

一次飞机积冰过程的气象条件和微物理特征分析

左懂飞^{1,2} 赵舒文^{1,2} 李军霞^{1,2} 高扬^{1,2} 张骁拓^{1,2} 夏兆军³ 杜远谋⁴ 王黎俊⁵

1 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

2 中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室, 北京 100081

3 华云普达(北京)科技有限公司, 北京 100081

4 北京市人工影响天气中心, 北京 100089

5 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810001

摘要 飞机积冰严重威胁飞行安全, 为更好地了解飞机积冰的气象条件和云微物理特征, 寻找积冰与宏观气象条件阈值之间的关系, 本文利用飞机观测资料, 结合雷达、欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料, 对 2018 年 12 月 10 日河南中东部冬季一次飞机严重积冰过程的天气条件和云微物理过程进行了分析, 并对此次积冰强度进行了评估。此次积冰过程是受高空槽、低层切变以及地面冷高压的共同作用, 流向河南的低层暖湿空气沿着冷高压爬升, 形成上暖下冷的逆温层, 促进了该区域内液态水的积聚。积冰区域内液态水含量丰富, 而冰水含量较低, 液态水含量主要分布在 550~750hPa 高度之间。飞机观测数据与 ERA5 再分析资料结果较为一致, 强积冰区在 3630m 高度层上, 云中温度为-8.2~-6.8°C, 相对湿度在 87%~92%, 平均云滴数浓度为 499.9cm⁻³, 液态水含量最大可达 0.87g/m³, 该区域内大小过冷液滴共存, 基本无冰晶粒子。通过计算: 飞机穿过液态水含量丰富区发生轻度积冰、中度积冰、严重积冰时的液态水含量阈值分别为 0.05g/m³、0.20g/m³、0.58g/m³。当逆温层强度为 1.9°C/100hPa、垂直运动速度在-0.25~0.2Pa/s、水平辐合强度为-3.73kg/(m²s)的情况下, 积冰强度达到中度以上的概率为 77%。

关键词: 飞机积冰, 飞机观测, 积冰强度, 云微物理特征

文章编号 2023155B

中图分类号 P481

文献标识码 A

收稿日期 2023-11-27; 网络预出版日期

作者简介 左懂飞, 男, 1995 年出生, 助理工程师, 主要从事云降水物理研究。E-mail: zuodf@cma.gov.cn

通讯作者 高扬, 高级工程师, E-mail: 517183870@qq.com

资助项目 国家重点研发计划(2019YFC1510301), 中国气象局创新发展专项(CXFZ2024J028), 青海省基础研究计划(2020-ZJ-711)

Funded by The National Key Research and Development Program of China (2019YFC1510301), China

Meteorological Administration Innovation Development Project (CXFZ2024J028), The Qinghai Science and Technology Department Project (2020-ZJ-711).

Analysis of Meteorological Conditions and Microphysical Characteristics of an Aircraft Icing Event

ZUO Dongfei^{1,2}, ZHAO Shuwen^{1,2}, GAO Yang^{1,2}, LI Junxia^{1,2}, ZHANG Xiaotuo^{1,2},
XIA Zhaojun³, Du Yuanmou⁴, WANG Lijun⁵

1 *CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081*

2 *CMA Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory (CPML), Beijing 100081*

3 *Huayun Puda (Beijing) Technology Co., LTD, Beijing 100081*

4 *Beijing Weather Modification Center, Beijing 100089*

5 *Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810001*

Abstract Aircraft icing poses a serious threat to flight safety. To better understand the meteorological conditions and cloud microphysical characteristics of aircraft icing, and to find the relationship between icing and the threshold of macro meteorological conditions, this study used aircraft observation data, combined with radar and ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, to analyze the weather conditions and cloud microphysical processes of a severe aircraft icing event in central and eastern Henan Province on December 10, 2018. The intensity of the icing event was also assessed. This icing event was caused by the combined effects of an upper-level trough, low-level shear, and surface cold high pressure. Warm and moist air at low levels flowing towards Henan ascended along the cold high pressure, forming an inversion layer with warm air above and cold air below, which facilitated the accumulation of liquid water in the region. The icing area was rich in liquid water content but had low ice water content, liquid water content is significantly higher between the altitudes of 550 to 750hPa compared to other altitudes. The aircraft observation data is relatively consistent with the results of ERA5 reanalysis data, the severe icing area was at an altitude of 3630m, with cloud temperatures between -8.2 and -6.8°C, relative humidity between 87% and 92%, an average cloud droplet concentration of 499.9cm⁻³, and a maximum liquid water content of up to 0.87g/m³. In this area, large and small supercooled liquid droplets coexisted, with virtually no ice crystal particles. Calculations showed that the thresholds for light, moderate, and severe aircraft icing in areas rich in liquid water

content were 0.05g/m^3 , 0.20g/m^3 , and 0.58g/m^3 , respectively. Under conditions where the inversion layer strength was $1.93^\circ\text{C}/100\text{hPa}$, vertical motion speed ranged from -0.25 to 0.2Pa/s , and horizontal convergence intensity was $-3.73\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$, the probability of icing intensity reaching moderate or above was 77%.

Keywords Aircraft icing, Aircraft observation, Icing intensity, Cloud microphysical characteristics

1 引言

飞机积冰是指在飞行过程中，飞机表面因飞经含有过冷水滴的云层、雾、冻雨或湿雪等环境，导致水滴冻结或水汽凝华在飞机表面形成冰层的现象（王秀春等，2014；孙晶等，2019）。积冰可能会影响飞机的气动性能，干扰飞机的稳定性和操纵性，甚至导致飞机导航系统和通信设备失灵，增加飞行事故的风险。因此，飞机积冰是飞行中需要特别注意的危险现象（Sand et al. 1984; Bellucci et al. 2009, 孙晶等，2020）。

飞机积冰与大气温湿度、云中过冷水含量以及过冷水滴大小存在着直接关系（张宇飞，2013；王秀春等，2014）。研究指出，飞机积冰主要发生在高湿区，最易发生积冰的温度范围是 $-10\sim-2^{\circ}\text{C}$ （赵树海，1994）。当云中过冷水含量越大，飞机发生积冰的概率以及强度也就越大。积冰的类型与过冷液滴的大小与环境温度等气象条件有关，积冰类型主要分为明冰、毛冰、雾凇和霜 4 种。

国内外学者对飞机积冰的天气系统研究表明，飞机积冰常与锋面相伴而生（Schack et al, 1980; Politovich et al, 1996; Bernstein et al, 1998; 申红喜等，2005, 刘开宇等，2008），在锋区附近会产生大范围的云和降水，致使发生积冰的概率大大增加。李子良等（1999）通过对几种有利于发生积冰的天气系统进行分析表明，地面锋线、高空槽线和切变线也是有利于产生飞机积冰的天气系统，在槽线和切变线附近，一般辐合较强，水汽也较充沛，由于云层中存在大量的过冷水滴，且尺度较大，有利于积冰的形成（张宇飞，2013）。Politovich 等（2002）研究发现，影响美国科罗拉多东北部积冰的天气背景主要是冷锋为主。迟竹萍（2007）对山东地区不同天气系统进行统计分析，研究发现冷锋、低压倒槽、南方气旋是产生积冰的主要天气条件。王钦等（2018）对天气条件进行分析表明，冷锋型、低槽型、西南气流型以及弱脊型的存在导致飞机发生了积冰。此外，当云中存在逆温层时，也有利于造成飞机积冰（陈跃等，1989；刘烈霜等 2013；孙晶等，2019；王泽林等，2022）。

国内外开展了大量的积冰探测研究，获取了珍贵的探测资料。美国和加拿大等国家对积冰气象条件展开了大量飞机探测研究，建立了详尽的积冰气象条件资料数据库，并获得了丰富的飞机积冰气候研究成果（Bernstein et al, 2007; Bernstein et al, 2009）。Rasmussen 等（1992）通过研究冬季风暴中过冷液态水的形成和耗尽过程，改进了飞机结冰的预报。Cober 等（1995）对大西洋东海岸冬季风暴的飞机结冰环境进行了分析，结果表明，过冷液态水云区的平均水平范围为 4.3km ，平均液滴浓度为 130cm^{-3} ，液态水含量为 0.13 g/m^3 ，液滴体积直径中值为 $18\mu\text{m}$ 。Isaac 等（2001）发现加拿大的纽芬兰和五大湖是北美洲地表冰冻降水发生频率最高的两个地区，据评估，大约 80% 的冻雨或过冷大滴降水环境是通

过非典型天气机制形成的。Politovich 等（2002）等指出科罗拉多州东北部结冰条件的特征反映了冬季云中小液滴数量少，液态水含量低，结冰多为轻度或中度。Hauf 等（2006）通过一次飞机观测发现，几乎所有的积冰期，包括严重积冰期，都发生在嵌入周围层云的混合相对流层中。近 40 年来，国内各人工影响天气等气象科研部门利用飞机开展观测，获取了大量的观测资料（游来光等，2010；李军霞等，2014；亓鹏等，2019；张佃国等，2021；杨洁帆等，2021；Zuo et al, 2023），并对积冰环境的云微物理特征开展了一些研究。袁敏等（2018）对非降水云系探测时发现少量的飞机积冰，由于积冰的温度范围波动较小，未能总结出温度与积冰微物理环境之间的关系。孙晶等（2019）对安庆地区的云系特征和飞机积冰气象条件进行了分析发现，导致飞机积冰的原因主要是强冷空气造成锋面逆温，云中主要为过冷水，基本无冰相粒子。王泽林等（2022）对一次严重积冰过程的微物理特征进行了分析，飞机遭遇严重积冰期间环境温度为 $-8\sim-5^{\circ}\text{C}$ ，液态水含量最大为 $0.85\text{g}/\text{m}^3$ ，云粒子中值体积直径平均为 $20.3\mu\text{m}$ 。孙艳辉等（2023）在高空冷涡天气系统中进行了 7 个架次飞机结冰探测试验，重度飞机积冰出现在冷涡东南部水汽饱和区中，高浓度的过冷水含量导致飞机外壳出现瞬时快速积冰。彭冲等（2023）利用机载 DMT 云物理探测资料等多源观测表明，强积冰区域液态水含量丰沛，最大液态含水量可达 $0.818\text{g}/\text{m}^3$ ，大量球型过冷液滴和半径超过 $50\mu\text{m}$ 的过冷大滴存在是导致积冰的重要原因。

目前的研究主要针对不同个例的天气以及云降水条件分析积冰原因，未能讨论不同天气条件参数（逆温层强度、水平辐合强度、大气垂直速度）对飞机积冰的影响。本文基于飞机观测资料，对河南一次严重积冰过程的云微物理特征进行了深入分析，讨论积冰形成的天气条件，并计算逆温层强度、水平辐合强度等天气条件参数，为研究不同积冰条件下的宏观气象条件阈值给出参考。

2 仪器设备和飞行概况

2.1 仪器设备和数据介绍

本文使用中国气象局人工影响天气中心的新舟 60（MA60）国家高性能增雨飞机作为观测平台，该飞机最高升限约 7620 米、最大航程约 2600 公里。飞机上加装了先进的云微物理探测系统（云滴探头、云粒子图像探头以及综合气象探测系统），可直接实时探测云中各种水成物粒子谱、数浓度等微观云物理特征量（机载探测设备详细信息见表 1）。

云滴探头（Cloud Droplet Probe，简称 CDP），通过测量粒子与激光束作用造成的光散射估算粒子的大小和浓度（Lance et al., 2010）。该仪器可以测量粒

径为 2~50μm，分辨率约为 2μm，能在飞机速度为 10~200m/s 下正常工作。其中云滴数浓度（ N ）、液态水含量（ LWC ）可通过 CDP 的粒径分布计算得到：

$$N = \sum_{i=1}^{30} n_i \tag{1}$$

$$LWC = \frac{\pi \rho_w}{6} \sum_{i=1}^{30} n_i d_i^3 \tag{2}$$

其中，CDP 共有 30 个档位，下标 i 代表第 i 档， d_i 为粒子每档直径， n_i 为粒子每档的浓度。

云粒子图像探头（Cloud Particle Image Probe，CIP）由 64 个光电二极管阵列组成（张荣等，2021），可以测量云中粒径为 25~1250μm 的降水粒子，分辨率为 25μm，并可以获取得到云和降水粒子的二维图像。

机载综合气象探测系统（Aircraft Integrated Meteorological Measurement System，AIMMS）可用于记录飞行时的温度、湿度、风的 3D 空间状况、气流的观测。当设备所处环境为高湿状态时，响应能力不足，测量误差变大。

为讨论积冰发生时的气象条件，本文使用了欧洲中期天气预报中心的全球气候的第五代全球气候大气再分析资料（ECMWF Reanalysis v5，ERA5）。该资料水平分辨率为 0.25°× 0.25°，时间间隔为 1 h，垂直方向为 1000hPa 到 1hPa 共 37 个高度层。本文选取了 2018 年 12 月 10 日 16:00（北京时间，下同）ERA5 再分析资料的风场、位势高度、温度、湿度、垂直速度、海平面气压、云水含量以及冰水含量等对本次积冰过程的天气背景展开分析。

本文使用的雷达资料是中国气象局新一代天气雷达组网产品，主要包括：组网混合扫描反射率（HBR），组网组合反射率（CR）、组网最大反射率高度（CRH）、组网回波顶高产品（ET）、组网垂直累积液态水含量（VIL）、组网一小时降水（OHP）、组网等高面反射率（CAP），数据频次为 6 分钟。本文主要使用了 2018 年 12 月 10 日 16:00-19:00 雷达的组网组合反射率（CR），用于分析积冰云系的云宏观特征以及演变规律。

表 1 MA60 机载云微物理探测系统设备功能及参数
Table 1 Equipment functions and parameters of MA60 airborne cloud microphysical detection system

仪器名称	功能	测量量程	分辨率
云滴探头 CDP	测量云滴粒子的谱分布及数浓度	2~50μm	1-12 档为 1μm, 13-30 档为 2μm
云粒子图像探头 CIP	测量云和降水粒子的谱分布及数浓度	25~1550μm	25μm

综合气象探测系统 AIMMS	测量飞行高度、经纬度、温湿度、气压、风向风速、垂直速度等	高度：0~15km 温度：-20~40℃ 相对湿度：0~100%	温度精度：0.05℃ 风速精度：0.5m/s 相对湿度精度：2%

2.2 飞行探测试验概况

2018年12月10日，新舟60（B-3435）飞机16:01从河南新郑机场起飞，起飞前机场地面气温0℃，阴有小雪，云底高度1200 m。16:07飞机起飞爬升，在1600m高度处入云，16:17到达本次观测最大高度3630m，飞机发生积冰，为了解飞机积冰的原因，逐渐降低高度平飞探测，分别在3630m、2990m、2620m、2280m的高度上进行分层探测，18:22飞机开始返程降落，18:50飞机落地（飞行轨迹见图1）。在16:11-17:16时段探测飞机在河南中东部上空穿越层状云的过程中遭遇严重积冰，飞机风挡、机翼迅速积聚毛冰，该时段存在逆温层（郑庆锋等，2011），云系环境温度在-15.8~-0.6℃。为了解积冰形成的微物理过程，本文利用该次飞行得到的观测结果，选取了垂直爬升时段16:07-16:17（AB段）、平飞时段16:17-16:58（BC段）以及16:58-17:16（CD段）进行研究分析，这三个时段分别为液态水含量增长区、稳定大值区以及下降区。

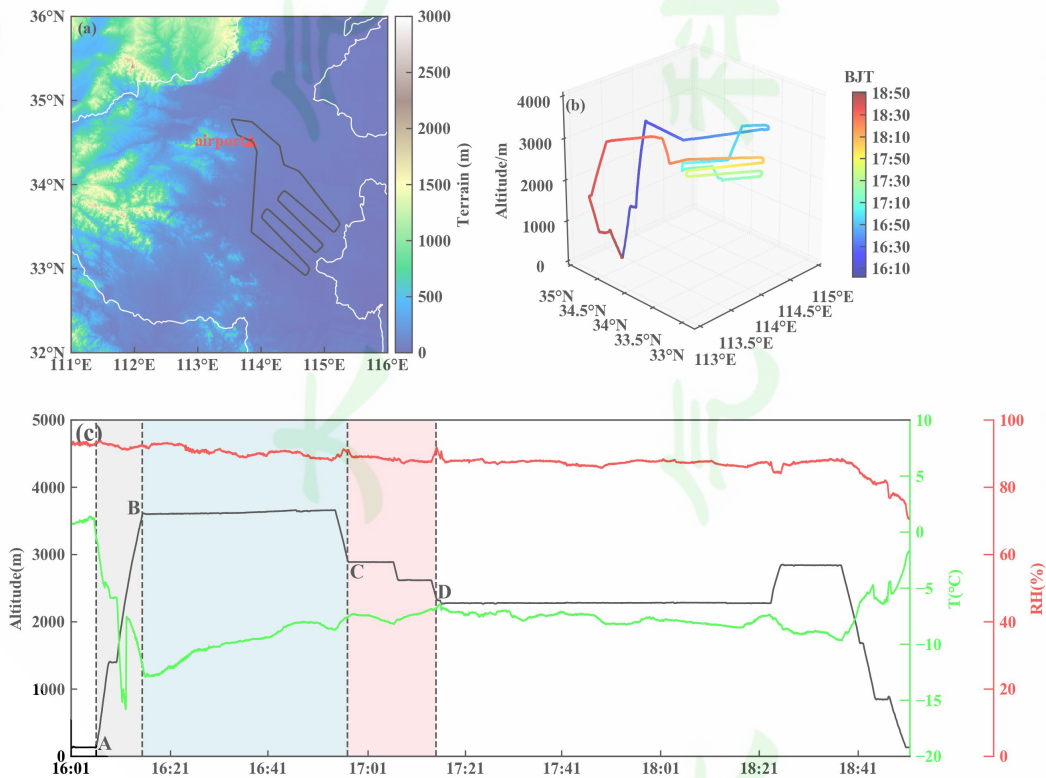


图1 2018年12月10日飞机探测概况

（a. 飞机轨迹叠加的地形图；b. 飞行三维轨迹图；c. 飞行时间序列图，黑色代表飞行高度，绿色代表飞行路径上的温度，红色代表飞行路径上的湿度）

Fig. 1 Aircraft Detection Overview on December 10, 2018

(a. Topographic map overlaid with aircraft trajectory; b. Three-dimensional flight trajectory diagram; c. Flight time series chart, with black representing flight altitude, green representing temperature along the flight path, and red representing humidity along the flight path)

3 天气背景和云宏观特征

受高空槽、低层切变以及地面冷高压的共同作用，2018 年 12 月 10 日河南中部地区出现了一次降水过程。当日 16 时的天气形势图显示（图 2），在 500hPa 高度层上，河南中部地区位于高空槽前，温度场落后于高度场，有西南暖湿气流流向河南中部地区输送；在 700hPa 高度层上，河南中部地区同样位于高空槽前，河南中部为西南气流，此外，河南地区的南部有西南急流源源不断输送暖湿空气；地面，河南地区受冷高压控制，冷高压可以向上延伸至 850hPa，流向河南的低层暖湿空气会沿着冷高压爬升，形成上暖下冷的逆温层。

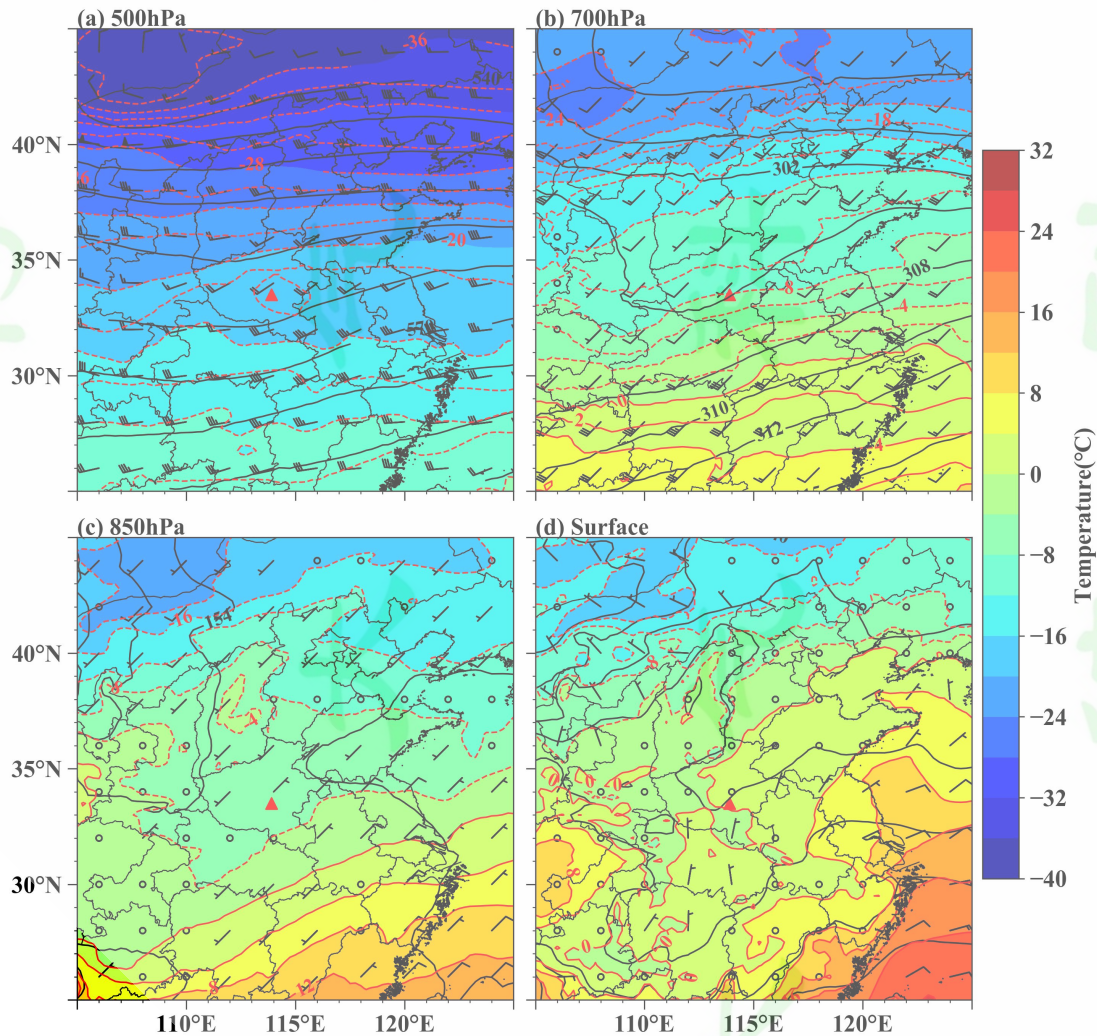


图 2 2018 年 12 月 10 日 16:00 的天气背景，红色三角形代表积冰区域
(a-c. 分别为 500hPa、700hPa、850hPa 的位势高度和风场；d. 地面压强和风场；红色三角

形代表积冰区域，红色线代表等温线，黑色线代表位势高度)

Fig.2 Weather background at 16:00 on December 10, 2018, with red triangles representing the icing area

(a-c. Potential height and wind field at 500hPa, 700hPa, and 850hPa, respectively; d. Surface pressure and wind field. The red triangles represent the icing area, red lines represent isotherms, and black lines represent potential height)

本文选取了 111°E~117°E, 31°N~37°N 作为研究区域，飞机严重积冰区域 (33.48°N~34.37°N, 113.93°E~114.44°E) 在图中用红色框标注 (图 3)。由 33.1°N 和 114.2°E 的垂直剖面可见，700hPa 以上高度，偏西南风，积冰区域温度在 -5~-15°C 之间，相对湿度在 85% 以上，该区域存在明显的逆温层 (图 3b)。研究表明 (刘烈霜等 2013; 孙晶等, 2019; 王泽林等, 2022)，逆温层会削减空气对流，促进云中液态水的积聚，导致该区域内气象条件利于积冰的形成。

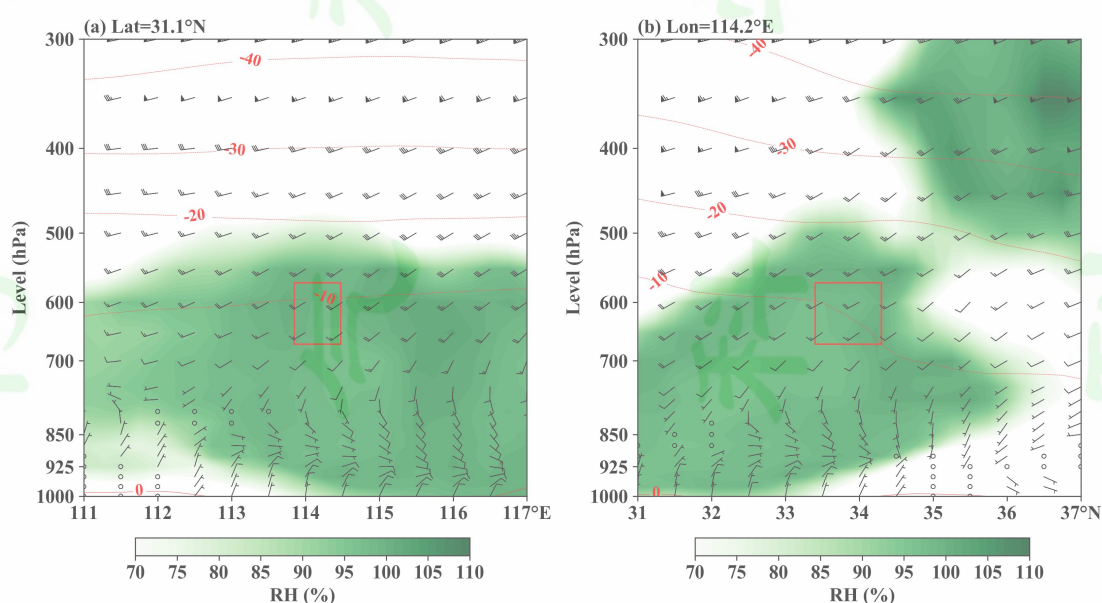


图 3 2018 年 12 月 10 日 16:00 相对湿度垂直分布

(a. 沿北纬 31.1° 垂直剖面; b. 沿东经 114.2° 垂直剖面)

Fig.3 Vertical distribution of relative humidity at 16:00 on December 10, 2018

(a. Vertical cross-section along 31.1°N latitude; b. Vertical cross-section along 114.2°E longitude)

从 ERA5 再分析资料的液态水含量及冰水含量垂直分布来看 (图 4)，33.1°N 的垂直剖面图中 (图 4a)，液态水含量主要分布在 670~500hPa 高度之间，垂直剖面存在两个液态水含量极大值中心，液态水含量最大值为 0.55g/m³。在飞机积冰区域内液态水含量最大值为 0.42g/m³，该区域伴随着-0.25Pa/s 的垂直上升运动，环境温度在-8~-12°C。而由 114.2°E 的垂直剖面可知 (图 4b)，液态水含量主要分布在 31~33°N 之间，高度在 750~550hPa 之间，液态水含量最大可达 0.6g/m³。飞机遭遇积冰区域在其北侧，环境温度在-10°C 左右，该区域内液态水含量最大值为 0.35g/m³，并伴随着-0.2Pa/s 的垂直上升运动。结合不同高度层上的风场来

看，受西南气流的影响，促进了该区域内液水的聚积。由两个垂直剖面的冰水含量可知（图 4c、4d），在积冰区域内云冰水含量较低，最大值仅为 0.05g/m^3 ，说明该区域内冰晶粒子较少。这一结果说明，在该区域内，异质核化过程较弱。

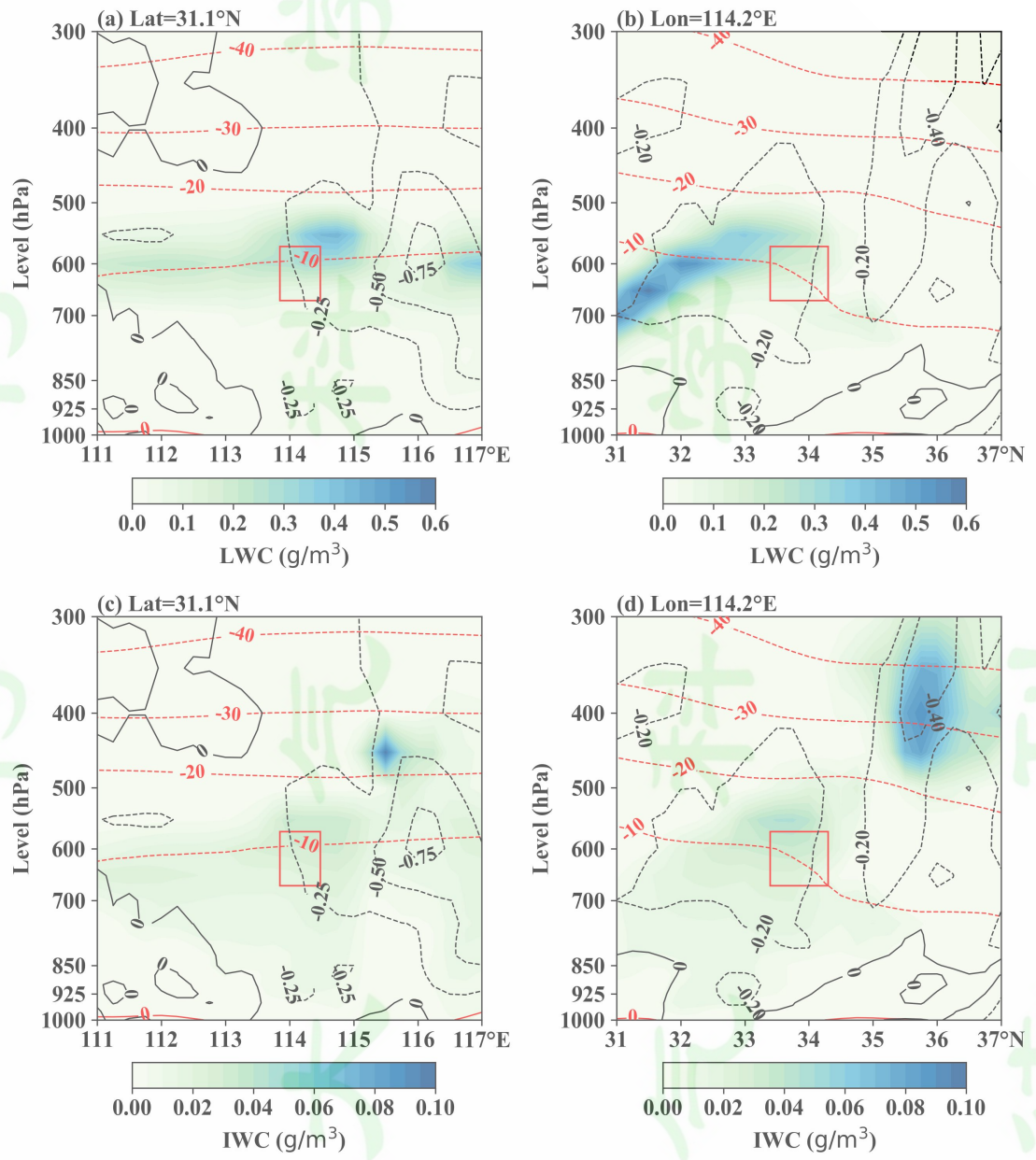


图 4 2018 年 12 月 10 日 16:00 液态水含量及冰水含量垂直分布

(a、c 分别为沿北纬 31.1° 垂直剖面的液态水含量和冰水含量；b、d. 分别为沿东经 114.2° 垂直剖面的液态水含量和冰水含量)

Fig. 4 Vertical distribution of liquid water content and ice water content at 16:00 on December 10, 2018

(a, c: Liquid water content and ice water content, respectively, in the vertical cross-section along 31.1°N latitude; b, d: Liquid water content and ice water content, respectively, in the vertical cross-section along 114.2°E longitude)

图 5 为探测区域内飞机发生严重积冰时的 S 波段雷达组网观测的组合反射率

因子,在飞机探测路径上回波强度在 5~30dBZ。整个云系自西南向东北方向移动,云系回波水平分布较为均匀,无明显对流中心,具有层状云特点。

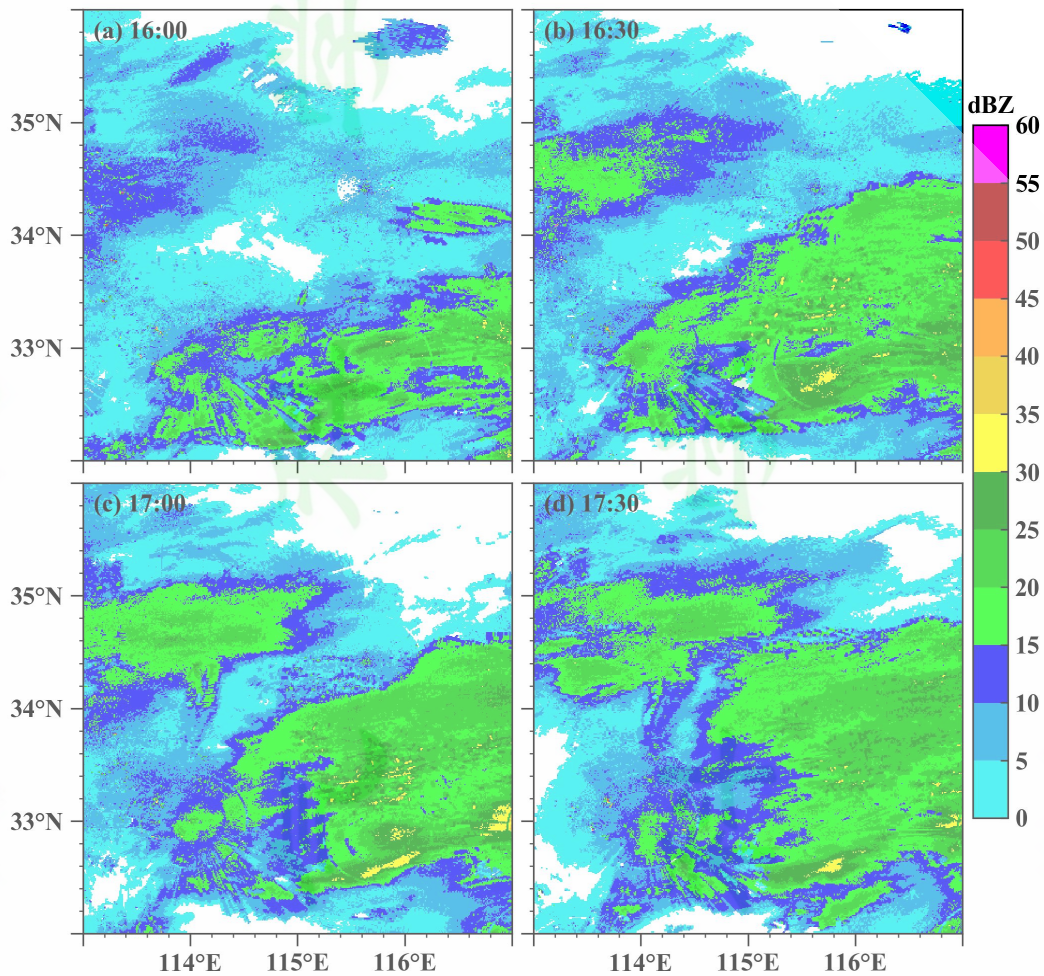


图 5 2018 年 12 月 19 日 16:00-17:30 S 波段雷达组合反射率因子

Fig. 5 Combined reflectivity factor of S-band radar from 16:00 to 17:30 on December 19, 2018

从动力条件上来看,飞行区域有弱的垂直上升运动和水平辐合。从热力条件上来看,飞行区域湿度较大,并且大气中层有逆温层存在。综合来看,弱的垂直上升运动和水平辐合以及高湿条件,促进了飞行区域云滴的碰并。大气中的逆温层抑制了污染物向上层的扩散,导致积冰区域大气冰核较少,无法核化为冰晶。因此飞行区域的液态水含量较大,极易发生飞机积冰。

4 云微物理过程分析

为了解积冰形成的微物理过程,选取飞机垂直爬升阶段的探测过程进行研究分析(图 6)。该时段飞机垂直探测高度为 1400~3630m,温度为-5.8~-15.8℃,相对湿度在 91.1%~92.5%,此次层状云系为双层冷云结构,并且在 2360m 高度处存在逆温区(图 6a),逆温层厚度约为 110m。

从 CDP 测得的云滴数浓度和液态水含量的垂直廓线中可以看出(图 6b),

云滴数浓度和液态水含量随高度增加整体上呈增加趋势，云滴数浓度在 3051m 高度上达到最大值，约为 1058.9cm^{-3} 。而液态水含量在 3630m 高度处达到最大值约为 0.69g/m^3 。值得注意的是，在 2050~2200m 云滴数浓度低于 10cm^{-3} ，表明该段飞机未入云（蔡兆鑫等，2019）。从 CDP 的粒子谱分布上可以看出（图 6d），云中多为直径较小的过冷云滴，粒子直径主要分布在 $20\mu\text{m}$ 以下。随着高度的增加，CDP 的谱逐渐变宽， $5\sim 20\mu\text{m}$ 的粒子数浓度最大为 $451\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。

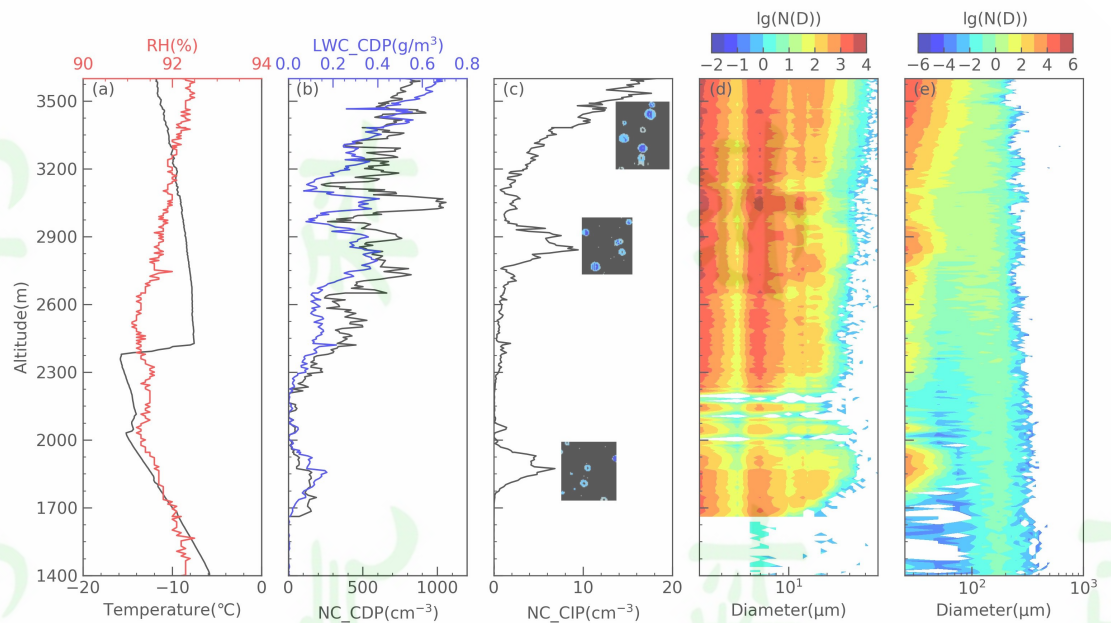


图 6 AB 时段飞机爬升时探测结果

（a. 温湿度廓线，黑色线代表温度，红色线代表湿度；b. CDP 观测到的云滴数浓度和液态水含量；c. CIP 观测到的云和降水粒子浓度；d. CDP 观测到的云滴粒子浓度图像；e. CIP 观测到的云和降水粒子浓度图像）

Fig.6 Aircraft detection results during ascent in periods A and B

（a. Temperature and humidity profiles, with black line representing temperature and red line representing humidity; b. Cloud droplet number concentration and liquid water content observed by CDP; c. Cloud and precipitation particle concentration observed by CIP; d. Image of cloud droplet particle concentration observed by CDP; e. Image of cloud and precipitation particle concentration observed by CIP)

结合 CIP 测得的云降水粒子浓度的垂直廓线可知（图 6c），云降水粒子浓度谱型呈现多峰结构，浓度随高度增加整体上呈增加趋势，最大值为 19.5cm^{-3} ，平均值约为 5.1cm^{-3} 。而 CIP 的粒子谱分布随着高度的增加（图 6e），CIP 的谱逐渐变窄，云降水粒子主要分布在 $200\mu\text{m}$ 以下，数浓度最大约为 16.4cm^{-3} 。结合 1800m、2800m 以及 3500m 的 CIP 粒子图像可以看出，飞机在垂直爬升阶段未观测到大的冰晶粒子。

在逆温层之下，CDP 和 CIP 测得的粒子浓度较小，但在逆温层之上，CDP

和 CIP 测得的粒子浓度增大趋势较为明显。由于逆温层的存在，此时大气层结较为稳定，空气对流运动减弱，不利于气溶胶等向上层扩散，导致在逆温层之上，缺少大量的大气冰核，因此不能高效启动异质核化、消耗云中的过冷液滴，从而加速了液态水的积聚。

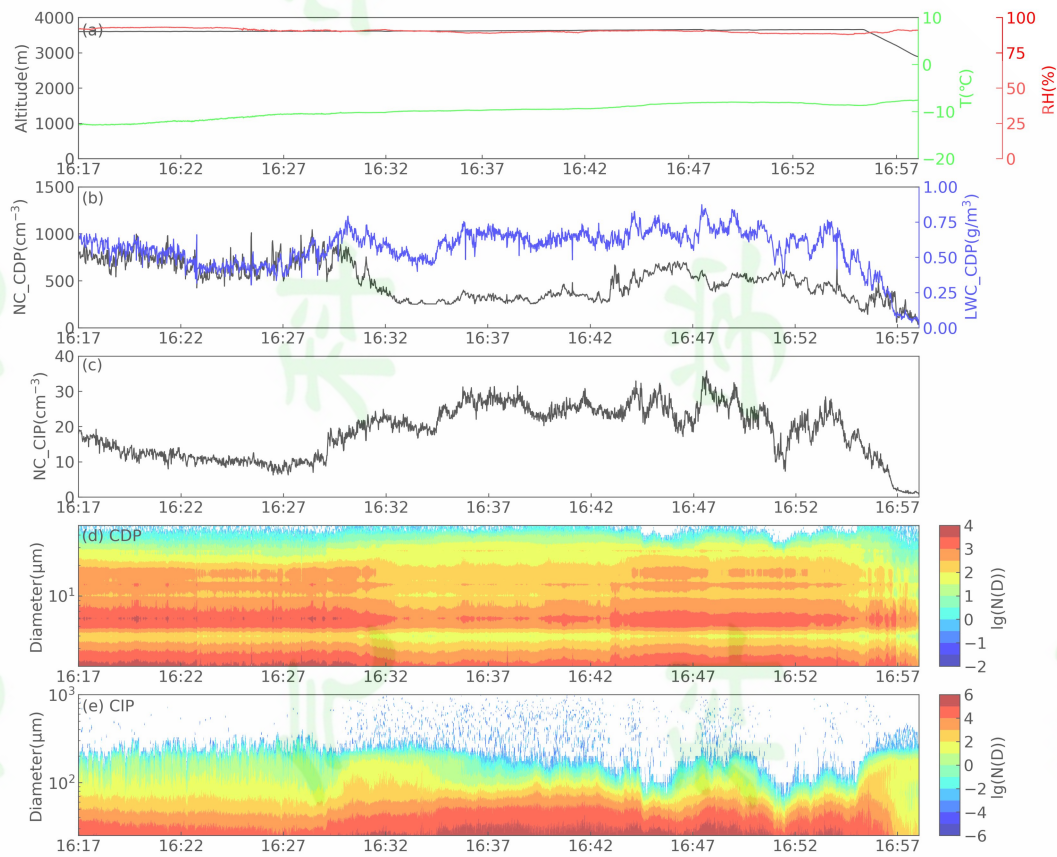


图 7 2018 年 12 月 10 日 16:17-16:57 BC 时段飞机探测结果

(a. 飞行高度、温湿度时间序列，黑色线代表飞行高度，绿色线代表温度，红色线代表湿度；b. CDP 观测到的云滴数浓度和液态水含量；c. CIP 观测到的云和降水粒子浓度；d. CDP 观测到的云滴粒子浓度图像；e. CIP 观测到的云和降水粒子浓度图像)

Fig.7 Aircraft detection results for the BC period from 16:17 to 16:57 on December 10, 2018 (a. Time series of flight altitude, temperature, and humidity; black line represents flight altitude, green line represents temperature, and red line represents humidity; b. Cloud droplet number concentration and liquid water content observed by CDP; c. Cloud and precipitation particle concentration observed by CIP; d. Image of cloud droplet particle concentration observed by CDP; e. Image of cloud and precipitation particle concentration observed by CIP)

图 7 为飞机平飞时段探测到积冰的云微物理量时间序列，此时飞机位于 3630m 的高度层（图 7a），在逆温层上方约 1300m，云中温度为-12.9~-7.6℃，平均温度为-9.8℃，相对湿度在 87.9%~93.2%，此时的气象环境非常有利于积冰的形成。

该时段云中过冷水含量较为丰富（图 7b），飞机发生了较严重的积冰。云

滴数浓度为 $36.5\sim 1043.8\text{cm}^{-3}$, 平均值为 499.9cm^{-3} , 液态水含量最大可达 0.87g/m^3 , 平均值约为 0.56g/m^3 。从 CDP 的粒子谱分布上可以看出 (图 7d), 粒子谱较宽, 但粒子主要分布在直径 $30\mu\text{m}$ 以下。在 16:30-16:53 时段, 该时段的云滴数浓度呈下降趋势, 而液态水含量呈增加趋势, 云滴数浓度与液态水含量存在负相关性, 此时云中小液滴发生了碰并增长, 消耗了大量的的小液滴, 从而导致该时段云滴数浓度降低, 但是液态水含量呈增加趋势。

从 CIP 测得的云降水粒子浓度的时间序列上来看 (图 7c), 云降水粒子整体上呈现出先减后增的变化趋势。在 16:17-16:30 时段, 粒子数浓度为 $6.3\sim 19.6\text{cm}^{-3}$, 平均值为 11.8cm^{-3} 。在 16:30-16:53 时段, 粒子数浓度为 $7.3\sim 35.8\text{cm}^{-3}$, 平均值为 23.7cm^{-3} 。结合 CIP 的粒子谱可知 (图 7e), 在前一时段, 粒子主要分布在 $200\mu\text{m}$ 以下, 且粒子谱分布相对均匀, $50\sim 200\mu\text{m}$ 的粒子平均数浓度为 $96\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。在后一时段, 粒子谱拓宽, 但粒子主要分布在 $100\mu\text{m}$ 以下, $50\sim 100\mu\text{m}$ 的粒子平均数浓度为 $453.8\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。

图 8 为飞机平飞时段探测到积冰的云微物理量时间序列, 该时段飞机主要在 2890m 和 2620m 的高度层平飞, 云中温度为 $-8.2\sim -6.8^\circ\text{C}$, 平均温度为 -7.5°C , 相对湿度在 $87\%\sim 92\%$ 。

相较于上一飞行阶段, 该时段的云微物理量明显减小。云滴数浓度和液态水含量出现多个峰值, 但整体上呈先增后减的变化趋势 (图 8b)。云滴数浓度为 $1.1\sim 521.2\text{cm}^{-3}$, 平均值为 206.5cm^{-3} , 液态水含量最大可达 0.34g/m^3 , 平均值约为 0.15g/m^3 。从 CDP 的粒子谱分布上可以看出 (图 8e), 过冷云滴主要集中在直径 $30\mu\text{m}$ 以下, $5\sim 30\mu\text{m}$ 的粒子数浓度最大为 $493.7\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。

从 CIP 测得的云降水粒子浓度的时间序列上来看 (图 8c), 云降水粒子变化趋势与 CDP 保持一致, 粒子数浓度最大为 7.6cm^{-3} , 平均值为 2.6cm^{-3} 。结合 CIP 的粒子谱可知 (图 8e), 粒子主要分布在 $200\mu\text{m}$ 以下, $50\sim 200\mu\text{m}$ 的粒子平均数浓度约为 $1.4\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 。但在 17:03-17:13 时段, $50\sim 100\mu\text{m}$ 的粒子浓度占比较大, 数浓度最大可达 $5.1\text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$, 此时对应的液态水含量较高, 云中存在直径超过 $50\mu\text{m}$ 的大过冷液滴, 导致该时段液态水含量升高。

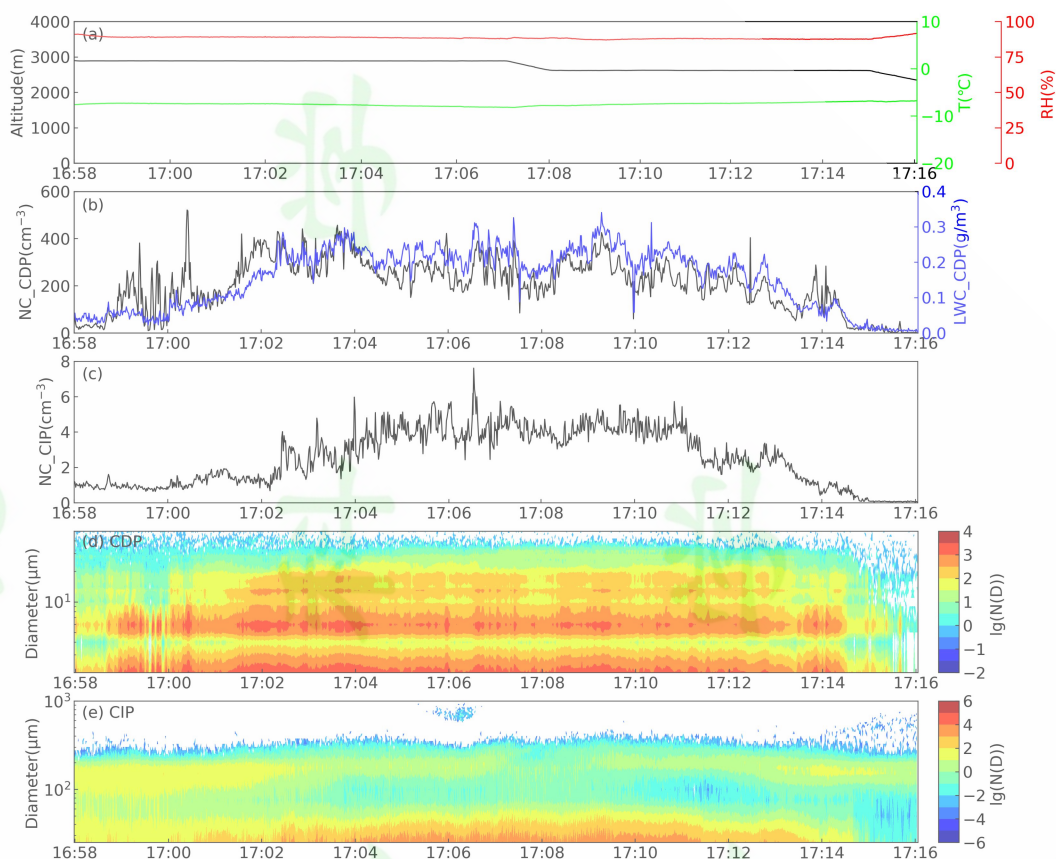


图 8 2018 年 12 月 10 日 16:58-17:16 CD 时段飞机探测结果

(a. 飞行高度、温湿度时间序列，黑色线代表飞行高度，绿色线代表温度，红色线代表湿度；b. CDP 观测到的云滴数浓度和液态水含量；c. CIP 观测到的云和降水粒子浓度；d. CDP 观测到的云滴粒子浓度图像；e. CIP 观测到的云和降水粒子浓度图像)

Fig.8 Aircraft detection results for the CD period from 16:58 to 17:16 on December 10, 2018
(a. Time series of flight altitude, temperature, and humidity; black line represents flight altitude, green line represents temperature, and red line represents humidity; b. Cloud droplet number concentration and liquid water content observed by CDP; c. Cloud and precipitation particle concentration observed by CIP; d. Image of cloud droplet particle concentration observed by CDP; e. Image of cloud and precipitation particle concentration observed by CIP)

图 9 为 AB、BC、CD 段的组合粒径分布。三个时段的 CDP 粒子谱分布均呈双峰结构，峰值位于 $4.5\sim 10\mu\text{m}$ 之间，大粒子端浓度比小粒子低 3 个数量级，说明云中以小粒子为主。AB、CD 时段的云滴谱的谱型相似，但随着粒径的增大，两段的云滴数浓度差异也随之增加。AB 段和 CD 段 CIP 粒子谱分布差异较大，CD 段粒子谱分布呈双峰结构，峰值分别位于 $175\mu\text{m}$ 、 $925\mu\text{m}$ 处，CD 段的 CIP 粒子数浓度在 $50\sim 1000\mu\text{m}$ 之间比 AB 段高一个量级，在 $1000\mu\text{m}$ 以上，两者差别不大。在发生强积冰的 BC 段，CDP 粒子谱浓度比 AB、CD 时段高一个量级，CIP 的粒子谱浓度都高于 AB 时段。但在 $175\sim 275\mu\text{m}$ 之间，CD 段的谱浓度高于 BC 段，在其他粒径分布下，BC 段谱浓度均高于 CD 段。整体上来看，BC 段浓

度最大，CD 段次之，AB 段最低。逆温层的存在，削弱垂直运动，导致积冰区域大气冰核较少，异质核化较弱，无法启动淞附过程，消耗过冷水。

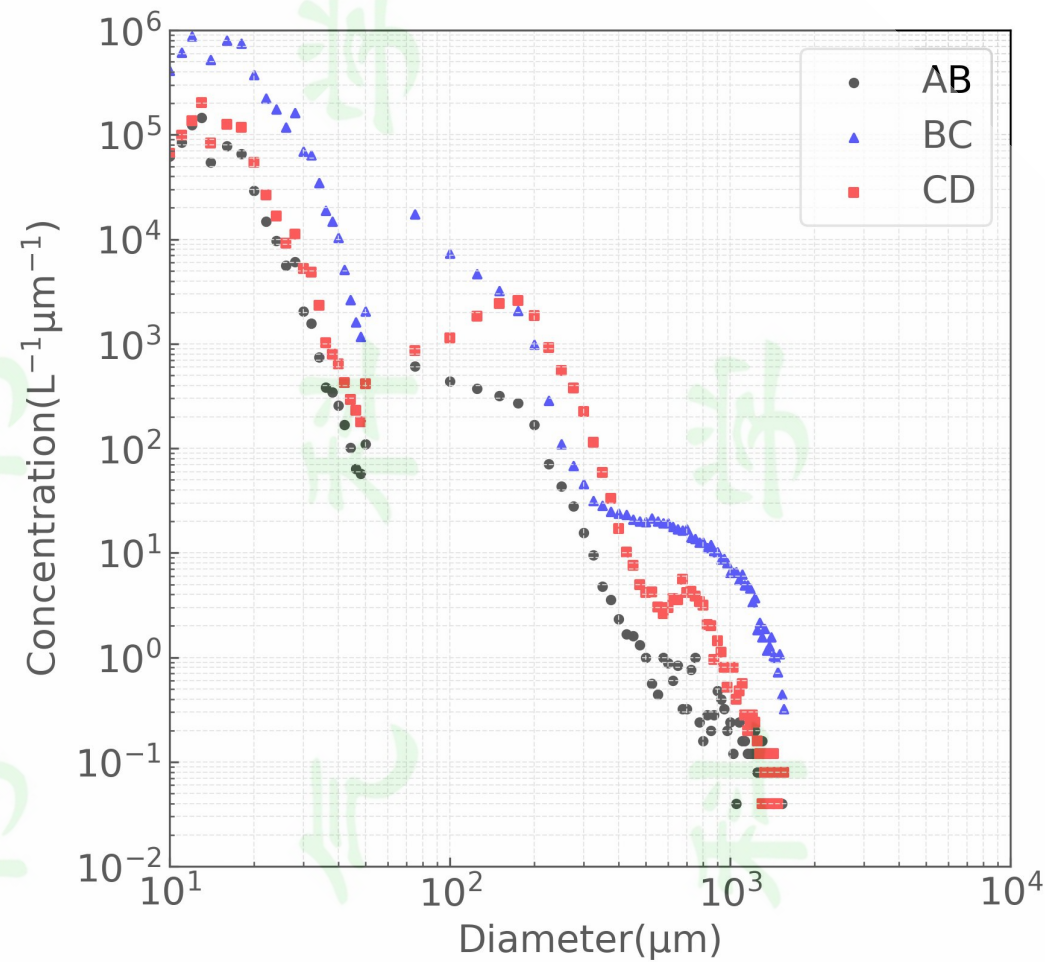


图 9 CDP、CIP 粒子组合浓度谱分布

(黑色、蓝色、红色分别代表 AB、BC、CD 时段的粒子谱浓度)

Fig. 9 CDP and CIP particle combination size distributions

(Black, blue, and red represent the particle spectrum concentration during the AB, BC, and CD periods, respectively)

5 积冰强度

为深入探讨影响积冰强度的气象因子，本研究对积冰强度、逆温层强度、垂直运动速度和水平辐合运动强度进行了分析和讨论。上世纪 40 年代国外学者提出了积冰强度的定义，目前的积冰强度被划分为微量、轻度、中度，严重 4 个等级 (Jeck, 2001)。积冰强度的定义目前还没有统一，但是大多数气象学家同意云中过冷却水滴含量、温度、云滴大小是影响积冰强度的最重要因子。为了将不同机型的积冰强度联系起来，国外学者提出用积冰速率来表述结冰强度的概念。本研究中，采用 Jeck 等 (1998, 2001) 提出的积冰强度公式：

$$L = \frac{D/t}{A} \cdot \frac{1}{TAS \cdot \beta} \quad (3)$$

式中，L 表示液态水含量，单位为 g/m^3 ，D 为 0.635 cm ，t 为时间， β 为水滴收集效率，TAS 为真空速，单位为 km/h ，A 为比例经验常数。本文依据 MA60 飞机飞行动态确定并假设飞机攻角为 0 ，真空速为 382.3 km/h ，经验常数 A 为 0.00118 ，收集效率 β 为 0.48 ，当 t 取取为 5 、 15 、 60 min 时，用上述经验公式计算轻度、中度、严重积冰时的液态水含量阈值(图 10)分别为 0.05 g/m^3 、 0.20 g/m^3 、 0.58 g/m^3 。

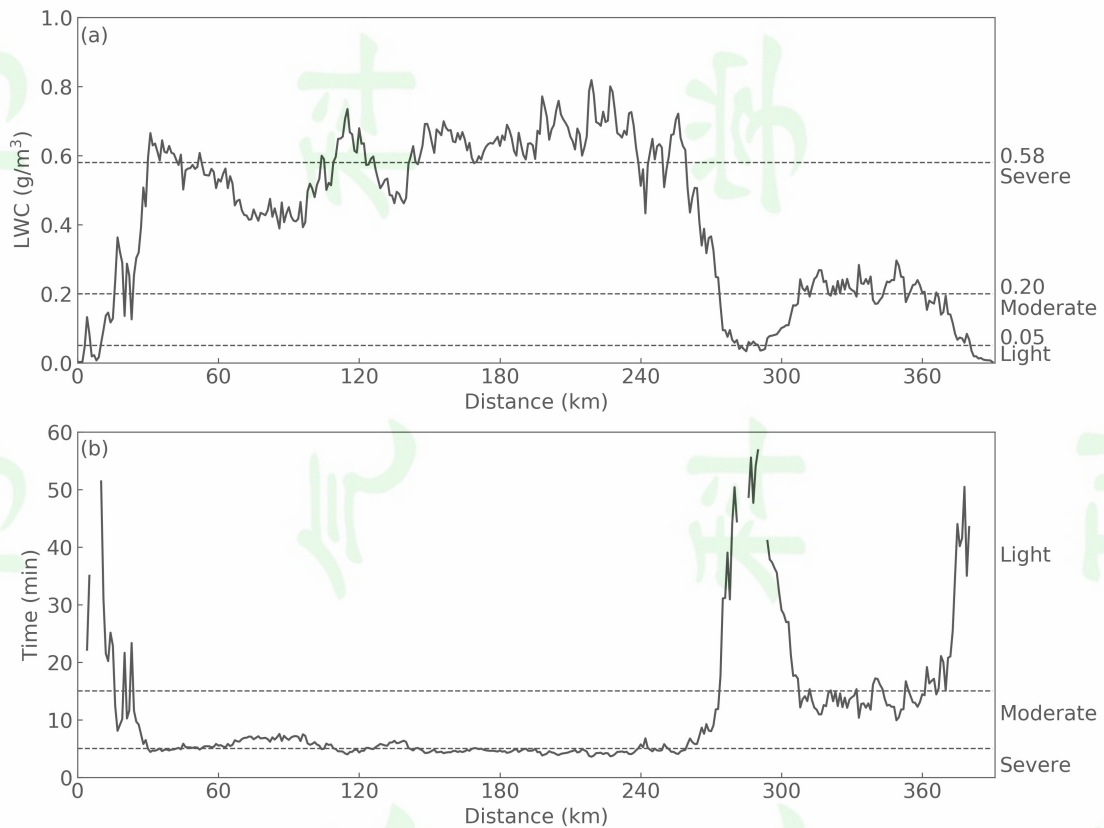


图 10 液态水含量随暴露距离的变化

(a. CDP 实测的液态水含量；b. 积冰速率；黑色虚线分别代表轻度、中度、严重积冰时的液态水含量阈值)

Fig. 10 Liquid water content varies with exposure distance

(The black dashed lines represent the liquid water content thresholds for light, moderate and severe icing respectively)

选取积冰时段 16:11-17:16 CDP 探头计算的液态水含量，将其进行 10s 平均处理，利用经验公式计算出累积 0.635 cm 厚度的积冰所需时间，结果如图 10 所示。发生积冰的概率达 94%，其中，轻度积冰概率为 17%，中度积冰的概率为 43%，严重积冰的概率达 34%。从统计结果看出，该时段飞机积冰较为严重，中

度积冰以上的概率达到 77%，与本次观测相符。在利用经验公式计算时，采用的水滴收集效率以及飞机的真空速等采用的是固定的常数值，实际飞行中，收集效率和真空速可能更大，飞机积冰情况更严重。

气象上把温度不随高度变化的大气层称为等温层，而把温度随高度的升高而增高的大气层称为逆温层。从热力学的角度看，无论是等温层还是逆温层都表示大气层结是稳定的，它们会阻碍下方垂直运动的发展（郑庆锋等，2011）。逆温强度定义为逆温层内每升高 100hPa 温度的逆增值（°C/100hPa），用 I 表示：

$$I = \frac{dT}{dhPa} \quad (4)$$

其中， T 代表逆温层顶部与底部的温度差（°C）， hPa 代表逆温层顶部与底部的压强差（hPa）。本文选取了积冰区域（33.25°N~34.25°N，113.75°E~114.5°E）600-700hPa 高度上的 ERA5 温度资料计算逆温层强度，该区域压强差为 100hPa，温度差为 1.9°C。因此，积冰区域内的逆温层强度为 1.9°C/100hPa。

水汽通量散度指单位时间汇入单位体积或从该体积辐散出去的水汽量，由风和湿度资料可以计算出任一地点的水汽通量散度，整层的水汽通量可表示为（文宝安，1980）：

$$\int \nabla \cdot \left(\frac{Vq}{g} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{uq}{g} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{vq}{g} \right) \quad (5)$$

其中， g 为重力加速度， q 为比湿， V 为风速， u 、 v 分别为水平、垂直方向的风速分量。本文利用 ERA5 再分析资料计算积冰区域内（33.25°N~34.25°N，113.75°E~114.5°E）整层的水汽通量为 -3.73kg/(m²s)，该区域存在水平辐合。

本研究的个例中，在逆温层强度为 1.9°C/100hPa、垂直运动速度在 -0.25~0.2Pa/s、水平辐合强度为 -3.73kg/(m²s) 的情况下，飞机发生了严重积冰，积冰强度为中度以上的概率为 77%。

6 结论

飞机积冰气象条件和微物理特征的研究，对人工影响天气飞机飞行安全保障和飞机适航验证等方面具有重要意义。本文利用机载探测资料、ERA5 再分析资料以及地面雷达组网资料，对一次严重积冰过程的气象条件以及云微物理结构特征进行了深入分析，并给出不同积冰强度对应的宏微观气象因子特征值。

- （1）本次积冰过程是受高空槽、低层切变以及地面冷高压的共同作用，流向河南的低层暖湿空气沿着冷高压爬升，且存在逆温层，促进了液态水的积聚，气象条件利于积冰的形成。
- （2）飞机观测数据与 ERA5 再分析资料结果较为一致，强积冰区主要在 3630m 高度层上，液态水含量最大可达 0.87g/m³，该区域内大小过冷液滴共存，

基本无冰晶粒子，大量小液滴发生碰并过程，促进了液态水的积聚。

- (3) 飞机积冰强度不仅与液态水含量、温度等因素有关，还与逆温层强度、水平辐合强度以及大气垂直速度有关。在积冰区域内，逆温层强度为 $1.9^{\circ}\text{C}/100\text{hPa}$ 、垂直运动速度在 $-0.25\sim 0.2\text{Pa/s}$ 、水平辐合强度为 $-3.73\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ 的情况下，积冰强度达到中度以上的概率为 77%。
- (4) 大气中的逆温层会削弱垂直运动，导致积冰区域大气冰核较少，异质核化减弱，淞附过程较弱，因此飞行区域的液态水含量较大，极易发生飞机积冰。

需要指出的是，本研究只对河南地区一次积冰个例进行分析，总结了严重积冰下的积冰强度、逆温层强度、大气垂直速度以及水平辐合强度，单个个例不具有普适性，但本文成果可为后续研究宏微观气象条件阈值与积冰强度提供参考。未来需积累飞机积冰个例进行分析和总结，深入系统研究宏观气象条件阈值与积冰强度之间的关系，更好地进行积冰条件判断，为更好保障飞机飞行安全提供科学依据。

参考文献

- Bain M, Jean-François Gayet. 2010. Aircraft measurements of icing in supercooled and water droplet/ice crystal clouds [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 21(5): 631–641.
- Bellucci M, Vernillo P, Auletta A, et al. 2007. SONACA Icing Test Campaign on a 2D model at CIRA IWT [M]. Routledge.
- Bernstein B C, Bot C L. 2009. An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part II: Europe, Asia, and the Globe [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8):1503–1526.
- Bernstein B C, Omeron T A, Politovich M K, et al. 1998. Surface weather features associated with freezing precipitation and severe in-flight aircraft icing [J]. *Atmospheric Research*, 46(1–2): 57–73.
- Bernstein B C, Wolff C A, McDonough F. 2007. An inferred climatology of icing conditions aloft, including supercooled large drops. Part I: Canada and the continental United States [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(11):1857–1878.
- 蔡兆鑫, 蔡淼, 李培仁, 等. 2019. 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 [J]. *大气科学*, 43(6): 1191–1203. Cai Zhaoxin, Cai Miao, Li Peiren, et al. 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43(6): 1191–1203.

- Cober S G, Isaac G, Strapp J W. 1995. Aircraft icing measurements in east coast winter storms [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(1): 88–100.
- 陈跃, 马培民, 游光来. 1989. 飞机积冰环境下的液态水含量及滴谱个例分析 [J]. *气象*(4期): 24–28. Chen Yao, Ma Peimin, You Laiguang. 1989. A case study of droplet spectra and liquid water content measurements in aircraft icing environments [J]. *Meteorological Monthly*, 15(4): 24–28.
- 迟竹萍. 2007. 飞机空中积冰的气象条件分析及数值预报试验 [J]. *气象科技*, 35(5): 6. Chi Zhuping. 2007. Statistical analysis and numerical prediction experiment of weather conditions for aircraft icing [J]. *Meteorological Science and Technology*, 35(5): 6.
- Hauf, T, Schröder, F. 2006. Aircraft icing research flights in embedded convection. *Meteorology and Atmospheric Physics* [J], 91, 247–265.
- Isaac G A, Cober S G, Strapp J W, et al. 2001. Recent Canadian research on aircraft in-flight icing [J]. *Canadian Aeronautics & Space Journal*.
- Jeck R K, A Workable. 1998. Aircraft-specific icing severity scheme-36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (AIAA) [J].
- Jeck R K. 2001. A history and interpretation of aircraft icing intensity definitions and FAA Rules for operating in icing conditions [J]. *Flight Control Systems*.
- 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]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(6): 1683–1706.
- 李军霞, 李培仁, 陶玥, 等. 2014. 山西春季层状云系数值模拟及与飞机探测对比 [J]. *应用气象学报*, 25(1): 22–32. Li Junxia, Li Penren, Tao Yue, et al. Numerical simulation and flight observation of stratiform precipitation clouds in spring of Shanxi Province [J]. *Journal of Applied Meteorology Science*, 25(1): 22–32.
- 李子良. 1999. 飞机积冰的气象条件分析 [J]. *四川气象*, 19(3): 55–57. Li Ziliang. 1999. Analysis of meteorological conditions related to aircraft icing [J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 19(3): 55–57.
- 刘开宇, 张云瑾, 龚娅. 2008. 一次飞机积冰气象条件的诊断分析 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, (S1): 330–332. Liu Kaiyu, Zhang Yunjin, Gong Ya. 2008. Diagnosis on meteorologic factor for an aircraft icing [J]. *Journal of Yunnan University*, 30(S1): 330–332.
- 刘烈霜, 金山, 刘开宇. 2013. 用 AMDAR 资料分析两次强飞机积冰过程 [J]. *气象科技*, 41(4): 7. Liu Lieshuang, Jin Shan, Liu Kaiyu. 2013. Diagnostic analysis of two severe aircraft icing events using AMDAR data [J]. *Meteorological Science and Technology*, 41(4): 764–770.
- Politovich M K, Berstein T A O. 2002. Aircraft icing conditions in Northeast Colorado [J]. *Journal*

of Applied Meteorology, 41(2): 118–132.

彭冲, 宋灿, 蔡淼. 2022. 河南一次罕见飞机积冰过程云系宏微观特性的综合观测 [J]. 大气科学, 47(X): 1–13. Peng Chong, Song Can, Cai Miao. 2022. Comprehensive observation of the cloud macro- and microstructures of a rare aircraft icing case in Henan Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(X): 1–13.

亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 2019. 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 [J]. 大气科学, 43(6): 1365–1384. Qi Peng, Guo Xueliang, Lu Guangxian, et al. 2019. Aircraft measurements of a stable stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang mountain of north china: Characteristics of embedded convection and melting layer structure [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1365–1384.

Rasmussen R, Politovich, et al. 1992. Winter Icing and Storms Project (WISP) [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 73(7): 951–974.

Sand W R, Cooper W A, Politovich M K, Veal D L. 1984. Icing conditions encountered by a research aircraft [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(10): 1427–1440.

Schack C J, Christe K O. 1980. Forecasters' Guide on Aircraft Icing [J]. Air Weather Service Rep, AWS/TR-80/001, 1–58.

申红喜, 李秀连, 张荣德, 等. 2005. 民航太原机场"04.12.21"飞机积冰天气过程数值特征分析[C]//中国气象学会 2005 年年会. Shen Hongxi, Li Xiulian, Zhang Rongde, et al. 2005. Analysis of numerical characteristics of aircraft icing weather process at Taiyuan Airport of civil aviation "04.12.21" [C]// 2005 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society.

Stankov B B, Westwater E R, Snider J B, et al. 1990. Remote Sensor Observations during WISP90: The Use of Microwave Radiometers, RASS, and Ceilometers for Detection of Aircraft Icing Conditions [R]. NOAA technical memorandum ERL WPL.

孙晶, 蔡淼, 王飞, 等. 2019. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析 [J]. 气象, 45(10): 1341–1351. Sun Jing, Cai Miao, Wang Fei, et al. A case study of aircraft icing conditions in Anqing area [J]. Meteorological Monthly, 2019, 45 (10): 1341–1351 (in Chinese).

孙晶, 李想. 2020. 飞机积冰气象条件研究进展 [J]. 气象科技, 48(4): 9. Sun Jing, Li Xiang. 2020. Advances in researches on meteorological conditions related to aircraft icing [J]. Meteorological Science and Technology, 48(4): 9.

孙艳辉, 张波, 刘伟, 等. 2023. 高空冷涡背景下飞机积冰特征和机制的探测研究 [J]. 气象, 49(8): 972–984. Sun Yanhui, Zhang Bo, Liu Wei, et al. 2023. Study on the characteristics and mechanism of aircraft ice accumulation under the background of upper-air cold vortex [J]. Meteorological Monthly, 49(8): 972–984 (in Chinese).

- 王钦, 吴俊杰. 2018. 四川盆地低空飞行飞机积冰的气象条件分析 [J]. 气象科技, 46(4): 799-808. Wang Qin, Wu Junjie. 2018. Analysis of weather conditions for aircraft icing in Low-Level flight in Sichuan Basin [J]. Meteorological Science and Technology, 46(4): 799-808.
- 王秀春, 顾莹, 李程. 2014. 航空气象 [M]. 北京: 清华大学出版社. Wang Xiuchun, Gu Ying, Li Cheng. 2014. Aeronautical meteorology [M]. Beijing: Tsinghua University Press.
- 王泽林, 周旭, 吴俊辉, 等. 2022. 一次飞机严重积冰的天气条件和云微物理特征. 应用气象学报, 33(5): 555-567. Wang Zelin, Zhou Xu, Wu Junhui, et al. 2022. Weather conditions and cloud microphysical characteristics of an aircraft severe icing process [J]. Journal of Applied Meteorology Science, 33(5): 555-567.
- 文宝安. 1980. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽通量与水汽通量散度 [J]. 气象, (06): 36-38. Wen Baoan. 1980. The calculation of physical quantities and its application in rainstorm analysis and forecast--water vapor flux and water vapor flux divergence [J]. Meteorological Monthly, (06): 36-38 (in Chinese).
- 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等. 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究 [J]. 大气科学, 45(1): 88-106. Yang Jiefan, Hu Xiangfeng, Lei Hengchi, et al. 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang Mountains [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(1): 88-106.
- 游来光, 吴兑. 2010. 中国北方五省(区)飞机探测云物理资料: 1980~1982 [M]. 气象出版社. You laiGuang, Wu Dui. 2010. Physical information on cloud detection by airplanes in five provinces (districts) in northern China: 1980~1982 [M]. Meteorological Press.
- 袁敏, 黄敏松, 段炼. 2018. 一次飞机积冰环境中的云微物理特征 [J]. 气象科技, 46(1): 170-177. Yuan Min, Huang Minsong, Duan Lian. 2018. A case study of microphysical properties in aircraft icing environment [J]. Meteorological Science and Technology, 46(1): 170-177.
- 张佃国, 王烁, 郭学良, 等. 2020. 基于机载 Ka 波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征 [J]. 大气科学, 44(5): 1023-1038. Zhang Dianguo, Wang Shuo, Guo Xueliang, et al. 2020. The properties of convective generating cells embedded in the stratiform cloud on basis of airborne Ka-band Precipitation cloud radar and droplet measurement technologies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1023-1038.
- 张荣, 李宏宇, 周旭, 等. 2021. DMT 机载云粒子图像形状识别及其应用 [J]. 应用气象学报, 32(6): 735-747. Zhang Rong, Li Hongyu, Zhou Xu, et al. 2021. Shape recognition of DMT airborne cloud particle images and its application [J]. Journal of Applied Meteorology Science, 2021, 32(6): 735-747.

张宇飞. 2013. 浅析飞机积冰与航空安全[J]. 科技风, (14): 2. Zhang Yufei. 2013. Analysis of aircraft icing and aviation safety [J]. Science and Technology Wind, (14): 2.

赵树海. 1994. 航空气象学 [M]. 气象出版社. Zhao Shuhai. 1994. Aeronautical meteorology [M]. China Meteorological Press.

郑庆锋, 史军. 2011. 上海地区大气贴地逆温的气候特征 [J]. 干旱气象, 29(2): 7. Zheng Qingfeng, Shi Jun. 2011. Temperature inversion characteristics of lower atmosphere over Shanghai [J]. Journal of Arid Meteorology, 29(2): 7.

Zuo D F, et al. 2023. Liquid water determination by airborne millimeter cloud radar and in-situ size distribution measurements [J]. Atmospheric Research, 284, 106607.