

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. GAQ Qian, GUO Xueliang, LIU Xiang'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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 407–420. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172

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 5~6 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 6~12 km 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 5~6 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 1006-9895(2020)02-0407-14

中图分类号 P458.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172

Numerical Simulation and Observation 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 Xiang'e^{2,3,5}, and HE Hui^{2,3,5}

收稿日期 2018-06-08; **网络预出版日期** 2019-07-04

作者简介 高茜, 女, 1984 年出生, 博士, 主要从事云降水物理研究。E-mail: gaoqianbjwm@163.com

通讯作者 郭学良, E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41805114、41675138、41775138, 北京市自然科学基金项目 8164058、8182024、8172023

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41805114, 41675138, 41775138), Beijing Natural Science Foundation (Grants 8164058, 8182024, 8172023)

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 study, observation data in combination with the WRF mesoscale numerical simulation model were used to analyze the microphysical processes of two different snowfall cases in the northern mountain area of Beijing. The results showed the following: (1) Because of the great differences in weather situation and water vapor transport during these two snowfall processes, great differences existed in the microphysical mechanism of these two snowfall cases. In period I of November 5, 2015, due to a strong water vapor transport, there was more liquid water in the cloud, and deposition and rimming processes were the main formation processes for snow particles. However, deposition and coalescence were the main formation processes for snowfall cases on January 24 and in period II of November 5–6 for the weak water vapor transport. (2) In period I of November 5, the air contained ice crystal (9%), snow crystal (72%), cloud liquid water (6%), and rainwater (12%), and the snow particles grew with deposition (78%) and rimming (20%) processes. On January 24, the air contained ice crystal (28%) and snow crystal (72%); meanwhile, period II of November 5–6 had a similar portion: ice crystal (11%) and snow crystal (88%). Moreover, snow particles grew through deposition and coalescence on January 24 and in period II of November 5–6. (3) Updraft has a great influence on the ice crystal and snow crystal growth processes because it results in sufficient water vapor. The vertical motion and water vapor make more snow for strong deposition, rimming, and coalescence processes.

Keywords 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、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 年开展了喀斯喀特项目（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°C 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 1 km，淞附和聚并更强（Hobbs, 1975）。Rauber（1987）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。Reynolds and Kuciauskas（1988）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。Shupe et al.（2008）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。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 and Cotton（1992）、Reisner et al.（1998）、Lin and Bueh（2006）、Lin et al.（2009）、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, 2011~2017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, 科学合理地开展冬季增雪作业具有重要意义, 同时也为保障2022年北京冬季奥运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) 模式是由美国国家大气研究中心 (NCAR)、美国气象环境预报中心 (NCEP) 和美国国家海洋和大气管理局系统预报实验室 (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、1 km。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NCEP和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 (北京时, 下同) 和20:00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1 h、5 min、1 min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 (39.48°N , 116.28°E), 高度97.6 m, 覆盖范围230 km。

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5~6日两次过程NCEP再分析资料500 hPa、700 hPa、850 hPa高度场和1000 hPa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5~6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2a和2b分别为1月24日和11月5日08:00水汽通量在近地面 (1000 hPa) 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 g s kg^{-1} , 11月5日最大为 5 g s kg^{-1} 。

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, 850 hPa以下受偏东风影响, 水汽输送条件好, 500 hPa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4a给出了2015年1月24日11:00~23:00北京全市降水量分布, 图4c为1月24日20:00Micaps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。全市平均降水量0.4 mm, 城区平均0.1 mm, 山区降水量2.5 mm。图5a给出了1月24日16:00的雷

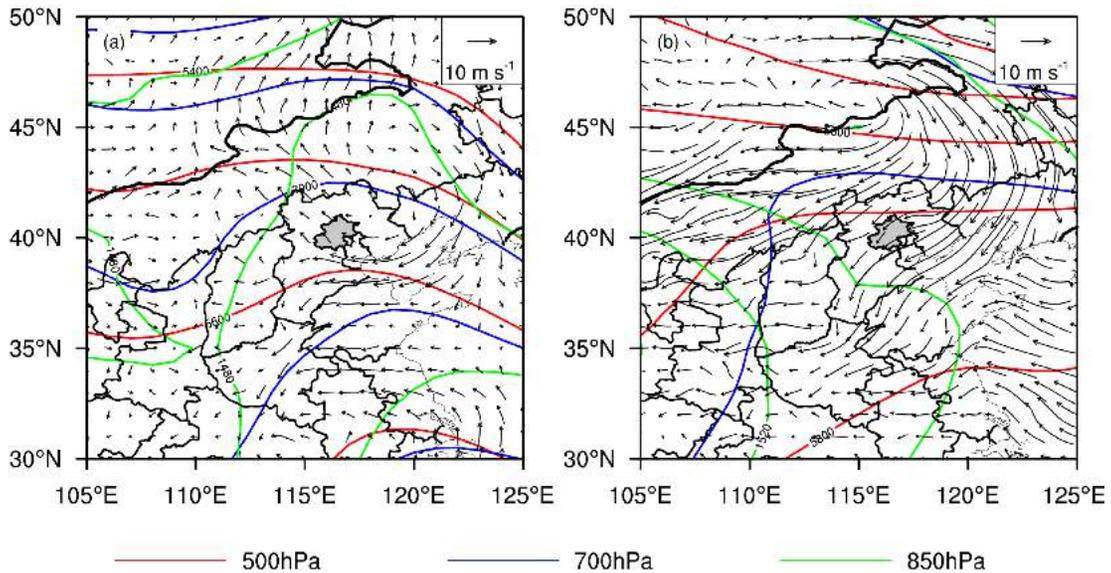


图1 2015年(a)1月24日08:00(北京时间,下同)和(b)11月5日08:00 NCEP再分析资料500 hPa(红色实线)、700 hPa(蓝色实线)、850 hPa(绿色实线)高度场(单位: gpm)和1000 hPa风场(箭头,单位: m s^{-1})

Fig. 1 The NCEP reanalysis geopotential height (units: gpm) at 500 hPa, 700 hPa, and 850 hPa and wind field (vector, units: m s^{-1}) at 1000 hPa at (a) 0800 BT (Beijing time) 24 Jan 2015 and (b) 0800 BT 5 Nov 2015

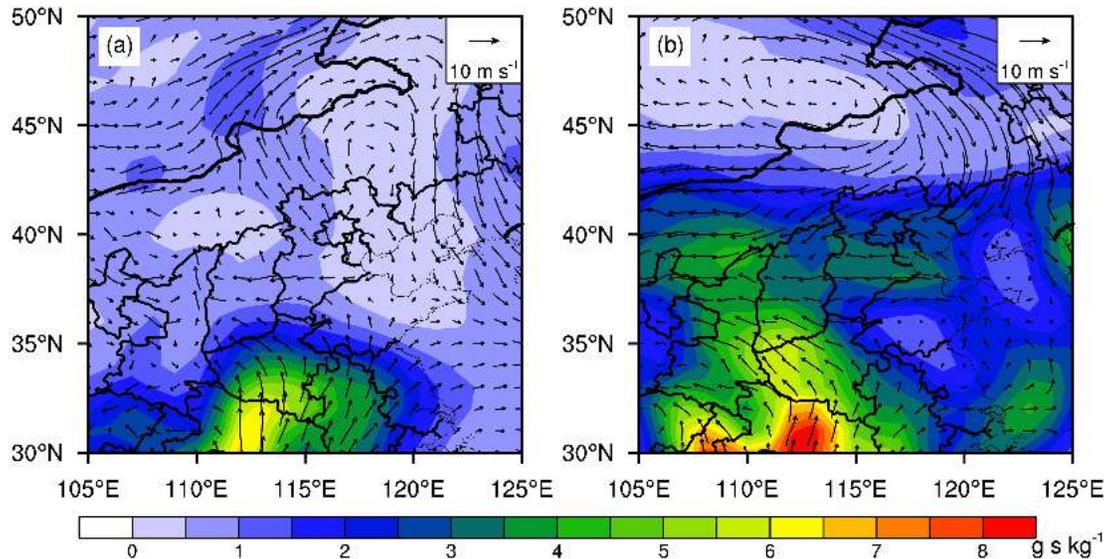


图2 2015年(a)1月24日08:00和(b)11月5日08:00 NCEP再分析资料1000 hPa水汽通量(阴影,单位: g s kg^{-1})和风场(箭头,单位: m s^{-1})

Fig. 2 The NCEP reanalysis water vapor fluxes (shaded, units: g s kg^{-1}) and wind field (vector, units: m s^{-1}) at 1000 hPa at (a) 0800 BT 24 Jan 2015 and (b) 0800 BT 5 Nov 2015

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4 km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5~15 dBZ,仅在弱降水中心强度在20~25 dBZ。

11月5~6日,则是一次雨夹雪转雪的天气。从图4b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30 mm。通过Micaps地面填图(图4d、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5b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4 km以上,在水平方向上分布均匀,有明

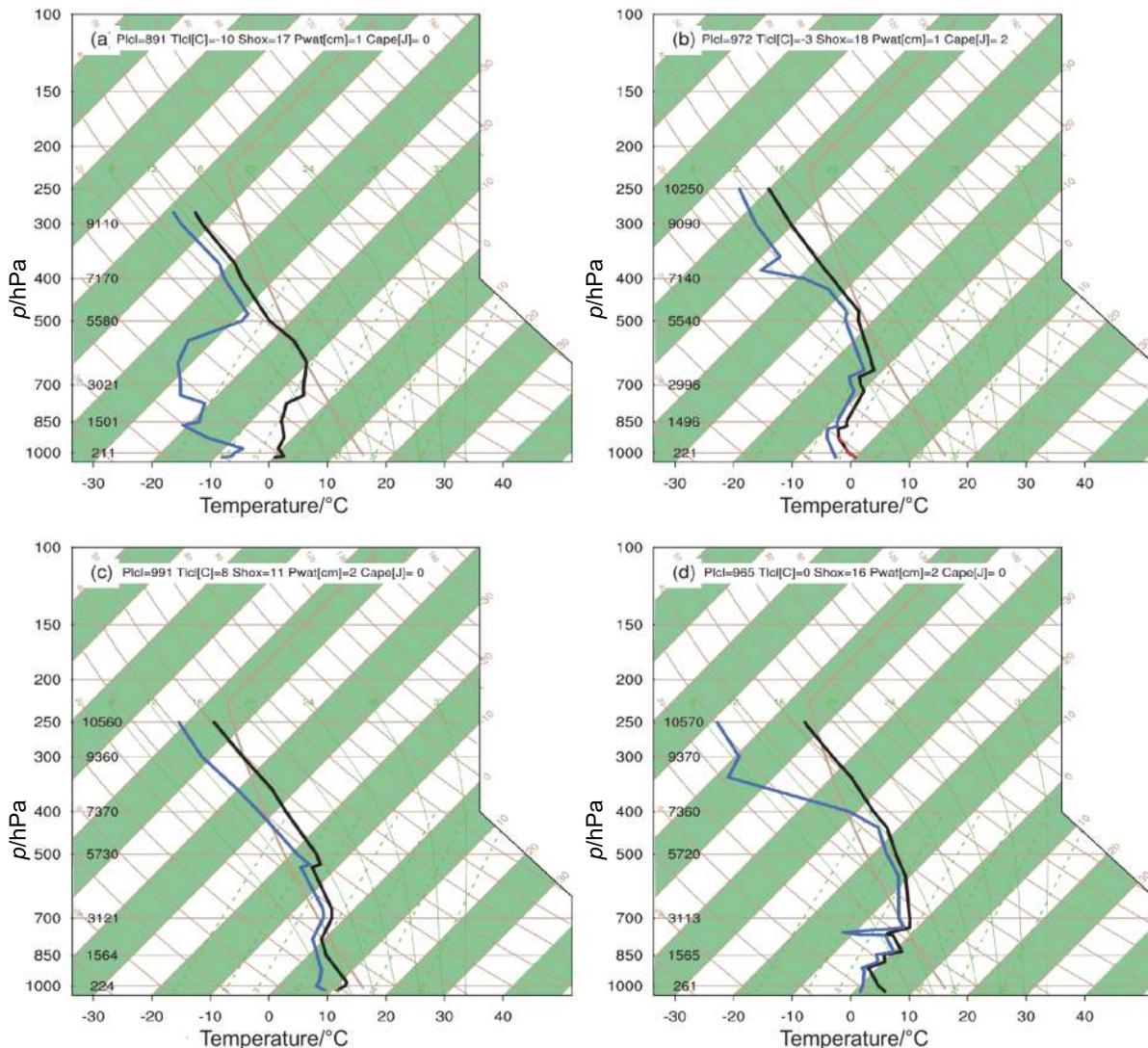


图3 (a) 2015年1月24日 (a) 08:00、(b) 20:00和11月5日 (c) 08:00、(d) 20:00北京探空曲线(黑线: 温度; 蓝线: 露点温度)

Fig. 3 The sounding curve of Beijing at (a) 0800 BT and (b) 2000 BT 24 Jan 2015 and at (c) 0800 BT and (d) 2000 BT 5 Nov 2015. The black line is temperature, and the blue line is dewpoint temperature

显的层状结构, 近地层回波强度在 20~30 dBZ 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。

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地模拟出降水的位置和量级。图6是2015年1月24日14:00~20:00实测和模拟的地面自动站降水量。模拟结果

与实测结果一致, 可以比较好地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 0.5 mm 以上, 西北部最多, 6小时累积最大值 2 mm。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8是2015年11月5日07:00至6日07:00观测与模拟的降水量结果对比。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2015年11月5日北京地区观测和模拟

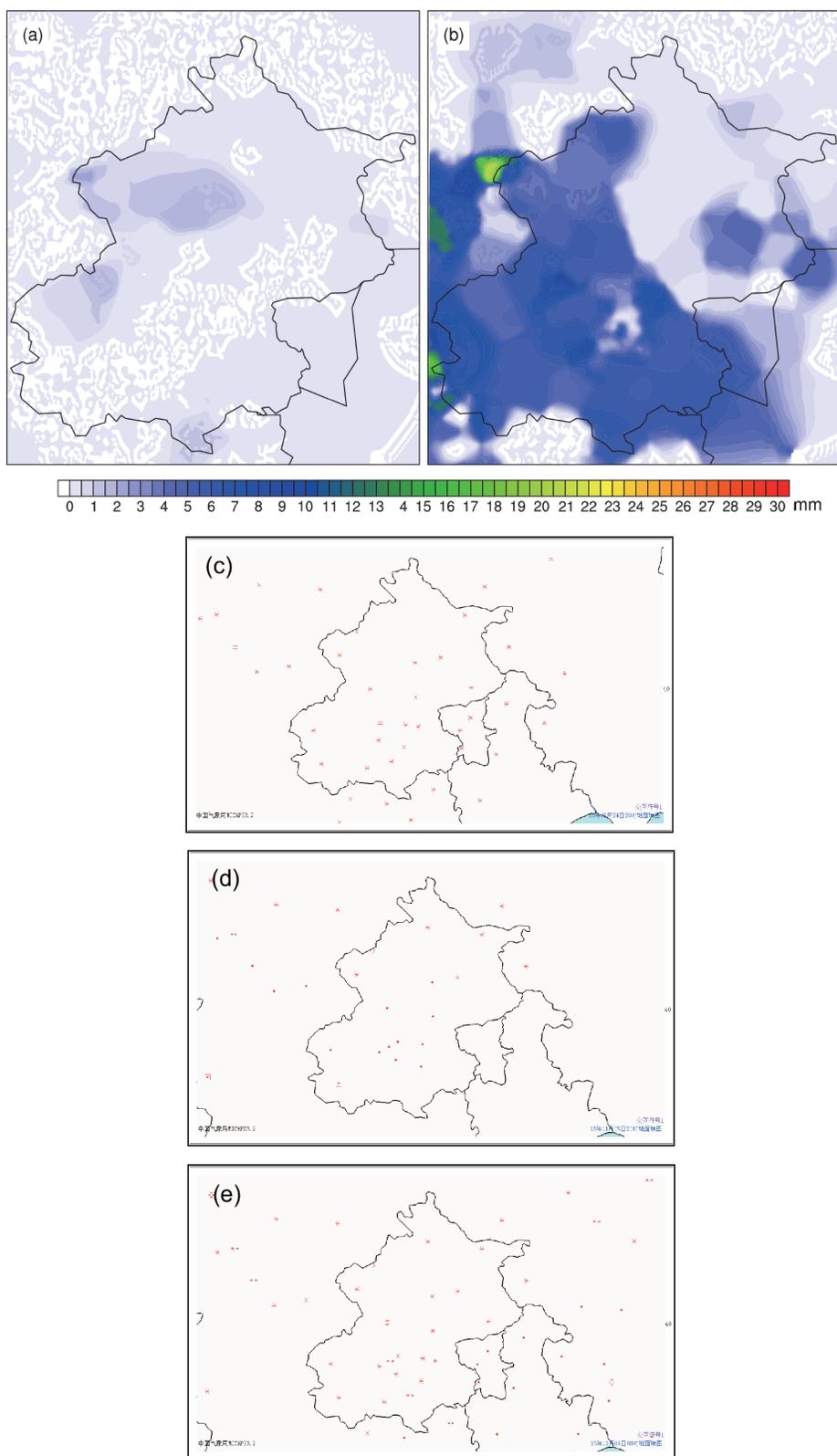


图4 2015年 (a) 1月24日11:00~23:00和(b)11月5日07:00~23:00观测的降水量分布(阴影,单位:mm);2015年(c)1月24日20:00、(d)11月5日20:00和(e)11月6日08:00Micaps地面填图(符号为天气现象,·代表降雨,*代表降雪)

Fig. 4 Observed precipitation (shaded, units: mm) (a) from 1100 BT to 2300 BT 24 Jan 2015 and (b) from 0700 BT to 2300 BT 5 Nov 2015; Micaps surface plotting at (c) 2000 BT 24 Jan 2015, (d) 2000 BT 5 Nov 2015, and (e) 0800 BT 6 Nov 2015 (markers represent weather phenomena, · represent rain, * represent snow)

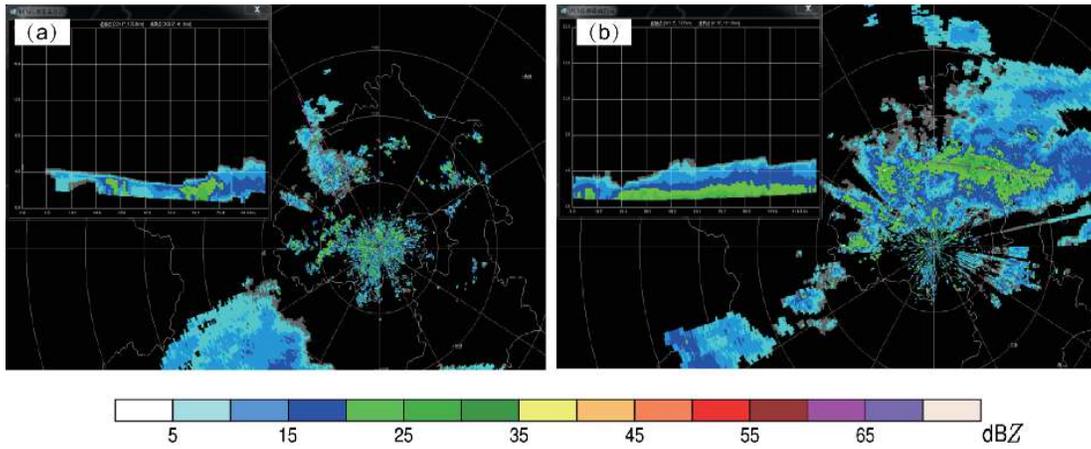


图5 (a) 2015年1月24日16:00和(b)11月5日13:30雷达回波特征(单位: dBZ)
Fig. 5 Observed composed radar echo (units: dBZ) at (a) 1600 BT 24 Jan 2015 and (b) 1330 BT 5 Nov 2015

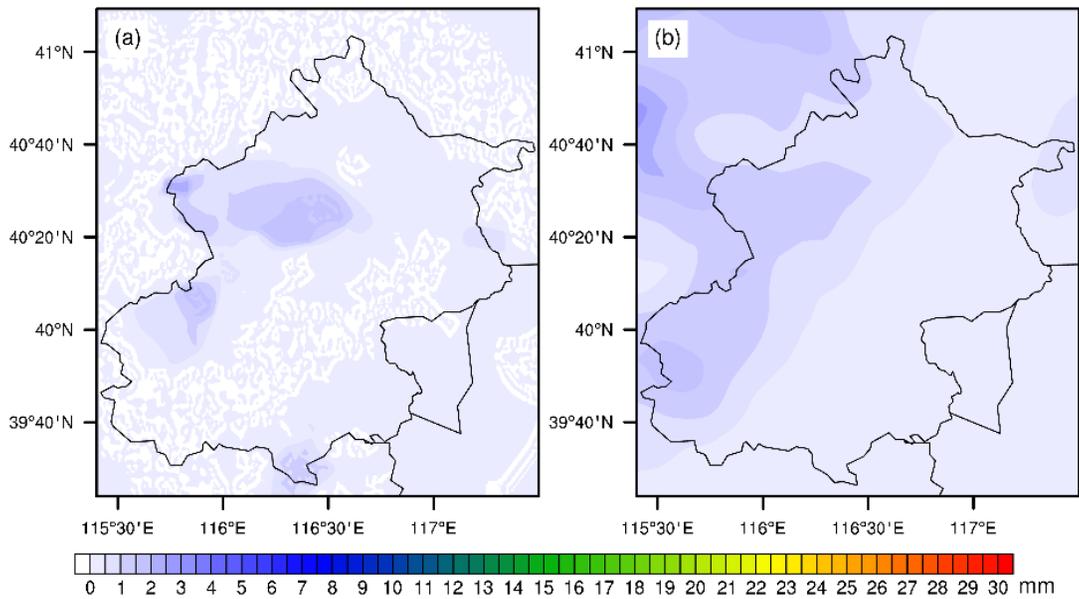


图6 2015年1月24日14:00~20:00 (a) 实测和(b)模拟的降水量(单位: mm)
Fig. 6 (a) Observed and (b) simulated precipitation (units: mm) from 1400 to 2000 BT 24 Jan 2015

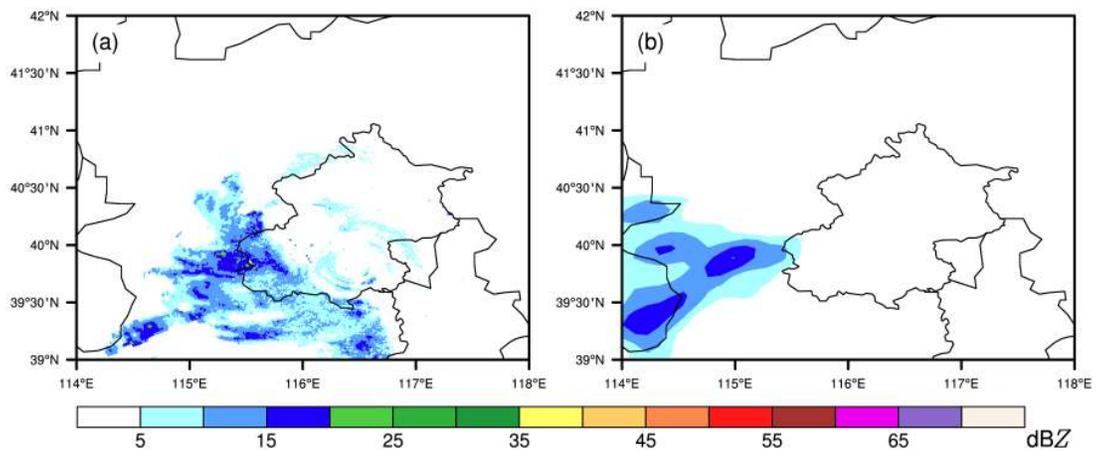


图7 2015年1月24日14:00 (a) 观测和(b)模拟的雷达回波(单位: dBZ)对比
Fig. 7 (a) Observed and (b) simulated composed radar echo (units: dBZ) at 1400 BT 24 Jan 2015

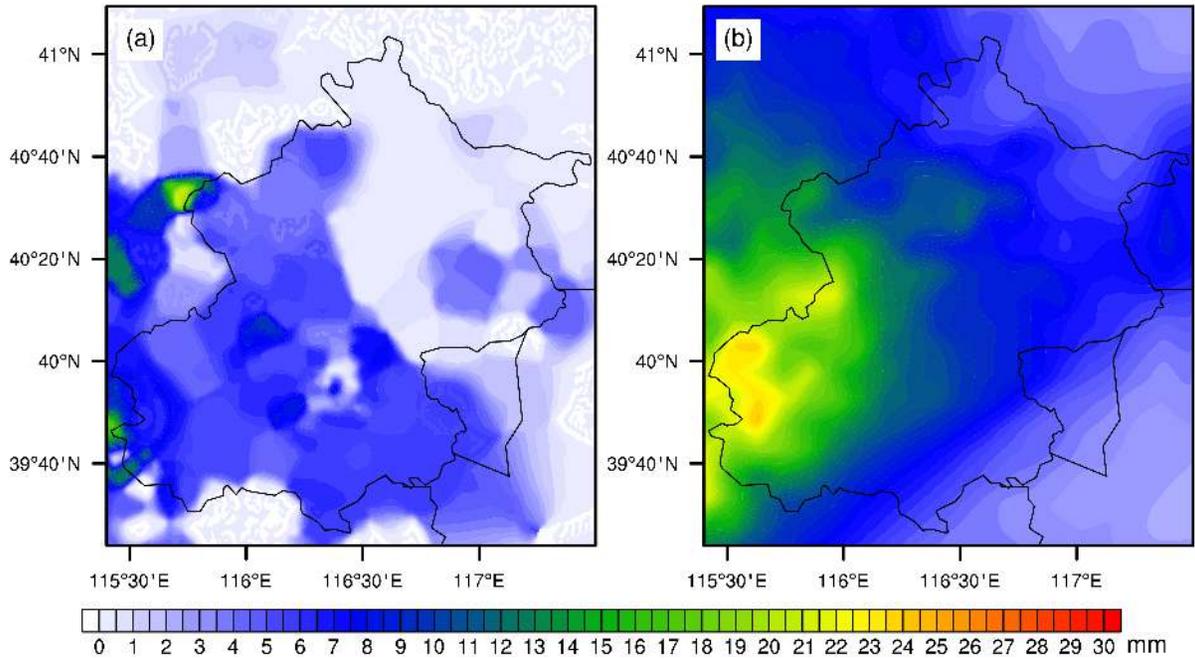


图 8 2015 年 11 月 5 日 07:00 至 6 日 07:00 (a) 观测与 (b) 模拟的降水量 (单位: mm)

Fig. 8 (a) Observed and (b) simulated precipitation (units: mm) from 0700 BT 5 Nov to 0700 BT 6 Nov 2015

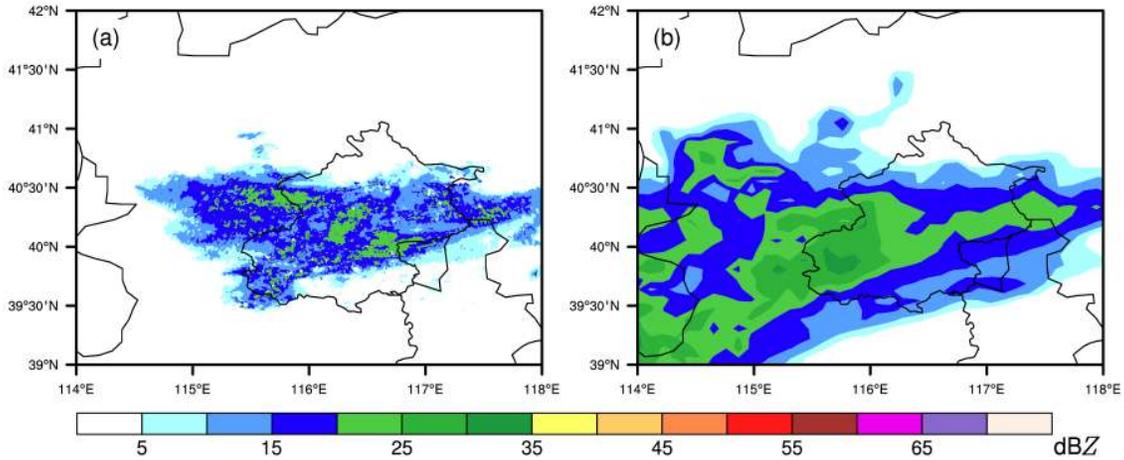


图 9 2015 年 11 月 5 日 10:00 (a) 观测和 (b) 模拟的雷达回波 (单位: dBZ)

Fig. 9 (a) Observed and (b) simulated radar echo (units: dBZ) at 1000 BT 5 Nov 2015

的雷达回波, 10:00 北京大部分地区被回波覆盖, 最大强度 35 dBZ, 海坨山上空有回波, 强度 20 dBZ。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。

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进行对比分析, 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 2000 m 左右, 主要受 850 hPa 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 5~6 日两个时刻以东风为主, 两次过程在山区都

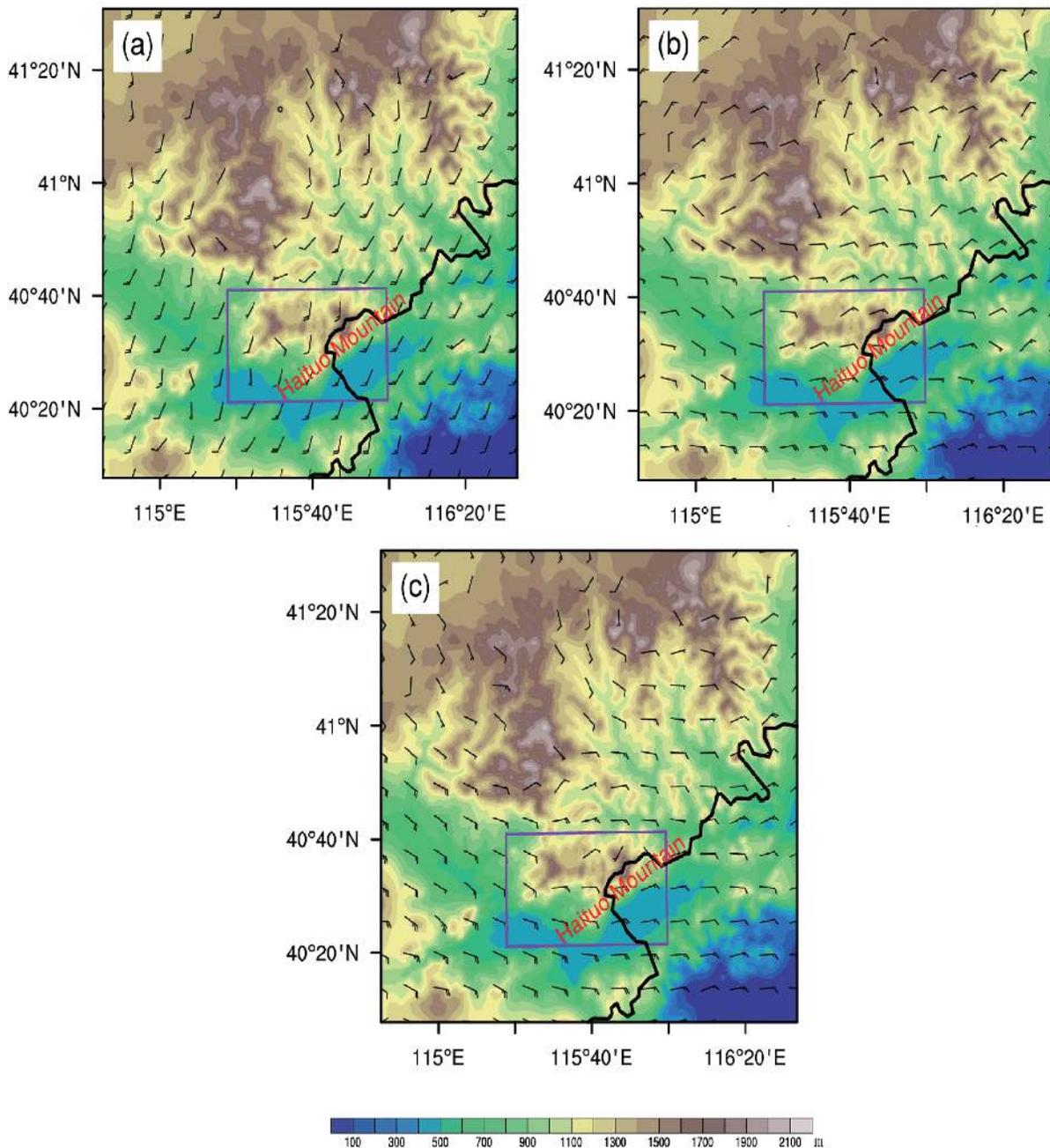


图 10 (a) 2015 年 1 月 24 日 16:00、(b) 2015 年 11 月 5 日 06:00 和 (c) 6 日 00:00 地面风场 (单位: knots per hour) 分布 (彩色阴影: 地形; 紫色矩形: 海坨山区域)

Fig. 10 Surface wind (units: knots per hour) at (a) 1600 BT 24 Jan, (b) 0600 BT 5 Nov and (c) 0000 BT 6 Nov 2015 (colorful shading: terrain height, purple rectangle: Haiyuan mountain area)

受地形影响, 有一定的转向。

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, 冰晶混合比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, 水汽和雪晶混合比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,

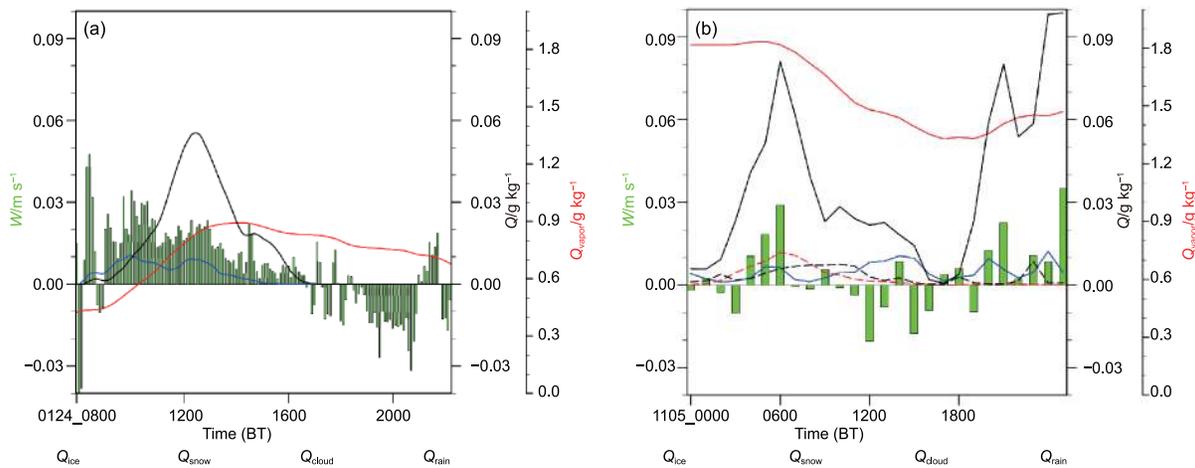


图 11 模拟的 2015 年 (a) 1 月 24 日和 (b) 11 月 5 日海坨山上空垂直速度 (W : 绿色直方图, 单位: m s^{-1})、云冰混合比 (Q_{ice} : 蓝色实线, 单位: g kg^{-1})、雪晶混合比 (Q_{snow} : 黑色实线, 单位: g kg^{-1})、水汽混合比 (Q_{vapor} : 红色实线, 单位: g kg^{-1})、云水混合比 (Q_{cloud} : 红色虚线, 单位: g kg^{-1})、雨水混合比 (Q_{rain} : 黑色虚线, 单位: g kg^{-1}) 随时间变化

Fig. 11 Simulated vertical wind speed (W : green histogram, units: m s^{-1}), cloud ice mixing ratio (Q_{ice} : blue line, units: g kg^{-1}), snow mixing ratio (Q_{snow} : black line, units: g kg^{-1}), water vapor mixing ratio (Q_{vapor} : red line, units: g kg^{-1}), cloud water mixing ratio (Q_{cloud} : red dashed line, units: g kg^{-1}), rain water mixing ratio (Q_{rain} : black dashed line, units: g kg^{-1}) on (a) 24 Jan and (b) 5 Nov 2015

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。这一时段水汽混合比随时间变化不大, 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, 雪晶混合比出现另一个极大值。

两次过程区域平均的冰晶混合比差别不大, 都在 0.02 g kg^{-1} 以下; 11 月 5~6 日雪晶和水汽混合比明显高于 1 月 24 日。1 月 24 日区域平均的雪晶混合比最大约 0.05 g kg^{-1} , 11 月 5~6 日最大约 0.08 g kg^{-1} ; 1 月 24 日区域平均的水汽混合比最大约 0.8 kg kg^{-1} , 11 月 5~6 日最大约 1.9 kg kg^{-1} 。

从这两次过程看, 垂直速度与冰晶、雪晶和水汽混合比是正相关的。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 12a 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 7~12 km 上升气流较强区; 雪晶主要分布在 1~7 km 高度, 山区附近由于地形较高, 雪晶

已降落到地面, 最大值 0.25 g kg^{-1} 。图 12b、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 7.5 km 以上高度, 雪晶主要分布在 2~7 km 之间, 雪晶混合比最大值为 0.35 g kg^{-1} 。0°C 层高度在 2 km 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 8 km 范围内, 都有雪晶的存在。

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, 雪晶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。云中冰晶转换成雪晶 (Prai) 是雪晶生成的主要机制, 生成“雪胚”。雪胚生成后, 通过凝华 (雪晶凝华增长 Prds, PPRDS)、聚并 (雪晶碰并云冰, Prci)、淞附 (雪晶碰并过冷云水, Psacws) 三种过程增长。

图 13a、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 (Prai) 的分布。云冰转换

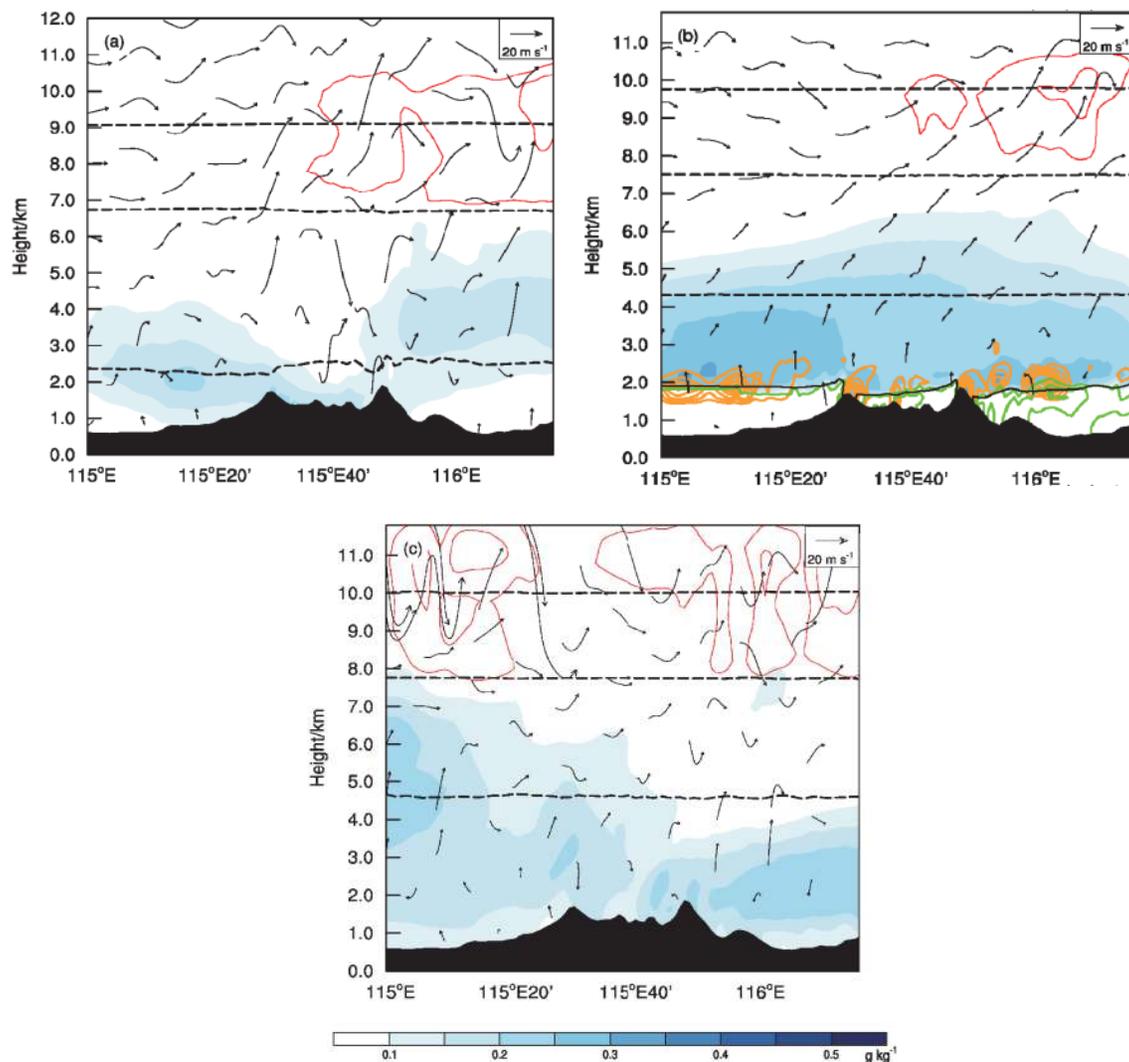


图 12 模拟的 2015 年 (a) 1 月 24 日 16:00、(b) 11 月 5 日 06:00 和 (c) 6 日 00:00 水凝物混合比、温度 (0°C : 黑色实线; 黑色虚线, 从上往下依次为 -10°C 、 -20°C 、 -30°C 、) 和 风场 (黑色箭头, 单位: m s^{-1}) 垂直剖面。云冰混合比 (红色实线, 单位: g kg^{-1})、雪晶混合比 (蓝色阴影, units: g kg^{-1})、云水混合比 (橙色实线, units: g kg^{-1})、雨水混合比 (绿色实线, units: g kg^{-1})、地形 (黑色阴影) 混合比

Fig. 12 Simulated hydrometeor mixing ratio, temperature (0°C , black line, black dashed line, -10°C 、 -20°C 、 -30°C), and wind vertical distribution (black vector, units: m s^{-1}) at (a) 1600 BT 24 Jan, (b) 0600 BT 5 Nov, and (c) 0000 BT 6 Nov 2015. Cloud ice mixing ratio (red line, units: g kg^{-1}), snow mixing ratio (blue shaded, units: g kg^{-1}), cloud water mixing ratio (orange line, units: g kg^{-1}), rain water mixing ratio (green line, units: g kg^{-1}), terrain (black shaded)

为雪晶主要集中在 $6\sim 12\text{ km}$ 高度, 高值区与云冰分布的高值区一致。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 13d、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 (表 1)。共同点为雪晶碰并云冰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。

分别对山区上空 (图 10 紫色方框区域) 所有格点的 5 种水凝物 (云冰、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 (图 14)。可以看出, 1 月 24 日过程, 空中云水、雨水、霰均为 0, 云冰占总和的 10.26%, 雪晶占 89.74%。由于空中过冷水缺

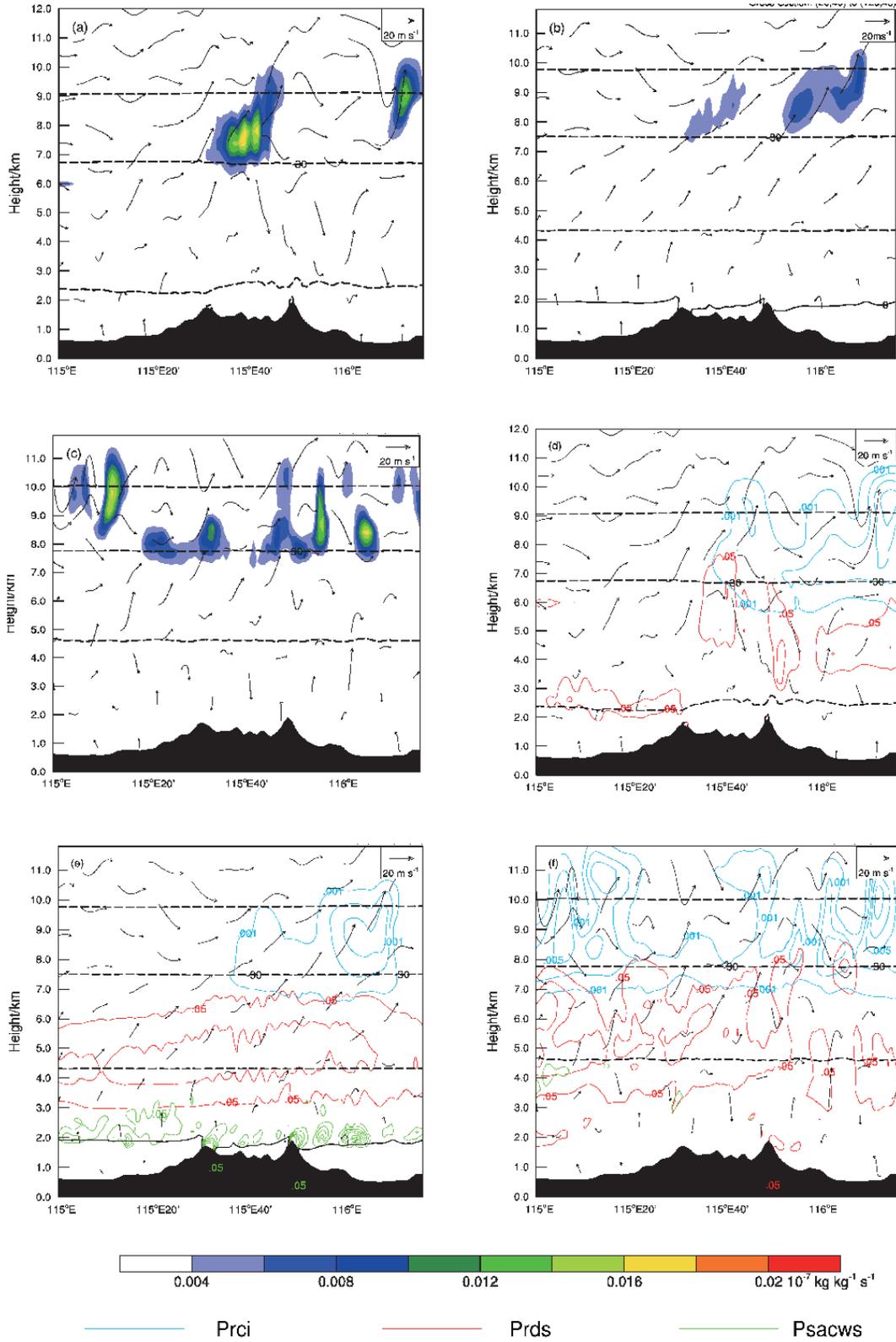


图 13 模拟的 2015 年 (a) 1 月 24 日 16:00、(b) 11 月 5 日 06:00 和 (c) 11 月 6 日 00:00 海坨山上空云冰转化为雪晶 (Prai: 彩色阴影, 单位: $10^{-7} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$) 垂直分布以及 2015 年 (d) 1 月 24 日 16:00、(e) 11 月 5 日 06:00 和 (f) 6 日 00:00 雪晶凝华增长 (Prds: 红色实线)、雪胚碰并过冷水云冰附增长 (Psacws: 绿色实线)、雪晶碰并云冰增长 (Prci: 蓝色实线) 垂直分布 (单位: $10^{-7} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 13 Simulated snow sources vertical distribution (units: $10^{-7} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$): Prai (shaded) at (a) 1600 BT 24 Jan, (b) 0600 BT 5 Nov, and (c) 0000 BT 6 Nov 2015; Prds (red line), Psacws (green line), Prci (blue line) at (d) 1600 BT 24 Jan, (e) 0600 BT 5 Nov, (f) 0000 BT 6 Nov 2015

过程。

从天气形势看, 1月24日为高空槽配合地面辐合区, 850 hPa(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, 850 hPa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, 这两次过程中垂直速度与冰晶、雪晶和水汽混合比是正相关的。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, 云冰、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, 山区上空除了云冰、雪晶, 还存在云水和雨水, 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 (References)

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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12321

Hobbs P V. 1975. The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding. Part I: Natural conditions [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 13(14):

783-804. doi:10.1175/1520-0450(1975)014<0783:TNOWCA>2.0.CO;2

雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. *大气科学*, 32(4): 967-974. Lei Hengchi, Hong Yanchao, Zhao Zhen, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 967-974. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.21

Lin Wenshi, Bueh C. 2006. The cloud processes of a simulated moderate snowfall event in North China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23(2): 235-242. doi:10.1007/s00376-006-0235-7

Lin Wenshi, Meng Jinping, Sui C H, et al. 2009. A study of the microphysical processes in a numerically simulated heavy snowfall event in North China: The sensitivity of different snow intercept parameters [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 104(1-2): 1-11. doi:10.1007/s00703-008-0007-2

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 [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 31(1): 26-50. doi:10.1175/1520-0450(1992)031<0026:EOTPFW>2.0.CO;2

Rauber R M. 1987. Characteristics of cloud ice and precipitation during wintertime storms over the mountains of northern Colorado [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 26(4): 488-524. doi:10.1175/1520-0450(1987)026<0488:cociap>2.0.co;2

Reisner J R, Rasmussen R M, Bruintjes R T. 1998. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 124(548): 1071-1107. doi:10.1002/qj.49712454804

Reynolds D W, Kuciauskas A P. 1988. Remote and in situ observations of Sierra Nevada winter mountain clouds: Relationships between mesoscale structure, precipitation and liquid water [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 27(2): 140-156. doi:10.1175/1520-0450(1988)027<0140:raisoo>2.0.co;2

Shupe M D, Daniel J S, de Boer G, et al. 2008. A focus on mixed-phase clouds: The status of ground-based observational methods [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 89(10): 1549-1562. doi:10.1175/2008BAMS2378.1

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 [J]. *气象学报*, 65(1): 29-44. Sun Jing, Wang Pengyun, Li Xiang, et al. 2007. Numerical study on microphysical processes of two different snowfall cases in North China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 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 [J]. *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 (in Chinese)*, 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 [J]. *气象学报*, 47(1): 73-81. You Laiguang, Wang Shourong, Wang Dingfeng, et al. 1989. The microphysical structure of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 47(1): 73-81. doi:10.11676/qjxb1989.009