王梧熠，侯劭禹，黄兆楚，等，2026. 河北省低槽冷锋云系中逆温层对飞机积冰微物理环境的调控机制[J].高原气象，45(5)：1393−1405. Wang Wuyi，Hou Shaoyu，Huang Zhaochu，et al.，2026. Regulatory mechanism of the inversion layer on the microphysical environment of aircraft icing within trough-cold front cloud systems in Hebei Province[J].Plateau Meteorology，45(5)：1393−1405. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2026. 00018. CSTR：32265. 14. gyqx. CN62−1061/P. 2026. 00018.

河北省低槽冷锋云系中逆温层对飞机积冰微物理环境的调控机制

王梧熠[1,2,3,4]，侯劭禹[3,4]，黄兆楚[3,4]，胡向峰[3,4]，彭 敏[3,4]，麦 榕[3,4]，吕 峰[3,4]，崔 毅[3,4]，吕 鑫[3,4]，李晓龙[5]

（1. 中国气象局吉林云物理野外科学试验基地，吉林 长春 130062；
2. 吉林省东北区域人工影响天气重点实验室，吉林 长春 130062；
3. 河北省人工影响天气中心，河北 石家庄 050021；
4. 中国气象局太行山-燕山暴雨野外科学试验基地，河北 邢台 054000；
5. 石家庄市气象局，河北 石家庄 050081）

摘要：利用2021年2月28日机载探测资料，结合MODIS卫星资料、地面雷达资料和NCEP FNL再分析资料，分析了河北省中南部飞机积冰的云微物理特征。结果表明：此次积冰天气是受到低槽冷锋、低空急流、地面倒槽共同影响的结果。垂直探测结果显示云系整体为3层结构特征，低层为冷暖混合云，且过冷水含量较高，中高层为冷云。5900~6100 m出现的逆温层促进了过冷水积聚，其底部过冷水出现极大值(0. 18 g·m^{-3})，同时逆温层显著抑制垂直对流混合，形成典型的“水多冰少”的微物理环境，飞机在此经历最严重的积冰。利用MODIS反演的云顶温度、云光学厚度、云有效粒子半径以及液态水路径，通过积冰概率算法得出的积冰概率分布与飞机实际观测结果高度吻合。研究结果揭示了逆温层热力结构对过冷水分布的关键调控作用，为华北地区飞机积冰预警提供了参考依据。

关键词：飞机观测；飞机积冰；MODIS；积冰概率

文章编号：1000−0534(2026)05−1393−13 **中图分类号**：P412. 24 **文献标识码**：A

DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2026. 00018

CSTR: 32265. 14. gyqx. CN62−1061/P. 2026. 00018

1 引言

人工影响天气作业飞机时常需要在复杂气象条件下开展增雨(雪)作业。飞机积冰危及飞行安全，不仅会破坏机翼气动特性，造成飞机动力衰减，降低飞行稳定性，严重时甚至导致坠机事故。因此，对飞机积冰的机理、影响因素进行深入研究，对于提高飞行安全性、保障人民生命财产安全具有重要意义(王泽林等，2025；孙晶和李想，2020)。

冷锋抬升和较低的冰晶核数浓度是飞机积冰事故形成的关键微物理机制。暖湿气流沿冷锋锋面爬升，在中高空形成含有大量过冷水滴的层状云，同时由于锋面逆温层增强了大气稳定度，使得过冷水滴滞留在低温区域，营造了飞机积冰的环境。美国空军研究指出，观测到的大部分(约85%)飞机积冰发生在锋区附近，暖锋与最大水平尺度的积冰有关，冷锋与最大强度积冰有关(Schack and Christe，1980)。中国西南和西北部，主要由冷锋、

收稿日期：2025-07-04；**定稿日期**：2026-01-27

资助项目：中国气象局吉林云物理野外科学试验基地/吉林省东北区域人工影响天气重点实验室创新基金(Q202503)；河北省科技厅面上项目(D2024304015)；河北省气象局科研开发项目(23zc10，23ky08)；国家重点研发计划项目(2017YFB0504000)；云南省科学技术厅重点研发计划项目(202403AC100012)；内蒙古自治区科技创新重大示范项目(2025ZDSF0009)

作者简介：王梧熠(1991−)，男，河北邯郸人，工程师，主要从事人工增雨及大气探测研究. E-mail：1520641182@qq. com

通信作者：侯劭禹(1995−)，男，山西晋城人，工程师，主要从事人工增雨及大气探测研究. E-mail：shaoyu_hou@163. com

© Editorial Department of *Plateau Meteorology* (CC BY-NC-ND)

高空槽和切变线导致飞机积冰(李子良，1999；庞朝云和张逸轩，2008)。华北地区的地面高压与河套地区高空槽产生的回流与倒槽现象(刘开宇等，2005)，以及山东地区的低压倒槽、冷锋和南方气旋是导致积冰现象发生的主要因素(迟竹萍，2007)。低冰晶核数浓度同样是维持积冰环境的必要条件之一。Jurkat et al.(2023)研究发现，云中冰晶核浓度低时，液态水滴难以冻结成冰晶，通过碰并凝结可增长到更大尺寸，强调了云中液水含量、滴谱及冰相过程对积冰形成的控制作用。此外，过冷水滴的大小也是影响积冰程度的重要因素之一，如果液滴尺寸过小，撞击机翼时会迅速凝结成乳白色的雾冰，而较大的过冷水滴(半径>25 μm)则可能形成透明的冰层，后者密度大且附着更牢，对航空器危害更大。

国内外学者在积冰探测技术研究领域已取得相关研究成果。北美多家研究机构通过开展大量飞机观测试验，构建了飞机积冰气象数据库(Rasmussen et al.，1992；Cober et al.，1995；Miller et al.，1998；Isaac et al.，2001，2005)。Bernstein et al.(2021)对北美五大湖地区小水滴和过冷大水滴进行了细致研究。Minnis et al.(2004a)依托美国国家航空航天局(NASA)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和美国联邦航空管理局(FAA)联合开发的综合性飞机积冰计划，利用卫星资料和飞机积冰统计资料，研发了一套基于实时检测积冰条件的物理原型方法，并开发了飞机积冰概率算法。王泽林等(2022)利用加装机载探测设备的King-air 350飞机观测资料，分析了山西蒲县地区的一次飞机严重积冰的天气条件和云微物理特征。樊明月等(2016)建立了空中积冰观测记录规范，分析了增雨飞机积冰类型和积冰强度。孙晶等(2019)在安徽安庆地区开展了飞机观测，分析了云系特征和积冰产生条件。彭冲等(2023)分析了河南省有史以来飞机观测到的最强积冰现象。孙玉稳等(2019)分析了2017年太行山东麓一次低槽冷锋降水云系的云物理结构和作业条件。封秋娟等(2023)研究了2019年11月29日山西回流倒槽降雪观测个例的云微物理结构和冰粒子增长的演变特征。彭启洋等(2025)对云南航空安全风险等级评价开展了研究。吴宝军等(2025)对影响云南航空安全的4类气象要素进行了深入分析。

上述研究主要是从产生积冰的天气系统和云宏微物理条件方面开展分析。当前，我国专门针对飞机积冰环境开展的探测试验仍显不足(孙晶和李想，2020)。河北地区低槽冷锋天气系统的云宏微观结构特征和积冰形成条件具有明显地域特征，通过机载探测设备和卫星等手段研究该云系不同发展阶段结构特征和积冰形成条件是提高增雨飞机作业安全能力的重要保障。本文利用2021年2月28日机载探测资料，结合MODIS卫星反演云产品及NCEP FNL再分析资料，分析积冰形成的天气形势、云系宏微观特征，并用积冰概率算法进行对比验证。

2 资料来源与方法介绍

2.1 资料来源

本文所分析的天气背景资料来自美国国家环境预报中心(NCEP)的空间分辨率为1°×1°的逐6 h FNL全球格点再分析资料(https：//rda. ucar. edu/datasets/ds083. 2/)。卫星资料为MODIS卫星的二级云产品数据(https：//search. earthdata. nasa. gov/search？q=MOD06_L2)。机载观测资料由搭载多种云微物理测量探头的King-air 350高性能飞机获取。设备详细参数见表1。文中均采用北京时。

本文采用经锐化处理的CIP，有效降低粒子撞击探头尖端引起的二次破碎、飞溅现象，从而提升机载观测数据准确性(Korolev et al.，2013)。数据质量控制参考刘伟等(2021)、杨洁帆等(2021)的机载探测资料处理方法，将CDP测量的粒子浓度超过有效测量范围(0~2000 cm^{-3})的异常大值数据作为无效数据剔除。考虑CIP探头的景深效应，直径小于100 μm的粒子测量结果存在不确定性(Korolev，2007)，因此选取直径大于100 μm的粒子来分析CIP观测的冰晶浓度。

2.2 有效粒子直径

有效粒子直径(Effective Particle Diameter，ED)综合考虑了粒子的尺寸分布和浓度，用于衡量云滴和冰晶的平均尺寸，较大的ED值通常意味着存在过冷大液滴，更容易导致飞机产生严重的积冰，本文采用ED来表征CDP与CIP的有效尺寸，计算公式如下：

$$ED = \frac{\int D_i^3 n_i(D_i)\mathrm{d}D_i}{\int D_i^2 n_i(D_i)\mathrm{d}D_i} \tag{1}$$

式中：D_i为不同尺度档的直径(单位：μm；i的取值为机载设备分档通道编号)；$n_i(D_i)$为不同通道的粒子数浓度谱(单位：$cm^{-3}\cdot\mu m^{-1}$)，$\mathrm{d}D_i$为对应档宽(单位：μm)。

文中N代表粒子数浓度，CDP探头测得的云滴

表 1　机载云微物理探测系统及主要参数

Table 1　Airborne cloud microphysics detection system and main parameters

探头名称	厂家	测量范围	分辨率	用途
云滴谱探头（Cloud Droplet Probe，CDP）	美国DMT公司	30 通道，2~50 μm	2 μm	测量云滴粒子数浓度、粒子谱
二维云粒子图像探头（Cloud Imaging Probe，CIP）	美国DMT公司	62 通道，25~1550 μm	25 μm	测量冰雪晶粒子数浓度、粒子谱及粒子二维图像
二维立体云粒子图像探头（Two Dimensional，Stereo Particle Imaging Probe，2DS）	美国SPEC公司	10~1280 μm	10 μm	测量大云滴、冰雪晶粒子数浓度、粒子谱及粒子二维图像
云粒子图像探头（Cloud Particle Imager probe，CPI）	美国SPEC公司	2. 3~2000 μm	2. 3 μm	取得云滴、冰雪晶、雨滴图像
高体积降雨分光仪（High Volume Precipitation Spectrometer，HVPS）	美国SPEC公司	150~19200 μm	150 μm	取得降水粒子谱和粒子二维图像
综合气象要素探头（Aircraft Integrated Meteorological Measurement System，AIMMS−20）	加拿大Aventech公司	温度：−50~50 ℃；垂直气流速度：0~50 m·s^{-1}；海拔：0~13. 7 km	温度：0. 3 ℃；速度：0. 75 m·s^{-1}；海拔：18. 3 m	获取空速、高度、攻角、侧滑角、GPS等飞机飞行参数和气压、温度、相对湿度等大气环境参数

数浓度（单位：cm^{-3}）和CIP探头测得的冰晶粒子数浓度（单位：L^{-1}）对应的粒子数浓度谱dN/dD的单位分别为cm^{-3}·μm^{-1}和L^{-1}·μm^{-1}。

2. 3　积冰概率计算方法

飞机积冰的产生通常与云顶温度T_{top}、云光学厚度τ、云液水路径（LWP）和云有效粒子半径re等云参数有关。本文参考了Minnis et al.（2004a）提出的积冰概率算法，该算法基于实时检测积冰条件的物理原型方法（详见网址：http：//www-pm. larc. nasa. gov/icing/icing. html），尽管已在美国飞机积冰监测预警业务中得到应用验证（Black et al.，2008；Bernstein et al.，2006；Smith et al.，2012；Smith，2014），但仍存在若干不确定性和局限性，包括：积冰阈值精度有限、积冰强度分级标准客观性不足以及夜间反演的适用性受限等。针对上述问题，Minnis et al.（2004b）通过构建地面观测数据集并结合探空资料和卫星数据调整了算法，主要基于白天的观测数据开发，其在夜间缺乏可见光数据条件下的适用性尚未得到验证。

积冰产生的概率IP用分段函数表示，如下：

$$IP=\begin{cases}0, & T_{top}>0\ ℃或LWP<40\ g\cdot m^{-2}或\tau<5\\ 0.147\ln(LWP)-0.084, & 0\ μm<re\leqslant 5\ μm\\ 0.138\ln(LWP)-0.024, & re\geqslant 16\ μm\\ IP(re=5)+\dfrac{re-re_{min}}{re_{max}-re_{min}}\left[IP(re=16)-IP(re=5)\right], & 5\ μm<re<16\ μm\end{cases}\tag{2}$$

式中：IP表示积冰概率（单位：%）；T_{top}为云顶温度（单位：℃）；LWP为云液水路径（单位：g·m^{-2}）；τ为云光学厚度，无量纲；re表示云有效粒子半径（单位：μm）；IP（re=5）和IP（re=16）分别代表re为5 μm和16 μm时的积冰概率；re_{min}取值为5 μm；re_{max}取值为16 μm。飞行过程中遇到暖云或云层过薄时基本不产生积冰，因此当T_{top}>0 ℃或LWP<40 g·m^{-2}或τ<5时，IP为0；在中等粒子尺度区间（5 μm<re<16 μm），积冰概率与粒子半径re为线性关系，通过线性插值获得此区间内的积冰概率IP。

为验证Minnis et al.（2004a）提出的积冰概率算法及中等粒子尺度区间线性插值方法的稳定性，本文进行了敏感性分析，结果如图1所示。通过设定re在2~32 μm范围内的不同边界条件进行测试。从图1可以看出，将re=5 μm和re=16 μm做为线性插值边界条件，并以re=8 μm进行验证，发现IP与LWP之间变化关系稳定，证明云有效粒子半径等参数变化对该算法扰动较小，该算法具有较好鲁棒性。

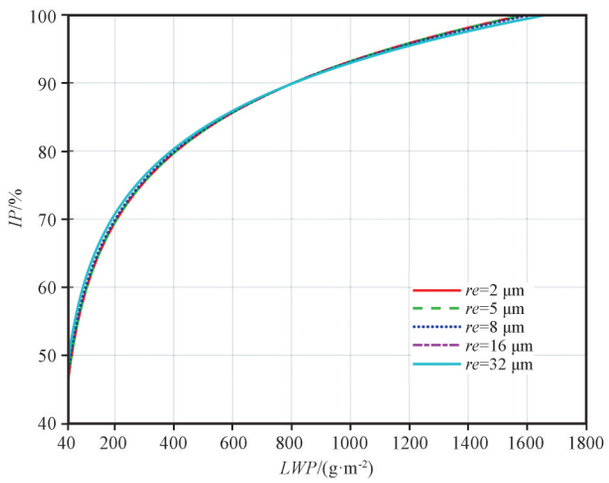


图1 不同*re*边界条件下*LWP*与*IP*的关系

Fig. 1 The relationship between *LWP* and *IP* under different *re* boundary conditions

3 天气形势与积冰潜势分析

3.1 天气形势

2021年2月28日受低槽冷锋、切变线、低空急流、地面倒槽等多尺度天气系统的共同影响，河北中南部地区出现小到中雨天气过程，其间500 hPa环流场上[图2(a)]，青藏高原东部为宽广的槽区，河北省位于高空槽前，温度场落后于高度场，有西南暖湿气流向河北中南部地区输送；700 hPa环流场上[图2(b)]，河北省位于高原涡前部的西南气流北侧，该气流在过境河北省时形成低空急流(风速>12 m·s^{-1})，有利于大量的水汽和不稳定能量从低纬向高纬地区输送；850 hPa环流场上河北南部形成风向切变[图2(c)]，切变线南侧维持较强的西南气流，切变线北侧的冷空气在高空槽的引导下向南入侵。从温度场上看，0 ℃等值线位于河北省南部，等温线密集，表明存在显著锋区；此外在回流和地面倒槽冷暖空气共同影响下，迫使暖湿空气抬升，形成强烈的上升运动，导致长时间持续降水。河北省南部的*T*-ln*P*图[图2(d)]揭示了典型的冷锋前结构特征：高层主导气流为西北气流，中低层则以西南暖湿气流为主，垂直方向上不同的温度平流有利

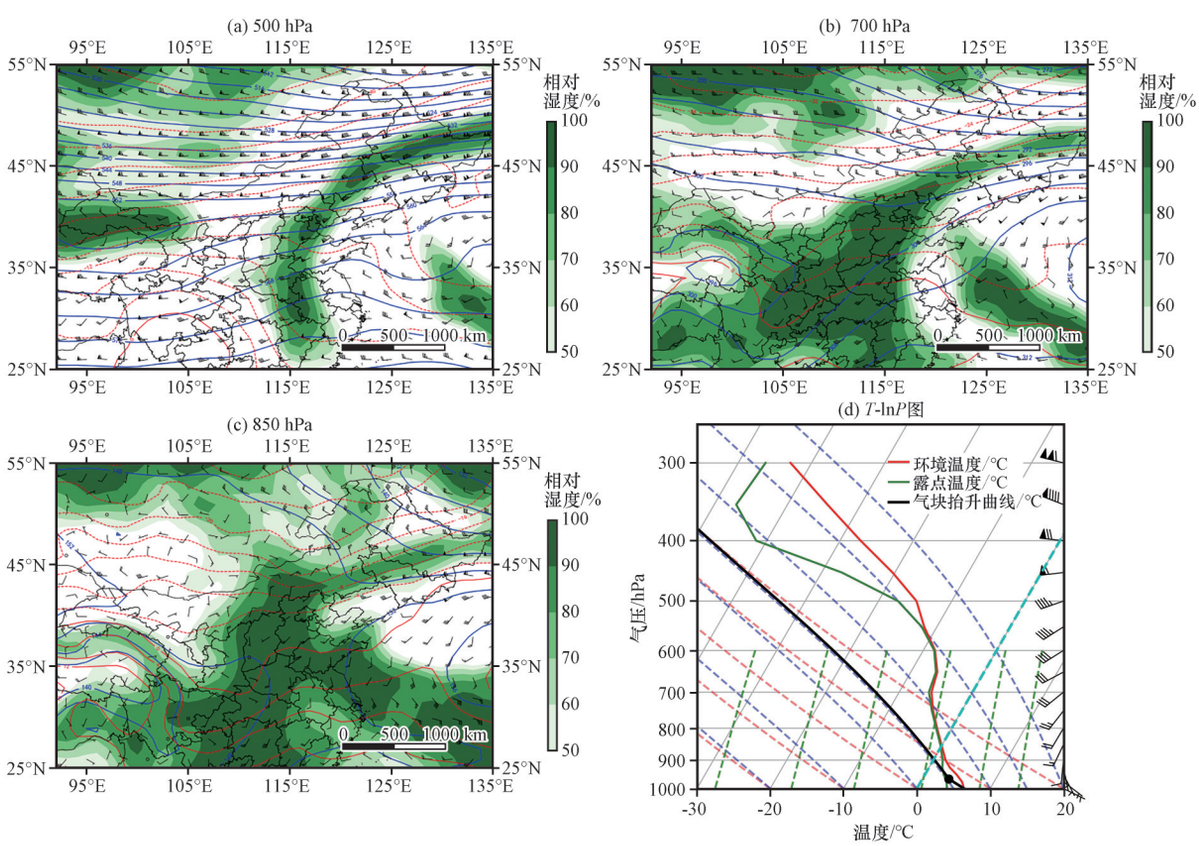


图2 2021年2月28日08:00天气图(蓝线实线代表位势高度，单位：dagpm；红色虚线代表等温线，单位：℃；填色为相对湿度，单位：%)

(a)500 hPa，(b)700 hPa，(c)850 hPa，(d)*T*-ln*P*图

Fig. 2 Weather chart at 08:00 on February 28, 2021. Blue solid line represents geopotential height, unit: dagpm; red dashed line represents isotherm, unit: ℃; shading represents relative humidity, unit: %.

(a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) *T*-ln*P*

于中高层逆温结构的形成。此外，高低层间的湿度梯度显著，云顶的长波辐射冷却与云内的短波辐射吸收进一步加强了逆温结构。

3.2　基于MODIS的云参数与积冰概率分析

过冷水云是导致飞机积冰的重要因素之一，具有典型的云微物理特征。MODIS二级大气产品利用多光谱卫星观测数据进行反演，能够提供高分辨率的关键云微物理参数，实现大范围过冷水云的精确识别，从而准确判断积冰概率，尤其是在白天观测条件下MODIS反演准确率更高。

3.2.1　MODIS云参数分析

云顶温度(T_{top})反映云层顶部的热力条件，一般云顶温度低于0 ℃时，云中水滴可能处于过冷却状态，且温度越低云内冰晶形成的概率越大；当云顶温度降至−40 ℃以下，水滴几乎完全冻结，因此该温度常被视为纯冰云的阈值。在积冰概率分析中，重点关注−40~0 ℃的云顶温度，特别是−20~−10 ℃。从云顶温度分布图[图3(a)]来看，云顶温度均低于0 ℃，大部分云顶温度低于−13 ℃，属于较易发生积冰的区域，这也与飞机实际探测的云顶温度情况相符。

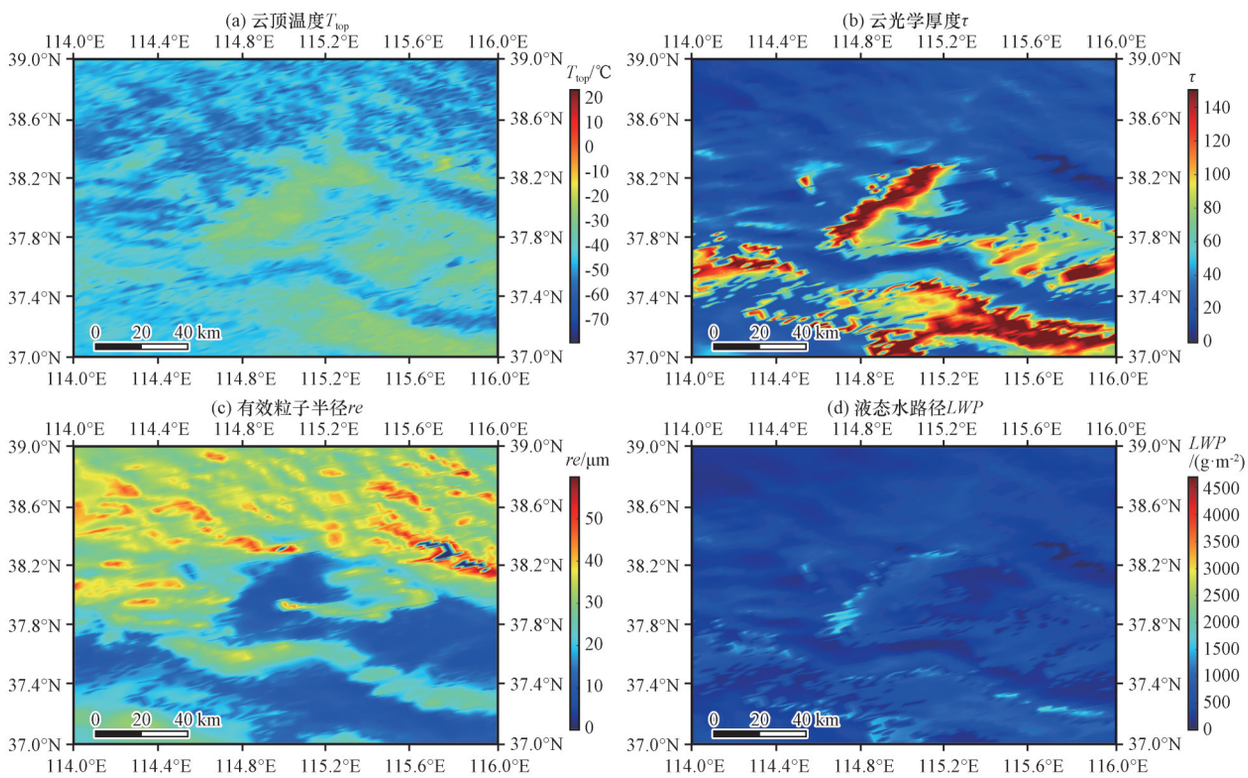


图3　2021年2月28日12:40 MODIS卫星反演的云参数

(a)云顶温度T_{top}，单位：℃，(b)云光学厚度τ，无量纲，(c)有效粒子半径re，单位：μm，(d)液态水路径LWP，单位：g·m^{-2}

Fig. 3　Cloud parameters retrieved by MODIS satellite at 12:40 on February 28, 2021. (a) T_{top}, unit: ℃, (b) τ, dimensionless, (c) re, unit: μm, (d) LWP, unit: g·m^{-2}

云光学厚度(τ)[图3(b)]表示云对太阳辐射的遮挡能力，反映了云中水滴或冰晶的数量和总截面积，也是飞机产生积冰的直接判据之一。从图3(b)可以看出，云光学厚度在空间上分布不均，南部整体明显偏高。该区域云系覆盖范围大、云层深厚。结合云光学厚度与云顶温度来看，飞行区域内的云层深厚且温度偏低，具备飞机积冰发生的基本条件。

影响飞机积冰强度的主要因素除了温度和光学厚度外，还与云中过冷水含量和粒径有关。只有当冷云中存在过冷水滴，飞机与水云或混合相云接触时，才会产生积冰。较高的过冷水滴含量和较大的液态水滴粒径通常会增加飞机积冰风险。图3(c)展示了表征水滴粒径的有效粒子半径(re)，图3(d)给出反映过冷水含量的液态水路径(LWP)，从图3(c)和图3(d)中可以看出，37.9 °N以南的区域有效粒子半径数值较小，且过冷液态水分布不均，这与飞机在赵县等地观测到的云顶情况基本一致。

3.2.2　积冰概率

将反演得到的云微物理量利用积冰概率算法，得到飞机积冰发生的概率分布。从图4可以看出，飞行区域内的绝大部分地区飞机积冰的概率都在

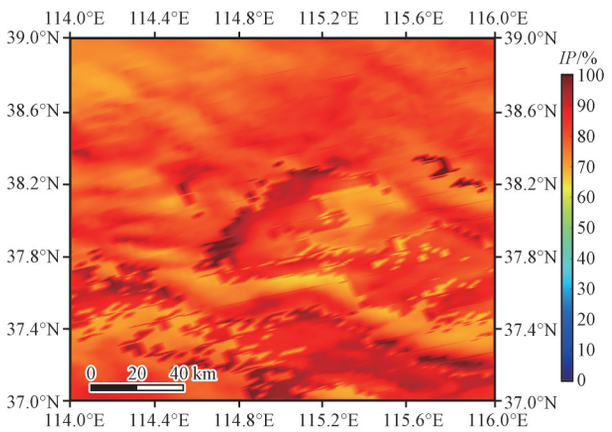


图4 飞机积冰概率*IP*分布(单位：%)

Fig. 4 Probability distribution of aircraft icing. Unit: %

75 %以上，这与实际飞行观测到的积冰情况基本一致。

4 云微物理量特征

4.1 飞行概况

2021年2月28日K-Air 350（B-3523）飞机于09:52从河北正定机场起飞，起飞前地面有小雨和轻雾，在赵县的垂直探测高度为564~6971 m，结果显示云底高度低于最低探测高度564 m（温度为3.1 ℃），云顶附近存在逆温层。垂直探测最高点6971 m处温度为−24.5 ℃，0 ℃层位于1300 m，−5 ℃层位于3060 m，−8 ℃层位于4200 m。10:59—12:46飞机在探测高度6000 m左右（逆温层）平飞的过程中积冰严重，飞机风挡、机翼迅速积累毛冰，该时段位于飞机积冰概率分布的大值区内，且存在逆温层，云系环境温度为−24.5~−6.2 ℃。飞机探测路径上观测到的回波强度范围为−5~30 dBZ[图5(a)]。赵县附近的雷达垂直廓线表明了回波特征随高度的显著变化，5000~6000 m反射率因子(Z_H)随高度减小[图5(b)]，而差分反射率(Z_{DR})[图5(c)]和差分相移率(K_{DP})[图5(d)]随高度逐渐增大，表明随着高度升高，小粒径的过冷水滴数浓度增加，同时冰晶粒子与过冷水的凇附作用增强，改变了冰相粒子的密度和形状特征；融化层附近冰粒子融化，在融化层底部Z_H、Z_{DR}和K_{DP}均出现峰值，并且Z_H和K_{DP}峰值位置高于Z_{DR}，表明在Z_H和K_{DP}峰值位置处液态水含量达到最大，雨滴在下落过程中变得扁平，而较大雨滴相对于较小雨滴下落更快，导致在略低的高度处出现Z_{DR}峰值。

4.2 云微物理量垂直分布特征

利用飞机在赵县上空的垂直观测（观测时段：10:34—11:27，高度范围：564~6971 m）资料得到云微物理量垂直分布特征，如图6所示。为突出主要

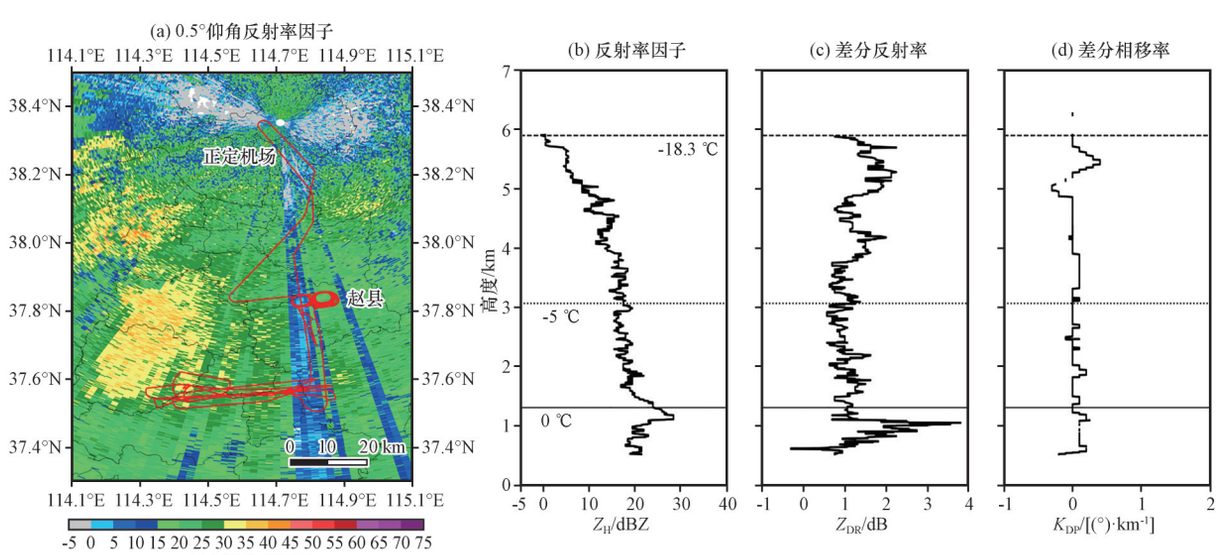


图5 2021年2月28日11:24石家庄S波段双偏振雷达0.5°仰角反射率因子(a，填色，单位：dBZ)，沿飞机垂直探测轨迹的反射率因子(Z_H)(b)、差分反射率(Z_{DR})(c)和差分相移率(K_{DP})(d)的垂直廓线

(a)中红色实线为飞机飞行轨迹，(b)~(d)中黑色实线、点线、虚线分别代表0 ℃等温层、−5 ℃等温层和−18.3 ℃回波顶高温度

Fig. 5 Reflectivity factor at 0.5° elevation (a, shading, unit: dBZ), vertical profiles of reflectivity factor (Z_H) (b), differential reflectivity (Z_{DR}) (c), and specific differential phase (K_{DP}) (d) along the aircraft vertical detection track, observed by the Shijiazhuang S-band dual-polarization radar at 11:24 on 28 February, 2021. The red solid line in (a) represents the aircraft flight track. The black solid, dotted, and dashed lines in (b)~(d) represent the 0 ℃ isotherm, -5 ℃ isotherm, and -18.3 ℃ echo top temperature, respectively

特征，利用固定间隔采样平均法对CDP和CIP的有效粒子直径进行了平滑处理。从图6(a)温度垂直廓线可以看出，云内温度为−24. 5~3. 2 ℃，0 ℃层高度在1300 m附近，2000 m以下的低云由冷暖混合云组成，中高云为冷云。图6(a)和6(b)表明564~2000 m高度范围内连续观测到丰富的云滴粒子和液态水，观测到的液态水含量(CDP-*LWC*)平均值为0. 16 g·m^{-3}，在687 m、751 m、754 m高度出现最大值0. 48 g·m^{-3}，CDP数浓度在595 m出现最大值1256 cm^{-3}。

万超悦等(2024)对中国大气逆温的时空分布特征研究结果显示华北地区的逆温层厚度(以北京为例)多小于420 m，逆温层整体强度多小于2 ℃。本文逆温层结构符合万超悦等(2024)的研究结果：在5800~6100 m高度范围内出现逆温层结构，强度约为0. 6 ℃·(100m)$^{-1}$，与此对应在逆温层底部观测到过冷水极大值0. 18 g·m^{-3}。这种逆温层底部过冷水聚集的现象与Bernstein et al. (2019)观测结果一致，形成机制归因于逆温层对垂直湍流混合起削弱抑制作用，导致云中液态水在逆温层底部区域积聚(王泽林等，2022)。

逆温层底部出现垂直速度标准差的极大值[图6(a)]，表明该处存在较强的垂直风切变。在其下部区域标准差变化幅度较小，表明低层大气对流活动强度不强，呈现弱不稳定层结特征，垂直运动相对平缓，湍流混合作用更为充分；其上部区域(逆温层附近)垂直速度明显增大，可能与逆温层的形成过程及高层垂直风切变有关，促进了逆温层底部云滴的碰并增长过程，为云滴、冰晶提供更长的路径和时间进行碰并、撞冻等。在垂直风切变影响下小云滴凝结增长，协同逆温层阻隔作用，使得从低层输送的小云滴以及通过碰并增长形成的大云滴在逆温层底部大量积聚而无法继续上升，最终形成过冷水高值区。这种风切变增强碰并与逆温层阻隔输送的协同作用，是该区域过冷水异常富集的主要原因。

从图6(b)可以看出，云系整体以小云滴为主，有效粒子直径最大值出现在4364 m处，最大值为15. 4 μm。CDP粒子谱[图6(c)]也显示分档数浓度高值区主要集中在18 μm以内的小粒径端，2000 m高度以下云滴直径小于18 μm的数浓度为10~316 cm^{-3}·μm^{-1}；3400~5000 m高度范围，直径小于16 μm的数浓度降至8~59 cm^{-3}·μm^{-1}；5440~6000 m高度范围直径小于16 μm的数浓度为5. 9~79 cm^{-3}·μm^{-1}。结合图6(a)和6(c)发现：粒子谱宽，云中液态水含量较丰富；粒子谱窄，云中液态水含量较少。这一观测结果与张瑜等(2012)的研究结论一致，反映了云滴增长过程中的碰并作用。

图6(e)是飞机积冰探头的结果。积冰探头正常状态下以高频振动，振动频率约为39970 Hz，结冰后振动频率降低，通过频率变化判断飞机积冰发生。从图6(e)可以看出，从4000 m左右，振动频率开始下降，说明该高度已经开始积冰，宏观记录人员也在4100 m左右发现机翼出现积冰。4000~5500 m(对应时间：10:59—11:17)范围内积冰探头显示的振动频率均处于较低值(39960~39630 Hz)，温度为−15~−6.8 ℃。5440~6000 m(对应时间：11:17—11:20)范围内积冰振动频率随高度上升迅速下降，代表飞机积冰迅速加剧，此时飞机正位于逆温层下层，温度为−18. 5~−15. 2 ℃。CIP探测到的冰晶有效粒子直径显著减小[图6(d)，(f)]，数浓度也相应降低，表明由于逆温层造成层结相对稳定，上升运动受到抑制，湍流混合作用减弱，从而削弱了异质核化的效率，导致环境中的过冷水无法充分消耗，促进了云中过冷水在逆温层底部的积累。

4. 3　逆温层的主要特征

积冰现象最严重的区域位于5500~6000 m高度，存在一个强度约0. 6 ℃·(100m)$^{-1}$、垂直厚度约236 m的逆温层，飞机在穿越此区域过程中迅速积冰[图6(e)]。该逆温层处于对流层中层，在5500 m高度形成显著的垂直风切变带[图6(a)]。为深入研究该逆温层的云微物理特性及其对飞机积冰强度的影响机制，基于积冰探头的探测结果，将逆温层按照垂直高度划分为上中下3个层次，如表2所示。

图7(a)~(c)分别展示了双对数坐标下，逆温层

表2　2021年2月28日飞行逆温层概况

Table 2　Overview of flight temperature inversion layer on February 28，2021

层次	温度/℃	高度/m	时段	过冷水含量与冰晶数浓度相关性(*r*/*P*)
下层	−17. 2~−15. 5	5501~5749	11:17:26—11:18:50	−0. 298/ 0. 006
中层	−18. 3~−17. 2	5752~5917	11:18:51—11:19:51	−0. 063/0. 632
上层	−18. 5~−17. 3	5920~6138	11:19:52—11:20:56	0. 548/0. 000002

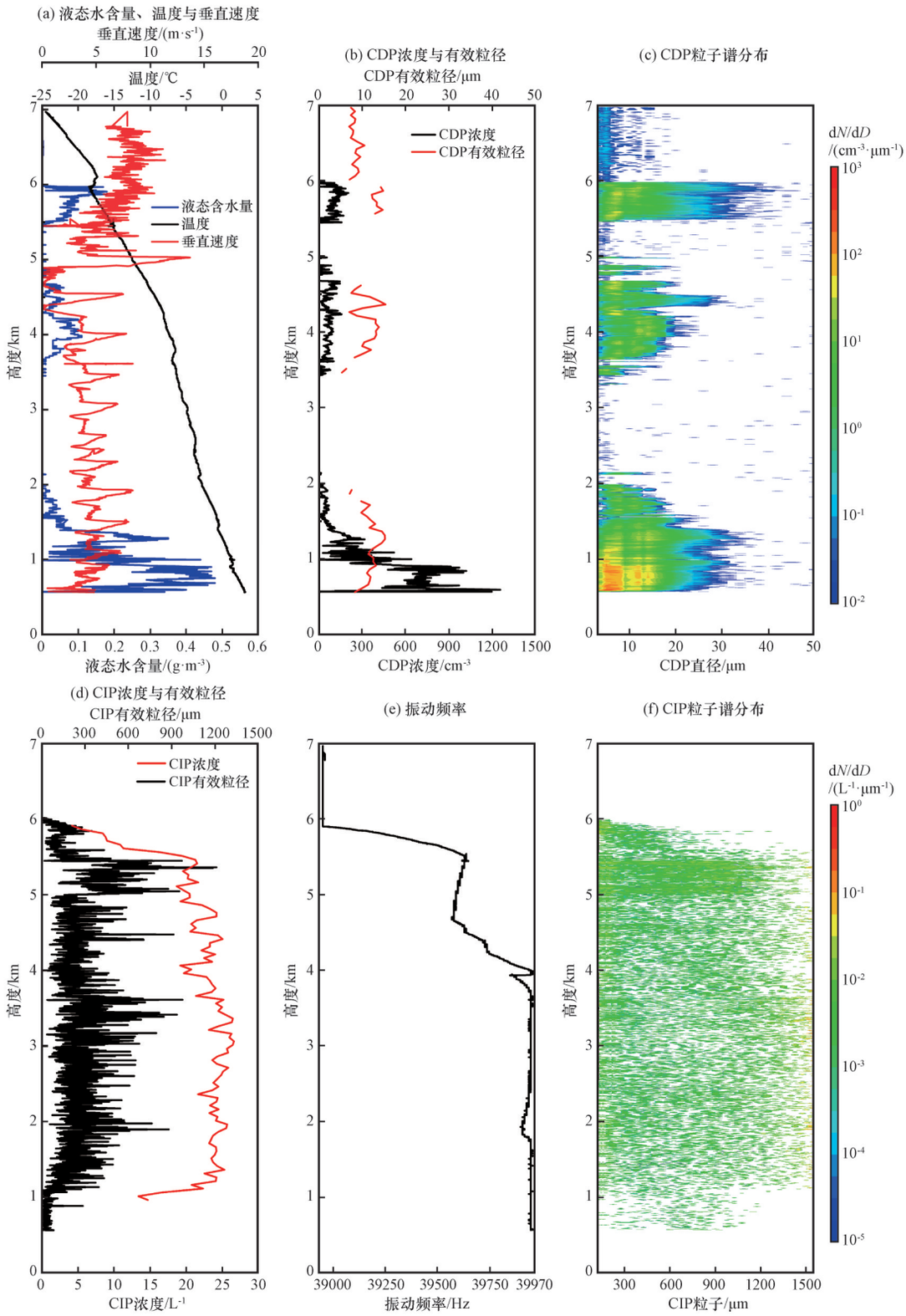


图6 2021年2月28日河北省邢台市赵县上空飞机观测物理量垂直分布图

(a)液态水含量、温度与垂直速度，(b)CDP浓度与有效粒径，(c)CDP粒子谱分布，(d)CIP浓度与有效粒径，(e)振动频率，(f)CIP粒子谱分布

Fig. 6 Vertical profiles of physical parameters observed by aircraft over Zhao County, Xingtai City of Hebei on February 28, 2021. (a) liquid water content, temperature, and vertical velocity, (b) CDP number concentration and effective diameter, (c) CDP particle size distribution, (d) CIP number concentration and effective diameter, (e) vibration frequency, (f) CIP particle size distribution

下层、中层和上层的CDP、2DS和HVPS的粒子数浓度谱分布平均值。在粒子粒径跨度较大（从几微米到数千微米）的双对数坐标系中，粒子数浓度除以粒径的对数区间宽度（dlog$D$）是一种标准的数据处理方式，从而实现CDP、2DS和HVPS 3种不同探头在同一个坐标系下进行粒子谱的平滑拼接，真实、完整地反映出飞机在不同高度层（下层、中层、上层）所探测到的全尺寸粒子谱分布特征（Dong et al.，2020，2021）。在逆温层下层[图7(a)]粒子谱最宽，小粒子端峰值位于6 μm左右；在逆温层中层，小粒子端呈现双峰分布，但峰值位置有所变化：第一个峰值位于5~8 μm，第二个峰值位于10~11 μm；逆温层上层，CDP粒子数浓度降低1~2个数量级，呈明显的双峰分布，第一个峰值位于4~6 μm，第二个峰值位于10~11 μm，同时观测谱宽变窄，表明逆温层的存在显著减弱了大尺度冰晶的形成与维持条件，此区域内主要以撞冻增长为主导。

此外，逆温层附近的粒子谱分布呈现出明显的垂直分布特征：在20~100 μm，逆温层下层数浓度最大，逆温层中层次之，逆温层上层最低；在大粒子端，逆温层下层出现最大超过1000 μm的粒子，而逆温层上层最大粒子不超过1000 μm；3个层次在大粒子端的分布上表现出明显的垂直梯度：逆温层底部大粒子数量较多，最大粒径超过1000 μm，这归因于该层相对较高的液态水含量为粒子生长提供了条件；逆温层上层的最大粒径不超过1000 μm，表明逆温层温度梯度对垂直混合和冰晶增长起抑制作用。

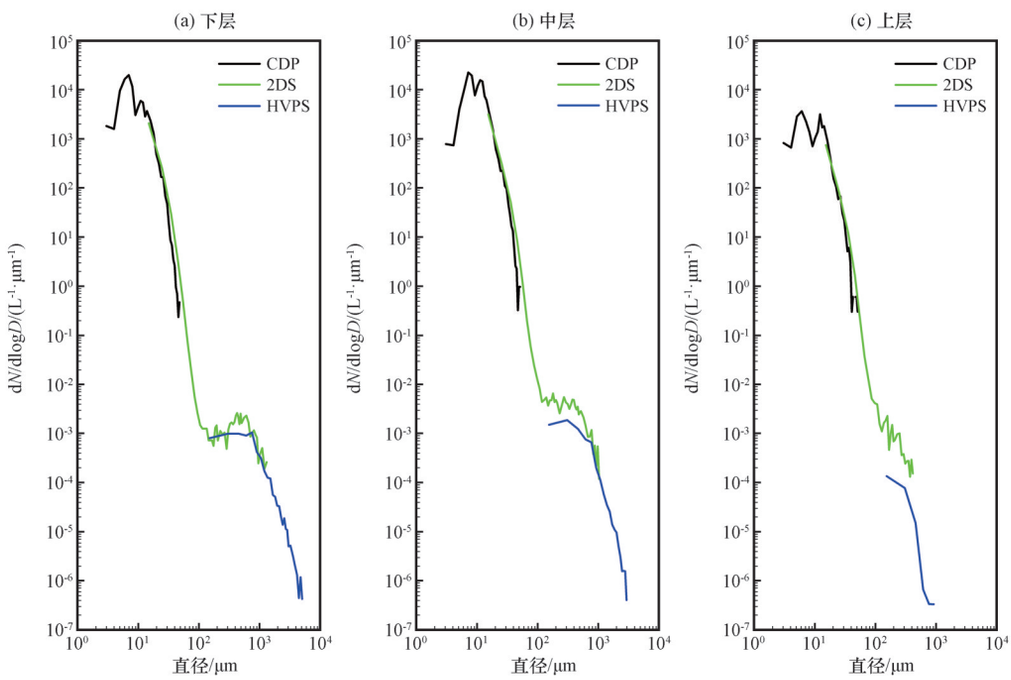


图7　逆温层下层(a)、中层(b)和上层(c)的CDP、2DS和HVPS粒子数浓度谱分布

Fig. 7　Particle number concentration size distributions measured by CDP, 2DS, and HVPS in the lower (a), middle (b), and upper layers (c) of the inversion layer

表2展示了逆温层垂直分层的过冷水含量与冰晶数浓度的Pearson相关性分析结果，r表示两变量间的相关系数，P代表显著性检验的P值。相关性分析揭示了逆温层对微物理环境垂直分异的调控作用：逆温层下层过冷水含量与冰晶数浓度呈显著负相关，印证了此区域“水多冰少”的微物理结构；逆温层中层两者没有明显的相关性，可能由于该区域处于复杂的过渡带，多种微物理过程并存，削弱了简单的线性关系；逆温层上层两者呈现出显著的正相关关系。

在逆温层底部，异质核化过程较弱，云中的过冷液滴消耗较少，加速了液态水的积聚。同时逆温层有效抑制了云滴的向上输送，使得逆温层下部积聚了大量的云滴和过冷水滴。逆温层下部大量存在的液滴，一定程度上有效促进了冰粒子间的聚合、凇附过程。大量小尺度冰粒子在聚合过程中被消耗，导致融化层底部出现“水多冰少”的现象。飞机CPI在逆温层底部观测到的聚合状（图8）冰晶可以证实。

本研究通过机载观测与多源数据融合，揭示了逆温层在飞机积冰微物理环境中的关键调控作用。图8为机载2DS和CPI探头实测的反映逆温层附近

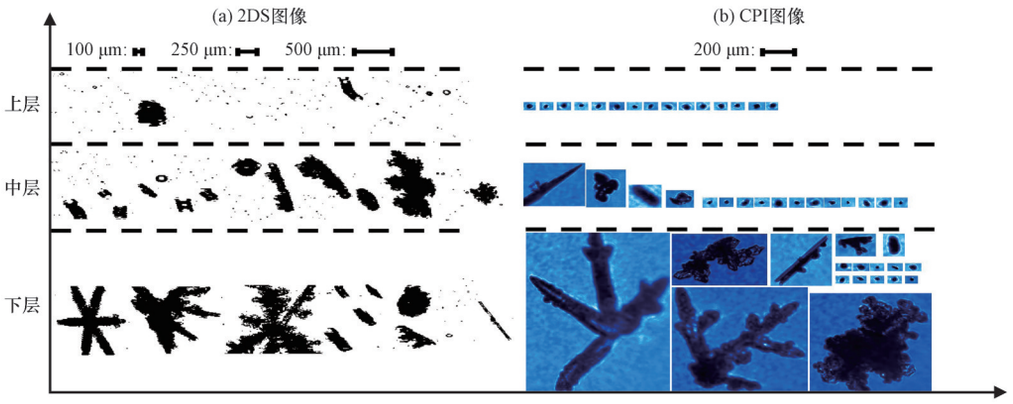


图8 2021年2月28日机载2DS(a)和CPI(b)探头在逆温层下层、中层和上层探测到的粒子图像

Fig. 8 Particle images detected by airborne 2DS (a) and CPI (b) probes at the lower, middle, and top of the temperature inversion layer on February 28, 2021

冰晶微物理变化过程的图片。逆温层下层仍然存在少量冰晶，呈现过冷水和冰晶粒子共存的特征。冰晶粒子多为聚合状、枝状，枝状冰晶表面凸起是液滴附着后产生的凝华增长，进一步证实了逆温层下层过冷水含量较高，冰晶粒子通过凝华和淞附作用快速增长；逆温层中上层观测到的粒子以过冷水滴和冰晶为主，粒径较小，表面凝华和淞附特征不明显。综合分析表明，逆温层的稳定层结抑制冰晶和水汽的垂直输送，导致逆温层内冰晶生长速率缓慢，但同时过冷水滴的聚并增长也使得其内存在尺度较小的过冷水滴。

5 结论

利用机载观测资料、地面雷达资料、MODIS资料和NCEP FNL再分析资料，对2021年2月28日河北省中南部一次严重积冰过程的气象条件、云微物理特征和逆温层结构进行了热动力学分析，发现过冷水含量及其粒径、冰晶含量、垂直速度对飞机积冰有较大影响，逆温层的存在有利于为飞机积冰创造条件。主要结论如下：

（1）本次过程发生在高空槽前，受低层冷锋、切变线、低空急流和地面倒槽等多尺度天气系统共同影响。西南暖湿气流沿锋面抬升，同时在5900 m高度左右形成逆温层，促进了过冷水在逆温层底部的积聚，形成了飞机积冰的条件。

（2）MODIS卫星反演的云微物理量和积冰概率算法表明，飞行区域内云层较厚且云内温度较低，有效粒子半径数值较小，过冷液态水分布不均，飞行区域内的绝大部分地区积冰概率在75%以上，具备典型的积冰环境特征，与实际飞行观测结果基本一致。

（3）云系在垂直结构上呈现为3层云的分布特征，整体以小云滴为主，有效粒子直径为15.6 μm，低层（2000 m以下）为冷暖混合云，中高层为冷云，0 ℃层位于1300 m高度附近，云内温度为−24.5~3.2 ℃；低层和高层逆温区附近均观测到过冷水含量极大值，低层过冷水含量最大可达0.48 g·m^{-3}，逆温层底部达0.18 g·m^{-3}。同时逆温层下层的冰晶与过冷水的相关系数为−0.298，形成典型的“水多冰少”的微物理环境，并且存在较强的垂直风切变，飞机在此经历最严重的积冰。

（4）逆温层下层的冰晶主要为聚合状、枝状，表面有明显凝华增长特征，表明该区域仍然存在少量冰晶粒子，其微物理过程主要以凝华和淞附过程为主导；而逆温层中、上层则以小粒径过冷水滴和冰晶为主，凝华和淞附特征不明显。

本研究仍存在一定局限性，仅基于一次河北省机载观测数据进行飞机积冰个例分析，逆温层的形成机制尚未通过数值模拟进一步验证。未来将结合更多机载观测案例和WRF模式，深入探究逆温层在不同天气系统下的演变机制，并通过地面特种设备观测数据集、探空资料等调整飞机积冰概率算法，开发更适用于华北地区的飞机积冰预警指标。

参考文献（References）：

Bernstein B C, Rasmussen R M, McDonough F, et al., 2019. Keys to differentiating between small-and large-drop icing conditions in continental clouds[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(9): 1931−1953. DOI: 10. 1175/jamc−d−18−0038. 1.

Bernstein B, DiVito S, Riley J T, et al., 2021. The In-Cloud Icing and Large-Drop Experiment (ICICLE) science and operations plans[R]. DOT/FAA/TC−21/29. DOI: 10. 21949/1524472.

Bernstein B, Wolff C, Minnis P, et al., 2006. Practical application of NASA-langley advanced satellite products to in-flight icing now-

casts［C］//44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，1220. DOI：10. 2514/6. 2006−1220.

Black J，Haggerty J A，Landolt S，et al.，2008. Comparison of NASA-Langley satellite-derived cloud properties with pilot reports in aircraft icing scenarios［C］//AMS 13th Conference on Aviation，Range，and Aerospace Meteorology，21−24.

Cober S G，Isaac G A，Strapp J W，1995. Aircraft icing measurements in east coast winter storms［J］. Journal of Applied Meteorology and Climatology，34（1）：88−100. DOI：10. 1175/1520−0450−34. 1. 88.

Dong X B，Zhao C F，Yang Y，et al.，，2020. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based seeding experiment［J］. Earth and Space Science，7（8）：e2020EA001196. DOI：10. 1029/2020EA001196.

Dong X B，Zhao C F，Huang Z C，et al.，2021. Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in November 2020 over Shijiazhuang，China［J］. Atmospheric Research，250：105766. DOI：10. 1016/j. atmosres. 2021. 105766.

Isaac G A，Cober S G，Strapp J W，et al.，2001. Recent Canadian research on aircraft in-flight icing［J］. Canadian Aeronautics and Space Journal，47（3）：213−221.

Isaac G，Ayers J，Bailey M，et al.，2005. First results from the alliance icing research study II［C］//43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，252. DOI：10. 2514/6. 2005−252.

Isaac G，Cober S，Strapp J，et al.，2001. Preliminary results from the alliance icing research study（AIRS）［C］//39th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，393. DOI：10. 2514/6. 2001−393.

Jurkat-Witschas T，Lucke J，Schwarz C，et al.，2023. Overview of cloud microphysical measurements during the SENS4ICE airborne test campaigns：contrasting icing frequencies from climatological data to first results from airborne observations［J］. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility，6（3）：1172−1181. DOI：10. 4271/2023−01−1491.

Korolev A，2007. Reconstruction of the sizes of spherical particles from their shadow images. part I：theoretical considerations［J］. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology，24（3）：376−389. DOI：10. 1175/jtech1980. 1.

Korolev A，Emery E，Creelman K，2013. Modification and tests of particle probe tips to mitigate effects of ice shattering［J］. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology，30（4）：690−708. DOI：10. 1175/jtech−d−12−00142. 1.

Miller D，Bernstein B，McDonough B，et al.，1998. NASA/FAA/NCAR supercooled large droplet icing flight research-Summary of winter 96−97 flight operations［C］//36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit，577. DOI：10. 2514/6. 1998−577.

Minnis P，Nyen L，Smith W L，et al.，2004a. Real-time cloud，radiation，and aircraft icing parameters from GOES over the USA［C］// 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography，2004：7（1）.

Minnis P，Smith W L，Nguyen L，et al.，2004b. A real-time satellite-based icing detection system［C］// 14th International Conference on Clouds and Precipitation.

Rasmussen R，Politovich M，Sand W，et al.，1992. Winter icing and storms project（WISP）［J］. Bulletin of the American Meteorological Society，73（7）：951−974. DOI：10. 1175/1520−0477（1992）073<0951：wiasp>2. 0. co；2.

Schack C J，Christe K O，1980. Forecasters’guide on aircraft icing［R］. Air Weather Service，AWS/TR−80/001：1−58.

Smith W L，2014. 4−D cloud properties from passive satellite data and applications to resolve the flight icing threat to aircraft［D］. The University of Wisconsin-Madison，6：52−81.

Smith W L，Minnis P，Fleeger C，et al.，2012. Determining the flight icing threat to aircraft with single-layer cloud parameters derived from operational satellite data［J］. Journal of Applied Meteorology and Climatology，51（10）：1794−1810. DOI：10. 1175/jamc−d−12−057. 1.

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）：714−718，766. Chi Zhuping，2007. Statistical analysis and numerical prediction experiment of weather conditions for aircraft icing［J］. Meteorological Science and Technology，35（5）：714−718，766. DOI：10. 19517/j. 1671−6345. 2007. 05. 021.

樊明月，龚佃利，刘文，等，2016. 增雨飞机空中积冰观测记录规范探讨［C］// 中国气象学会. 第33届中国气象学会年会S15人工影响天气关键技术与业务应用，2016：35−39. Fan M Y，Gong D L，Liu W，et al.，2016. Discussion on the specifications for aircraft icing observations［C］// Chinese Meteorological Society. Proceedings of the 33rd Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society S15：Key Technologies and Operational Applications of Weather Modification，2016：35−39.

封秋娟，牛生杰，侯团结，等，2023. 山西一次回流倒槽降雪过程的飞机观测研究［J］. 高原气象，42（4）：1044−1054. Feng Qiujuan，Niu Shengjie，Hou Tuanjie，et al.，2023. Aircraft observation and study on the snowfall process affected by reflux inverted trough in Shanxi［J］. Plateau Meteorology，42（4）：1044−1054. DOI：10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2022. 00047.

李子良，1999. 飞机积冰的气象条件分析［J］. 四川气象，19（3）：56−57，55. Li Ziliang，1999. Analysis of meteorological conditions of aircraft icing［J］. Plateau and Mountain Meteorology Research，19（3）：56−57，55.

刘开宇，申红喜，李秀连，等，2005. “04. 12. 21”飞机积冰天气过程数值特征分析［J］. 气象，31（12）：23−27. Liu Kaiyu，Shen Hongxi，Li Xiulian，et al.，2005. Analysis of an aircraft-icing event in Taiyuan Airport［J］. Meteorological Monthly，31（12）：23−27. DOI：10. 3969/j. issn. 1000−0526. 2005. 12. 004.

刘伟，孙玉稳，谢祥永，等，2021. 河北省冬季低槽冷锋层状云结构特征和可播性分析［J］. 气象与环境学报，37（3）：110−116. Liu Wei，Sun Yuwen，Xie Xiangyong，et al.，2021. Analysis of the structure characteristics and seeding possibility of low trough cold front stratiform cloud in winter in Hebei Province［J］. Journal of Meteorology and Environment，37（3）：110−116. DOI：10. 3969/j. issn. 1673−503X. 2021. 03. 015.

庞朝云，张逸轩，2008. 甘肃中部地区飞机积冰的气象条件分析［J］. 干旱气象，26（3）：53−56. Pang Zhaoyun，Zhang Yixuan，

2008. Weather conditions of aircraft icing in the middle part of Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 26(3): 53−56. DOI: 10. 3969/j. issn. 1006−7639. 2008. 03. 010.

彭冲, 宋灿, 蔡淼, 2023. 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(6): 1757−1769. Peng Chong, Song Can, Cai Miao, 2023. Comprehensive observation of the cloud macro-and microstructures of a rare aircraft icing case in Henan Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 47(6): 1757−1769. DOI: 10. 3878/j. issn. 1006−9895. 2208. 21044.

彭启洋, 窦小东, 侯胜芳, 等, 2025. 云南航空气象安全风险等级评价研究[J]. 高原气象, 44(2): 535−545. Peng Qiyang, Dou Xiaodong, Hou Shengfang, et al., 2025. Research on Yunnan aviation meteorological safety risk level evaluation[J]. Plateau Meteorology, 44(2): 535−545. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2024. 00106.

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., 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing area [J]. Meteorological Monthly, 45(10): 1341−1351. DOI: 10. 7519/j. issn. 1000−0526. 2019. 10. 001.

孙晶, 李想, 2020. 飞机积冰气象条件研究进展[J]. 气象科技, 48(4): 561−569. Sun Jing, Li Xiang, 2020. Advances in researches on meteorological conditions related to aircraft icing[J]. Meteorological Science and Technology, 48(4): 561−569. DOI: 10. 19517/j. 1671−6345. 20190365.

孙玉稳, 董晓波, 李宝东, 等, 2019. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J]. 高原气象, 38(5): 971−982. Sun Yuwen, Dong Xiaobo, Li Baodong, et al., 2019. The physical properties and seeding potential analysis of a low trough cold front cloud system at Mountain Taihang based on aircraft observations[J]. Plateau Meteorology, 38(5): 971−982. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2018. 00112.

万超悦, 徐婷婷, 王艳, 等, 2024. 中国大气逆温的时空分布特征[J]. 高原气象, 43(2): 434−449. Wan Chaoyue, Xu Tingting, Wang Yan, et al., 2024. Spatial and temporal distribution characteristics of atmospheric inversion in China[J]. Plateau Meteorology, 43(2): 434−449. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2023. 00058.

王泽林, 蔡兆鑫, 吴俊辉, 等, 2025. 西北地区冬季非降水层状云积冰环境的飞机观测个例研究[J]. 高原气象, 44(5): 1234−1248. WANG Zelin, CAI Zhaoxin, WU Junhui, et al, 2025. Aircraft Observations of Non-Precipitating Stratiform Cloud Icing Environments in Northwest China: A Winter Case Study[J]. Plateau Meteorology, 44(5): 1234−1248. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2025. 00010.

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[J]. 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 Meteorological Science, 33(5): 555−567. DOI: 10. 11898/1001−7313. 20220504.

吴宝军, 陈明升, 宋敏红, 等, 2025. 影响云南航空安全的四类气象要素分析[J]. 高原气象, 44(2): 492−506. Wu Baojun, Chen Mingsheng, Song Minhong, et al., 2025. Analysis of four meteorological factors affecting aviation safety in Yunnan[J]. Plateau Meteorology, 44(2): 492−506. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000−0534. 2023. 00071.

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, 45(1): 88−106. DOI: 10. 3878/j. issn. 1006−9895. 2004. 19202.

张瑜, 银燕, 石立新, 等, 2012. 2007年秋季河北地区云微物理结构的飞机探测分析[J]. 高原气象, 31(2): 530−537. Zhang Yu, Yin Yan, Shi Lixin, et al., 2012. Analysis of cloud microphysics structure over Hebei Region during autumn of 2007[J]. Plateau Meteorology, 31(2): 530−537.

Regulatory mechanism of the inversion layer on the microphysical environment of aircraft icing within trough-cold front cloud systems in Hebei Province

Wang Wuyi[1,2,3,4], Hou Shaoyu[3,4], Huang Zhaochu[3,4], Hu Xiangfeng[3,4], Peng Min[3,4], Mai Rong[3,4], Lü Feng[3,4], Cui Yi[3,4], Lü Xin[3,4], Li Xiaolong[5]

(1. *JilinField Research Station for Cloud Physics, China Meteorological Administration, Changechun* 130062, *Jilin, China*;
2. *Jilin Provincial KeyLaboratory of Weather Modification, Changchun* 130062, *Jilin, China*;
3. *Hebei Weather Modification Center, Shijiazhuang* 050021, *Hebei, China*;
4. *Taihang-Yanshan Mountains Field Research Station for Heavy Rainfall, China Meteorological Administration, Xingtai* 054000, *Hebei, China*;
5. *Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang* 050081, *Hebei, China*)

Abstract: Using airborne detection data from February 28, 2021, combined with MODIS satellite data, ground-based radar data, and NCEP FNL reanalysis data, this study analyzes the cloud microphysical characteristics of aircraft icing in central and southern Hebei Province. This icing event was the result of the combined influence of a low trough cold front, a low-level jet stream, and a surface inversion trough. Vertical detection results reveal that the cloud system exhibited a three-layer structure overall: the lower layer consisted of mixed-phase clouds with relatively high supercooled water content, while the middle and upper layers were cold clouds. A temperature inversion layer observed between 5900 m and 6100 m promoted the accumulation of supercooled water, with a maximum value of 0. 18 $g \cdot m^{-3}$ observed at its base. Concurrently, the inversion layer significantly suppressed vertical convective mixing, thereby forming a typical microphysical environment characterized by "abundant liquid water but scarce ice crystals". The aircraft experienced the most severe icing in this region. The probability distribution of icing, derived using an icing probability algorithm based on MODIS-retrieved cloud top temperature, cloud optical thickness, cloud effective particle radius, and liquid water path, shows high consistency with the actual aircraft observations. The findings of this study reveal the critical role of the thermal structure of the inversion layer in regulating the distribution of supercooled water, providing a reference for aircraft icing warnings in North China.

Key words: aircraft observation; aircraft icing; MODIS; probability of ice accumulation