大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

# 山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究

封秋娟 牛生杰 侯团结 范秀平 申东东 杨俊梅

## Aircraft-Based Observation of the Physical Characteristics of Snowfall Cloud in Shanxi Province

FENG Qiujuan NIU Shengjie HOU Tuanjie FAN Xiuping SHEN Dongdong YANG Junmei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21004

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究

大气科学. 2019, 43(6): 1191 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.19113

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

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

大气科学. 2020, 44(2): 407 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18172

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

Vertical Observation and Numerical Simulation of the Clouds Physical Characteristics of Snow-Producing over Yanqing Mountain Area in Beijing

大气科学. 2020, 44(2): 356 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18258

华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究:对流云对流泡和融化层结构特征

大气科学. 2019, 43(6): 1365 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1901.18220

基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究

Numerical Simulation Study on the Microphysical Characteristics of Stratiform Clouds with Embedded Convections in Northern China based on Aircraft Measurements

大气科学. 2020, 44(5): 899 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1908.19114

毫米波测云雷达在降雪观测中的应用初步分析

Preliminary Analysis on the Application of Millimeter Wave Cloud Radar in Snow Observation

大气科学. 2018, 42(1): 134 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1705.17121

关注微信公众号，获得更多资讯信息

封秋娟, 牛生杰, 侯团结, 等. 2021. 山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究 [J]. 大气科学, 45(5): 1146−1160. FENG Qiujuan, NIU Shengjie, HOU Tuanjie, et al. 2021. Aircraft-Based Observation of the Physical Characteristics of Snowfall Cloud in Shanxi Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(5): 1146−1160. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21004

# 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 南京信息工程大学大气物理学院，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（气象信息综合分析处理系统）、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 10～20 dB$Z$ 大片层状云回波为主，镶嵌了超过 30 dB$Z$ 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。液态水含量主要位于 3.2 km 以下，最大值为 0.0697 g m$^{-3}$，$N_{50}$（粒子直径大于 50 μm 的冰雪晶数浓度）、$N_{200}$（粒子直径大于 200 μm 的冰雪晶数浓度）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°C 附近，分别为 188.4 L$^{-1}$、33.5 L$^{-1}$ 和 0.121 g m$^{-3}$。−14.4°C～−19.7°C 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°C 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 $N_{os}$=1.021$\lambda^{1.684}$ 表示（其中，$N_{os}$、$\lambda$ 分别表示截距和斜率，$N_{os}$ 越大表示小粒子数浓度越大，$\lambda$ 越大表示小粒子数浓度占总粒子数浓度比例越高），相关系数 $R^2$ 为 0.86。3.2 km 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 $N_{os}$ 减小，抑制了云内凇附增长和凝华增长，导致本次观测谱拟合参数 $N_{os}$、$\lambda$ 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** 降雪云 冰雪晶图像 形成机制 飞机探测
**文章编号** 1006-9895(2021)05-1146-15 **中图分类号** P481 **文献标识码** A
**doi:**10.3878/j.issn.1006-9895.2106.21004

# Aircraft-Based Observation of the 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 *College of Atmospheric Physics*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044

**收稿日期** 2021-01-09；**网络预出版日期** 2021-07-17
**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 2018YFC1507905、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 (Grants 2018YFC1507905, 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* 100081
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 observations from an aircraft that directly entered the snowfall cloud and MICPAS (Meteorological Information Comprehensive Analysis and Processing System), radar and satellite data, the macro and micro structure characteristics of a snowfall cloud in Shanxi Province on 29 November 2011, were analyzed. Notably, the radar echo of this snowfall process was mainly between 10 dB*Z* and 20 dB*Z* large stratiform cloud echo, inlaid with more than 30 dB*Z* massive and strong echo. The zero line of the radar radial velocity had a strong "S" curve with a bull's eye structure. Strong vertical wind shear was observed from the lower level to the upper level. The liquid water content was mainly below 3.2 km, and the maximum value was 0.0697 g $m^{-3}$. The ice and snow crystal number concentrations $N_{50}$ (Number concentration of ice and snow crystals with particle diameter greater than 50 μm) and $N_{200}$ (Number concentration of ice and snow crystals with particle diameter greater than 200 μm) and the ice water content were mainly produced in the upper part of the stratiform mixed-phase snowfall cloud, and the maximum values, which were 188.4 $L^{-1}$, 33.5 $L^{-1}$, and 0.121 g $m^{-3}$, were obtained at approximately −9.3°C. From −14.4°C to −19.7°C, the images of ice crystals were mainly needle, columnar, and irregular, and the ice particles grew mainly by deposition. The images of ice and snow crystals at approximately −9.3°C 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 the ice and snow crystal spectra can be well fitted by the exponential form. The spectrum fitting parameters can be expressed by the power function $N_{os}=1.021\lambda^{1.684}$ ($N_{os}$ and $\lambda$ represent intercept and slope, respectively. The larger $N_{os}$ was, the higher the concentration of small particles was. The larger $\lambda$ was, the higher the proportion of small particle number concentration to total particle number concentration was.), and the correlation coefficient $R^2$ was 0.86. Three inversion times below 3.2 km were detected. The appearance of the inversion layer influenced the cloud microphysical characteristics, decreased the fitting parameter $N_{os}$, and inhibited the growth of rimming and deposition. As a result, the variation of the fitting parameters $N_{os}$ and $\lambda$ with temperature in this study was inconsistent with that in previous studies. The greater the inversion intensity was, the greater the inhibition effect.

**Keywords**　Snowfall cloud, 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 and Srivastava, 1970; Lo and Passarelli, 1982; Heymsfield et al., 2002）。Rauber（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云的下部增加。Reynolds and Kuciauskas（1988）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）等通过分析了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。Geerts et al.（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，1.5 km 以上冰晶以凝华增长为主，并对下层有播种效应，1.5 km 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% 的降雪仅出现在夜间，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（贾星灿等, 2018; 高茜等, 2020）。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态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 降雪云宏观特征及飞机探测

2011 年 11 月 29 日 08 时（北京时，下同）高空 500 hPa 河套地区至贵州有一个较强冷性低槽，山西全省处于槽前西南急流带之中，700 hPa 河套底部至成都有一个切变线，沿切变线有西南暖湿空气向山西北部输送，850 hPa 蒙古中部有一个冷高压，山西南部到四川成都有一个倒槽，11 时地面山西中东部受高压底部回流影响（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 500 hPa 对应位置有−40°C 冷中心，

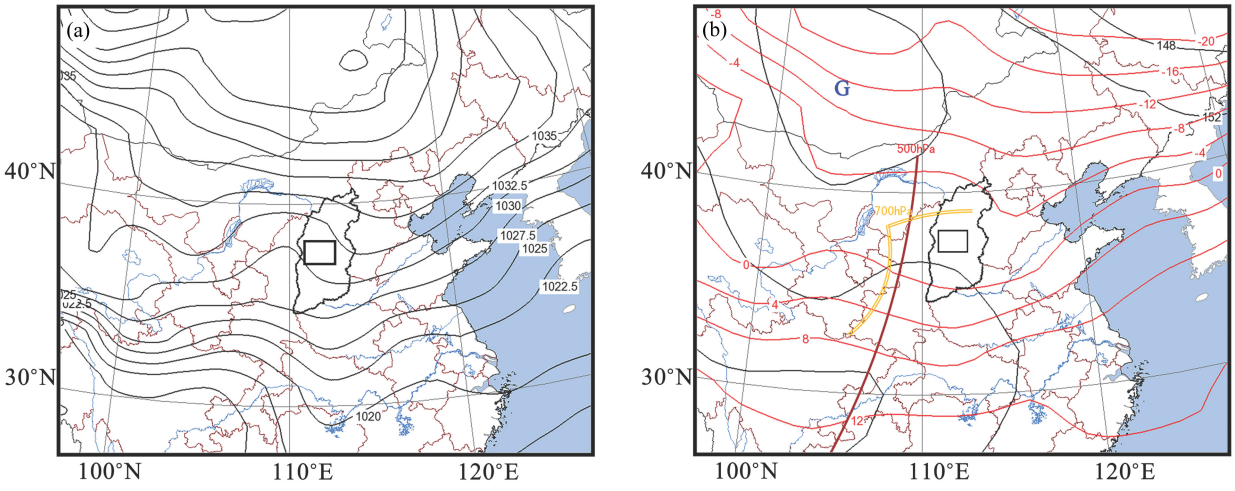


图 1 2011 年 11 月 29 日（a）11:00（北京时，下同）的地面气压场（黑线，单位：hPa）和（b）08:00 的 850 hPa 温度场（红线，单位：°C）、高度场（黑线，单位：dagpm）。黑色矩形代表飞行区域。图 b 中棕色粗实线表示 500 hPa 槽线，黄色粗实线表示 700 hPa 切变线

Fig. 1 Surface pressure field (black lines, units: hPa) at 1100 BJT (Beijing time) and (b) temperature (red lines, units: °C), geopotential height (black lines, units: dagpm) at 850 hPa at 0800 BJT on 29 November 2011. The black rectangle denotes the flight area. In Fig. b, the brown thick solid line represents the 500-hPa trough line and the thick yellow lines represent the 700-hPa shear line

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 d。河套倒槽类系统在 500 hPa 高原到山西产生弱西南气流，−40°C 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 500 hPa 高原到山西西南气流加强，冷高压位置出现−40°C 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 d 以上的大雪天气。

从 11 月 29 日 10 时 FY-2D 卫星的红外云图（图 2）可以看到，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 500 hPa 槽线和 700 hPa 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。

2011 年 11 月 29 日雷达 PPI（plan position indicator）显示大范围片状降雪云回波，强度在 10～20 dB*Z*，回波顶高 7 km 以上，1～3 km 镶嵌了强度超过 30 dB*Z* 的块状回波（图 3a）。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：P1：08:38～08:49（900～3282 m）穿过层状云降雪回波主体；P2：08:49～09:06（3282～5495 m）穿过层积云降雪回波的上部；P3：09:06～09:20（5495～6364 m）在层状云降雪回波的上部飞行（图 3b）。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（图 3c）。08:38～09:20 对山西中部（太原—离石）降雪云系进行飞机穿云探测（图 3d），根据宏观记录，最高飞行高度 6364 m，未到达云顶。

## 3　观测仪器和数据处理

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天气资料和卫星云图。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（2～50 μm），CIP（Cloud Imaging Probe）（25～1550 μm）和 PIP（Precipitation Imaging Probe）（100～6200 μm）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

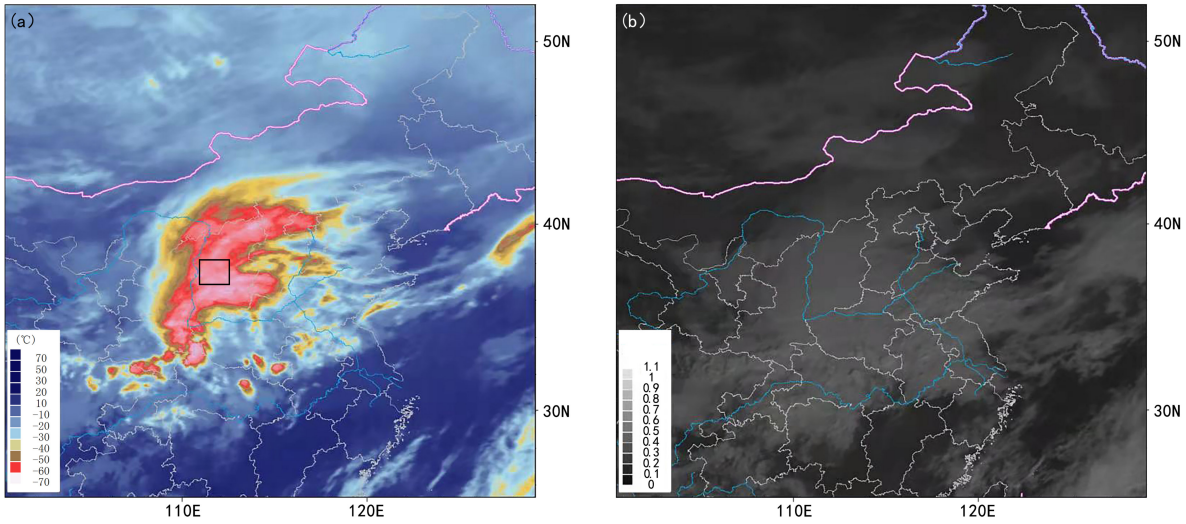


图 2　2011 年 11 月 29 日 10:00 FY-2D 卫星的（a）红外云图、（b）可见光云图。黑色矩形代表飞行区域

Fig. 2　(a) Infrared cloud image, (b) visible light cloud image from FY-2D satellite at 1000 BJT on 29 November 2011. The black rectangle denotes the flight area

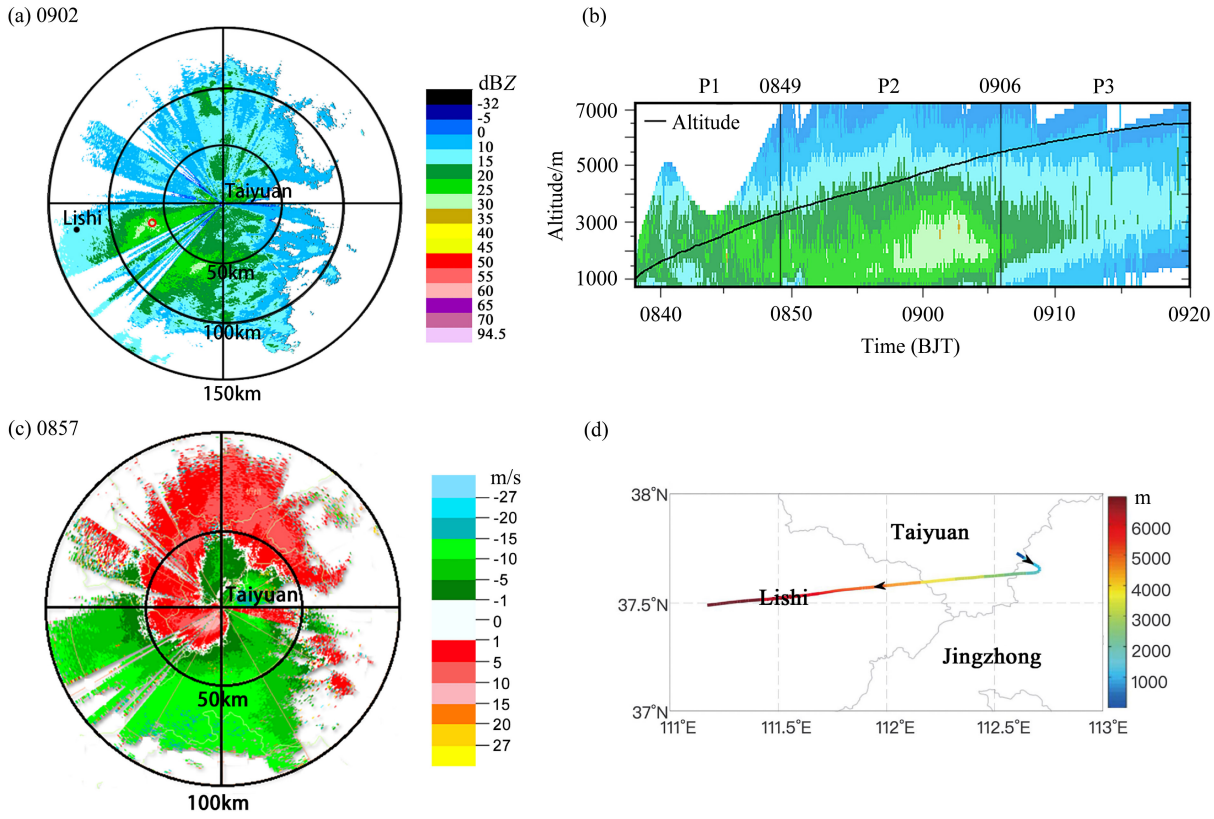


图 3 2011 年 11 月 29 日（a）09:02 的 1.5°仰角 PPI 回波（单位：dBZ），（b）沿飞行轨迹的 RHI（range height indicator）回波（单位：dBZ），（c）08:57 的 1.5°仰角速度回波（单位：m s$^{-1}$），（d）08:38～09:20 时间段对应的飞行轨迹，色标代表高度（单位：m）

Fig. 3 (a) PPI (plan position indicator) echo (units: dBZ) at 1.5° elevation at 0902 BJT, (b) RHI (range height indicator) echo (units: dBZ) along the flight path, (c) velocity echo (units: m s$^{-1}$) at 1.5° elevation at 0857 BJT, (d) flight path (colors indicate heights) during 0838–0920 BJT on 29 November 2011

**表 1 DMT（droplet measurement technology）机载仪器参数**

**Table 1 DMT (droplet measurement technology) parameter list of detection 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 | 30 bin，1 μm或2 μm | 云滴 |
| 3 | CIP | 25～1550 | 62 bin，25 μm | 云滴、冰雪晶粒子、雨滴 |
| 4 | PIP | 100～6200 | 62 bin，100 μm | 冰雪晶粒子、雨滴 |

在飞机机翼的下方，飞机的巡航速度约为 60 m s$^{-1}$，所有仪器在观测前都进行了标定。

本文液态水含量 LWC（Liquid Water Content）由 CDP 计算所得。CDP 通过测量尺度范围为 2～50 μm 的小粒子，推断液态水含量。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 估算的液态水含量时，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 数浓度大于或等于 10 cm$^{-3}$ 时，我们判断温度低于 0°C 的冷层云为混合相云，云内含有液态水。CIP、PIP 由于第一档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 $N_{50}$（粒子直径大于 50 μm 的冰雪晶数浓度）、$N_{200}$（粒子直径大于 200 μm 的冰雪晶数浓度）表示冰雪晶粒子数浓度。

图 4 给出了 11 月 29 日 09:00（对应温度 −9.8°C，高度 4656 m）CIP 和 PIP 联合测量的冰雪

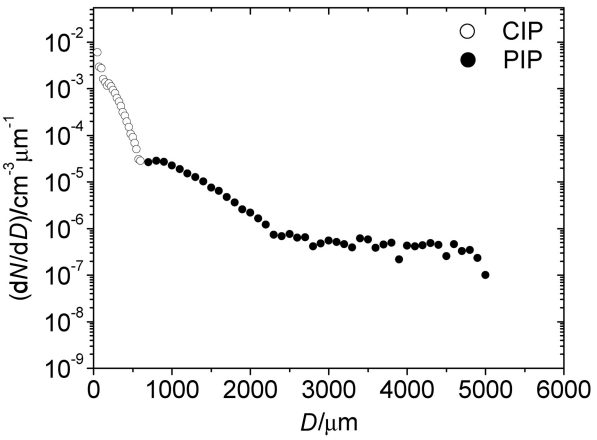


图 4　2011 年 11 月 29 日 09:00 观测的冰雪晶谱分布。$N$、$D$ 分别表示冰雪晶数谱密度和最大直径，空心圆来自 CIP 探头资料，实心圆来自 PIP 探头资料

Fig. 4　Ice and snow crystal spectral distribution at 0900 BJT on 29 November 2011. $N$ and $D$ represent the spectral density and maximum diameter of ice and snow crystals, respectively. The values of hollow circles and solid circles obtained from CIP (Cloud Imaging Probe) and PIP (Precipitation Imaging Probe) data, respectively

晶尺度谱，可以看出 CIP 测量的小于 600 μm 的粒子和 PIP 测量的大于 600 μm 的粒子之间有很好的重叠。

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之间的关系，其质量和直径符合以下幂指数分布：

$$m(D)=a_{\mathrm{m}}D^{b_{\mathrm{m}}}, \tag{1}$$

$$\mathrm{IWC}=\sum n_i m(D_i), \tag{2}$$

其中，$a_{\mathrm{m}}$、$b_{\mathrm{m}}$ 是经验推导数值，由冰晶特性决定；$D$（单位：mm）是单个冰粒子的最大直径；$m(D)$（单位：mg）是单个冰粒子的质量；$i$ 是冰雪晶谱的粒子直径分档数；$n$（单位：$\mathrm{L}^{-1}$）是粒子数浓度。根据 Mitchell et al.（1990）研究，$a_{\mathrm{m}}$=0.022，$b_{\mathrm{m}}$=2.0，该参数适用于凇附和无凇附粒子。

## 4　降雪云的微物理特征

### 4.1　降雪云的垂直分布特征

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 $N_{\mathrm{c}}$（云滴数浓度）、LWC 主要集中在 P1，$N_{\mathrm{c}}$、LWC 最大值分别为 204.9 $\mathrm{cm}^{-3}$（08:42:13，1828 m）、0.0697 g $\mathrm{m}^{-3}$（08:39:03，1149 m）（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态水含量主要分布在云的上部，最大液态水含量高达 0.2 g $\mathrm{m}^{-3}$。P1（900～3282 m）穿过层状云降雪回波，3282 m 以下出现三次逆温（Inversion Layer），分别在 08:40:56～08:41:59（1530～1750 m）、08:44:16～08:45:19（2220～2440 m）、08:47:23～08:49:21（2856～3190 m）三个时间段，伴随着逆温层的出现，$N_{50}$ 减小，如 08:40:56～08:41:59（1530～1750 m）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 时段 $N_{50}$ 变化范围为 7.6～52.1 $\mathrm{L}^{-1}$，$N_{200}$ 量级集中在 $10^0$ $\mathrm{L}^{-1}$。

P2（3282～5495 m）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°C（4575 m）

**表 2　2011 年 11 月 29 日 08:38～09:20 穿云探测到的不同高度微物理特征量统计。$N_{50}$、$N_{200}$分别表示直径大于 50 μm、200 μm 冰雪晶数浓度。$N_{c24}$表示 CDP 获取的直径大于 24 μm 的粒子数浓度**

**Table 2　Statistical microphysical characteristics at different altitudes observed by cloud-penetrating exploration during 0838–0920 BJT on 29 November 2011. $N_{50}$ and $N_{200}$ represent the concentration of ice and snow crystal number with diameter greater than 50 μm and 200 μm, respectively, $N_{c24}$ was the number concentration of particles greater than 24 μm obtained by CDP (Cloud Droplet Probe)**

| 时段 | 高度/m | 温度/°C | $N_{50}$/$\mathrm{L}^{-1}$ | $N_{200}$/$\mathrm{L}^{-1}$ | LWC/g $\mathrm{m}^{-3}$ | $N_{c24}$/$\mathrm{cm}^{-3}$ | IWC/g $\mathrm{m}^{-3}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 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 |

注：液态水含量LWC由CDP观测到粒子数浓度大于或等于10 $\mathrm{cm}^{-3}$的云滴计算所得，冰水含量IWC由M-D关系计算所得。

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 188.4 $L^{-1}$、33.5 $L^{-1}$ 和 0.121 g $m^{-3}$（表 2）。P3（5495～6364 m）在层状云降雪回波的上

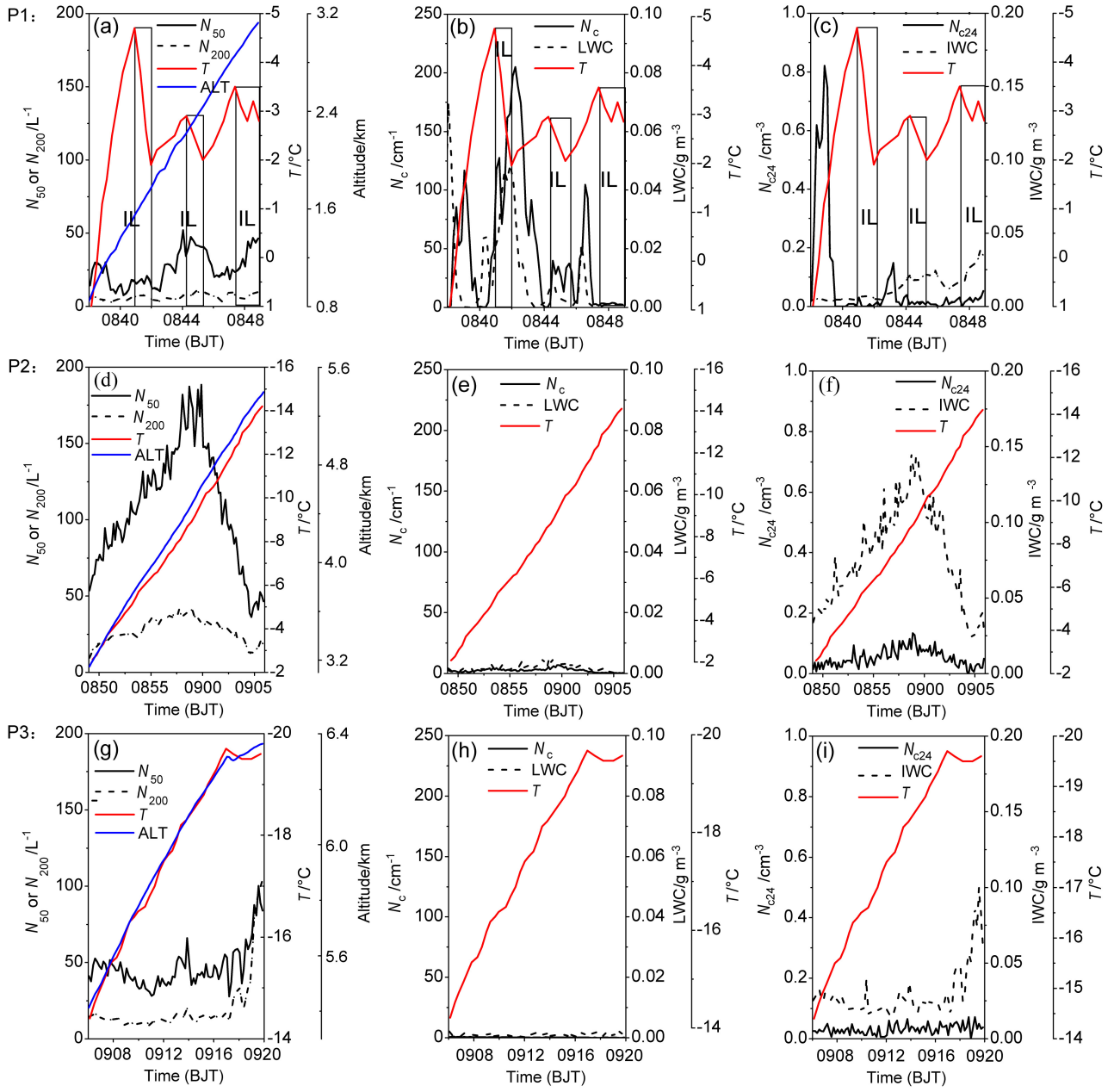


图 5 2011 年 11 月 29 日 08:38～08:49 时段（P1）（a）$N_{50}$（黑色实线，单位：$L^{-1}$）、$N_{200}$（黑色虚线，单位：$L^{-1}$）、温度（$T$，红色线，单位：°C）、高度（ALT，蓝色线，单位：km），（b）$N_c$（黑色实线，单位：$cm^{-3}$）、LWC（黑色虚线，单位：g $m^{-3}$）、温度（红色线，单位：°C），（c）$N_{c24}$（黑色实线，单位：$cm^{-3}$）、IWC（黑色虚线，单位：g $m^{-3}$）、温度（红色线，单位：°C）随时间的变化。（d–f）同（a–c），但为 08:49～09:06 时段（P2）云微物理量随时间的变化。（g–i）同（a–c），但为 09:06～09:20 时段（P3）云微物理量随时间的变化

Fig. 5 Variations of (a) $N_{50}$ (solid black line, units: $L^{-1}$), $N_{200}$ (dashed black line, units: $L^{-1}$), temperature ($T$, red line, units: °C), altitude (ALT, blue line, units: km), (b) $N_c$ (the number concentration of cloud droplets, solid black line, units: $cm^{-3}$), LWC (Liquid Water Content, dashed black line, units: g $m^{-3}$), temperature ($T$, red line, units: °C), (c) $N_{c24}$ (solid black line, units: $cm^{-3}$), IWC (Ice Water Content, dashed black line, units: g $m^{-3}$), temperature ($T$, red line, units: °C) with time during 0838–0849 BJT (P1) on 29 November 2011. (d–f) As in (a–c), but for variations of cloud microphysical characteristics with time during 0849–0906 BJT (P2) on 29 November 2011. (g–i) As in (a–c), but for variations of cloud microphysical characteristics with time during 0906–0920 BJT (P3) on 29 November 2011

部飞行，在云顶−19.5°C 附近观测到 $N_{50}$、$N_{200}$ 和 IWC 出现极大值，如−19.5°C（6364 m）观测到 $N_{50}$、$N_{200}$ 和 IWC 分别为 100.1 $L^{-1}$、96.8 $L^{-1}$ 和 0.099 g $m^{-3}$，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 27.8～100.1 $L^{-1}$、8.7～104.4 $L^{-1}$ 和 0.014～0.099 g $m^{-3}$。

P2、P3 观测到 $N_c$ 偏低，量级分别为 $10^0$ g $m^{-3}$、$10^{-1}$ 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 0.039 g $m^{-3}$、0.099 g $m^{-3}$。

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 1900 m 观测到 $N_{50}$、$N_{200}$ 和 LWC 分别为 10.4 $L^{-1}$、5.8 $L^{-1}$、0.0488 g $m^{-3}$，P2 在 4575 m 观测到 $N_{50}$、$N_{200}$ 分别为 188.4 $L^{-1}$、33.5 $L^{-1}$（表 2）。P1 出现第一次逆温后，大云滴数浓度极大值为 0.821 $cm^{-3}$，第二次、第三次逆温出现时，观测到大云滴数浓度 $N_{c24}$ 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 0.002 g $m^{-3}$ 到 0.264 g $m^{-3}$。Heymsfield et al.（2002）在热带降雨测量项目（TRMM）中获得的直径大于 100 μm 的粒子总浓度大约在 10 $L^{-1}$ 到 100 $L^{-1}$ 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 6 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 08:40:43（第一次逆温出现时）云滴谱呈双峰分布，峰值直径分别为 6 μm、9 μm，存在直径大于 24 μm 的大云滴；08:44:13、08:46:33、08:48:29（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 6 μm，但 08:40:43、08:44:13 观测到 CIP、PIP 各档粒子数浓度小于 08:46:33、08:48:29，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 08:54:24、09:00:23、09:03:19 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 09:00:23 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 6000 μm，但云滴谱呈单调递减分布，云滴最大直径为 16 μm。P3 给出了 09:09:00、09:19:00 两个时刻组合粒子谱分布，09:09:00 云滴谱呈单调递减分布，云滴谱宽为 6 μm，09:19:00 几乎不含液态水，09:19:00 冰雪晶谱大滴段较 09:09:00 时刻上翘，导致 09:19:00 观测到的冰水含量大于 09:09:00 时刻。

### 4.3　冰晶图像和降雪机制的分析

云中冰晶的形态是反映云粒子形成和增长的重要参数。图 7 给出了穿云过程−1.6°C～−19.7°C 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 时段冰晶图像以辐枝状和针状为主。1.8～2.2 km（−1.9°C～−2.9°C）观测到霰粒子的存在，发生冰晶的凇附增长；2.4～2.9 km（−2.0°C～−3.5°C）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°C～−5°C 层，以凝华增长为主。2.9～3.2 km（−3.5°C～−2.6°C）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°C～−10°C 层，−3.5°C～−2.6°C 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 时段有少量的柱帽状冰雪晶，可能是由−18°C～−25°C 生成的柱状冰雪晶下落穿过−13°C～−18°C 生成的板状冰雪晶形成的（Heymsfield et al, 2002）。

P2 时段 3.2～4.7 km（−2.6°C～−10.2°C）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。4.7～5.4 km（−10.2°C～−14.4°C）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°C～−18°C（Heymsfield and KajiKawa, 1987; Bailey and Hallett, 2009）。−9.3°C 观测到最大冰雪晶数浓度为 188.4 $L^{-1}$，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 6 组合粒子谱看出，09:00:23（−10.1°C）直径大于 3100 μm 和直径小于 1500 μm 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 时段 5.4～5.9 km（−14.4°C～−17.5°C）冰晶形态主要为不规则状和柱状，5.9～6.4 km（−17.5°C～−19.7°C）以不规则状为主，P3 时段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°C～−10°C、−5°C 层冰晶图像以针状、柱状和不规则状

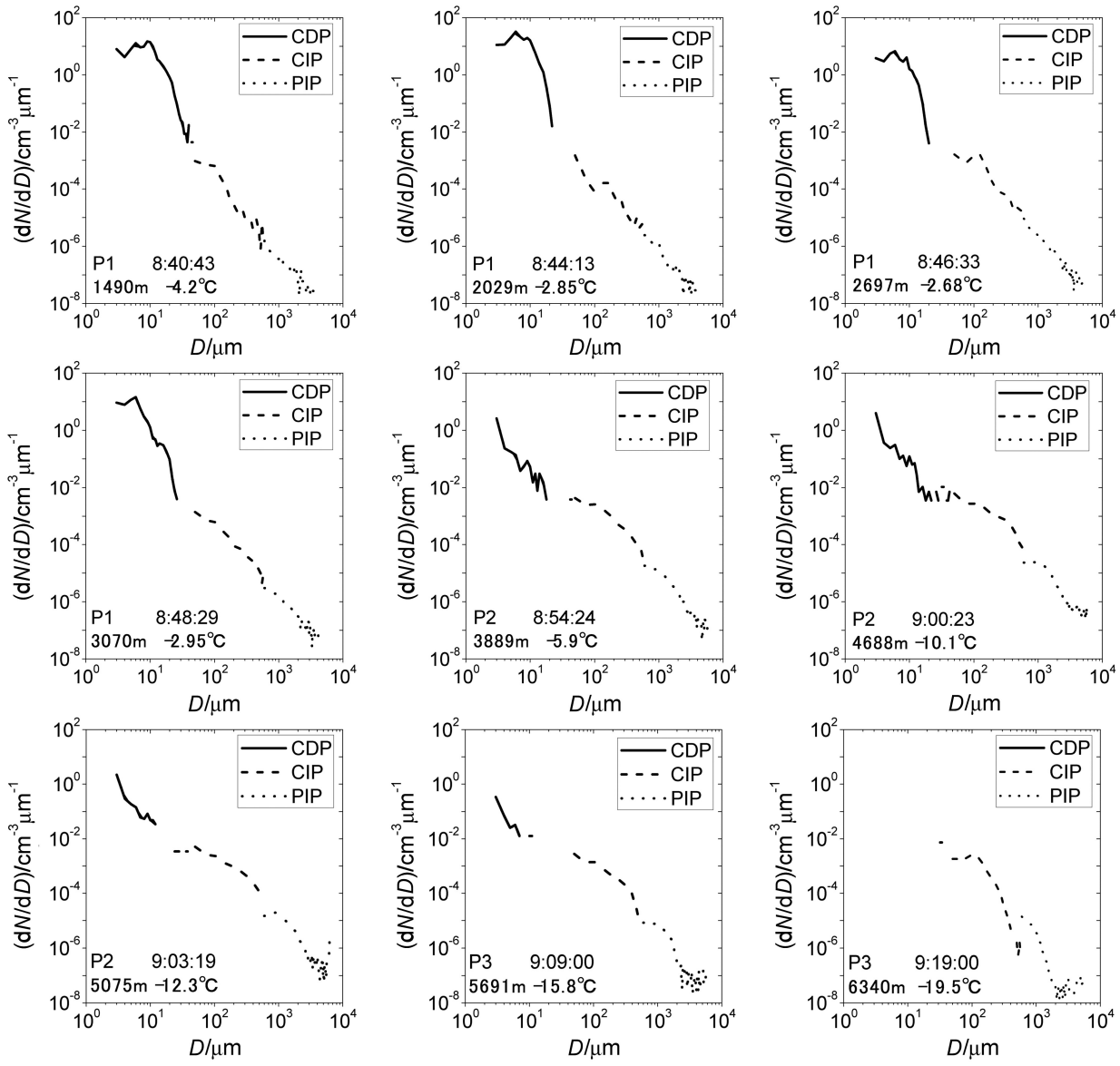


图 6 2011 年 11 月 29 日 08:38～09:20 时间段 CDP、CIP 和 PIP 粒子探头获取的组合粒子谱在不同高度和温度的分布

Fig. 6 Distributions of combined particle spectrum at different heights and temperatures obtained from CDP, CIP, and PIP during 0838–0920 BJT on 29 November 2011

为主，其中−5°C 层以下液态水含量丰富，出现冰晶的凝华增长。

Hallet-Mossop 的观测指出温度为−3°C～−8°C，云滴直径大于 24 μm，碰撞速度在 1.4～3 m $s^{-1}$ 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 时段−1.9°C～−2.9°C 出现本次观测 $N_{c24}$ 极大值 0.821 $cm^{-3}$，且存在明显的凇附增长。Yang et al.（2014）发现凇附增长发生时直径>23 μm 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 时段−2.6°C～−5.1°C（3.2～3.8 km）存在凇附状冰晶，这可能是 3.2 km 以下生成的凇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：

$$N_s(D) = N_0 \exp(-\lambda D), \qquad (3)$$

其中，$D$ 为雪花的直径；$N_0$ 和 $\lambda$ 分别表示截距和斜率，取决于降水率。Sekhon and Srivastava（1970）进一步分析 Gunn 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。

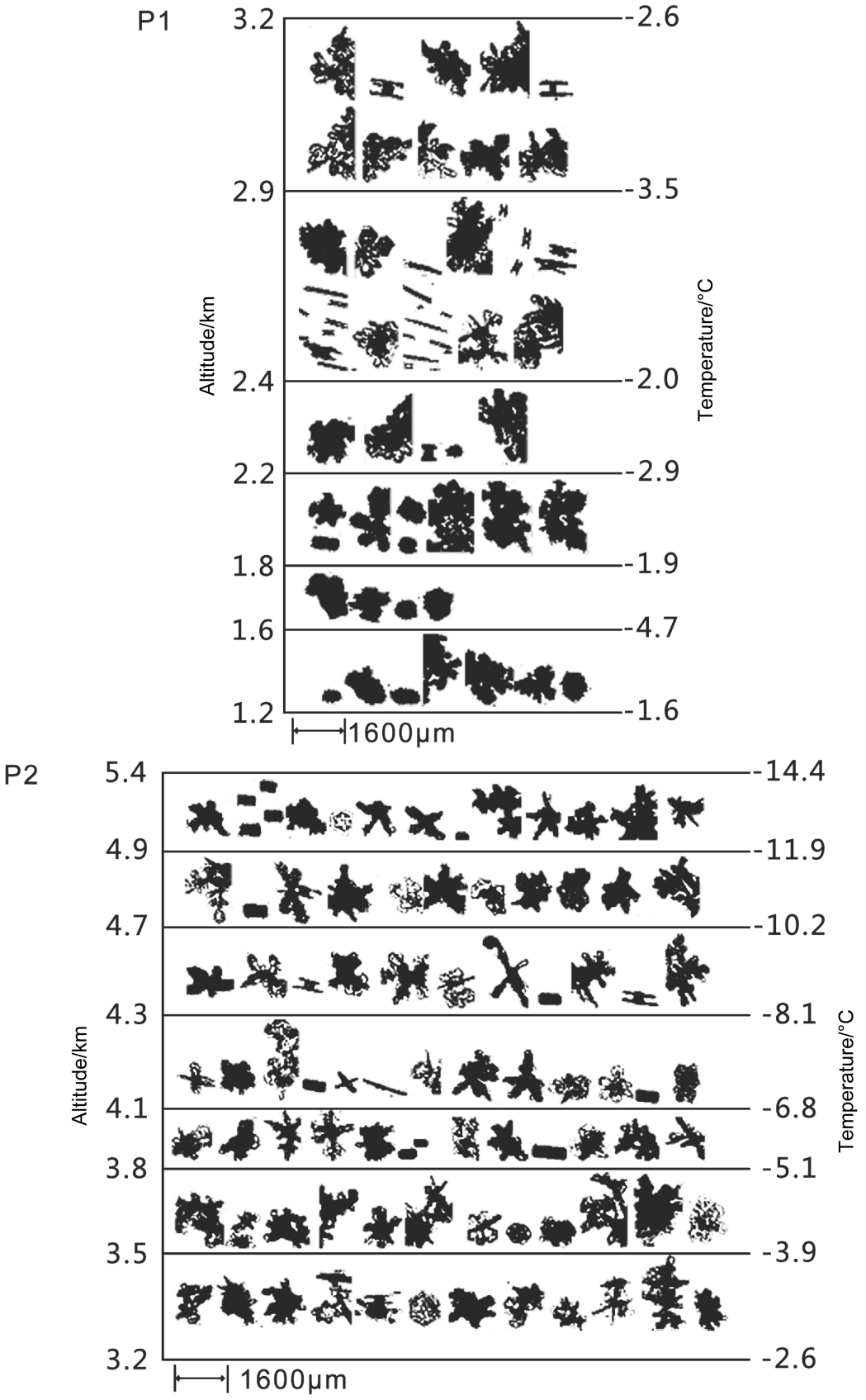


图 7　P1、P2、P3 时段观测到的冰晶图像随温度的变化（取自 CIP 资料）

Fig. 7　Ice crystal image changes with temperature during P1, P2, and P3 (from the CIP data)

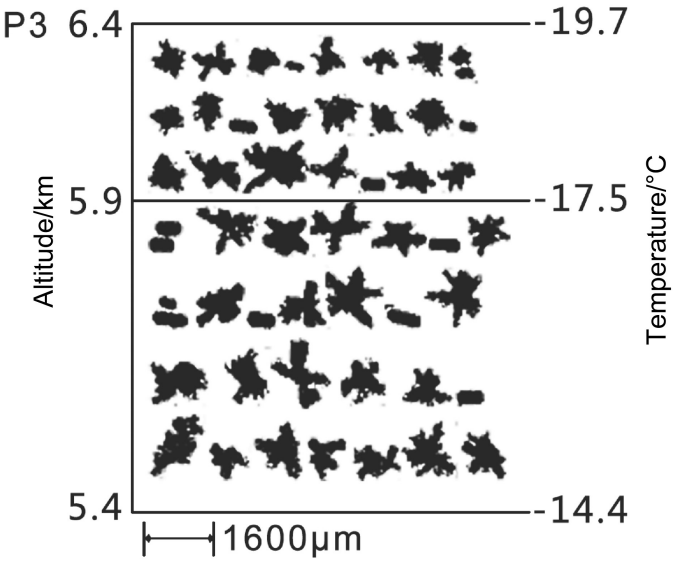


图 7 （续）

Fig. 7 (Continued)

根据以往对冬季降雪谱型关系的研究，Lo and Passarelli（1982）指出 $N_{os}$ 与 $\lambda$ 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 $N_{os}$ 的增加和 $\lambda$ 的减小，第二阶段聚集机制引起 $N_{os}$、$\lambda$ 均减小，第三阶段由于碰撞破碎导致小粒子数量增多，大粒子数量减少，$N_{os}$、$\lambda$ 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 $N_{os}$、$\lambda$ 随温度的变化规律如下（图 8）：−19°C～−17°C，$N_{os}$ 略有起伏、$\lambda$ 增大；−17°C～−14°C，$N_{os}$ 增大、$\lambda$ 增大，凝华增长使粒子数浓度增加，如−18°C 冰雪晶谱粒子数浓度在大滴段随直径增加而递增导致 $\lambda$ 偏大（图 5）。−14°C～−10°C，$N_{os}$ 增大、$\lambda$ 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°C～−4°C，$N_{os}$ 减小，−10°C～−8°C，$\lambda$ 减小，−8°C～−5°C，$\lambda$ 基本不变。−5°C 层以下非逆温层 $N_{os}$ 随高度增加而增大，逆温层出现导致 $N_{os}$ 减小；随高度的增加，第一次逆温出现时，$\lambda$ 先减小后增大，第二次逆温出现时，$\lambda$ 先增大后减小，第三次逆温出现时，$\lambda$ 先增大后保持不变。−5°C 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（图 9a），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 时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 $N_{os}$、$\lambda$ 骤减导致的。

一些研究表明冰雪晶谱拟合参数 $N_{os}$ 和 $\lambda$ 之间的关系可以用幂函数（$N_{os}=a\lambda^b$，其中 $a$、$b$ 为常数）表示。例如，Yang and Lei（2016）用幂函数对获取的空中冰雪晶谱拟合参数 $N_{os}$ 和 $\lambda$ 进行相关性分析，相关系数 $R^2$ 最大为 0.72。对本次观测的 $N_{os}$ 和 $\lambda$ 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 9b）。

## 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淞附增长和冰雪晶之间的碰撞破碎等机制产生。

（2）P3 时段（−14.4°C～−19.7°C）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 时段（−2.6°C～−14.4°C）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°C 出现冰雪晶

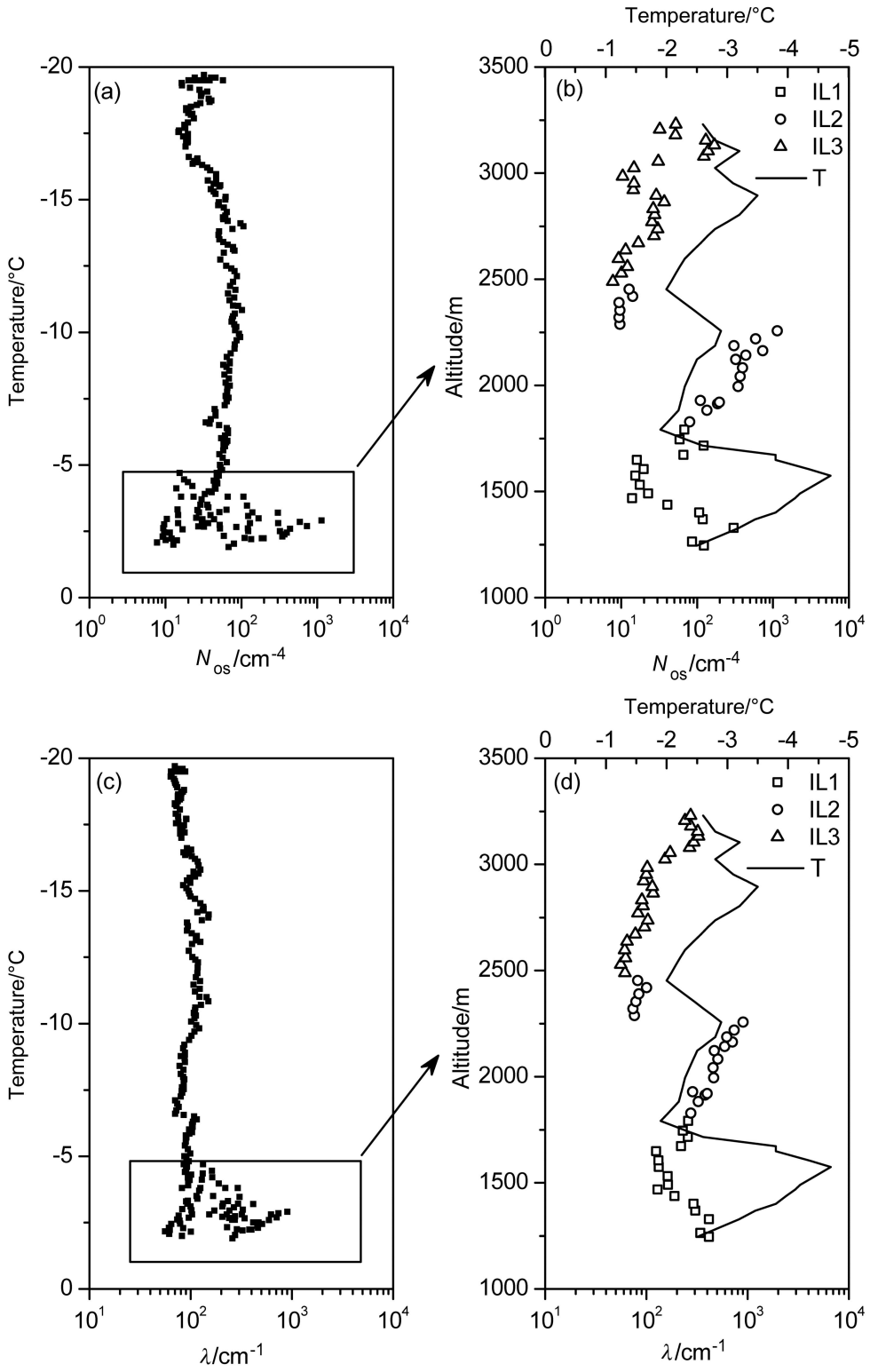


图 8　2011 年 11 月 29 日 08:38～09:20 冰雪晶谱拟合参数（a）$N_{os}$、（c）$\lambda$ 随温度的变化，−5°C 层以下三次逆温层（Inversion Layer, IL1、IL2、IL3）（b）$N_{os}$ 和温度、（d）$\lambda$ 和温度随高度的垂直分布。图 a、c 中的黑点表示每 10 s 拟合参数的平均值

Fig. 8　Variations of (a) $N_{os}$ (fitting parameter, the larger $N_{os}$ was, the higher the concentration of small particles was), (c) $\lambda$ (fitting parameter, the larger $\lambda$ was, the higher the proportion of small particle number concentration to total particle number concentration was) with temperature; vertical distributions of (b) $N_{os}$ and temperature, (d) $\lambda$ and temperature with height in three inversion layers (IL1, IL2, IL3) below −5°C level during 0838–0920 BJT on 29 November 2011. In Figs. a and c, the black dots denote the average value of the fitting parameters every 10 s

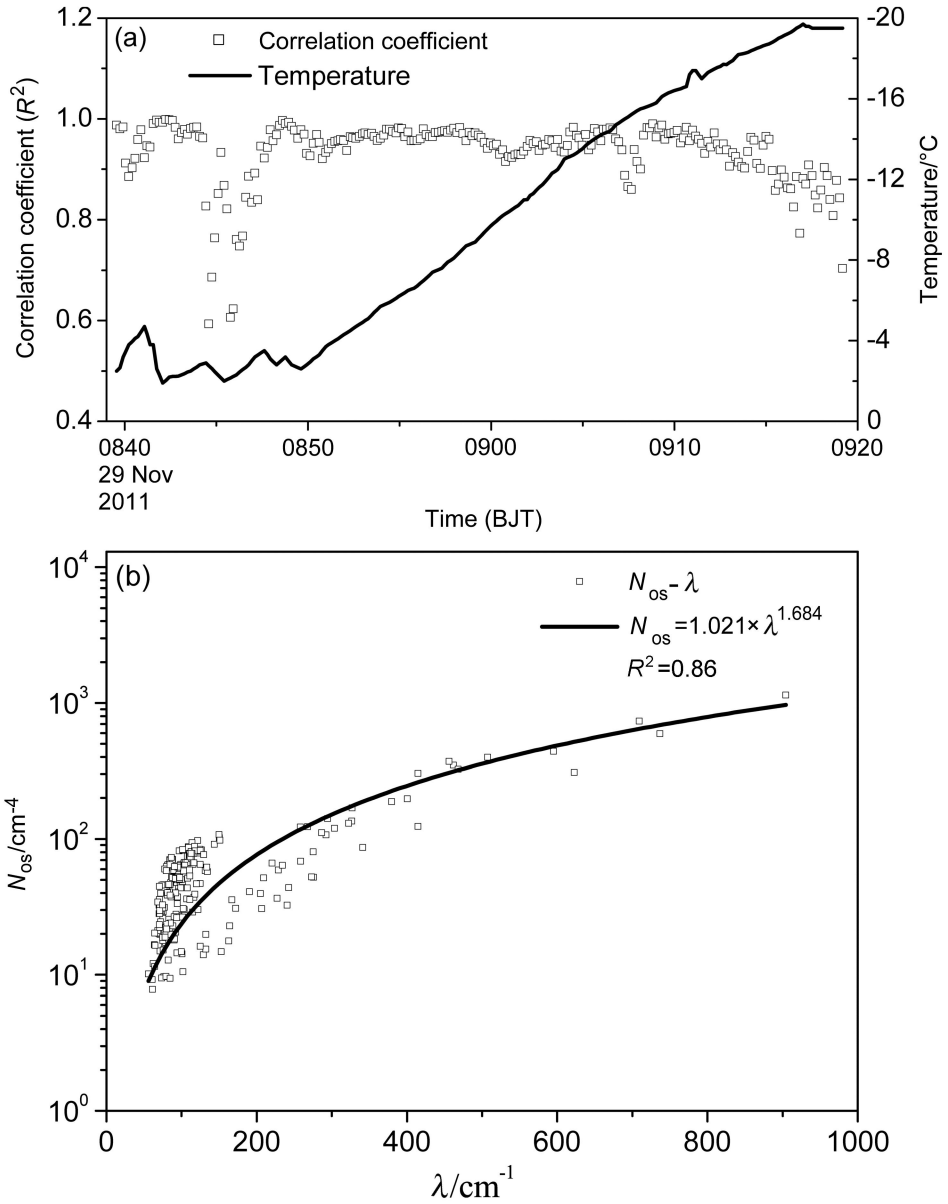


图 9　2011 年 11 月 29 日 08:38～09:20（a）指数分布拟合冰雪晶谱得到的相关系数 $R^2$、温度随时间的变化，（b）指数拟合参数 $N_{os}$ 和 $\lambda$ 的散点图，实线代表 $N_{os}$ 和 $\lambda$ 的回归函数

Fig. 9　(a) Variation with time and temperature of the correlation coefficient $R^2$ obtained by fitting the ice and snow crystal spectra with the exponential distribution, (b) scatter diagram of the exponential fitting parameters $N_{os}$ and $\lambda$ (the line denotes the regression functionof $N_{os}$ and $\lambda$) during 0838–0920 BJT on 29 November 2011

数浓度最大值为 188.4 $L^{-1}$，P2 段以冰晶凝华和聚集增长为主。此外 P2 时段（−2.6°C～−5.1°C）存在凇附状冰晶，这可能是 3.2 km 以下云内生成后通过上升气流抬升而来的。

（4）P1 时段云滴谱出现双峰分布，液态水含量及直径>24 μm 的云滴数浓度远大于 P2 时段，云内出现三次逆温层，第一次逆温过程发生凇附和聚集并以凇附为主，第二次逆温过程出现聚集和凇附并以聚集为主。逆温层存在抑制了云内凇附增长和凝华增长，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，本文仅对回流系统影响下山西降雪云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 snows [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 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 multiplication generated by dendritic snow crystals collision and aggregation [J]. Journal of Academy of Meteorological Science (in Chinese), 2(1): 74−80.

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 in 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. 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

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

Gunn 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 graupel [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 Tuanjie, Lei Hengchi, He Youjiang, et al. 2021. Aircraft measurements of the microphysical properties of stratiform clouds with embedded convection [J]. Adv. Atmos. Sci., 38(6): 966−982. doi: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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(2): 356−370. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18258

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 Xiaoqin, 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-phase clouds during ARCPAC [J]. Atmos. Meas. Tech., 3: 1683−1706. doi: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 Xincheng, Bi Kai, Chen Yunbo, et al. 2017. Characteristics of winter clouds and precipitation over the mountains of northern Beijing [J]. Adv. Meteor., 2017: 3536107. doi:10.1155/2017/3536107

Mitchell D L, Zhang R, Pitter R L. 1990. Mass dimensional relationships for ice particles and the influence of riming on snowfall rates [J]. J. Appl. Meteor., 29(2): 153−163. doi:10.1175/1520-0450(1990)029<0153:MDRFIP>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. Appl. Meteor. Climatol., 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. Climatol., 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. 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 Jiefan, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia, et al. 2014. Particle size spectra and possible mechanisms of high ice concentration in nimbostratus over Hebei Province, China [J]. Atmos. Res., 142: 79−90. doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.018

Yang Jiefan, Lei Hengchi. 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 process 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 the 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, et al. 2011. Analysis and forecast of heavy snow in Shanxi Province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(3): 727−738.