

北京海坨山区低槽降雪云系演变特征的观测研究*

马新成^{1,2,3} 董晓波⁴ 毕凯^{1,2,3} 温典^{1,3} 陈云波^{1,3} 陈羿辰^{1,2,3} 麦榕⁴
MA Xincheng^{1,2,3} DONG Xiaobo⁴ BI Kai^{1,2,3} WEN Dian^{1,3} CHEN Yunbo^{1,3} CHEN Yichen^{1,2,3} MAI Rong⁴

1. 北京市人工影响天气办公室, 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. 河北省人工影响天气办公室, 石家庄, 050020

1. *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089, China*

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

3. *Field Experiment Base of Cloud and Precipitation Research in North China, China Meteorological Administration, Beijing 101200, China*

4. *Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050020, China*

2020-09-03 收稿, 2021-03-08 改回。

马新成, 董晓波, 毕凯, 温典, 陈云波, 陈羿辰, 麦榕. 2021. 北京海坨山区低槽降雪云系演变特征的观测研究. 气象学报, 79(3): 428-442

Ma Xincheng, Dong Xiaobo, Bi Kai, Wen Dian, Chen Yunbo, Chen Yichen, Mai Rong. 2021. The characteristics and evolution of low trough snowfall cloud system in the Haituo mountain, Beijing. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(3):428-442

Abstract A typical snow case during a low trough controlled weather system was measured in Haituo Mountains of Beijing on 14 February 2019. The observations from aircraft, Ka-band cloud radar, microwave radiometer, precipitation spectrometer and snow shape detector provide a unique dataset, which is used to analyze the evolution of synoptic situation and meso- and microscale structures associated with the snow process. The results are as follows: (1) Snow was formed by the combination of warm moist southwesterly winds in front of the low trough and inverted trough at high levels and cold dry easterly winds in the lower layer. The thickness and strengthen of the southwesterly winds are positively correlated with snowfall and concentration of snow particles. (2) Snow clouds consist of ice particles and the main snow shapes are flake, dendritic and columnar single crystals. The snow formation mechanism mainly involves sublimation and coalescence. (3) Large amounts of dendritic aggregated snowflakes were found in the lifting process of orographic snow clouds. In this situation, the weather was controlled by warm flows coming from the southwest with abundant humidity in front of the inverted trough. (4) The occurrence of supercooled liquid water is related to the lifting by the topography, during which a good potential exists for artificial snow enhancement.

Key words Snow, Snowflake micro observation, Haituo mountain, Beijing

摘要 2019年2月14日在北京海坨山地区出现了一次由低槽云系产生的降雪过程。利用飞机、Ka波段云雷达、微波辐射计、降水粒子谱仪、雪晶显微观测仪等协同观测数据集,分析了此次降雪过程的天气形势、中尺度和微观结构的演变特征。协同观测显示:(1)降雪过程由高空低槽和地面倒槽槽前西南暖湿气流与低层东风回流干冷偏东风共同影响形成,西南风厚度和强度与地面降雪量以及降雪粒子数浓度成正相关。(2)降雪云系为冰云,地面降雪形状主要为片状、枝状和柱状单晶体,冰雪晶的凝华-聚并增长是降雪的主要形成机制。(3)大量枝状雪花的攀附现象出现在地形云爬升阶段,即低层东风回流减弱,转由倒

* 资助课题:国家重点研发计划项目(2016YFA0601704、2019YFC1510301)。

作者简介:马新成,主要从事云降水物理和人工影响天气研究。E-mail: fellow_007@163.com

通信作者:毕凯,主要从事大气冰核和人工影响天气研究。E-mail: bikai_picard@vip.sina.com

槽前西南暖湿气流控制。(4)过冷水的出现与地形抬升有关,地形云爬升期间存在人工增雪潜力。

关键词 降雪,雪花显微观测,海坨山,北京

中图法分类号 P426.63

1 引言

海坨山区是中国大型冬季室外运动开展的重点区域。自然积雪是冬季室外运动会举办的重要气象条件,为了提高复杂地形下降雪精细化预报水平和人工增加山区降雪,需要对2月海坨山区的自然降雪过程有清晰的认识。美国从20世纪70年代起在多个山区开展了山区自然降雪观测研究和人工增雪试验(Hobbs, 1975; Rauber, 1987; Stoelinga, et al, 2003; Geerts, 2013; Breed, et al, 2014; Tessen-dorf, et al, 2019)。20世纪80年代中国在新疆天山首次开展了空-地联合的雪观测试验,并对人工增雪作业潜力和自然条件进行了探讨(游来光等, 1989, 1992; 王谦等, 1978; 王广河等, 1989; 刘玉宝等, 1990)。这些研究发现不同山区的自然降雪云系有很大差异,对应存在不同降雪特征。因此,有必要针对不同地理区域的山区降雪开展协同观测研究。

近年来,学者们利用雪花显微、地基(遥感)仪器等观测设备取得了降雪云系演变的许多研究结果。Thériault等(2014)在加拿大的SNOW-V10外场试验中利用高分辨率的数码相机显微仪,通过人工和自动同时观测手段,对雪花进行拍摄分析,证明了雪花形状和尺度在空间分布上存在很大差异,统计认为最常见的雪花形状是辐枝状(>30%)和片状(<5%),凇附粒子在降雪个例中也经常被观测到。Colle等(2014)采用了立体显微镜与相机结合的方法,在15—30 min间隔下通过对降雪粒子采样,分析了粒子属性和凇附程度,认为在接近降雪天气的气旋中心强凇附的粒子主要为针状和霰粒,而在气旋中心的西侧主要为微弱凇附的片状和辐枝状雪花;结合微雨雷达(MRR)和探空等设备进行地面微物理特征变化与垂直动力、温度和相对湿度关系研究,认为最大垂直运动发生在有利于冰增长和过冷水较少的区域(即-15—-25℃),在重凇附期间以针状雪花和霰粒为主,最大垂直运动发生在0—5℃温度范围内,相对于轻度凇附,重凇附期间具有更强的垂直运动和湍流。这些研究结果显示,不同地区地面降雪微物理特征有很大的差异,在不

同地区广泛开展降雪微结构观测具有重要意义(Thériault, et al, 2014)。中国方面,胡云涛等(2017)利用 Parsivel 激光雨滴谱仪观测了南京地区2014—2016年6场降雪粒子谱资料,得到了具有局地化特征的降雪微物理性质。李遥等(2019)利用 Parsivel、自动气象站观测资料及 MICAPS 数据,对2018年冬季南京的4次强降雪过程中雪花微物理参量进行分析。遗憾的是,上述两项研究缺少降雪光学仪器和地基遥感设备的协同观测。针对华北地区,鄆大雄(1963)利用目测、显微照相、阴影照相3种方法对华北冬季弱降水系统进行雪晶观测分析。贾星灿等(2018)以及 Jia 等(2019)利用 Parsivel 结合地面部分雪晶显微观测和云雷达探测数据,对比分析了北京海坨山区冬季过冷雨滴、霰粒、雪花、混合态降水粒子谱和下落速度特征。陈羿辰等(2018)联合 Ka 波段云雷达、称重式雨量计和 S 波段天气雷达对降雪系统发展过程中的宏微观结构、毫米波雷达在探测中电磁波的衰减以及估测雪粒子含水量和地面降雪量估测等方面进行了分析研究。但针对海坨山2月的降雪过程观测研究还很少,并且缺少利用飞机和地面雪花显微观测结合分析降雪粒子形状分类、凇附程度和攀附现象等微物理属性。

Ma 等(2017)对2016—2017年冬季海坨山区降雪过程进行了统计分析,结果显示低槽和低涡低槽是降雪的高空主要影响系统。仪清菊等(1999)和张琳娜(2014)的统计结果也认为北京地区典型降雪过程主要为低涡低槽型、低槽型和东风回流型等。每年冬季低槽影响下的西南气流携带的暖湿水汽沿着华北平原到达北京境内,越过军都山后到达海坨山前延庆盆地平原,西南气流基本与海坨山谷轴线垂直,由于山谷的地形作用,气流沿着山谷在迎风面汇合并上升,形成了低层的地形云,这些地形云对冬季室外运动会造成低能见度事件,往往造成取消或推迟比赛的事件;此外这些地形云和高层云相互配合形成的降雪对海坨山区降雪预报都存在很大的不确定性。针对华北地区低槽降雪研究,主要集中在天气尺度的分析研究上(王建中等,

1995; 孙继松等, 2003), 缺少对微物理结构演变的分析。Ma 等(2017)通过飞机、云雷达、微波辐射计和雪花显微观测等对 2016—2017 年海陀山区冬季 12 个降雪个例进行了综合分析, 但缺少对低槽降雪过程的空-地协同观测。黄钰等(2020)基于风廓线雷达、云雷达、粒子谱仪、微波辐射计和自动站等垂直观测设备观测资料, 结合中尺度数值模式(WRF)对 2017 年 3 月 23—24 日北京延庆海陀山区的一次低槽降雪过程进行了观测和数值模拟研究, 但缺少对地面雪花的显微观测分析。

2017—2022 年, 北京市人工影响天气办公室(简称北京人影办)组织开展针对海陀山冬季地形云降水观测和综合云催化试验研究(简称 TOP-ICE 研究计划, Ma, et al, 2017), 该试验的重点研究

内容包括以下 3 方面: (1)海陀山区自然降雪特征, (2)人工增雪潜力评估, (3)冬季降雪综合催化试验。文中针对 2019 年 2 月 14 日一次低槽云系产生的降雪过程, 通过组织海陀山区自然降雪空-地协同观测, 重点讨论海陀山区自然降雪的宏、微观结构演变特征及可能的人工增雪潜力。

2 试验区 and 仪器

2.1 研究区域概况

海陀山(图 1a)位于北京延庆区西北部, 属燕山山脉的军都山系, 距北京市中心约 90 km。山脉呈西南—东北走向, 由山脉、盆地和山谷组成, 其最高峰——大海坨海拔 2241 m。地面观测仪器主要部署在闫家坪综合观测站(以下简称闫家坪, 2016 年

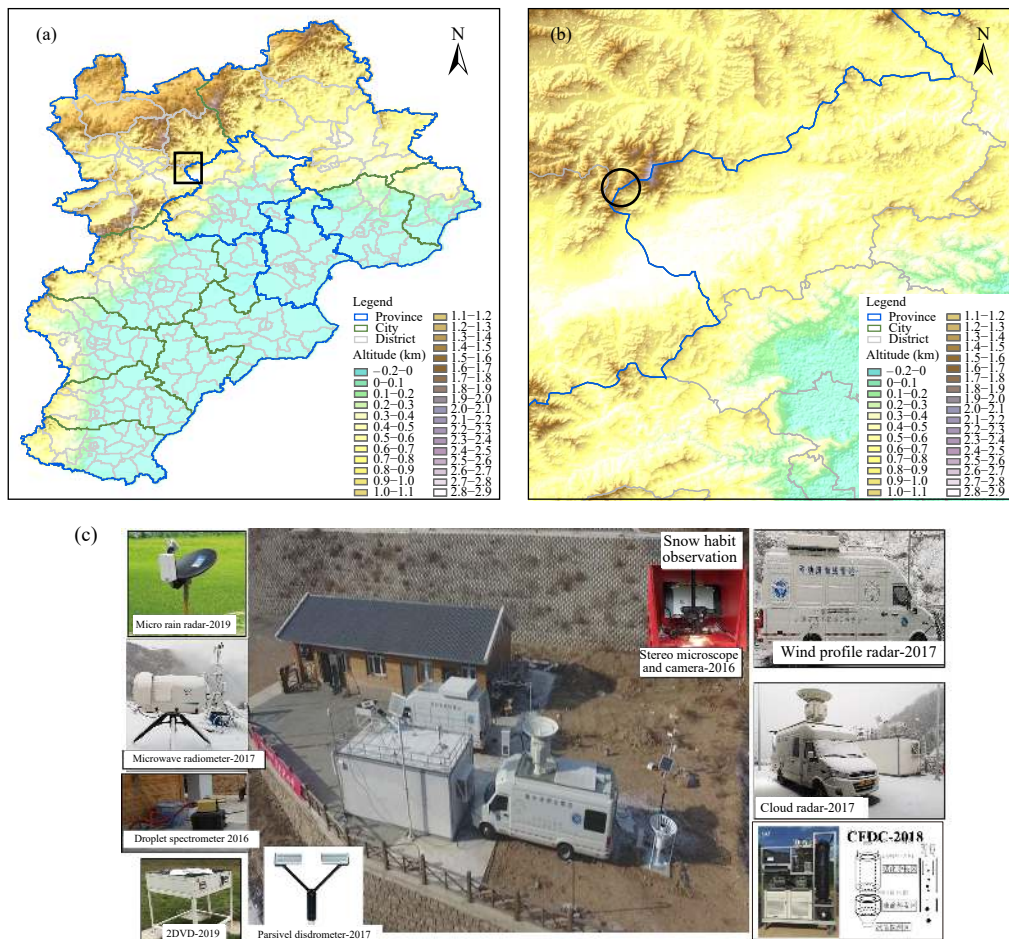


图 1 (a) 华北地区地形、北京海陀山位置和在外场试验区(黑框), (b) 外场试验区放大地形包括闫家坪等位置(黑圈), (c) 闫家坪空中俯视图及主要观测设备(数字为建成时间)

Fig. 1 (a) Topography of North China, location of Beijing Haituo Mountain in North China and the study area (black box); (b) The enlarged topography of the study area, including the location of Yanjiaping Comprehensive Observation Station (black circle); (c) Aerial view and main observation equipment at Yanjiaping Observatory (numbers indicate the set-up time)

后逐步建成),它位于海坨山谷西北方向的山脊上(图1b),海拔1344 m,水平距离大海坨约6 km。海坨山谷位于大海坨和马鞍山(海拔约1800 m)之间,呈楔形,由闫家坪向东南方向延伸,到山谷入口处(海拔约600 m)水平距离约10 km,山谷口面向东南为山前延庆盆地平原(海拔约489 m)。试验飞机起降机场在北京昌平(位于海坨山东南,距离约64 km)。山区最低安全高度为2900 m,所以低层降雪结构主要由地基遥感获得。

2.2 仪器

在海坨山试验区使用了多种类型的观测设备(图1c)。主要包括:(1)美国SPEC云物理机载探测仪器,(2)Ka波段多普勒云雷达,(3)微波辐射计,(4)降水粒子谱仪,(5)雪晶显微观测仪。同时,闫家坪还拥有雾滴谱仪、风廓线雷达、标准自动气象站、固态称重降雪量仪、雪深(人工)、能见度仪等。探空站点选择距闫家坪西北78 km处河北张家口站(54401)和东南90 km处北京观象台站(54511)。除上述数据外,天气图和卫星观测数据来自中国气象局(CMA)并提供了专门的分析。北京观象台的S波段多普勒雷达提供了中尺度云系结构资料。此外,利用NCEP的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 再分析资料获得了闫家坪上空4个时次(世界时00、06、12、18时)、高度层为13层(900、850、800、750、700、650、600、550、500、450、400、350、300 hPa)的温度和相对湿度等特征量,并通过计算得出比湿和假相当位温等用于分析降雪云系水汽和不稳定条件。

2.2.1 美国SPEC云物理机载探测仪器

利用“空中国王”飞机搭载的美国SPEC公司生产的云物理探测仪器对云系微物理结构开展观测。主要仪器有探测2—50 μm 云滴粒子的CDP探头、云滴及冰晶粒子数浓度(2DS)和图像(CPI)探头、探测范围150—19200 μm 并可提供雪粒子图像的HVPS探头、测量液水含量/总水探头(LWC/TWC)、古德里奇温度探头以及机载气象探测系统(AIMMS-20;获得温度、湿度、压强、水平风速风向、垂直风速等)。这些云物理机载探头探测结果可以对地基遥感观测结果进行直接验证,但是由于飞行受时间和安全高度限制,整个云系演变期间宏、微观物理特征还需要由地基云雷达、微波辐射计、降水粒子谱仪、降雪显微观测仪等配合获得。此外,由于受海坨山南侧空中走廊影响,闫家坪上

空的垂直探测只能选择在闫家坪附近开展。机载探测仪器每年在飞行使用前均进行标定,同时在每次飞行前对机载探测仪器进行维护以确保观测数据可靠。

2.2.2 Ka波段多普勒云雷达

闫家坪使用的垂直指向8 mm波长云雷达,能够在对流层12 km内以每8.8 s垂直方向30 m间距实时连续探测,获取包括线性偏振雷达反射率因子、垂直速度、速度变化率、线性极化率以及多普勒谱等(陈羿辰等,2018)。使用Maahn等(2012)的方法对原始多普勒谱数据进行后处理,并计算多普勒谱宽度。Ka波段云雷达对降雪云的观测,衰减效应通常可以忽略不计(Matrosov, et al, 2008)。但在大雪的情况下,降雪会堆积在加热天线上,产生大量的衰减。在实际观测中需及时清理天线积雪,并在后期数据分析中考虑衰减影响的时段。

2.2.3 降雪显微观测仪

降雪显微观测仪(SPI, Snow Particles Imager)由北京人影办研究团队搭建,原理与Gibson等(2007)和Thériault等(2014)在加拿大山区雪花显微观测所使用的人工和自动设备功能基本相同。该仪器用来分析降雪粒子形状类型、尺度、不同形状所占比例、淞附程度和攀附现象等结构和演变特征。它由相机主体加改装的高分辨率显微镜头以及数显屏构成。观测时在仪器外围安装防护罩,以防止吹雪造成的影响。人工观测流程首先是首先通过使用长宽20 cm载玻盘根据降雪强度暴露5—10 s进行雪花采样(一般一次收集20—30个雪花粒子),然后放到改装的相机镜头下从左到右依次下移(同组放大倍数固定和拍摄区域不重复)载玻盘拍摄6—9张雪花图片,并依此作为一组雪花显微观测数据,通过后期人工和软件识别进行综合分析。一般观测一组需要1 min,所以整个降雪期间雪花显微观测最小间隔1 min,最长不超过10 min。雪花形状分类参考Magono等(1966)的雪晶形状分类法,降雪粒子的淞附程度分析参考Mosimann等(1994)方法,也可识别降雪粒子攀附现象的有和无。雪花尺寸通过后期处理添加标尺测量主要长轴长度。该仪器观测的雪花形状可判断空中产生雪晶处的湿度和温度条件,根据地面温度及产生雪晶处的温度之差,大体可估计出产生某些形状雪晶的云中高度,并通过飞机观测给予验证。

3 天气形势演变

2019年2月14日08时(北京时,下同),即闫家坪最大降雪开始前2 h,500 hPa中高纬度的低压槽向东南移动,与中低纬度的低压槽合并加强,闫家坪中高空位于低压槽前部暖湿西南气流中,对应700和850 hPa上也有低压槽东移加强(图略)。此时,地面在河套地区存在低值环流中心(1027 hPa,距离北京360 km),倒槽顶部位于内蒙古中部与蒙古国交界处,对应出现纬向分布的降水云系(图2a);而东北地区受高压控制,北京近地层存在东风回流。闫家坪正受降雪云系前部影响,红外云图上显示云顶亮温中等强度,属于中层云。11时低值环流中心增强并进一步向东移动,随着倒槽加深,闫家坪处于主体云系影响中(图2b),云顶亮温显示达到最低,说明云层已显著增厚并达最大。14时后,低

值环流前部控制北京,东风回流逐渐东移退出,北京不断受降雪云系后部云带的影响(图2c),云顶亮温已很低,说明主要为低云降雪。随着槽后冷空气的不断南下,16时地面锋面过境期间,伴随着东风回流减弱,低层由西南暖湿气流控制,人工观测到地形云沿着海坨山谷从东南方向不断爬升到闫家坪。到20时,降雪云系基本移出北京,槽后干燥冷空气主导北京上空(图2d),闫家坪地面到高空转为西北风控制,降雪基本结束。

由于这次过程地面倒槽位置距离北京偏西北,导致河北的西北部降雪量相对较大,北京城区及东南部地区以小雪为主,北部地区出现中雪,怀柔、延庆和密云局地大雪(图略)。人工观测显示闫家坪从04时20分开始大风中飘雪,降雪持续到20时基本结束,持续时间近16 h,最大降雪出现在10—14时(图3),累计雪深23.7 cm,闫家坪出现中雪过

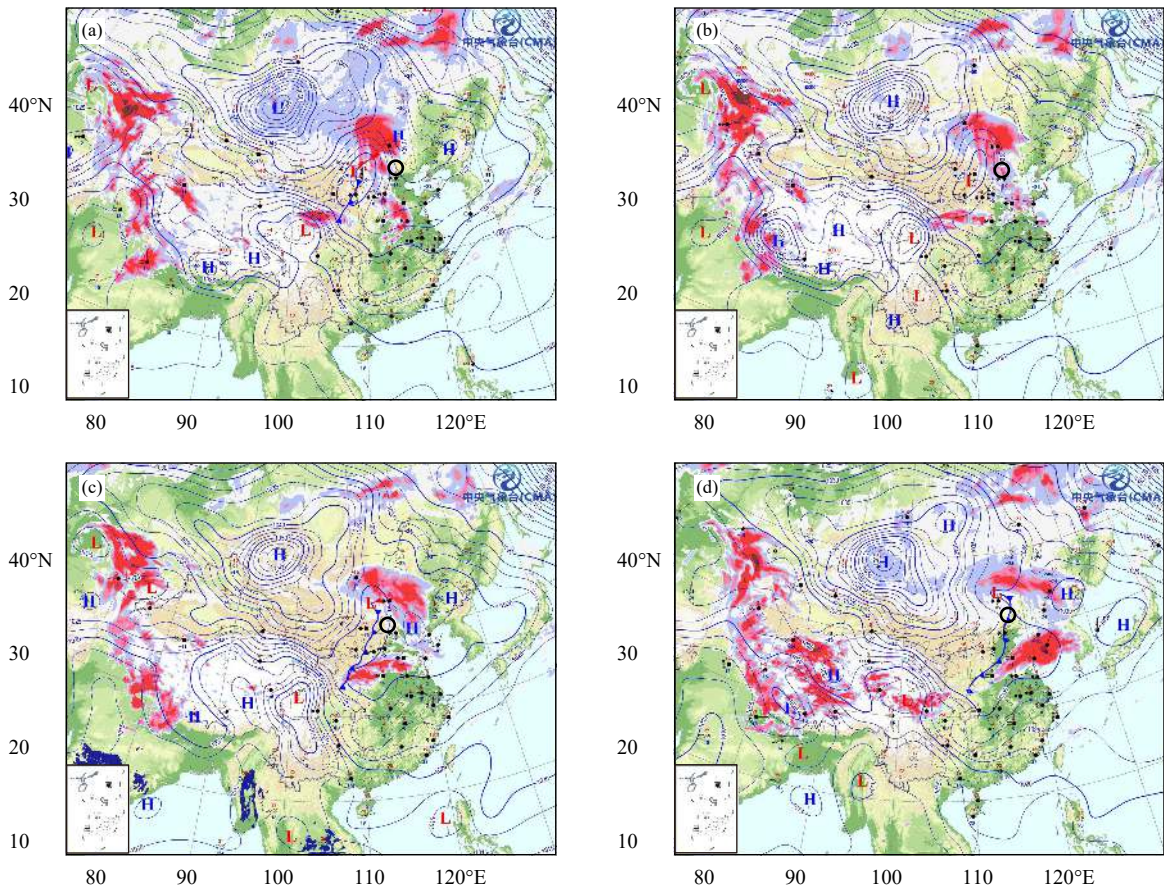


图2 2月14日08时(a)、11时(b)、14时(c)和20时(d)地面天气形势叠加红外云图(黑圈为海坨山试验区)

Fig. 2 Infrared cloud image and surface weather chart at 08:00 BT (a), 11:00 BT (b), 14:00 BT (c) and 20:00 BT (d) 14 February 2019 (the black circle shows the Haituo Mountain experiment area)

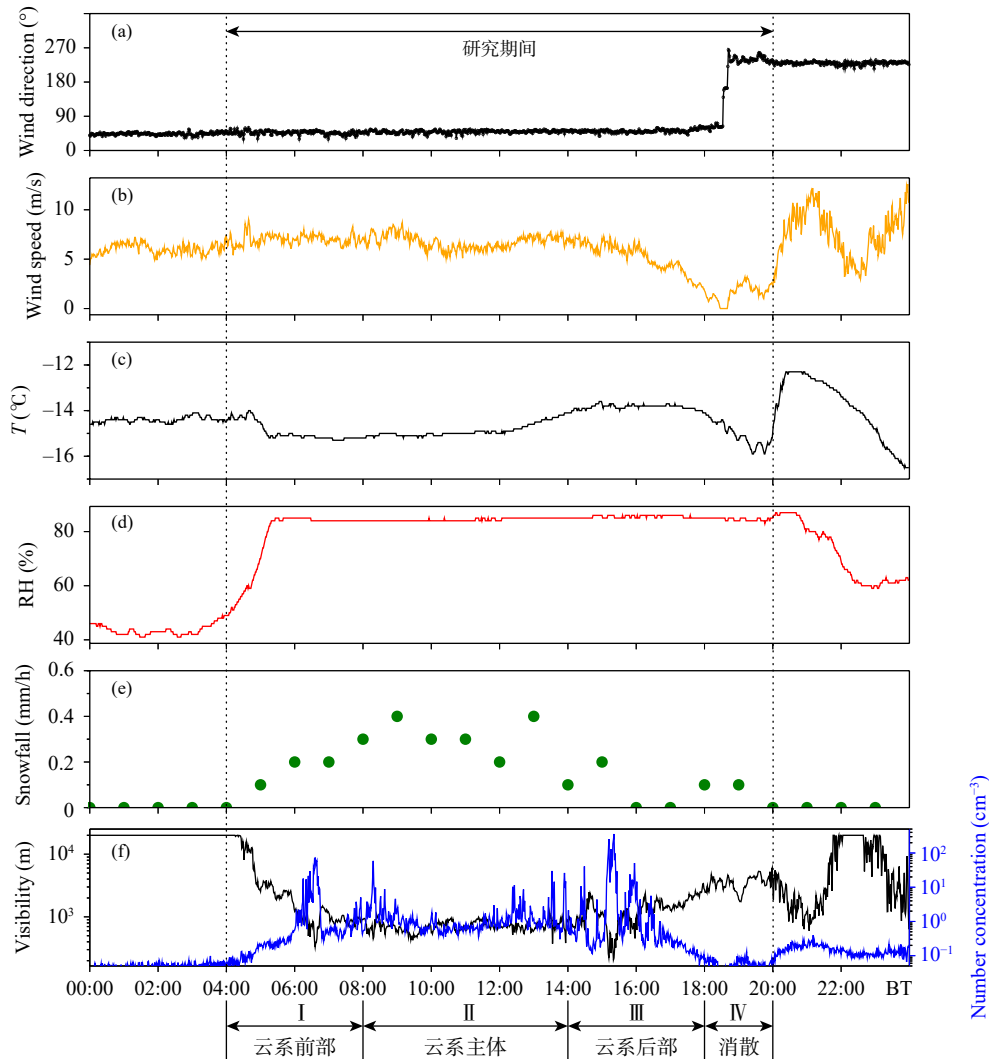


图3 闫家坪地面气象信息时间序列 (a. 风向, b. 风速, c. 气温, d. 相对湿度, e. 降雪量, f. 能见度 (黑实线) 和雾滴数浓度 (蓝实线))

Fig. 3 Time series of meteorological variables at Yanjiaping site (a. wind direction, b. wind speed, c. temperature, d. relative humidity, e. snowfall amount, f. visibility (solid black line) and fog drop number concentration (solid blue line))

程(2.9 mm/(24 h))。这次降雪过程是北京海坨山区2月典型降雪天气。文中选取主要降雪时段(04—20时)加以分析。图3显示,04—18时,地面为偏东风,风速5—8 m/s,18时30分前后偏东风转向偏西风,在风向转变时,地面风速逐渐减弱,并一度出现静稳状态,20时后迅速增大。地面相对湿度由50%迅速升高至超过80%(相应地面温度由-14℃降低到-15℃以下)并一直维持到降雪结束后逐渐跌至60%。地面温度也一直维持在-15℃附近,但是在降雪后期出现先升后降现象,在升温期间地面不断有地形云爬升到闫家坪,而能见度更是低于100 m;随着偏西冷空气不断入侵,降雪趋于结束时温度又迅速下降到最低(-16℃)。

4 中尺度结构演变

按照降雪云系不同部位影响闫家坪的时间,将研究时段划分成4阶段:云系前部(I)、云系主体(II)、云系后部(III)和云系消散(IV)。图4是闫家坪云雷达垂直向上探测的降雪云系雷达反射率因子的时间序列,图5是闫家坪风廓线雷达观测风场结构演变。

4.1 阶段 I (云系前部): 04—08时

04时,北京气象台S波段多普勒雷达PPI显示(图略),北京气象台到河北张家口之间有一东南—西北走向降雪回波带(长约150 km,宽约50 km,最强15 dBz),其前沿已到闫家坪,回波带由西南向东

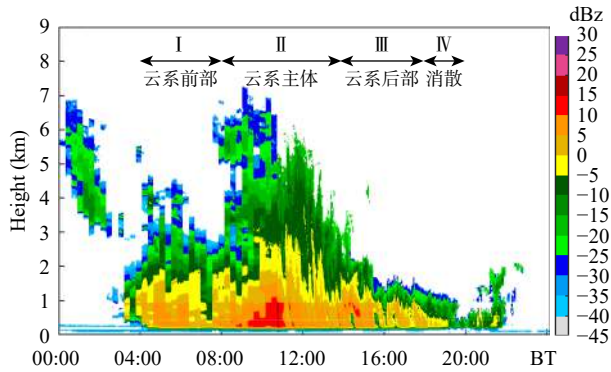


图4 闫家坪云雷达反射率因子时间序列
(左侧垂直轴是距地高度)

Fig. 4 Time series of cloud radar reflectivity at Yanjiaping site
(left vertical axis shows height above the ground level)

北移动, 移速 30—40 km/h。到 04 时 20 分, 回波带分布范围显著扩大, 闫家坪已完全处于降雪回波带中并开始降雪。图 4 显示云系前端回波顶部相对平坦, 主要维持在 4.3 km 高度(温度 -20°C), 云底高度约 1.6 km(温度 -17°C)。假相当位温廓线显示(图略)为弱不稳定层结, 图 6b 和 c 也显示在闫家坪开始降雪前期, 即 00—04 时, 边界层存在弱的不稳定。云中 1.6—3 km 高度层存在逆温, 西南风也主要分布在该高度层(图 5), 最大风速(20 m/s)所在高度约维持在 2 km, 对应出现最大相对湿度, 但比

湿小于 0.8 g/kg (图略)。云系最大回波强度(10 dBZ)主要集中在云中下部。而云底以下受东风回流影响(图 2a), 一直维持偏东风(约 6 m/s, 图 5), 由于其携带水汽较少, 主要时段并未在近地层观测到地形云上升到闫家坪。

4.2 阶段 II (云系主体): 08—14 时

08 时, 随着降雪云系主体到来, 北京观象台 S 波段雷达 PPI 显示北京北部山前, 从延庆到平谷之间存在东—西走向的降雪回波带, 前沿已到闫家坪, 最大回波强度已达 20 dBZ(图略), 回波带由南向北移动, 移速 20—25 km/h。图 4 显示回波顶高已达 7.8 km, 与探空观测云顶高度基本一致(图略), 云顶温度接近 -43°C , 云底维持在 1.6 km(-17°C), 并在 1.6—3 km 高度存在逆温, 逆温强度 $4.57^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。12—14 时, 回波顶高维持在 6.8 km(对应温度 -35°C)。云系主体非常深厚, 尤其是 10—14 时, 回波顶部具有与弱对流相关的弱波状特征。回波结构反映了云中潜在的不稳定, 这种不稳定是由于天气尺度抬升而以弱嵌对流的形式释放出来, 层结逐渐向中性调整, 假相当位温廓线(图略)也显示存在中性不稳定。图 5 显示, 云系中西南风分布厚度不仅达到最大(高度 1.6—7.3 km, 西南风速均超过 16 m/s), 而且极大风速(28 m/s)出现在 4.5 km 高度附近, 对应高空出现比湿最大值(1.6 g/kg , 图略)。

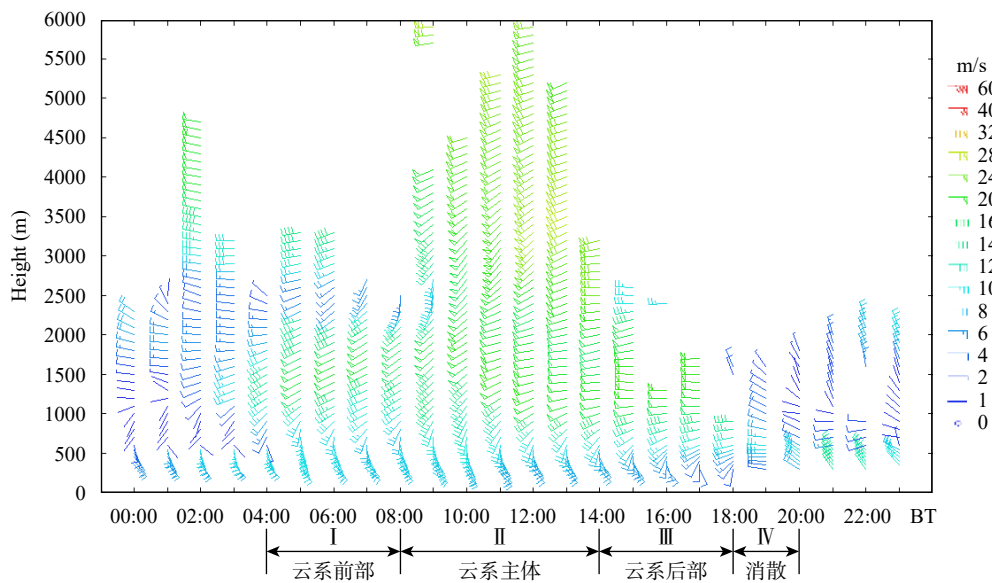


图5 闫家坪风廓线雷达风场时间序列(左侧垂直轴是距地高度)

Fig. 5 Time series of wind field observed by wind profile radar at Yanjiaping site
(left vertical axis shows height above the ground level)

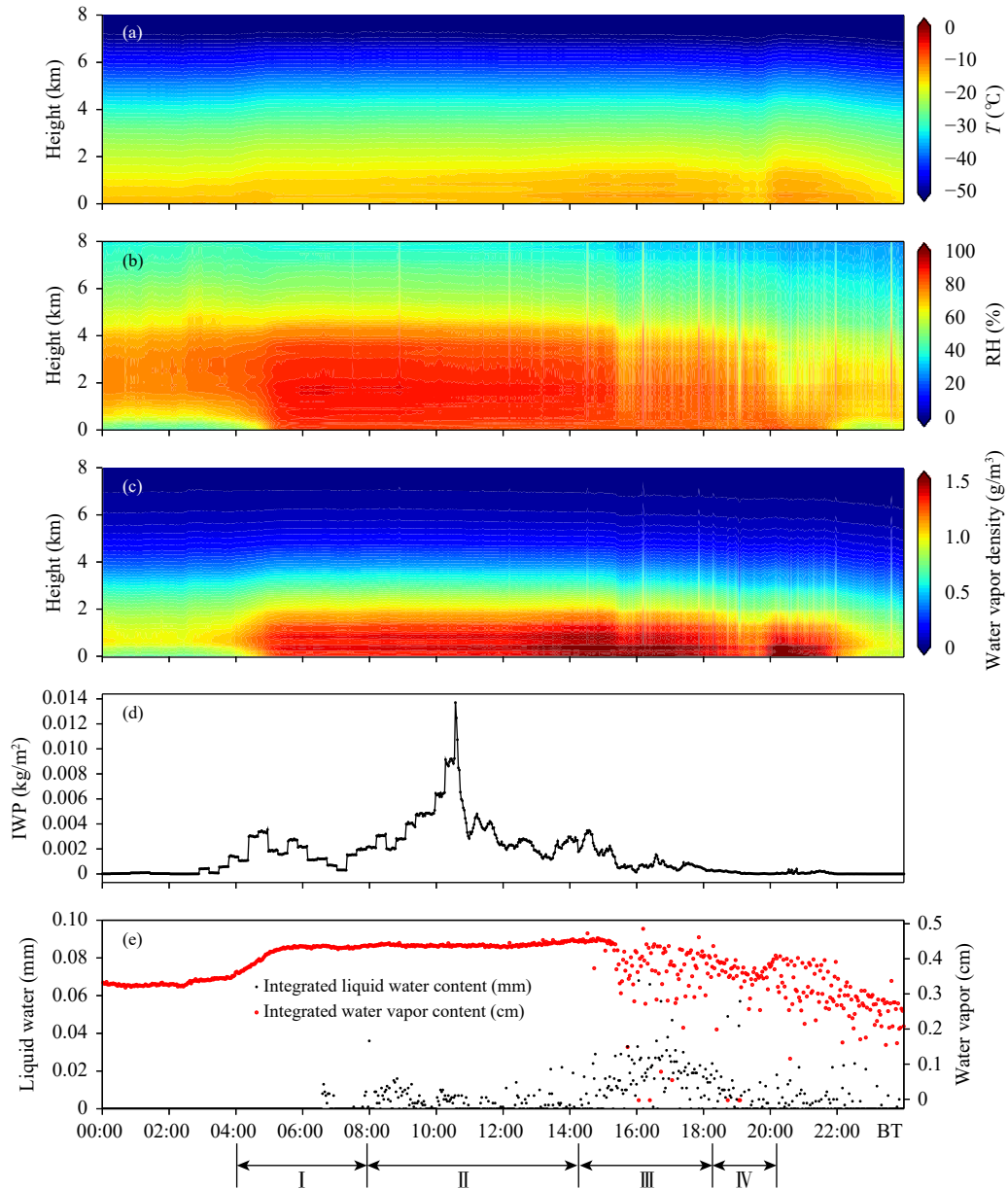


图6 闫家坪微波辐射计和云雷达综合反演参数演变

(a. 气温, b. 相对湿度, c. 水汽密度, d. 整层积分冰水路径, e. 整层积分液态水和水汽; a、b、c 垂直轴是距地高度)

Fig. 6 Time-height cross sections of (a) temperature, (b) relative humidity, (c) water vapor density and time series of (d) IWP, (e) ILWC and IWV at Yanjiaping site from 00:00 to 23:00 BT 14 February (vertical axis of a, b, c shows height above the ground level)

与阶段 I 一样, 云底以下继续处于东风回流的偏东风控制中, 雾滴谱仪观测也显示基本无地形云爬升到闫家坪(图 3f)。

4.3 阶段 III (云系后部): 14—18 时

14 时随着地面低值环流中心东移, 东风回流减弱移出, 闫家坪降雪处于低槽云系后部影响中。图 4 显示回波顶高已明显下降到 4.3—2.6 km(对应温度

-24—-15℃)。云底基本及地, 15—16 时, 地面观测到不断有地形云沿着海坨山谷爬升到闫家坪, 图 3f 显示云、雾滴数浓度出现峰值, 达 300 cm^{-3} , 并且能见度一度降到不足 100 m, 这期间地形云范围覆盖了整个冬季运动活动区, 这种低层地形云所造成的低能见度现象, 对冬季运动将产生严重影响。整层回波变薄(人工观测显示模糊可见太阳),

呈现弱的浅层对流特征,存在明显的弱不稳定,主要受地形抬升影响。云中下部仍旧存在逆温,西南风分布高度已显著降低,风速进一步减弱(图5),但由于近地层转受西南风控制,此阶段比湿达到最大(1.8 g/kg,图略)。

4.4 阶段Ⅳ(云系消散): 18—20时

消散阶段,图5显示西南风逐渐转为西北风,西南风输送的水汽减少,回波顶高进一步降低。地面观测显示可见月亮,地面风向由偏东转为偏西(图3a)。20时锋面过境后,风速迅速增大,超过10 m/s,出现风吹雪现象,锋后低层有零散的积云维持,并由西北不断向东南移动,移速很快,在移动中逐渐消散。

5 微物理结构演变特征

降雪云中是否存在过冷水对是否适合实施人工增雪至关重要。飞机可以提供过冷水直接观测资料,但受时间和山区安全飞行高度限制,而地基微波辐射计可提供连续的过冷水观测资料。图6微波辐射计观测的整层积分过冷水(ILWC)和积分水汽(IWV),以及由云雷达资料反演的整层积分冰水路径(IWP)时间演变结果显示:降雪期间地面温度始终低于0℃,ILWC和IWP不存在高估误差。根据地面雪晶形状可以了解雪晶形成温度和水汽等条件,并确定形成层高度,结合飞机观测给予验

证。除ILWC外,根据雪花凇附现象及程度也可以判断过冷水存在情况。雪晶形成温度范围数据是基于Nakaya的实验结果:柱状分别在-9—-12℃和-17—-25℃两个范围内出现;柱片组合的雪晶(不包括柱帽状)产生的温度为-28—-36℃;立体枝状:-18—-25℃;枝状(星状):-14—-17℃;片状:-10—-20℃(鄠大雄,1963)。

5.1 阶段Ⅰ(云系前部): 04—08时

04时20分,雪花为单晶体。06时06分,开始降片状雪花,六角片状单晶体尺寸小于1 mm(图7a),其他六角片状角端已出现扇片,偶尔出现枝状(约3 mm,图7b)。图6e显示在降雪初期ILWC为0,说明云中无过冷水,云系完全是冰云。06时10分,ILWC为0.01 mm,地面显示降六角片状雪花,但其角端多有延伸,或有扇片、辐枝(图7c),尺寸最大约有1.5 mm。06时33分,片状角端出现的辐枝明显增大(雪花尺寸约3.5 mm,图7d),说明云中水汽有一定升高,IWV由0.35 cm升高到0.41 cm(图6d)。06时41分,片状雪花中偶尔出现星状(约4.5 mm,图7e)。一直到08时主要为片状晶型(图7f)。阶段Ⅰ地面降雪粒子形状统计显示,93%为片状单晶体,回波顶高约4.3 km,对应温度-20℃,说明片状雪花是从这个高度生成降下。图6e显示,ILWC最大仅0.015 mm,而且只是偶尔观测到,地面降雪形状中也没有观测到凇附现象,说明云系为冰云,基

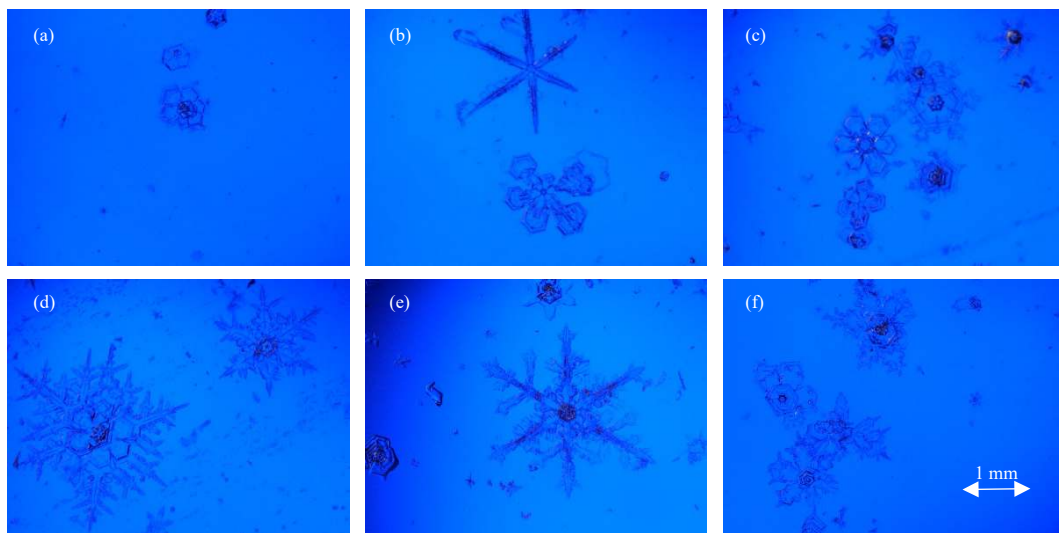


图7 阶段Ⅰ地面雪花形状演变示例(a、b. 06时06分,c. 06时10分,d. 06时33分,e. 06时41分,f. 07时41分)

Fig. 7 Observed snow habit pictures by SPI in stage I at (a) and (b) 06:06 BT, (c) 06:10 BT, (d) 06:33 BT, (e) 06:41 BT, and (f) 07:41 BT

本不存在过冷水,降雪主要由云中冰粒子的凝华增长产生。从降雪的形状及06—08时降雪强度的少变,可以看出云的结构比较均匀,雪花形成层高度随时间变化不大。图12a显示云系前部雪花粒子谱分布谱宽最窄,降雪粒子数浓度也最低。

5.2 阶段Ⅱ(云系主体):08—14时

08—09时,继续降片状雪花,主要为六角片状,并且以角端带辐枝状最多(约2.2 mm,图8a)。10时前后雪花形状变为以枝状为主,雪花尺度明显增大(约5 mm,图8b),同时也观测到枝状雪花聚并现象(图8c),降雪强度也达最大(约0.4 mm/h),这期间整层积分过冷水含量最大(约0.015 mm)。10时36分,观测到枝状雪花最大约7 mm(图8d)。一直到10时41分雪花形状基本维持为枝状,这期间也正处于底层回波强度最大期(图4)。10时41分以后,雪花形状转变为片状,而且尺度显著变小(图8e),并观测到大量六角片状上有空间片状以及柱状和柱状的结合体(尺寸小于1 mm),部分子

弹柱状聚合物(图8f、g、h、i),并一直维持到该阶段的末期(14时),这期间底层回波强度也明显减弱,降雪量也持续减小到0.2 mm/h。11时54分—12时,由于受海坨山南侧空中走廊影响,只能在闫家坪周边附近开展了飞机垂直观测(图9a),探测高度是从5286 m(-23.6℃)开始,下降到3808 m(-17.6℃),图9给出了CPI云粒子探头获得的不同高度的粒子图像,这与地面观测的雪花形状一致,说明柱状应该是在高空-17—-25℃云层中产生降落,下落的过程中可能与片状冰晶聚并,导致地面观测到大量六角片状上有空间片状以及柱状聚并的雪花(图8f)。整个阶段Ⅱ,整层积分过冷水含量只在14时达到最大0.02 mm,其他时间都低于0.01 mm,云中观测也显示过冷水含量很低(图9b),其中在最大降雪期间一度未观测到过冷水,云中冰面相对湿度整层基本上在100%,但是水面相对湿度整层低于90%(图略),700 hPa高度附近存在比湿大值区(约1.6 g/kg),IWV基本维持在0.43 cm

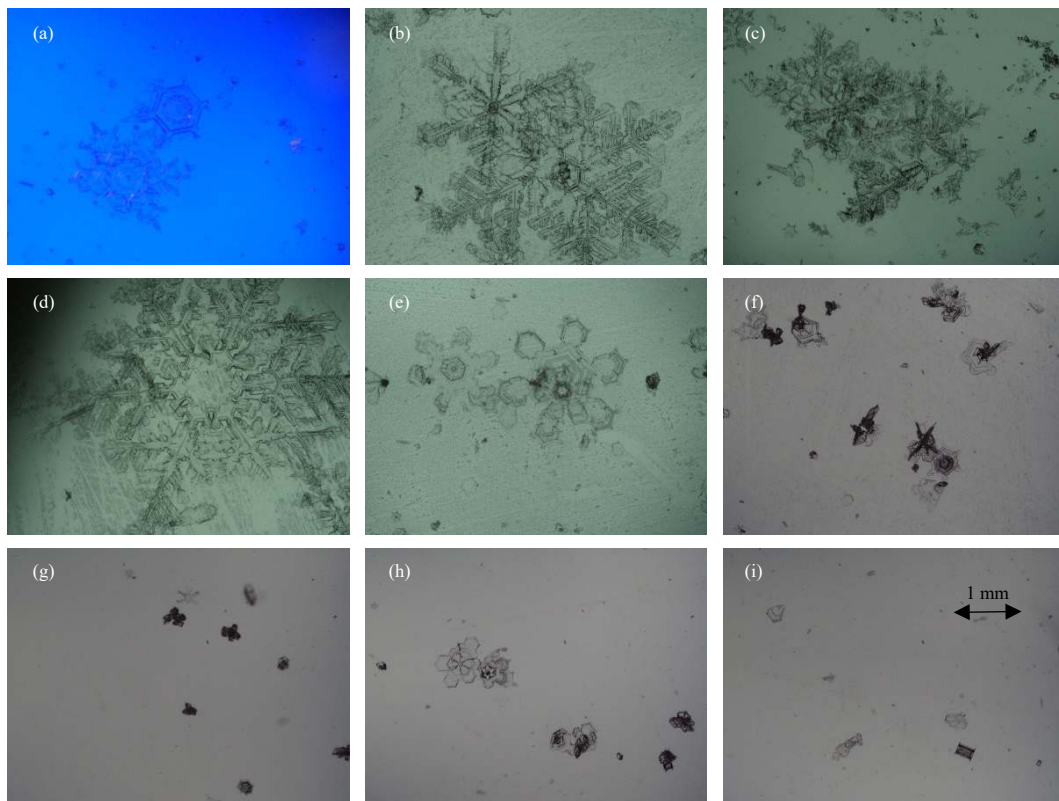


图8 阶段Ⅱ地面雪花形状演变示例

(a. 08时35分, b. 09时52分, c. 10时13分, d. 10时36分, e. 10时54分, f. 12时19分, g. 13时20分, h. 13时21分, i. 13时36分)

Fig. 8 Observed snow habit pictures by SPI in stage II at (a) 08:35 BT, (b) 09:52 BT, (c) 10:13 BT, (d) 10:36 BT, (e) 10:54 BT, (f) 12:19 BT, (g) 13:20 BT, (h) 13:21 BT, (i) 13:36 BT

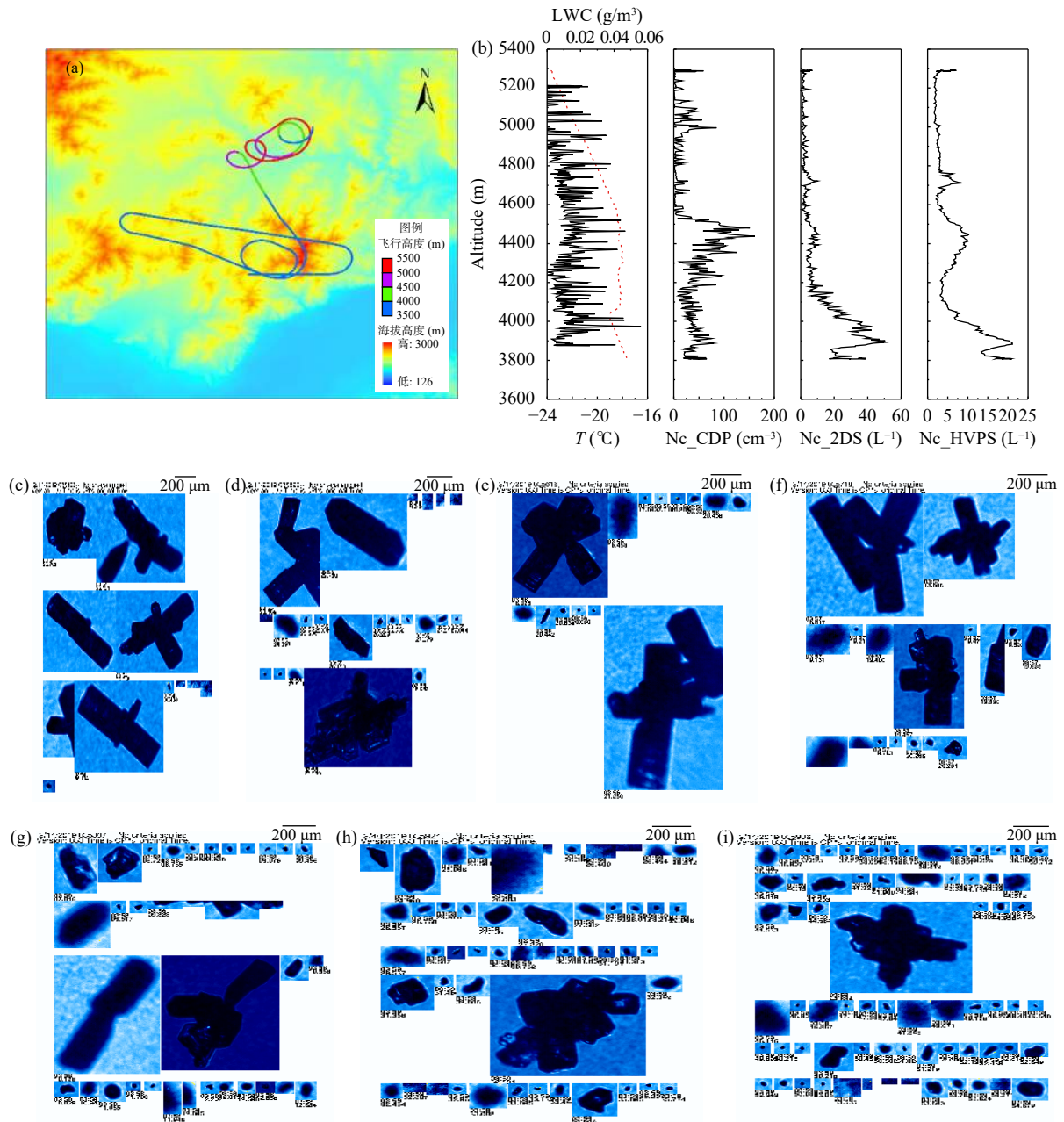


图9 (a)海坨山附近飞机探测轨迹,(b)机载云物理探头观测温度和液态水含量(虚线)、CDP、2DS及HVPS时间序列和(c—i)各高度云粒子图像示例(c. 5286 m, -23.6°C ; d. 5100 m, -22.4°C ; e. 4802 m, -20.1°C ; f. 4498 m, -18.3°C ; g. 4199 m, -18.2°C ; h. 3900 m, -18.2°C ; i. 3808 m, -17.6°C)

Fig. 9 Flight path (a), time series of temperature, LWC (dotted red line), CDP, 2DS and HVPS (b) and examples of particle images observed by SPEC CPI probe at the altitudes (c) 5286 m, -23.6°C ; (d) 5100 m, -22.4°C ; (e) 4802 m, -20.1°C ; (f) 4498 m, -18.3°C ; (g) 4199 m, -18.2°C ; (h) 3900 m, -18.2°C ; and (i) 3808 m, -17.6°C

(图 6e), 对应图 6d 显示 IWP 也出现最大值 (0.015 kg/m^2), 雪花粒子谱分布显示此阶段谱宽最宽, 降雪粒子数浓度也最高(图 12a)。云中和地面未观测到淞附现象, 表明凝华-聚并是降雪增长的重要过程。

5.3 阶段 III (云系后部): 14—18 时

14 时 25 分后, 观测的雪花主要为枝状(最大约 4 mm, 图 10a), 14 时 35 分前后出现大量枝状聚并雪花(图 10b、c、d)。这些聚并的雪花降落到载玻片上后就自然散开成大量的枝状单晶体, 并且大部

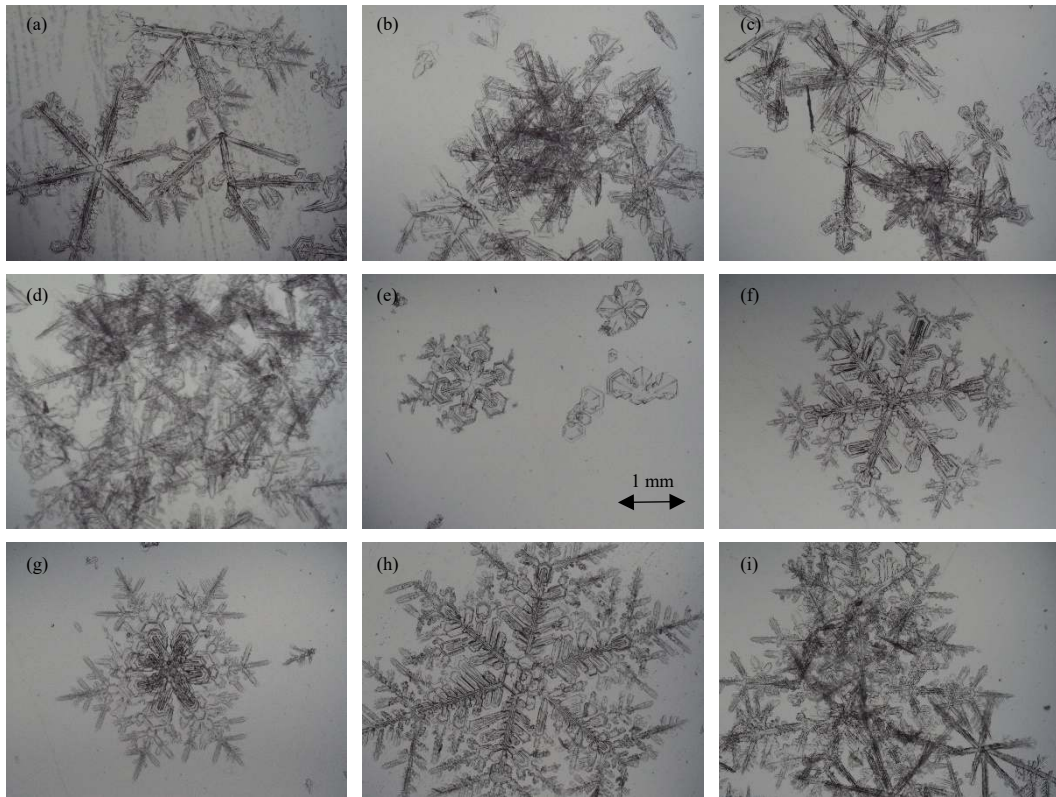


图 10 阶段Ⅲ地面雪花形状演变示例

(a. 14时27分, b. 14时34分, c, d. 14时35分, e. 15时17分, f. 16时11分, g. 16时12分, h. 16时42分, i. 16时51分)

Fig. 10 Observed snow habit pictures by SPI in stage III at (a) 14: 27 BT, (b) 14: 34 BT, (c) and (d) 14: 35 BT, (e) 15: 17 BT, (f) 16: 11 BT, (g) 16: 12 BT, (h) 16: 42 BT, (i) 16: 51 BT

分容易破碎, 聚并枝状单晶体尺寸平均约 2 mm, 枝状聚并现象维持到 15 时, 这期间底层雷达回波强度也对应出现最大值。随后枝状雪花减少, 主要为片状雪花, 结构也相对简单而且比较单薄, 容易破碎(图 10e), 这些雪花形状基本一直维持到 16 时。16 时后再次出现枝状单晶体雪花, 而且单个晶体尺度非常大(图 10f、g), 观测到最大达 7 mm(图 10h), 观测显示这期间不断有地形云爬升到闫家坪, 其整层积分过冷水(ILWC)也达到最大的 0.07 mm, IWV 最大接近 0.5 cm, 可能与地形云贡献有关, 这与以往研究(Rauber, 1987)中观察到的与地形抬升相关的过冷水特征一致。17 时后还观测到枝状聚并雪花(图 10i), 这些参与聚并的单晶体雪花尺度也基本在 3—4 mm。图 6d 显示整个降雪过程 ILWC 最大值出现在阶段Ⅲ, 比湿在低层也最大达 1.8 g/kg(图略), 而 IWP 很小(图 6d), 说明此阶段是降雪云系水汽最多时期, 尽管这样, 但 ILWC 量级还是很小, 地面观测到弱的淞附现象, 降雪主要

由凝华-聚并过程形成。

5.4 阶段Ⅳ(云系消散): 18—20 时

18 时之后地面降雪形状又转变为以片状为主(图 11a), 尺寸也变小, 偶尔出现枝状聚并雪花, 但不多见(图 11b), 主要还是以片状单晶体为主(图 11c), 接近 19 时曾观测到六角片状上有空间片状(图 11d)。19 时后随着降雪明显减弱, 地面雪花形状基本是片状单晶体(图 11e), 偶尔有柱状(图 11f), 尺度显著变小低于 1 mm。整层积分过冷水含量又减少到 0.015 mm 以下, 地面未观测到淞附现象, 跟阶段 I 云系前部一样, 降雪主要还是由云中冰粒子凝华增长产生。雪花粒子谱分布显示该阶段与第 I 阶段基本一样, 谱宽最窄, 降雪粒子数浓度也最低(图 12a)。

6 结论

低槽降雪是 2 月北京海坨山区典型的天气过程。2019 年 2 月 14 日, 在 TOP-ICE 研究计划实施期间, 高空低槽系统配合地面倒槽和东风回流共同

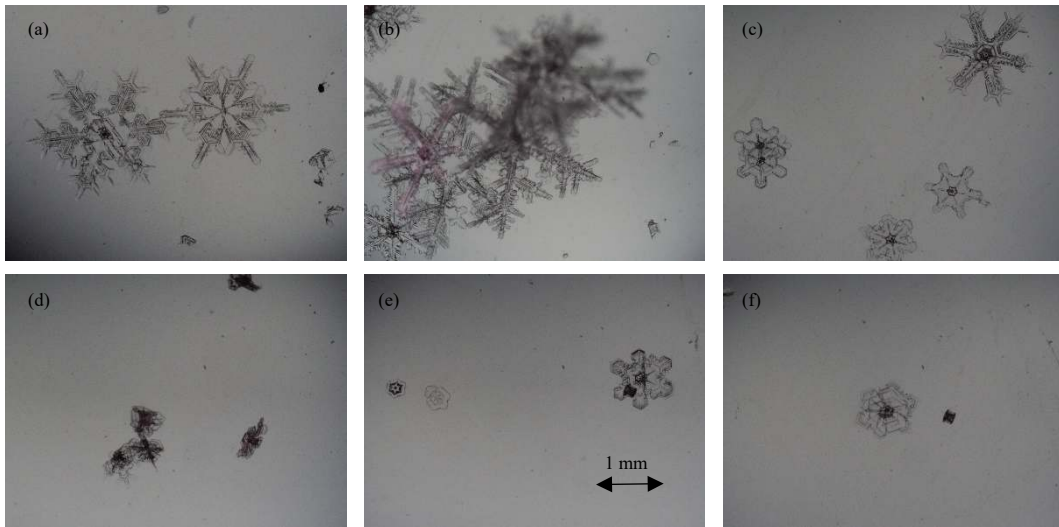


图 11 阶段IV地面雪花形状演变示例

(a. 18时37分, b. 18时40分, c. 18时52分, d. 18时57分, e. 19时06分, f. 19时07分)

Fig. 11 Observed snow habit pictures by SPI in stage IV at (a) 18: 37 BT, (b) 18: 40 BT, (c) 18: 52 BT, (d) 18: 57 BT, (e) 19: 06 BT, and (f) 19: 07 BT

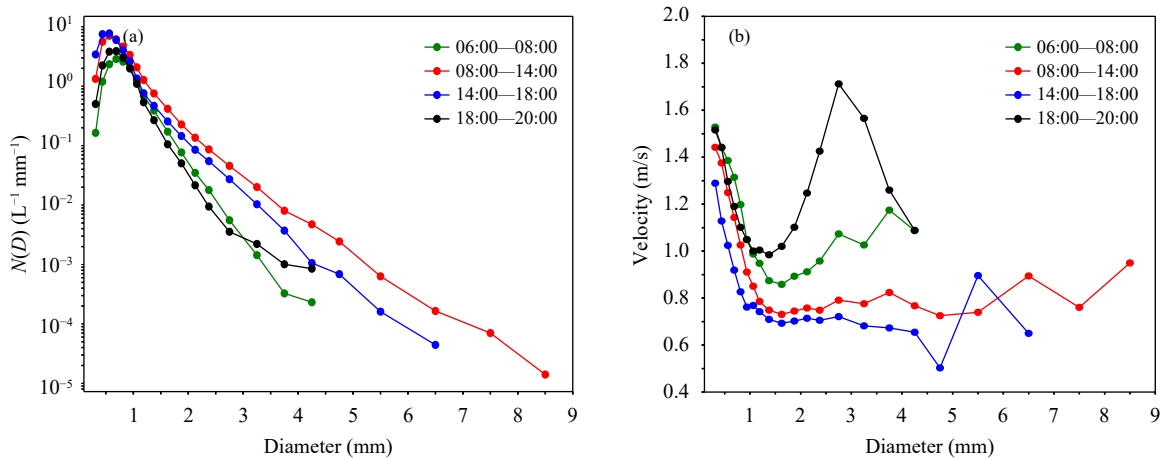


图 12 降雪粒子平均谱 (a) 和下落末速度与直径的关系 (b)

Fig. 12 Average size spectra (a) and terminal velocity (b) of snow particles with regard to diameter from 06: 00 to 20: 00 BT 14 February 2019

作用下形成的降雪云系影响海坨山区。利用 Ka 波段多普勒雷达、微波辐射计、风廓线雷达、降雪显微观测仪和机载云物理探头等协同观测数据集,分析了该次降雪过程的天气形势、中尺度和微物理结构的演变特征。综合分析结果总结在概念性示意图 13 中。在该个列中,降雪过程分为 4 个阶段:云系前部(I)、云系主体(II)、云系后部(III)和云系消散(IV),主要结论如下:

(1)云系前部阶段,中高层西南风在低层东风回流控制下的偏东风上部明显增强,地面相对湿度和 IWV 出现跃增现象。降雪雷达回波属稳定层状

云回波,地面降雪粒子为片状单晶体,基本无过冷水存在,地面降雪无淞附和攀附现象发生,云系为冰云,降雪主要由云中冰粒子的凝华增长产生。

(2)云系主体影响阶段,低层由东风回流的偏东风继续控制,但中高层西南风无论厚度和强度都达最大。云系为深厚层状云,处于中性不稳定。地面随着攀附的枝状雪花出现,降雪量达最大。地面出现的大量片状、柱状及柱片状攀附雪花与飞机空中观测结果一致,但地面和飞机都没有观测到淞附现象,凝华-聚并是降雪增长的重要机制。

(3)云系后部影响期间,东风回流东退减弱,低

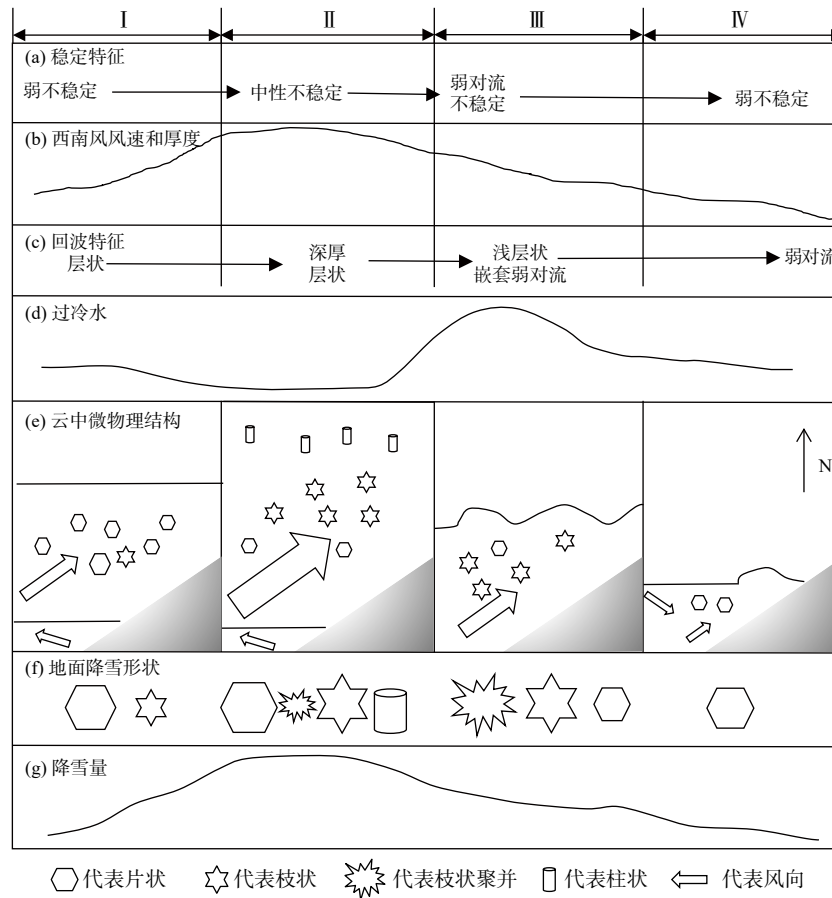


图 13 闫家坪 2019 年 2 月 14 日低槽降雪云系结构演变概念示意

Fig. 13 Schematic of the change of the low trough snow cloud structures and their environmental conditions in Yanjiaping on 14 Feb 2019: (a) stability, (b) ambient wind speed component, (c) echo patterns, (d) LWC, (e) microphysical structures in snow cloud, (f) snow habit pictures and (g) snowfall

层转由槽前西南气流控制, 导致不断有波状地形云爬升到闫家坪, 造成低于 100 m 的低能见度事件, 与之对应的 ILWC 出现最大值, 比湿在底层也出现最大值, 说明过冷水的出现与地形云有关。由于整层西南气流厚度显著减小, 回波顶高也明显下降, 存在弱的对流不稳定, 地面雪晶观测显示主要为攀附的枝状雪花, 但并无凇附现象, 降雪仍旧主要由凝华-聚并过程形成。

(4) 在云系消散阶段, 西南风明显减弱, 干燥西北风占主导, 地面雪花相态由片状和枝状单晶体构成。降雪停止后出现大风吹雪现象, 并且低层有零散的积云持续, 在快速移动中消散。

(5) 在降雪云系后部, 即东风回流减弱, 整层由槽前西南气流控制后, 不断有地形云在山谷爬升, 并对应出现了 ILWC 和比湿的最大值, 地形云爬升

期间存在人工增雪潜力。但是整个降雪期间地面降雪形状主要为片状、枝状和柱状单晶体, 并未观测到凇附现象(包括飞机空中观测结果), 说明该个例降雪云中无过冷水, 人工增雪潜力比较弱, 冰、雪晶的凝华-聚并增长是降雪的主要形成机制。

致谢 感谢陶玥博士提供卫星观测分析资料, 张邢提供风廓线分析资料, 肖伟提供探空资料分析以及秦睿对文章提出的修改意见。

参考文献

陈羿辰, 金永利, 丁德平等. 2018. 毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析. 大气科学, 42(1): 134-149. Chen Y C, Jin Y L, Ding D P, et al. 2018. Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar in snow observation. Chinese J Atmos Sci, 42(1): 134-149 (in Chinese)

鄯大雄. 1963. 一次华北冬季弱降水系统的雪晶分析. 气象学报, 33(4): 554-561. Feng D X. 1963. A weak north China winter snow crystals

- precipitation system analysis. *Acta Meteor Sinica*, 33(4): 554-561 (in Chinese)
- 胡云涛, 高太长, 曾培培等. 2017. 2014-2016年南京地区降雪微物理特征. *气象与减灾研究*, 40(2): 107-110. Hu Y T, Gao T C, Zeng P P, et al. 2017. Analysis of the micro-physical characteristics of snow in Nanjing area. *Meteor Disaster Reduction Res*, 40(2): 107-110 (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. *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. *Chinese J Atmos Sci*, 44(2): 356-370 (in Chinese)
- 贾星灿, 马新成, 毕凯等. 2018. 北京冬季降水粒子谱及其下落速度的分布特征. *气象学报*, 76(1): 148-159. Jia X C, Ma X C, Bi K, et al. 2018. Distributions of particle size and fall velocities of winter precipitation in Beijing. *Acta Meteor Sinica*, 76(1): 148-159 (in Chinese)
- 李遥, 牛生杰, 吕晶晶等. 2019. 2018年冬季南京三次暴雪过程微物理特征分析. *大气科学*, 43(5): 1095-1108. Li Y, Niu S J, Lü J J, et al. 2019. Analysis on microphysical characteristics of three blizzard processes in Nanjing in the winter of 2018. *Chinese J Atmos Sci*, 43(5): 1095-1108 (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. *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. *Quart J Appl Meteor*, 1(2): 113-122 (in Chinese)
- 孙继松, 梁丰, 陈敏等. 2003. 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析. *大气科学*, 27(6): 1057-1066. Sun J S, Liang F, Chen M, et al. 2003. An analysis on serious city traffic trouble caused by light snow. *Chinese J Atmos Sci*, 27(6): 1057-1066 (in Chinese)
- 王广河, 游来光. 1989. 乌鲁木齐冬季冷锋云带和锋下层积云的微物理结构及其降雪特征. *气象*, 15(3): 15-19. Wang G H, You L G. 1989. The microphysical structures and precipitation characteristics of the cloud zone, over a wintertime cold front and stratocumulus under it in Urumqi. *Meteor Mon*, 15(3): 15-19 (in Chinese)
- 王建中, 丁一汇. 1995. 一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究. *气象学报*, 53(4): 451-460. Wang J Z, Ding Y H. 1995. Research of moist symmetric instability in a strong snowfall in North China. *Acta Meteor Sinica*, 53(4): 451-460 (in Chinese)
- 王谦, 游来光, 胡志晋. 1978. 新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究: 个例的观测结果与分析. *气象学报*, 45(1): 2-12. Wang Q, You L G, Hu Z J. 1978. Study on stratocumulus clouds in Urumqi, Xinjiang: Case study and Analysis. *Acta Meteor Sinica*, 45(1): 2-12 (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. *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. *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. *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. *Acta Meteor Sinica*, 47(1): 73-81 (in Chinese)
- 游来光, 李炎辉, 刘玉宝. 1992. 自然云中冰晶生成的核化过程及雪晶对过冷云滴的撞冻. *气象学报*, 50(2): 232-238. You L G, Li Y H, Liu Y B. 1992. On the nucleation processes of ice crystal and the collision efficiency between the dendritic snow crystal and droplets in natural clouds. *Acta Meteor Sinica*, 50(2): 232-238 (in Chinese)
- 张琳娜. 2014. 北京地区灾害性天气概念模型. 北京: 气象出版社. Zhang L N. 2014. Conceptual Model of Severe Weather in Beijing. Beijing: China Meteorological Press (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 Appl Meteor Climatol*, 53(2): 282-299
- Colle B A, Stark D, Yuter S E. 2014. Surface microphysical observations within east coast winter storms on Long Island, New York. *Mon Wea Rev*, 142(9): 3126-3146
- Geerts B. 2013. The AgI seeding cloud impact investigation (ASCII) campaign 2012: Overview and preliminary results. *J Wea Mod*, 45: 24-43
- Gibson S R, Stewart R E. 2007. Observations of ice pellets during a winter storm. *Atmos Res*, 85(1): 64-76
- 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 Appl Meteor Climatol*, 14(5): 783-804
- Jia X C, Liu Y G, Ding D P, et al. 2019. Combining disdrometer, microscopic photography, and cloud radar to study distributions of hydrometeor types, size and fall velocity. *Atmos Res*, 228: 176-185
- Ma X C, Bi K, Chen Y B, et al. 2017. Characteristics of winter clouds and precipitation over the mountains of northern Beijing. *Adv Meteor*, 2017(9): 1-13
- Maahn M, Kollias P. 2012. Improved micro rain radar snow measurements using Doppler spectra post-processing. *Atmos Meas Tech*, 5(11): 2661-2673
- Magono C, Lee C W. 1966. Meteorological classification of natural snow crystals. *J Faculty Sci, Hokkaido Univ Ser 7*, 2(4): 321-335
- Matrosov S Y, Shupe M D, Djalalova I V. 2008. Snowfall retrievals using millimeter-wavelength cloud radars. *J Appl Meteor Climatol*, 47(3): 769-777
- Mosimann L, Weingartner E, Waldvogel A. 1994. An analysis of accreted drop sizes and mass on rimed snow crystals. *J Atmos Sci*, 51(11): 1548-1558
- Rauber R M. 1987. Characteristics of cloud ice and precipitation during wintertime storms over the mountains of northern Colorado. *J Appl Meteor Climatol*, 26(4): 488-524
- Stoelinga M T, Hobbs P V, Mass C F, et al. 2003. Improvement of microphysical parameterization through observational verification experiment. *Bull Amer Meteor Soc*, 84(12): 1807-1826
- Tessendorf S A, French J R, Friedrich K, et al. 2019. A transformational approach to winter orographic weather modification research: The SNOWIE project. *Bull Amer Meteor Soc*, 100(1): 71-92
- Thériault J M, Rasmussen K L, Fisco T, et al. 2014. Weather observations on whistler mountain during five storms. *Pure Appl Geophys*, 171(1): 129-155