

# 北京地区一次降雪系统大气水凝物输送特征及降雪微物理机制的数值模拟研究\*

刘香娥<sup>1,2,3,4</sup> 何晖<sup>1,2,3,4</sup> 陈羿辰<sup>1,2,3,4</sup> 高茜<sup>1,2,3,4</sup> 王永庆<sup>1,2,3,4</sup> 杨燕<sup>1,2,3,4</sup>

- 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. 中国气象局北京城市气象研究院, 北京, 100089
4. 中国气象局华北云降水野外科学试验基地, 北京, 101200

**摘要** 北京冬季降雪云系存在丰富的可开发利用的云水资源。出于人工增雪研究和充分开发云水资源的需要, 文中对北京 2019 年 11 月 29 日发生的年度首场降雪进行了观测, 对其资料做了分析和中尺度数值模拟, 研究了降雪过程的宏观特征、水凝物输送及降雪的微物理机制。结果表明: 影响本次北京降雪的是稳定性层状冷云云系, 水凝物主要从北京区域的西边界和南边界输送到区域内, 而从东边界和北边界流出, 具有西向和南向分量的湿气流是降雪云系水物质的输送通道。降雪云中的水凝物基本全为冰晶和雪, 有少量的云水, 整层云系都含有非常丰富水汽并且贯穿整个降雪时段。在冰面过饱和环境中, 水汽凝华 (Prds) 是雪的主要增长过程; 其次是云冰增长成雪 (Prci) 和云冰聚合成雪 (Prai) 的过程。

**关键词:** 云水资源, 冬季降雪, 数值模拟

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2110.20212

## Numerical Simulation Studies of Atmospheric Hydrometeor Transport Characteristics and Snowfall Microphysical Mechanism During A Snowfall System in Beijing

LIU Xiang'e<sup>1,2,3,4</sup>, HE Hui<sup>1,2,3,4</sup>, Chen Yi Chen<sup>1,2,3,4</sup>, GAO Qian<sup>1,2,3,4</sup>, Wang YongQing<sup>1,2,3,4</sup>, Yang Yan<sup>1,2,3,4</sup>

1 Beijing Weather Modification Center, Beijing 100089

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

**收稿日期: 2020-10-15; 网络预出版日期**

**作者简介:** 刘香娥, 女, 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观测与数值模拟研究 E-mail: hehui@bj.cma.gov.cn

\*资助项目: 国家重点研发计划资助(2016YFA0601704)、国家自然科学基金项目(42005078、41675138)、北京市自然科学基金资助项目(8182024)。

**Abstract** There are abundant cloud water resources for development and utilization in the snowfall cloud system in winter in Beijing. For the needs of artificial snow enhancement research and full development of cloud water resources, the first annual snowfall in Beijing on November 29, 2019 was observed. The data are analyzed and numerical simulation is carried out. The macro observation characteristics of the snowfall process are studied, and the atmospheric hydrometeor transport characteristics and microphysical mechanism of the snowfall are also analyzed through the simulation results. The results show that it is the stable stratified cold cloud system that affects the snowfall in Beijing; water vapor and water condensate are mainly transported into the region from the west and south boundaries of the Beijing area, and flow out from the east and north boundaries. With a westward and southward component of the moist airflow is the cloud hydrometeor transport channel for the snowfall cloud system. The water condensate in the snowfall cloud is basically ice crystals and snow. There is a small amount of cloud water. The entire layer of cloud system contains very rich water vapor and runs through the entire snowfall period. In ice-saturated environment, water vapor deposition (Prds) processes are the main source of the snow; followed by the automatic conversion cloud ice to snow (Prci) and the accretion cloud ice by snow (Prai). **Key words:** cloud water resources, snowfall in winter, numerical simulation

## 1 引言

云水资源是指存在于大气中一定时段一定区域内参与大气水循环过程,没有形成地面降水还留在空中的凝结水总量,是通过人工干预可以直接开发利用的水资源。除了降水云系,冬季的降雪云系也存在丰富的云水资源,并且降雪云系是我国北方实施人工增雪作业的主要对象之一,冬季降雪云系的水凝物输送特征和降雪机制研究对缓解北京地区的水资源短缺、增蓄储水、缓解旱情等具有重要的科学和现实意义。

近些年来,国内外学者对区域的大气水循环和水分收支等方面开展了大量研究,取得了一定进展(徐淑英, 1958; Lufkin, 1959; 施晓晖等, 2008; 杨青等, 2013)。水汽输送状况的不同可造成区域水汽含量及收支平衡的差异,并最终导致地面降雨/雪的变化。Tao et al. (1983) 分析了飚线系统的水分收支,指出对流区和层状区对于地面降水都有重要作用,对流区在产生层状区降水方面起主要作用。中国东部暴雨区的水汽主要是从南边界和西边界流入,东边界和北边界流出,且水汽的流入流出主要集中在中低层(胡国权和丁一汇, 2003)。任宏利等(2004)通过分析中国西北东部 1962-2002 年逐日降水和 NCAR/NCEP 再分析资料,阐

述了该地区春季降水及其水汽输送的气候特征和异常变化。同样有学者运用 ERA-Interim 再分析资料结合 HYSPLIT 后向迹模式等对三江源地区、青藏高原、华北等多地的气水汽输送特征和轨迹来源进行了分析,得到不同地区不同季节因环流背景、气候特征以及地形差异等导致其水汽输送特征均有不同(王婧羽等, 2014; 龚佃利和边道相, 2002; 强安丰等, 2019; 马京津和高晓清, 2006)。

云中水汽通过凝结、凝华等过程产生水凝物,不同水凝物之间的相互转化是云发展与降雨、降雪产生的重要微物理过程。云中水凝物的输送可以增加或减少局地大气中云凝结物的含量,改变云凝结物的空间分布状况,影响云的微观物理过程,进而促进或抑制降水云系的发展演变(齐彦斌等, 2009)。由于云系内微物理过程很难由观测工具探测得到,因此中尺度数值模式便成为很好的研究工具。平凡等(2007)应用二维云分辨尺度模式研究了热带地区对流系统的热量和水汽收支情况,结果表明大尺度垂直平流的加湿和冷却在浅对流中发挥主导作用。孙晶等(2007)利用中尺度模式 MM5 分别模拟了中国北方地区两次不同类型的降雪过程,分析了降雪的水成物相态及其源汇项分布特点,并探讨了云物理过程对降水热力、动力过程的反馈作用。周非非等(2010)运用中尺度数值模式对河南省一次层状云降水云系的水分收支状况进行模拟分析,得到河南省域以外的水汽和水凝物主要通过西边界和南边界输送到区域内,水汽降水效率约 31.1%,降水由冷云和暖云过程共同产生,冰粒子凝华增长对雨水的贡献最大。李宏宇等(2006)利用模式对一次冷锋层状云降水过程进行了区域水分循环收支状况的估算,结果表明在积层混合云区域的拟降水效率达 70% 以上。陶玥等(2015)对北京地区一次积层混合云降水过程进行了云系的宏微观结构和降水特征、云系的水分收支及降水效率数值模拟,结果得到北京区域降水过程其水汽和水凝物主要来自西边界和南边界两支水源地,水物质输送到区域内并且基本达到平衡。唐洁等(2018)运用数值模式研究了青藏高原对流云微物理结构、云中水分转化和区域水分的收支特征,得到高原云系降水主要来自外界输入的水汽转化而成,霰粒子融化是地面降水的主要产生来源。高茜等(2020)、黄钰等(2020)对北京地区的降雪过程进行了观测、垂直探测仪器资料分析和中尺度 WRF 数值模拟,分析了降雪云系的观测和微物理特征。

前期对降水过程的水分收支和微物理成因机制分析的较多,而对北京地区冬季降雪云系的区域水凝物输送及降雪云微物理机制的研究较少。弄清北京地区冬季降雪云系水凝物的输送特征及微物理转化机制对于开发利用北京地区

冬季的空中云水资源具有重要意义，这也是人工增雪潜力研究的基础和需要。本文对北京地区 2019 年冬季的首场明显降雪过程进行观测资料分析和中尺度数值模拟，在对模拟结果进行验证的基础上，分析研究了降雪云系宏微观结构、云中水凝物转化和区域输送特征，并对降雪产生的微物理机制进行了探讨。

## 2 降雪过程观测分析

2019 年 11 月 29 日午后至夜间（北京时，下同），北京迎来入冬首场全市范围降雪。此次过程，北京全市平均降水量 3.9mm（图 1a），城区平均 3.1mm，城市副中心平均 2.9mm；最大降雪出现在延庆海子口 13.7mm。城区和东部地区积雪深度 1-3cm，西部山区和北部地区积雪深度 2-5cm，最大延庆本站达到 11cm。

从天气形势来看，29 日 20 时 500hPa 图上，在河套以西有低槽不断东移并逐渐加深加强，850hPa 图显示北京地区处于高压后部（图略），槽前的偏南暖湿气流为华北地区提供了丰富的水汽，为北京地区的成云致雪提供了很好的条件，此次是高空西来槽影响的稳定性层状云降雪过程。

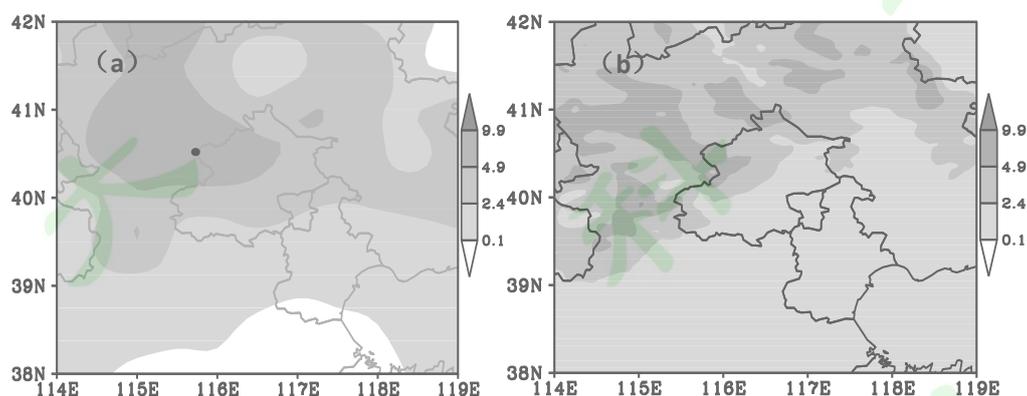


图 1 2019 年 11 月 29 日 08 时~30 日 08 时 24h 地面降水量(单位:mm):(a)实况;(b)模拟，黑点为闫家坪站位置。

Fig. 1 (a) Observed and simulated (b) 24-hour cumulative rainfall (units: mm) from 08:00 BT (Beijing time) 29 to 08:00 BT 30 November 2019. The black dot is the location of YanJiaPing Station

卫星云顶亮温图（图 2）显示，本次降雪过程的影响云系分为两个阶段，第一阶段为 29 日下午至傍晚，此时段云系主要位于北京西部山区和西南至河北境内，水平范围不大，云顶亮温较低，达到 $-40^{\circ}\text{C}$ 以下（图 2a），对应地面降雪的第一阶段，最大小时降水量约 2mm。第二阶段为 29 日夜间，受高空槽影响，云系逐渐东移发展加强，20 时移入北京境内，22 时云系覆盖整个北京地区，云顶温度整体低于 $-40^{\circ}\text{C}$ （图 2b），最大小时降水量也为 2mm 左右。30

日凌晨随着高空槽继续东移，北京和河北地区云系逐渐东移减弱消散，北京区域的降雪逐渐结束。

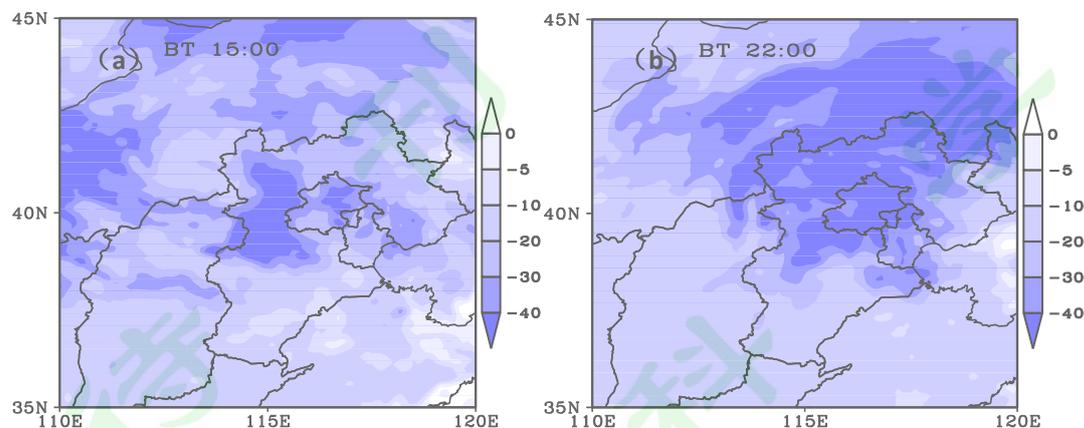


图 2 11 月 29 日 FY-2G 卫星云顶亮温图 (a: 15:00, b: 22:00)

Fig 2 TBB images from FY-2G on top of cloud on 29 November 2019. (a: 15:00; b: 22:00)

北京市人工影响天气中心（原北京市人工影响天气办公室）2014 年在海坨山建立的闫家坪高山综合观测站（ $40^{\circ}31'40''\text{N}$ ， $115^{\circ}44'51''\text{E}$ ，海拔 1344 m）观测的此次降雪过程气象要素变化图显示（图 3）：29 日午后闫家坪站的相对湿度不断增大至 90% 以上，而地面温度持续维持在  $-10^{\circ}\text{C}$  以下，在地形抬升和低温增湿的条件下，15 时之后闫家坪站开始降雪。图中可见闫家坪站也有两个时段的半小时降雪量峰值，分别为 18 时的 0.3mm 和 23 时的 0.5mm，本站过程降水总量为 4.1mm，达到了中雪量级，附近西大庄科站的总降雪量 7.6mm，达到了大雪的量级（图略）。该站的云雷达回波演变显示：回波总体强度不大，最大为 20dBz 左右，两个降雪峰值处云雷达的回波强度和高度都给出了相对应的反映，回波顶高达到 6km 和 8km 附近（图 4b）。

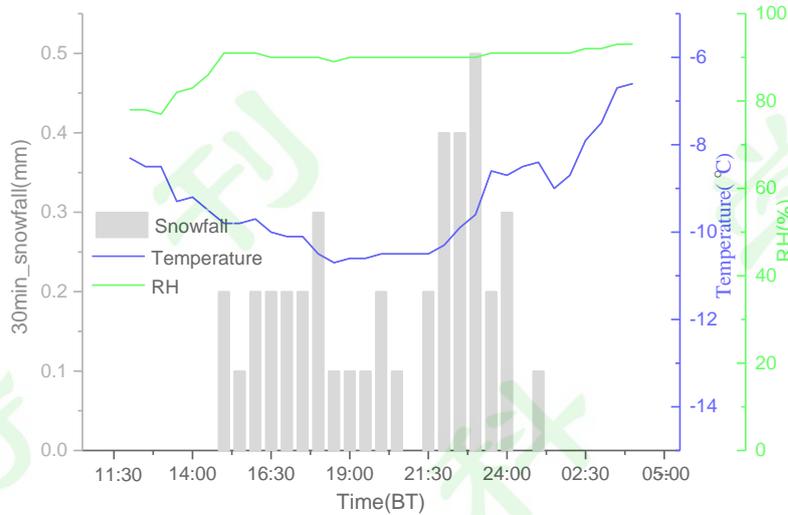


图3 闫家坪站气象要素时间演变图 (柱状图:降水量; 蓝线:气温; 绿线:相对湿度)  
 Fig 3. Time evolution of various elements at Xi DaZhuangKe meteorological station (columnar: precipitation(mm); blue: temperature(°C); green: relative humidity(%))

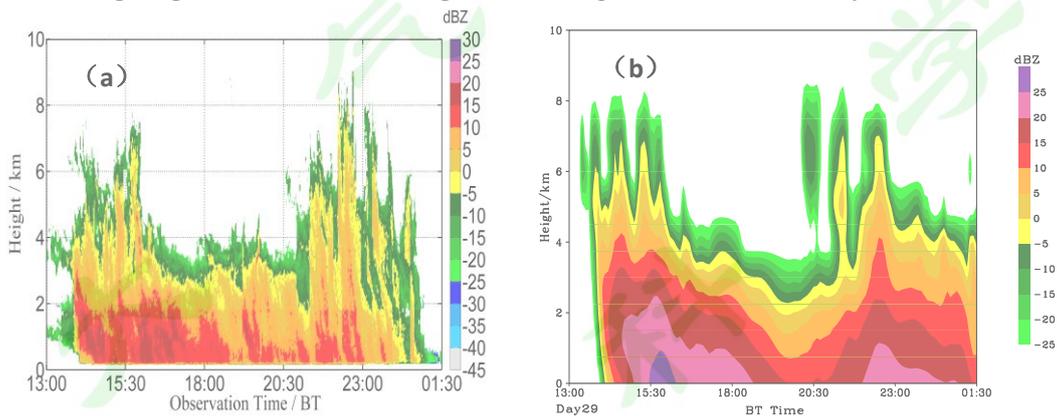


图4 闫家坪站观测的云雷达回波(a)与模拟雷达回波(b)的时间-高度演变图  
 Fig 4. Time-Height evolution of echo intensity observed by cloud radar

### 3 降雪过程数值模拟

#### 3.1 模式参数及设置

本文利用中尺度数值模式 WRF3.7 进行了数值模拟研究。模式初始场和侧边界条件来自北京城市气象研究院新一代快速更新多尺度资料分析和预报系统-短时数值预报子系统 RMAPS-ST (Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System) 的预报场。由于 RMAPS-ST 同化了多种本地观测, 较美国国家环境预报中心提供的 FNL 再分析数据或其他再分析数据等在北京地区更为准确 (张亦洲等, 2017; 刘郁珏等, 2019), 因此, 本文使用 RMAPS-ST 第二层嵌套 (水平网格距 3km) 逐 3 小时资料同化和循环预报的初始时刻数据作为 WRF 的初始场

对本次降雪过程进行模拟。

模拟区域以北京为中心，水平分辨率为 3km，网格数为 300×300，模式垂直方向上分为不等间距的 50 层。物理参数化方案的设置中，短波辐射方案采用 Dudhia 方案，长波辐射方案采用 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) 方案，不采用积云参数化方案，边界层参数化方案选择 YSU 方案，陆面过程方案采用 Noah land-surface model 方案，云微物理方案采用 Morrison 方案，该方案中包含云水、冰晶、雨水、雪、霰的质量浓度和数浓度的预报。此外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，并加密每六分钟输出一次计算结果。

### 3.2 数值模拟检验

为验证数值模式模拟结果的可靠性，将模拟区域的过程降雪总量、闫家坪单站半小时降雪量、雷达回波演变等结果与模拟结果进行了对比检验。

#### 3.2.1 降雪量时空对比检验

图 1 是 29 日 08 时~30 日 08 时模拟区域的 24h 地面累积降雪量观测与模拟的对比，可以看到受自西向东移动系统的影响，模拟的降雪区域分布、覆盖范围和大雪的落区等与实际降雪基本一致。实际大雪的落区主要位于北京延庆西部北部山区并延伸至河北张家口境内，模式模拟的大雪落区也主要位于这一区域，二者的走向一致，降雪量级相当，模拟效果较好。但模拟的中雪区域比实际偏大，基本覆盖整个北京地区（实际只在北京西部北部半数地区）。从模拟的闫家坪单站半小时降雪量与实际观测的对比来看（图 5），模式也给出了本次降雪过程出现两段明显降雪时段的特征，即 29 日下午和深夜，只是第一降雪时段半小时模拟结果偏高约 0.2mm，这可能与参数设置和模式误差有关，而第二降雪时段模式几乎给出了与观测非常一致的结果。

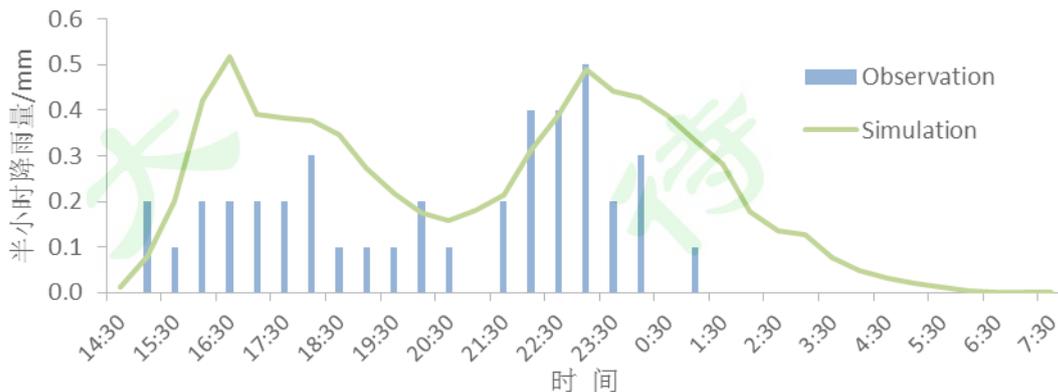


图 5 闫家坪站半小时降雨量观测（条形图）与模拟（实线）对比

Fig 5 The simulated (green line) and observed (blue colourum) 30min accumulated precipitation at Yan JiaPing station.(unit:mm)

### 3.2.2 模拟雷达回波检验

图 4 展示的是本次降雪过程闫家坪站云雷达所观测的回波时间高度演变及模式模拟结果的对比验证。可以看到，与图 5 的半小时降雪量相对应，模拟雷达回波的演变趋势与实际观测也比较一致，即有两个明显的回波发展时段：29 日午后 14~20 时和 20~30 日 05 时。总体来看模拟的雷达回波强度比观测偏强约 10dBz，最大回波高度基本与观测接近。

总体来看，WRF3.7 对所选个例有较好的模拟能力，模式模拟的降雪落区、范围和降雪量级与实况基本一致，模拟雷达回波和半小时降雪量也再现了单站出现两个明显降雪时段的基本特征，模拟结果能基本再现实况特征，因此可以在此基础上进行水凝物输送及降雪微物理机制的进一步分析。

## 4 降雪云系大气水凝物来源分析

### 4.1 水汽来源特征

通过对比降雪前期不同等压面上北京区域的水汽通量，发现在 700 hPa 以上北京区域的水汽通量较大，并且持续时间较长，该层在山西北部、河北中南部及冀鲁豫交界处为水汽通量的高值区，并且自西-西南方向向东输送影响北京地区（图 6）。因此此次降雪过程的水汽输送主要集中在对流层中高层，北京区域的水平水汽输送具有西、南入，东、北出的特征。

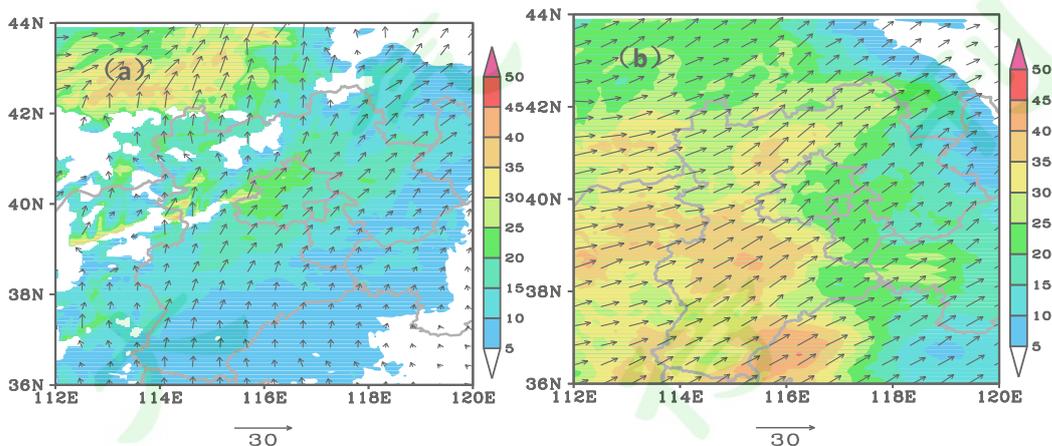


图 6 11 月 29 日 17 时水汽通量（填色）和风场图（黑箭头）（a:850hPa, b:700hPa）  
Fig. 6 The 850 (a) and 700 (b) hPa water vapor flux (coloring) and wind field(black arrows) at 17:00 BT on 29 November.

#### 4.2 水凝物总体特征

云系中的水物质按相态可以分为液相（云水  $Q_c$  和雨水  $Q_r$ ）和固相（冰晶  $Q_i$ 、雪  $Q_s$  和霰  $Q_g$ ），模拟区域内这两相物质的总含量随时间的演变可以直观给出整体云系演变过程中不同相态水凝物的变化特征。模式结果中一个格体的水凝物含量= $Q_x \rho \Delta L^2 \Delta H$  其中  $Q_x$  为各水凝物的质量浓度（单位： $\text{kg}/\text{kg}$ ），计算中取格点处有一种水凝物质量浓度大于  $0.01\text{g}/\text{kg}$  即认为有效云系进行计算； $\Delta L$  为模拟网格距（单位： $\text{m}$ ）， $\Delta H$  为垂直相邻高度层之间的距离（单位： $\text{m}$ ）， $\rho$  为空气密度（单位： $\text{kg}/\text{m}^3$ ），不同时刻水凝物总量即为该时刻地面至模式层顶整层水凝物之和（单位： $\text{kg}$ ）。图 7 给出模拟云系两相水凝物总量随时间的演变（由于水凝物总量较大，图中转换为以千吨为单位进行展示）。可以看到此次降雪过程由于云系温度较低，云中液相水凝物含量较少，总量低于  $50000\text{kt}$ ，而固相水凝物较多，总量最大达到近  $200000\text{kt}$ 。此外还注意到与图 5 相对比，云系总体固相水凝物两个明显的峰值时段（29 日午后 15-18 时和 22-30 日 02 时附近）与单站两个降雪时段相对应，表明云系降雪以冷云过程为主，云中固态水凝物对地面降雪的产生有重要贡献。

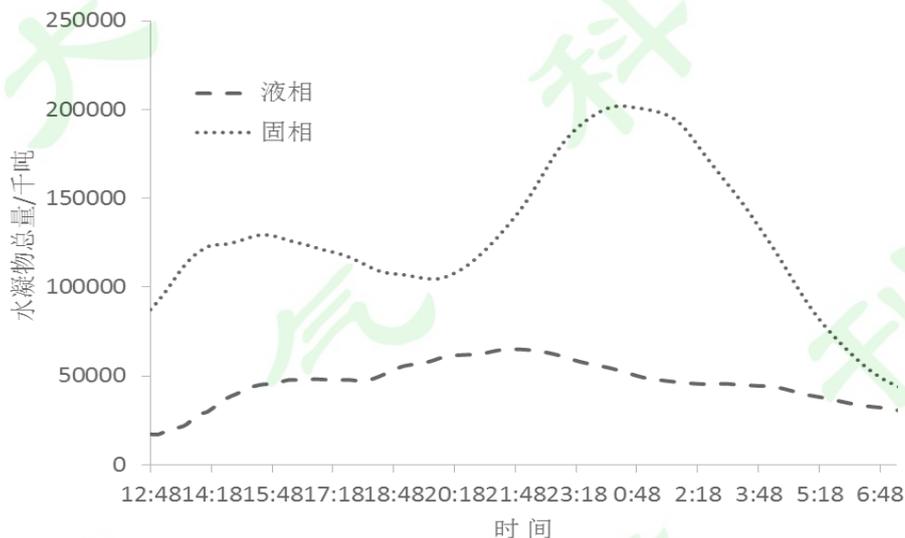


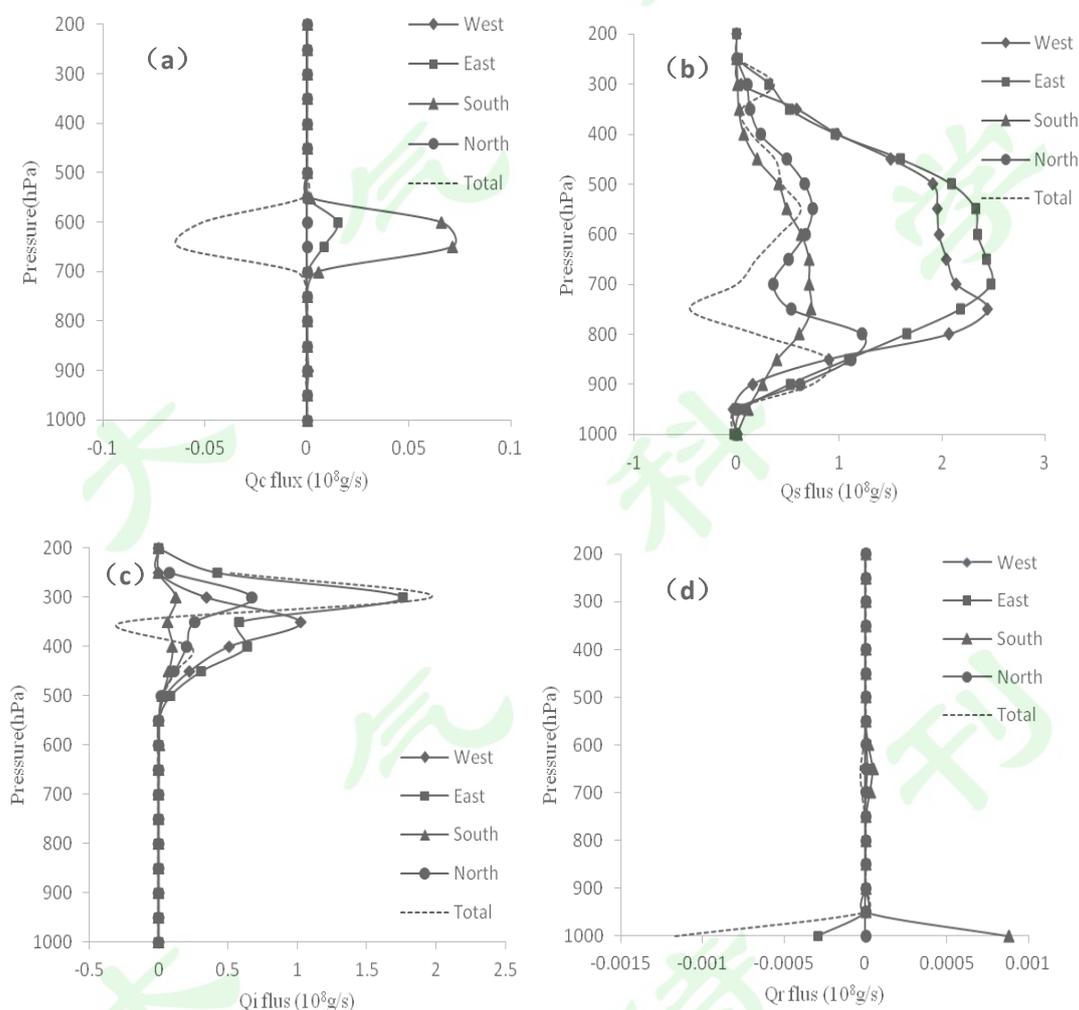
图 7 模拟云系两相水物质总量时间演变图

Fig 7 Time evolution of the total amount of two-phase water in the simulated cloud system

#### 4.3 边界水凝物来源分析

除了了解降雪云系大气水凝物的总体特征，还可以通过计算北京地区东西南

北四个方向不同高度处水凝物的状况来分析其来源。此处参考周非非等（2010）、陶玥等（2015）提出的计算方法，对北京地区（115.3-117.5 E，39.3-41.2 N）计算东西南北四个边界不同高度处水凝物的质量通量和总通量。水凝物质量通量的计算公式为： $\frac{1}{g} |V| Q_x \Delta L \cdot \Delta p$ ，其中  $V$  为水平速度（单位： $m/s$ ）； $Q_x$  为各水凝物的混合比（单位： $g/kg$ ）； $\Delta L$  为各边界边长（单位： $cm$ ）； $\Delta p$  取  $50hPa$ ；由此计算得到的水凝物通量单位为  $g/s$ 。水凝物的总通量 = （东边界水凝物通量 - 西边界水凝物通量） + （北边界水凝物通量 - 南边界水凝物通量），总通量大于零，表明水凝物是辐散-净流出，小于零，表明水凝物是辐合-净流入。



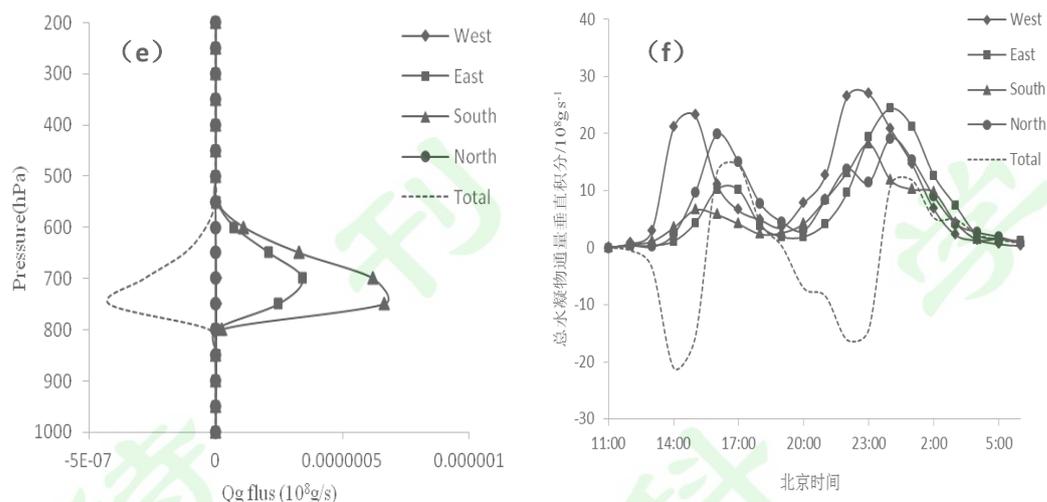


图8 30日00时穿过北京区域（115.3 N~117.5 N，39.3 E~41.5 E）各边界单位截面积的（a）云水、（b）雪、（c）冰晶、（d）雨水、（e）霰的通量及总量随高度分布以及总水凝物通量（带标记的线）和总量（虚线）的垂直积分时间演变图（f）

Fig. 8 Vertical distribution of the fluxes of (a) cloud water, (b) ice, (c) snow, (d) rain, (e) graupel and the total convergences across each of the boundaries of the Beijing region at 00:00 BT 30 December 2019. Fig f represents the time series of the vertically integrated fluxes (solid lines with symbols) and flux convergences (dashed line) of all condensates.

选择 30 日 00 时模拟区域固相水成物较多并且北京山区小时降雪强度较大的时次分析水凝物通量和总量随高度的分布（图 8）。从各水凝物的通量值来看，雪的通量最大，其次是冰晶、云水、雨水和霰。雪在 800~700hPa 为辐合，但东西边界的流出流入量基本相当，总通量主要来自南边界的流入量多于北边界的流出量。值得注意的是，模拟区域固相水凝物较少并且北京山区降雪强度也较小的 29 日 20 时，500 hPa 以下整层雪的通量均为辐散（图略），对比表明虽然 00 时 800~700hPa 雪的通量辐合层较薄，量级也不大，但对地面降雪的产生应有重要贡献。冰晶在高空 350 hPa 和 250 hPa 附近分别是辐合和辐散的最大值区，与雪不同，冰晶的净输入主要来自较多的西部流入。500hPa 至地面因东西南北四个边界基本无冰晶流通因而总通量为零；云水在 600~700hPa 为辐合层，净输入量来自南边界，其他层因四个边界无流通而总通量为零；雨只在 1000hPa 附近有来自南边界的流入量，其他层总通量均近似为零。霰在 800~700hPa 为辐合层，但与雪不同，霰几乎没有来自西边界的输入和北边界的输出，辐合主要来源于南边界的流入。

将图 8a-e 中将各气压层的水凝物通量对高度作积分，可得穿过高为从地表

到模式层顶、长为各边界长度的截面积的通量，如图 8f 所示，其正（负）值表示水凝物从北京区域水平输送出去（进来），从时间演变可以看出，这一区域总水凝物在西、南边界上流入，东、北边界上流出，总水凝物通量出现两个峰值，出现时段与区域水凝物总量（图 7）及单站降雨量峰值（图 5）基本对应。随着东边界和北边界水凝物流出增大，总水凝物水平辐散，区域内降雪量减少。北京区域降雪主要时段内，云水资源即水凝物通量在水平方向上为净流入。

以上分析表明，在模拟降雪的显著时段，北京区域外水凝物主要通过西边界和南边界输送到区域内。雪、云水和霰存在一定的输送，其中雪的总通量最大，表明平流输送从区域外净流入的雪量对区域内降雪的增加有一定贡献。在高层受西风气流的作用，冰晶和雪存在明显的辐散。在降雪的加强（减弱）时段，总的水凝物表现为辐合（辐散），但与典型的降水过程相比量值要少一些（周非非等，2010；陶玥等，2015）。

## 5 降雪云系的结构特征

### 5.1 模拟降雪云系的水平演变过程

根据模拟降雪的分布和强度，可以将北京区域的降雪划分为与观测相一致的两个阶段，其中第一阶段降雪的影响云团来自山西和河北中部，14时位于晋冀交界处的最大云中水凝物比含水量超过 $3\text{g/kg}$ ，此后云团逐渐向东北向北京方向移动，云团进入北京区域时处于由强盛转为逐渐减弱的阶段，16时北京西北部延庆一带云中最大水凝物比含水量降为 $2\text{g/kg}$ ，此时的小时降水量不超过 $0.1\text{mm}$ ，随着云系减弱和北抬，地面降雪的覆盖范围一直维持在北京西部地区。21时之后第二阶段影响云团由北京西南部再次向东部北部移动并影响北京地区，23时北京中南部及河北中部地区云系中水凝物比含水量均超过 $2\text{g/kg}$ ，由此造成覆盖整个北京城区的第二个降雪时段，30日03时之后云系基本移出北京地区，降雪逐渐停止（图 9）。从云图、小时雨强等分析可见，比较均匀的层状云系是导致此次北京降雪的主要云系。随着云系移入/出北京并逐渐加强/减弱，北京地区的降雪逐渐增强/减弱。山区由于地形的作用降雪量比平原地区稍大。

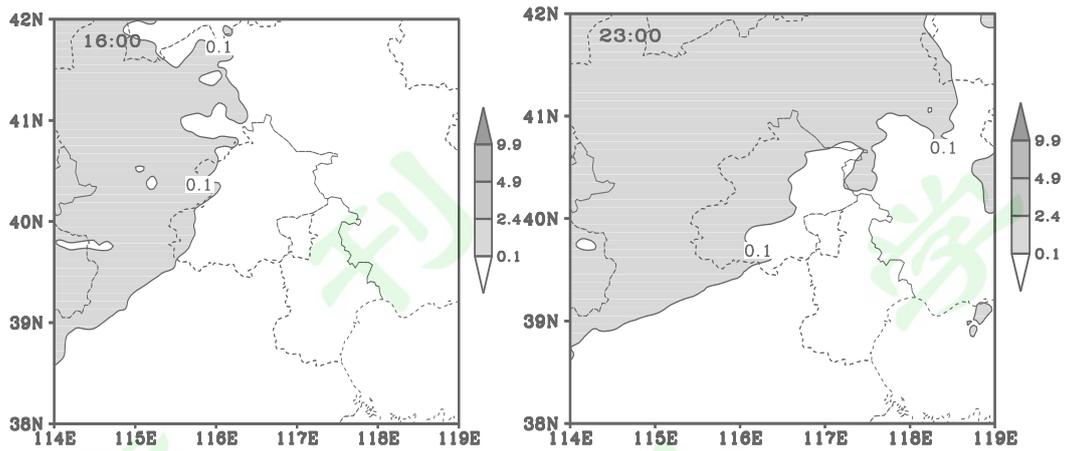


图9 模拟结果11月29日16:00和23:00的小时降雨量图

Fig 9. Simulated hourly rainfall at 16:00 and 23:00 on November 29.

### 5. 2 模拟降雪云系的垂直结构

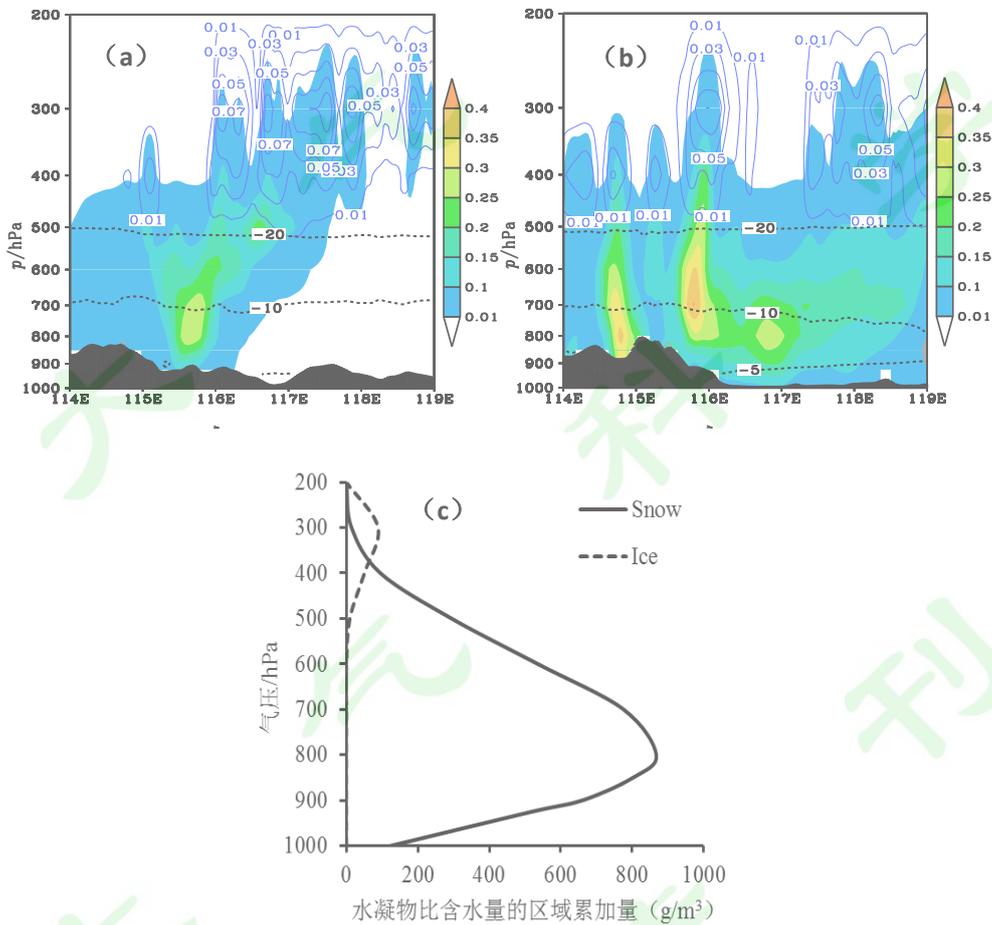


图10 11月29日16时(a)沿40.3 N和30日00时沿40 N水凝物的纬向剖面(b)和区域内水凝物比含水量总量(区域39.3 N-41.5 N, 115.3 E-117.5 E)垂直廓线(c) (a、b:彩色阴影:雪,蓝色实线:冰晶,黑色虚线:等温线,c:黑实线:雪,黑虚线:冰晶,单位:g/kg)

Fig. 10 Vertical sections of water hydrometeors along 40 N(a,b) and vertical profiles of area accumulation of total water content of hydrometeors over 39.3 N-41.5 N and 115.3 E-117.5 E at 16:00, 00:00 on 29th and 30th November. (a、b:shaded:snow, blue lines: ice crystal, black

dotted line: isotherm ,c: black solid line:qs, black dotted lines:qi,unit:g/kg)

利用模式结果给出的水凝物垂直分布可以分析降雪云系在垂直方向上的微物理结构。在第一阶段降雪时沿 29 日 16 时 40.4°N 的云系垂直剖面（图 10a）可见，此时有大片冷云云系覆盖北京西部北部山区。云中冰晶和雪的含量丰富，在 300 和 700hPa 高度附近，分别对应冰晶和雪的质量浓度高值区，值约为 0.07g/kg 和 0.25g/kg，此时山区降雪明显。随着影响云系东移减弱，北京区域降雪减弱。30 日 00 时沿 40°N 的第二阶段降雪云系剖面显示雪晶的含量更为丰富（图 10b），在 700hPa 高度附近，雪的比质量高值超过 0.35g/kg。由于云中缺乏过冷云水和雨水，冰雪晶下落途中未有结凇等过程，因此云中霰的含量也非常少。北京区域（39.3°N~41.5°N，115.3°E~117.5°E）内水凝物比质量的垂直廓线可以清楚显示，云中不同高度处雪的区域比含水量累加量最大超过 800g/m<sup>3</sup>，其次是冰晶约 90g/m<sup>3</sup>，云水、雨水和霰量很少而未有显示（图 10c）。

从不同时刻云系云微物理量的垂直分布可以看到，冷云云系为本次降雪过程的主要影响云系，云中温度均低于零度，水成物主要是冰相粒子，冰相过程对降雪形成有重要作用，但不同的微物理转换对降雪的贡献有一定差异。

### 5.3 降雪的云微物理机制

本次过程北京山区降雪的强度要高于平原地区，为详细分析山区降雪的微物理机制，本节选取海坨山区闫家坪站为代表。图 11 给出该站雨、雪、霰、冰晶、云水和水汽质量浓度随时间和高度的演变，可以看到在整个云系的发展演变过程中，从地面至高空整层水汽含量都比较丰富，3km 以下水汽质量浓度基本均大于 2g/kg。由于降雪云系为冷云云系，云内温度均低于零度，因此如图 11a 所示闫家坪站上空基本无雨水，云水质量浓度也很低，在个别时次和高度处仅有的云水质量浓度比水汽质量浓度低三个量级，液态过冷云水的缺乏表明云微物理的淞附和撞冻过程会比较微弱。此外，与卫星云图和区域水物质总量的时间演变相对应，闫家坪单站雪的质量浓度也出现了两个显著的高值时段，时间分别为 29 日下午 14-17 时和夜间 23 时前后，最大值均达到了 2g/kg。对应雪质量浓度大值区的两个时段，在高空 6-10km 之间有相应的冰晶质量浓度大值区，这种冰雪晶的高低层配置表明降雪云系中高空冰晶通过凝华增长不断长大，一定程度后下落至中间层，对中间层起着“播种”冰晶的作用，冰晶在经过整层冷云云系过程中不断与云中其他粒子产生碰并、聚合等过程长大为雪花，最终下落至地面形成降雪。由于水汽含量丰富并且云中缺乏过冷云水，云中霰的含量也微乎其微（图 11b）。

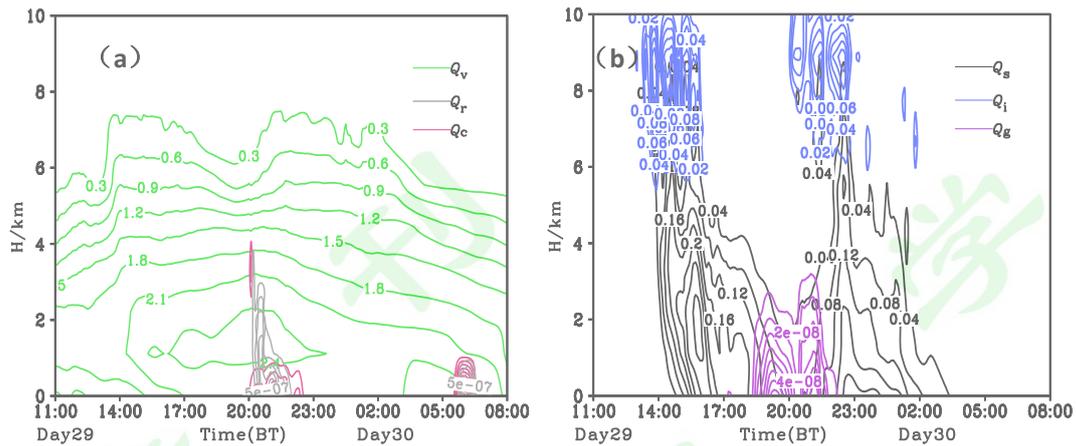


图 11 闫家坪站水凝物含量随时间和高度的分布图 (绿线:水汽  $Q_c$ , 灰线:雨水  $Q_r$ , 红线:云水  $Q_c$ , 黑线:雪  $Q_s$ , 蓝线:冰晶  $Q_i$ , 紫线:霰  $Q_g$ , 单位均为  $g/kg$ )

Fig 11. Distribution of water content with time and height in YanJiaPing station(blue: water vapor, gray:rain, red:cloud water, black: snow, blue: ice, purple: graupel)

为了理清不同微物理过程对产生降雪的贡献,下面以微物理过程的产生率为特征量对雪的源汇项进行解析。为了直观显示,源汇项图中所示的微物理过程产生率均为绝对值。图 12 给出与雪相关微物理过程的产生率随时间和高度的分布图,在 Morrison 方案中,与雪相关的源汇转换一共有十一项,由于本次过程为冬季降雪,地面和云中的温度都很低,如上述图 11a 所示基本不存在雨,因此源汇项中雪的融化蒸发 ( $P_{smilt}$ ,  $E_{vpms}$ )、被雨滴收集 ( $P_{sacr}$ )、冰晶雨滴碰并成雪 ( $P_{iacrs}$ ,  $P_{racis}$ ) 的过程都很微弱或者转化率非常小,以上这些转化项在图中均被略去。图 12 可以看到,在 6-10km 的高空,冰晶含量比较丰富的两个主要时段 (14-17 时和 23 时附近),云冰自动转换成雪 ( $P_{rci}$ ) 和云冰聚合成雪的过程 ( $P_{rai}$ ) 比较明显,这表明雪首先由冰晶转化而来,此时形成的雪通常比较小,属于“雪胚”。由于闫家坪站云系水汽含量丰富,在低温的条件下容易产生对冰面的过饱和,如图 12a 所示,6km 以下直至地面都有一定的冰面过饱和度,此时由高空掉落的“雪胚”在冰面过饱和的环境中通过凝华增长 ( $P_{rds}$ ) 不断长大,凝华增长率随时间和高度的分布与冰面过饱和度的分布有非常好的一致性。2km 以下在 21 时附近存在少量的云水,对应有一定的雪淞附云滴 ( $P_{sacws}$ ) 增长的过程。而在 1km 高度附近两个显著降雪时段的冰面欠饱和处,出现了雪的升华过程 ( $E_{prds}$ )。从雪的各个微物理过程转换率的量级来看,由于云系中缺乏过冷云水,“雪胚”与过冷云水之间的微物理转换过程缺失,凝华增长的速率在图中所展示的几种雪源项中表现的更为快速,量级更大。云冰自动转换成雪 ( $P_{rci}$ ) 和云冰聚合成雪 ( $P_{rai}$ ) 的转换率仅次于凝华增长,因此这三个过程是云中产生

雪的重要源项。

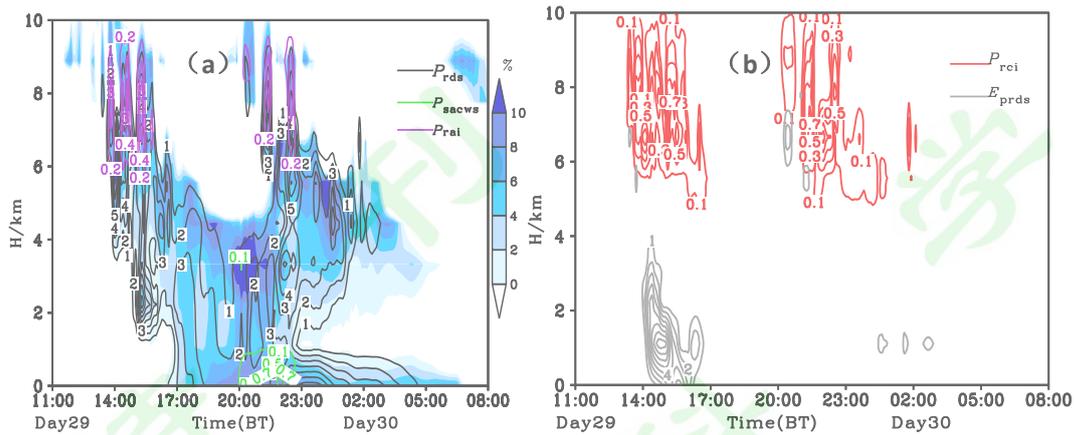


图 12 雪的源汇项解析 (彩色阴影: 冰面过饱和度,  $P_{rds}$ :水汽凝华成雪,  $P_{sacws}$ : 雪淞附云滴,  $P_{rai}$ : 云冰自动转换为雪,  $P_{rai}$ : 云冰聚合成雪,  $E_{prds}$ : 雪晶升华, 单位:  $10^{-8} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .)

Fig 12 The source and sink of snow (Unit:  $10^{-8} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , coloured shading represents ice supersaturation,  $P_{rds}$ : deposition of snow,  $P_{sacws}$ : droplet accretion by snow,  $P_{rai}$ : autoconversion cloud ice to snow,  $P_{rai}$ : accretion cloud ice by snow,  $E_{prds}$ : sublimation of snow)

## 结论与讨论

本文基于观测和中尺度数值模式 WRF 对 2019 年 11 月 29 日发生在北京地区的首场降雪进行了观测资料分析和数值模拟。研究了北京区域降雪云系云水资源分布和收支特征, 研究了产生降雪的云微物理机制并探讨了雪的源汇项贡献, 主要得到以下结论:

(1) 本次过程为受高空槽影响的稳定性层状云降雪。降雪云系自西向东影响北京时有两个时段, 与之对应的北京区域内地面降雪也有两个时段。云雷达回波也给出了对应着两个降雪时段回波强度较大的观测特征。中尺度数值模式模拟结果显示, 对区域过程降雪总量、降雪的分布范围、单站降雪强度等特征模式均能给出与实际观测比较一致的结果。

(2) 数值模拟结果分析显示: 本次过程降雪云系的总体液相水凝物含量很少, 固态水凝物对地面降雪的产生有重要贡献。对北京区域而言, 大气水凝物主要从西边界和南边界输送到区域内, 而从东边界和北边界流出, 因此具有西向和南向分量的湿气流是降雪云系云水资源的输送通道。在降雪相对加强(减弱)时段对应着水凝物的辐合(辐散)。

(3) 冷云云系是本次过程的主要影响云系, 云中水凝物基本全为冰晶和雪, 有少量的云水, 雨水和霰的含量微乎其微, 整层云系都含有非常丰富水汽并且贯穿整个降雪时段。分析微物理机制得到, 在冰面过饱和的环境下, 水汽凝华

(Prds) 增长是雪的最主要转换源项；其次是云冰的自动转换 (Prci) 和云冰聚合成雪的过程 (Prai)。本文只针对北京地区一次降雪过程的云物理机制和云水资源收支进行了分析, 对于发生在不同天气背景或不同影响系统下的降雪过程其微物理过程和云水资源收支会存在一定的差异。此外, 针对北京地区的人工冬季增雪催化作业多参照云中过冷云水的多寡来实施, 而从本次降雪过程的云物理机制分析来看, 云中几乎未有过冷云水, 而是存在大量的水汽, 而且北京冬季大部分的降雪过程均有类似的特点, 因此从充分开发北京地区冬季云水资源的角度出发, 针对冬季增雪可以考虑采用其他云物理量作为新的催化条件选择, 这有待于进行进一步的业务实践和机理机制的研究。

### 参考文献

- 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. 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. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 44(2): 407-420.
- 龚佃利, 边道相. 2002 山东省空中水资源的初步分析, 气候与环境研究, 7(4):474-482. Gong D L, Bian D X. 2002. An Elementary Analysis of Water Resource over Shandong Province. Climatic Environ Res (in Chinese), 7(4):474-482.
- 黄钰, 郭学良, 毕凯等. 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. 大气科学, 2020, 44(2): 356-370. HUANG Y, GUO X L, BI K, et al. Vertical Observation and Numerical Simulation of the Clouds Physical Characteristics of Snow-Producing over Yanqing Mountain Area in Beijing. Chinese J Atmos Sci, 2020, 44(2): 356-370.
- 胡国权, 丁一汇. 2003. 1991 年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. 气象学报, 61 (2): 146-163. Hu G Q, Ding Y H. 2003. A study on the energy and water cycles over Changjiang-Huaihe River basins during the 1991 heavy rain periods. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (2): 146-163
- 李宏宇, 王华, 洪延超. 2006. 锋面云系降水中的增雨潜力数值研究. 大气科学, 30 (2): 341-350. Li H Y, Wang H, Hong Y C. 2006. A numerical study of precipitation enhancement potential in frontal cloud system. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 30 (2): 341-350
- 刘玉芝, 常姝婷, 华珊等. 2018. 东亚干旱半干旱区空中水资源研究进展. 气象学报, 76(3):485-492. Liu Y Z, Chang S T, Hua Shan, et al. 2018. A review of the research on atmospheric water resources over arid and semi-arid regions of East Asia. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 76(3):485-492.
- 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. 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 Appl Meteor Sci, 30(1): 70-81.
- 马京津, 高晓清. 2006, 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析, 高原气象, 25(5):893-899. Ma J J, Gao X Q. 2006. The Transportation Paths of Water Vapor and Its Relation to

Climate Change over North China. Plateau Meteor (in Chinese), 25(5):893-899.

齐彦斌,冉令坤,洪延超. 2009. 云凝结物平流输送对降水云系发展影响的数值模拟研究. 气象学报, 67(6):1045-1057 Qi Y B, Ran L K, Hong Y C. 2009. Numerical study of influence of cloud hydrometeor advections on precipitable cloud system. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67(6):1045-1057

平凡, 罗哲贤. 2007. 热带对流热量与水汽收支的数值模拟研究. 地球物理学报, 50(5):1351-1361. Ping F, Luo Z X. 2007. The numerical simulated study of convective. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50(5):1351-1361

强安丰, 魏加华, 解宏伟等. 2019. 三江源区大气水汽含量时空特征及其转化变化. 水科学进展, 30(1):14-23. Qiang A F, Wei J H, Xie H W. 2019. Spatial-temporal characteristics and changes of atmospheric water vapor in the Three River Headwaters Region. Adv Water Resour (in Chinese), 30(1):14-23.

任宏利, 张培群, 李维京等. 2004. 中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征. 气象学报, 62(3):365-374. Ren H L, Zhang P Q, Li W J et al. 2004. Characteristics of Precipitation and Water Vapor Transport During Springtime In The Eastern Northwest China. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 62(3):365-374.

施晓晖, 徐祥德, 程兴宏. 2009. 2008年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征. 气象学报, 67(3):478-487. Shi X H, Xu X D, Cheng X H. 2009. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 67(3): 478-487.

徐淑英. 1958. 我国水汽输送和水分平衡. 气象学报, 29(1):33-43. Xu S Y. 1958. water vapor transfer and water balance over the eastern China. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 29(1):33-43.

孙晶, 王鹏云, 李想, 逯莹. 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 J, Wang P Y, Li X et al. 2007. Numerical Study on Microphysical Processes of Two Different Snowfall Class in North China. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65(1):29-44.

唐洁, 郭学良, 常祎. 2018. 青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征. 大气科学, 42 (6): 1327-1343. Tang J, Guo X L, Chang Y. 2018. Cloud microphysics and regional water budget of a summer precipitation process at Naqu over the Tibetan Plateau. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 42 (6): 1327-1343.

陶玥, 李军霞, 党娟, 等. 2015. 北京一次积层混合云系结构和水分收支的数值模拟分析. 大气科学, 39 (3): 445-460. Tao Y, Li J X, Dang J, et al. 2015. A numerical study on precipitation process and moisture budget of stratiform and embedded convective cloud over Beijing area. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 39 (3): 445-460.

王婧羽, 崔春光, 王晓芳, 等. 2014. 2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征. 气象, 40(2):133-145. Wang J Y, Cui C G, Wang X F et al. 2014. Analysis on Water Vapor Transport and Budget of the Severe Torrential Rain over Beijing Region on 21 July 2012. Meteor Mon (in Chinese), 40(2):133-145.

杨青, 姚俊强, 赵勇等. 2013. 伊犁河流域水汽含量时空变化及其和降水量的关系. 中国沙漠, 33(4):1174-1183. Yang Q, Yao J Q, Zhao Y et al. 2013. Spatial-temporal variation of water vapor and its relationship with the precipitation in the Yli River Basin. 2013. Journal of Desert Research. (in Chinese), 33(4):1174-1183.

张亦洲, 苗世光, 李青春等. 2017. 北京城市下垫面对雾影响的数值模拟研究. 地球物理学报, 60(1):22-36. Zhang Y Z, Miao S G, Li Q C, et al. 2017. Numerical simulation of the impact of urban underlying surface on fog in Beijing. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 60(1): 22-36.

周非非, 洪延超, 赵震. 2010. 一次层状云系水分收支和降水机制的数值研究. 气象学报, 68 (2): 182–194. Zhou F F, Hong Y C, Zhao Z. 2010. A numerical study of the moisture budget and the mechanism for precipitation for a stratiform cloud system. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (2): 182–194

Lufkin D.1959. Atmospheric water divergence and the water balance at the Earth's surface. General Circulation Project Science Rept. Cambridge Mass, MIT Press, (4):44.

Tao W K, Simpson J, Sui C H, et al. 1983. Heating, moisture, and water budgets of tropical and midlatitude squall lines: Comparisons and sensitivity to longwave radiation. J. Atmos. Sci., 50 (5): 673–690

Xincheng Ma, Kai Bi, Yunbo Chen, et al. Characteristics of Winter Clouds and Precipitation over the Mountains of Northern Beijing, Advances in Meteorology, vol. 2017, Article ID 3536107, 13 pages.