山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究

封秋娟[1,2,3] 牛生杰[1*] 侯团结[4] 范秀平[5] 申东东[2] 杨俊梅[2]

1 南京信息工程大学，中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室，南京 210044

2 山西省人工增雨防雷技术中心，太原 030032

3 中国气象局云雾物理环境重点开发实验室，北京 100081

4 中国科学院大气物理研究所，北京 100029

5 山西省气象信息中心，太原 030032

摘 要 通过飞机直接进入降雪云进行探测，并配合 MICPAS、雷达和卫星等资料，对 2011 年 11 月 29 日山西一次降雪云宏微观结构特征进行分析。研究发现：本次降雪过程的雷达回波以 10~20dBZ 大片层状云回波为主，镶嵌了超过 30dBZ 的块状强回波，雷达径向速度零线呈较强的“S”型弯曲，出现“牛眼”结构，从低层到高层有较强的风垂直切变。液水含量主要位于 3.2km 以下，最大值为 0.0697g m^{-3}，冰雪晶数浓度 N_{50}、N_{200} 和冰水含量主要产生于层积混合降雪云的上部，极大值出现在-9.3℃附近，分别为 188.4L^{-1}、33.5L^{-1} 和 0.121g m^{-3}。-14.4~-19.7℃冰晶图像以针状、柱状和不规则状为主，以冰晶的凝华增长为主。-9.3℃附近冰雪晶图像以辐枝状、不规则状为主，辐枝状冰晶的聚并碰撞和折裂繁生可能是造成此处冰雪晶高浓度的主要原因。利用指数形式能较好地拟合冰雪晶谱分布，谱拟合参数可以用幂函数 $Nos=1.021\lambda^{1.684}$ 表示，相关系数 R^2 为 0.86。3.2km 以下存在三次逆温，逆温层的出现使云微物理特征量和拟合参数 *Nos* 减小，抑制了云内淞附增长和凝华增长，导致本次观测谱拟合参数 *Nos*、λ 随温度的变化规律与以往的观测不一致，逆温强度越大抑制作用越大。

关键词 强降雪云 冰雪晶图像 形成机制 飞机探测

文章编号 **中图分类号** **P481** **文章标识码** **A**

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21004

Aircraft Observation of Physical Characteristics of Snowfall Cloud in Shanxi Province

FENG Qiujuan[1,2,3], NIU Shengjie[1,*], HOU Tuanjie[4], FAN Xiuping[5], SHEN Dongdong[2] and YANG Junmei[2]

1 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration,Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

收稿日期 2021-01-09；**网络预出版日期**

作者简介 封秋娟，女，1982 年出生，博士研究生，研究方向为云降水物理与人工影响天气。E-mail: fqj119818@163.com

通讯作者 牛生杰，E-mail: niusj@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2019YFC1510304，山西省气象局重点项目 SXKZDRY20165205，中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题 2017Z016，江苏省普通高校学术学位研究生科研创新计划项目 KYLX16_0938

Funded by National Key R&D Program of China (2019YFC1510304) ,Key Project of Shanxi Meteorological Administration (Grant SXKZDRY20165205),Open Project of Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration (Grant 2017Z016),Research and innovation project of academic degree postgraduates in Jiangsu Province(Grant KYLX16_0938)

2 Shanxi Artificial Precipitation Enhancement and Lightning Protection Technical Center, Taiyuan 030032

3 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration,Beijing 100029

4 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

5 Shanxi Meteorological Information Center，Taiyuan 030032

Abstract Based on the aircraft directly entering the snowfall cloud with the data of micpas, radar and satellite, the macro and micro structure characteristics of heavy snowfall cloud under the influence of Reflux system in Shanxi Province on November 29th, 2011 were analyzed. It is found that the radar echo of this snowfall process was mainly between 10 and 20dBZ large stratiform cloud echo, inlaid with more than 30dBZ massive strong echo.The zero line of radar radial velocity had a strong "s" curve with a bull's-eye structure. There was a strong wind vertical shear from the lower level to the upper level. The liquid water content was mainly below 3.2km and the maximum value was 0.0697 g m^{-3}. The ice and snow crystal number concentration N_{50}, N_{200} and ice water content were mainly produced in the upper part of the stratiform mixed snowfall cloud, and the maximum values appeared near -9.3 ℃ , which were 188.4L^{-1}, 33.5L^{-1} and 0.121g m^{-3} respectively. From -14.4 to -19.7 ℃ the images of ice crystals were mainly needle, columnar and irregular and ice particles grew mainly by deposition. The images of ice and snow crystals near -9.3 ℃ were mainly dendritic and irregular. The aggregation, collision and fracture of radial dendritic ice crystals may be the main reason for the high concentration of ice and snow crystals. The distribution of ice and snow crystal spectrum can be well fitted by the exponential form. The spectrum fitting parameters can be expressed by the power function $Nos=1.021\lambda^{1.684}$ and the correlation coefficient R^2 was 0.86. There were three inversion times below 3.2km. The appearance of inversion layer made the cloud microphysical characteristics and fitting parameter Nos decrease and inhibited the growth of riming and deposition. As a result, the variation of fitting parameters Nos and λ with temperature in this observation was inconsistent with the previous observation. The greater the inversion intensity was, the greater the inhibition effect was.

Keywords Reflux system, Ice and snow image, Formation mechanism, Aircraft observation

1 引言

降雪是中国北方冬季主要天气现象，山西冬季降雪气候特征以寒冷干燥为主，降雪稀少，年际变化大，降雪量集中。近年来，由于气候变化和环境条件等因素影响山西冬季降雪量减少。在气候系统中降雪云能发挥重要作用，影响地气系统的能量平衡、辐射传输和水循环，对其进行研究，有助于了解山西降雪的发生发展机制。

通过飞机穿云探测可直接获取云中冰雪晶特征，从而推断降雪形成和增长的机制。国外开展过一些降雪云结构的飞机观测（Sekhon et al.，1970；Lo and Passarelli，1982；Heymsfield et al.，2002）。Rauber et al.（1987）通过对科罗拉多山区多个冬季降雪系统的遥感、地面观测、飞机等过程资料进行分析，发现冰粒子主要在云顶部生成，在地形抬升区域和深厚的云的下部增加。Reynoldset al.（2010）分析了 Sierra Necada 山区降雪过程的微波辐射计、雷达、卫星等数据，发现高空锋面系统的高空急流后存在过冷水高值区。Woods et al.（2008）等分

析了通过飞机观测收集到的冬季锋面和地形降水系统在不同高度和温度下的冰雪晶谱发现，冰雪晶谱一般呈指数分布，通过谱拟合参数的变化进一步研究降雪机制。Saleeby et al. (2011)利用飞机探测资料分析发现冷云中云微物理参数不仅与雨滴和冰晶的数浓度相关，还和雨滴的最终下落末速度有关。Bart and Yang (2015)对怀俄明 16 次降雪过程进行了飞机观测，分析了不同动力过程降雪的生长、传输和沉积机制，并总结了概念模型。

在我国也开展了一些降雪云结构的飞机观测。游来光等（1989，1992）、陈万奎（1987）在新疆开展降雪云微结构的观测，对冰晶核化、雪晶对过冷云滴的撞冻、枝状雪晶的碰撞攀附等进行研究发现，1.5km 以上冰晶以凝华增长为主，并对下层有播种效应，1.5km 以下冰晶以聚合增长为主。Ma et al.（2017）利用地面仪器、遥感和飞机观测对影响北京海坨山冬季降雪云特征进行观测发现 12 次降雪过程主要天气系统是高空槽和低涡。58%的降水仅出现在夜间，只有 8%的降雪发生在白天。液态水的第一个峰值出现在降雪的早期，随地形云的抬升而增加。

最近几年利用云雷达、风廓线雷达、微波辐射计、雨滴谱仪等人影地基观测设备，开展对降雪云结构特征的研究（高茜等，2020；贾星灿等，2018）。Jing et al.(2015)利用机载 X 波段双偏振雷达对冬季的 6 次降雪过程进行观测，发现催化后降雪的增加与反射率的增大一致，并发生在低层，同时由于水汽的扩散和聚合导致降雪的增加。Kim and Lee（2015）用微波辐射计和风廓线对韩国冬季降雪进行观测，发现风廓线反演的液水含量和水汽与微波辐射计结果一致，降雪热力特性取决于上升气流强度和云顶高度。陈羿辰等 (2018)以云雷达为主，配合多普勒天气雷达、人工观测和自动站等手段对北京山区降雪进行了观测，探讨了如何利用云雷达估计降雪量和雪粒子含水量。黄钰等（2020）利用云雷达、风廓线雷达、微波辐射计和粒子谱仪等设备，结合中尺度数值模式 WRF 对北京延庆海坨山地区降雪过程进行分析发现，上升气流有助于水汽的输送、冰雪转化以及雪晶凝华、聚合，冰晶数浓度中心对应着上升运动顶部。

本文利用机载云物理设备直接进入降雪云，并配合常规天气资料、雷达和卫星等手段，从降雪云的冰雪晶浓度垂直分布、粒子图像、谱分布及拟合等方面入手，对 2011 年 11 月 29 日山西一次降雪云的宏微观特征和形成机制进行研究。对降雪云结构的研究能改进模式中云的参数化，进一步理解降雪云对气候变化的影响，并指导人工增雪作业。

2 宏观特征及飞机探测

2011 年 11 月 29 日 08 时（北京时，下同）高空 500hPa 河套地区至贵州有一较强冷性低槽，山西全省处于槽前西南急流带之中，700hPa 河套底部至成都有一切变线，沿切变线有西南暖湿空气向山西北部输送，850hPa 蒙古中部有一冷高压，山西南部到四川成都有一倒槽，08 时地面山西中东部受高压底部回流影响（见图 1）。受高空冷槽和地面回流系统共同影响，11 月 29 日 08 时至 30 日 08 时山西普降中到大雪，大部分地区下了暴雪。赵桂香等（2011）以地面系统为依据，综合分析了 1971~2008 年山西 108 个地面气象观测站常规观测资料，认为山西大雪天气的主要影响系统有地面回流、河套倒槽及两者共同作用等三类。地面回流类系统在 500hPa 对应位置有-40℃冷中心，地面冷高压东移发展，形成回流，系统强盛时，出现全省性大范围的大雪天气，一般持续时间较短多为 1 天。河套倒槽类系统在 500hPa 高原到山西产生弱西南气流， -40℃冷中心位于贝加尔湖附近，大雪主要落区在山西中北部，系统强盛时出现全省大范围降雪天气。地面回流与河套倒槽共同作用类系统在 500hPa 高原到山西西南气流加强，冷高压位置出现-40℃冷中心，地面冷高压东移发展形成回流，河套倒槽在降雪前一日 14 时达到最强盛，大雪落区主要在山西中南部或全省范围，降雪持续时间较长，山西常常出现持续 2 天以上的大雪天气。

从 11 月 29 日 10 时 30 分 FY-2D 红外云图可以看到（见图 2），河西走廊至成都、内蒙古中部至渤海湾覆盖有大片云系，主要云带位于 500hPa 槽线和 700hPa 切变线附近，其北部及西部边缘呈人字形，云系中心位于山西中部，云系深厚，色调均匀，呈红色，云顶亮温低，云顶高度较高，对比同时次可见光云图山西全省有云系覆盖，云体紧密厚实，分布均匀，主要由中高云系构成，分布与地面倒低压控制范围一致。

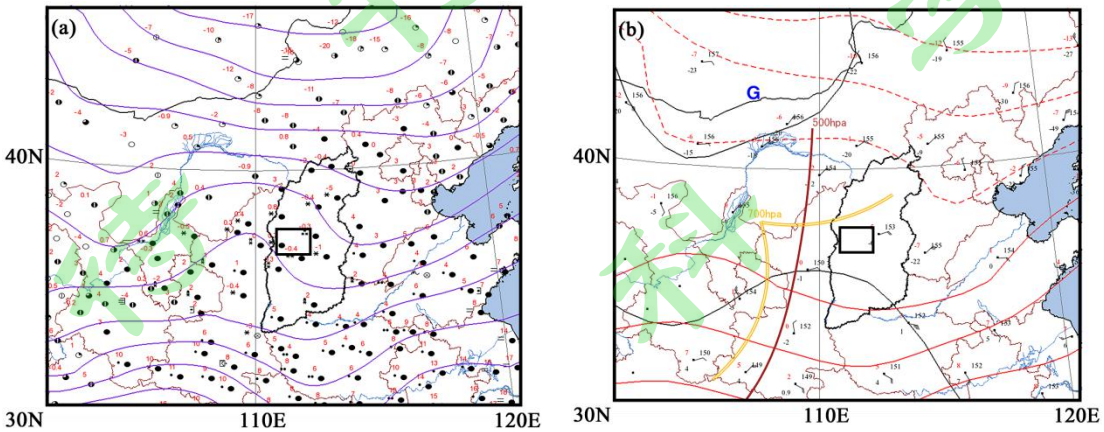


图 1 2011 年 11 月 29 日（a）11:00 地面形势和（b）08:00 850hPa 高空形势（黑色矩形代表飞行区域）

Fig.1 (a) The ground situation at 11:00 (b) the high aititude situation of 850hPa at 08:00 on 29 November 2011 (the black rectangle represents the flight area)

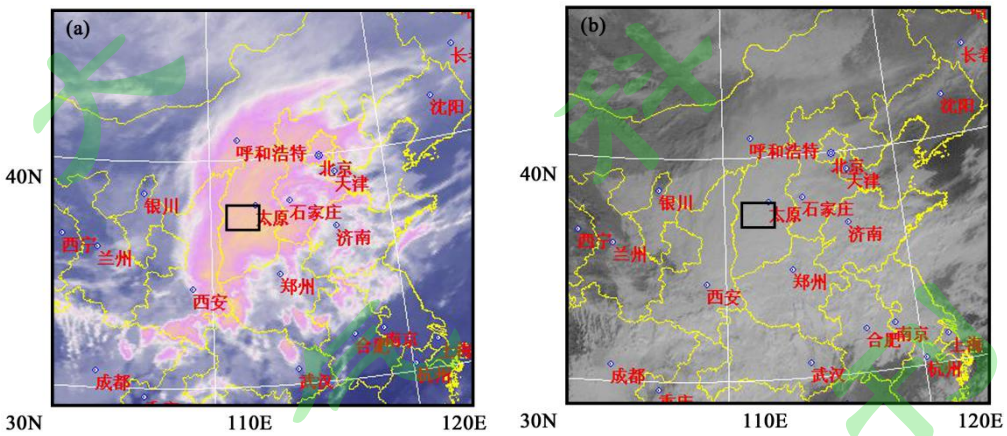


图 2 2011 年 11 月 29 日 10:30 FY-2D（a）红外云图、（b）可见光云图（黑色矩形代表飞行区域）

Fig.2 FY-2D at 10:30 on 29 November 2011(a)Infrared cloud image，(b) visible light cloud image (the black rectangle represents the flight area)

2011 年 11 月 29 日雷达 PPI 显示大范围片状降雪云回波，强度在 10~20dBZ，回波顶高 7km 以上，1~3km 镶嵌了强度超过 30dBZ 的块状回波（见图 3（a））。为了研究不同层次和区域的降雪云发展情况，结合飞机轨迹上的雷达回波、云中微结构不均匀性和水平跨度的分布，将穿云探测大致分为三个部分：8:38~8:49（900~3282m）穿过层状云降雪回波主体，

为 P1；8:49~9:06（3282-5495m）穿过层积云降雪回波的上部，为 P2；9:06~9:20（5495~6364m）在层状云降雪回波的上部飞行，为 P3（见图 3（b））。雷达径向速度零线呈较强的“S”型弯曲，同时出现“牛眼”结构，低层为东北到西南的气流，高层为西南到东北的气流，从低层到高层有较强的风垂直切变，为顺时针切变，表现为大尺度暖平流（见图 3（c））。8:38~9:20 对山西中部（太原~离石）降雪云系进行飞机穿云探测（见图 3（d）），根据宏观记录，最高飞行高度 6364m，未到达云顶。

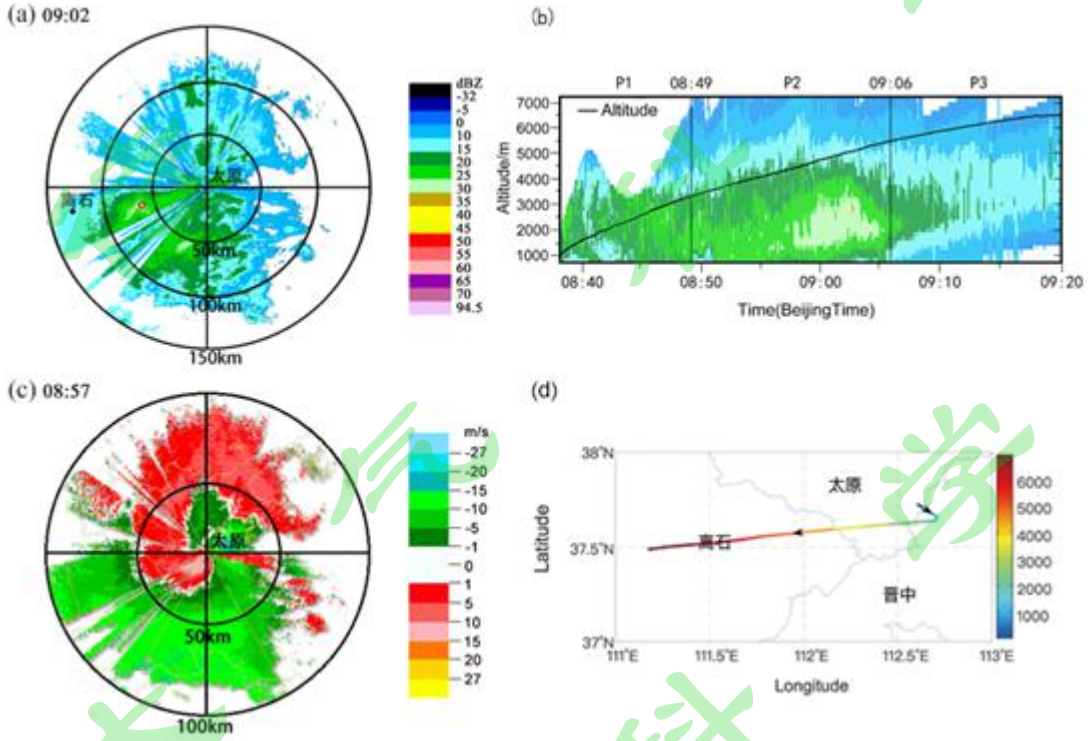


图 3 2011 年 11 月 29 日（a）09 时 02 分 1.5°仰角 PPI 回波（b）沿飞行轨迹的 RHI 回波（单位：dBZ）（c）08 时 57 分 1.5°仰角速度回波（单位：m s^{-1}）（d）飞行轨迹

Fig.3（a）PPI echo on 1.5 ° elevation at 09:02，(b) RHI echo along flight path (Unit: dBZ)，(c) velocity echo on 1.5 ° elevation at 08:57 (Unit: m s^{-1})，(d) flight path on 29 November 2011

3 仪器和数据处理

本次观测使用的飞机为运-12，地面配合的观测仪器是太原 C 波段多普勒雷达，在观测期间同时收集了探空资料和卫星云图。表 1 给出了机载云物理观测仪器的参数和测量内容，云滴的分布使用 CDP（Cloud Droplet Probe）探头数据（2~50μm），CIP（Cloud Imaging Probe）（25~1550μm）和 PIP（Precipitation Imaging Probe）（100~6200μm）探头分别给出冰雪晶粒子的数浓度、图像和谱分布，飞机综合气象要素测量系统 AIMMS-20（Aircraft Integrated Meteorological Measurement System），主要用于测量温度、湿度、相对湿度、空气的静态气压和动态气压、风速、风向、轨迹等。仪器均安装在飞机机翼的下方，飞机的巡航速度约为 60m s^{-1} 左右，所有仪器在观测前都进行了标定。

表 1 DMT 机载仪器参数

Table1 DMT (Droplet Measurement Technology) parameters list of detecting probes

序号	仪器名称	量程（μm）	通道	测量内容
1	AIMMS-20			温度，湿度，轨迹
2	CDP	2~50	30bin，1μm 或 2μm	云滴
3	CIP	25~1550	62bin，25μm	云滴、冰雪晶粒子、雨滴
4	PIP	100~6200	62bin，100μm	冰雪晶粒子、雨滴

本文液水含量 LWC（Liquid Water Content）由 CDP 计算所得。CDP 通过测量尺度范围为 2~50μm 的小粒子，推断液水含量。由于 CDP 在测量过程中不能区分液滴和冰粒子，在混合相条件下，CDP 测得的 LWC 不可避免地会受到小冰粒子的影响。因此，在分析 CDP 估算的液水含量时，应考虑这些偏差。本文参考 Lance et al. (2010)和 Hou et al. (2021)，在没有热线含水量仪的情况下，选择 CDP 数浓度 10 cm^{-3} 作为临界值，当 CDP 数浓度大于等于 10 cm^{-3} 时，我们判断温度低于 0℃的冷层云为混合相云，云内含有液态水。CIP、PIP 第一档由于激光束误差导致采样面积误差从而导致浓度有误差，均剔除第一档数据，分别用 N_{50}、N_{200} 表示冰雪晶粒子数浓度。

采用 CIP 和 PIP 观测到的联合谱给出冰雪晶谱分布，图 4 给出了 CIP 和 PIP 联合测量的冰雪晶尺度谱，可以看出 CIP 测量的小于 600μm 的粒子和 PIP 测量的大于 600μm 的粒子之间有很好的重叠。

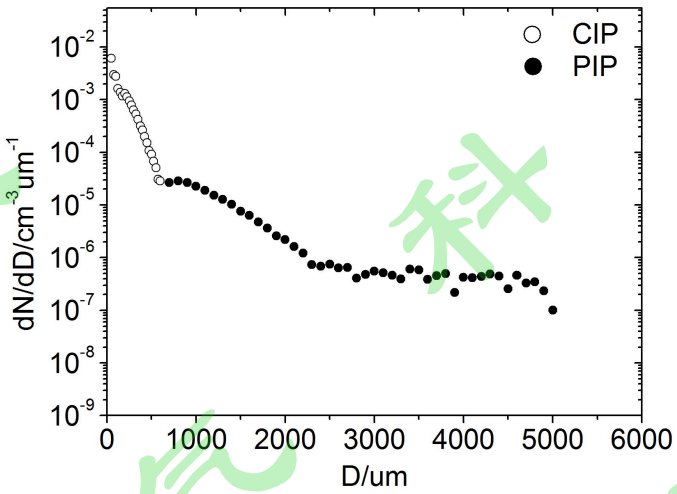


图 4 冰雪晶谱分布（温度-9.8℃，4656m）（空心圆来自 CIP 探头资料，实心圆来自 PIP 探头资料）

Fig.4 Ice and snow crystal spectrum distribution (T=- 9.8℃，4656m) (hollow circle from CIP probe data，solid circle from PIP probe data)

实验室研究证实，冰水含量 IWC（Ice Water Content）取决于粒子质量和直径（M-D）之间的关系，其质量和直径符合以下幂指数分布：

$$M(D) = a_m D^{b_m}$$

$$IWC = \sum_{i=1}^{N_{bins}} n_i m(D_i)$$

其中，a_m、b_m 由冰晶特性决定，D（mm）是单个冰粒子的最大直径，m（D）（mg）是单个冰粒子的质量。根据 Mitchell et al.（1990）研究，a_m=0.022，b_m=2.0，该参数适用于淞附和无淞附粒子。

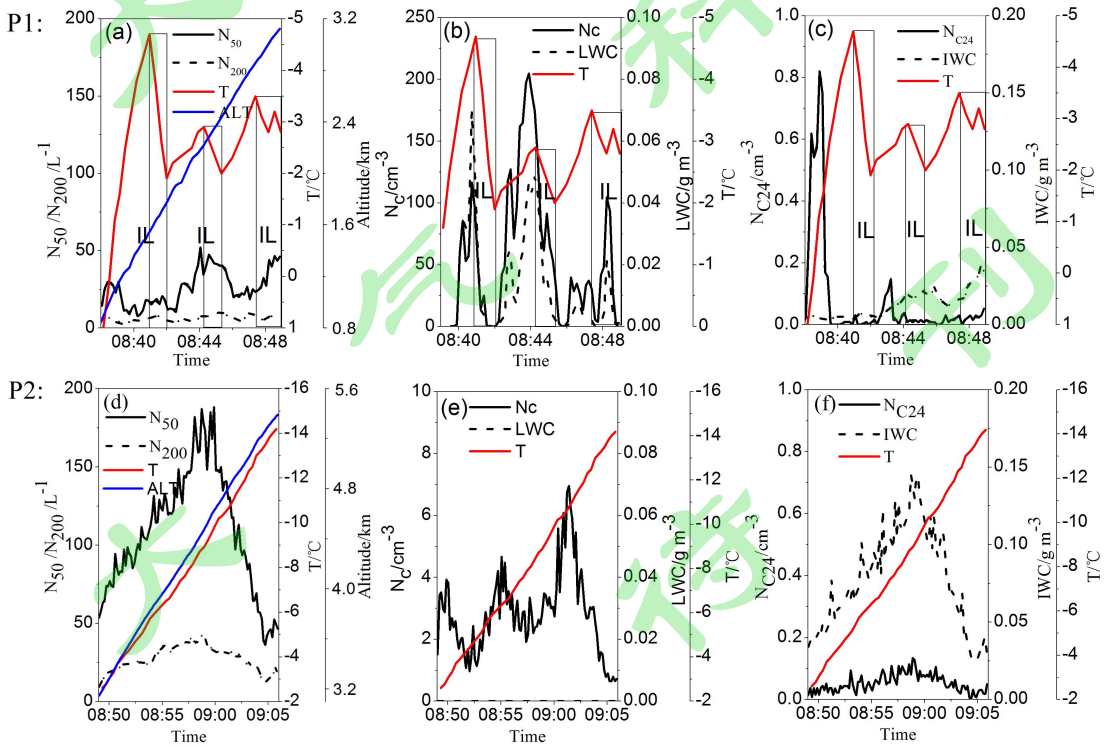
4 降雪云的微物理特征

4.1 降雪云的垂直分布特征

表 2 穿云探测观测不同高度微物理特征量统计表（N_{50}、N_{200} 分别表示直径大于 50μm、200μm 冰雪晶数浓度，Nc 表示云滴数浓度，液水含量 LWC 由大于等于 10 cm^{-3} 的 CDP 计算所得，N_{C24} 取自 CDP 获取大于 24μm 粒子数浓度，冰水含量 IWC 由 M-D 关系计算所得）

Table2 Statistical table of microphysical characteristics at different altitudes observed by cloud penetrating exploration（N_{50} and N_{200} represent the concentration of ice and snow crystal number with diameter greater than 50μm and 200μm respectively，Nc is the number concentration of cloud droplets，the liquid water content is calculated by CDP，N_{C24} was obtained by CDP with number concentration greater than 24μm，the ice water content is calculated from the M-D relationship.）

Penet-ration	Altitude (m)	T (℃)	N_{50} (L^{-1})	N_{200} (L^{-1})	LWC (g m^{-3})	N_{C24} (cm^{-3})	IWC (g m^{-3})
P1	1149	-1.5	30.1	4.6	0.0697	0.748	0.004
	1900	-2.9	10.4	5.8	0.0488	0.023	0.015
P2	3850	-5.9	96.6	25.4	0.0000	0.044	0.075
	4575	-9.3	188.4	33.5	0.0000	0.079	0.121
	5180	-13.0	113.1	27.9	0.0000	0.039	0.033
P3	6364	-19.5	100.1	96.8	0.0000	0.050	0.099



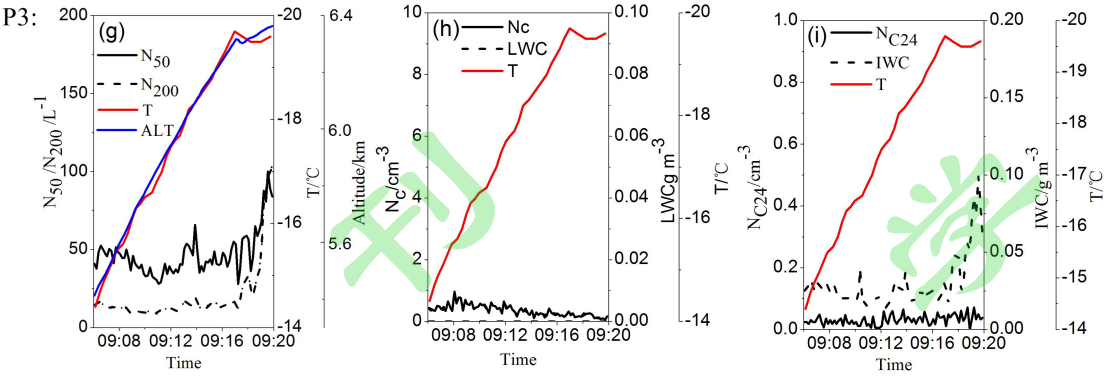


图 5 云微物理特征量随时间的变化（P1：8:38~8:49，P2：8:49~9:06，P3：9:06~9:20）（a）实线、虚线、红线和蓝线分别代表 N_{50}、N_{200}（L^{-1}）、温度 T（℃）和高度 ALT（km）（b）实线、虚线分别代表 Nc（cm^{-3}）和 LWC（g m^{-3}）（c）实线、虚线分别代表 N_{C24}（cm^{-3}）、IWC（g m^{-3}），图(d)、(e)、(f)和图(g)、(h)、(i)分别同图(a)、(b)、(c)

Fig.5 Variation of cloud microphysical characteristics with time (P1：8:38~8:49，P2：8:49~9:06，P3：9:06~9:20) （a）solid line, dotted line,red line and blue line represent N_{50}，N_{200}（L^{-1}），temperature （℃）and altitude（km）respectively，（b）solid line and dotted line represent Nc（cm^{-3}） and LWC（g m^{-3}） respectively，（c）solid line and dotted line represent N_{C24}（cm^{-3}）and IWC（g m^{-3}），Fig.5 (d)，(e)，(f) and (g)，(h)，(i) are the same as Fig.5 (a)，(b)，(c) respectively

穿云探测获取的云微物理特征量随时间的分布如图 5 所示。整个爬升阶段观测到的 N_C、LWC 主要集中在 P1，N_C、LWC 最大值分别为 204.9 cm^{-3}（08:42:13，1828m）、0.0697 g m^{-3}（08:39:03，1149m）（见表 2），且随高度分布有起伏，Ma et al.（2017）通过飞机观测发现北京海坨山冬季降雪云发展前期液水含量主要分布在云的上部，最大液水含量高达 0.2g m^{-3}。P1（900~3282m）穿过层状云降雪回波，3282m 以下出现三次逆温 IL（Inversion Layer），分别在 8:40:56~8:41:59（1530~1750m）、8:44:16~8:45:19（2220~2440m）、8:47:23~8:49:21（2856~3190m）三个时间段，伴随着逆温层的出现，N_{50} 减小，如 8:40:56~8:41:59（1530~1750m）段逆温强度最强，存在液态水但 N_{50} 较其他逆温层偏小，逆温层阻碍了空气的垂直对流运动，抑制了降雪云的发展。P1 段 N_{50} 变化范围为 7.6~52.1L^{-1}，N_{200} 量级集中在 10^0L^{-1}。

P2（3282~5495m）穿过层积云降雪回波的上部，冰雪晶主要在这个范围内产生，N_{50}、N_{200}、IWC 随高度增加先增大后减小，在-9.3℃（4575m）附近冰雪晶粒子数浓度 N_{50}、N_{200} 和冰水含量出现极大值，分别为 188.4L^{-1}、33.5L^{-1} 和 0.121g m^{-3}（见表 2）。

P3（5495~6364m）在层状云降雪回波的上部飞行，在云顶-19.5℃附近观测到 N_{50}、N_{200} 和 IWC 出现极大值，如-19.5℃（6364m）观测到 N_{50}、N_{200} 和 IWC 分别为 100.1L^{-1}、96.8L^{-1} 和 0.099g m^{-3}，除云顶外其他高度变化不大。P3 段 N_{50}、N_{200}、IWC 变化范围分别为 27.8~100.1L^{-1}、8.7~104.4L^{-1} 和 0.014~0.099g m^{-3}。

P2、P3 观测到 N_C 偏低，量级分别为 10^0g m^{-3}、10^{-1}g m^{-3}，几乎不存在液态水。P1、P3 观测到 IWC 随高度的增加逐渐增大，峰值分别为 0.039g m^{-3}、0.099g m^{-3}。

比较 P1、P2、P3 观测到的微物理量发现，P1 观测到 N_{50}、N_{200} 比 P2 观测到低一个量级，P1 段存在液态水，如 P1 在 1900m 观测到 N_{50}、N_{200} 和 LWC 分别为 10.4L^{-1}、5.8L^{-1}、0.0488g m^{-3}，P2 在 4575m 观测到 N_{50}、N_{200} 分别为 188.4L^{-1}、33.5L^{-1}（见表 2）。P1 出现第一次逆温后，N_{C24} 观测到 0.821cm^{-3} 的极大值，第二次、第三次逆温出现时，观测到大云滴数浓度 N_{C24} 明显减小且小于 P2，P1 第二次、第三次逆温出现时云滴以小粒子为主。

Braham（1990）在密歇根湖下风岸附近对受湖泊效应影响的降雪云进行观测，发现冰

水含量变化范围从 0.002g m^{-3} 到 0.264g m^{-3}。Heymsfield et al.（2002）在热带降雨测量项目（TRMM）中获得的直径大于 100μm 的粒子总浓度大约在 $10L^{-1}$ 到 $100L^{-1}$ 之间变化。本次降雪过程观测到的冰水含量和冰雪晶数浓度与这两个地区观测值接近。

4.2 粒子总谱分布

图 7 为 CDP、CIP 和 PIP 探头获取的组合粒子谱随高度和温度的垂直分布，P1 段 8:40:43（第一次逆温出现时）云滴谱呈双峰分布，峰值直径分别为 6μm、9μm，存在直径大于 24μm 的云滴；8:44:13、8:46:33、8:48:29（第二次逆温处、第三次逆温出现前后）云滴谱呈单峰分布，峰值直径为 6μm，但 8:40:43、8:44:13 观测到 CIP、PIP 各档粒子数浓度小于 8:46:33、8:48:29，逆温层存在抑制了降雪云的发展，且逆温强度越大抑制作用越大。观测 P2 段 8:54:24、9:00:23、9:03:19 三个时刻组合粒子谱分布发现，由于这段产生大量冰雪晶，其中 9:00:23 处冰雪晶粒子数浓度最大，冰雪晶谱分布连续，雪晶最大直径为 6000μm，但云滴谱单调递减分布，云滴最大直径为 16μm。P3 给出了 9:09:00、9:19:00 两个时刻组合粒子谱分布，9:09:00 云滴谱呈单调递减分布，云滴谱宽为 6μm，9:19:00 几乎不含液态水，9:19:00 冰雪晶谱大滴段较 9:09:00 时刻上翘，导致 9:19:00 观测到的冰水含量大于 9:09:00。

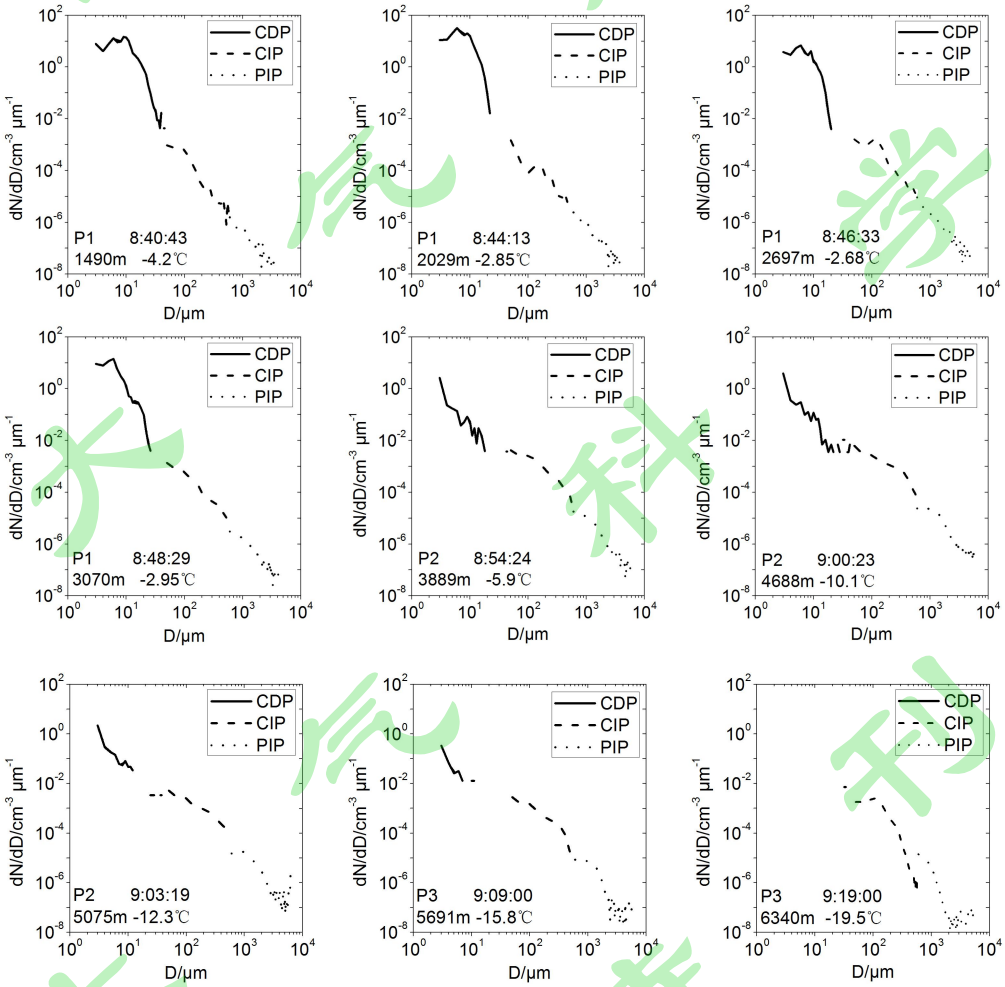


图 7 不同粒子探头获取的组合粒子谱随高度和温度的分布

Fig.7 Distribution of combined particle spectrum with height and temperature obtained by different particle probes

4.3 冰晶图像和降雪机制的分析

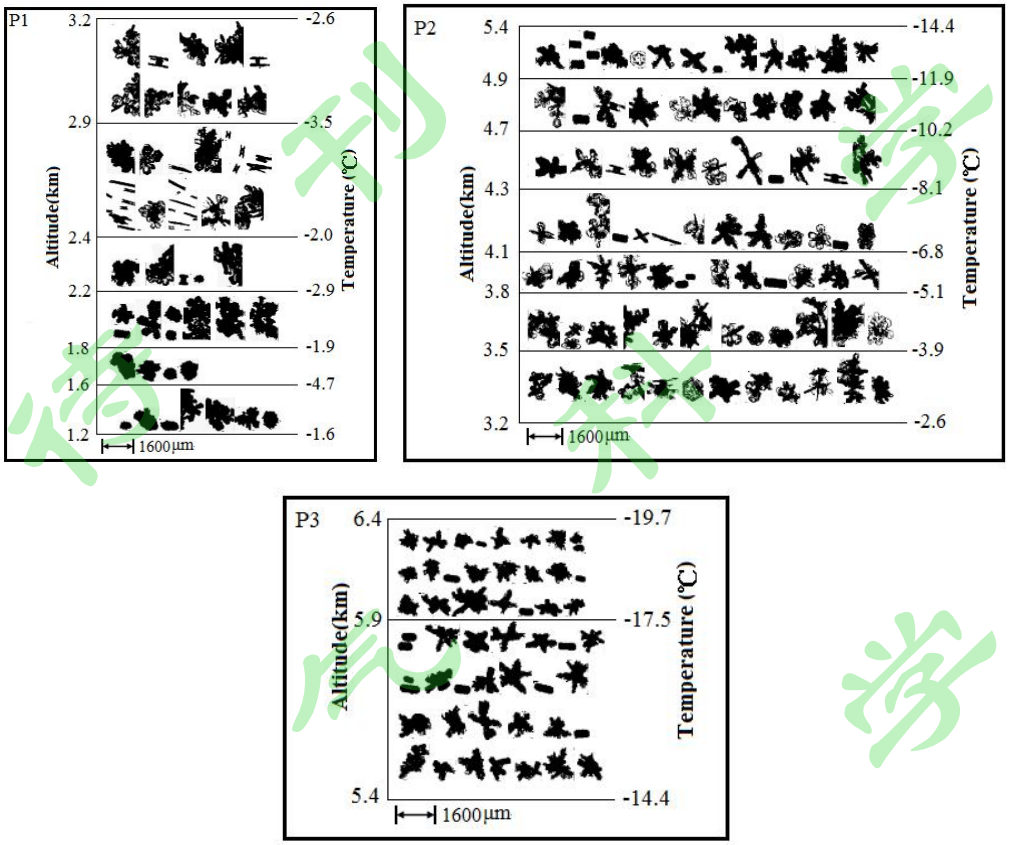


图 6 P1、P2、P3 观测到冰晶图像随温度的变化（取自 CIP）

Fig.6 P1, P2, P3 Ice crystal image changes with temperature (from CIP)

云中冰晶的形态是反映云粒子形成和增长的重要参数。图 6 给出了穿云过程-1.6~-19.7℃观测到的冰晶图像随温度的分布，主要形态包括针状、柱状、板状、辐枝状、柱帽状和不规则状。

P1 冰晶图像以辐枝状和针状为主。1.8~2.2km（-1.9~ -2.9℃）观测到霰粒子的存在，发生冰晶的凇附增长；2.4~2.9km（-2.0~ -3.5℃）可以探测到大量的针状冰晶，与 Korolev et al.（2000）的观测结果一致，即针状粒子多出现在 0~ -5℃层，以凝华增长为主。2.9~3.2km（-3.5~ -2.6℃）观测的冰晶形态主要以辐枝状为主，实验室研究证明辐枝状冰雪晶应该形成于-15~ -10℃层，-3.5~ -2.6℃很难生成辐枝状冰雪晶，应该是由更高的冷云中下落产生。此外 P1 段有少量的柱帽状冰雪晶，可能是由-18~ -25℃生成的柱状冰雪晶下落穿过-13~ -18℃形成的板状冰雪晶形成的(Heymsfield et al, 2002)。

P2 处 3.2~4.7km（-2.6~ -10.2℃）观测的冰晶形态以凇附状、辐枝状为主变为以辐枝状、板状和不规则状为主。4.7~5.4km（-10.2~ -14.4℃）观测的冰晶形态以辐枝状、聚合体、不规则状为主及含有少量柱帽状，主要是由于适宜辐枝状冰晶形成的温度为-12~ -18℃（Bailey, et al, 2009; Heymsfield, et al, 1987）。-9.3℃观测到最大冰雪晶数浓度为 188.4L^{-1}，以辐枝状和聚合体形状冰雪晶为主，辐枝状冰雪晶是勾连、攀附的主要区域，一方面碰撞攀附使冰雪晶数浓度减小，另一方面因折裂繁生又使冰雪晶数浓度增加，同时使冰雪晶谱明显拓宽。从

图 7 组合粒子谱看出，09:00:23（-10.1℃）直径大于 3100μm 和直径小于 1500μm 的冰雪晶数浓度明显增加，这里可能发生了折裂繁生和碰撞攀附过程。

P3 处 5.4~5.9km（-14.4~ -17.5℃）冰晶形态主要为不规则状和柱状，5.9~6.4km（-17.5~ -19.7℃）以不规则状为主，P3 的冰晶粒子以单个小粒子为主，聚合状冰晶比较少。

进一步分析本次降雪云的形成机制，-19~ -10℃、-5℃层冰晶图像以针状、柱状和不规则状为主，其中-5℃层以下液水含量丰富，出现冰晶的凝华增长。

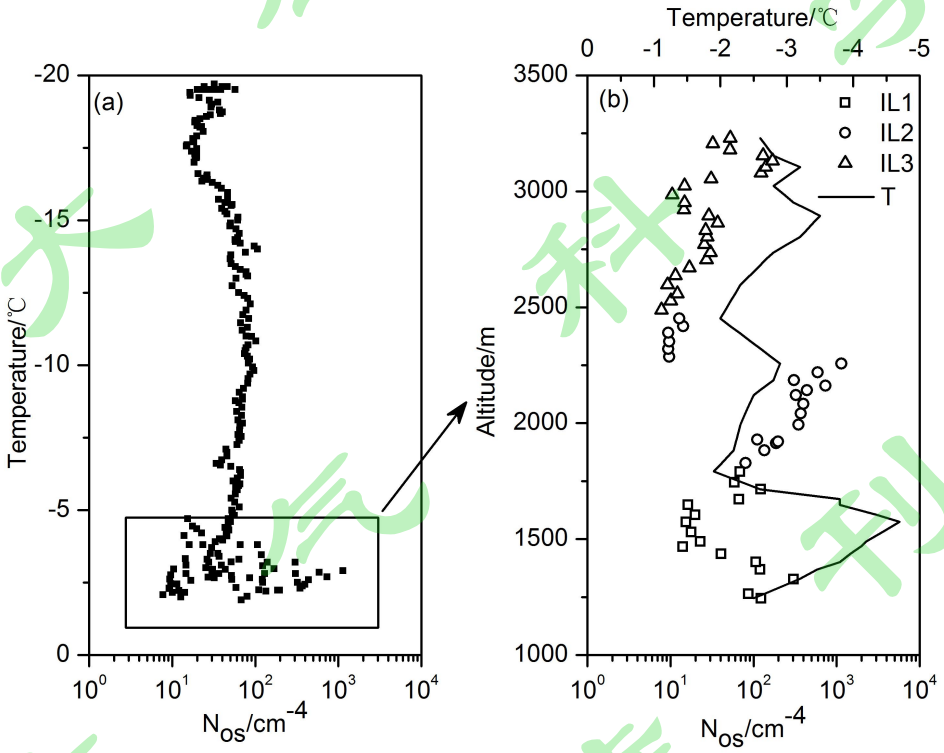
Hallet-Mossop 的观测指出温度为-3~ -8℃，云滴直径大于 24μm，碰撞速度在 1.4～3m s^{-1} 时冰晶撞冻过冷云滴产生的碎片才明显，-5°C 温度层的繁生过程最为明显。P1 段-1.9~ -2.9℃出现本次观测 N_{C24} 极大值 0.821cm^{-3}，且存在明显的淞附增长。Yang J F and Lei H C（2014）发现淞附增长发生时直径>23μm 的云滴最大数浓度为 3.4 cm^{-3}，远大于本次过程的观测值。P2 段-2.6~ -5.1℃（3.2~3.8 km）存在淞附状冰晶，这可能是 3.2km 以下生成的淞附状冰晶通过上升气流抬升而来的。

4.4 冰雪晶谱拟合

根据地面雪花的观测 Gunn and Marshall（1958）首次提出冰雪晶尺度谱分布符合指数形式：

$$N_s(D) = N_0 \exp(-\lambda D)$$

其中 D 为雪花的直径，N_0和λ取决于降水率。Sekhon and Srivastava（1970）进一步分析 Gun and Marshall（1958）采集的雪晶数据，指出指数分布能充分描述冰雪晶谱的分布。



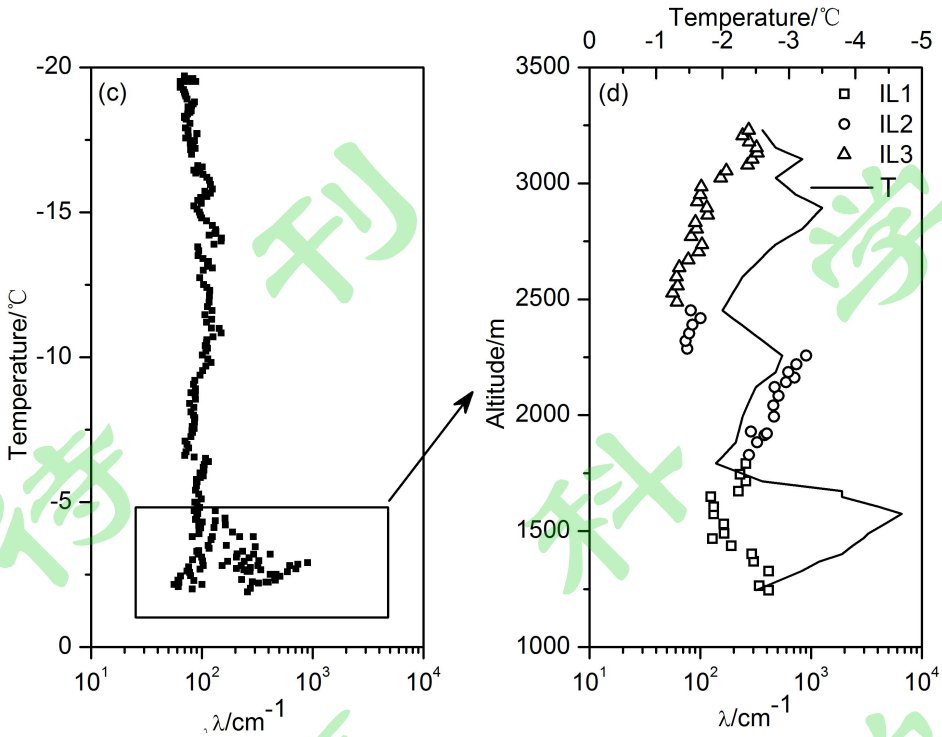


图 8 冰雪晶谱拟合参数（a）*Nos*、（c）λ随温度的垂直变化（黑点表示每 10s 拟合参数的平均值），-5℃层以下三次逆温层（IL1、IL2、IL3）（b）*Nos*、（d）λ及温度随高度的垂直分布

Fig.8 Vertical variation with temperature（a）*Nos*，（c）λ（black dots represent the average value of fitting parameters every 10 seconds），vertical distribution of （b）*Nos*，（d）λ and temperature with height in three inversion layers (IL1,IL2,IL3) below -5 ℃

根据以往对冬季降雪 *Nos* 与λ关系的研究，Lo and Passarelli（1982）指出 *Nos* 与λ随温度的变化能反映云内微观物理过程的变化，并根据谱拟合参数随温度的变化将云内粒子生长分为三个阶段。第一阶段，凝华增长导致 *Nos* 的增加和λ的减小，第二阶段聚集机制引起 *Nos*、λ均减小，第三阶段由于碰撞破碎导致小粒子数量增加，大粒子数量减小，Nos、λ均增加。利用指数分布对本次降雪过程的冰雪晶谱进行拟合，拟合参数 *Nos*、λ随温度的变化规律如下（见图 8）：-19~ -17℃*Nos* 略有起伏、λ增大，-17~ -14℃ *Nos* 增大、λ增大，凝华增长使粒子数浓度增加，如-18℃冰雪晶谱粒子数浓度在大滴段随直径增加而递增导致λ偏大（见图 5）；-14~ -10℃ *Nos* 增大、λ基本不变，粒子数浓度和最大直径均增大，以凝华和聚集增长为主；-10~ -4℃ *Nos* 减小，-10~ -8℃ λ减小，-8~ -5℃ λ基本不变；-5℃层以下非逆温层 *Nos* 随高度增加而增大，逆温层出现导致 *Nos* 减小；随高度的增加，第一次逆温出现时λ先减小后增大，第二次逆温出现时λ先增大后减小，第三次逆温出现时λ先增大后保持不变。-5℃层以下随高度的增加，非逆温层冰雪晶由淞附和聚集增长向凝华和聚集增长转化，逆温层的出现阻碍了淞附和凝华增长的发生。

用指数形式拟合本次降雪过程的冰雪晶谱分布，发现超过 80%的冰雪晶谱分布拟合相关系数 R^2 大于 0.90。在 P1 段第二次逆温过程中拟合相关系数 R^2 小于 0.70，这可能是由于拟合参数 *Nos*、λ骤减导致的。

一些研究表明冰雪晶谱拟合参数 *Nos* 和λ之间的关系可以用幂函数（$Nos=a\lambda^b$）表示。例如，Yang J F and Lei H C（2016）用幂函数对获取的空中冰雪晶谱拟合参数 *Nos* 和λ进行相

关性分析，相关系数 R^2 最大为 0.72。对本次观测的 *Nos* 和λ用幂函数进行拟合，参数 *a* 和 *b* 分别为 1.021 和 1.684，相关系数 R^2 为 0.86。

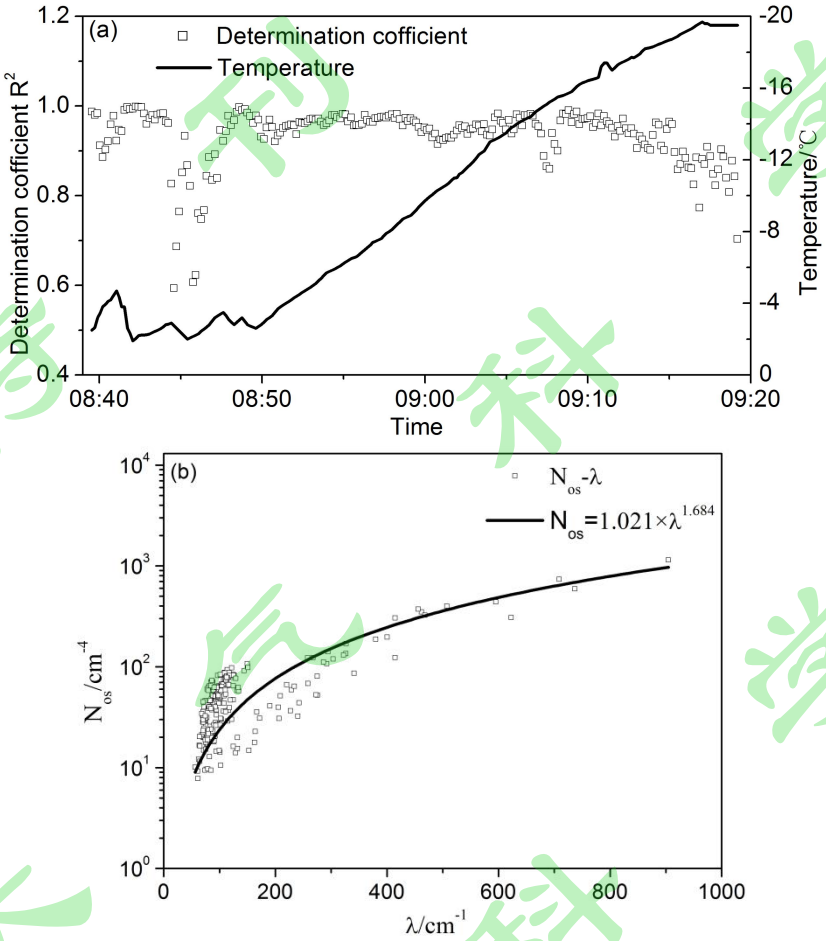


图 9（a）指数分布拟合冰雪晶谱得到的相关系数 R^2 随时间和温度的变化 （b）指数拟合参数 *Nos* 和λ的相关性，实线代表 *Nos* 和λ的回归函数（$Nos=a\lambda^b$），相关系数 R^2 为 0.86

Fig.9 （a）The variation of correlation coefficient R^2 with time and temperature obtained by fitting ice snow crystal spectrum with exponential distribution，（b）correlation of exponential fitting parameters *Nos* and *λ*，the line represents regression function of *Nos* and *λ*（$Nos=a\lambda^b$），the correlation coefficient R^2 is 0.86

5 结论

本次观测利用飞机直接进入降雪云，对山西一次降雪云物理特征进行探测，根据分析结果，形成结论如下：

（1）根据不同高度层冰雪晶粒子数浓度、冰晶图像、组合粒子谱及谱拟合参数的垂直分布，本次过程冰雪晶主要由冰晶的凝华增长、聚并增长、冰晶碰冻过冷云滴的凇附增长和冰雪晶之间的碰撞破碎等机制产生。

（2）P3（-14.4~ -19.7℃）以冰晶的凝华增长为主，冰晶粒子图像为不规则状和柱状，云滴谱呈单调递减分布。

（3）P2（-2.6~ -14.4℃）冰晶图像以辐枝状、聚合体和不规则状为主，易于冰雪晶勾连、

攀附及折裂繁生的发生，导致-9.3℃出现冰雪晶数浓度最大值为 188.4L^{-1}，P2 段以冰晶凝华和聚集增长为主。此外 P2（-2.6~ -5.1℃）存在淞附状冰晶，这可能是 3.2km 以下云内生成后通过上升气流抬升而来的。

（4）P1 云滴谱出现双峰分布，液水含量及直径>24μm 的云滴数浓度远大于 P2，云内出现三次逆温层，第一次逆温过程发生淞附和聚集过程并以淞附为主，第二次逆温过程出现聚集和淞附过程并以聚集为主。逆温层存在抑制了云内淞附增长和凝华增长，且逆温强度越大抑制作用越大。

山西由于地理、地形特殊，造成降雪的时空分布极不均匀，使得降雪的发生发展过程及微物理结构更加复杂和独特。降雪云是山西冬季重要降水云系，由于形成的天气系统不同，云内冰晶数浓度和形态复杂多变，因而云系结构和微物理特征也有所不同。目前针对山西冬季降雪云微物理特征直接观测的研究还未见，本文仅对山西回流系统影响的降雪过程宏微观特征进行分析，其结果能深入理解降雪云在气候变化中的作用，为人工增雪作业实际播云方案的制定提供科学依据。未来将进一步结合空地联合观测及数值模式，深入研究降雪机理，为模式中云的参数化过程提供参考。

参考文献（References）

Bailey M P， Hallett J.2009.A comprehensive habit diagram for atmospheric ice crystals: confirmation from the laboratory, AIRS II, and other field studies[J].J. Atmos. Sci.,66(9): 2888-2899.doi: 10.1175/2009JAS2883.1

Braham R R Jr.1990.Snow particle size spectra in lake-effect snow storms[J].J. Appl. Meteor., 29(3):200–207.doi: 10.1175/1520-0450(1990)029<0200:SPSSIL>2.0.CO;2

陈万奎.1987.枝状雪晶碰撞攀附与折裂繁生[J].气象科学研究院院刊,2(1):74-80.Chen Wankui.1987.The multipliation cenerated by dendritic snow crystals collision and aggregation[J]. Journal of Academy of Meteorological Science(in Chinese),2(1):74-80.doi: CNKI:SUN:YYQX.0.1987-01-008

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[J].大气科学,42(1):134−149.Chen Yichen, Jin Yongli, Ding Deping, et al.2018.Preliminary analysis on the application of millimeter wave cloud radar on snow observation[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),42 (1):134−149.doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17121

高茜,郭学良,刘香娥,等.2020.北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测—模拟研究[J]. 大气科学, 44(2): 407-420.Gao Qian, Guo Xueliang, Liu Xiang'e, et al. 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

Geerts B,Yang Y,Rasmussen R,et al.2015.Snow growth and transport patterns in orographic storms as estimated from airborne vertical-plane dual-doppler radar data.Mon. Weather. Rev.,143(2):644-665.doi:10.1175/MWR-D-14-00199.1

Gun K L S, Marshall J S.1958.The distribution with size of aggregate snowflakes[J].J. Atmos. Sci.,15(5):452-461.doi: 10.1175/1520-0469(1958)015<0452:TDWSOA>2.0.CO;2

Heymsfield A J,Kajikawa M.1987.An improved approach to calculating terminal velocities of plate-like crystals and graupels[J].J. Atmos. Sci.,44(7):1088-1099.doi: 10.1175/1520-0469(1987)044<1088:AIATCT>2.0.CO;2

Heymsfield A J,Bansemer A,Field P R,et al.2002.Observations and parameterizations of Particle size distributions in deep tropical cirrus and stratiform precipitating clouds: Results from

in situ observations in TRMM field campaigns[J].J. Atmos. Sci.,59(24):3457-3491.doi:10.1175/1520-0469(2002)059<3457:OAPOPS>2.0.CO;2

Hou T J,Lei H C,He Y J, et al.2021.Aircraft measurements of the microphysical properties of stratiform clouds with embedded convection[J]. Adv. Atmos. Sci., 38:966-982.doi.org/10.1007/s00376-021-0287-8.

黄钰,郭学良,毕凯,等.2020.北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究[J]. 大气科学, 44(2):356-370. Huang Yu, Guo Xueliang, Bi Kai, el al. 2020. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain area in Beijing[J]. Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),44(2):356-370. doi: CNKI:SUN:DQXK.0.2020-02-010

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[J].气象学报, 76(1):148-159.Jia Xingcan, Ma Xincheng,Bi Kai, el al. 2018.Distributions of particle size and fall velocities of winter precipitation in Beijing[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 76(1):148-159.doi:10.11676/qxxb2017.085

Jing X Q,Geerts B,Friedrich K,et al.2015.Dual-polarization radar data analysis of the impact of ground-based glaciogenic seeding on winter orographic clouds. Part I: Mostly stratiform clouds[J].J. Appl. Meteor.Climatol.,54(9):1944-1969.doi:10.1175/JAMC-D-14-0257.1

Kim D K,Lee D I.2015.Atmospheric thickness and vertical structure properties in wintertime precipitation events from microwave radiometer, radiosonde and wind profiler observations[J].Meteorological Applications,22(3):599-609.doi:10.1002/met.1494

Korolev A,Isaac G A,Hallett J.2000.Ice particle habits in stratiform clouds[J].Quart. J. Roy. Meteor. Soc.,126(569):2873-2902.doi: 10.1002/qj.49712656913

Lance S,Brock C A,Rogers D,et al.2010.Water droplet calibration of the Cloud Droplet Probe (CDP)and in-flight performance in liquid, ice and mixed-phaseclouds during ARCPAC. Atmospheric Measurement Techniques, 3: 1683-1706.doi.org/10.5194/amt-3-1683-2010

Lo K K,Passarelli R E.1982.The growth of snow in winter storms:An airborne observational study[J].J. Atmos. Sci.,39(4):697-706.doi:10.1175/1520-0469(1982)039<0697:TGOSIW>2.0.CO;2

Ma X C,Bi K,Chen Y B,et al.2017.Characteristics of winter clouds and precipitation over the mountains of northern Beijing[J].Adv. Meteor.,3536107.doi:10.1155/2017/3536107

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

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].J.Appl.Meteor.,27(2):140-156.doi:10.1175/1520-0450(1988)027<0140:RAISOO>2.0.CO;2

Saleeby S M,Cotton W R,Fuller J D, et.al.2011.The cumulative impact of cloud droplet nucleating aerosols on orographic snowfall in Colorado[J].J.Appl.Meteor.Climatol.,50(3): 604-625.doi:10.1175/2010JAMC2594.1

Sekhon R S, Srivastava R C. 1970. Snow size spectra and radar reflectivity[J]. J. Atmos. Sci., 27(2):299-307. doi: 10.1175/1520-0469(1970)027<0299:SSSARR>2.0.CO;2

Woods C P,Stoelinga M T,Locatelli J D.2008.Size spectra of snow particles measured in wintertime precipitation in the Pacific Northwest[J].J. Atmos. Sci., 65(1):189-205.doi:10.1175/2007JAS2243.1

Yang J F,Lei H C,Hu Z X,et al.2014.Particle size spectra and possible mechanisms of high ice concentration in nimbostratus over Hebei Province,China[J].Atmospheric Research.,142:79-90.doi: 10.1016/j.atmosres.2013.12.018

Yang J F,Lei H C.2016.In Situ Observations of Snow Particle Size Distributions over a Cold Frontal Rainband within an Extratropical Cyclone[J].Asia-Pacific J. Atmos.Sci.,52(1): 51-62.doi:10.1007/s13143-015-0089-y

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 processs of snow in winter in Xinjiang[J].Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),47(1):73-81.doi: 10.11676/qxxb1989.009

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[J].气象学报, 50(2): 232-238.You Laiguang, Li Yanhui, Liu Yubao. 1992. On the nucleation processes of ice crystal and the collision efficiency between dendritic snow crystal and droplets in natural clouds[J].Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),50(2):232-238.doi: 10.11676/qxxb1992.026

赵桂香,杜莉,范卫东,等.2011.山西省大雪天气的分析预报[J].高原气象,30(3):727-738.ZHAO Guixiang,DU Li,FAN Weidong,el al.2011.Analysis and forecast of heavy snow weather in Shanxi Province[J]. Plateau Meteorology (in Chinese),30(3):727-738.doi:CNKI:SUN:GYQX.0.2011-03-021