

美国气象学会第20届中尺度过程会议和第28届数值预报会议概述

■ 郑永光 陈敏 陈炯

精准天气预报的核心对象是中小尺度天气。强降水和强对流天气的精准预报是世界性难题。2023年美国气象学会第20届中尺度过程会议和第28届数值预报会议关注强对流天气等中尺度过程的精细机理研究、超高分辨率数值模拟、物理过程、资料同化技术、一体化模式系统等。提升该类天气的精准预报能力的科学基础是继续深入认识其物理规律和机制，核心是发展先进的精细数值天气预报模式、资料同化技术及其后处理技术等。

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.04.013

2023年7月16—23日, 每两年一次的美国气象学会第20届中尺度过程会议(简称20 Meso)、第32届天气分析与预报会议(简称32 WAF)和第28届数值预报会议(简称28 NWP)在美国威斯康星州首府麦迪逊同时举行。

参加本次会议的专家和研究生等多数来自美国, 同时, 来自中国气象局、北京大学、中山大学等的中国专家和研究生也较多, 也有部分专家来自英国、日本、澳大利亚、巴西、瑞典、瑞士、以色列等国家^①。

这三个会议共有50余个专题会议, 包括: 中尺度对流系统、重力波和湍流、组织化湿对流、多尺度过程及其相互作用的可预报性、温带气旋和冬季风暴、地形气流和降水、极地气旋可预报性、中尺度过程和中尺度极端事件的预报和资料同化、极端降水的科学和预报、非均匀下垫面对对流初生和组织的作用、日变化和辐射反馈、中尺度边界层环流、热带和温带气旋(以上为20 Meso的专题会议); 天气气候模式中的物理参数化、模式发展和应用、改进热带对流的数值预报、基于预报的预警系统发展、资料同化、快速更新预报系统RRFS、全球模式发展、模式评估、模式处理和偏差订正、随机物理过程(以上为28 NWP的专题会议); 中尺度到次季节天气现象、预报进展、降水和洪水预报技术、概率预报和偏差、强天气和火预

报技术、新观测平台和能力、热带气旋分析和预报、科研业务转化、大气河、极端降水预报、冬季风暴、人工智能预报高影响天气(以上为32 WAF的专题会议)等多个专题会议^②。本文将介绍20 Meso和28 NWP会议的主要报告情况。

1 20 Meso会议情况

1.1 中尺度对流系统(MCS)和组织化湿对流专题会

这两个专题会议具有很大的相关性, 重点关注MCS的形成、发展和传播等多个方面, 包括MCS识别诊断, 以及重力波、冷池、垂直风切变等对MCS和组织化湿对流结构特征、形成和发展的影响机理等。

在对流系统识别和特征诊断等方面, 澳大利亚墨尔本大学的Ewan Short等使用雷达反射率因子和环境风客观诊断中尺度组织的特征, 提出了“MINT”算法, 识别和跟踪雷达反射率数据中的MCS, 并客观诊断与经典模型相关的组织特征。北京大学的王沛雨等统计了2016—2020年中国具有多个平行雨带(MPRB)特征的MCS分布, 将MPRB分为初始型(约40%)和分化型(约60%), MPRB主要包含3~4个雨带, 方向与0~1 km风切变方向大致一致。

在MCS发展环境和机理方面, 美国宾夕法尼亚州立大学的Chen Xingchao等发现热带海洋MCS是在一种 β 中尺度环境中发展起来的, 该环境具有的自由对

收稿日期: 2023年11月21日; 修回日期: 2024年1月20日

第一作者: 郑永光(1974—), Email: zhengyg@cma.gov.cn

资助信息: 国家重点研发计划(2022YFC3004104); 国家自然科学基金(U2342204, 42175017); 中国气象局重点创新团队(CMA2022ZD07)

① 会议相关信息和报告摘要等可在如下网址查阅: <https://ams.confex.com/ams/WAFNWPMS/meetingapp.cgi/ModuleProgramBook/0>。该网站可以查看所有的报告视频。

② 具体的会议安排参见网址<https://www.ametsoc.org/index.cfm/ams/meetings-events/ams-meetings/32waf-28nwp-20meso/printed-program/>。

流层低层较高比湿、中层较暖、低层较冷、较强的向上运动和较强的深层风切变。美国宾夕法尼亚州立大学的Peng Chin-Hsuan等发现孟加拉湾区域在海岸线附近MCS日变化是由海陆风引发，而在广阔海域上空清晨MCS则受到日内辐射强迫的强烈影响，还发现重力波具有关键作用。中山大学的杜宇等使用气象塔观测数据分析了2019年4月11日深圳极端降水事件，发现该次过程中，两个冷池的碰撞降低了合并冷池北部前缘的温度梯度，可能抑制了飚线的发展。美国强风暴实验室(NSSL)的Matthew C. Brown研究了低层风切变方向和大小对理想飚线结构和中涡旋(Mesovortex, 属于 γ 中尺度)形成的影响，发现大气低层的速度图(Hodograph)曲率增加有助于更强和更宽的线状对流(QLCS)上升气流，支持更大、更强烈和持久的中涡旋，表明低层垂直风切变可能是影响QLCS中涡旋的重要物理途径。

在组织化湿对流专题方面，报告关注对流初生和环境条件对深厚湿对流发展的影响。美国宾夕法尼亚州立大学的John M. Peters研究了不同垂直风切变对深厚湿对流初生(DCI)的影响，结果表明，垂直风切变在某些情况下抑制DCI，在其他情况下有利于DCI。美国太平洋西北国家实验室(PNNL)的Adam Varble等发现，在CACTI(Cloud, Aerosol, and Complex Terrain Interactions)试验期间，对流单体发展对大气条件的敏感性根据单体宽度而显著不同。美国北卡罗来纳大学的Casey Davenport使用理想化模拟研究了中尺度环境的变化在超级单体演变中的作用，对比了地形、地表边界和日变化过程对超级单体特征的影响。

在垂直风切变对深厚湿对流影响方面，美国宾夕法尼亚州立大学的Luke Justin LeBel等使用CM1模式研究了对流发生对Hodograph特征的敏感性，发现积云结构和对流初生对风切变幅度特别敏感，而对Hodograph曲率不敏感。美国伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校的Kevin Thomas Gray等使用数值模拟研究了具有不同中层风切变矢量方向的超级单体中顺流涡流的特征和发展机制。美国俄克拉何马大学的Andrew James Muehr等研究了中层切变和水平转子对超级单体上升气流动力学的影响，发现中层切变不会影响中层中气旋，中层最大的负压扰动主要由水平转子驱动，而不是中层中气旋。国家气象中心的郑永光介绍了2019年7月3日下午辽宁开原EF4级强龙卷的天气形势、环境条件、对流触发、对流风暴演变特征和龙卷的形成与消亡机制。

1.2 重力波和湍流

重力波是中尺度气象学的重要研究方面。本专题

的报告除了普查重力波的分布特征外，重点关注了重力波对对流系统发展的影响等。

在重力波分布特征方面，中山大学的罗雨涵等使用120个探空站点的高分辨率L波段数据研究了中国重力波时空变化及其特征，发现青藏高原东部边缘对流层和平流层低层重力波事件的发生率很高，与频繁的急流活动相吻合。中山大学的卫俊宏等基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)9 km预报普查了目前最高分辨率的全球数值天气预报(NWP)模式解析的重力波动量通量的全球分布。澳大利亚的Stacey M. Hitchcock则给出了雷暴附近湍流的空间分布。

重力波对对流系统发展作用方面，中山大学的杨洪沛等发现，2014年5月10—11日华南准静止锋暖区夜间沿海强降水过程中，在天气尺度强迫作用下锋面降雨产生的重力波，增强了暖区对流发展所需要的水汽等环境条件。美国石溪大学的Na Zhou等使用WRF-LES研究了接近陡峭地形的锋面系统内的切变驱动湍流及其对降水的影响，发现在上海海岸、山谷和迎风坡的地形阻塞效应增强了切变驱动的湍流涡旋和地形强迫抬升的大小，有利于对流单体的增强。

1.3 非均匀下垫面对对流初生和组织的作用

该部分主要交流了非均匀下垫面和地表差异对对流初生和对流组织的影响，以及它们之间的相互作用所涉及的基本中尺度过程，包括海风/陆风与对流初生和组织的相互作用，与地形有关的中尺度过程等；聚焦于对比明显的山区和平原地区和对比明显的下垫面，包括水/陆、城市/农村、沙漠/绿洲、森林/草原等对对流的影响，及其与对流相互作用的中尺度过程。

关于海、湖等水体与陆地差异所致局地环流对对流初生的影响方面，美国中央密歇根大学的Christian H. Boyer等使用大涡模拟(LES)研究了大尺度向岸气流过程中的湖风锋特征及其对对流初生的影响。美国中央密歇根大学的Jason M. Keeler等使用云模式CM1运行LES研究了湖风锋冷侧的不稳定性极大值及其对对流生成的影响。美国西肯塔基大学的Eric Rappin介绍了陆气相互作用中的灌溉所致梯度的影响观测和LES结果。美国宾夕法尼亚州立大学的Katherine McKeown等给出了美国休斯敦地区海岸对流的环境特征，根据对流形成的位置，对流初生模式可以分为3种：仅海湾、仅陆地以及陆地和海湾。美国科罗拉多大学的Benjamin David Ascher等研究了陆地表面不均匀性对海风对流的影响。

美国PNNL的James N. Marquis研究了LES模拟的深对流初生和地形环流之间的关系，发现地形低层辐合的主要功能可能是将瞬态边界层上升气流集中到一

个受限区域,其他重要作用可能是增加边界层大气的水汽。厦门气象局的黄亦鹏等研究了植被对比强烈的地区不同天气形势下形成的中尺度边界及其对相关对流的影响。北京大学的刘泓君研究了植被对比明显区域边界层辐合线相关的对流初生。

北京大学的孟智勇介绍了2022年7月5日—8月9日在河套进行的沙漠绿洲对流辐合线和深对流试验(DECODE)。北京大学的张慕容介绍了DECODE试验期间对实时运行的1 km WRF模式预报结果的评估情况,发现在23个观测日中的21个观测日内都能很好地预测边界的出现,但与边界相关的对流初生的命中率相对较低。

2 28 NWP会议情况

28 NWP会场的学术报告交流内容几乎涵盖了数值预报技术的所有方面,包括但不限于从全球到区域模式、从物理过程到资料同化、从随机过程到极端天气事件数值预报、从检验评估到后处理和人工智能应用等各个领域,并且详细介绍了美国业务数值模式研发的实际进展。

2.1 天气和气候模式的跨尺度物理参数化

数值模式中物理参数化存在较多的不确定性,本专题对美国全球预报系统(GFS)模式物理参数化进行了评估,并给出了通用模式物理包(CCPP)的开发进展。

美国国家大气研究中心(NCAR)的Tracy Hertnecky对基于美国国家海洋与大气局(NOAA)环境模拟中心的GFS模式v16版本回算预报的物理新方案开展了详细评估。结果表明,云和辐射相互作用的不确定性及其对模式物理过程的敏感性仍然是中期天气预报中一个持续存在的问题;各种敏感性包括探索用于驱动单柱模式SCM大尺度强迫的单个组分的贡献、浅积云中的水平夹卷率,以及云凝结核(CCN)的数量对降水的影响。

美国NOAA的Ligia Bernardet报告了通用物理包(CCPP)的开发进展。CCPP由开发测试中心(DTC)设计,包括一个物理参数化库和一个可以将库连接到几乎各种预报模式的框架接口。2022年6月发布的CCPP第6版包含23个主要参数化方案,代表了各种大气和地表过程。CCPP已经证明了其在业务环境中使用的可靠性和良好性能,是统一预测系统(UFS)的基石。它将纳入所有即将推出的NOAA业务版本UFS天气模式及其应用程序,如飓风分析和预报系统(HAFS)、快速更新预报系统(RRFS)和GFS。

2.2 模式发展和应用:物理过程

物理过程是数值模式的重要组成部分,会议报告

包括了湍流参数化方案、陆面过程、地形拖曳作用等方面。

美国NOAA的Joseph Olson主要通过细化地层和浅对流的次网格云描述改进了MYNN-EDMF湿湍流参数化方案,增加了一个新的2.6阶闭合,以改善层云的描述,而从大涡模拟(LES)分析中得到的新关系式则改善了浅积云的预报。加拿大环境中心的Nasim Alavi对加拿大环境与气候变化部(ECCC)的中期全球确定性NWP系统的新陆面方案包进行了客观评估,结果表明新陆面方案对夏季近地表空气温度和湿度的中期预报具有积极影响。美国德克萨斯农工大学的Yi Li等提出了在WRF模式中实现复杂地形拖曳的新方法,其下边界条件被重写成一种允许局地直接应用的形式,从而消除了对全局矩阵求逆的需求。中国气象局地球系统数值预报中心的陈炯研究了GRAPES全球模式中热带对流层(TTL)中冰相相对湿度(RHi)计算精度、卷云分布和不同过程相互作用所致的预报温度变化,解决了TTL中超过4 K的暖偏差。

2.3 模式发展和应用:资料同化

资料同化技术发展一直是提升全球和区域数值预报模式能力的必要方面。美国国家环境预报中心(NCEP)的Daryl Kleist重点介绍了NCEP全球数据同化系统(GDAS)的研发进展。GFS第17版的升级计划已经开始,包括GDAS向耦合同化系统发展,从而为从UFS中获取的耦合模式提供初始场这一重大更新。在UFS的框架内,基于数据同化集成(JEDI)的统一数据同化系统集成正在进行中。

美国NCEP的Cory Martin介绍了NCEP发展的基于JEDI原型的全球资料同化系统进展和评估工作,概述了基于JEDI的低分辨率原型纯大气循环GDAS的初步结果。在向新软件过渡的同时,NCEP还在开发耦合地球系统建模和数据同化(大气、海洋、海冰、陆地和组成)的能力,希望UFS和JEDI加快这方面的科学创新。美国NCAR的Craig Schwartz采用与NCAR跨尺度模式(MPAS)接口的JEDI软件,使用可变分辨率对集合变分(EnVar)混合同化开展了试验。试验网格在北美大部分地区分辨率为3 km,并在全球其他地区平稳过渡到约15 km。美国詹姆斯·奇普里亚尼气象公司(The Weather Company James Cipriani)介绍了IBM全球高分辨率大气预测(GRAF)系统,该系统基于JEDI发展,分析增量在高斯网格上计算,并插值到15或4 km分辨率的原MPAS网格。北京城市气象研究院的陈敏详细介绍了北京城市气象研究院基于WRF/WRFDA发展的逐小时快速更新循环模式系统CMA-BJ。

美国俄克拉何马大学的Xuguang Wang作了题为“数值天气预报的多尺度资料同化”的特邀报告，概要介绍了在集合变分资料同化系统中实现同步多尺度资料同化的方法，提出了一种MLGETKF（多尺度局部增益集合变换卡尔曼滤波）的新多尺度资料同化方法。美国NCEP的Daryl Kleist介绍了一种尺度依赖的局地化(SDL)方案，已被证明可以提高分析和后续预报性能。美国NOAA地球系统实验室(GSL)的Ming Hu介绍了RRFS系统中地面观测资料的高频同化应用。美国宾夕法尼亚州立大学的Keenan Christopher介绍了采用集合卡曼滤波(EnKF)对偏振雷达和GOES-16红外亮温的同步同化工作。美国犹他大学的Zhaoxia Pu介绍了土壤湿度资料同化对于登陆台风模拟的影响。台风登陆前土壤水分的增加往往会在登陆后产生较弱的风暴，并对台风路径模拟产生负面影响。

2.4 美国快速更新预报系统(RRFS)

快速更新的数值预报是强对流天气短时临近预报的重要数据基础之一。美国NCEP环境模式中心(EMC)的Jacob R. Carley等介绍了NOAA下一代对流可分辨的集合预测系统的第一个版本RRFS，它以统一预报系统(UFS)为基础。RRFS的特点是覆盖北美的3 km分辨率大区域，是一个具有混合3D EnVar算法的快速更新数据同化系统，每天生成4次集合预报，每小时生成确定性预报。美国NCEP EMC的Shun Liu等介绍了RRFS数据同化系统的测试和开发，RRFS包含一个每小时循环的确定性预报系统、一个每小时循环的EnKF数据同化系统和一个含5个成员的集合预报系统。

2.5 模式后处理和偏差订正

集合预报后处理和机器学习等方法的应用是会议的关注重点之一。美国德克萨斯理工大学的Austin Coleman介绍了一种集合灵敏度分析(ESA)方法，即通过将感兴趣的局部高影响预报现象(响应函数)与早期预报条件联系起来，提供了一种计算成本低廉的方法来诊断高影响预报特征不确定性的来源。美国Tomorrow.io的Xiaoxu Tian利用神经网络(NN)的切线和伴随(TL/AD)的便利性，初步发展了一种基于NN的四维变分同化系统以探索神经网络在资料同化中的应用。美国NCAR的Ryan Sobash介绍了应用密集神经网络(DNN)和卷积神经网络(CNN)、使用三个对流可分辨模式(CAM)的每小时对流天气预报结果，使用的数值模式是HRRRv3、HRRRv4和RRFS。美国NCAR的David Ahijevych扩展了之前神经网络和对流天气预报工作，将类似的机器学习技术应用于闪电预报。

2.6 基于预报的预警系统(WoFS)的发展

WoFS是指基于快速更新的高时空分辨率NWP发布强对流天气预警，是未来短时临近预报发展的主要方向之一，但目前还存在资料同化、模式本身的发展等较多技术难题。

美国NSSL的Nusrat Yussouf报告了美国WoFS总体发展情况。美国目前的对流风暴NWP系统，包括美国NOAA的HRRR和WoFS系统，都为3 km的水平网格间距。未来的对流风暴NWP系统将采用网格间距 ≤ 100 m的云解析模式。美国NSSL的Patrick S. Skinner基于对象检验方法分析了WoFS的预报性能。美国NSSL的Christopher A. Kerr等发现1 km分辨率的WoFS对于小尺度对象的预报性能显著高于3 km分辨率的WoFS。

3 总结

对这两个同时召开的会议情况简要总结如下。

1) 强对流天气机理研究越来越精细化，更加重视不同中小尺度影响因素对对流初生、发展、传播和对流风暴结构等的影响，包括不同地表下垫面、海陆分布、重力波、冷池、边界、不同分布的垂直风切变等的影响。

2) 高时空分辨率观测资料、精细物理过程和LES等在强对流天气研究中的作用越来越凸显。

3) 对流风暴NWP系统将采用网格间距 ≤ 100 m的云解析模式是未来的发展方向。不过，未来几年内美国的WoFS系统分辨率将只提高到1 km。“基于预报的预警”虽然发展依然存在困难和瓶颈，但其是提升精准预报能力的必然途径。

4) 美国的数值模式系统未来将统一为以FV3为核心的一体化模式系统。在近几年内HRRR将依然使用WRF模式、保持3 km的水平分辨率。但其下一代区域数值模式系统将为RRFS，该系统仍然为3 km分辨率但其数值模式将切换为FV3，动力/物理过程将集成应用CCPP，资料同化也将逐渐从GSI过渡到JEDI系统，同化方法将重点基于集合变分混合同化来发展。

5) 整体来看，整个美国业务数值模式发展的趋势是要走向集约化、通用化。虽然目前RRFS v1版本的预报性能仍然与现行业务模式系统HRRR有一定差距，但未来可期。

6) 应用机器学习方法的模式后处理技术是订正和提升数值预报能力的不可或缺的方面。

(作者单位: 郑永光, 国家气象中心; 陈敏, 北京城市气象研究院; 陈炯, 中国气象局地球系统数值预报中心)

(编辑: 卢冰)