物理场。该系统在北京奥运会期间也有应用^[55]。EnKF不需要切线性和伴随矩阵，它能利用集合预报得到流依赖的背景误差协方差以及不同变量间的协方差。Dowell等^[56]、Tong等^[57]展现了使用EnKF方法可以分析得到合理的微物理场、风场和热力学变量，在几次循环同化后风暴可以在模拟中成功再现。他们指出流依赖和动力协调的背景误差协方差是成功同化的重要因素。Xue等^[58]应用EnKF方法，根据雷达径向风和反射率能成功估计对流风暴的水凝物混合比和数浓度。将由集合预报估计得到的流依赖的背景误差协方差应用在变分框架中的混合同化方法也有不少进展^[59-64]。

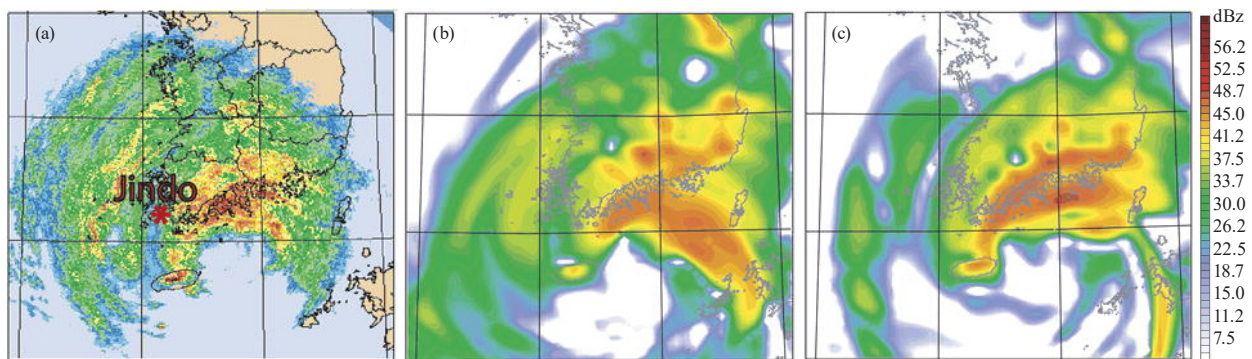


图4 2002年8月31日0300 UTC台风茹莎登陆韩国前的雷达反射率(摘自Xiao等^[48])

(a) 观测; (b) 控制试验; (c) 同化雷达反射率试验

Fig.4 Radar reflectivity at 0300 UTC 31 August 2002, i.e., prior to the landfall of Typhoon Rusa in Korea (from Xiao等^[48])

(a) observation, (b) control experiment, (c) experiment with assimilation of radar reflectivity

近年来，其他高分辨率的观测资料，如地面闪电资料的同化也逐渐受到重视^[65-70]，这些资料能弥补雷达观测无法覆盖的区域。如何协调利用好各种新型观测资料，将高分辨率观测资料有效同化进模式对提高高分辨率模拟和中、小尺度天气系统预报的质量十分

重要。

3 模式物理过程的作用

强降水由积云对流造成，这涉及到准地转上升运动、锋面或地形抬升、边界层过程、非绝热加热/冷却，辐射和云微物理过程等。这些过程跨越不同的时

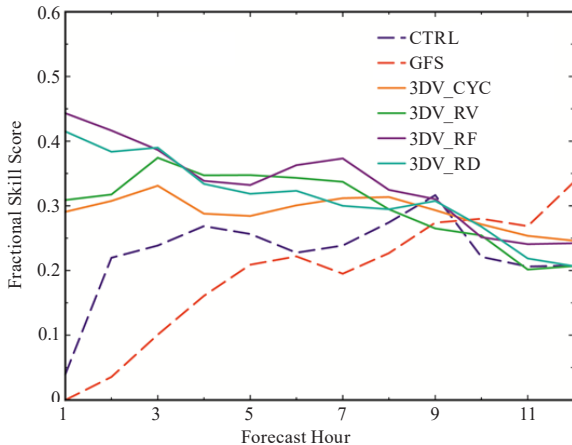


图5 对美国中部2002年暖季6天期间1 h降水量预报所做的6个试验的FSS评分。CTRL: 以Eta模式分析场驱动作为控制试验; GFS: GFS全球分析场驱动的试验; 3DV_CYC: 3小时循环同化常规数据; 3DV_RV: 同3DV_CYC, 并同化雷达径向风; 3DV_RF: 同3DV_CYC, 并同化雷达反射率; 3DV_RD: 同3DV_CYC, 并同化雷达径向风和反射率 (摘自Sun等^[52])

Fig. 5 The 6 experimental-averaged fractions skill score (FSS) of hourly precipitation forecasts over the central United States during a 6-day period in the warm season of 2002 (IHOP_2002). CTRL: initialized by Eta Model analysis; GFS: initialized by GFS analysis; 3DV_CYC: initialized by WRF 3DVAR with 3-hourly cycle without radar; 3DV_RV: as in 3DV_CYC but with radar radial velocity; 3DV_RF: as in 3DV_CYC but with radar reflectivity; 3DV_RD: as in 3DV_CYC but with radar velocity and reflectivity (from Sun等^[52])

空尺度。即使使用套网格方法, 目前计算机能力也无法包含全部12个量级尺度的大气运动。所有次网格尺度的物理过程都需通过某种参数化出现在模式中。而不同网格分辨率(即6~8网格距)需使用不同参数化。随着分辨率的提高, 一些原来在较低分辨率模式中不可分辨的现象在高分辨率模式中变得可分辨, 需要合理描述各种复杂的物理过程以及它们之间的相互作用^[71]。对不同的物理过程, 在数值模式中存在着一个水平分辨率区间被称为“灰色区”。在这“灰色区”中, 所模拟对象的部分特征是可分辨的(即显式), 但其他特征属于次网格尺度。完全使用(隐式)参数化方案还是显式方案就变得模棱两可(图6)。其中比较典型的是积云对流和边界层及云内的湍流混合处理方案, 它们的“灰色区”可粗略认为分别在10~1 km和1000~100 m。其实, 本文介绍的大部分模拟工作(除了大涡模拟)所使用的水平分辨率都在这二“灰色区”之中或之一。

首先是积云参数化方案和微物理方案的使用。水平格距为2~20 km的模拟中, 对流不完全是次网格现

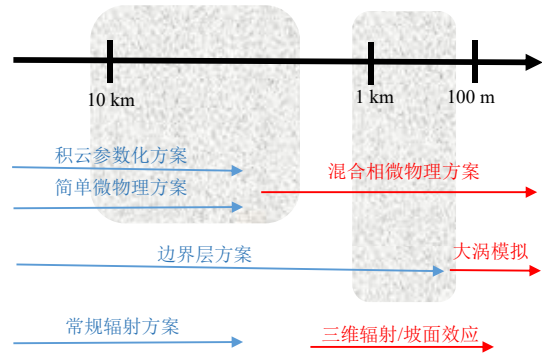


图6 数值模拟中积云对流、大气边界层和辐射方案灰色区示意图(根据 https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201907/dudhia_physics.pdf改制)

Fig. 6 Schematic of “gray zones” for convection, planetary boundary layer, and radiation parameterization schemes (Adapted from https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/201907/dudhia_physics.pdf)

象, 一般来说应同时合理使用积云参数化方案和显式微物理方案^[71]。实际上, 目前还没有发展出适合网格距小于10 km的积云参数化方案。此外, 由于不同参数化有不同的闭合假设, 使用积云参数化的模式分辨率范围也有所不同^[72]。无论是单个模拟研究, 还是对业务模式的评估, 关于格距为10 km以下的模拟中使用积云参数化方案对模拟预报会产生正效果还是负效果都无法得出一致的结论。有的模式因使用积云参数化方案能更快触发对流, 同时减轻模拟降水过强的问题, 从而使得预报效果更好; 但有的使用积云参数化方案后产生过于平滑的结构, 预报效果变差^[73]。近年来, 学者还尝试研发自识别尺度(scale-aware)的对流参数化方案^[74-79], 这些方案能从完全的参数化平稳过渡到显式方案, 主要针对水平格距在3~5 km的数值模拟, 避免在灰色区完全使用传统的对流参数化方案或云微物理方案带来的问题。

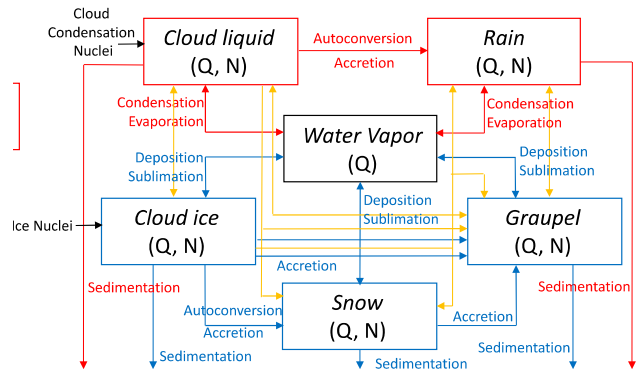


图7 典型双参云微物理方案示意图(摘自Randall等^[80])
Fig. 7 Diagram of a typical two-moment cloud microphysics scheme (from Randall等^[80])

高分辨率(2~3 km以下)数值模拟需要使用较

完善的云微物理方案。微物理方案可分为两大类，整体水法（Bulk方法）和分档法（Bin方法）。Bulk方法假设水凝物粒子的总体分布特征能用一个经验函数来描述，常用的是Gamma函数，根据函数中可变参数的个数可分为单参方案（仅预报粒子比质量）、双参方案（预报粒子比质量和数浓度）、三参方案（预报比质量、数浓度、反射率因子或密度）等。典型的双参微物理方案通常包含水汽、云水、云冰、雨、霰、雪等粒子，描述它们之间的转化过程，预报各种粒子的混合比以及部分或全部粒子的数浓度^[80]（图7）。Bin方案根据粒子的大小、质量等将粒子分成几十到几百档，建立每类粒子的预报方程和它们之间的转化关系。再加上使用Bin方案需较高分辨率（1 km以下），使得Bin方案对计算资源要求高。一些研究使用Bin方案研究云—气溶胶相互作用^[81-82]，以及云微物理—动力相互作用^[83-84]。Bin方案结果也作为对照，用于发展和测试天气气候模式中的Bulk方案^[85]。但目前更多业务模式和理论研究集中于Bulk方法，探讨使用多参微物理方案是否能提高高分辨率模拟的质量。

不少研究发现，使用双参方案能够更好地模拟对流的结构和演变、冷池结构、双偏振量特征等^[86-92]。例如，Putnam等^[90]和Wheatley等^[91]阐述了在中尺度对

流系统模拟中，由于双参方案模拟得到较多的雪或冰形成，从对流塔向后输送到层云区，从而改善了层云降水的模拟。还有一些研究显示使用三参方案能得到更好的龙卷风暴或雹暴模拟^[93-96]。Dawson等^[94]指出使用三参方案能模拟出更接近实况的风暴路径和冷池特征，而冷池强度对龙卷涡旋的生成和演变十分重要。另一方面，也有研究指出微物理方案中对冰相过程的描述，尤其是关于霰或雹的形成过程的描述，对模拟效果有重要影响。双参方案对霰或雹的密度和下落速度十分敏感^[97-98]。Adams-Selin等^[99]指出微物理方案中关于霰的描述对弓状回波的模拟有显著影响（图8），不同的霰粒子谱分布影响模拟的冷池强度，进而影响气压扰动、后向入流和上升气流的发展等。Tao等^[100]和Bae等^[101]的研究都发现在微物理方案中加入冰雹对于小雨或者云内过程的模拟有所帮助。当然，上述微物理方案对于不同对流系统或不同分辨率也会有不同效果。如Jensen等^[102]使用复杂的冰相微物理方案（ISHMAEL）以及1.33 km和148 m分辨率模拟湖泊效应产生的对流雪带。由于后者分辨率高能模拟出较强的上升气流场，由此产生较多的融化球状冰粒和霰粒子，所模拟的雪带回波强度也更接近于实际雷达观测。综上所述，网格距小于1 km的数值模拟应尽可能

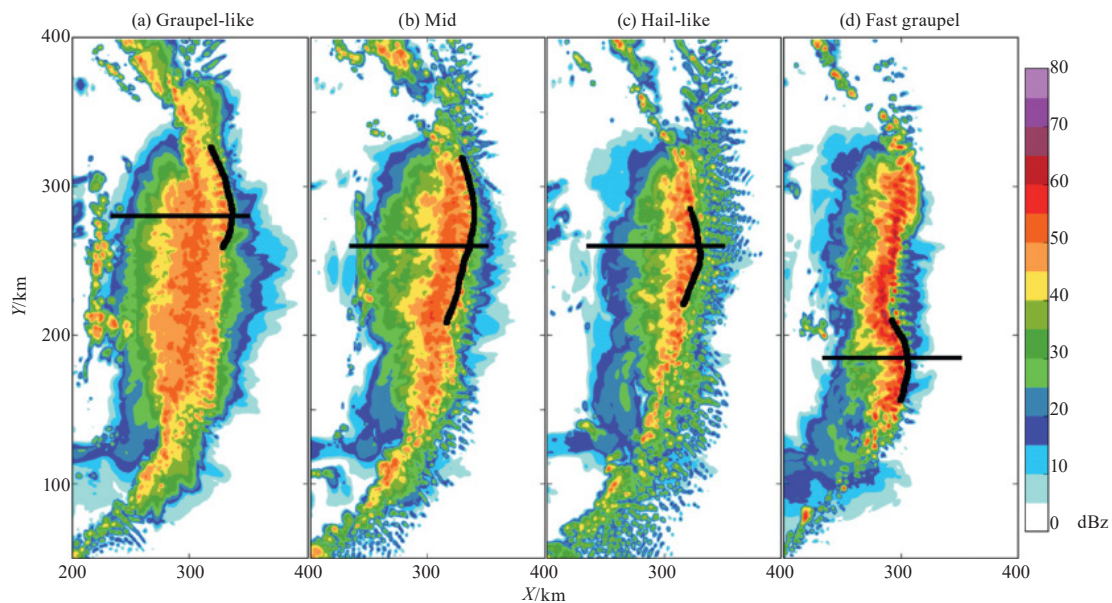


图8 使用不同霰粒子截断参数、密度、下落速度参数的不同（理想）模拟试验产生弓状回波时的雷达反射率，粗黑线指示弓状特征（摘自Adams-Selin等^[99]）

Fig. 8 Simulated composite reflectivity when bow echo begins to appear in experiments using different intercept values, density and fall speed parameters for graupel. Thick black lines represent bowing segments (from Adams-Selin等^[99])

考虑使用较为完善的云、冰微物理方案。

边界层内动量、热量和水汽的湍流混合过程中、小尺度对流系统十分重要。但在网格距1 km以

上的模式中往往仅需对湍流垂直输送参数化。当网格距小于100~200 m时，水平湍流混合开始显得重要。此外，复杂下垫面、大风或不稳定气流下的湍流

特征很难通过参数化合理描述。故当模式分辨率达到100~200 m, 研究人员使用大涡模拟来直接解析可分辨尺度、较为活跃的高能湍流, 而对次网格尺度湍流进行参数化闭合处理。但目前常见的几千米的高分辨率数值模拟无法完全分辨湍流, 因此仍然需要使用边界层参数化方案。边界层方案在高分辨率模拟中十分敏感, 特别是对热带气旋的模拟^[103-104], 毕竟海面上的潜热和显热是热带气旋发展的主要能源。有研究显示在可分辨对流的分辨率下使用一些边界层方案(如MYJ方案)会在边界层产生冷偏差或湿偏差^[105-106]。

当模式分辨率在几百米到1 km时, 湍流可以被分辨, 此时出现对于边界层而言的灰色区^[107]。尤其对于对流边界层, 湍流尺度可接近1 km, 使用常规边界层方案容易导致误差。有些学者提出scale-aware边界层方案^[108-114], 主要思想是根据水平格距, 调节由常规边界层方案计算得到的次网格通量所占总通量的比例。但这些scale-aware边界层方案大部分针对干对流边界层, 对于湿对流边界层, 涉及到边界层过程和湿对流的相互作用更为复杂, 有待进一步研究。

除边界层内的湍流交换, 对流云内次网格湍流在热量、水分和其他标量的传输中也起着重要作用。在这方面, Sun等^[115]开展理想超级单体大涡模拟试验, 将50 m分辨率的模拟逐步粗格化到4 km, 对比这些模拟结果显示, 云内垂直和水平次网格湍流输送通量在500 m网格就具可比性, 并表现出与深对流相似的非局部特征。Kirshbaum^[116]通过理想数值试验来理解在模拟地形对流分别使用对流、湍流灰色区分辨率时的情景, 其结果显示在前者灰色区由于地形产生的水平不均匀流场和加热场, 隐式对流在未达山脊前很远就发生, 时间上也提早激发; 而后者灰色区则影响到云内夹带和对流质量通量的强度。

高分辨率模拟其中一个优势在于能使用高精度的地形和下垫面信息, 这也导致在复杂地形区还需要考虑其他问题, 例如在辐射方案中需考虑在云覆盖率和地形影响下的三维辐射、坡面效应, 在处理城市下垫面的冠层模式中需考虑建筑群的分布和高度、道路和非自然加热等因素^[117-118]。此外, 尽管随着分辨率的提高, 可以不再使用原有的参数化方案, 但是总会面临新的更小尺度的次网格过程, 如小尺度的三维湍流输送过程, 需要针对这些过程建立新的合理的参数化方案。

4 中、小尺度对流系统的高分辨率数值模拟

由于大多灾害天气与对流尺度环流有关, 若要开展灾害天气机理的研究, 有必要取得对流系统的高分

辨率数值模拟。近年来有不少关于中、小尺度对流系统的高分辨率数值模拟研究^[119-157]。本节介绍使用1 km和次千米分辨率模拟暴雨对流系统、雹暴、龙卷和热带气旋的几项具有一定代表性的工作, 同时也提及其他相关的高分辨率数值模拟研究。

4.1 暴雨对流系统

梅雨锋暴雨是影响我国东部的的主要灾害天气之一。梅雨锋暴雨中心的强度和落区受中小尺度对流演变的影响, 要深入理解梅雨锋暴雨的发生发展机制, 需要对这些对流及其环境的精细特征进行细致分析, 而目前的观测仍无法提供足够高分辨率的资料, 因此需要依赖高分辨率数值模拟。已有一些研究使用1 km左右, 甚至几百米分辨率的数值模拟结果对梅雨锋暴雨系统的发生发展机制进行深入分析^[119-122]。Zhang等^[119-120]使用MM5模式, 设置四重网格(12/4/1.33/0.444 km), 成功模拟了2003年7月4—5日江淮流域中尺度对流系统引发的暴雨过程。四重网格均采用Tao等^[123]提出的包含三类冰相粒子的微物理方案和修改的Blackadar边界层方案^[124], 只在最外面两重使用积云对流方案。该模拟的其中一个关键技术在于他们使用外场观测资料改善NCEP分析场, 并且额外使用一个覆盖范围远大于12 km区域的分辨率为36 km的模拟区域, 模拟起始时间比12 km区域提前12 h, 36 km区域的输出结果作为12 km区域的初始条件及边界条件, 在36 km区域上使用动力松弛逼近法, 以改善提供给12 km区域的边界条件。

结合观测资料 and 高分辨率模拟, 他们分析了此次暴雨过程的多尺度特征, 包括对流触发和组织机制。图9展现了Zhang等^[119]中分辨率为444 m的区域模拟的对流系统成熟阶段的雷达反射率和局地浮力。其中, 计算局地浮力时减去了由32点滑动平均得到的参考虚温。由于非降水的云水和云冰对雷达反射率的贡献很小, 图9没有反映这两类粒子。如图所示, 分立的(而非连续的)对流单体首先在湿润的西南季风气流前触发, 其后在低层辐合区(约10~15 km宽)上是发展高至150 hPa的强降水对流, 尾部是变弱的云柱(大部分是层状降水云)。在550 hPa附近能清楚看到融化层(雷达反射率垂直梯度大值区)。前沿主雨带由蒸发性下沉冷出流与系统前方高相当位温气流汇合而激发生成, 其中的上升速度最大可达25 m·s⁻¹。随后, 这些对流热塔相对于前沿主雨带向系统后方移动, 并逐渐衰弱, 形成层状云区。在整个对流系统中, 包括在层状云区域, 这些不同强度的降水对流热塔的尺度从2~5 km不等。总的来说, 444 m网格的模

拟结果更好地重演了对流系统的演变，抓住了多个对流风暴的触发及其随后组织形成中尺度对流系统，以及前期对流活动遗留冷空气造成的中高压等。他们利用模拟结果进一步阐明了在此次过程中，湿空气沿着梅雨锋前的冷空气顶的等熵抬升对于对流触发十分重要；夜间西南急流提供充足的不稳定能量和水汽；对流沿着相同路径形成并移动导致了暴雨的发生。这项研究也展现了使用1 km以下的水平格距可能更好地模拟对流结构以及相关的 β 中尺度环流，提高梅雨锋暴雨的预报水平。

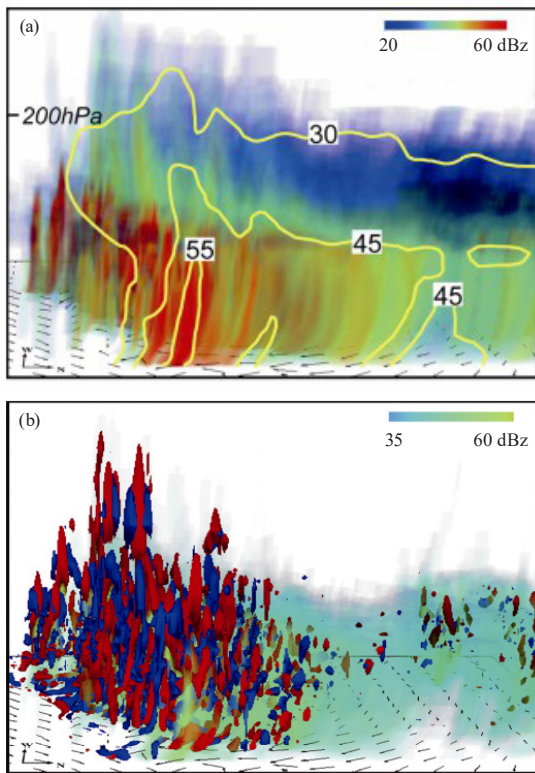


图9 对2003年7月4—5日发生在江淮流域的一次梅雨锋暴雨模拟的Vis5D 三维图像

(a) 雷达反射率；(b) 局地浮力（红/蓝色阴影分别指示 $\pm 1^\circ\text{C}$ 等值面，绿色阴影表示云，摘自Zhang等^[119]）

Fig. 9 Vis5D plots of (a) radar reflectivity; (b) local buoyancy from the simulation of torrential rainfall occurring over Yangtze-Huaihe River basin during 4-5 July 2003. Red/blue shadings are for isosurfaces of $\pm 1^\circ\text{C}$. Green shadings indicate volumes of cloudy air (from Zhang等^[119])

需要指出的是上述444 m网格距模拟还使用边界层参数化，显然这是属于边界层显式与隐式处理的灰色区（见图6）。最近，Huang等^[125]使用500 m网格距按照WRF大涡模拟方案（即不包含边界层参数化）模拟了2017年5月6—7日发生在广州的极端降水事件。他们还与包含边界层参数化方案的模拟实验比较，发现后者模拟结果与实际观测相比不如未包含边界层参

数化的大涡模拟结果。但Yin等^[126]使用1.333 km网格和边界层参数化的WRF也模拟了这一极端降水事件，所模拟的最大降水比Huang等^[125]的模拟更接近于实际观测值。由于二者模式初始条件、地表处理和其他模式框架都十分相似，这不同的降水模拟结果可能与使用不同的云微物理方案有关。需要指出的是，目前许多使用1 km左右网格距模拟对流触发、极端降雨以及中尺度对流结构和演变的研究都使用了边界层参数化^[121-122, 127-131]；本文前面介绍的大多有关模拟也是如此。不管怎样，未来使用1000~200 m网格距来模拟中、小尺度对流系统时有必要开展对边界层显式和隐式处理的相对重要性研究。

4.2 冰雹对流系统

冰雹给生命财产安全带来严重威胁，但目前数值模式对冰雹的预报还有一定难度，尤其是地面降雹。此外，相对于其他强灾害中尺度对流系统，雹暴的模拟研究工作也较少。Li等^[131]针对2005年6月10—11日我国东北地区一次强对流过程，使用WRF模式研究初始环境水汽量对冰雹产生和降水模拟的影响，模拟中设置9/3/1 km三重网格，采用包含霰和雹粒子的双参Milbrandt-Yau方案^[132-133]，结果显示在前期，冰雹和降水率随初始水汽量增加而单调递增，降水增强造成冷池更强，并维持更长时间，影响深对流发展，使得后期冰雹的产生和初始水汽量呈现非线性变化关系。

Luo等^[96]使用双重（3/1 km）网格的ARPS模式，对2015年4月28日发生在江苏西南地区的一次多单体雹暴进行模拟。他们对比了使用单参、双参和三参数版本的Milbrandt-Yau方案在模拟冰雹最大可能直径、尺度分布、累积质量、数浓度等方面的差异。与S波段多普勒雷达观测结果比较显示，使用三参方案的模拟效果较好（图10）。不同方案对冰雹粒子谱分布的形状参数描述的差异导致雹生长过程明显不同，加上粒子分选的差异，共同导致模拟结果的差异。单参方案没有粒子分选过程；在双参方案中使用固定的形状参数（设为0）会导致过度的粒子分选，使得冰雹的粒子谱分布偏向于大雹；而三参方案能获得更合理的形状参数，产生更合理的粒子谱分布，模拟的最大可能雹直径、地表累积雹浓度等优于单参和双参方案。由此可见，在高分辨率云模式中使用合理的形状参数对于冰雹各微物理参数的模拟和冰雹事件的预报十分重要。

后来，Labriona等^[134]使用500 m网格距评估了ARPS模式中Milbrandt-Yau双参和三参数方案以及NSSL多密度冰融化双参方案对美国一次冰雹事件

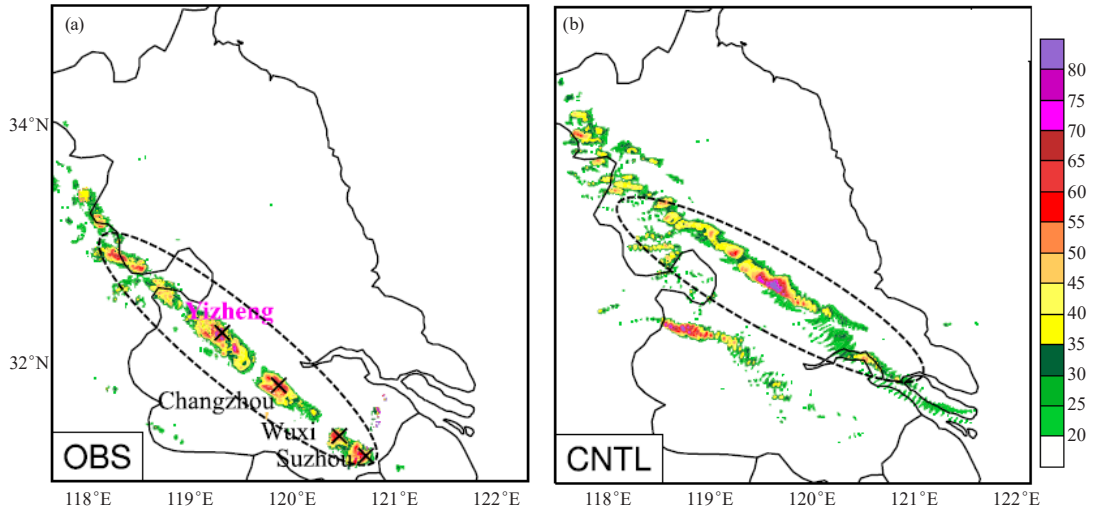


图10 2015年4月28日发生在江苏仪征到常州、无锡和苏州一带的多单体雹暴观测 (a, OBS) 和用ARPS 模式中三参微物理方案 (b, CNTL) 预报试验结果所诊断的最大雹直径 (阴影, mm) 分布 (摘自Luo等^[96])

Fig. 10 Maximum estimated sizes of hail from observation (a, OBS), and simulation with the three-moment microphysics scheme in ARPS model (b, CNTL) for a multicellular convective system occurring over Yizheng, Wuxi, and Suzhou on 28 April 2015 (from Luo等^[96])

的0~90 min预报, 这三方案都能报出大致的冰雹范围, 但预报强冰雹发生范围的能力较低。最近Mansell等^[135]在NSSL三参数方案中加入允许改变分布形状并适应融化对冰雹和雨滴尺寸分布的一些直接影响, 能模拟出冰雹粒子融化时由于重力作用使得冰雹和雨滴大小重分布的状况。

4.3 龙卷结构

由于龙卷的尺度小、维持时间短, 我们对龙卷的观测研究仍十分困难。目前对龙卷涡旋结构的理解大多来自数值模拟结果的分析。自20世纪70年代末Klemp等^[136]使用2 km格距和 (x, y, z) 维度为 $24 \times 24 \times 20$ 的格点模拟龙卷型超级单体以来, 到近10年来随着超大型并行计算机性能的快速提升, 人们已能使用20~100 m分辨率来模拟龙卷系统的结构^[137-142]。虽然大多数研究仍是基于探空廓线的理想模拟, 模拟区域也较小, 但所取得的模拟结果可以提供目前观测资料难以解析的中、低层三维涡旋风场和热力结构。如Orf等^[139]使用Cloud Model 1 (CM1)^[143]变网格以及双参方案模拟了2011年5月24日在美国俄克拉何马产生EF5级别龙卷的超级单体。在模式区域中心使用了水平和垂直格距为30 m, (x, y, z) 维度为 $2200 \times 2200 \times 380$, 即近20亿的格点数; 时间步长为0.2 s。变网格模式中粗网格三维区域范围为 $160 \text{ km} \times 160 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 。图11展现了龙卷生成时的三维流向涡旋。所示的流向旋流 (SVC) 和Schenkman等^[137]模拟的水平旋流相似, 但SVC能

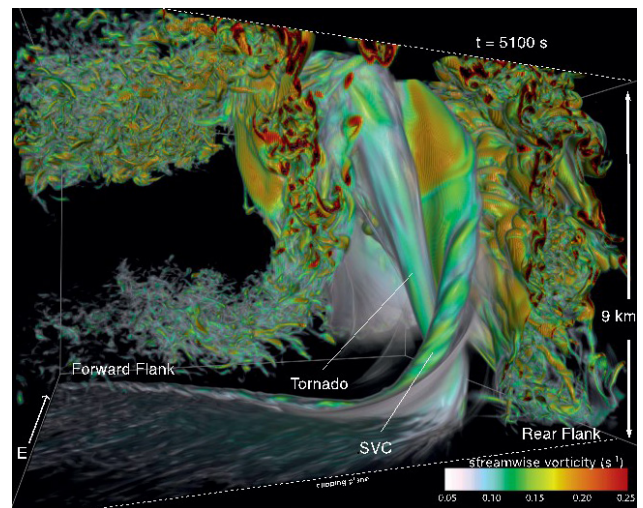


图11 CM1模式在5100 s时模拟的相对于龙卷的三维流向涡旋: 从左侧垂直风切变引起的低层水平涡旋到龙卷中心的涡旋塔 (摘自Orf等^[139])

Fig. 11 Storm-relative 3D streamwise vorticity (from the low-level horizontal vorticity induced by vertical wind shear on the left to the vorticity tower in the center of tornado) at $t = 5100 \text{ s}$ of the simulation by CM1 (from Orf等^[139])

延伸到前侧更深处, 而且与水平旋流不同, 由于自由滑动的下边界条件, SVC涡度不能由表面摩擦产生。在SVC倾斜至上升气流前, SVC的水平涡度由前侧下沉边界 (FFDB) 相关的浮力梯度产生。随着FFDB的浮力梯度增大, SVC增强。在龙卷发展前的10~12 min, SVC显著增强。随着SVC增强, SVC倾斜同时加强了低层中尺度涡旋的旋转以及随后的上升气流。上升气流的加强和旋转引起的向上的扰动气压

梯度加速一致。加强的上升气流导致其下方形成辐合区。上述龙卷结构能在模式中传播120 km、维持2.5 h以上。

Sun等^[142]使用WRF模式，设置1~5层嵌套网格，最内层网格分别为4000、1333、444、148、49 m，尝试模拟2016年6月23日江苏阜宁EF4级龙卷。结果显示，使用444、148和49 m分辨率能分别模拟出强度达EF1、

EF2和EF3的龙卷。49 m分辨率的模拟结果(图12)中，多个“抽吸涡旋”沿着高涡度环发展，从而形成具有多涡旋结构的龙卷。次涡旋、主涡旋环流和系统移动速度的叠加产生局地强风区。根据他们的研究结果，在业务预警应用中需要使用至少500 m分辨率才能抓住龙卷涡旋特征，而研究龙卷动力结构，则需要采用至少50 m分辨率的模拟。

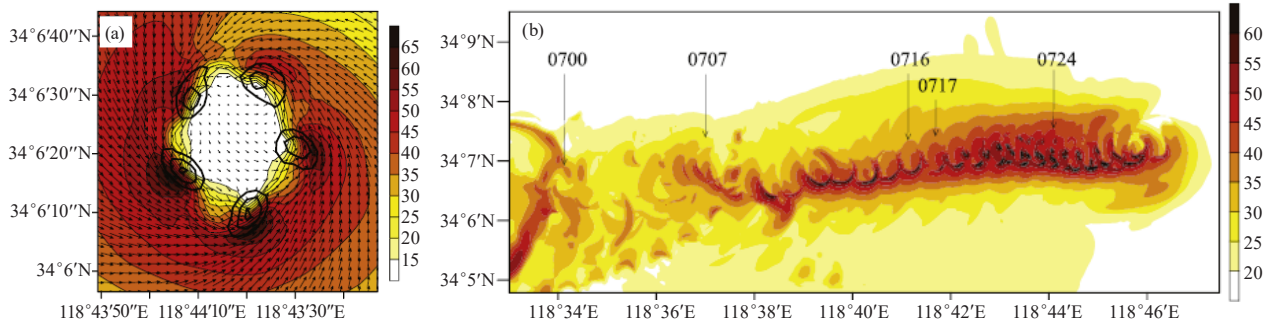


图12 使用WRF模式49m分辨率模拟江苏阜宁EF4级龙卷的结果：(a) 地面 ($z=10$ m) 水平风 (填色, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) 和垂直涡度 (粗线, s^{-1})；(b) 最大地面风速轨迹带 (摘自Sun等^[142])

Fig. 12 Results from the WRF simulation of the Funing/Jiangsu EF4 tornado with horizontal grid spacing of 49m: (a) surface ($z=10$ m AGL) horizontal wind vectors and speed (shaded, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), and vertical vorticity (thick contours, s^{-1}); and (b) swaths of the maximum surface wind speed (from Sun等^[142])

4.4 热带气旋的精细结构

东亚和北美洲的不少国家受热带气旋影响严重。虽然热带气旋是 α 中尺度的系统，但其内部复杂的结构特征可能引发局地性的暴雨、大风等灾害。为更好地满足防灾减灾的要求，需要深入研究热带气旋的精细化结构。在这方面，已有不少使用1 km和次千米网格距模拟热带气旋生成、爆发性增长、极端降水和精细结构的工作^[26, 144-152]。由于篇幅有限，在此仅介绍两篇揭示不同台风精细结构的大涡模拟研究。

Ito等^[153]利用日本气象厅区域天气预报模式的大涡模拟版本对台风整体进行大涡模拟(图13)。他们的模拟没有使用嵌套网格，避免了不同分辨率网格之间的边界问题。模式分辨率设为100 m，可分辨台风边界层的大涡，没有使用边界层参数化方案；设置60个垂直层，高度为23 km，其中538 m以下的垂直层间隔小于100 m。100 m网格的初始场是由使用同样区域，但分辨率为2 km的网格模拟输出插值得到的。该模拟使用了9216个计算节点，占了所用的K超算系统将近1/8的资源，积分1个小时需要约9.5 h，临时输出文件大小达17 TB。分析模拟结果显示，大涡模拟的近地面最大风速和2km分辨率网格模拟的相近，但是大涡模拟呈现出更精细的边界层结构特征，主要涉及三种类型的卷流。A型卷流主要位于大风半径外；B型卷流靠近大风半径；C型卷流位于大风半

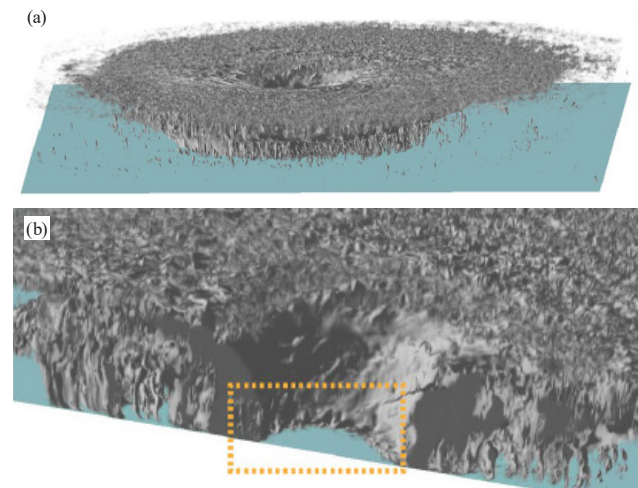


图13 (a) 台风整体大涡模拟的云的三维视图；(b) 图13a台风中心附近的放大图，橙色方框指示C型卷流的区域 (摘自Ito等^[153])

Fig. 13 (a) Three-dimensional view of simulated cloud amount from the large eddy simulation of entire tropical cyclone; and (b) is a close-up view of the typhoon inner core region in (a). The orange rectangle indicates the region of Type-C rolls (from Ito等^[153])

径内，可导致逆梯度输送动量，引起强阵风。该模拟研究应是首个发现B、C型卷流的研究。虽然图13展示的是作者们使用理想初始条件所作的数值试验，他们也使用类似的模式框架对2019年9月给日本造成严重损失的第15号台风法茜进行了10 h整体大涡模拟，

在美国气象学会100周年年会期间作了报告 (<https://ams.confex.com/ams/2020Annual/videogateway.cgi/id/517686?recordingid=517686>)，其动态影像十分吸引眼球，引起人们强烈的科学兴趣。

大涡模拟可以为深入研究热带气旋的精细化结构提供极高分辨率的信息。以往观测发现热带气旋边界层存在几百米到几千米尺度的小尺度系统，甚至龙卷尺度涡旋^[154-158]，这些涡旋的垂直涡度峰值和水平尺度与弱龙卷相当，有时伴随着 $10\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极强上升运动，并可能造成局地强阵风。目前对热带气旋边界层的观测还较少，精度也不足，难以对龙卷尺度涡旋开展精细分析，需要借助百米级的超高分辨率模拟。Wu等^[159-160]使用6重(9/3/1/0.333/0.111/0.037 km)嵌套网格和75个垂直层(其中2 km以下有19层)的WRF模式模拟研究台风边界层的精细结构。在分辨率为1 km以下的网格使用大涡模拟技术，其余网格使用YSU边界层参数化方案。他们成功模拟出和观测较一致的龙卷尺度涡旋特征(图14)，包括强上升速度和近地面局地大风等，龙卷尺度涡旋附近风速可达 $70\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，并发现龙卷尺度涡旋普遍存在于台风眼墙的内侧，它们很可能影响近地面极端阵风的分布。

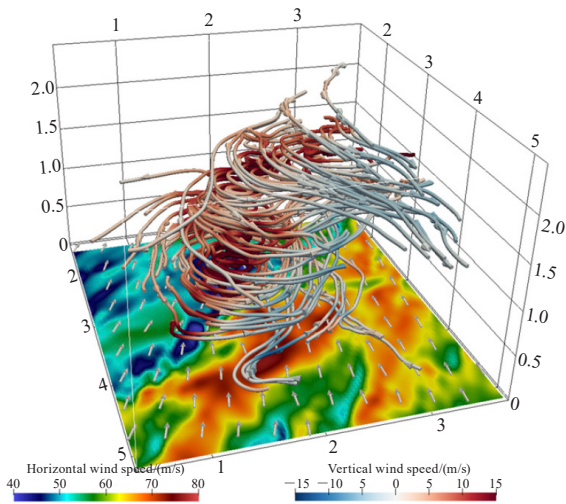


图14 模拟龙卷尺度涡旋相关的扰动风场。流线是水平扰动风，暖(冷)色流线表示上升(下沉)运动；箭头指示近地面风，填色是风速。台风中心在左上角方位(摘自Wu等^[159])

Fig. 14 The streamlines of the horizontal perturbation winds associated with the simulated tornado-scale vortex. The warm (cold) color of the streamline denotes the upward (downward) vertical motion. Vectors represent the near-surface winds with the wind speed shaded. The typhoon center is located far outside from the left corner (from Wu等^[159])

5 未来挑战

综上所述，目前中、小尺度对流系统的数值模

拟研究开始进入次千米分辨率的阶段。提高模式分辨率有助于减小由物理过程参数化造成的不确定性，从而改善对中、小尺度对流系统强度、结构和演变的模拟，整体提高数值天气预报水平。更高分辨率的模拟结果也有助于加深对这些对流系统及其相关天气现象的形成机制的理解。在不久的将来，越来越多的业务天气预报区域模式会使用1 km左右的分辨率，我们也会看到更多中、小尺度对流系统真实个例的次千米级模拟，甚至大涡模拟。此外，取决于计算能力的提升程度，1~4 km对流分辨率的全球预报模式也可能在不久的将来投入业务运行^[161-162]。我们相信，到那时通过多重嵌套或变网格技术将会逐渐淘汰区域模式，从而不断增加使用高分辨率、不存在侧边界问题的一体化全球模式。

但是，未来提高模式分辨率以改善对中、小尺度对流系统的数值预报、模拟仍会面临不少挑战。首先，如前所述，目前高分辨率模拟都是通过多重嵌套网格实现的，很多情况下仅有部分对流系统被细网格覆盖。增加细网格覆盖面积或提高模式分辨率，计算量将呈几何级数增长。本文中介绍的几篇大涡模拟工作几乎已将能获得的计算能力推至极限，所消费的经费也是十分“昂贵”。由于增加时钟频率需要耗费昂贵的电力，目前而言时钟频率已难以大幅增加。从2000年左右起，超级计算机大多通过增加并行核数来提高计算能力。处理器之间的信息交换速度相对较慢，对数值预报模式中所发展的任何新程序并行化，以及重构模式代码使能高效利用大量的处理器，这些问题需要未来计算方式和能力有革命化的发展^[1, 80](如未来量子计算机的推广运用)。

其次，随着观测数据(包括遥感数据)越来越多样化，数据量越来越大，需要发展更先进、有效的客观分析和数据同化方法以充分利用观测资料，获得更高质量的动力一致的模式初始场。使用融合了丰富观测信息的高分辨率分析场来驱动高分辨率数值模拟对改善模拟效果有重要影响，尤其是提高小尺度对流系统(如龙卷风暴，由不均匀地表条件所引发的局地风暴等)初始形成的时间和地点的可预报性。但是，我们也需要明白，由于无法准确得知模式的最优初始状态，模式物理方案也存在很多不确定性，我们难以期望获得对中、小尺度对流系统的完美模拟^[163-164]。

由于模式物理方案具有尺度依赖性，自识别尺度的概念近年来也得到越来越多的关注。在理想情况下，自识别尺度的模式物理方案应该能够精确地从满足静力平衡的隐式方案(即大于10 km)为主，

自然过渡到模拟（非静力）对流云的显式方案（即1~2 km），再到大涡模拟（即10~100 m）的网格距尺度。由于我们对不同尺度物理过程的认识还十分有限，要发展如此理想的自识别尺度物理方案还是十分困难的。另一方面，即使在较高分辨率的模式中也存在难以分辨的现象，也需要发展有关的合理的参数化方案。如在次千米分辨率中，一些对流要素仍无法被分辨；在几十米分辨率的情况下，一些云微物理过程也还需要进行参数化描述。获得合适的观测以验证这些对流云过程也仍是十分艰巨的任务。在模式中描述边界层内和积云对流中的三维湍流混合输送过程（特别是大风条件下）也面临着类似的挑战。

本文提及许多高分辨率数值模拟展现了目前观测手段还无法得到的对流系统内核结构。这些模拟的小尺度对流结构仍需由高分辨率的观测验证，才能真正确信其模拟结果。而形成这些结构的有些物理过程（如潜热释放）是目前无法测量的或可获得的相关气象信息甚少，以至于难以提供理论上的解释。显然，未来需要发展合适的观测手段，获得更精细的观测资料来帮助验证模拟结果的真实性。

正如大多运行模式者所知，每一个中、小尺度对流系统个例的高分辨率数值模拟都将产生动力学一致的海量资料（如Orf等^[139]，Ito等^[153]和Wu等^[159-160]的大涡模拟）。但以模式模拟为主已发表的很多文章仅利用了其中很有限或仅对作者有用的信息，很多宝贵的有科学意义的气象信息（特别是一些读者感兴趣的资料）就被“浪费了”。如何共享这些模式资料并充分诊断分析、理解其所提供的中、小尺度信息十分重要。这需要发展更有效的多维诊断分析软件（如本文引用的几张三维图）。通过“人工智能”方法来提高对模式资料诊断分析的能力可能是一个好途径。此外，还需加强科技人员之间的合作，以最终将我们对模拟结果的充分理解上升为中、小尺度对流系统可预报性、中尺度动力学和降水物理学的理论。

总之，高分辨率数值模拟和预报已得到广泛应用，但仍需从初始条件、物理方案等多方面改善模拟预报的效果，尤其是当分辨率进一步提高到1 km乃至几百米时，还有不少问题有待深究。例如，需要配合发展合适的对流尺度同化方法以提供与模式分辨率相协调的更优的初始条件，需要改进、合理使用显式微物理方案和边界层模拟技术等。与此同时，未来需要更多精细的观测来进一步验证高分辨率数值模拟结果，也为改进物理方案提供更多信息，使物理方案适用于更高分辨率的模拟。

参考文献

- [1] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525: 47-55.
- [2] Keyser D, Uccellini LW. Regional models: emerging research tools for synoptic meteorologists. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1987, 68: 306-320.
- [3] ESRL. High-Resolution Rapid Refresh (HRRR). Earth System Research Laboratory, 2015, <https://rapidrefresh.noaa.gov/hrrr/>.
- [4] Brown A, Milton S, Cullen M, et al. Unified modeling and prediction of weather and climate: a 25-year journey. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93: 1865-1877.
- [5] Balduf M, Seifert A, Förstner J, et al. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 3887-3905.
- [6] Zhang D L, Chang H R, Seaman N L, et al. A two-way interactive nesting procedure with variable terrain resolution. *Monthly Weather Review*, 1986, 114: 1330-1339.
- [7] Brooks H E, Maddox R A. On the use of mesoscale and cloud-scale models in operational forecasting. *Weather and Forecasting*, 1992, 7: 120-132.
- [8] Brooks H E, Doswell C A. New technology and numerical weather prediction—A wasted opportunity? *Weather*, 1993, 48: 173-177.
- [9] Mass C F, Ovens D, Westrick K, et al. Does increasing horizontal resolution produce more skillful forecasts? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, 83: 407-430.
- [10] Schwartz C S, Fossell K R, Sobash R A, et al. Toward 1-km ensemble forecasts over large domains. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 2943-2969.
- [11] Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B. The resolution dependency of explicitly modeled convective systems. *Monthly Weather Review*, 1997, 125: 527-548.
- [12] Bryan G H, Wyngaard J C, Fritsch J M. Resolution requirements for the simulation of deep moist convection. *Monthly Weather Review*, 2003, 131: 2394-2416.
- [13] Bryan G H, Morrison H. Sensitivity of a simulated squall line to horizontal resolution and parameterization of microphysics. *Monthly Weather Review*, 2012, 140: 202-225.
- [14] Verrelle A, Ricard D, Lac C. Sensitivity of high-resolution idealized simulations of thunderstorms to horizontal resolution and turbulence parameterization. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141: 433-448.
- [15] Potvin C K, Flora M L. Sensitivity of idealized supercell simulations to horizontal grid spacing: Implication for Warn-on-Forecast. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 2998-3024.
- [16] Sobash R A, Schwartz C S, Romine GS, et al. Next-day prediction of tornadoes using convection-allowing models with 1-km horizontal grid spacing. *Weather and Forecasting*, 2019, 34: 1117-1135.
- [17] Squitieri B J, Gallus WA Jr. On the forecast sensitivity of MCS cold pools and related features to horizontal grid spacing in convection-allowing WRF simulations. *Weather and Forecasting*, 2020, 35: 325-346.
- [18] Heim C, Panosetti D, Schlemmer L, et al. The influence of the resolution of orography on the simulation of orographic moist convection. *Monthly Weather Review*, 2020, 148: 2391-2410.
- [19] Liu Y, Zhang D L, Yau M K. A multiscale study of Hurricane Andrew (1992). Part I: Explicit simulation and verification. *Monthly Weather Review*, 1997, 125: 3073-3093.
- [20] Yau M K, Liu Y, Zhang D L, et al. A multiscale study of Hurricane Andrew (1992). Part VI: Small-scale inner-core structures and wind streaks. *Monthly Weather Review*, 2004, 132: 1410-1433.
- [21] Li Y, Lin Y, Wang Y. A numerical study on the formation and maintenance of a long-lived rainband in Typhoon Longwang (2005). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124: 10401-10426.
- [22] Gentry M S, Lackmann G M. Sensitivity of simulated tropical cyclone structure and intensity to horizontal resolution. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 688-704.

- [23] Persing J, Montgomery M T. Hurricane superintensity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, 60: 2349-2371.
- [24] Bryan G H, Rotunno R. The influence of near-surface, high-entropy air in hurricane eyes on maximum hurricane intensity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66: 148-158.
- [25] Emanuel K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady state maintenance. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1986, 43: 585-604.
- [26] Qin N, Zhang D L. On the extraordinary intensification of Hurricane Patricia (2015). Part I: Numerical experiments. *Weather and Forecasting*, 2018, 33: 1205-1224.
- [27] Lindzen R S, Fox-Rabinovitz M. Consistent vertical and horizontal resolution. *Monthly Weather Review*, 1989, 117: 2575-2583.
- [28] Anthes R A. Recent applications of the Penn State/NCAR mesoscale model to synoptic, mesoscale, and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1990, 71: 1610-1629.
- [29] 陆维松. 垂直分辨率与水平分辨率协调问题的研究. *南京气象学院学报*, 1990, 13(3): 274-284.
- [30] Fox-Rabinovitz M, Lindzen R S. Numerical experiments on consistent horizontal and vertical resolution for atmospheric models and observing systems. *Monthly Weather Review*, 1993, 121: 264-271.
- [31] 廖洞贤, 朱艳秋. 再论水平和垂直分辨率之间的协调. *气象学报*, 1995, 53(2): 129-137.
- [32] Aligo E A, Gallus WA Jr, Segal M. On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 575-594.
- [33] Zhang D L, Wang X. Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20: 711-725.
- [34] Zhang D L, Zhu L, Zhang X, et al. Sensitivity of idealized hurricane intensity and structures under varying background flows and initial vortex intensities to different vertical resolutions in HWRF. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 914-932.
- [35] Schwartz C S, Sobash R A. Revisiting sensitivity to horizontal grid spacing in convection-allowing models over the central and eastern United States. *Monthly Weather Review*, 2019, 147: 4411-4435.
- [36] Wang H, Wang Y, Xu H. Improving simulation of a tropical cyclone using dynamical initialization and largescale spectral nudging: A case study of Typhoon Megi (2010). *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27: 455-475.
- [37] 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验. *气象学报*, 2006, 64(3): 293-307.
- [38] Lorenc A C, Payne T. 4D-Var and the butterfly effect: Statistical four-dimensional data assimilation for a wide range of scales. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, 133: 607-614.
- [39] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2003, 131: 1663-1677.
- [40] Zhang F, Zhang M, Hansen J A. Coupling ensemble Kalman filter with four-dimensional variational data assimilation. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26: 1-9.
- [41] Kieu C Q, Nguyen T M, Hoang M T, et al. Sensitivity of the track and intensity forecasts of typhoon Megi (2010) to satellite-derived atmospheric motion vectors with the ensemble Kalman filter. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29: 1794-1810.
- [42] Jones CD, Macpherson B. A latent heat nudging scheme for the assimilation of precipitation data into an operational mesoscale model. *Meteorological Applications*, 1997, 4: 269-277.
- [43] Liu Y, Warner T T, Bowers J F, et al. The operational meso-gamma-scale analysis and forecast system of the U.S. Army Test and Evaluation Command. Part I: Overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 1077-1092.
- [44] Albers S C, McGinley J A, Birkenheuer D A, et al. The Local Analysis and Prediction System (LAPS): Analysis of clouds, precipitation and temperature. *Weather and Forecasting*, 1996, 11: 273-287.
- [45] Xue M, Wang D H, Gao K, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2003, 82: 139-170.
- [46] Hu M, Brewster K. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of Fort Worth tornadic thunderstorms. Part I: Cloud analysis and its impact. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 675-698.
- [47] Gao J D, Xue M, Brewster K, et al. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2004, 21: 457-479.
- [48] Xiao Q, Kuo Y H, Sun J, et al. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, 44: 767-788.
- [49] Pu Z, Li X, Sun J. Impact of Airborne Doppler Radar Data Assimilation on the Numerical Simulation of Intensity Changes of Hurricane Dennis near a Landfall. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66: 3351-3365.
- [50] Hu M, Xue M. Impact of configurations of rapid intermittent assimilation of WSR-88D radar data for the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic thunderstorm case. *Monthly Weather Review*, 2007, 135: 507-525.
- [51] Kain J S, Xue M, Coniglio MC, et al. Assessing advances in the assimilation of radar data within a collaborative forecasting-research environment. *Weather and Forecasting*, 2010, 25: 1510-1521.
- [52] Sun J, Trier S B, Xiao Q, et al. Sensitivity of 0-12-h warm-season precipitation forecasts over the central United States to model initialization. *Weather and Forecasting*, 2012, 27: 832-855.
- [53] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: Part I: Model development and simulated data experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 54: 1642-1661.
- [54] Sun J, Crook N A. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint: Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1997, 55: 835-852.
- [55] 陈明轩, 王迎春, 高峰, 等. 基于雷达资料4DVar的低层热力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析. *气象学报*, 2011, 69(1): 64-78.
- [56] Dowell D, Zhang F, Wicker L J, et al. Wind and temperature retrivals in the 17 May 1981 Arcadia, Oklahoma supercell: Ensemble Kalman filter experiments. *Monthly Weather Review*, 2004, 132: 1982-2005.
- [57] Tong M, Xue M. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Monthly Weather Review*, 2005, 133: 1789-1807.
- [58] Xue M, Jung Y, Zhang G. State estimation of convective storms with a two-moment microphysics scheme and an ensemble Kalman filter: Experiments with simulated radar data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2010, 136: 685-700.
- [59] Gao J, Stensrud D J. The development of a hybrid EnKF-3DVAR algorithm for storm-scale data assimilation. *Advances in Meteorology*, 2013, 2014: 512656.
- [60] Gao J, Stensrud D J. Some observing system simulation experiments with a hybrid 3DVar system for storm-scale data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 3326-3346.
- [61] Kong R, Xue M, Liu C. Development of a hybrid En3DVar data assimilation system and comparisons with 3DVar and EnKF for radar data assimilation with observing system simulation experiments. *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 175-198.
- [62] Wang X, Barker D, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: observing system simulation experiment. *Monthly Weather Review*, 2008a, 136:

- 5116-5131.
- [63] Wang X, Barker D, Snyder C, et al. A hybrid ETKF-3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: real observation experiments. *Monthly Weather Review*, 2008b, 136: 5132-5147.
- [64] Wang X, Snyder C, Hamill T M. On the theoretical equivalence of differently proposed ensemble/3D-Var hybrid analysis schemes. *Monthly Weather Review*, 2007, 135: 222-227.
- [65] Fierro A O, Mansell E R, Ziegler C L, et al. Application of a lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving scales for the tornado outbreak of 24 May 2011. *Monthly Weather Review*, 2012, 140: 2609-2627.
- [66] Mansell E R, Ziegler C L, MacGorman D R. A lightning data assimilation technique for mesoscale forecast models. *Monthly Weather Review*, 2007, 135: 1732-1758.
- [67] Kong R, Xue M, Fierro AO, et al. Assimilation of GOES-R Geostationary Lightning Mapper Flash Extent Density Data in GSI EnKF for the Analysis and Short-Term Forecast of a Mesoscale Convective System. *Monthly Weather Review*, 2020, 148: 2111-2133.
- [68] Qie X, Yuan S, Chen Z, et al. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunderstorms over the Beijing metropolitan region. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9656-8>.
- [69] 李万彪, 宋国琼, 童科. TRMM卫星LIS闪电资料在数值模式中的应用. *北京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(3): 399-406.
- [70] 冉令坤, 周玉淑. TRMM卫星的闪电观测资料在中尺度数值模式中的Nudging同化应用研究. *大气科学*, 2011, 35(6): 1145-1158.
- [71] 张大林. 各种非绝热物理过程在中尺度模式中的作用. *大气科学*, 1998, 22(4): 548-561.
- [72] Wagner A, Heinzeller D, Wagner S, et al. Explicit convection and scale-aware cumulus parameterizations: High resolution simulations over areas of different topography in Germany. *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 1925-1944.
- [73] Hong S Y, Dudhia J. Next-generation numerical weather prediction: Bridging parameterization, explicit clouds, and large eddies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 93: ES6-ES9.
- [74] Grell G A, Dévényi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29: 1693.
- [75] Arakawa A, Jung J H, Wu C M. Toward unification of the multiscale modeling of the atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, 11: 3731-3742.
- [76] Arakawa A, Wu C M. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70: 1977-1992.
- [77] Grell G A, Freitas S R. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14: 5233-5250.
- [78] Zheng Y, Aplapaty K, Herwehe JA, et al. Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) model with an updated Kain-Fritsch scheme. *Monthly Weather Review*, 2016, 144: 833-860.
- [79] Kwon Y C, Hong S Y. A mass-flux cumulus parameterization scheme across gray-zone resolutions. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 583-598.
- [80] Randall D A, Bitz C M, Danabasoglu G, et al. 100 year of earth system model development. *Meteorological Monographs*, 2019, 59, 12.1-12.66.
- [81] Feingold G, Stevens B M, Cotton W R, et al. The relationship between drop in-cloud residence time and drizzle production in numerically simulated stratocumulus clouds. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, 53: 1108-1122.
- [82] Khain A, Rosenfeld D, Pokrovsky A. Aerosol impact on the dynamics and microphysics of deep convective clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131: 2639-2663.
- [83] Stevens B, Walko R L, Cotton W R. The spurious production of cloud-edge supersaturations by Eulerian modes. *Monthly Weather Review*, 1996, 124: 1034-1041.
- [84] Ackerman A S, Kirkpatrick M P, Stevens DE, et al. The impact of humidity above stratiform clouds on indirect aerosol climate forcing. *Nature*, 2004, 432: 1014-1017.
- [85] Khairoutdinov M, Kogan Y. A new cloud physics parameterization in a large-eddy simulation model of marine stratocumulus. *Monthly Weather Review*, 2000, 128: 229-243.
- [86] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part III: Control simulation of a hailstorm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63: 3114-3136.
- [87] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part IV: Sensitivity experiments. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2006, 63: 3137-3159.
- [88] Yussouf N, Mansell E R, Wicker L J, et al. The ensemble Kalman filter analyses and forecasts of the 8 May 2003 Oklahoma City tornado supercell storm using single- and double-moment microphysics schemes. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 3388-3412.
- [89] Putnam B J, Xue M, Jung Y, et al. The analysis and prediction of microphysical states and polarimetric radar variables in a mesoscale convective system using double-moment microphysics, multinet radar, and the ensemble Kalman filter. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 141-162.
- [90] Putnam B J, Xue M, Jung Y, et al. Ensemble probabilistic prediction of a mesoscale convective system and associated polarimetric radar variables using single-moment and double-moment microphysics schemes and EnKF radar data assimilation. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 2257-2279.
- [91] Wheatley D M, Yussouf N, Stensrud D J. Ensemble Kalman filter analyses and forecasts of a severe mesoscale convective system using different choices of microphysics schemes. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 3243-3263.
- [92] Snook N, Jung Y, Brotzge J, et al. Prediction and ensemble forecast verification of hail in the supercell storms of 20 May 2013. *Weather and Forecasting*, 2016, 31: 811-825.
- [93] Dawson D T II, Xue M, Milbrandt J A, et al. Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multi-moment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 2010, 138: 1152-1171.
- [94] Dawson D T II, Xue M, Shapiro A, et al. Sensitivity of real-data simulations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornadic supercell and associated tornadoes to multi-moment microphysics. Part I: Storm- and tornado-scale numerical forecasts. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 2241-2265.
- [95] Luo L, Xue M, Zhu K, et al. Explicit prediction of hail in a hailstorm of 19 March 2014 in eastern China using multi-moment microphysics schemes. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122: 7560-7581.
- [96] Luo L, Xue M, Zhu K, et al. Explicit prediction of hail in a long-lasting multi-cellular convective system in eastern China using multi-moment microphysics schemes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75: 3115-3137.
- [97] Morrison H, Milbrandt J. Comparison of two-moment bulk microphysics schemes in idealized supercell thunderstorm simulations. *Monthly Weather Review*, 2011, 139: 1103-1130.
- [98] Morrison H. On the numerical treatment of hydrometeor sedimentation in bulk and hybrid bulk-bin microphysics schemes. *Monthly Weather Review*, 2012, 140: 1572-1588.
- [99] Adam-Selin R D, van den Heever S C, Johnson R H. Impact of graupel parameterization schemes on idealized bow echo simulations. *Monthly Weather Review*, 2013, 141: 1241-1262.
- [100] Tao W K, Wu D, Lang S, et al. High-resolution NU-WRF simulations of a deep convective-precipitation system during MC3E: Further improvements and comparisons between Goddard microphysics schemes and observations. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121: 1278-1305.
- [101] Bae S Y, Hong S Y, Tao W K. Development of a single-moment

- cloud microphysics scheme with prognostic hail for the Weather Research and Forecasting (WRF) Model. *Asia-Pac Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, 55: 233-245.
- [102] Jensen A A, Bergmaier P T, Geerts B, et al. Sensitivity of Convective Cell Dynamics and Microphysics to Model Resolution for the OWLeS IOP2b Lake-Effect Snowband. *Monthly Weather Review*, 2020, 148: 3305-3328.
- [103] Braun S A, Tao W. Sensitivity of High-Resolution Simulations of Hurricane Bob (1991) to Planetary Boundary Layer Parameterizations. *Monthly Weather Review*, 2000, 128: 3941-3961.
- [104] Hill K A, Lackmann G M. Analysis of idealized tropical cyclone simulations using the Weather Research and Forecasting Model: Sensitivity to turbulence parameterization and grid spacing. *Monthly Weather Review*, 2009, 137: 745-765.
- [105] Weisman M L, Davis C, Wang W, et al. Experiences with 0-36-h explicit convective forecasts with the WRF-ARW model. *Weather and Forecasting*, 2008, 23: 407-437.
- [106] Coniglio M C, Elmore K L, Kain J S, et al. Evaluation of WRF model output for severe weather forecasting from the 2008 NOAA Hazardous Weather Testbed spring experiment. *Weather and Forecasting*, 2013, 25: 408-427.
- [107] Wyngaard J C. Toward numerical modeling in the "terra incognita". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2004, 61: 1816-1826.
- [108] Honnert R, Masson V, Couvreur F. A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometeric scale. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, 68: 3112-3131.
- [109] Shin H H, Hong S Y. Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70: 3248-3261.
- [110] Shin H H, Hong S Y. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 250-271.
- [111] Boutle I A, Eyre J E J, Lock A P. Seamless stratocumulus simulation across the turbulent gray zone. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 1655-1668.
- [112] Ito J, Niino H, Nakanishi M, et al. An extension of the Mellor-Yamada model to the terra incognita zone for dry convective mixed layers in the free convection regime. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 157: 23-43.
- [113] Zhou B, Xue M, Zhu K. A grid-refinement-based approach for modeling the convective boundary layer in the gray zone: A pilot study. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74: 3497-3513.
- [114] Kurowski M, Teixeira J. A scale-adaptive turbulent kinetic energy closure for the dry convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75: 675-690.
- [115] Sun S, Zhou B, Xue M, et al. Scale-similarity subgrid-scale turbulence closure for supercell simulations at kilometer-scale resolutions: comparison against a large eddy simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, <https://doi.org/10.1175/JAS-D-20-0187.1>.
- [116] Kirshbaum D J. Numerical simulations of orographic convection across multiple gray Zones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77: 3301-3320.
- [117] Chen F, Kusaka H, Bornstein R, et al. The integrated WRF/urban modelling system: Development, evaluation, and applications to urban environmental problems. *International Journal of Climatology*, 2011, 31: 273-288.
- [118] Zhang D L, Jin M, Shou Y, et al. The influences of urban building complexes on the ambient flows over the Washington-Reston region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58: 1325-1336.
- [119] Zhang M, Zhang D L, Wang A S. Numerical simulation of torrential rainfall and vertical hot towers in a midlatitude mesoscale convective system. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2009, 2: 189-193.
- [120] Zhang M, Zhang D L. Subkilometer simulation of a torrential-rain-producing mesoscale convective system in east China. Part I: Model verification and convective organization. *Monthly Weather Review*, 2012, 140: 184-201.
- [121] Luo Y, Gong Y, Zhang D L. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a mei-yu front in east China. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 203-221.
- [122] 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. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120: 10593-10618.
- [123] Tao W K, Simpson J. The Goddard cumulus ensemble model. Part I: Model description. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 1993, 4: 35-72.
- [124] Zhang D L, Anthes R A. A high-resolution model of the planetary boundary layer-Sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data. *Journal of Applied Meteorology*, 1982, 21: 1594-1609.
- [125] Huang Y, Liu Y, Liu Y, et al. Mechanisms for a record - breaking rainfall in the coastal metropolitan city of Guangzhou, China: Observation analysis and nested very large eddy simulation with the WRF model. *Journal of Geophysical Research*, 2019, 124: 1370-1391.
- [126] Yin J, Zhang D L, Luo Y, et al. On the extreme rainfall event of 7 May 2017 over the coastal city of Guangzhou. Part I: Impacts of urbanization and orography. *Monthly Weather Review*, 2020, 148: 955-979.
- [127] Meng Z, Zhang F, Markowski P, et al. A modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69: 1182-1207.
- [128] Sun Y, Fang J. Numerical study on the initiation of the severe convective weather in Chongqing on 6 May 2010. *Acta Meteorologica Sinica*, 2013, 27: 364-378.
- [129] Li H, Cui X, Zhang D L. On the initiation of an isolated heavy-rain-producing storm near the central urban area of the Beijing metropolitan region. *Monthly Weather Review*, 2017, 145: 181-197.
- [130] Du Y, Zhang F. Banded Convective Activity Associated with Mesoscale Gravity Waves over Southern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124: 1912-1930.
- [131] Li M, Zhang F, Zhang Q, et al. Nonlinear response of hail precipitation rate to environmental moisture content: A real case modeling study of an episodic midlatitude severe convective event. *Journal of Geophysical Research*, 2017, 122: 6729-6747.
- [132] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part I: Analysis of the role of the spectral shape parameter. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 63: 3114-3136.
- [133] Milbrandt J A, Yau M K. A multimoment bulk microphysics parameterization. Part II: A proposed three-moment closure and scheme description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2005, 63: 3137-3159.
- [134] Labriola J, Snook N, Jung Y, et al. Explicit ensemble prediction of hail in 19 May 2013 Oklahoma City thunderstorms and analysis of hail growth processes with several multimoment microphysics schemes. *Monthly Weather Review*, 2019, 147: 1193-1213.
- [135] Mansell E R, Dawson E T II, Straka J M. Bin-emulating hail melting in three-moment bulk microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77: 3361-3385.
- [136] Klemp J B, R. B. Wilhelmson R B. The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, 35: 1070-1096.
- [137] Schenkman A D, Xue M, Shapiro A. Tornadogenesis in a simulated mesovortex within a mesoscale convective system. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69: 3372-3390.
- [138] Xue M, Hu M, Schenkman A D. Numerical prediction of the

- 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 39-62.
- [139] Orf L, Wilhelmson R, Lee B, et al. Evolution of a long-track violent tornado within a simulated supercell. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98: 45-68.
- [140] Yao D, Xue H, Yin J, et al. Investigation into the formation, structure, and evolution of an EF4 tornado in East China using a high-resolution numerical simulation. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 32: 157-171.
- [141] Yao D, Meng Z, Xue M. Genesis, maintenance and demise of a simulated tornado and the evolution of its preceding descending reflectivity core (DRC). *Atmosphere*, 2019, 10: 236.
- [142] Sun Z, Xue M, Zhu K, et al. Prediction of an EF4 supercell tornado in Funing, China: Resolution dependency of simulated tornadoes and their structures. *Atmospheric Research*, 2019, 229: 175-189.
- [143] Bryan G H, Fritsch J M. A benchmark simulation for moist nonhydrostatic numerical models. *Monthly Weather Review*, 2002, 130: 2917-2928.
- [144] Chen H, Zhang D L, Carton J, et al. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part I: Model prediction and structural changes. *Weather and Forecasting*, 2011, 26: 885-901.
- [145] Cecelski S, Zhang D L. Genesis of Hurricane Julia (2010) within an African Easterly wave: Low-level vortices and upper-level warming. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, 70: 3799-3817.
- [146] Wang Z. Characteristics of convective processes and vertical vorticity from the tropical wave to tropical cyclone stage in a high-resolution numerical model simulation of tropical cyclone Fay (2008). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71: 896-915.
- [147] Wang Z. Role of cumulus congestus in tropical cyclone formation in a high-resolution numerical model simulation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71: 1681-1700.
- [148] Liu M, Smith J A. Extreme rainfall from landfalling tropical cyclones in the eastern United States: Hurricane Irene (2011). *Journal of Hydrometeorology*, 2016, 17: 2883-2904.
- [149] Fox K R, Judt J, A numerical study on the extreme intensification of Hurricane Patricia (2015). *Weather Forecasting*, 2018, 33: 989-999.
- [150] Miller W, Zhang D L. Understanding the unusual looping track of Hurricane Joaquin (2015) and its forecast errors. *Monthly Weather Review*, 2019, 147: 2231-2259.
- [151] Li M, Zhang S, Wu L, et al. An examination of the predictability of tropical cyclone genesis in high-resolution coupled models with dynamically downscaled coupled data assimilation initialization. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2020, 37: 939-950.
- [152] Li X, Pu Z. Vertical eddy diffusivity parameterization based on a large eddy simulation and its impact on prediction of hurricane landfall. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48: e2020GL090703.
- [153] Ito J, Oizumi T, Niino H. Near-surface coherent structures explored by large eddy simulation of entire tropical cyclones. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3798.
- [154] Wurman J, Winslow J. Intense sub-kilometer-scale boundary layer rolls observed in Hurricane Fran. *Science*, 1998, 280: 555-557.
- [155] Lorsolo S, Schroeder J L, Dodge P, et al. An observational study of hurricane boundary layer small-scale coherent structures. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 2871-2893.
- [156] Marks F D, Black P G, Montgomery M T, et al. Structure of the eye and eyewall of Hurricane Hugo (1989). *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 1237-1259.
- [157] Kosiba K, Wurman J. Finescale dual-doppler analysis of hurricane boundary layer structures in Hurricane Frances (2004) at landfall. *Monthly Weather Review*, 2014, 142: 1874-1891.
- [158] Wurman J, Kosiba K. The role of small-scale vortices in enhancing surface winds and damage in Hurricane Harvey (2017). *Monthly Weather Review*, 2018, 146: 713-722.
- [159] Wu L, Liu Q, Li Y. Prevalence of tornado-scale vortices in the tropical cyclone eyewall. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115: 8307-8310.
- [160] Wu L, Liu Q, Li Y. Tornado-scale vortices in the tropical cyclone boundary layer: numerical simulation with the WRF-LES framework. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19: 2477-2487.
- [161] Palmer T, Stevens B. The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116: 24390-24395.
- [162] Zhou L, Lin S J, Chen J H, et al. Toward convective-scale prediction within the next generation global prediction system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 101: 1225-1243.
- [163] Lorenz E N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model. *Tellus*, 1965, 17:321-333.
- [164] Zhang F, Sun Y, Magnusson L, et al. What is the predictability limit of midlatitude weather? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, 76: 1077-1091.