

云解析人工影响天气数值模式的改进、初步试验和展望

刘玉宝¹ 丁秋冀¹ 史月琴² 方春刚² 段婧² 楼小凤² 李萍¹ 霍朝阳¹
周永波¹ 王昊亮¹ 景晓琴¹ 王新³ 陈添宇² 陈宝君² 李集明²

(1 南京信息工程大学 精细化区域地球模拟和信息中心, 南京 210044;

2 中国气象科学研究院 中国气象局云物理开放实验室, 北京 100081; 3 国家气象卫星中心, 北京 100081)

摘要: 基于WRF四维资料同化和预报技术, 初步发展了针对我国西北地区云微物理和播云催化技术的云解析人工影响天气模式系统(CR-WMM, Cloud-Resolvable Weather Modification Model)。该模式耦合并改进了中国气象科学院发展的微物理方案(CAMS-MP)和碘化银(AgI)催化方案, 并实现基于大涡模拟(LES)模式的飞机、地面烟炉等播撒源及毗邻区域AgI粒子扩散的精细模拟方法。选取降水案例对CR-WMM资料同化功能、CAMS-MP微物理参数化和AgI的催化数值模拟方案进行测试和评估, 验证了该系统的资料同化能力、微物理参数化和AgI催化数值模拟方案的可靠性。CR-WMM具备连续同化常规和加密气象观测, 特别是针对云微物理过程的新型卫星、云雷达和人工影响天气外场作业飞机和基地的特殊观测能力, 能生成全面、精确的云和降水热力、动力和微物理分析场, 支撑云和降水过程及云催化技术的理论研究及优化人工播云方案辅助决策。并提出为达到这一目标, CR-WMM模式在未来5—10年应集中攻克五个方面的科学难题。

关键词: WRF, 云解析模式, 四维资料同化, CAMS微物理方案, 大涡模拟, 人工影响天气

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.05.013

Development of a Cloud-Resolvable Weather Modification Model: Model Description, Preliminary Results and Challenges

Liu Yubao¹, Ding Qiuji¹, Shi Yueqin², Fang Chungang², Duan Jing², Lou Xiaofeng², Li Ping¹, Huo Zhaoyang¹,
Zhou Yongbo¹, Wang Haoliang¹, Jing Xiaoqin¹, Wang Xin³, Chen Tianyu², Chen Baojun², Li Jiming²

(1 Precision Regional Earth Modeling and Information Center, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081 3 National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Based on WRF four-dimensional data assimilation and forecast (WRF-FDDA), a cloud-resolving weather modification model (CR-WMM) is developed for modeling and forecasting cloud microphysical and cloud-seeding processes in Northwest China. The microphysical parameterization (CAMS-MP) and the silver iodide (AgI) cloud-seeding schemes, developed by the Chinese Academy of Meteorological Sciences, are transplanted into CR-WMM. The model permits simultaneously nested-grid LES (Large-Eddy Simulation) simulation of transportation and dispersion of AgI particles released from aircrafts or ground burner stoves. Precipitation cases are simulated to evaluate the data assimilation, CAMS-MP and AgI nucleation scheme in CR-WMM and the result demonstrated the general reliability of these components. CR-WMM is been developed for continuously assimilating diverse observational datasets, including conventional and intensive ground and upper-air meteorological observations, satellite cloud observations, and special cloud-radar and aircraft in-situ observations during weather modification operations as well. The system produces integrated analysis of thermodynamic, dynamic and microphysical analysis fields of cloud and precipitation processes, which can be used to support cloud and weather modification theoretical studies and field cloud-seeding operations. Finally, several challenges with the CR-WMM developments are identified, which should be addressed in the next 5–10 years.

Keywords: WRF, cloud-resolvable model, 4D data assimilation, CAMS-MP, LES, weather modification

收稿日期: 2021年1月8日; 修回日期: 2021年8月18日

第一作者: 刘玉宝(1963—), Email: ybliu@nuist.edu.cn

资助信息: 中国气象局西北人工影响天气工程技术建设项目
(ZQC-Z19081/ZQC-Z19176)

0 引言

人工影响天气是我国抗旱和消雹的重要减灾防灾手段, 每年人工增雨和消雹的业务投入数亿元。近几年里, 我国建设了强大的云物理观测设施, 包括各类

国际先进的地基、专业飞机和卫星云观测设备,开展了针对不同地区不同云系的人工影响天气外场试验,并发展了人工影响天气理论和数值模拟技术,在自然云观测分析、云模拟和资料同化等领域内取得了很大进展。这些理论和技术研究成果为发展一套新一代全国范围人工影响天气数值模式系统,推广和实现这些前期研究成果在人工影响天气的业务应用价值提供了重要基础。但由于云和降水过程的高度复杂性,人们对云热动力和微物理过程、播云潜力、播云技术和播云效果的认识和定量评估仍很有限,亟需进一步加强对自然云过程和播云催化影响过程的研究。

云数值模式在人工影响天气的理论和应用中发挥着重要作用^[1-4]。Orville^[2]对云降水和人工影响天气催化数值模式的发展和进行了概述。人工影响天气催化模式是在云降水模式的基础上,通过添加不同的催化过程而形成的具有催化能力的模式,包括吸湿性催化剂催化模式、AgI类成冰剂催化模式和致冷剂催化模式^[5]。利用数值模式在静力催化、增雨和防雹的正相关催化效果、微物理过程和动力过程的相互作用、催化时间窗口、催化效果和过量催化概念等方面都取得了非常重要的理论发展。一些学者针对我国东北地区层状云降雨进行了观测和数值模拟研究^[6-7],揭示了多层云冰晶核化、自然催化和雨水增长机制,确定暖云的厚度和含水量对降水过程发展的决定性作用。胡志晋和严采繁通过模式计算和实测^[8]得出,厚度为2 km的层状暖云,可以通过云水—雨水自动转化产生 $0.4\sim 0.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降水。

人工影响天气是云和降水物理学的应用领域,我国人工影响天气的理论和数值模拟及探测技术研究都取得显著进展。李宏宇等^[9]利用三维冰雹云数值催化模式研究高炮和火箭催化防雹技术,对两种催化工具的催化作业时间、催化剂量、作业部位、催化方式等都进行了研究。对人工增雨方面的研究,胡志晋^[10]提出了新的层状云人工增雨机制,研究指出人工冰晶除通过贝吉龙过程使过冷水转化为降水外,还会导致一部分冰面过饱和和水汽转化为降水,凝华释放的潜热,导致空气增温和局部风速加大,促进云降水的发展。对人工增雨条件、催化技术和效果评估方面的研究。通过对云模式模拟结果分析,在对流云中的最大上升气流以及过冷水含量区,进行碘化银的播散,能获得最好的增雨效果^[11]。王宏等^[12]用三维对流云模式模拟黄河上游河曲地区的对流云,如果催化时机、部位选择适当,降水总量增加有望达到30%~50%,催化所产生的动力效果显著。

过去数十年里,数值天气预报和云模拟是两个

相互独立的研究领域。数值天气预报聚焦业务天气预报需求,因此该领域主要关注资料同化、天气和中尺度动力过程和大气辐射、边界层混合、积云参数化、陆气和海气交换的模拟能力。另一方面,云模拟主要集中在研究云微物理过程参数化和积云对流热动力的物理过程,且多数是用单点观测或合成探空作为云初始环境强迫,这与真实大气里不断演变的中小尺度环境强迫不符。当代计算技术的飞速发展打破了数值天气预报和云模拟领域的界限,直接把数值天气预报模式的各方面模拟技术,特别是资料同化技术、基于全球模式预报的时变侧边界条件、下垫面强迫和边界层参数化、太阳和大气长短波辐射计算、地形强迫等,应用到云模拟系统中,即云解析数值天气预报模式(CRM)。CRM的水平网格距小于 $2\sim 3\text{ km}$,具有对真实大气的天气尺度—中小尺度—微物理过程及其相互作用的综合模拟和预报能力。通常来说,有效的人工影响天气作业一方面必须弄清楚真实大气里的云降水和播云催化中的微物理过程,另一方面是制定优化的业务播云计划和播云方案,CRM为此提供可靠的基础构架。因此,针对西北人工影响天气工程的云和降水结构、演变过程、播云潜力和播云技术研究及应用需求,本研究基于具有四维资料同化的国际先进的WRF模式(WRF-FDDA)初步发展了针对我国西北地区云微物理和播云催化技术的云解析人工影响天气模式系统(Cloud-Resolvable Weather Modification Model, CR-WMM),即能够通过模式网格尺度对云微物理、降水及其播云催化等过程进行精确模拟的数值模式系统。CR-WMM耦合并改进了中国气象科学院多年发展的微物理方案(CAMS-MP)^[1, 13],并实现基于LES模式的飞机、地面烟炉等播撒源及毗邻区域AgI粒子扩散的精细模拟方法。

1 云解析人工影响天气模式(CR-WMM)模式技术构架

1.1 WRF 四维资料同化技术

为支撑西北人工影响天气外场试验示范区在复杂地形下的人工影响天气播云机理研究和外场作业试验,CR-WMM以美国大气研究中心引领发展的天气研究和预报模式(WRFV4.1版本)及四维资料同化和预报技术为基础,在西北天山和祁连山两个人工影响天气实验基地发展两套模式系统,实现西北地区模拟区域常规WMO/GTS资料、常规地面和高空气象观测、业务雷达、风云卫星、加密地面自动气象站和人工影响天气外场试验观测资料的同化。CR-WMM支撑适合人工播云作业天气典型历史案例的云和降水过程历史

案例重构和催化模拟试验。

NCAR 的WRF-FDDA技术建立在牛顿张弛逼近理论基础上^[14-16]。WRF-FDDA本质上就是把气象观测逐个地注入到WRF模式中，与WRF模式在动力、物理、三维空间和时间维上不断地进行消化磨合，从而产生时间连续、动力和物理一致的全变量网格化气象分析场。

不同于其他WRF社区资料同化技术，WRF-FDDA能够同化不同时刻、不同地区的所有观测资料，特别是飞机、轮船等移动平台资料；能够有效同化所有的标准观测站和高密度自动气象站的高频（每5~10 min）资料，并有效地将地面观测信息扩展到整个边界层中；具有独特的WRF“在线”观测质量控制功能，对每个观测进行分析和进行0~1的可信度打分，保障资料同化的稳定性和精度；具有最大化消减数值预报模式的初始预报“Spin-up”噪音的能力，在模式起报时刻，使模式热力场及云和降水粒子场的各变量间达到动力平衡、物理一致、云雨热启动的特性。这些特点对重构历史加强观测的云和降水过程和实时人工影响天气的云和降水的短临预报及人工播云技术和方案的研究具有重要意义。此外，WRF-FDDA具有集成WRF社区开源GSI（Grid Statistical Interpolation）和基于集合资料同化技术的杂交同化能力。

1.2 Aerosol-aware CAMS-MP 和 AgI 催化模拟技术

中国气象科学研究院从20世纪80年代就致力于自主发展双参数云微物理参数化方案，即CAMS-MP。数十年里，CAMS-MP早期被用于强对流云、层状云的云模式模拟研究^[8, 17-21]，近年来，通过与GRAPES、MM5和WRF等中尺度数值模式的耦合，用于研究暴雨^[22-24]、锋面降雨^[25]、季风降雨^[26]、人工增雨播云催化^[27-29]以及气溶胶云相互作用^[30]等研究。CAMS参数化方案包括云中水汽、云滴和冰晶、雨滴、霰、雹的群体比水量和比浓度的转化率等参数的计算方案，考虑了26种主要的云微物理过程，具体包括凝结（凝华）、蒸发、粒子间的碰并（撞冻）、冰晶核化、繁生、冻结、融化、云—雨、冰—霰、霰—雹的自动转化以及雹的干湿增长等。CAMS方案在自动转化、雨滴冻结成霰、雪晶淞附、冰晶核化、繁生等过程的描述及过饱和度计算方面具有一定的优势，并经过了许多个例的模拟检验。例如：云雨自动转化通过计算云滴谱拓宽度，冰雪自动转化通过计算冰晶直径大于300 μm的冰粒子数，雪霰自动转化通过计算淞附度来完成；冰晶核化过程考虑过饱和度和大气温度变化率的影响；云微物理量的计算采用不同的顺序（先计算汇项多而源项少的量），保证了计算的稳定、守恒；

使用准隐式积分方法，凝结、凝华等快变过程不需要小步长迭代，节省了计算时间。为发挥CAMS-MP的优势，我们将CAMS-MP移植到基于最新稳定版本的WRF-FDDA模式中，作为CR-WMM一个具有中国特色的云微物理模拟方案。

WRF的云微物理模块多数不直接考虑气溶胶参与的云、降雨相关过程以及和辐射过程的相互作用。基于AgI播撒催化模拟需求和未来模拟自然冰核及工业气溶胶的影响，我们在耦合到WRF模式系统的CAMS-MP微物理方案中增加了PM_{2.5}、PM₁₀、AgI的排放源以及一个沙尘排放方案，并相应的增加了这些气溶胶的干沉降和次网格的垂直混合过程。其中，加入的气溶胶能通过一定的活化方案来参与云微物理过程。由此调整后的CAMS方案已经可以较为完整地描述气溶胶在大气中的扩散和传输及其对云雨降水的作用，该方案称为Aerosol-aware CAMS-MP，图1描述该方案的主要框架。

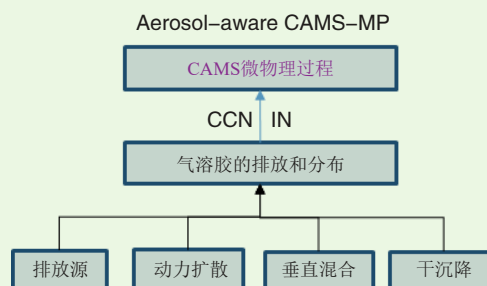


图1 Aerosol-aware CAMS-MP微物理参数化方案的主要框架
Fig. 1 The framework of Aerosol-aware CAMS-MP scheme

针对AgI播撒催化，在Aerosol-aware CAMS-MP引入了楼小凤等^[28]AgI的催化方案，并参考了刘诗军等^[27]、刘卫国等^[29]的方案做了一些调正。该方案根据Demott的试验结果^[31]，模拟AgI粒子在不同环境条件下的四种主要的AgI冰晶核化过程，其中包括凝结（ F_{ind} ）、凝华（ F_{dep} ）、凝结冻结（ F_{cfd} ）、接触冻结（ F_{ctr} ）和浸没冻结（ F_{imf} ）。这些过程都是温度（ T ）、水面过饱和度（ S_w ）以及冰面过饱和度（ S_i ）的函数，并考虑温度和过饱和度的时间趋势 $\partial T/\partial t$ 和 $\partial S/\partial t$ 因子。

为模拟不同AgI播撒过程（和其他自然和工业气溶胶排放），发展了具有时空变化排放的排放源模块。在CR-WMM模式运行时，其Aerosol-aware CAMS-MP通过调用具有时空变化的飞机、火箭和地面烟炉等AgI播撒（排放源）模块来模拟AgI气溶胶粒子的播撒过程和速率。

1.3 LES 耦合精细模拟方案

WRF模式支持LES降尺度模拟。CR-WMM采用

“在线”嵌入套网格方法，实现对高敏感局部区域的精细模拟，并将模拟信息实时反馈到云解析中尺度网格。Liu 等^[32-33]成功地采用这一技术分别对美国一个小地形微尺度风环流和北京北部山区的2022年冬奥会场区的天气模拟中。CR-WMM的LES模式具有两种启动方式，一种是固定播撒源区（如地面AgI烟炉、地面高炮播撒）的给定LES模拟区域，另一种是根据可移动平台的播撒（如飞机播撒和火箭播撒）。特别指出，在地形较为复杂的地区，地面AgI烟炉和其他底层播撒源需要考虑的精细地形和环流特征对气溶胶扩散和传输的影响，LES模式的精细模拟更为重要。

2 CR-WMM初步试验模拟结果

基于CR-WMM模式技术，结合西北人工影响天气工程技术需求，在天山和祁连山的人工影响天气试

验区/示范区分别建立了实时资料同化和预报系统。这两个系统都具有三个套网格模拟区，网格分辨率为15、3和1 km。其中1 km模式区覆盖主要试验区及其毗邻地区。图2给出新疆天山模式区设计图。模式系统运行设计每天预报8次，每3 h完成过去3 h的四维连续资料同化和24~72 h的预报。本研究选取2020年新疆天山多个案例，开展了资料同化试验、CAMS-MP与WRF其他几种微物理方案的对比和AgI催化试验及LES模拟试验。雷达是观测云降水过程的重要手段，由于目前对西北地区的山地地形下雷达观测资料质量控制尚不够完善，基于华东一个强对流案例检验CR-WMM雷达资料同化能力。本节主要介绍和分析这些试验的初步结果。

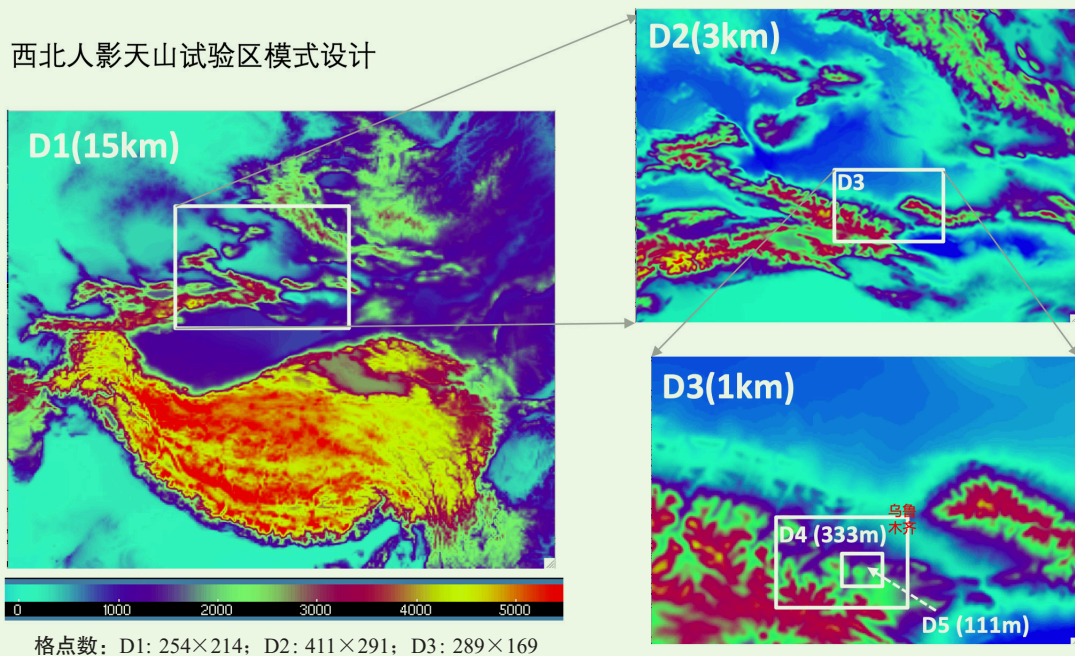


图2 西北人工影响天气工程新疆天山CR-WMM人工影响天气模式区和地形高度（模式D1-D3支持实时滚动资料同化和预报；附加模式区D4和D5支持播云催化AgI粒子扩散的LES模拟研究）

Fig. 2 Domains setting and terrain height in CR-WMM for the northwest China weather modification project over Tianshan Mountain region, Xinjiang (Real-time rolling data assimilation and prediction are implemented in D1-D3, LES simulation of AgI aerosol particles' diffusion is applicable in D4 and D5)

2.1 雷达观测四维资料同化

WRF四维资料同化（FDDA）能有效地同化不同观测平台的温度、湿度、风速、风向和气压/高度的观测资料^[14-15]。目前，西北人工影响天气工程新疆天山CR-WMM实时系统能够同化我国的标准地面站（每小时）和探空站（每12 h）、地面自动气象站（每5 min）、风廓线雷达观测、FY卫星大气风矢量（AMV）、商业飞行气象报告（AMDAR）、微波辐射计观测等。该模式的系统性检验将在未来的工作中

完成。雷达和卫星是观测云降水过程的重要手段，是目前CR-WMM的核心研究内容之一。这里首先选取2020年8月20日发生在华东地区的强对流暴雨过程，以测试对雷达资料的同化效果。图3为CR-WMM华东模式区（3 km网格距）同化雷达（RDA）和没有同化雷达资料（NODA）的模式预报的雷达组合反射率与雷达观测的组合反射率的比较。可以看出，CR-WMM能够大幅度提升强对流降雨的分析和预报能力，对于6 h内预报有着非常显著的效果改善。

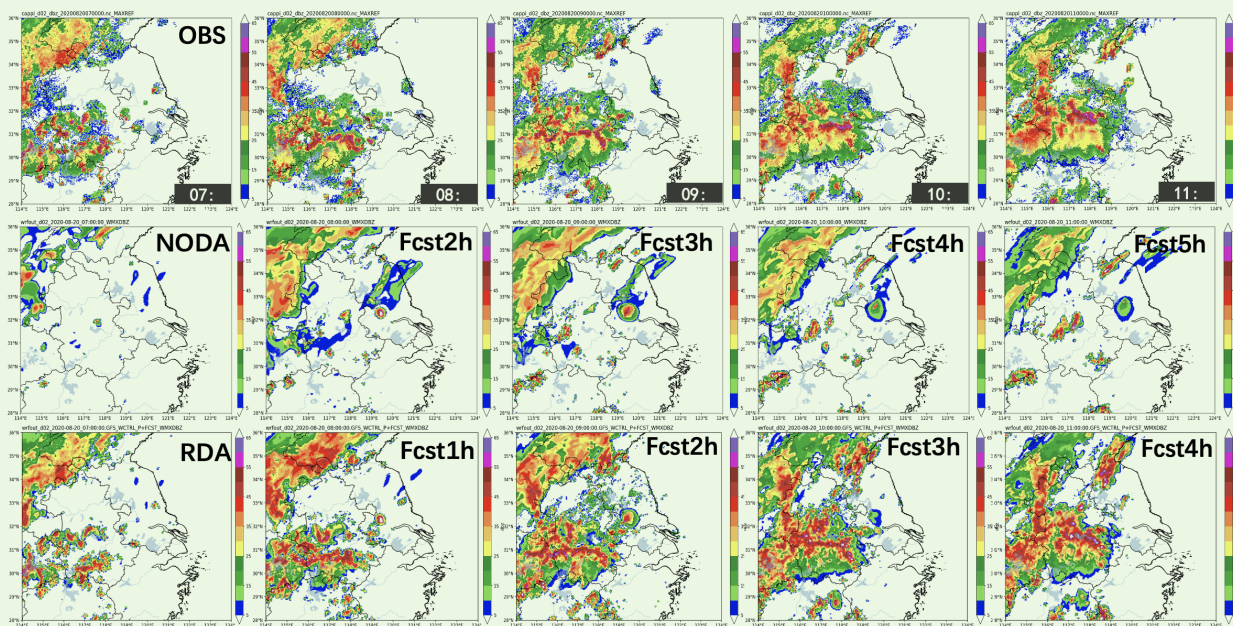


图3 雷达资料同化和模式预报的检验。第一行为雷达观测的组合雷达反射率，时间为2020年8月20日07—11 UTC；第二行为对应时间没有同化雷达反射率的模式预报垂直层最大雷达反射率，第三行为06—07 UTC同化雷达反射率的模式预报垂直层最大雷达反射率

Fig. 3 Verification of radar data assimilation and model prediction. The top panels are the observed combined radar reflectivity hourly from 07 to 11UTC August 20, 2020, the middle are the model predicted combined vertical maximum reflectivity without radar data assimilation, and the bottom are those with radar data assimilation between 06 and 07 UTC

雷达观测在西北地区受复杂陡峭地形影响，观测数据的定量处理和质量控制难度较大。复杂山地的地形遮挡效应和地物回波导致雷达观测范围局限在相对较小区域和降水粒子含水量定量的反演具有较大不确定性，使得雷达资料同化在预报实效和精度上都受到一定的限制。图4给出天山试验区2020年8月14日一次夏季对流过程的雷达资料同化结果。可以看出，雷达资料同化有效地改进了模式区内的对流降水云团分布，并减少了模式对强对流降水云团的高估。但与东南地区CR-WMM的强对流过程雷达资料同化不同，本过程雷达资料同化后的预报效果会很快消失（图略）。初步分析表明其原因可能与雷达观测精度和代表性问题有关，同时也受高山地形强迫与雷达资料同化的热动力调整不一致性的影响。因此未来需要进一步改进雷达资料同化的水汽和潜热调整方案，同时加强雷达观测质量控制和发展基于卫星云观测的区域综合云团反演技术，从而改善复杂地形条件下雷达资料同化的对区域云系的描述能力。

2.2 CAMS 微物理测试和比较

2020年5月18日，天山山区多地出现暴雨、冰雹、大风天气。利用天山试验区CR-WMM（模式区见图2）对该案例进行了观测资料模拟试验。模拟试验采用三重嵌套模式区，模式起始时间为2020年5月

18日00时，模式积分30 h。针对该案例，在其他物理选项相同的条件下，分别选择了Thompson、WSM6、WDM6、Morrison和Lin方案，与CAMS-MP方案进行模拟试验的对比分析。这些方案都是包含云水、云冰、雪、雨和霰粒子5类水成物粒子的微物理方案，在业务和研究中应用较广泛。其中Thompson方案是NOAA高分辨率快速更新模式（HRRR）业务模式选用微物理参数化方案，Morrison方案是NCAR的社区气候模式（CESM）系统的微物理参数化方案，WSM6和WDM6方案为韩国Yonsei大学专门为WRF模式发展的两套微物理方案，Lin方案是WRF最早安置的基准微物理方案。

图5显示了2020年05月18日 06时，不同微物理方案对地面雷达反射率的模拟结果。其结果表明，各方案均能模拟出团块状的对流云回波，对流降水回波强度大于35 dBz。CAMS-MP模拟雷达反射率结果处于几个模式模拟结果的中间水平，该结果表明CAMS-MP与WRF 4.1.3的耦合较为成功，能够满足中尺度天气数值模拟的工作需求。

为进一步评估CAMS-MP模拟的微物理特征和分析不同云微物理方案的云特征模拟的差异，图6给出了2020年5月18日强对流中心（参见图5的圆弧标示区）的云水（ qc ）、雨水（ qr ）、云冰（ qi ）、雪

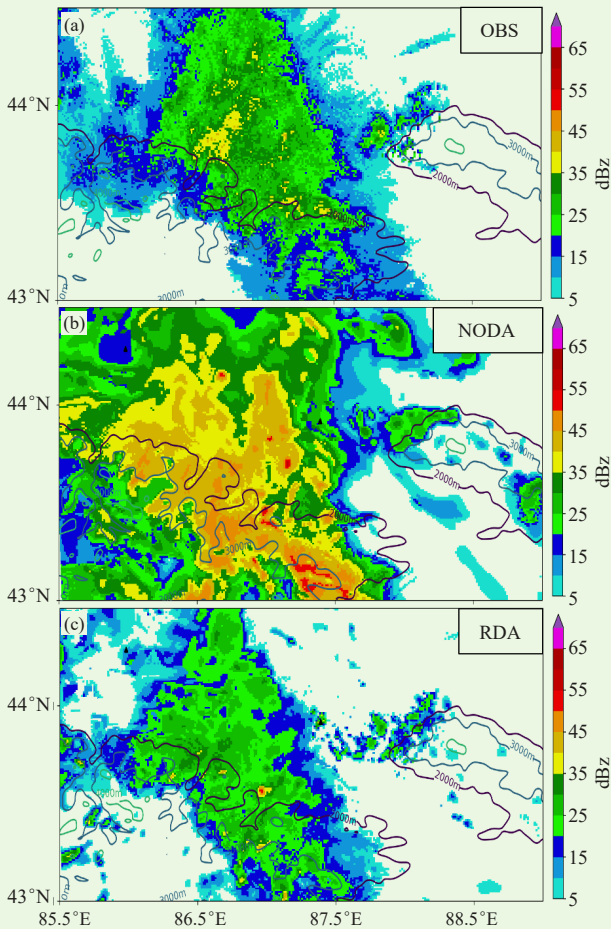


图4 2020年8月14日05UTC天山试验区雷达资料同化结果 (a) 观测雷达观测的组合雷达反射率; (b) 没有同化雷达资料时模式模拟的垂直最大雷达反射率; (c) 同化雷达资料后的模式模拟垂直最大雷达反射率

Fig. 4 Radar data assimilation for the Tianshan test area at 05 UTC 14 August 2020

(a) the observed combined radar reflectivity, (b) the model predicted vertical maximum reflectivity without radar data assimilation, (c) the model simulated vertical maximum reflectivity with radar data assimilation

(q_s) 和霰 (q_g) 区域平均垂直廓线。对比分析不同方案中的水成物粒子的分布特征, 可以看出不同方案模拟的微生物水成物粒子的含水量差别较大。CAMS-MP模拟的 q_c 含量相对较大, 但比WDM6的小, 垂直分布廓线和WDM6的结果最为接近。CAMS-MP模拟的 q_r 和Lin、Thompson方案相似, 模拟的霰粒子含水量介于6个方案的中间, 其模拟的固态水成物 q_i 、 q_s 、 q_g 结果总体来说, 和Thompson方案模拟的形态最为接近, 但数值较高。除Thompson模拟结果, CAMS-MP相比较其他模式而言, 模拟的 q_g 和 q_i 较高, 而 q_s 偏低。值得指出, 目前的试验结果仅表明CAMS-MP和WRF模式的耦合是合理的。下一步需要

利用新疆外场试验的观测资料, 对CAMS-MP的模拟地面降水和云内微物理结果进行细致比较。

不同云微物理方案模拟的各类水成物粒子含水量的巨大差异, 这表明尽管目前的微物理参数化方案对云和降水区具有一定的整体描述能力, 但它们对云内微物理过程的模拟仍然存在非常大的不确定性。云内冰晶、过冷水含量是播云催化的关键参量, 因此, 为保障CR-WMM播云潜力和播云方案模拟能力, 亟待提高云微物理方案对云内微物理过程的模拟能力。未来发展, 一方面需要着重加强CAMS-MP的微物理的核心科学模拟能力, 另一方面必须结合人工影响天气外场加强观测试验, 检验和调试微物理参数化方案里的多个关键的不确定性参数。

2.3 AgI 催化和 LES 模拟试验

选取2020年1月16—17日天山北坡地区的降雪过程, 首先使用四重嵌套网格(图2)进行AgI播撒模拟测试, 模拟时间为2020年1月16日20时—1月17日20时(北京时, 下同)。模拟试验包括飞机播撒和地面烟炉两个播云方式。飞机播撒试验在第三层网格(D3: 1 km网格)内进行, 设置飞机播撒高度大致为海拔2 km高度, 于17日03: 15从85.5°E、43°26'N开始播撒, 自东向西飞行1 h, 以 $1.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度进行碘化银的播撒, 模拟结果验证了模式对AgI催化对转化模拟区内地形云过冷水而形成地面增雪的过程基本模拟能力, 但模式结果需要未来结合外场试验进行检验和调试。

针对地面AgI烟炉播撒模拟试验, 使用高分辨LES模拟网格(图2, D4: 333 m)。地面烟炉位置按天山人工影响天气示范区建设的三个烟炉设置。为测试目的, AgI排放强度为 $24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 其排放时长和模式的运行时间一致。一共进行两次试验, 分别开启和关闭LES模拟选项(简称exp_LES和exp_NoLES)。图7是LES模拟地面烟炉播撒AgI的三维展示图, 可以看出在Aerosol-aware CAMS-MP耦合了LES模拟实验后, 模式很好的体现了AgI粒子在地形复杂地区中的扩散和传播过程。

当WRF开启LES模式时, 次网格上的垂直混合过程则不由边界层模块所控制。每个网格的三维涡旋混和由模式可分辨动力和基于湍流动能(TKE)预报的次网格混合过程来描述。这将会影响地面扩散上升的AgI气溶胶粒子在垂直方向上的分布, 进而改进催化过程的模拟。在对exp_LES和exp_NoLES模拟的近地层AgI浓度场和风场进行的逐小时的对比后发现(图略), exp_LES模拟的近地层风场更加符合局地的地

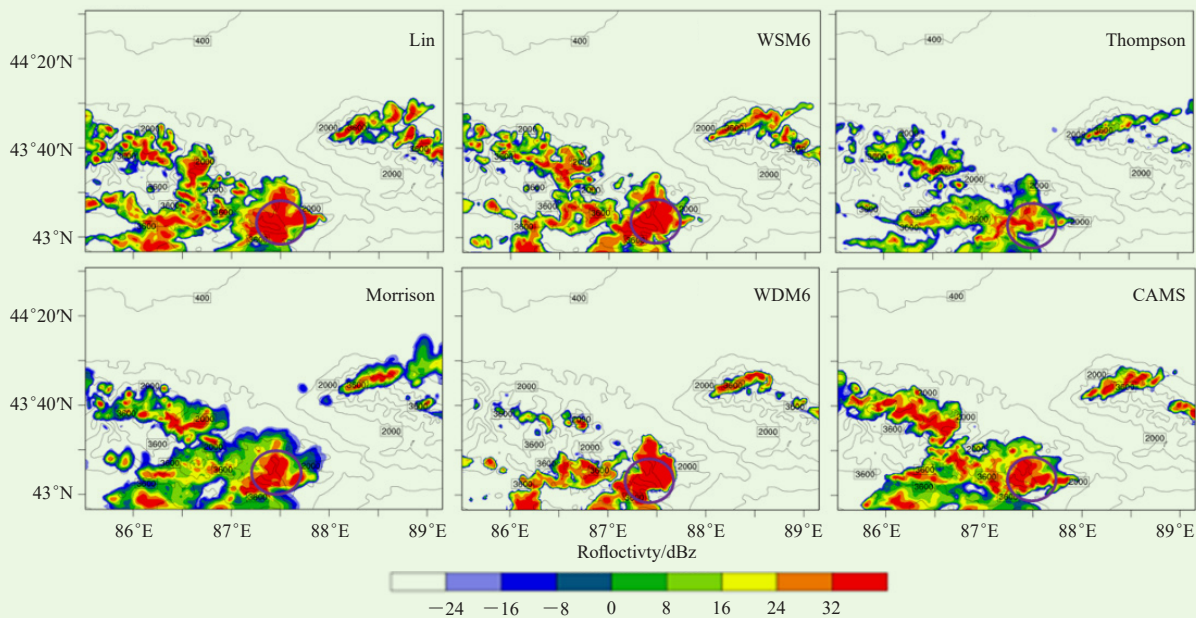


图5 2020年5月18日06时, 使用6种微物理方案所模拟的地面雷达反射率

Fig. 5 Comparison of ground radar reflectivity simulated by using six different microphysical schemes respectively at 06 UTC 18 May 2020

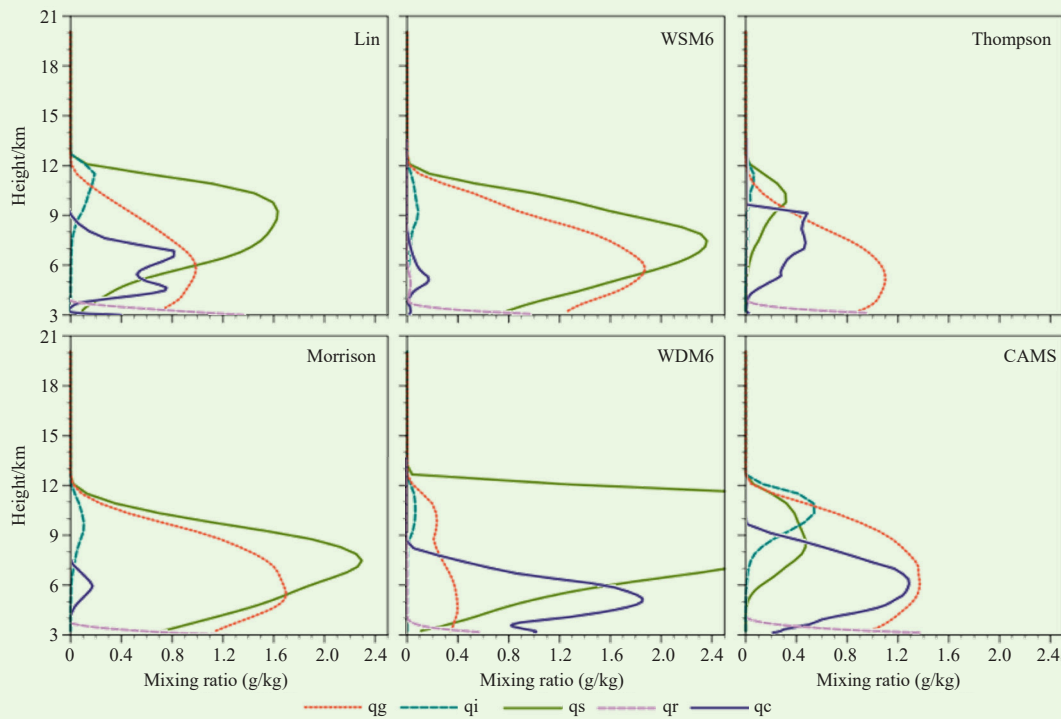


图6 2020年5月18日 06时强对流区 (图5中圆圈标注区) 五类水成物 (qc, qr, qi, qs, qg) 的区域平均廓线

Fig. 6 Vertical profiles of mixing ratios of five types of hydrometeors (qc, qr, qi, qs, qg) averaged in the severe convective cores (circles marked area in Fig. 5) at 06 UTC 18 May 2020

形特征, 而在临近地面烟炉的下风向区域内exp_LES和exp_NoLES的风场和AgI浓度都有着显著的差异。下一步将利用CR-WMM AgI催化耦合模式开展1~2个具有外场观测资料和催化试验的典型降水过程的催化模拟试验, 通过对碘化银浓度和浸没在云滴中的碘化

银浓度的模拟结果进行分析, 获得催化剂在云中的扩散传输特性精确模拟, 为确定作业影响区域, 评估作业效果, 优选催化技术, 为外场人工影响天气作业和试验提供科技支撑。此外, 目前模式系统尚没有考虑AgI粒子的老化效应。

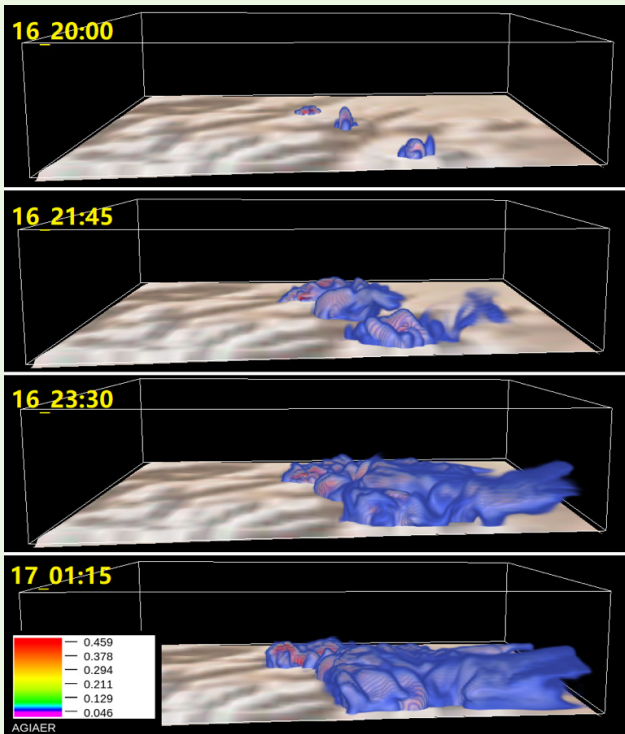


图7 LES模拟地面烟炉播撒的AgI在山区间的传播和扩散过程, 图中展示的为AgI浓度大于 $0.046 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的包络面, 时间为2020年1月16日20:00 BT—17日01:15 BT

Fig. 7 The LES simulation of transportation and diffusion of AgI particle that released from the ground burner stoves between 20:00 BT 16 January and 01:15 BT 17 January 2020. Shown in the figure are the terrain and the iso-surface of AgI concentration of $0.046 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

3 结论

云解析数值天气预报模式具有对真实大气的天气尺度—中小尺度—微物理过程及其相互作用的综合模拟和预报能力。基于NCAR具有四维资料同化的最新稳定版(V4.1.3)WRF模式(WRF-FDDA), 本研究初步发展了针对我国西北地区地形云和降水过程宏观云热动力和微物理过程的模拟和实时预报的云解析人工影响天气模式系统(CR-WMM)。CR-WMM耦合并改进了中国气象科学院发展的微物理方案(CAMS-MP)和两个AgI催化方案, 并实现基于LES模式的飞机、地面烟炉等播撒源及毗邻区域AgI粒子扩散的精细模拟技术。CR-WMM支持历史加强观测案例的云过程和播云技术的科学研究, 也可用于外场播云业务的实时降水和云微物理预报和优化播云催化方案的辅助决策。

基于CR-WMM, 在天山和祁连山的人工影响天气试验区分别建立了实时资料同化和预报系统。这两个系统都具有三个套网格模拟区, 网格分辨率为15、3和1 km。其中1 km模式区覆盖主要试验区及毗邻地

区。模式系统可每天8次预报周期, 每3 h完成过去3 h的四维连续资料同化和24~72 h的预报。

本研究选取2020年5月18日天山北坡地形对流云过程, 采用CAMS-MP微物理参数化方案和WRF中使用最成熟的其他5个微物理方案进行对比模拟试验。模拟结果显示CAMS-MP模拟的云区、雨量和云内水成物的含水量相对比较合理, 量值介于其他五个方案之间。比较6个微物理方案的云微物理模拟结果, 发现不同方案模拟的云水、冰晶、雪、雨、霰的含水量相差非常大。这一结果表明目前微物理参数化方案对模拟云和降水整体(宏观)特征有一定能力, 但对云微物理特征、特别是播云潜力评估和播云方案研究, 具有很大的不确定性, 模拟精度亟待大幅提升。值得指出, 近年来, 云微物理参数化方案在三参数参数化方案、大涡环境微物理粒子增长方案、云-气溶胶相互作用和粒子分档模拟方面有很好的进展。这些成果为进一步改进CAMS-MP微物理方案提供了基础。

针对2020年1月16—17日天山北坡地区的降雪过程的飞机AgI播云催化的模拟试验测试的CR-WMM模拟能力。初步试验结果表明, 加入温度和过饱和度的时间趋势对AgI核化的模拟, 冰晶生成有所减少。耦合了LES模拟的CR-WMM模式可以很好地考虑复杂地形下的湍流活动, AgI在烟炉下风的传输过程、在垂直方向上的扩散和混合过程都得到了不同程度的改善, 模拟的AgI催化增雪效应与没有LES的模拟结果有明显差异。值得指出, CR-WMM播云催化模拟的能力和效果, 需要未来结合外场试验资料进行检验、调试和改进。

4 挑战和展望

CR-WMM意旨集成数值天气预报模式和云模拟技术, 实现云和降水资料融合同化的云过程再分析能力和支撑人工影响天气的播云潜力、播云技术和播云效果检验的模拟研究及外场播云业务过程中优化作业方案辅助决策。尽管在西北人工影响天气工程技术项目支持下, 我们初步建设了CR-WMM系统的基础构架。然而, 初步模式试验结果和系统分析人工影响天气需求, 我们认为CR-WMM仍然面对云微物理特征和云和降水发生、发展过程的高度复杂性的多方面挑战, 多个基础问题应在未来5~10年里攻关解决。

首先, 目前对各类云和降水(对流系统、地形云系统、锋面云系统、低涡云系统等等)的云微物理特征只有片面和时空极度局部的观测和认识。第二, 尽管数值天气预报模式能模拟云和降水发展过程的天气和中尺度云区、降水量等, 但对模拟和预报对人工影

响天气作业至关重要的云和降水小尺度云团及其内部微物理特征的能力十分有限。第三, 如何将我国近年来人工影响天气业务作业强化观测装备, 特别是云物理观测飞机、FY (风云) 系列卫星和日本“葵花”卫星、天气和Ku/Ka/W波段雷达、闪电及其他针对云内和地面水成物粒子的遥感观测融合同化到云解析数值模式。第四, 目前云微物理参数化缺乏对重要形态过渡粒子(比如淞附雪花、冰晶形状、融雪粒子等)的表达能力, 多个微物理转化控制参数具有很大的不确定性。最后, 云微物理粒子是在云内微尺度大气涡旋(eddies)内生长的, 在几秒到几分钟内, 涡旋里的云粒子可能经历不同的温度、湿度、气压环境, 影响其增长速度, 目前已有微物理参数化方案尚没有考虑这些因子。

解决这些云解析模式的问题是发展有效的人工影响天气研究和业务模式的关键。为完成这一任务, 人工影响天气的科学工作者不仅需要在观测、理论、同化技术和模式技术的各个方面钻研攻关, 更需要联合卫星、雷达、飞机等云观测专家、数值模式和资料同化专家、云微物理理论和参数化专家等, 共同针对典型云和降水案例进行云和降水发展机制、云微物理特征和演变、观测和模式资料融合同化及模拟和预报能力的全方位研究。研究内容包括开展“天地空”基气象观测系统, 特别是卫星主、被动遥感、机载和地基的云雷达、微雨雷达和其他云微物理观测的集成分析、同化和基于AI深度学习的融合, 实现云宏微观结构精确再现和准确的模式云初始化。同时应研究适用于层状云和强对流云及播云催化模拟和预报的多参数微物理参数化方案, 实现从大涡模拟(LES)到云解析中尺度模式的尺度适应性模拟能力。利用先进的云观测对CR-WMM模式进行检验, 指导模式的改进, 然后将各类云观测融合同化到CR-WMM模式, 增进对云和降水结构和机制的认识。

参考文献

- [1] 胡志晋, 何观芳. 积雨云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式. 气象学报, 1987, 45(4): 467-484.
- [2] Orville H D. A review of cloud modeling in weather modification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1996, 77(7): 1535-1555.
- [3] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.
- [4] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008—2012年). 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [5] 楼小凤, 师宇, 李集明. 云降水和人工影响天气催化数值模式的发展及应用. 气象科技进展, 2016, 6(3): 75-82.
- [6] 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究. 大气科学, 2007, 31(3): 425-439.
- [7] 侯团结, 胡朝霞, 雷恒池. 吉林一次降水层状云的结构和物理过程研究. 气象学报, 2011, 69(3): 508-520.
- [8] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(二)中纬度气旋云系的微物理过程. 中国气象科学研究院院刊, 1987, 133-142.
- [9] 李宏宇, 周崑, 周毓荃. 人工消(减)雨作业中卫星反演云特征参量变化. 气象, 2008, 34(S1): 136-140.
- [10] 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 10-13.
- [11] Guo X L, Fu D H, Zheng G G. Modeling study on optimal convective cloud seeding in rain augmentation. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 2007, 43(3): 273-284.
- [12] 王宏, 雷恒池, 李书严, 等. 河上游河曲地区对流云催化增雨的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2004, 9(4): 619-630.
- [13] Lou X, Shi Y, Sun J, et al. Cloud-resolving model for weather modification in China. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(9): 1055-1061.
- [14] Liu Y, Warner T T, Bowers J F, et al. The operational mesogamma-scale analysis and forecast system of the U.S. Army Test and Evaluation Command. Part 1: Overview of the modeling system, the forecast products. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 1077-1092.
- [15] Pan L, Liu Y, Liu Y, et al. Impact of four-dimensional data assimilation (FDDA) on urban climate analysis. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2008, 7: 1997-2011.
- [16] Huang Y, Liu Y, Xu M, et al. Forecasting severe convective storms with WRF-based RTFDDA radar data assimilation in Guangdong, China. *Atmospheric Research*, 2018, 209: 131-143.
- [17] 胡志晋, 严采繁. 层状云微物理过程的数值模拟(一)微物理模式. 中国气象科学研究院院刊, 1986, 1(1): 37-52.
- [18] 胡志晋, 何观芳. 积雨云中微物理过程的数值模拟(二)阵雨、冰雹、暴雨的个例研究. 气象学报, 1988, 46(1): 28-40.
- [19] Liu Y, Zhou X, Hu Z. A Three-dimensional Elastic Nested-grid Meso (beia-gamma) scale atmospheric model -Part I: Model Description. *Acta Meteorologica Sinica*, 1993, 7: 257-272.
- [20] 李淑日, 胡志晋, 王广河. CAMS三维对流云催化模式的改进及个例模拟. 应用气象学报, 2013, 14(3): 78-91.
- [21] 刘涛, 孙晶, 周毓荃, 等. 一次低槽冷锋层状云系结构和过冷水分布特征的模拟研究. 天津: 中国气象学会年会, 2015
- [22] 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. CAMS复杂云微物理方案与GRAPES模式耦合的数值试验. 应用气象学报, 2008, (3): 315-325.
- [23] Gao W H, Zhao F S, Hu Z J, et al. A two-moment bulk microphysics coupled with a mesoscale model WRF: Model description and First results. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(5): 1184-1200.
- [24] 高文华, 赵凤生, 胡志晋, 等. CAMS云微物理方案的改进及与WRF模式耦合的研究个例. 地球物理学报, 2012, 55(2): 396-405.
- [25] 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 华南冷锋云系的中尺度和微物理特征模拟分析. 大气科学, 2008, 32(5): 1019-1036.
- [26] Gao W, Sui C H, Wang T C, et al. An evaluation and improvement of microphysical parameterization from a two-moment cloud microphysics scheme and the Southwest Monsoon Experiment (SoWMEX)/Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment (TiMREX) observations. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116: D19101.
- [27] 刘诗军, 胡志晋, 游来光. 碘化银核化过程的数值模拟研究. 气象学报, 2005, 63(1): 30-40.
- [28] 楼小凤, 孙晶, 史月琴, 等. 减弱对流云降水的AgI催化原理的数值模拟研究. 气象学报, 2014, 72(4): 782-793.
- [29] 刘卫国, 陶羽, 党娟, 等. 2014年春季华北两次降水过程的人工增雨催化数值模拟研究. 大气科学, 2016, 40(4): 669-688.
- [30] Li G, Wang Y, Zhang R. Implementation of a two-moment bulk microphysics scheme to the WRF model to investigate aerosol-cloud interaction. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113: D15211.
- [31] DeMott P J. Quantitative descriptions of ice formation mechanisms of silver iodide-type aerosols. *Atmospheric Research*, 1995, 38: 63-99.
- [32] Liu Y, Warner T, Liu Y W, et al. Simultaneous nested modeling from the synoptic scale to the LES scale for wind energy applications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99: 308-319.
- [33] Liu Y, Liu Y, Muñoz-Esparza D, et al. Simulation of flow fields in complex terrain with WRF-LES: Sensitivity assessment of different PBL treatments. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2020, 59: 1481-1501.