

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

高茜^{1,2,3,4,5} 郭学良¹ 刘香娥^{2,3,5} 何晖^{2,3,5}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

3 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

4 中国科学院大学, 北京 100049

5 云降水物理研究与云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

摘要: 降雪是北京冬季的重要降水天气过程, 但目前对实例降雪形成的微物理机制的观测-模拟研究较少。本文利用中尺度 WRF 模式结合外场观测资料, 对北京 2015 年 1 月 24 日和 11 月 5-6 日两次不同天气条件下的山区降雪云系的微物理结构特征及降雪形成的微物理转化机制进行了分析研究, 定量比较了云中水凝物含量的比例和降雪形成机制的差异。研究结果表明: (1) 由于两次降雪过程的天气形势和水汽输送有较大差异, 导致降雪形成的微物理转化机制也出现较大差异。11 月 5 日降雪第一阶段水汽输送较强, 云中过冷水含量较高, 降雪形成以凝华增长和淞附增长为主, 地面表现为雨夹雪天气, 而 1 月 24 日和 11 月 5-6 日第二阶段水汽输送弱, 降雪形成以凝华增长和聚并增长为主, 地面表现为纯降雪天气; (2) 11 月 5 日的雨夹雪天气过程中, 云中不仅有冰晶 (9%)、雪晶 (72%), 还有云水 (6%) 和雨水 (12%) 的存在, 高层生成的雪胚在下落过程中主要通过凝华 (78%) 和淞附 (20%) 过程增长。而 1 月 24 日与 11 月 5-6 日第二阶段的纯降雪过程中, 云中水凝物分布相似, 以冰晶和雪晶为主, 1 月 24 日冰晶含量占 28%, 雪晶含量占 72%; 11 月 6 日冰晶含量占 11%, 雪晶含量占 88%, 冰粒子主要分布在高层。首先高层 6-12km 通过云冰转换生成的雪胚下落到低层水汽充足区, 然后通过凝华和聚并过程增长, 1 月 24 日凝华增长过程占 92%, 聚并增长过程仅占 5%; 11 月 6 日凝华占 88%, 聚并仅占 3%。(3) 垂直上升气流速度与冰晶、雪晶生成和增长过程呈正相关, 上升气流带来充足的水汽, 配合垂直运动使得雪胚增加, 凝华、淞附和聚并过程增强, 导致雪晶含量增加。

关键词 北京山区; 冬季降雪; 微物理特征

文章编号 2018172C

中图法分类号 P458.3

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172

收稿日期 2018-06-08; 网络预出版日期

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41805114, 41675138), 北京市自然科学基金项目 (8164058, 8182024, 8172023), 北京市科技计划课题 (D171100000717001)

作者简介: 高茜, 主要从事云降水物理研究。Email: gaoqianbjwm@163.com

通讯作者: 郭学良, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究。Email: guoxl@mail.iap.ac.cn

Numerical Simulation Study on Microphysical Formation Processes of Two Different Snowfall Cases in Northern Mountain Area of Beijing

GAQ Qian^{1,2,3,4,5}, GUO Xueliang¹, LIU Xiange^{2,3,5}, HE Hui^{2,3,5}

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

3 Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

5 Key laboratory of Beijing for cloud, precipitation and atmospheric water resources, Beijing 100089

Abstract Snowfall is an important precipitation system in Beijing. In this paper, observation data combined with the mesoscale numerical simulation model WRF are used to analyze microphysical processes of two different snowfall cases in northern mountain area of Beijing. The results shows that: (1) Because of the great differences in weather situation and water vapor transport during these two snowfall processes, the microphysical mechanism of these two snowfall has great differences. In period I of November 5, 2015, as a result of strong water vapor transport, there is more liquid water in cloud. Deposition and rimming processes are main formation processes for snow particles. Deposition and coalescence are main formation processes for snowfall cases in January 24 and period II of November 5 for the weak water vapor transport. (2) In period I of November 5, there is ice (9%), snow (72%), cloud liquid water (6%) and rain water (12%) in the air. The snow particles grow with deposition (78%) and rimming (20%) processes. In January 24, there is ice (28%) and snow (72%) in the air, while the period II of November 5 has similar portion: ice (11%) and snow (88%). Snow particles grow through deposition and coalescence in January 24 and period II of November 5. (3) Updraft has great influence of ice, snow grow process because it brings sufficient water vapor. The vertical motion and water vapor makes more snow for strong deposition, rimming and coalescence processes.

Key words: northern mountain area of Beijing, snowfall, microphysical process

1 引言

我国幅员辽阔、地形复杂，地形的存在，如大尺度的青藏高原，中尺度的太行山脉，到小尺度的北京延庆山区，都对天气系统产生了不同的热力、动力影响，这些影响会使得山区降水的发生发展过程及微物理结构更加复杂和独特。小海坨山位于延庆县西北部，该山海拔最高 2199 米，海拔变化幅度大，具有自身独特的小气候，具有典型的冬季地形云降雪结构特征。对其进行研究，有助于了解北京山区降雪的发生发展机制、影响因素，更好的开展冬奥会气象保障服务。

由于研究地形云及其降水过程具有重要的意义，国内外已开展过很多探测和数值模拟研究工作。外场探测方面，华盛顿大学的云物理研究团队在

1969-1974 年开展了 Cascade Project, 通过地基和空基观测, 研究山区云和降水的特征, 发现锋前-10℃以上区域主要是冰粒子为主, 锋后区域冰水转化过程减少, 在粒子下落最后 1km, 湍附和聚并更强(Hobbs, 1975)。Robert M. Rauber 等利用地面观测、遥感、飞机等数据对科罗拉多山区 17 个冬季降雪系统的云冰和降水过程进行分析, 发现云顶部是冰粒子生成的主要源区, 冰粒子数浓度在地形抬升区域增加, 在深厚的云的下部也是增加的(Rauber, 1987)。Shupe 等利用地基探测设备云雷达、微波辐射计、激光雷达等混合相云的宏微观、动力、辐射特征进行分析, 验证地基观测分析云系结构的可行性(Shupe et al., 2008)。Reynolds 等利用微波辐射计、雷达、卫星等数据对 Sierra Nevada 山区降雪进行分析, 发现过冷水高值区多位于伴随着高空锋面系统的高空急流后, 锋面造成云体变薄, 云顶升温, 降水减少以及浅对流的生成。云顶的温度、雨带都与锋面和急流对应(Reynolds & Kuciauskas, 2010)。在我国, 20 世纪 80 年代新疆天山地区开展了“北方层状云人工降水试验研究”, 通过对新疆冬季降雪云的观测和分析发现, 降雪主要出现在地面冷锋后, 存在锋上和锋下两个雪增长区(游来光等, 1989)。

尽管外场观测取得了很多成果, 但由于其空间和时间上的局限性, 需要借助数值模式, 更系统和细致地描述地形云降雪的发生发展过程和云系内部的结构、微物理特征等, 国内外科学家在此方面开展了很多工作(雷恒池等, 2008; 郭学良等, 2013)。Meyers、Reisner、林文实、孙晶等(Meyers et al, 1992; Reisner JR, 1998; Lin et al, 2006,2008; 孙晶等,2007,2009)利用 RAMS、MM5 模式对冬季降雪进行模拟, 发现过冷水、垂直速度和相变潜热对降雪具有非常重要的意义。

北京北部山区地形复杂, 地形的抬升作用使得降雪出现的频率远高于平原地区。根据历史观测资料, 2011 年-2017 年, 北京北部海坨山共降大雪 6 次, 中雪 9 次, 小雪 14 次, 雨夹雪 3 次, 降雪的高低空配置包括: 高空槽和低涡; 地面辐合区、倒槽和东风回流。一般当低槽或低涡与地面倒槽或东风回流配合时往往会出现中到大雪以上量级降雪。通过历史个例分析发现, 大部分个例降雪期间出现地形云, 且地形越高地区降雪越多。利用 WRF 数值模式对北部山地区的降雪过程进行模拟, 了解山区降雪发展过程, 分析典型天气条件下, 云中水凝物分布特征、雪的源汇项及形成机制, 对于我们进一步了解我国北方山区地

形云降雪的发生发展机制，科学合理的开展冬季增雪作业具有重要意义，同时也为保障 2022 年国际冬奥会提供了理论和技术支持。

2 模式设置及观测数据

本文利用的 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式是由 NCAR、NCEP 和 FSL/NOAA 等联合开发研制的中尺度数值模式。采用 Morrison 2-moment 云微物理显式方案 (该方案包括了水汽、云水、雨水、云冰、雪、霰等的比含水量以及雨水、云冰、雪、霰等的比数浓度预报量)、RRTM 长波辐射计算方案、Dudhia 短波辐射计算方案、Monin-Obukhov 边界层方案。模式采用 4 重嵌套，格距分别是 27、9、3、1km。模式在垂直方向上分 39 层，水平格点数分别为 101×101 、 103×103 、 151×151 、 151×151 。采用分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，时间间隔为 6 小时的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界条件。模拟选用欧拉质量坐标和 Runge-Kutta 3rd 时间积分方案。

文中使用的观测数据包括 NCEP 再分析资料、探空数据、地面降水数据和雷达数据。

NCEP 再分析资料是由美国气象环境预报中心 (NCEP) 和美国国家大气研究中心 (NCAR) 联合制作的，他们采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库，对各种来源 (地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等) 的观测资料进行质量控制和同化处理，获得了一套完整的再分析资料集。本文分析天气形势所用位势高度、风场和水汽通量都是由 NCEP 再分析资料计算得到。

文中所用的探空数据选取的是北京观象台每日 08:00 和 20:00 (北京时，下同) 的常规气象数据。

地面降水数据由北京全市分布的自动气象站观测得到。自动气象站能够提供时间分辨率分别为 1h、5min、1min 的温度、气压、风向风速和雨量资料。本文主要使用的是地面雨量。

文中所使用的雷达资料为位于北京大兴区的南郊观象台 (Z9010) S 波段多普勒天气雷达 (CINRAD/SA) 提供。该站具体经纬度为 116.28°E 、 39.48°N ，高度 97.6m，覆盖范围 230km。

3 结果分析

3.1 研究个例的天气特征

图 1 是 2015 年 1 月 24 日和 2015 年 11 月 5 日两次过程 NCEP 再分析资料 500hPa、700hPa、850hPa 高度场和 1000hPa 风场，1 月 24 日北京受东移低槽的影响，地面从高压后部倒槽前部转为弱辐合区控制，海坨山附近受东南风影响。11 月 5 日过程地面受高压底部偏东风配合倒槽影响，海坨山附近为东北风，此次过程风速远大于 1 月 24 日过程。

图 2(a)和(b)分别为 1 月 24 日和 11 月 5 日 08:00 水汽通量在近地面(1000hPa)的分布图。从图中可以看出，11 月 5 日水汽输送明显强于 1 月 24 日。1 月 24 日北京区域水汽通量最大为 $2(\text{g}\cdot\text{s})/\text{kg}$ ，11 月 5 日最大为 $5(\text{g}\cdot\text{s})/\text{kg}$ 。

图 1 NCEP 再分析资料 500hPa、700hPa、850hPa 高度场和 1000hPa 风场(a) 1 月 24 日 08:00 LST(b) 11 月 05 日 08:00 LST

Fig. 1 The geopotential height and wind vector at 500hpa, 700hpa, 850hpa at 08:00LST on 24 Jan,2015(a)and 08:00LST on 05 Nov,2015(b)

图 2 NCEP 再分析资料 1000hPa 水汽通量(a) 1 月 24 日 08:00 LST(b) 11 月 5 日 08:00 LST
Fig. 2 The NCEP reanalysis water vapor flux at 1000hpa at 08:00LST on 24 Jan,2015(a)and on 08:00LST on 05 Nov,2015(b)

从图 3 北京南郊（54511 站）上空的探空曲线可以看出，1 月 24 日 08:00 本地水汽条件差，低层受东南风影响，随着低层东南风的持续和降雪的影响，湿度逐渐加大，20:00 水汽条件改善。1 月 24 日降雪过程，具有较好的动力条件，水汽条件一般，导致此次过程虽然出现全市性小雪，但量级不大。11 月 5 日，08:00，850hPa 以下受偏东风影响，水汽输送条件好，500hPa 以下基本饱和。傍晚前后开始有冷空气影响，有雨转雪的过程出现。

图 3 北京探空曲线(a) 2015 年 1 月 24 日 08:00 LST、(b) 2015 年 1 月 24 日 20:00 LST
(c)11 月 5 日 08:00 LST、(d) 11 月 5 日 20:00 LST
(黑线：温度；蓝线：露点温度)

Fig. 3 The Skew-T at 08:00LST(a) and 20:00LST(b)on 24 Jan,2015, 08:00LST(c) and 20:00LST(d) on

05 Nov,2015

图 4(a) 给出了 2015 年 1 月 24 日 11:00-23:00 北京全市降水量分布, 图 4(c) 为 1 月 24 日 20:00 Micaps 地面填图, 从图中可以看出此次过程为全市性小雪天气, 降水从 11:00 开始, 23:00 结束。全市平均 0.4mm, 城区平均 0.1mm, 山区降水量 2.5mm。图 5(a)给出了 1 月 24 日 16:00 的雷达回波图, 回波主要分布在西北部, 从回波垂直剖面图看, 回波顶高大多在 4km 以下, 分布不均匀, 存在 2 个弱降水中心, 大部分区域回波强度在 5-15dBZ, 仅在弱降水中心强度在 20-25dBZ。

11 月 5 日-6 日, 则是一次雨夹雪转雪的天气。从图 4(b)可以看出, 此次过程降水量较大, 最大值在北京西北部山区, 可达 30mm。通过 Micaps 地面填图(图 4(d)、4(e)) 可以看出, 5 日白天北部地区为雪、雨夹雪天气, 南部地区为降雨, 夜间结束, 6 日凌晨北部地区再次出现降雪, 降雪过程继续。从图 5(b)的雷达回波图可以看出, 此次过程的影响范围包括北京大部分区域, 从垂直剖面看, 回波顶高多在 4km 以上, 在水平方向上分布均匀, 有明显的层状结构, 近地层回波强度在 20-30dBZ 之间。

由以上可见, 两次过程由于天气形势不同, 存在明显区别。1 月 24 日过程本地动力条件好但水汽条件一般, 量级为全市性小雪。11 月 5-6 日过程受偏东风影响, 水汽输送条件好, 出现全市性降雪天气, 山区降雪分为雨夹雪和纯雪两个阶段。

图 4 降水量分布图(a)2015 年 1 月 24 日 11:00LST-23:00 LST

(b) 11 月 5 日 07:00LST-23:00LST

Micaps 地面填图(c) 2015 年 1 月 24 日 20:00LST(d) 2015 年 11 月 05 日 20:00LST

(e) 2015 年 11 月 06 日 08:00LST (符号为天气现象, 红圈内为雨夹雪符号)

Fig. 4 Observed rainfall(mm) at 11:00-23:00LST on 24 Jan 2015(a) and 07:00 on 05 Nov-07:00LST on 06 Nov 2015(b)

Micaps surface plot(c) 2015 年 1 月 24 日 20:00LST(d) 2015 年 11 月 05 日 20:00LST

(e) 2015 年 11 月 06 日 08:00LST

图 5 雷达回波特征(a)2015 年 1 月 24 日 16:00LST(b) 11 月 5 日 13:30LST

Fig. 5 Observed composed radar echo at 14:00LST on 24 Jan 2015(a) and 13:30LST on 05 Nov,2015

3.2 模拟结果验证

综合地面降水量和雷达回波的模拟结果，通过与观测结果的对比，验证模式的可靠性。通过两次过程的对比，发现模式可以较准确的模拟出降水的位置和量级。图 6 是 2015 年 1 月 24 日实测和模拟的地面自动站降水量(14:00-20:00 LST)。模拟结果与实测结果一致，可以比较好的模拟出降水的走向与高值区的分布。降水主要分布在北京西部，降水量主要在 0.5mm 以上，西北部最多，6 小时累积最大值 2mm。图 7 是 1 月 24 日北京地区观测和模拟的雷达回波，14:00 回波开始进入北京，由北京西南部山区入境。模拟的北京区域回波位置和量级与观测一致，可以模拟出系统的发展。

图 6 2015 年 1 月 24 日实测和模拟的 6 小时降水量(14:00LST-20:00 LST)对比

(a) 自动站(b)模拟

Fig. 6 Observed(a) and simulated(b) 6 hour rainfall(mm) at 14:00-20:00LST on 24 Jan 2015

图 7 2015 年 1 月 24 日实测和模拟的雷达回波对比(a)14:00LST 观测(b) 14:00LST 模拟

Fig. 7 Observed(a) and simulated(b) composed radar echo at 14:00LST on 24 Jan 2015

图 8 是 2015 年 11 月 05 日 07:00-06 日 07:00 降水与模拟结果的对比。降水量来自北京自动站观测数据。模拟结果与实测结果较为一致，特别是在北京西北部山区位置，可以准确的模拟出降水高值的分布。

图 9 是 11 月 5 日北京地区观测和模拟的雷达回波，10:00 北京大部分地区被回波覆盖，最大强度 35DBZ，海坨山上空有回波，强度 20DBZ。模拟的北京区域回波强度与观测一致，可以模拟出系统的发展，但回波强度与观测相比略强。

图 8 2015 年 11 月 05 日 07:00-06 日 07:00 降水对比(a)自动站(b)模拟

Fig. 8 Observed(a) and simulated(b) 6 hour rainfall(mm) at 07:00 on 05 Nov-07:00LST on 06 Nov 2015

图 9 2015 年 11 月 5 日实测和模拟的雷达回波对比(a)10:00LST 观测(b) 10:00LST 模拟

Fig. 9 Observed(a) and simulated(b) composed radar echo at 10:00LST on 05 Nov 2015

3.3 微物理结构及演变特征

由以上分析可知，1 月 24 日与 11 月 5 日过程，由于影响系统的区别，山区范围的风场和水汽通量输送有很大差别，降水的量级和降水粒子相态也有不

同。将两次过程山区上空云系的微物理特征对比分析，其中 11 月 5 日过程又分为第一阶段雨夹雪和第二阶段降雪。选取 1 月 24 日 16:00(动力条件好、水汽条件一般，山区有小雪)、11 月 5 日 06:00(动力和水汽条件都好，温度较高，山区雨夹雪)和 6 日 00:00(温度降低，转为降雪过程)三个典型时刻，结合山区风场，分析云系的微物理结构及演变特征。

山区地形高度在 2000m 左右，主要受 850hPa 风场影响，图 10 是 3 个时刻山区上空的风场。1 月 24 日 16:00，山区以南风为主。2015 年 11 月 5 日两个时刻以东风为主，两次过程在山区都受地形影响，有一定的转向。

图 10 地面风场分布(a)2015 年 1 月 24 日 16:00LST (b)2015 年 11 月 5 日 06:00 LST; (c) 6 日 00:00LST (彩色阴影：地形；紫色方框：海坨山区域)

Fig. 10 Surface wind at 16:00LST on 24 Jan,2015(a)06:00LST on 05 Nov,2015(b)00:00LST on 06 Nov,2015(c)

将海坨山区域(图 10 紫色方框区域)上空冰晶、雪晶、霰、云水、雨水、水汽和垂直速度做区域平均，图 11 是各物理量随时间的变化。1 月 24 日，08:00-17:00，这一时段垂直速度基本为正，空中有冰晶、雪晶存在，冰晶比质量的变化与垂直速度起伏一致，说明冰晶的生成与上升气流密切相关。08:00-12:30，水汽和雪晶比质量随着时间以相似的增长率增加，有很好的相关性。之后水汽缓慢减少，雪晶迅速减少。

11 月 5-6 日过程比较复杂。总的来说，分为两个阶段。00:00-17:00 为第一阶段，山区上空有云水和雨水的存在，之后基本没有。这一阶段 07:00 之前，随着垂直速度从下沉逐渐转为上升，冰晶、雪晶、云水、雨水随时间逐渐增加，达到极大值后逐渐减少。这一时段水汽比质量随时间变化不大，说明虽然冰雪晶的增长消耗水汽，但水汽的输送是充足的。07:00-16:00，山区上空以下沉气流为主，水汽逐渐减少，冰晶、雪晶、云水逐渐减少至无。17:00 之后又转为上升气流，水汽缓慢增加，山区上空以冰晶、雪晶为主，雪晶比质量出现另一个极大值。

图 11 模拟的海坨山上空物理量随时间变化(a)2015 年 1 月 24 日(b)2015 年 11 月 5 日

Fig. 11 Simulated hydrometeor content on 24 Jan 2015(a) and 05 Nov,2015(b)

两次过程区域平均的冰晶比质量差别不大，都在 0.02g/kg 以下；11 月 5-6

日雪晶和水汽比质量明显高于 1 月 24 日。1 月 24 日区域平均的雪晶比质量最大约 0.05g/kg, 11 月 5-6 日最大约 0.08 g/kg; 1 月 24 日区域平均的水汽比质量最大约 0.8kg/kg, 11 月 5-6 日最大约 1.9kg/kg。

从这两次过程看, 垂直速度与冰晶、雪晶和水汽比质量是正相关的, 当垂直速度增加时, 上升气流会带来水汽, 凝华变强, 当空中有液态水存在时, 液态水的存在使得淞附过程增强, 雪晶增长; 当垂直速度减小时, 空中水汽减少, 凝华减弱, 空中雪晶减少。

图 12 是三个时刻山区上空水凝物的分布情况。从图 12(a)可以看出, 1 月 24 日山区上空云水、雨水、霰的含量非常低, 多为冰雪晶。冰晶主要分布在 7-12km 上升气流较强区; 雪晶主要分布在 1-7km 高度, 山区附近由于地形较高, 雪晶已降落到地面, 最大值 0.25g/kg。图 12(b)(c)分别对应雨夹雪和纯降雪两个阶段山区上空水凝物垂直分布。5 日 06: 00 冰晶分布在 7.5km 以上高度, 雪晶主要分布在 2-7km 之间, 雪晶比质量最大值为 0.35g/kg。0°C 层高度在 2km 高度附近, 山顶为降雪, 山坡和山谷均为降雨。云中液态水丰富, 多存在 0°C 层附近。而到了 6 日 00: 00, 山区温度均低于 0°C, 云水和雨水含量很少, 雪晶发展旺盛, 从地面到 8km 范围内, 都有雪晶的存在。

图 12 模拟的水凝物、温度和风场垂直剖面

Fig. 12 Simulated hydrometeor content, temperature and wind vertical distribution at 16:00 on 24 Jan 2015(a), 06:00 on 05 Nov,2015(b),00:00 on 06 Nov,2015(c)

(a)2015 年 1 月 24 日 16: 00LST (b) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST; (c) 6 日 00: 00LST

(红线: 冰晶比质量, 单位: g/kg; 蓝线: 云水比质量, 单位: g/kg; 绿线: 雨水比质量, 单位: g/kg; 蓝色阴影: 雪晶比质量, 单位: g/kg; 黑色虚线: 温度, 单位: °C; 棕色箭头: 风向风速; 黑色阴影: 地形)

3.4 云微物理过程转化特征

从这两次过程看, 降雪都是地面降水的主要来源。Morrison 方案中, 雪的源汇项包括云冰自动转换、雪晶凝华增长、聚并增长(雪晶碰并云水、雪晶碰并雨水、雪晶碰并云中冰晶、雨水碰并雪晶、雨水碰并冰晶)和冻结增长, 在这两次个例中, 主要的影响过程为云冰转换为雪晶、雪晶凝华增长、雪晶碰并冰晶聚并增长、雪晶碰并云水淞附增长。其他量级较小, 忽略不计。PRCI 代表云中

冰晶转换成雪晶，是雪晶生成的主要机制，生成“雪胚”。雪胚生成后，通过凝华（PPRDS 雪的凝华增长）、聚并（PRAI 雪碰并冰晶）、淞附（PSACWS 雪碰并过冷云水）三种过程增长。

图 13(a)(b)(c)是三个时刻山区上空雪胚的生成过程：云冰转换为雪晶(PRCI)的分布。云冰转换为雪晶主要集中在 6-12km，高值区与冰晶分布的高值区一致。且通过三个时刻的对比可以看出，当高空风场较强时，云冰转换为雪晶过程更强。说明高空冰晶分布和风场，是决定雪胚分布的重要因素。

图 13(d)(e)(f)是三个时刻山区上空凝华、聚并、淞附过程的分布，三个时刻既有共同点也有有很大区别，具体见表 1。共同点为雪碰并冰晶聚并增长均分布在高空且与其他两项相比，小一个量级。主要区别是 11 月 5 日 06:00 雨夹雪时刻，由于云水的存在，雪碰并过冷云水淞附增长过程也是雪晶的主要源项，雪晶凝华增长发展与其他两个时刻相比更旺盛。

图 13 模拟的海坨山上空雪的源项垂直分布

PRCI (a)2015 年 1 月 24 日 16: 00LST (b) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST; (c) 6 日 00:00LST
PRDS、PSACWS、PRAI(d) 2015 年 1 月 24 日 16:00LST (e) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST (f) 6 日 00:00LST

(彩色阴影: PRAI; 蓝色实线: PRCI; 红色实线: PRDS; 绿色实线: PSACWS)

Fig. 13 Simulated snow sources vertical distribution: PRCI at 16: 00LST on 24 Jan,2015(a),06:00LST on 05 Nov,2015(b),00:00 on 06 Nov,2015(c)
PRDS、PSACWS、PRAI at 16: 00LST on 24 Jan,2015(d),06:00LST on 05 Nov,2015(e),00:00 on 06 Nov,2015(f)

表 1 三个时刻雪晶主要的增长过程

Table.1 Main snow grow process

	PRAI 聚并	PRDS 凝华	PSACWS 淞附
	最大值和范围	最大值和范围	最大值和范围
1 月 24 日 16:00	0.015, 6-10km 部分区域	0.1,2-8km 部分区域	无
11 月 5 日 06:00	0.01, 7.5-10km 部分区域	0.15, 3-7km 整层	0.3, 地面-3km 整层
11 月 6 日 00:00	0.01, 7.5-12km	0.1, 地面-8km	无

图 14 模拟的海坨山上空源汇项转换(a)2015 年 1 月 24 日 16: 00LST (b) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST; (c) 6 日 00:00LST

Fig.14 Simulated hydrometer sources transition at 16: 00LST on 24 Jan,2015(a),06:00LST on 05 Nov,2015(b),00:00 on 06 Nov,2015(c)

分别对山区上空（图 10 紫色方框区域）所有格点的的 5 种水凝物（冰晶、雪晶、云水、雨水、霰）进行质量求和，得到山区上空 5 种水凝物总质量。得到其各自在山区上空的总量，并计算各粒子在总和中所占比例，如图 14 所示。可以看出，1 月 24 日过程，空中云水、雨水、霰均为 0，冰晶占总和的 10.26%，雪晶占 89.74%。由于空中过冷水缺乏，降雪的产生主要依靠凝华增长过程，消耗空中的水汽，这一增长过程占雪晶总增长的 92.46%。在高空（7km 以上），通过云中冰晶转换成雪晶（2.34%）产生雪胚，雪胚在高层碰并冰晶聚并增长（5.2%），并被下沉气流带到 7km 以下区域，而这一区域，由于底层南风 and 地形的共同作用，低层以上升气流为主，且南风带来了水汽输送，上升气流将水汽向上输送，配合高空向下输送的雪晶粒子，雪晶通过凝华增长过程迅速增加，这是此次降雪过程发展的主要机制。

与 1 月 24 日过程相比，11 月 5-6 日过程空中有云水、雨水的存在，但仍以冰晶和雪晶为主。在第一阶段（雨夹雪），由于过冷云水的存在，使得降水过程不只依赖于雪晶凝华增长，淞附增长也是一个主要的增长过程。如图 13(b)所示，冰晶比质量占降水粒子总质量的 5.20%，雪晶占 88.54%，云水占 3.13%，雨水占 3.13%。雪晶主要在 7.5km 以上高度，通过云中冰晶转换成雪晶（0.74%）生成雪胚，雪胚在这一高度碰并冰晶聚并增长（1.15%）。雪胚在下落过程中通过凝华（78.05%）、淞附（20.06%）长大，降落到山顶附近为雪，在山坡和平原地区，零度线以下融化为雨，雨主要来自于雪的融化（99.46%）。在第二阶段（雪），由于垂直速度的增强和温度的降低，山区以冰晶（11.69%）、雪晶（88.31%）为主，云水和雨水、霰几乎没有。高层通过云中冰晶转换成雪晶（2.58%）产生的雪胚在下落过程中通过聚并增长（2.96%）略有增加，但由于云水的减少，淞附增长减弱至 5.93%，降雪的产生主要依靠雪晶凝华增长（88.54%）。

4 结论

本文利用数值模式讨论了 2015 年冬季北京北部山区两次降雪过程。两次过程在不同的天气形势下，山区降雪云有着不同的微物理特征和粒子增长过程。

从天气形势看，1 月 24 日为高空槽配合地面辐合区，850hPa（山区高度）受偏南风影响，动力条件好水汽条件一般，山区小雪；11 月 5-6 日为高空槽配合地面倒槽，850hPa 以偏东风为主，动力和水汽条件较好，水汽输送明显强于 1 月 24 日，山区雨夹雪转雪。

从山区上空微物理量平均值随时间的变化可以看出，这两次过程，垂直速度与冰晶、雪晶和水汽比质量是正相关的，当垂直速度增加时，上升气流会带来水汽，凝华变强，当空中有液态水存在时，上升气流使得淞附过程增强，同时聚并过程增强，雪晶增长；当垂直速度减小时，空中水汽减少，凝华、淞附、聚并过程减弱，空中雪晶减少。

对比分析三个典型时刻云的微物理特征和降雪源项，发现 1 月 24 日过程和 11 月 5-6 日第二阶段云微物理特征相似，山区上空以冷云过程为主，冰晶、雪晶发展旺盛，云水、雨水、霰非常少。冰晶通过凝华增长和冻结核化过程生成。生成的冰晶，在高空云冰转换为雪晶，形成“雪胚”，产生的“雪胚”通过凝华过程和聚并过程继续长大。11 月 5-6 日第一阶段，山区山空除了冰晶、雪晶，还存在云水、雨水，水汽资源丰富。冰晶同样通过凝华增长和冻结核化过程生成，高层云冰自动转换形成的“雪胚”，主要通过凝华和淞附过程继续长大，聚并较弱。

本文通过分析 2015 年两次不同条件的北京北部山区降雪个例的发展过程和云物理特征，对北京山区冬季降雪机制有了进一步的了解，未来工作中，将结合北京市人工影响天气办公室在海坨山区域开展的 TOP-ICE 计划（Topographic Precipitation and Integrated Cloud-seeding Experiments），借助空地一体化观测系统和大涡模式，进一步分析地形云自然降雪机制和微物理过程，以及此区域增雨潜力。

参考文献（五号黑体）

- 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 2013. 云降水物理与人工影响天气研究进展 (2008~2012 年) [J]. 大气科学, 37 (2): 351-363. Guo Xueliang, Fu Danhong, Hu Zhaoxia. 2013. Progress in cloud physics, precipitation, and weather modification during 2008-2012 [J]. Chinese journal of atmospheric sciences (in Chinese), 37(2): 351-363.
- Hobbs, P. V. 1975. The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding I: Natural conditions [Weather]. Journal of Applied Meteorology, 13(14), 783-804.
- 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.Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),2008,32(4):967- 974.
- Lin, W., Bueh, C. 2006. The cloud processes of a simulated moderate snowfall event in north China. Advances in Atmospheric Sciences, 23(2), 235-242.
- Lin, W., Meng, J., Sui, C. H.,et al. A study of the microphysical processes in a numerically simulated heavy snowfall event in North China: the sensitivity of different snow intercept parameters. Meteorology and Atmospheric Physics, 104(1-2), 1-11.
- Meyers, M.P.,Cotton,W.R.1992.Evaluation of the potential for wintertime quantitative precipitation forecasting over mountainous terrain with an explicit cloud model.Part I: Two-Dimensional sensitivity experiments. Journal of Applied Meteorology, 31(1), 26-50.
- Rauber, R.M.1987. Characteristics of cloud ice and precipitation during wintertime storms over the mountains of northern Colorado. Journal of Climate & Applied Meteorology,26(4), 488-524.
- Reinsner JR,R.M.R.1998. Explicit forecasting of super cooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model . Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124B,1071-1107.
- Reynolds, D.W.,Kuciauskas,A.P.2010. Remote and in situ observations of Sierra Nevada winter mountain clouds: relationships between mesoscale structure, precipitation and liquid Water. Journal of Applied Meteorology,27(2),140-156.
- Shupe, M.D.,Daniel,el al.2008. A focus on mixed-phase clouds: the status of ground-based observational methods. Bulletin of the American Meteorological Society, 89(10):1549-1562, 89(10), 1549-1562.
- 孙晶, 王鹏云, 李想.2007. 北方两次不同类型降雪过程的微物理模拟研究,气象学报, 65(1),29-44.Sun Jing,Wang Pengyun,Li Xiang el al.2007.Numerical Study on Microphysical Processes of Two Different Snowfall Cases in North China[J].Acta Meteorologica Sinica,65(1),29-44.
- 孙晶, 楼小凤,胡志晋. 2009. 祁连山冬季降雪个例模拟分析(I):降雪过程和地形影响. 高原气象,28(3), 485-495. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijin.2009.Numerical simulation of snowfall in winter of Qilian mountains. Part(I):snowfall process and orographic influence[J].Plateau

Meteorology,28(3),485-495.

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.气象学报 (1),73-81.You Laiguang, Wang Shourong, Wang Dingfeng,el al.1989.The microphysical Structure of snow cloud and the growth processs of snow in winter in Xinjiang[J]. Acta Meteorologica Sinica,17(1),73-81.

第

科

风

学

第

科

风

学

第

卷

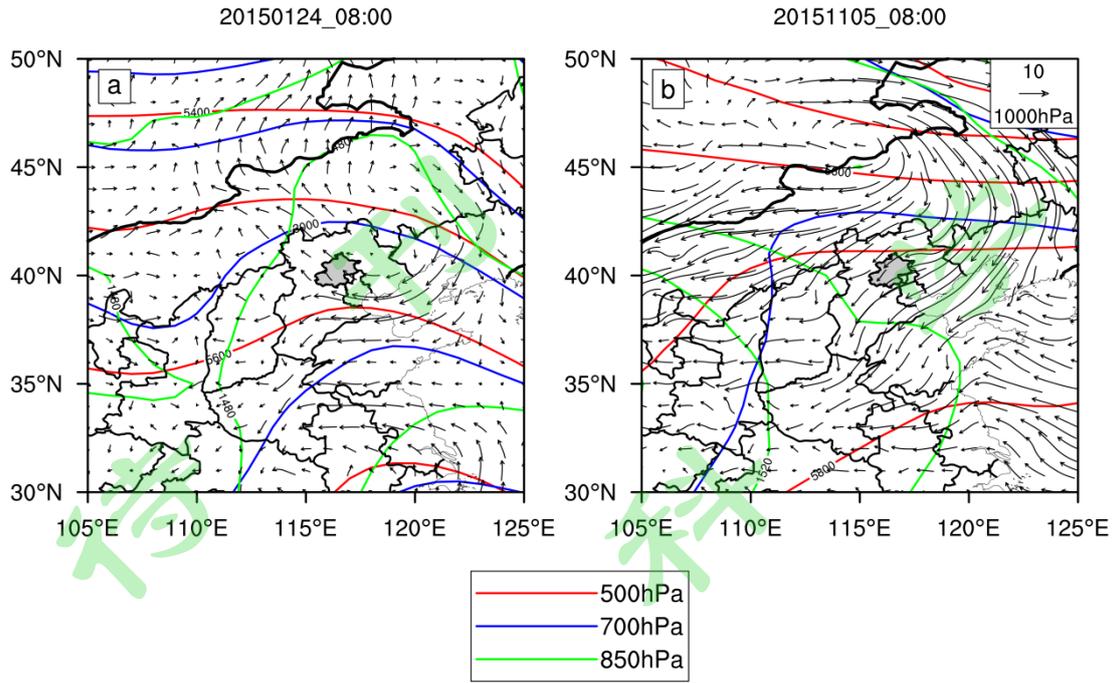


图 1 NCEP 再分析资料 500hPa、700hPa、850hPa 高度场和 1000hPa 风场 (a) 1 月 24 日 08:00 LST (b) 11 月 05 日 08:00 LST

Fig. 1 The geopotential height and wind vector at 500hpa, 700hpa, 850hpa at 08:00LST on 24 Jan, 2015 (a) and 08:00LST on 05 Nov, 2015 (b)

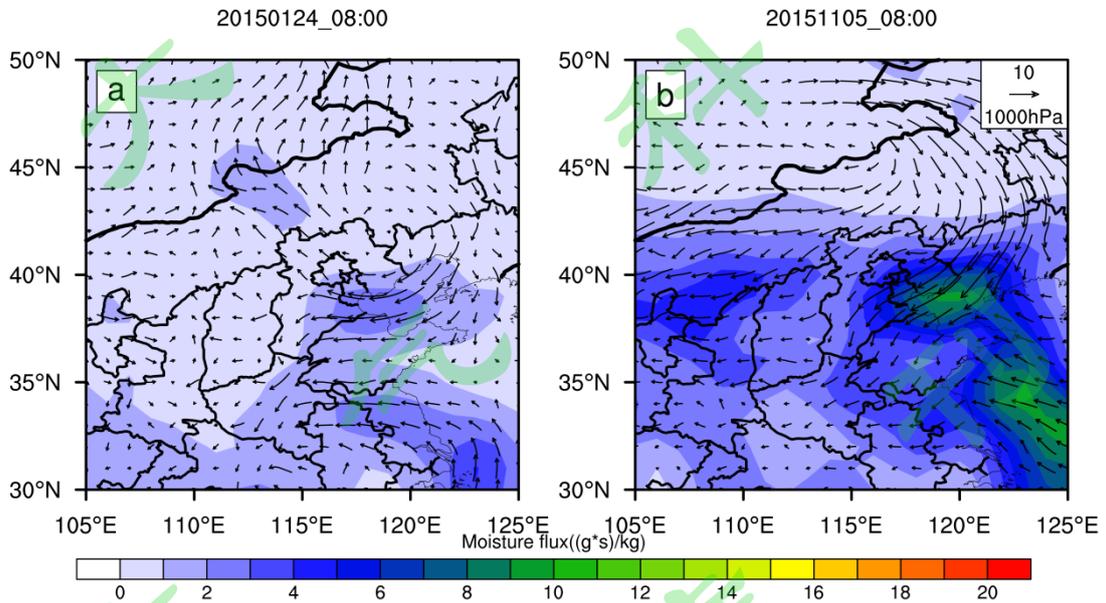


图 2 NCEP 再分析资料 1000hPa 水汽通量 (a) 1 月 24 日 08:00 LST (b) 11 月 5 日 08:00 LST

Fig. 2 The NCEP reanalysis water vapor flux at 1000hpa at 08:00LST on 24 Jan, 2015 (a) and on 08:00LST on 05 Nov, 2015 (b)

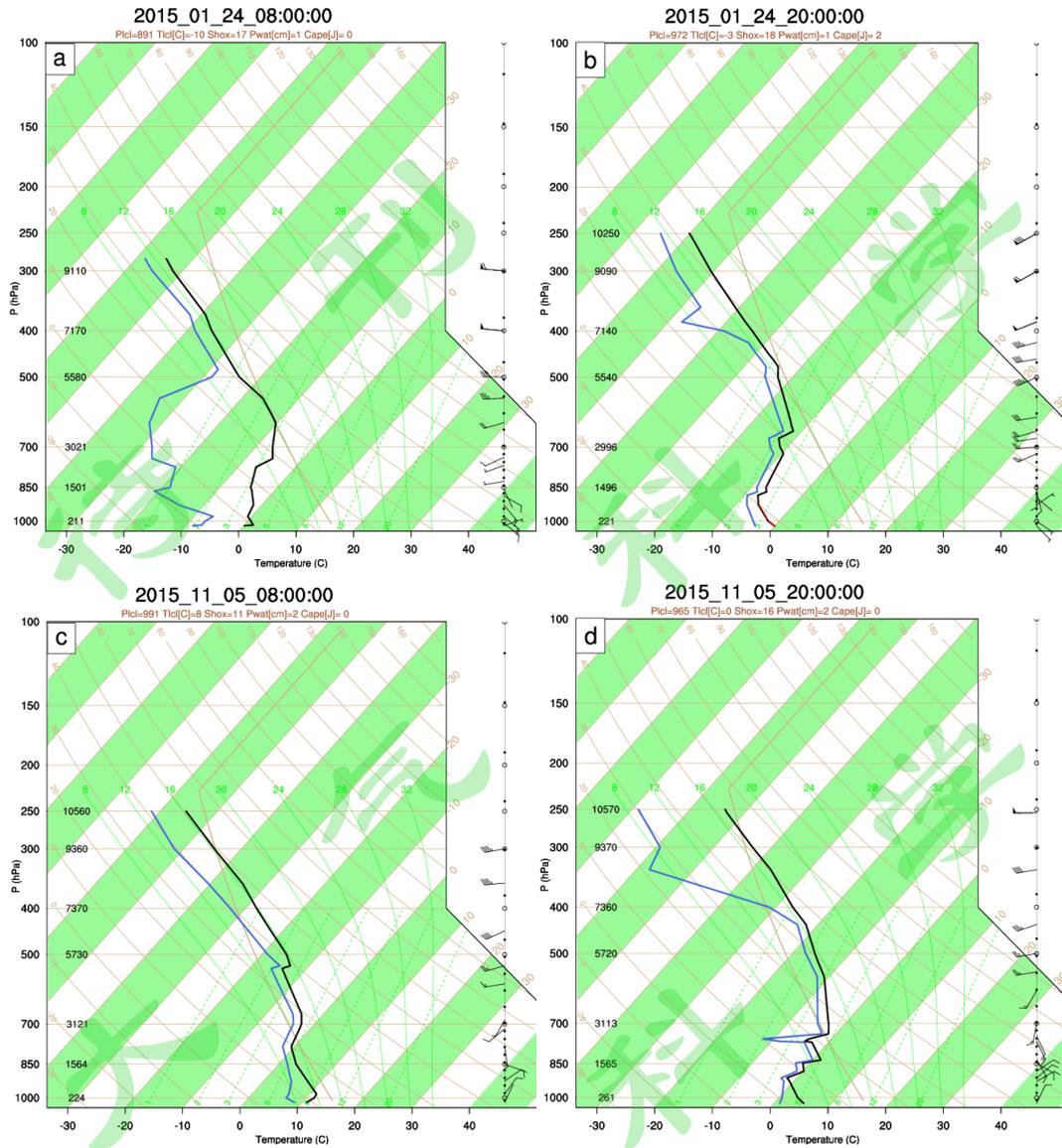


图3 北京探空曲线(a) 2015年1月24日08:00 LST、(b) 2015年1月24日20:00 LST
(c) 11月5日08:00 LST、(d) 11月5日20:00 LST

(黑线: 温度; 蓝线: 露点温度)

Fig. 3 The Skew-T at 08:00LST(a) and 20:00LST(b) on 24 Jan, 2015, 08:00LST(c) and 20:00LST(d) on 05 Nov, 2015

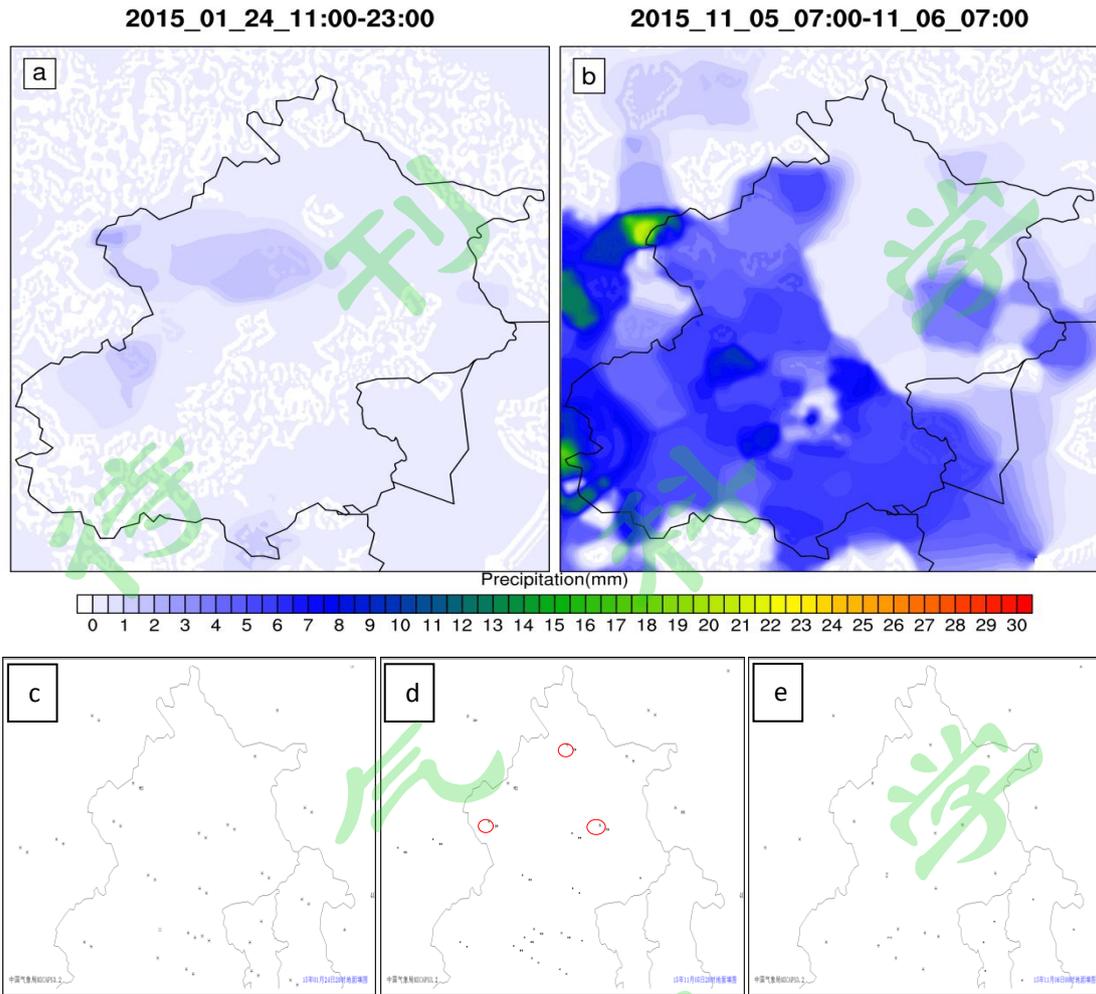


图4 降水量分布图(a)2015年1月24日11:00LST-23:00 LST

(b) 11月5日07:00LST-23:00LST

Micaps 地面填图(c) 2015年1月24日20:00LST(d) 2015年11月05日20:00LST

(e) 2015年11月06日08:00LST (符号为天气现象, 红圈内为雨夹雪符号)

Fig. 4 Observed rainfall(mm) at 11:00-23:00LST on 24 Jan 2015(a) and 07:00 on 05

Nov-07:00LST on 06 Nov 2015(b)

Micaps surface plot(c) 2015年1月24日20:00LST(d) 2015年11月05日20:00LST

(e) 2015年11月06日08:00LST

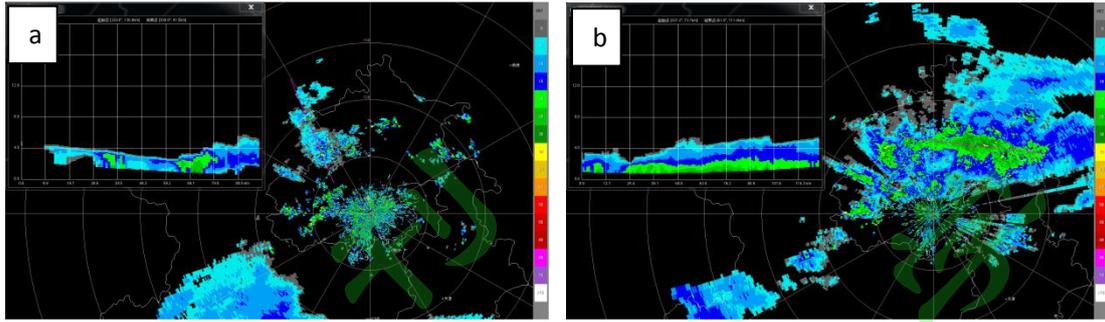


图5 雷达回波特征(a)2015年1月24日16:00LST(b)11月5日13:30LST

Fig. 5 Observed composed radar echo at 14:00LST on 24 Jan 2015(a) and 13:30LST on 05 Nov, 2015

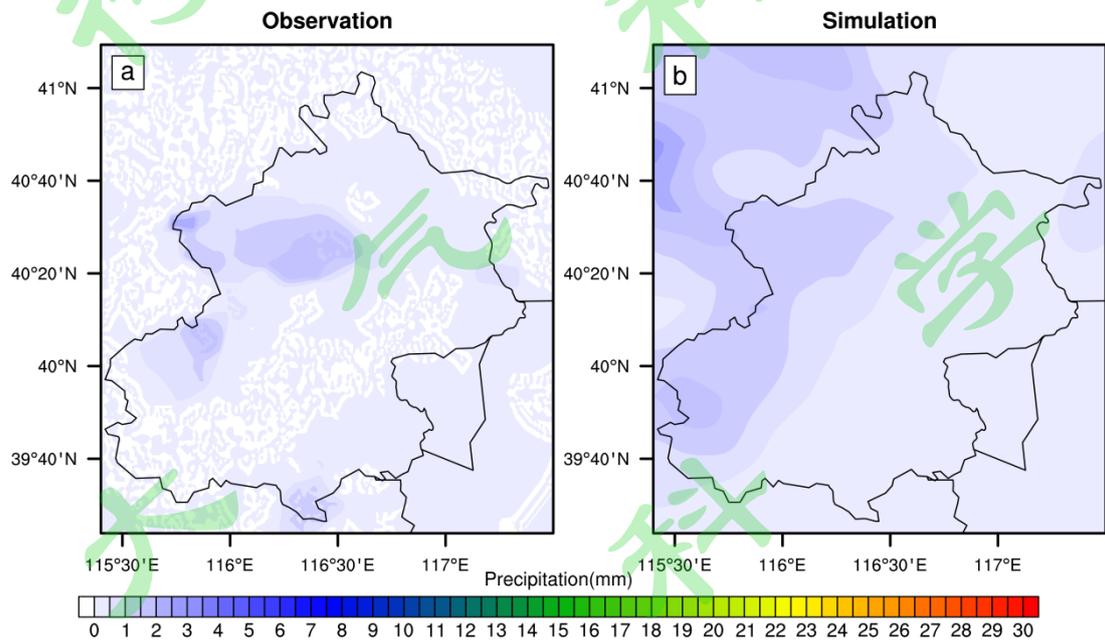


图6 2015年1月24日实测和模拟的6小时降水量(14:00LST-20:00LST)对比

(a) 自动站(b) 模拟

Fig. 6 Observed(a) and simulated(b) 6 hour rainfall(mm) at 14:00-20:00LST on 24 Jan 2015

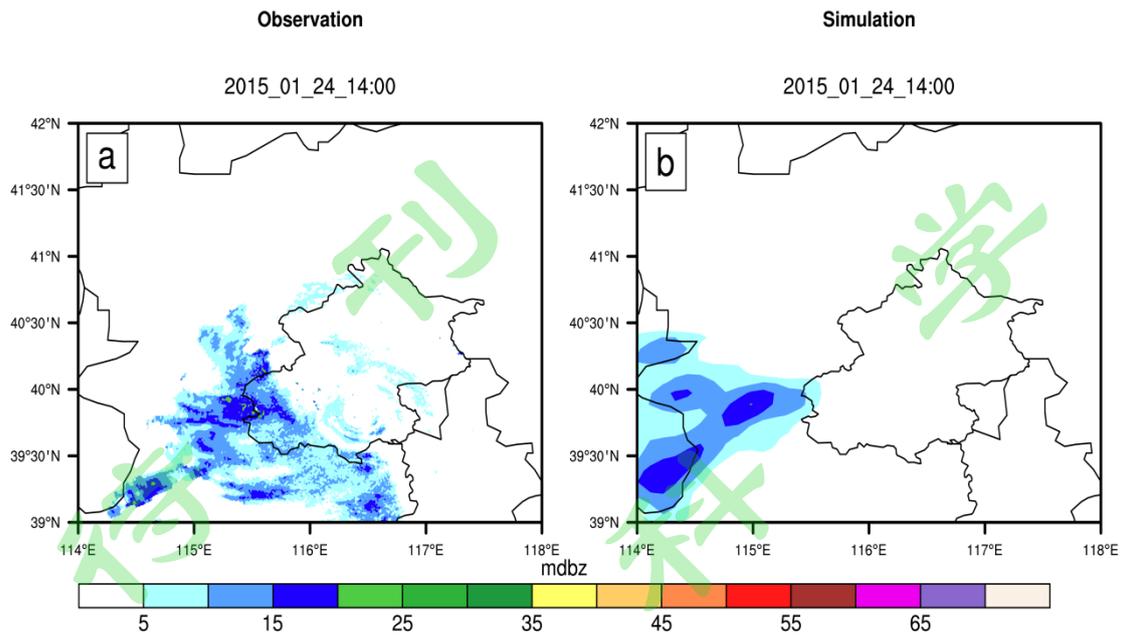


图 7 2015 年 1 月 24 日实测和模拟的雷达回波对比 (a) 14:00LST 观测 (b) 14:00LST 模拟

Fig. 7 Observed(a) and simulated(b) composed radar echo at 14:00LST on 24 Jan 2015

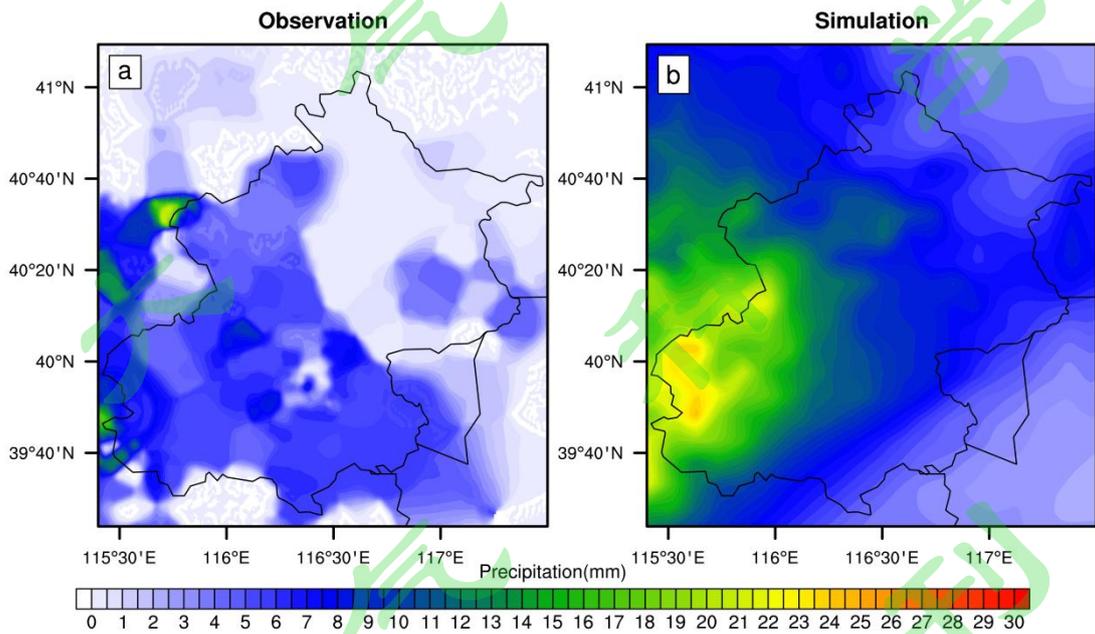


图 8 2015 年 11 月 05 日 07:00-06 日 07:00 降水对比 (a) 自动站 (b) 模拟

Fig. 8 Observed(a) and simulated(b) 6 hour rainfall (mm) at 07:00 on 05 Nov-07:00LST on 06 Nov 2015

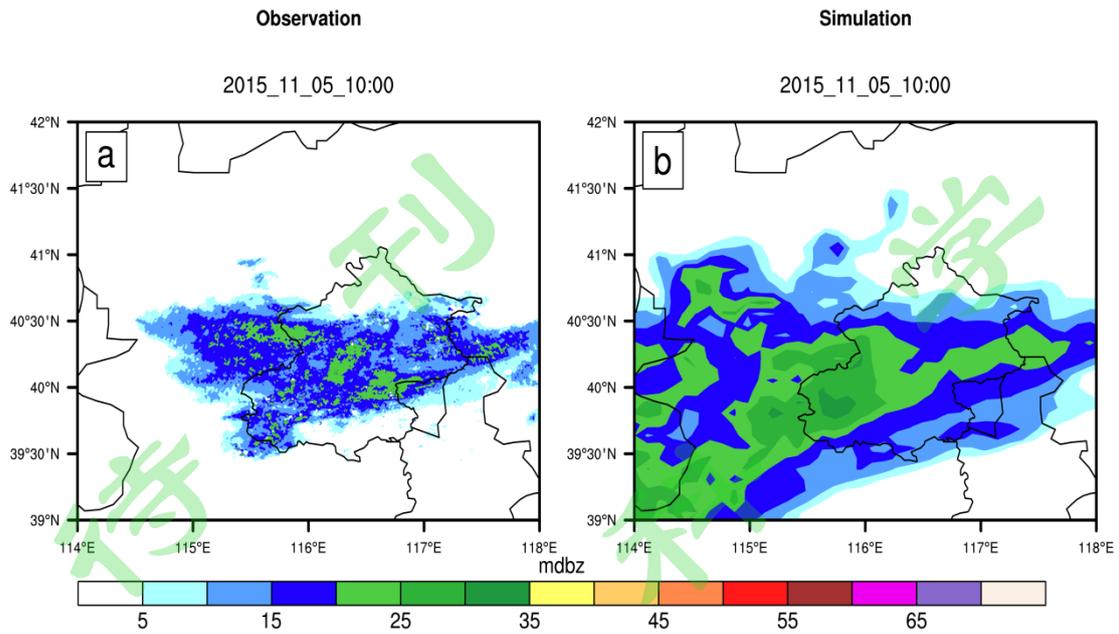


图 9 2015 年 11 月 5 日实测和模拟的雷达回波对比 (a) 10:00LST 观测 (b) 10:00LST 模拟

Fig. 9 Observed(a) and simulated(b) composed radar echo at 10:00LST on 05 Nov 2015

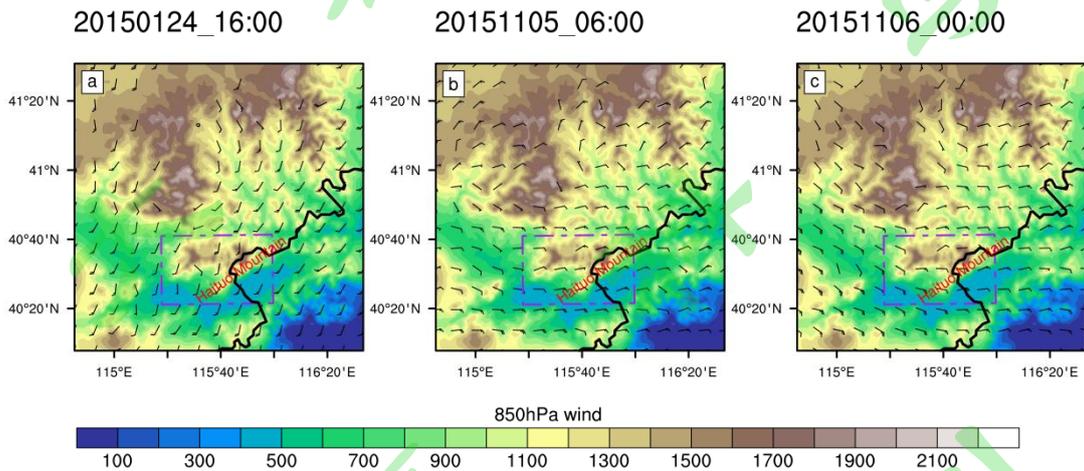


图 10 地面风场分布 (a) 2015 年 1 月 24 日 16: 00LST (b) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST; (c) 6 日 00: 00LST (彩色阴影: 地形; 紫色方框: 海坨山区域)

Fig. 10 Surface wind at 16:00LST on 24 Jan, 2015(a) 06:00LST on 05 Nov, 2015 (b) 00:00LST on 06 Nov, 2015 (c)

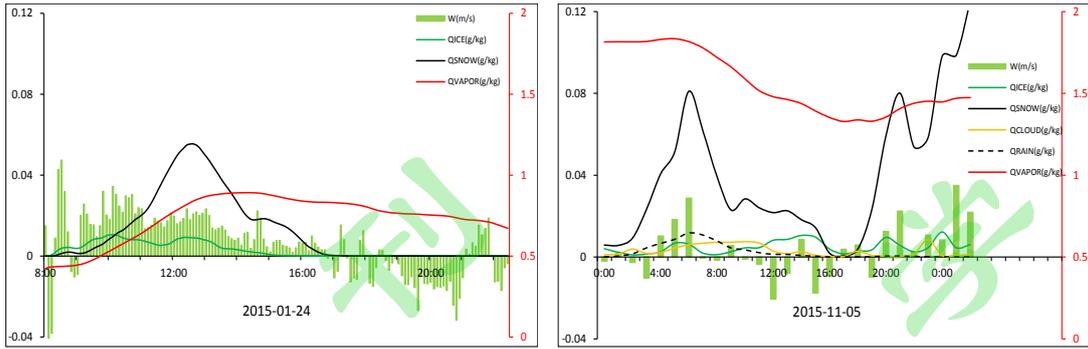


图 11 模拟的海坨山上空物理量随时间变化(a)2015年1月24日(b)2015年11月5日

Fig. 11 Simulated hydrometeor content on 24 Jan 2015(a) and 05 Nov, 2015(b)

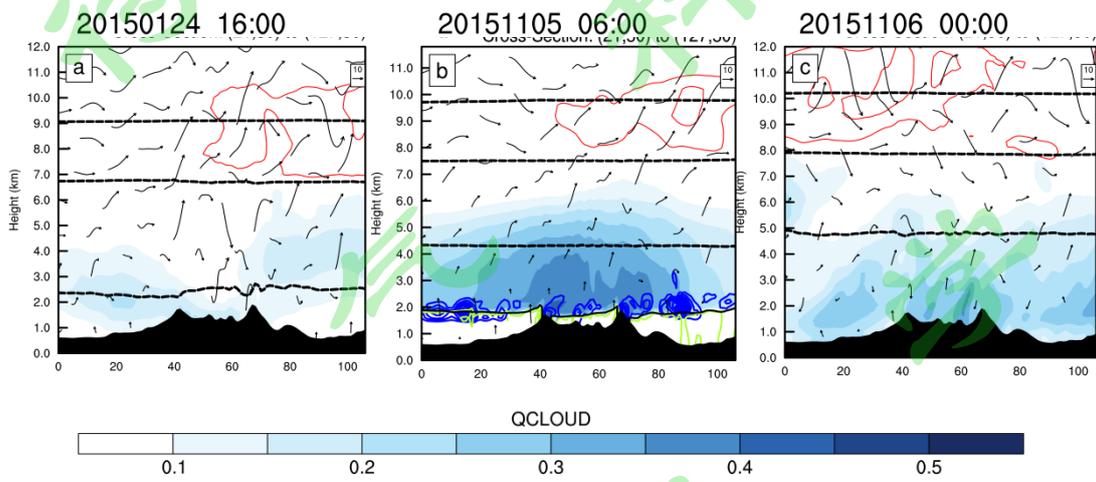
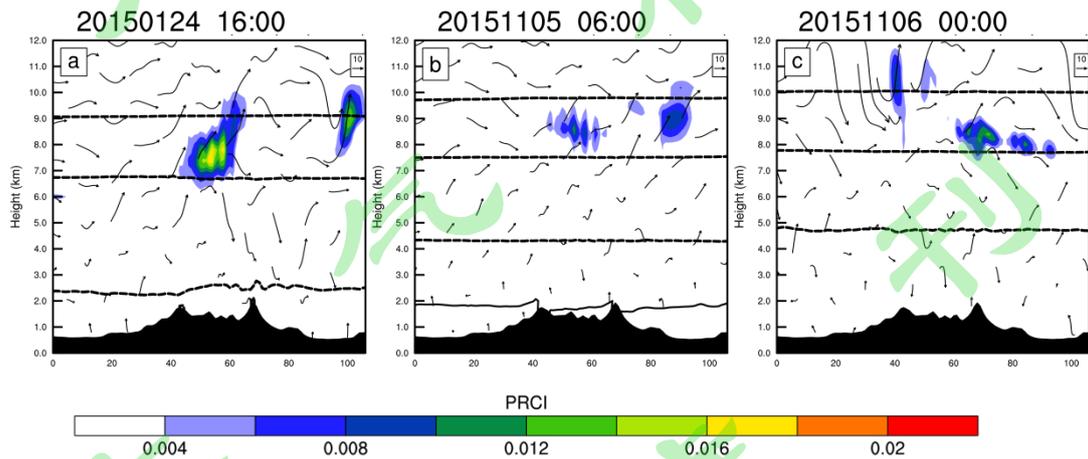


图 12 模拟的水凝物、温度和风场垂直剖面



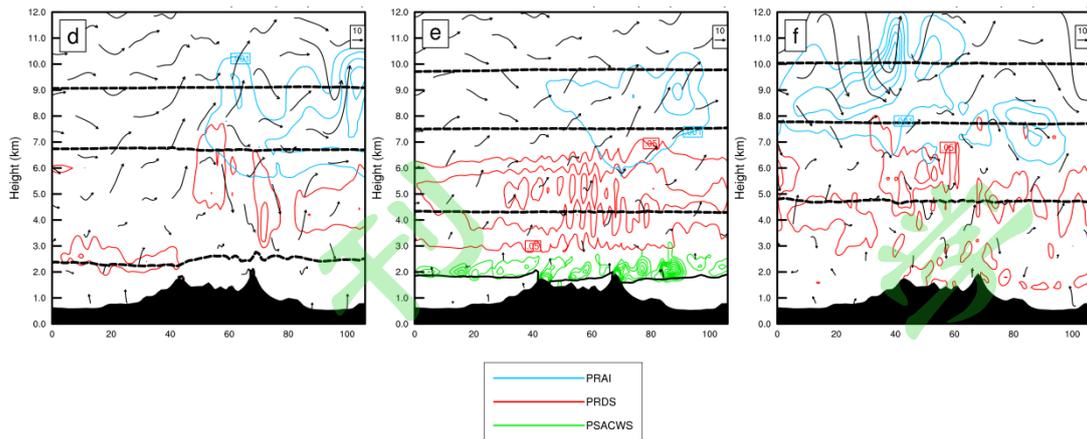


图 13 模拟的海坨山上空雪的源项垂直分布

PRCI (a) 2015 年 1 月 24 日 16: 00LST (b) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST; (c) 6 日 00:00LST
 PRDS、PSACWS、PRAI (d) 2015 年 1 月 24 日 16:00LST (e) 2015 年 11 月 5 日 06:00 LST (f) 6
 日 00:00LST

(彩色阴影: PRAI; 蓝色实线: PRCI; 红色实线: PRDS; 绿色实线: PSACWS)

Fig. 13 Simulated snow sources vertical distribution: PRCI at 16: 00LST on 24
 Jan, 2015 (a), 06:00LST on 05 Nov, 2015 (b), 00:00 on 06 Nov, 2015 (c)

PRDS、PSACWS、PRAI at 16: 00LST on 24 Jan, 2015 (d), 06:00LST on 05 Nov, 2015 (e), 00:00 on
 06 Nov, 2015 (f)

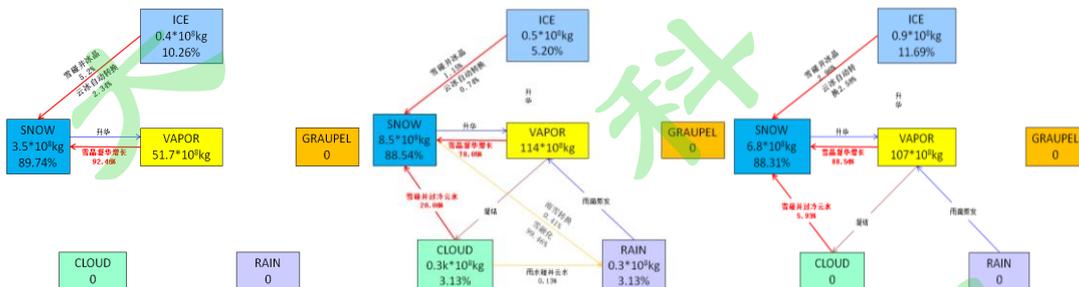


图 14 模拟的海坨山上空源汇项转换 (a) 2015 年 1 月 24 日 16: 00LST (b) 2015 年 11 月 5
 日 06:00 LST; (c) 6 日 00:00LST

Fig. 14 Simulated hydrometer sources transition at 16: 00LST on 24 Jan, 2015 (a), 06:00LST
 on 05 Nov, 2015 (b), 00:00 on 06 Nov, 2015 (c)