

刘香娥,何晖,陈羿辰,等,2023. 北京山区降雪微物理机制及催化影响的数值模拟研究[J]. 气象,49(4):439-453. Liu X E, He H, Chen Y C, et al, 2023. Numerical simulation about the microphysical mechanism and cloud seeding impacts on snowfall in mountain area in Beijing[J]. Meteor Mon, 49(4):439-453(in Chinese).

北京山区降雪微物理机制及催化影响的 数值模拟研究 *

刘香娥^{1,2,3} 何 晖^{1,2,3} 陈羿辰^{1,2,3} 韩晓晨⁴
高 茜^{1,2,3} 王永庆^{1,2,3} 杨 燕^{1,2,3}

1 北京市人工影响天气中心, 北京 100089

2 云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

3 中国气象局华北云降水野外科学试验基地, 北京 101200

4 中国人民解放军 66137 部队, 北京 102200

提 要: 基于观测资料和中尺度数值模式 WRF 对 2019 年 2 月 14 日发生在北京地区的一次典型低涡低槽型降雪系统进行了观测资料分析和数值模拟, 研究了降雪产生的云微物理机制, 探讨了雪的形成过程并进行了人工催化降雪的数值模拟分析。结果表明: 低涡前部暖湿平流带来的水汽和低涡切变线附近强烈的上升运动造成了此次区域性大雪; 雪的凝华增长、雪降落过程中淞附云水继续长大、云冰自动转换为雪、冰晶和雪碰并聚合是此次降雪的主要微物理过程。催化模拟显示, 人工播撒碘化银催化剂之后, 云中产生大量冰晶, 增多的冰晶通过凝华增长、碰并、聚合、淞附等转换成雪的过程增加, 进而造成地面降雪的增加。

关键词: 降雪, 微物理机制, 催化

中图分类号: P48, P457

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.112201

Numerical Simulation About the Microphysical Mechanism and Cloud Seeding Impacts on Snowfall in Mountain Area in Beijing

LIU Xiang'e^{1,2,3} HE Hui^{1,2,3} CHEN Yichen^{1,2,3} HAN Xiaochen⁴
GAO Qian^{1,2,3} WANG Yongqing^{1,2,3} YANG Yan^{1,2,3}

1 Beijing Weather Modification Center, Beijing 100089

2 Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089

3 Field Experiment Base of Cloud and Precipitation Research in North China, CMA, Beijing 101200

4 Unit 66137 of CPLA, Beijing 102200

Abstract: Based on the observational data and the mesoscale numerical model WRF, a typical low-vortex low-trough snowfall system that occurred in Beijing on 14 February 2019 is analyzed and numerically simulated. The microphysical mechanism and formation process of snowfall are discussed, and the numerical simulation of cloud seeding is analyzed. The results show that the water vapor caused by warm and humid advection near the low vortex front and the strong upward movement near the low vortex shear line gave rise to the regional snowfall event. The sublimation growth of snow, the cloud water rimming on falling

* 北京市自然科学基金项目(8222053、8182024)、国家自然科学基金项目(42005078)和北京市科技计划课题(Z221100005222016)共同资助
2022 年 1 月 4 日收稿; 2022 年 11 月 22 日收修定稿

第一作者: 刘香娥, 从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail: lxe3399@163.com

通讯作者: 何晖, 从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail: hehui@bj.cma.gov.cn

snow, the automatic conversion of cloud ice into snow, the ice crystals and snow collisions and aggregation were the main microphysical processes. Seeding simulation shows that after the seeding of silver iodide (AgI), a large number of ice crystals are generated in the cloud, and the increased ice crystals are converted into snow through sublimation growth, collision, aggregation and attachment, etc., which in turn leads to an increase in ground snowfall.

Key words: snowfall, microphysical mechanism, seeding

引 言

气候统计显示华北地区冬季降雪量和降雪日数均有显著减少的趋势(张志富等,2015)。研究降雪过程的微物理机制和人工增雪机制是人工增雪技术的研究基础。为了更好开展冬季气象人影保障服务,借助北京市人工影响天气中心 TOP-ICE 研究计划(Ma et al,2017)对北京地区典型的降雪过程进行云物理机制和人工催化影响研究很有必要(马新成等,2021)。

对冬季降雪天气过程和人工催化的研究,国内外已开展过一些观测和试验(段婧等,2017)。国际上对冬季降雪的人工影响天气试验开始于 20 世纪 60 年代。美国怀俄明人工影响天气试验项目通过运用地面燃烧炉和空中飞机进行冬季地形云随机催化试验,经统计评估作业地区每年冬季人工增雪效果可达 10%~15%(Breed et al,2014);在同地区开展的碘化银催化效果研究试验利用飞机和地面不同波段雷达对催化云和自然云的回波强度、大小粒子数量等进行对比分析,获取了催化物理响应(Pokharel and Geert,2016; Pokharel et al,2017);爱达荷州的冬季地形云催化试验专注于针对冬季降雪云系的空中播撒,获取了云系边界层上方区域对冷云催化剂的云微物理响应,为评估和提高数值模型能力提供了催化后云中冰和降水发展的关键细节(Xue et al,2014;French et al,2018)。相对而言,国内对降雪过程的天气、气候背景等方面的分析更多一些(仪清菊等,1999;赵思雄等,2002;丁一汇等,2008;张迎新等,2007;郭锐等,2012;何娜等,2014;翟亮等,2018;杜佳等,2019;陈双和符娇兰,2021),而对云微物理机制和人工催化降雪云系的分析较少。我国学者研究降雪始于 20 世纪 70 年代。在新疆开展的关于大气冰核和降雪的综合外场试验,获取了对新疆冬季降雪的微结构、凝华-聚并机制以及枝状雪晶碰撞攀附与折裂繁生等微物理现象(陈万

奎,1987;游来光等,1989)。对新疆多次冬季降雪过程的分析认为,北疆人工增雪催化对象主要是无高空强引晶作用的锋下层积云和浅对流、波动、爬坡等动力作用产生的降水带(刘玉宝和游来光,1990)。对祁连山地区降雪云物理过程地形敏感性试验显示,祁连山高大地形对降雪的动力及微物理过程均有较大影响,催化模拟中加入的人工冰晶可引起云中水汽和过冷云水含量减少而冰晶和雪的量值增加(孙晶等,2009a;2009b)。近些年,多样观测仪器如毫米波云雷达、风廓线雷达、粒子谱仪、探空仪、X 波段偏振雷达等观测仪器的协同观测及应用,可以获得降雪的宏观结构以及微物理信息,可以对降雪结构进行精细化探测,初步判断云中一些微物理变化过程并进行降雪量和雪粒子含水量的反演(仲凌志等,2010;杨成芳等,2015;王柳柳等,2017;魏玮等,2019;黄钰等,2020)。

不断改进的数值模式工具的应用,使得对降雪和人工催化过程云微物理机制的模拟和分析也更加细致和深入。Meyers et al(1995)根据云室试验结果建立了碘化银(AgI)催化剂核化的参数化方程并应用于对冬季云系的催化数值模拟,验证了催化后在播种区下游产生了更多的原始冰晶、团聚体和霰以及催化使地面降水的增加。Lin and Bueh(2006)运用 MM5 对华北地区降雪过程的数值模拟分析显示,雪的凝华增长和雪收集云水过程在降雪发展过程中同等重要。增加了冷云催化模块的 WRF 模式也被应用于冬季降雪及催化响应的数值模拟中,结果显示地面烟炉释放的 AgI 粒子主要影响边界层内的云,通过将液态水转化为冰、消耗更多的水汽等最终在地面上产生更多的降水(Xue et al,2013a;2013b;2014;2016;2017;Chu et al,2014)。国内高茜等(2020)对不同天气条件下的山区降雪云系微物理结构和转化机制进行了分析研究,结果显示凝华、淞附和聚并是降雪云系主要的微物理过程。

降雪是云系动力、热力及微物理过程共同作用的结果。山区降雪云系结构和特征复杂,地形迎风

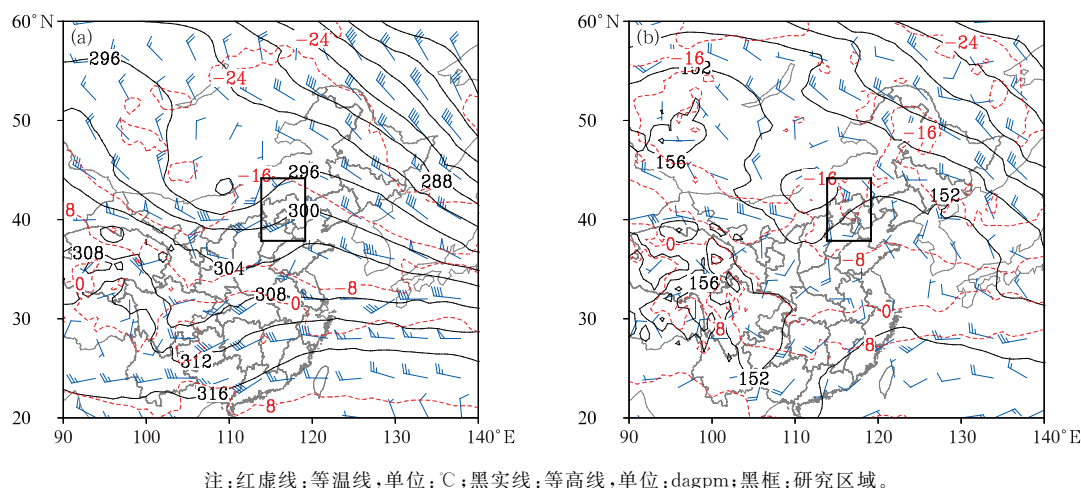
坡气流更容易抬升凝结,云水资源更加丰沛,有较强的增雪潜力。目前对北京山区降雪特征、微物理机制等问题研究得还不够深入,对人工催化影响降雪过程的分析更是缺乏。本文在对云雷达、自动气象站观测资料分析的基础上,运用耦合了冷云催化模块的中尺度数值模式 WRF,对 2019 年 2 月 14 日发生在北京山区的一次典型低涡低槽型降雪过程的宏观结构、降雪形成的微物理机制、人工催化增雪作业的影响和机制等进行了模拟与分析。

1 降雪过程观测分析

1.1 降雪天气形势

本次过程为影响北京降雪的典型天气形势之

一——低涡低槽型降雪。从天气图上(图 1)可以看到,14 日 08 时(北京时,下同),700 hPa 在内蒙古附近有闭合低涡,850 hPa 在该地区存在明显的低涡环流,低涡前有明显的暖平流,涡后为冷平流,前部暖湿平流带来的水汽和低涡切变线附近强烈的上升运动在北京地区造成了区域性降雪。北京海坨山区平均海拔高度高于 1500 m(850 hPa 附近),13 日 20 时北京观象台的探空曲线显示山区上空比较干,湿度不大,在偏南暖湿气流的补充下,至 14 日 08 时,850~500 hPa 变为明显的湿层(图 2),北京西部山区降雪自 06 时开始一直持续至傍晚前后。据北京市气象台 14 日 05—23 时的降水量统计,全市平均降水量为 1.5 mm,城区、西北部、东北部、西南部、东南部平均降水量分别为 0.5、3.8、3.1、0.9、1.0 mm(图 3a)。



注:红虚线:等温线,单位:℃;黑实线:等高线,单位:dagpm;黑框:研究区域。

图 1 2019 年 2 月 14 日 08 时(a)700 hPa 和(b)850 hPa 天气形势图

Fig. 1 The (a) 700 hPa and (b) 850 hPa synoptic charts at 08:00 BT 14 February 2019

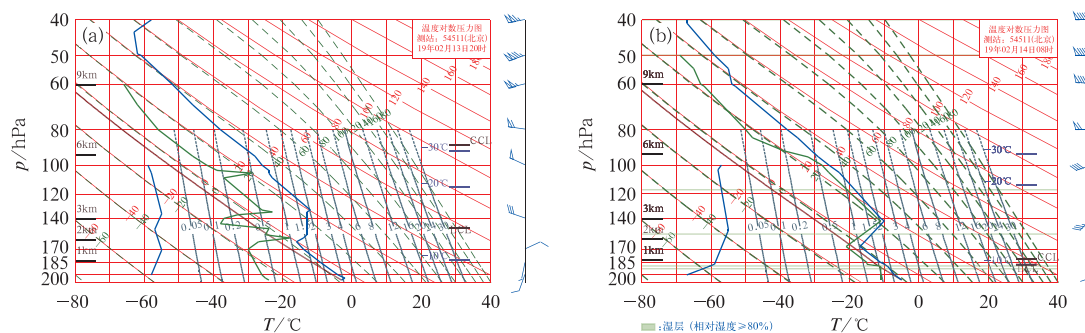
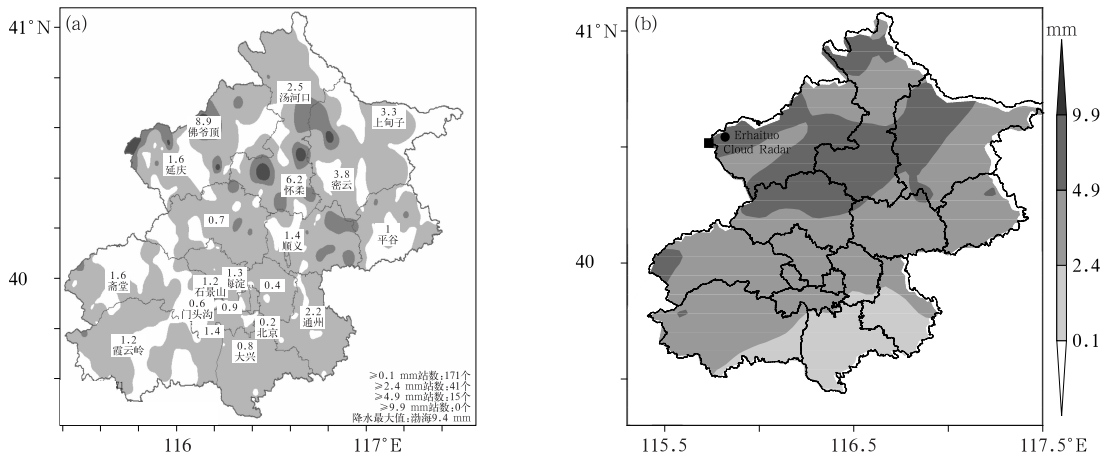


图 2 2019 年 2 月(a)13 日 20 时和(b)14 日 08 时北京站探空曲线图

Fig. 2 Sounding curves of Beijing Station at (a) 20:00 BT 13 and (b) 08:00 BT 14 February 2019



注:图 3b 中黑色方块和圆点分别代表云雷达和二海坨站的位置。

图 3 2019 年 2 月 14 日 08 时至 15 日 08 时(a)观测和(b)模拟的累计降水量

Fig. 3 (a) Observed and (b) simulated accumulated precipitation from 08:00 BT 14 to 08:00 BT 15 February 2019

1.2 气象要素和云雷达回波特征

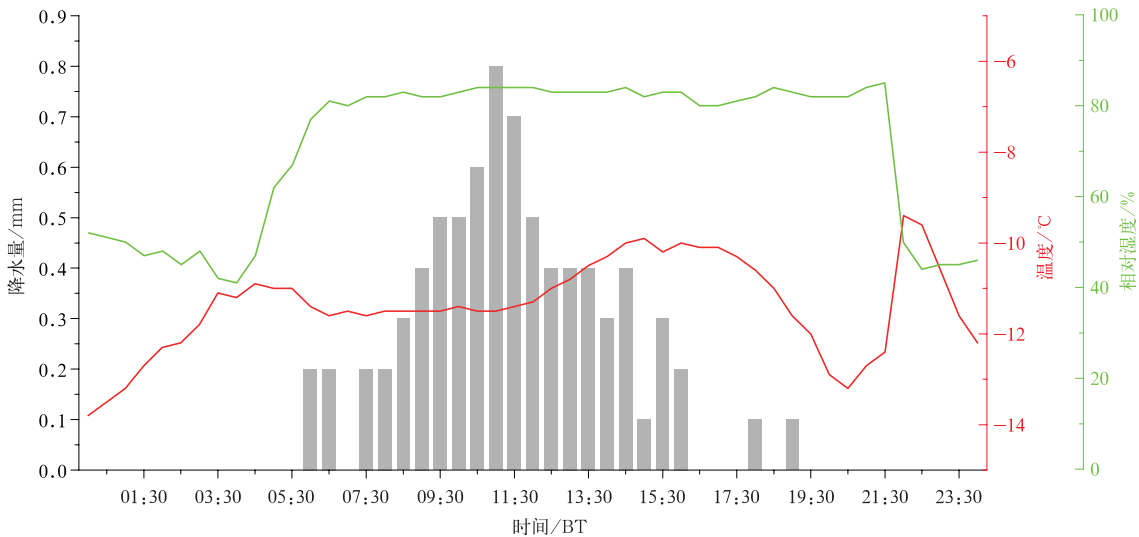
图 4 为闫家坪站气象要素变化,从图中可以看到,14 日凌晨,由于地面风向由北风转为偏南风,偏南风带来的暖湿气流使本站的相对湿度不断增大,增至 80% 以上,而地面温度持续维持在 -15°C 以下,在地形抬升和低温增湿的条件下,06 时后海坨山区开始降雪,逐半小时降水量不断增加,至 11 时的逐半小时降水量大于 0.5 mm,该站过程降水总量为 5.6 mm,达到了大雪量级。附近西大庄科站的总降水量也超过 5 mm,达到了大雪量级(图略)。

云雷达回波显示本次过程云雷达回波最大强度为 20 dBz 左右,在降雪前期雷达回波顶最高达到 6 km 附近,随着降雪的持续,回波基本处于 2 km 以下(图 5)。

2 数值模拟

2.1 模式参数

为了分析降雪过程的微物理机制和后续人工催化的影响,采用耦合了冷云催化模块的中尺度数值



注:柱状:降水量,红线:气温,绿线:相对湿度。

图 4 2019 年 2 月 14 日闫家坪站逐半小时各气象要素时间演变

Fig. 4 Time evolution of various elements at Yanjiaping Station on 14 February 2019

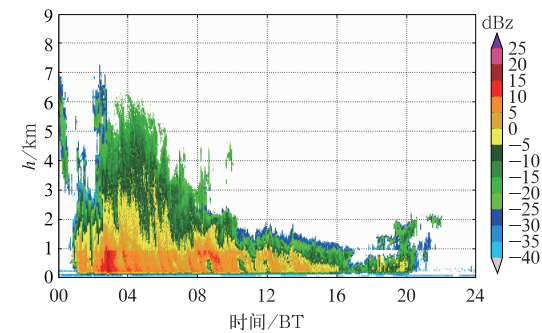


图 5 2019 年 2 月 14 日闫家坪站
云雷达观测回波强度演变
Fig. 5 Time evolution of echo intensity
observed by cloud radar at Yanjiaping Station
on 14 February 2019

模式 WRF3.7.1 对本次过程进行了模拟,该催化模块在 Morrison 双参数微物理方案中加入了催化剂 AgI 的预报方程,可以对人工影响雨、雪的催化过程进行仿真模拟(何晖等,2012;刘香娥等,2016;2021)。模拟的初始场和侧边界条件来自北京城市气象研究院睿图(Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Short Term, RMAPS-ST)的预报场。由于 RMAPS-ST 同化了多种本地观测,其在北京地区的模拟更为准确(刘香娥等,2021;刘郁珏等,2019)。为了研究降雪云系中各水成物的相互转换,增加了模式中各微物理过程源汇项及相关项的输出,加密每 6 分钟输出一次计算结果,模拟采用的相关参数设置如表 1 所示。

表 1 模拟参数设置	
Table 1 Setting of parameters for simulation	
名称	参数设置
初始场	RMAPS-ST 逐 3 小时循环预报的初始时刻结果
水平分辨率	3 km 300×300 网格数
垂直分辨率	50 层,模式顶为 50 hPa
积分时间	2019 年 2 月 13 日 20 时至 15 日 08 时
微物理过程	Morrison 方案
辐射方案	长波辐射:RRTM 方案,短波辐射:Dudhia 方案
积云对流参数化	无
边界层方案	YSU 方案
土壤方案	Noah 方案

2.2 模拟结果与实况对比

图 3 为模拟过程降水量(2 月 14 日 08 时至 15 日 08 时)与实际观测的对比,可以看到,在主要降水落区上,实况降水在北京地区主要有两处,一处位于延庆西北部,主要沿着海坨山区附近,其中佛爷顶最大降水量为 8.9 mm,一处位于昌平北部—怀柔中南部—密云西部的西南向东北延伸的由多个降水中心组成的带状降水区,模式模拟对于这两个主要落区的降水都给出了与实况较为接近的结果,模拟的降水量级也与实际观测吻合;在空间分布上实际降水并没有覆盖北京全境,而模式模拟有一定偏差,模拟降水覆盖北京全境,这可能与模式的相关参数和设置的网格距等有关。

图 6 是长虫沟与二海坨站模拟的半小时降水量与实际观测的对比,可以看到整个降雪过程中,模式对于降水的起止时间、半小时降水量及降水总量都

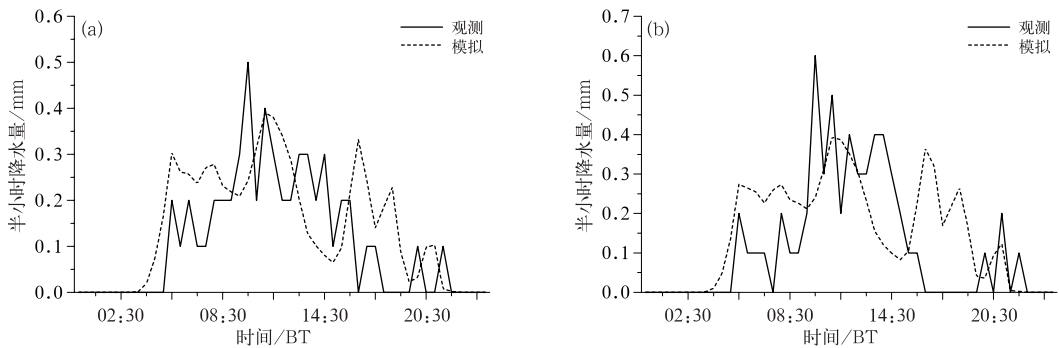


图 6 2019 年 2 月 14 日(a)长虫沟站与(b)二海坨站观测与
模拟逐半小时降水量对比
Fig. 6 The simulated and observed 30-min accumulated precipitation at
(a) Changchonggou and (b) Erhaituo stations on 14 February 2019

给出了与实际观测比较接近的结果。图 7 是模拟的雷达回波与实际观测的回波演变对比,08:30,模拟回波覆盖北京城区,位置基本与实际观测相同覆盖范围稍大,回波强度为 20~30 dBz;09:30,模拟与观测回波东南部范围变小,强度稍有减弱;10:30,观测与模拟回波均演变为近似带状,覆盖昌平延庆上空。整体来看,尽管模拟与观测回波在空间和强度上有一定差异,但两者的发展演变趋势基本一致。

以上模拟效果的对比检验显示,无论是过程降水总量、单站半小时降水量还是整体雷达回波演变,模式模拟均给出了与实际观测比较接近的结果,表明本次模式模拟效果较好,在此基础上,可以用模拟结果对降雪的微物理机制进行深入分析。

2.3 降雪成因机制

图 8 给出海坨山区二海陀站点模拟风场和降水量的时间高度演变,可以看到 14 日 02 时之后,随着 800~550 hPa 风场转向西南风并伴随着风速加大,地面开始产生明显降雪,09 时的半小时最大降水量达到最大(0.4 mm),此后降雪量逐渐减少,12 时左右,750~600 hPa 又出现西南风场的增加,对应降雪量也出现显著增大。至 18 时,整层风场转为偏西

风,降雪趋于结束。Ma et al(2017)曾统计过北京地区 2016 年的多次低涡低槽型降雪,其观测资料分析中也显示山区明显降雪时段与环境风场转向为西南风和风力逐渐增大有一定关系。从本次过程水汽通量(图 9)可以看到,在海坨山区的南侧,由于北京延庆至西部张家口怀来地区的地势相对较低,而南部又为高山阻挡,在南北高地的夹阻之下,存在一条明显的自西向东的水汽输送通道,丰富的水汽进入北京地区之后在南风—西南风的作用下向北部、西北部山区推进,暖湿气流遇地形阻挡抬升会产生凝华凝结增长,可能是造成地面降雪产生的因素之一。

此外注意到,二海坨站降雪主要分为三个阶段(图 8b):03—10 时的显著降雪时段 A,10—12 时的降雪减弱时段 B,12—17 时的明显降雪时段 C。对比低层和中高层的水汽通量(图 9)可以看到,A 时段的降雪对应在 850 hPa 和 700 hPa 有比较丰富的水汽输送,而在降雪减弱时段 B,山区 850 hPa 的水汽输送并不比邻近时段低,但 700 hPa 有明显的减弱,同样在 C 阶段,降雪增加对应着 700 hPa 水汽输送的再次加强,这表明山区明显降雪是整层水汽输送结合动力和热力共同作用的结果。

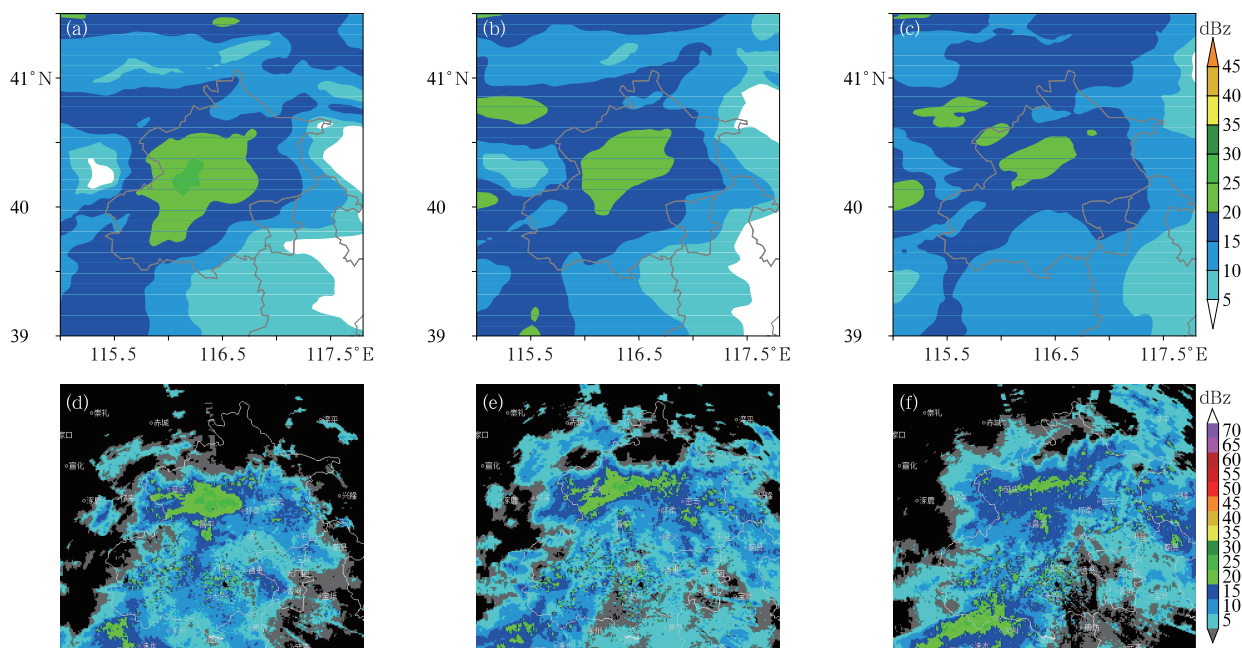


图 7 2019 年 2 月 14 日(a,b,c)模拟雷达回波与(d,e,f)实际雷达回波

(a,d)08:30,(b,e)09:30,(c,f)10:30

Fig.7 (a, b, c) Simulated and (d, e, f) observed radar echoes at

(a, d) 08:30 BT, (b, e) 09:30 BT, and (c, f) 10:30 BT 14 February 2019

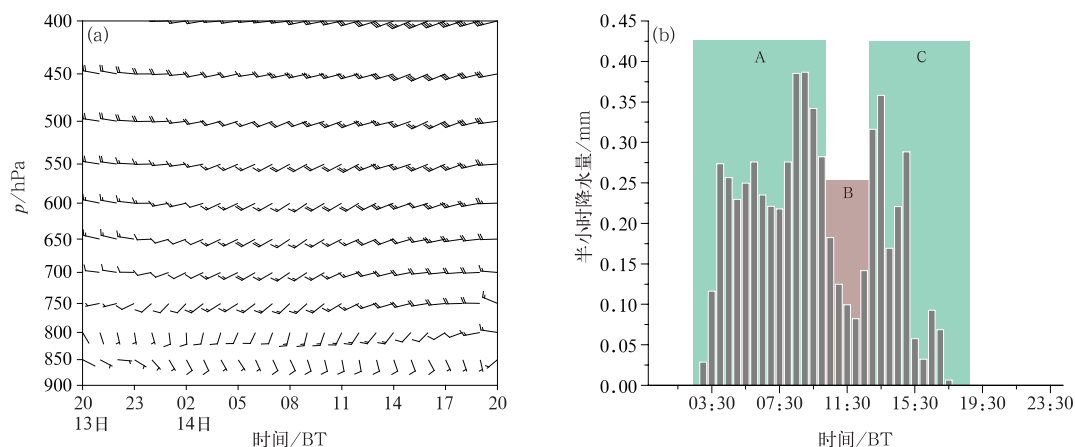


图8 2019年2月(a)13日20时至14日20时二海坨站风场和(b)14日半小时降水量时序图

Fig. 8 Evolution of (a) wind from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14 February and (b) precipitation at Erhaituo Station on 14 February 2019

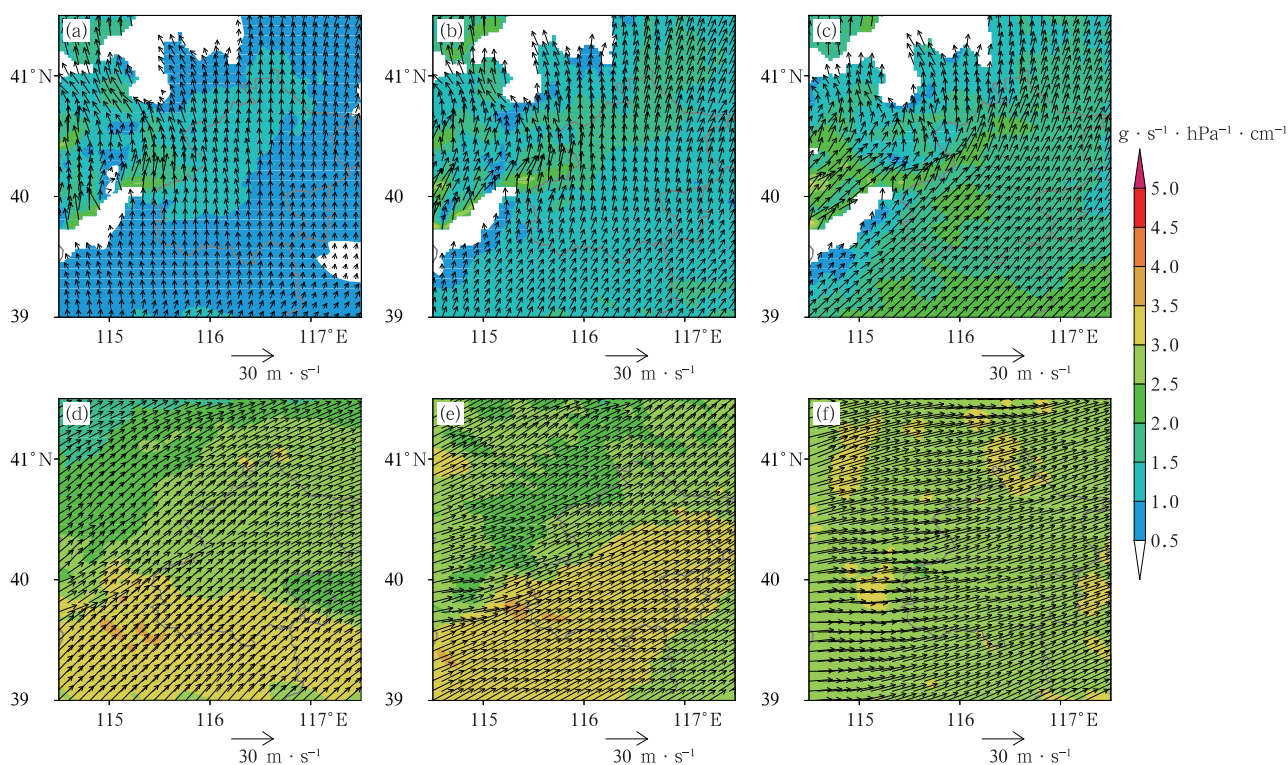


图9 2019年2月14日(a,b,c)850 hPa和(d,e,f)700 hPa水汽通量(填色)和风场(风矢)分布 (a,d)07时,(b,e)11时,(c,f)15时

Fig. 9 Distribution of water vapor flux (colored) and wind field (wind vector) at (a, b, c) 850 hPa and (d, e, f) 700 hPa at (a, d) 07:00 BT, (b, e) 11:00 BT and (c, f) 15:00 BT 14 February 2019

图10给出以二海坨站为代表的山区(邻近 2×3 格点区域)附近雨、雪、霰、云水和水汽比质量的区域格点几何平均值随时间和高度的演变。图中,04、09和16时附近,在山区上空500~300 hPa存在一定量的冰晶,最大比质量均高于 $0.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;对

应中低层为三个雪的比质量高值区,大值中心超过 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,同时700 hPa附近水汽的比含量高于 $1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;由这种水成物的高低层配置可以推测,冰晶在中高层可通过自动转换、凝华等过程而长大,一定程度后下落,在下落过程中通过与其他粒

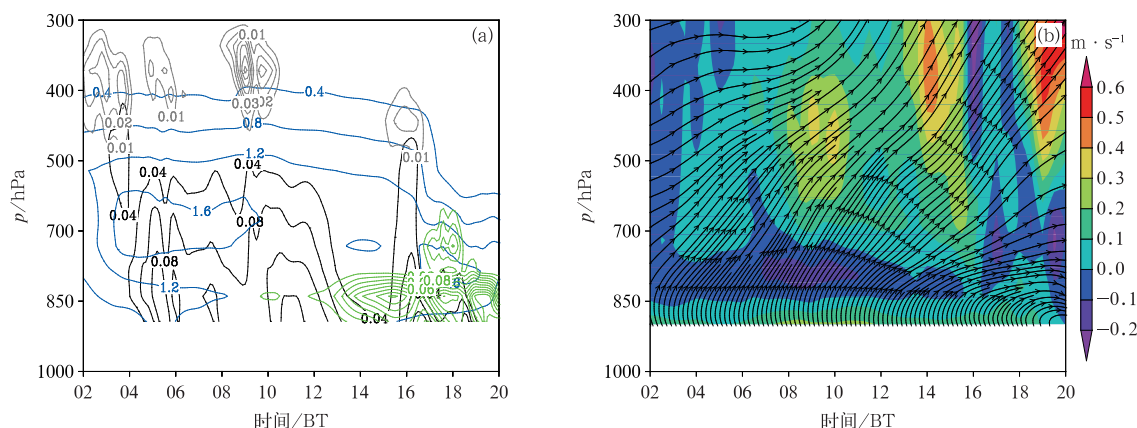


图 10 2019 年 2 月 14 日海坨山区(a)水成物含量区域几何平均值(黑线:雪,蓝线:水汽,灰线:冰晶,绿线:云水,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和(b)风场、垂直气流(填色:垂直速度)随时间和高度的分布

Fig. 10 Distributions of (a) geometric mean of water content (black line: snow, blue line: water vapor, grey line: ice, green line: cloud water, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), and (b) wind and vertical velocity (colored) with time and height in Haituo Mountain on 14 February 2019

子碰并、聚合等过程长大为雪花降落至地面,可能是地面形成降雪的机制之一。此外图中显示,白天至夜间在 850 hPa 附近有一定量的云水,最大比质量高于 $0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,此时云中存在弱的上升气流(图 10b),马新成等(2021)对本次过程的观测分析显示,该过冷云水可能主要来自地形云的贡献,与地形云不断爬升有关。高空掉落的冰晶和雪经过过冷云水区发生淞附过程继续长大,这可能也是地面产

生降雪的另一重要微物理过程。由于霰和雨水的含量非常低,在图中未有显示。

降雪的产生是云系动力、热力和不同微物理过程共同作用的结果,为了分析不同微物理过程的贡献,以这些过程的产生率为特征量对雪的源汇项进行分析。由于有的转换过程非常微弱,如雪的融化、蒸发、被雨滴收集、冰晶雨滴碰并成雪等,这些过程在图中未有体现。图 11 是与雪的产生相关的主要

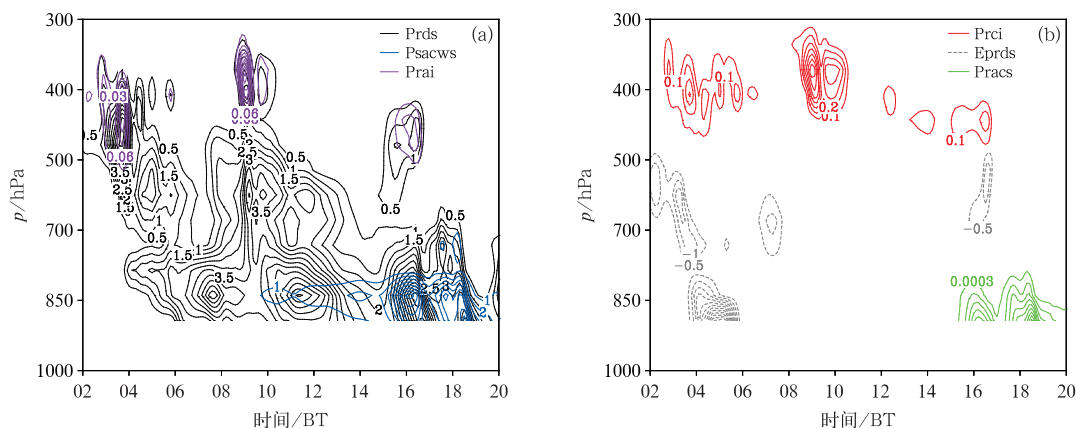


图 11 2019 年 2 月 14 日海坨山区与雪相关的主要微物理过程转换率随时间和高度演变(单位: $10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) Prds(黑线,水汽凝华成雪),Psacws(蓝线,雪淞附云滴),Prai(紫线,冰晶聚合成雪);
(b) Prci(红线,冰晶自动转换为雪),Eprds(灰虚线,雪晶升华),Pracs(绿线,雪收集雨水)

Fig. 11 Time-height evolution of the main microphysical processes conversion rate associated with snow in Haituo Mountain on 14 February 2019 (unit: $10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) Prds (black line, condensation of water vapor into snow), Psacws (blue line, droplet accretion by snow), Prai (purple line, coalescence of ice crystals into snow),
(b) Prci (red line, autoconversion of ice crystals into snow),
Eprds (grey dashed line, sublimation of snow), Pracs (green line, rain-snow collection)

微物理过程区域格点几何平均转换率随时间和高度的分布,图中可以看到,雪的凝华增长过程比较显著,从02时一直持续贯穿整个降雪时段,并且从低层一直到400 hPa高空都有凝华过程的存在,雪的凝华增长产生率量级和数值也比其他过程大,因此凝华增长是本次降雪过程雪的最主要源项之一,这与马新成等(2021)针对本次过程的地面观测分析得到的机制相一致。中午至夜间,在850 hPa附近有一定量的过冷云水,对应有雪淞附云滴的过程,从产生率的量级来看,该过程与凝华增长量级相当,数值略低,因此,在低层雪淞附云滴增长是本次降雪过程雪的另一主要源项。此外,高空存在一定数量的冰晶,对应有冰晶自动转换为雪的过程和雪收集冰晶的过程,这两个过程作为雪的高空源项,产生率相对要低一些。在有些时段的不同高度处也存在雪的升华过程。

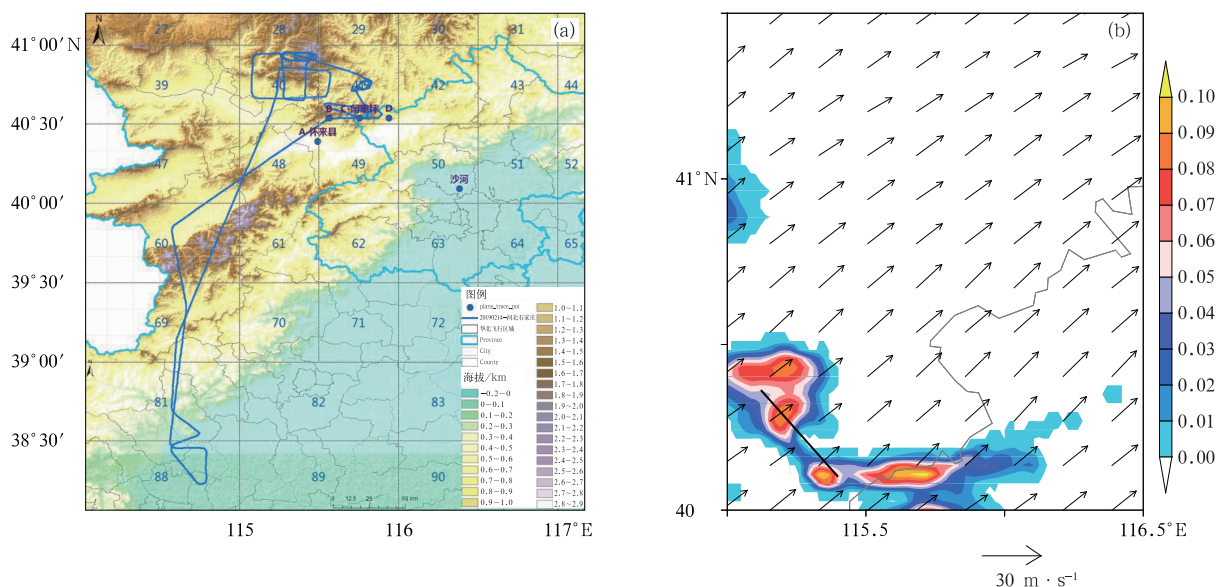
3 人工增雪的催化模拟及机制

针对本次降雪过程,北京联合河北开展了人工增雪作业。参照实际飞机作业情况,对本次过程进行了催化数值模拟,并分析人工催化对降雪微物理

过程的影响。

3.1 催化数值模拟

2月14日空中国王B3523飞机在河北崇礼地区开展了一架次的增雪作业,作业高度为3.9 km,作业区温度约为 -17°C ,总共作业AgI烟条36根,总剂量为972 g,飞行轨迹如图12a所示。模拟结果显示,14日09时,北京西部山区在实际作业区域偏南约50 km上空4 km高度附近存在一定的过冷云水,该高度处的温度约为 -18°C ,过冷水含量最大为 $0.08\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,具有冷云催化潜力。模式中在该过冷水区域加入了与实际作业剂量(972 g)相同的飞机播撒作业,播撒自09时开始,持续半小时作业结束。图13给出了飞机播撒后,催化与控制试验云中冰晶数浓度之差在水平方向上的分布,可以看到,催化与控制试验冰晶数浓度之差的影响范围逐渐扩大并向下游扩散。图14、图15为催化开始后36分钟和96分钟时自然累计降水量、6分钟雨强以及二者催化与控制试验的差值分布,可以看出,作业后作业区域下游降水量显著增加,增加区域随着时间推移逐步向下游扩散,其中长虫沟和二海坨站在作业开



注:图12a中,彩色底图为地形高度;图12b中,黑线为模拟催化位置。

图12 2019年2月14日(a)飞机飞行轨迹(蓝线)和(b)模拟的09时4 km高度处的云水(填色,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、风场(风矢)

Fig. 12 (a) Flight track (blue line) on 14 February 2019, and

(b) simulated cloud water (colored, unit: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) and wind field (wind vector)

at 4 km height (black line; the simulated seeding position) at 09:00 BT 14 February 2019

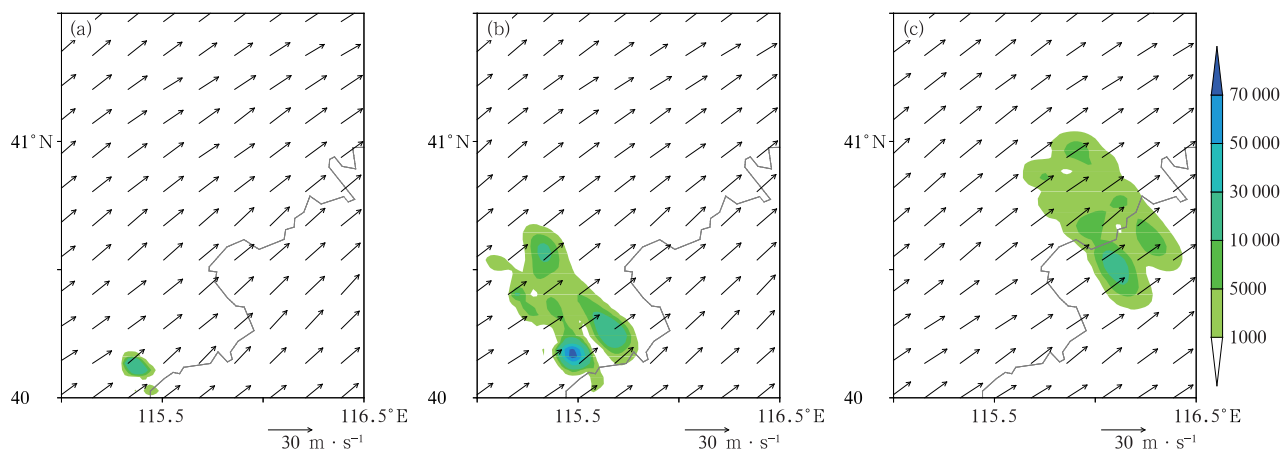
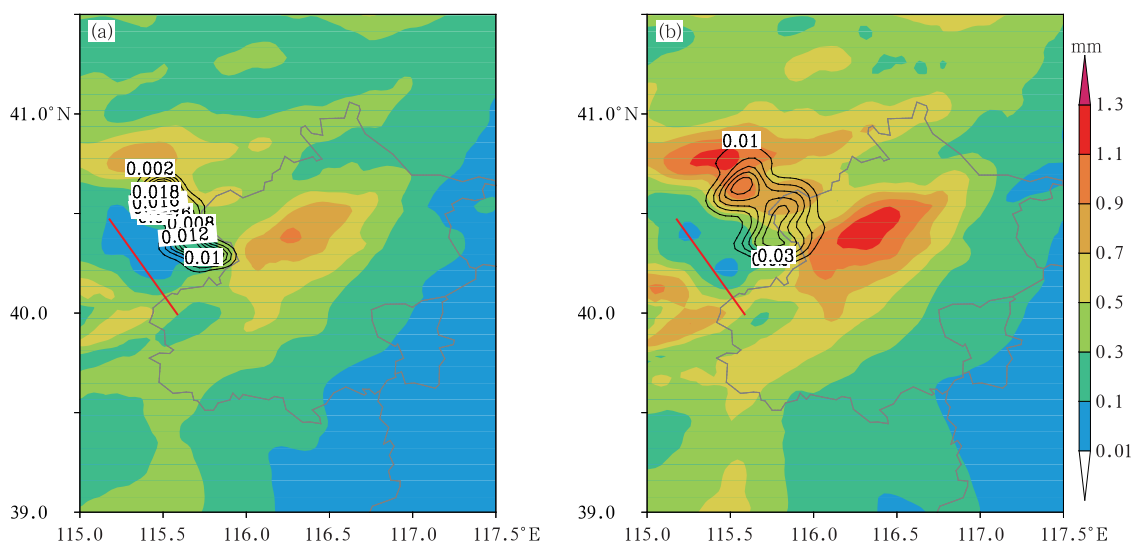


图 13 2019 年 2 月 14 日(a)09:06,(b)09:36,(c)10:36 600 hPa 高度处

催化与控制试验风场(风矢)和冰晶数浓度(填色,单位:个·kg⁻¹)的差异分布

Fig. 13 Difference distribution of wind (wind vector) and number concentration (colored, unit: kg⁻¹) between seeding and control test at 600 hPa at (a) 09:06 BT, (b) 09:36 BT and (c) 10:36 BT 14 February 2019



注:红线:模拟催化位置,下同。

图 14 2019 年 2 月 14 日(a)10:06(催化开始后 66 分钟),(b)10:36(催化开始后 96 分钟)

地面自然累计降水量(填色)、催化与控制试验累计降水量差(等值线)

Fig. 14 The natural accumulated precipitation (colored) on surface and the accumulated precipitation difference between seeding and control experiments (contour) at (a) 10:06 BT (66 min after seeding) and (b) 10:36 BT (96 min after seeding) 14 February 2019

始 1 小时左右降水量开始增加,在作业开始后 2 小时增加效果最为显著,之后有稍微减弱,在作业开始后 3 小时作业影响基本消失,总体降水量显著增加(图 16)。

3.2 催化微物理机制

为检验整体云系由于催化作用对云微物理过程

产生的影响,给出催化后模拟区域内三相水成物(气相:水汽,固相:冰晶、雪和霰,液相:云水和雨)各自的总量与控制试验之差随时间的演变,如图 17 所示。可以看到,在催化结束至其后的 3 小时内,整体云系的液态水和水汽含量减少,而固态水成物增加。由此可推断,人工催化加入 AgI 之后,通过核化形成大量冰晶,增多的冰晶通过贝吉隆过程、凝华增长

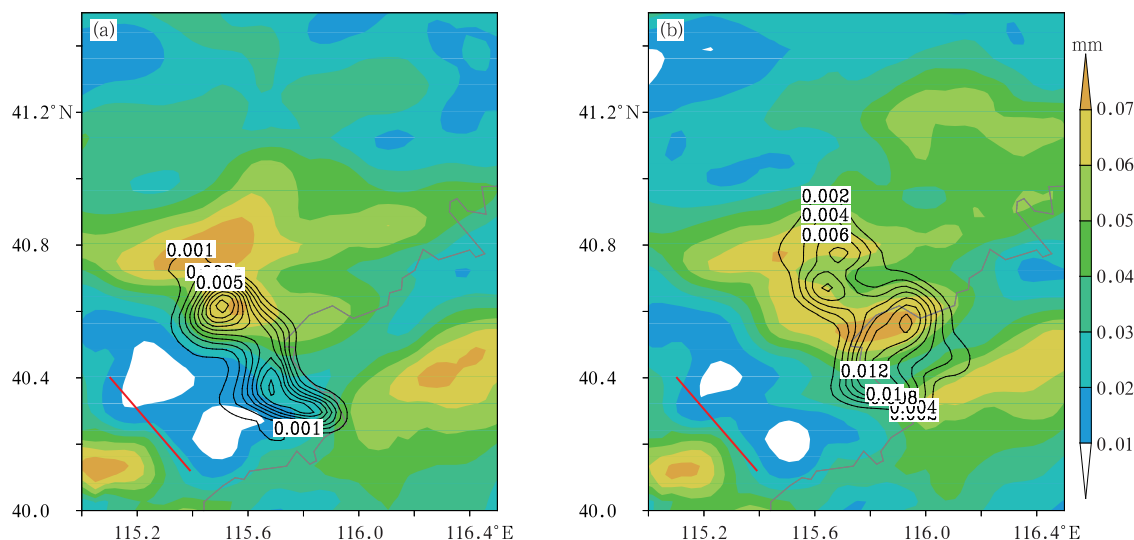


图 15 2019 年 2 月 14 日(a)10:06(催化开始后 66 分钟), (b)10:36(催化开始后 96 分钟)的自然 6 分钟降水量(填色)、催化与自然 6 分钟降水量之差(等值线)

Fig. 15 The 6 min natural precipitation (colored) and 6 min precipitation difference between seeding and natural rainfall (contour) at (a) 10:06 BT (66 min after seeding) and (b) 10:36 BT (96 min after seeding) 14 February 2019

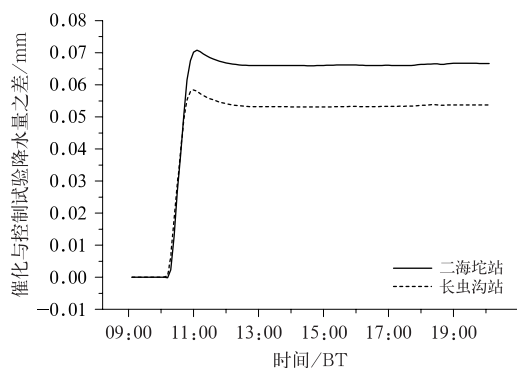


图 16 2019 年 2 月 14 日长虫沟和二海坨站催化与控制试验 6 分钟降水量之差时间演变

Fig. 16 Time evolution of the 6 min precipitation difference between seeding and control experiments at Changchonggou and Erhaituo stations on 14 February 2019

和淞附过程等消耗水汽和液态水得以继续长大,最终降落到地面导致降雪量的增加。从催化云系的三相变化值来看,水汽的消耗明显高于液相云水和雨水的变化,因此催化过程地面降雪的增加主要来自空中水汽的消耗。

选择典型时刻分析催化后各微物理过程的变化。图 18 给出了 10:06 沿图 15a 中 $40^{\circ} \sim 41^{\circ} \text{N}$ 、

115.8°E 范围内垂直方向上各水成物的自然量和催化与自然量之差的分布,可以看到,在该时刻催化剂 AgI 在垂直方向上主要位于 $700 \sim 500 \text{ hPa}$, 水平覆盖 $40.3^{\circ} \sim 40.7^{\circ} \text{N}$ (图 18a), 对应在基本相同的位置,水汽与云水的质量浓度有所减小(图 18c, 18d),相比控制试验二者分别减少约 2% 和 90%,而冰晶的质量浓度和数浓度显著增加(图 18b, 18h),由于播撒位置处自然冰晶数浓度很小,人工播撒成冰剂之后,在适宜的温度和环境条件下,通过水汽凝华与冻结核化等过程,消耗水汽与云水,增加了大量冰晶,相比较控制试验,冰晶的最大质量浓度和数浓度均有上百倍的增加;因为云水的减少,云水转化成雨水过程以及冰晶淞附过程减弱,导致雨水和霰也都

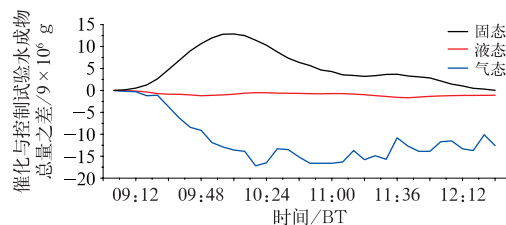


图 17 2019 年 2 月 14 日催化与控制试验三相水成物总量之差的时间演变

Fig. 17 Time evolution of the total amount of three-phase hydrometeors between seeding and control experiments on 14 February 2019

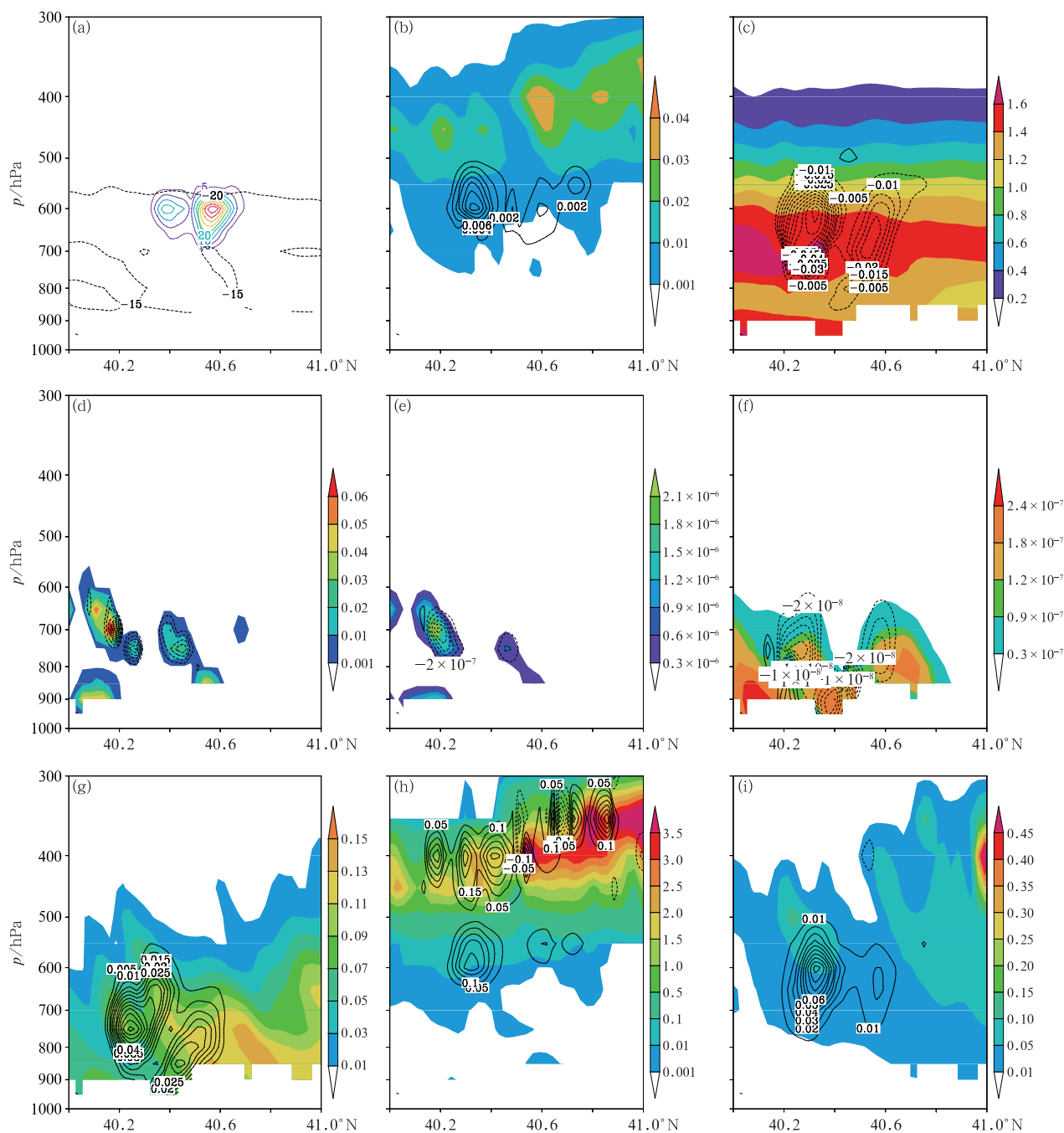


图 18 2019 年 2 月 14 日沿图 15a 中 115.8°E 水成物催化与自然量之差(等值线)和自然量(填色)的垂直剖面

(a) AgI 质量浓度(单位: $10^{-11} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (b) 冰晶质量浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

(c) 水汽质量浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) 云水质量浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

(e) 雨水质量浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (f) 霰质量浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

(g) 雪质量浓度(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (h) 冰晶数浓度(单位: $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$), (i) 雪数浓度(单位: $\text{个} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig. 18 The vertical sections of the hydrometeors difference between seeding and natural quantity (contour) and the natural quantity (colored) along 115.8°E in Fig. 15a on 14 February 2019

(a) AgI mixing ratio (unit: $10^{-11} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (b) ice crystal mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

(c) water vapor mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (d) cloud water mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

(e) cloud rain water mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (f) graupel mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),

(g) snow mixing ratio (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), (h) ice crystal number concentration (unit: L^{-1}),

(i) snow number concentration (unit: L^{-1})

有一定量的减少(图 18e,18f),冰晶的大量增加导致冰晶聚并成雪晶过程增强,雪的质量浓度和数浓度均有明显增加(图 18g,18i),相比控制试验二者分别增加约 60%和 240%。云中播撒 AgI 导致冰晶化过程释放的凝华和冻结潜热使催化试验中 700 hPa 附近有显著的正温区,增加了云体的上升气流速度(图略),在一定程度上也加强了云的发展。

4 结论与讨论

本文基于观测,运用中尺度数值模式 WRF 对 2019 年 2 月 14 日发生在北京地区的一次典型低涡低槽型降雪进行了数值模拟,分析了降雪产生的云微物理机制,探讨了雪的源汇项贡献;基于实际人影飞机催化作业信息对催化增雪的机制进行了模拟与分析,得到以下主要结论:

(1)本次过程为北京地区典型的低涡低槽型降雪。低涡前部暖湿平流带来的水汽和低涡切变线附近强烈的上升运动造成了北京地区的区域性大雪。本次降雪过程云雷达回波总体强度和回波顶高度等符合北京地区低涡低槽型降雪云雷达回波的基本特征。

(2)模拟结果及雪的源汇项微物理过程分析显示,本次降雪过程降雪量的增加与近地面风向转为西南风并逐渐加厚有一定关系。雪的凝华增长、雪淞附云水继续长大、云冰自动转换为雪和冰晶和雪碰并聚合是此次降雪的主要微物理过程。

(3)仿真催化数值模拟显示,加入冷云催化剂 AgI 之后,整体云系的水汽和液态水含量相对于控制试验有所减少,而固态水成物增加,水汽的消耗最为明显。分析增雪机制可知,人工催化之后,水汽在人工冰核上凝华产生大量冰晶,增多的冰晶通过凝华增长、碰并、聚合、淞附等过程继续消耗水汽与过冷云水,冰晶转换成雪的过程增加,空中雪的质量浓度和数浓度增加,最终导致地面降雪增加,本次人工催化作业起到了地面增雪的效果。

本文只针对北京地区一次低涡低槽型降雪的微物理机制及催化影响进行了分析,对于发生在不同天气背景下的降雪过程,其微物理机制及人工催化的影响效果可能不同,有待于进一步的研究,此外针对冬季降雪的人工影响催化作业潜力还有待于进一步挖掘和分析。

参考文献

- 陈双,符娇兰,2021. 华北地区雪密度不同的两次降雪过程对比分析[J]. 气象,47(1):36-48. Chen S, Fu J L, 2021. Comparative analysis of two snow events with different snow density in North China[J]. Meteor Mon,47(1):36-48(in Chinese).
- 陈万奎,1987. 枝状雪晶碰撞攀附与折裂繁生[J]. 应用气象学报,2(1):74-80. Chen W K, 1987. The multiplication generated by dendritic snow crystals collision and aggregation[J]. J Appl Meteor Sci,2(1):74-80(in Chinese).
- 丁一汇,王遵娅,宋亚芳,等,2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系[J]. 气象学报,66(5):808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al, 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteor Sin,66(5):808-825(in Chinese).
- 杜佳,杨成芳,戴翼,等,2019. 北京地区 4 月一次罕见暴雪的形成机制分析[J]. 气象,45(10):1363-1374. Du J, Yang C F, Dai Y, et al, 2019. Formation mechanism of an infrequent blizzard in Beijing in April[J]. Meteor Mon, 45(10):1363-1374(in Chinese).
- 段婧,楼小凤,卢广献,等,2017. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象,43(12):1562-1571. Duan J, Lou X F, Lu G X, et al, 2017. International recent progress in weather modification technologies[J]. Meteor Mon,43(12):1562-1571(in Chinese).
- 高茜,郭学良,刘香娥,等,2020. 北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测-模拟研究[J]. 大气科学,44(2):407-420. Gao Q, Guo X L, Liu X E, et al, 2020. Numerical simulation and observation study on microphysical formation processes of two different snowfall cases in northern mountain area of Beijing[J]. Chin J Atmos Sci,44(2):407-420(in Chinese).
- 郭锐,张琳娜,李靖,等,2012. 2010 年冬季北京初雪预报难点分析[J]. 气象,38(7):858-867. Guo R, Zhang L N, Li J, et al, 2012. Analysis of forecast difficulties for the first snow of Beijing Area in 2010 winter[J]. Meteor Mon,38(7):858-867(in Chinese).
- 何晖,金华,李宏宇,等,2012. 2008 年奥运会开幕式日人工消减雨作业中尺度数值模拟的初步结果[J]. 气候与环境研究,17(1):46-58. He H, Jin H, Li H Y, et al, 2012. Preliminary study of the mesoscale numerical simulation of the rain mitigation operation during the opening ceremony of the 2008 Beijing Olympic Games[J]. Climatic Environ Res,17(1):46-58(in Chinese).
- 何娜,孙继松,王国荣,等,2014. 北京地区预报失误的两次降雪过程分析[J]. 气象科技,42(3):488-495. He N, Sun J S, Wang G R, et al, 2014. Analysis of unsuccessful forecasting for two snowfall processes in Beijing[J]. Meteor Sci Technol,42(3):488-495(in Chinese).
- 黄钰,郭学良,毕凯,等,2020. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J]. 大气科学,44(2):356-370. Huang Y, Guo X L, Bi K, et al, 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain Area in Beijing[J]. Chin J Atmos

- Sci, 44(2):356-370(in Chinese).
- 刘香娥, 高茜, 何晖, 等, 2016. 碘化银冷云催化的数值模拟研究[J]. 气象, 42(3):347-355. Liu X E, Gao Q, He H, et al, 2016. Numerical simulation research on silver iodide cold cloud seeding [J]. Meteor Mon, 42(3):347-355(in Chinese).
- 刘香娥, 何晖, 高茜, 等, 2021. 中尺度碘化银催化数值模式在人工影响天气业务中的应用试验[J]. 气象学报, 79(2):359-368. Liu X E, He H, Gao Q, et al, 2021. Research on application of the mesoscale silver iodide seeding numerical model[J]. Acta Meteor Sin, 79(2):359-368(in Chinese).
- 刘玉宝, 游来光, 1990. 北疆冬季降水的中小尺度结构与人工增水作业潜力和自然条件探讨[J]. 应用气象学报, 1(2):113-122. Liu Y B, You L G, 1990. The meso-and small-scale structure and potential for cloud seeding of wintertime snowfall in the Zhungeer Basin[J]. Quart J Appl Meteor, 1(2):113-122(in Chinese).
- 刘郁珏, 苗世光, 刘磊, 等, 2019. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响[J]. 应用气象学报, 30(1):70-81. Liu Y J, Miao S G, Liu L, et al, 2019. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain[J]. J Appl Meteor Sci, 30(1):70-81(in Chinese).
- 马新成, 董晓波, 毕凯, 等, 2021. 北京海坨山区低槽降雪云系演变特征的观测研究[J]. 气象学报, 79(3):428-442. Ma X C, Dong X B, Bi K, et al, 2021. The characteristics and evolution of low trough snowfall cloud system in the Haituo Mountain, Beijing [J]. Acta Meteor Sin, 79(3):428-442(in Chinese).
- 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 2009a. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(I):降雪过程和地形影响[J]. 高原气象, 28(3):485-495. Sun J, Lou X F, Hu Z J, 2009a. Numerical simulation of snowfall in winter of Qilian Mountains. Part(I): snowfall process and orographic influence[J]. Plateau Meteor, 28(3):485-495(in Chinese).
- 孙晶, 楼小凤, 史月琴, 等, 2009b. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(II):人工催化试验[J]. 高原气象, 28(3):496-506. Sun J, Lou X F, Shi Y Q, et al, 2009b. Numerical simulation of snowfall in winter of Qilian Mountains. Part(II): seeding test[J]. Plateau Meteor, 28(3):496-506(in Chinese).
- 王柳柳, 刘黎平, 余继周, 等, 2017. 毫米波云雷达冻雨-降雪微物理和动力特征分析[J]. 气象, 43(12):1473-1486. Wang L L, Liu L P, Yu J Z, et al, 2017. Microphysics and dynamic characteristic analysis of freezing rain and snow observed by millimeter-wave radar[J]. Meteor Mon, 43(12):1473-1486(in Chinese).
- 魏玮, 刘黎平, 吴翀, 等, 2019. 杭州“12·05”降雪天气过程的偏振雷达观测分析[J]. 气象, 45(9):1248-1261. Wei W, Liu L P, Wu C, et al, 2019. Analysis of dual-polarization radar observation during the 5 December 2015 snowfall process in Hangzhou[J]. Meteor Mon, 45(9):1248-1261(in Chinese).
- 杨成芳, 周淑玲, 刘畅, 等, 2015. 一次入海气旋局地暴雪的结构演变及成因观测分析[J]. 气象学报, 73(6):1039-1051. Yang C F, Zhou S L, Liu C, et al, 2015. Case study of the cause and the dynamic structure for a small-scale snowstorm event associated with a cyclone[J]. Acta Meteor Sin, 73(6):1039-1051(in Chinese).
- 仪清菊, 刘延英, 许晨海, 1999. 北京 1980—1994 年降雪的天气气候分析[J]. 应用气象学报, 10(2):249-254. Yi Q J, Liu Y Y, Xu C H, 1999. Synoptical and climatological analysis of snowfall from 1980 to 1994 in Beijing Area[J]. Quart J Appl Meteor, 10(2):249-254(in Chinese).
- 游来光, 王守荣, 王鼎丰, 等, 1989. 新疆冬季降雪微结构及其增长过程的初步研究[J]. 气象学报, 47(1):73-81. You L G, Wang S R, Wang D F, et al, 1989. The microphysical structure of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang[J]. Acta Meteor Sin, 47(1):73-81(in Chinese).
- 翟亮, 郭淳薇, 马新成, 等, 2018. 北京 2016 年“11·20”初雪预报偏差分析[J]. 气象, 44(1):151-158. Zhai L, Guo C W, Ma X C, et al, 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016[J]. Meteor Mon, 44(1):151-158(in Chinese).
- 张迎新, 侯瑞钦, 张守保, 2007. 回流暴雪过程的诊断分析和数值试验[J]. 气象, 33(9):25-32. Zhang Y X, Hou R Q, Zhang S B, 2007. Numerical experiments and diagnosis on a heavy snow of return-flow events[J]. Meteor Mon, 33(9):25-32(in Chinese).
- 张志富, 希爽, 刘娜, 等, 2015. 1961-2012 年中国降雪时空变化特征分析[J]. 资源科学, 37(9):1765-1773. Zhang Z F, Xi S, Liu N, et al, 2015. Snowfall change characteristics in China from 1961 to 2012[J]. Res Sci, 37(9):1765-1773(in Chinese).
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等, 2002. 北京“12.7”降雪过程的分析研究[J]. 气候与环境研究, 7(1):7-21. Zhao S X, Sun J H, Chen H, et al, 2002. A study on snowfall in Beijing on 7 December 2001 [J]. Climatic Environ Res, 7(1):7-21(in Chinese).
- 仲凌志, 刘黎平, 陈林, 等, 2010. 星载毫米波测云雷达在研究冰雪天气形成的云物理机制方面的应用潜力[J]. 气象学报, 68(5):705-716. Zhong L Z, Liu L P, Chen L, et al, 2010. A potential application of a millimeter-wavelength radar to studying the cloud physics mechanism for ice and snow weather[J]. Acta Meteor Sin, 68(5):705-716(in Chinese).
- Breed D, Rasmussen R, Weeks C, et al, 2014. Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(2):282-299.
- Chu X, Xue L L, Geerts B, et al, 2014. A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part I: observations and model validations[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(10):2264-2286.
- French J R, Friedrich K, Tessendorf S A, et al, 2018. Precipitation formation from orographic cloud seeding[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 115(6):1168-1173.
- Lin W S, Bueh C, 2006. The cloud processes of a simulated moderate snowfall event in North China[J]. Adv Atmos Sci, 23(2):235-242.
- Ma X C, Bi K, Chen Y B, et al, 2017. Characteristics of winter clouds and precipitation over the mountains of Northern Beijing[J]. Adv Meteor, 2017:3536107.

- Meyers M P, Demott P J, Cotton W R, 1995. A comparison of seeded and nonseeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model[J]. *J Appl Meteor*, 34: 834-846.
- Pokharel B, Geerts B, 2016. A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part I: project description[J]. *Atmos Res*, 182: 269-281.
- Pokharel B, Geerts B, Jing X Q, et al, 2017. A multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part II: seeding impact analysis[J]. *Atmos Res*, 183: 42-57.
- Xue L L, Chu X, Rasmussen R, et al, 2014. The dispersion of silver iodide particles from ground-based generators over complex terrain. Part II: WRF large-eddy simulations versus observations[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 53(6): 1342-1361.
- Xue L L, Chu X, Rasmussen R, et al, 2016. A case study of radar observations and WRF LES simulations of the impact of ground-based glaciogenic seeding on orographic clouds and precipitation. Part II: AgI dispersion and seeding signals simulated by WRF[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 55(2): 445-464.
- Xue L L, Edwards R, Huggins A, et al, 2017. WRF large-eddy simulations of chemical tracer deposition and seeding effect over complex terrain from ground- and aircraft-based AgI generators[J]. *Atmos Res*, 190: 89-103.
- Xue L L, Hashimoto A, Masataka M, et al, 2013a. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part I: model description and idealized 2D sensitivity tests[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(6): 1433-1457.
- Xue L L, Tenssendorf S A, Nelson E, et al, 2013b. Implementation of a silver iodide cloud-seeding parameterization in WRF. Part II: 3D simulations of actual seeding events and sensitivity tests[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 52(6): 1458-1476.

(本文责编:戴洋)