

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 Y H, Zhang B, Liu W, et al, 2023. Study on the characteristics and mechanism of aircraft ice accumulation under the background of upper-air cold vortex[J]. Meteor Mon, 49(8):972-984 (in Chinese).

高空冷涡背景下飞机积冰特征和机制的探测研究^{*}

孙艳辉¹ 张波¹ 刘伟² 刘长立¹ 黄文震¹
刘正会¹ 包兴华¹ 寿绍文³ 孙鹏彪¹

¹ 内蒙古呼伦贝尔市气象局, 呼伦贝尔 021008

² 内蒙古通用航空股份有限公司, 呼和浩特 010090

³ 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

提 要: 飞机结冰可能引发严重飞行事故。为了了解飞机在冷涡背景下自然结冰的特征和机制, 2021年5月, 内蒙古呼伦贝尔市人工增雨作业人员使用Y-12运输机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, 其中出现中度和重度飞机积冰各2个架次, 对飞机积冰探测的环境气象条件进行了讨论, 着重分析了5月31日2个架次重度飞机积冰过程取得的DMT粒子测量数据。结果表明: 飞机平飞海拔高度为3.5~4.2 km, 环境温度为-8~-4℃时, 重度飞机积冰出现在冷涡东南部水汽饱和区中; 测量的过冷水含量在高值时段的平均值达到0.25~1.04 g·m⁻³, 平均有效直径为15~100 μm的粒子浓度显著偏高, 达到100~200个·cm⁻³, 高浓度的过冷水含量导致飞机外壳出现瞬时快速积冰。简述了高空冷涡东南象限航线上的云层粒子图像和云粒子增长方式, 讨论了高空冷涡东南象限的大气结冰条件。

关键词: 高空冷涡, 飞机结冰, 液态水含量, 云粒子浓度, 云滴平均有效直径

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.042001

Study on the Characteristics and Mechanism of Aircraft Ice Accumulation Under the Background of Upper-Air Cold Vortex

SUN Yanhui¹ ZHANG Bo¹ LIU Wei² LIU Changli¹ Huang Wenzhen¹
LIU Zhenghui¹ BAO Xinghua¹ SHOU Shaowen³ SUN Pengbiao¹

¹ Hulunbuir Meteorological Office of Inner Mongolia, Hulunbuir 021008

² Inner Mongolia General Aviation Co., Ltd., Huhhot 010090

³ School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: Ice on airplanes can cause serious accidents. In order to understand the characteristics and mechanism of natural freezing of aircraft under the background of cold vortex, seven flight detections were conducted using Y-12 aircraft under the upper-air cold vortex in Hulunbuir in May 2021. Among the seven flight detections, two moderate and two intense ice accumulation occurred. This paper discusses the atmospheric environments suitable for aircraft icing detection. Characteristics and mechanism of aircraft icing are speculated based on data obtained from the Droplet Measurement Technologies, Inc. (DMT) equipments carried by the aircraft for the two intense aircraft icing processes on 31 May 2021. The results show that while the aircraft was flying at altitudes of about 3.5~4.2 km, with the ambient temperature of -8~-4℃, intense aircraft ice accumulation occurred in the water vapor saturated area in the southeast of the

^{*} 内蒙古自治区气象局引导性创新基金项目(nmqxydcx202206)、呼伦贝尔市气象局科学技术研究项目(hlbeqx202208)共同资助

2022年9月24日收稿; 2023年2月24日收修定稿

第一作者: 孙艳辉, 主要从事中尺度天气学研究. E-mail: syhbmw@163.com

cold vortex. The averaged supercooled liquid water content (LWC) during the high LWC value periods could reach as high as $0.25\text{--}1.04\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, leading to instantaneously aircraft icing, and the particle number concentration increased to $100\text{--}200\text{ cm}^{-3}$ for drops and ice particles with mean effective drop diameter in the range of $15\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$. Particle images and their growth patterns in the southeast of the cold vortex were brought out. Finally, the atmospheric icing conditions in the southeast part of the cold vortex are discussed.

Key words: upper-air cold vortex, aircraft icing, liquid water content (LWC), particle number concentration, mean effective drop diameter

引言

飞机在低于 0°C 的云层中飞行时,触碰过冷水滴,飞机外壳和暴露在外的仪器设备表面容易冻结形成积冰。当积冰较快或者达到一定的厚度时,由于飞机机身变得不平滑以及积冰引起的机身重量增加等,会影响飞机的气动外形和发动机性能,如颠簸、结冰速率加剧、飞行水平加速度和发动机功率改变,造成偏航;其机械性能也会明显受到影响,出现拖曳增大、升力减小、负重增加,发动机效率降低 (Sand et al, 1984),可能加剧飞行风险,甚至造成严重飞行事故。

研究产生飞机积冰的气象条件对航空安全和民用飞机通过积冰试飞试验有重要作用 (陈跃等, 1989; Schultz and Politovich, 1992; 曹丽霞等, 2004; 迟竹萍, 2007; 王磊等, 2014; 李佰平等, 2018; 孙晶等, 2019; 周星旭等, 2023); 此外,通过分析和比较云滴谱特征,有助于认识和了解天气系统的云微物理特征,有效提高人工增雨作业效率。所以研究产生飞机积冰的气象条件对人工影响天气的科研和业务也具有重要意义。

飞机积冰主要表现为两种形态 (Riley, 1937; Minser, 1938): 一种坚硬透明,分布较为均匀,称作明冰;另一种为半透明或不透明颗粒状,称作湍冰或者毛冰。高密度的冰附着力大,密度低于 $0.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的积冰很容易通过抖振去除 (Tattelman, 1982)。飞机积冰主要由直径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的过冷云滴造成,有些飞机遇到了非迎风面出现的瞬时快速积冰,它们由直径为 $40\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ 的大过冷水滴造成,过冷水滴与冰粒混合,如同灰浆与砖块,能加快积冰速度 (Sand et al, 1984; Politovich, 1989)。

飞机结冰主要与云层过冷水含量有关,过冷水含量越高,越容易积冰。过冷水主要分布在温度为 $-20\text{--}0^{\circ}\text{C}$ 的大气环境中,在更冷的云层中含量很少

(汪学林等, 1982; Schultz and Politovich, 1992)。观测事实表明,含水量变化很大,20 世纪 60 年代以来,我国使用飞机探测资料计算和测量的过冷水含量在层云中一般可以达到 $0.1\text{--}0.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值 $>0.4\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,在层积云中可以达到 $1.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;测量的云滴浓度为 $10^1\text{--}10^2\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$,冰晶浓度的变化范围为 $10^{-3}\text{--}10^1\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ (叶家东等, 1992; 杨文霞等, 2005; 金华等, 2006; 范焘等, 2010; 廖捷和任芝花, 2011; 亓鹏等, 2019; 白婷等, 2020; 封秋娟等, 2021; 杨洁帆等, 2021; 蔡兆鑫等, 2021)。飞机积冰与气温和水汽条件密切相关,能够产生大值积冰累计量的地理位置随季节变化 (Hobbs and Rangno, 1985)。

虽然近年来关于飞机结冰的微物理研究广泛开展,但关于飞机结冰与天气系统的关系的研究还不多见。一般来说,飞机巡航过程中的结冰与航线上的天气系统背景密切相关。例如在东北和内蒙古地区常见的高空东北冷涡中飞行的飞机常常会产生结冰现象。为了了解飞机在高空冷涡背景下飞行时产生自然结冰的特征和机制,2021 年 5 月,使用 Y-12 人工增雨飞机携带的美国粒子测量技术公司 (Droplet Measurement Technologies, Inc., DMT) 的粒子测量设备,在高空冷涡天气系统中进行了 7 个架次飞机积冰探测试验,每次都有不同程度的飞机结冰发生,其中达到中度和重度飞机积冰程度的各 2 个架次。本文着重对 5 月 31 日 2 个架次重度飞机积冰过程取得的探测数据和环境大气条件进行分析,希望能增进关于天气形势背景和飞机结冰的关系以及飞机产生自然结冰的特征和机制的了解。

1 设备和资料

2021 年 5 月 31 日的 2 个架次探测过程,飞机携带的设备有 DMT 生产的粒子测量设备 (表 1)、露点仪、飞机综合气象要素测量系统 AIMMS-20。仪

表 1 飞机携带的 DMT 探测设备简表

Table 1 List of DMT equipments carried by the aircraft

DMT 探测设备名称	测量范围
二维降水粒子探头 (precipitation imaging probe, PIP)	100~6200 μm
二维云粒子灰度探头 (cloud imaging probe grayscale, CIP-G)	15~950 μm
云和气溶胶粒子谱仪 (具有偏振探测功能的) (cloud and aerosol spectrometer with depolarization, CAS DPOL)	0.5~50 μm
热线含水量仪 (hotwire liquid water content sensor, Hotwire LWC)	0~3 $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

器设备在使用之前进行了校准和标定。

对环境大气条件进行分析使用的资料包括:欧洲中期天气预报中心东北亚地区高分辨率逐 3 h 预报的温度、相对湿度、位势高度、水平风速和总云量百分数;欧洲中期天气预报中心全球高分辨率逐 3 h 预报的海平面气压和对流有效位能;FY-2E 卫星黑体亮温 1 h 产品;呼伦贝尔市海拉尔站探空资料等。

2 飞机积冰程度与环境气象条件分析

飞机积冰程度有很多种划分方法,根据 Jeck

(2002)的方法,按照积冰厚度达到 0.25 in(6.35 mm)所需要的时间,依次分为微量(≥ 60 min)、轻度($15 \sim < 60$ min)、中度($5 \sim < 15$ min)和重度(≤ 5 min)。

2021 年 5 月(采用北京时,下同),飞机在冷涡天气系统中进行探测的位置和积冰情况如图 1 和表 2 所示。在冷涡底部,出现中度和轻度飞机积冰各 1 个架次(图 1a,1d);在冷涡顶部和后部,观测到微量积冰(图 1b,1e);在冷涡正东方向,出现中度飞机积冰 1 个架次(图 1c);在冷涡东南部,出现重度飞机积冰 2 架次(图 1f,1g)。

在对流层中低层,冷涡东南象限有偏南暖湿气流输送热量和水汽,上升运动得到发展,当飞机探测

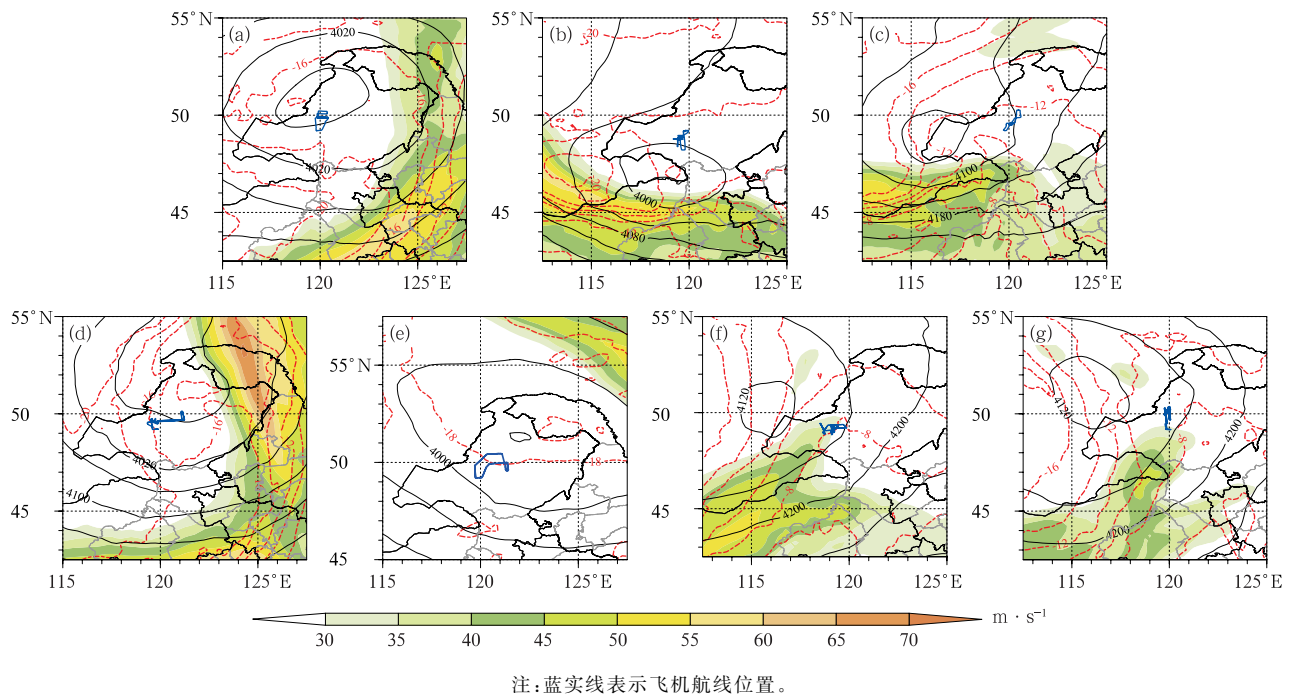


图 1 2021 年 5 月(a)4 日 11 时,(b)7 日 20 时,(c)11 日 14 时,(d)23 日 20 时,(e)24 日 20 时,(f)31 日 14 时和(g)31 日 20 时欧洲中期天气预报中心 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐 3 h 预报的 600 hPa 位势高度(黑色等值线,单位:gpm)、气温(红色等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$)和 300 hPa 高度层水平风速(填色)
Fig. 1 ECMWF $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ per 3 h forecast products at (a) 11:00 BT 4, (b) 20:00 BT 7, (c) 14:00 BT 11, (d) 20:00 BT 23, (e) 20:00 BT 24, (f) 14:00 BT 31, and (g) 20:00 BT 31 May 2021 for geopotential height (black isoline, unit: gpm), temperature (red isoline, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 600 hPa, and horizontal wind speed (colored) at 300 hPa

高度层的空气接近饱和且过冷水含量充足时,飞机机身表面积冰速度快,可能出现重度飞机积冰。冷涡中心附近的东南象限,水的相变产生的热量收支变化使气流结构变得复杂,是暴雨、冰雹、强风等强天气高发区,飞机在冷涡天气做结冰试飞试验,需要做更多更细致的天气预报和监测工作,以保证飞行安全。

使用欧洲中心数值预报产品、卫星资料、地面观测和探空资料,对 7 个架次飞机积冰探测的大气环境进行分析(表 2),探测环境最大云顶高度为 11.3 km;对流不稳定能量 $CAPE \leq 236 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$;冷涡暖区中的云顶亮温 $TBB > -56^\circ\text{C}$ 。这些物理量定性地表示了飞机探测的环境特征,不代表具体的云单体特征。

表 2 2021 年 5 月呼伦贝尔市探测飞机积冰情况与环境场特征

Table 2 Observing aircraft icing accretion and the associated environment features for Hulunbuir in May 2021					
飞机积冰程度	飞机探测时间(起飞—关车)/BT	飞行航线位置	云顶高度/km	TBB/ $^\circ\text{C}$	CAPE/ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$
微量	7 日 17:53—20:30	冷涡顶部	8.4	-47	208
	24 日 17:49—20:15	冷涡中心西南部	6.3	-56	33
轻度	23 日 17:04—20:10	冷涡中心底部	6.9	-48	88
中度	4 日 10:15—13:30	冷涡中心底部	4.9	-25	26
	11 日 13:14—15:30	冷涡中心外围东部	8.7	-52	59
重度	31 日 11:14—14:40	冷涡中心外围东南部	11.3	-51	198
	31 日 17:16—20:40		10.7	-49	236

850 hPa 与 500 hPa 的温度差常用来衡量大气稳定度,在出现飞机积冰的天气过程中,两个气压层的最大温差为 $28.0 \sim 31.2^\circ\text{C}$ 。地面气旋中心的加深速度与高空急流和大气稳定度有重要联系,31 日 08—20 时,模式预报的低压中心海平面气压 3 h 变压最大值为 $0.7 \sim 2.5 \text{ hPa}$,12 h 平均变压低于 0.6 hPa ,地面低压中心气压持续下降的程度小于爆发性气旋(孙艳辉等,2017)。300 hPa 高度层急流轴中心风速为 $50 \sim 80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,飞机距离高空强风剪切位置大于 45 km。

东南部。31 日 14 时(图 1f),飞行高度层附近为偏南暖湿气流,航线正上方对应 300 hPa 高空急流出口区左前方,急流轴核心风速为 $50 \sim 55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;20 时(图 1g),高空急流和冷涡强度减弱。飞行探测过程中,飞机在 10~20 min 内出现间歇重度颠簸,全程多次出现中度颠簸。李子良和黄仪方(2008)、孙艳辉等(2012)研究表明,飞机颠簸与高空急流附近的强风切变及湍流有关。

海拉尔站的探空表明(图 2),海拉尔站上空为整层的偏南风,31 日 08 时,最大湿层在 2~3 km, 0°C 层高度为 2.17 km(779.1 hPa);20 时,600 hPa 高度层以上为干层,600 hPa 以下为湿层, 0°C 层高度上升至 2.73 km(720.8 hPa)。对流层顶高度为 10.7~11.1 km(234.6~219.1 hPa),在 15.1~17.2 km(120~86.7 hPa)存在第二对流层顶。

3 2021 年 5 月 31 日飞机积冰探测与云滴谱特征分析

5 月 31 日飞行 2 个架次,飞机探测位置在冷涡

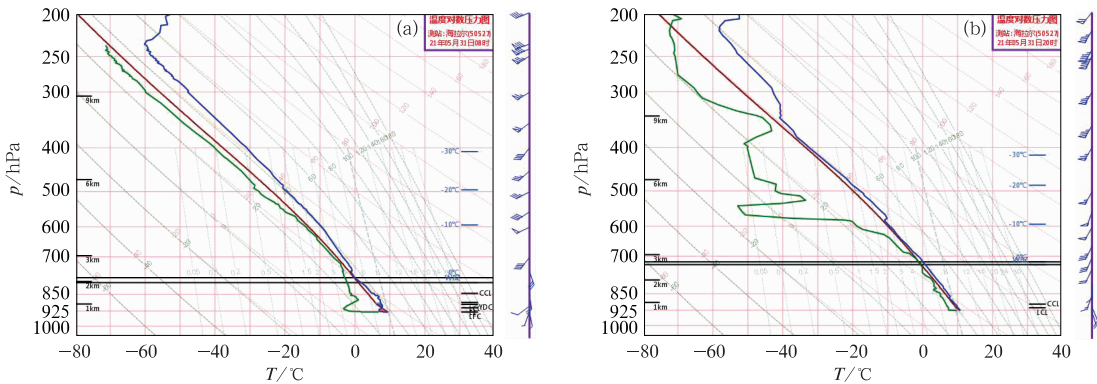


图 2 2021 年 5 月 31 日(a)08 时和(b)20 时海拉尔站温度-对数压力图

Fig. 2 $T\text{-}\ln p$ diagram for Hailar Sounding Station at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 31 May 2021

在2个架次飞行探测过程中,粒子测量设备CAS DPOL测量的云滴平均有效直径(mean effective diameter, MED)与其中值体积直径(median volume diameter, MVD,是某一粒子尺度范围液态水含量分布的中值)大小相当;在大粒子增多的情况下,PIP(CIP)测量的MED和MVD数值相差超过1 mm, MVD数值更大。本文更多地使用MED分析云滴谱特征和飞机结冰条件,主要有两方面原因,一是中国民用航空规章第25部运输类飞机适航标准^①使用MED描述大气结冰条件,二是MED更贴近云滴尺度谱的真实情况。

3.1 2021年5月31日第一次积冰探测

飞机在5月31日11:14起飞,11:35—12:05期间共燃烧6根碘化银烟条进行增雨作业,后续飞行航线位于其上风方且远离碘化银播撒区。飞行过程中,飞机机翼和撑杆出现明冰,飞机携带的探测设备表面积冰,播撒器外表面出现瞬时冻结形成的颗粒状积冰,飞机挡风玻璃和外部挂件积冰厚度达到4 cm(图3),发动机出气孔(非迎风面)积冰厚度大于1 cm,螺旋桨挂冰。

3.1.1 飞机探测数据分析

31日11:24:11—14:02:16,飞机在低于0℃的环境中飞行。如图4所示,11:27:33—11:53:18和11:54:56—13:56:51期间飞机分别在4.2 km和3.8 km高度平飞,环境气压平均值分别为596 hPa和620 hPa,空气密度平均值为 $0.779 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.806 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,随飞行高度下降,环境大气压力上

升,空气密度增大;飞机结冰温度为 $-6 \sim -4^\circ\text{C}$,温度露点差约为 3°C ,相对湿度为 $80\% \sim 90\%$,飞机速度为 $60 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。空气垂直速度在零值附近波动,一般不超过 $\pm 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。

如图5所示,11:24:11—13:19:48,热线仪测量的平均液态水含量(LWC)为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;13:29:30—13:40:38(灰色影区),LWC明显增长,平均值达到 $0.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,其中,13:40:32—13:40:35,连续4 s测得的 $\text{LWC} > 2.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;13:46:00—14:02:16,测得 $\text{LWC} < 0.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。13:29:30—13:40:38,即LWC高值时,PIP、CIP测量的云滴平均有效直径数值明显偏低,CAS DPOL测量的云滴平均有效直径集中在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,CIP测量的云粒子浓度明显偏高。

考虑到探测设备测量的粒子尺度范围有重叠,数据比较存在一定的困难。如果将所有测量结果组合在一起,如图6所示(水平和垂直坐标均使用对数坐标),可以看到,13:29:30—13:40:38,高值液态水含量(筛选 $\text{LWC} \geq 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时刻)对应的平均有效直径在 $15 \sim 100 \mu\text{m}$ 的粒子浓度显著偏高,达到 $100 \sim 200 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($2.0 \times 10^5 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$);平均有效直径在 $100 \sim 2000 \mu\text{m}$ 的粒子浓度 $< 1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3.1.2 云和降水粒子图像分析

DMT探测计时范围为11:14:06—14:28:39,温度范围为 $-7.17 \sim 16.29^\circ\text{C}$ 。对PIP采集的高空冷涡东南象限的粒子图像进行选择举例,温度范围为 $-5.99 \sim 0.60^\circ\text{C}$,如图7所示,在温度为 0.60°C 时,

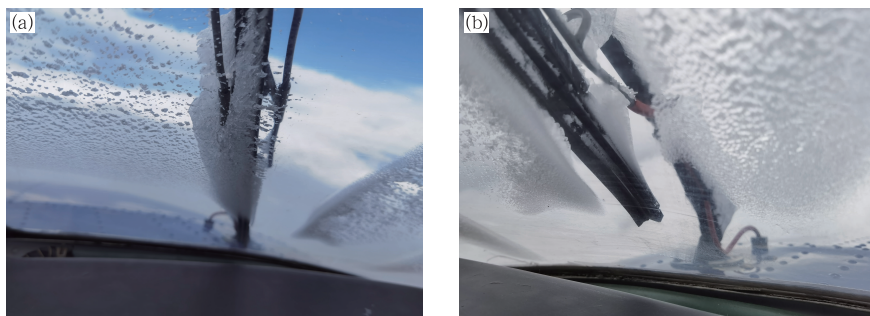


图3 2021年5月31日(a)13:55:11和(b)13:56:08飞机挡风玻璃重度积冰

Fig. 3 Intense ice accumulation on aircraft windshield at

(a) 13:55:11 BT and (b) 13:56:08 BT 31 May 2021

①中国民用航空局,2016.中国民用航空规章第25部运输类飞机适航标准[CCAR-25-R4]附录C. <http://www.caac.gov.cn/index.html/运输类飞机适航标准.pdf>

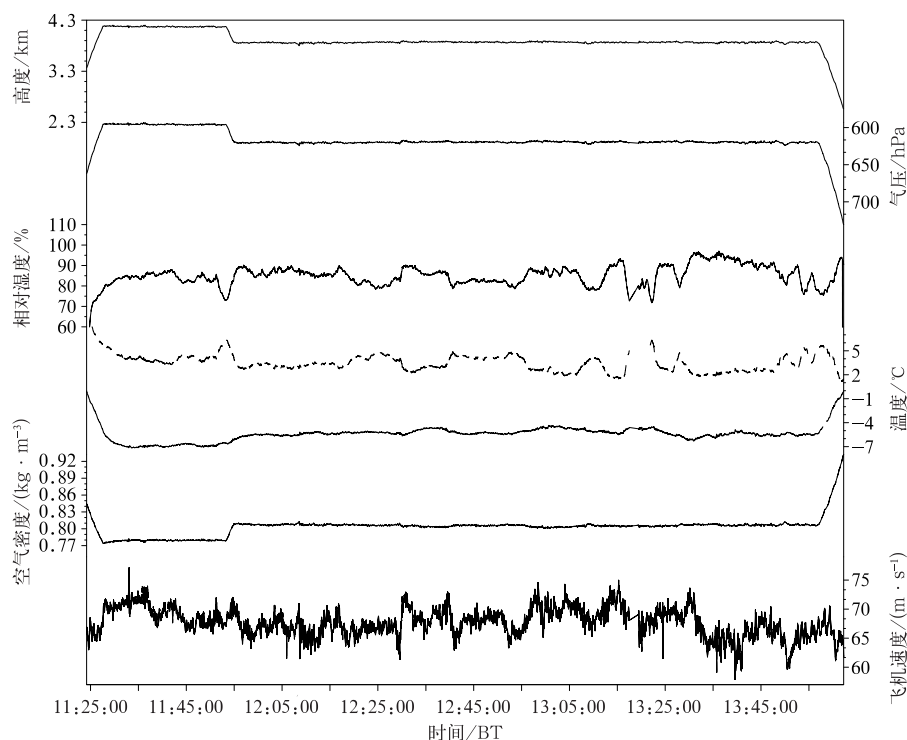
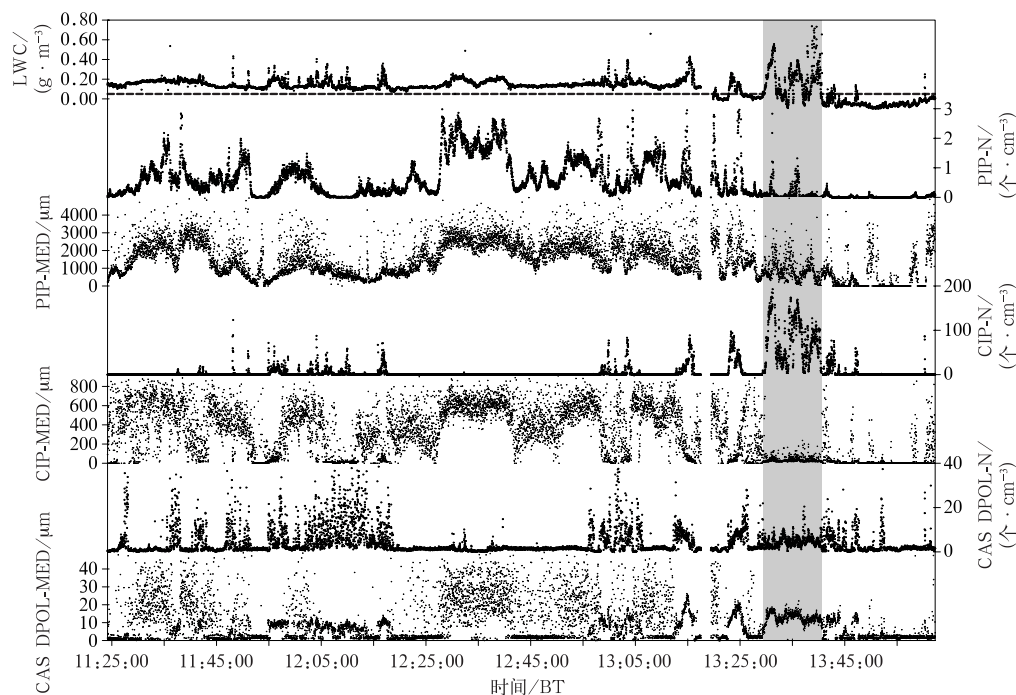


图4 2021年5月31日11:24:11—14:02:16 机载探测设备每秒测量的海拔高度、气压、相对湿度、温度(实线)和温度露点差(虚线)、空气密度和飞机速度

Fig. 4 The onboard equipments-measured 1 second altitude, pressure, relative humidity, temperature (solid line) and the difference between temperature and dewpoint (dashed line), air density and flying speed of aircraft during 11:24:11 BT—14:02:16 BT 31 May 2021



注:灰色阴影区表示LWC高值时段。

图5 2021年5月31日11:24:11—14:02:16 机载探测设备每秒测量的液态水含量(虚线: $LWC=0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 等值线)、粒子浓度和云滴平均有效直径

Fig. 5 The onboard equipments-measured 1 second LWC (dashed line; $LWC=0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), cloud particle concentration and the mean effective diameter of cloud drops during 11:24:11—14:02:16 BT 31 May 2021

云中为液态雨滴,温度为 0.25°C 时,雨滴与未完全融化的冰粒共存;线形、柱形和边缘融化的球形冰粒在 $-6\sim-1^{\circ}\text{C}$ 都有分布;单片的雪花出现在云内气温为 $-6\sim-4^{\circ}\text{C}$ 的环境中。粒子增长方式主要表现为球形冰粒之间碰并粘附,雪片勾连,雪片、球形冰粒碰冻过冷水淞附增长。

如图 7 所示,31 日 13:31:22,PIP 图像上表现为大量直径约 1 mm 淞附的球形冰粒和微小粒子,此时的过冷水含量为 $0.52\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,同样的粒子图像持续出现在 13:30:51—13:31:45,13:34:37—13:35:00,13:35:17—13:36:26 和 13:38:59—13:40:35,这样的高值过冷水含量导致飞机携带的播撒器外壳出现颗粒状瞬时积冰(图 8)。CIP 图像上分布着高浓度直径约为 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的过冷水云滴和冰晶粒子(图 9),从实测图上看,这一段时间飞机基本上是在过冷水环境中飞行,偶尔会有 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以

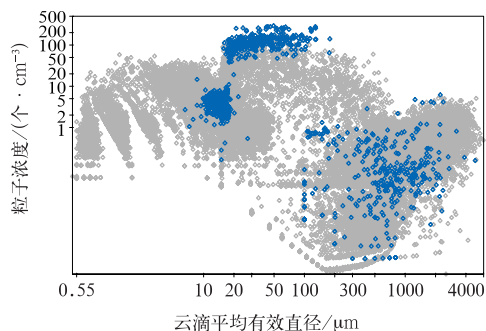
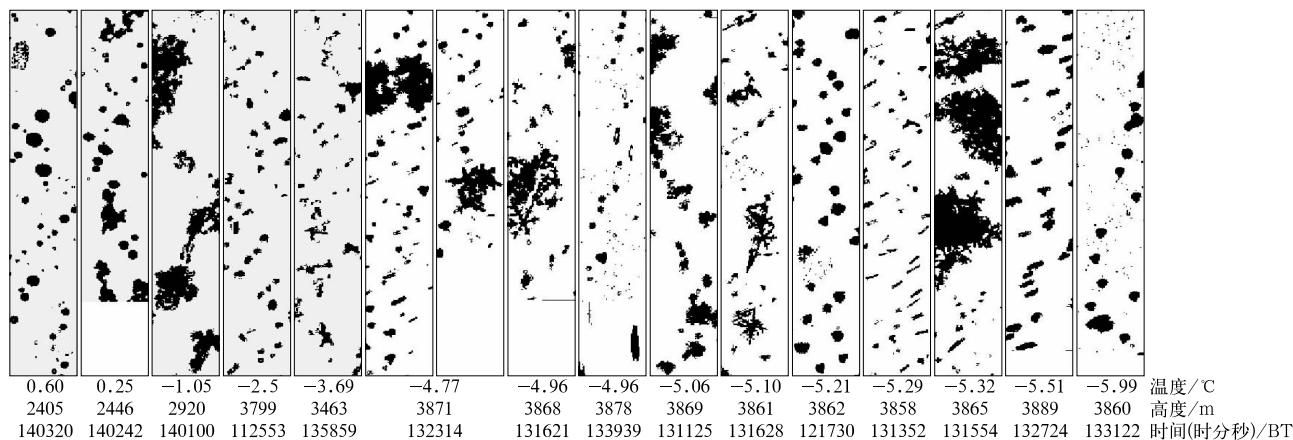


图 6 2021 年 5 月 31 日 11:24:11—13:46:00(灰色)和 13:29:30—13:40:38(蓝色,取 $\text{LWC}\geq 0.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的测量值)PIP、CIP 和 CAS DPOL 测量的云粒子浓度随云滴平均有效直径的变化
Fig. 6 The PIP, CIP and CAS DPOL-measured cloud particle number concentration changing with the mean effective diameter of cloud drops during 11:24:11—13:46:00 BT (grey) and 13:29:30—13:40:38 BT (blue, $\text{LWC}\geq 0.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$) on 31 May 2021



注:图像下方标注了图像采集时刻的温度、飞机高度和图像采集时间。

图 7 2021 年 5 月 31 日 11:25:53—14:03:20 PIP 采集的二维降水粒子图像
Fig. 7 Particle images produced by PIP during 11:25:53—14:03:20 BT 31 May 2021

上的过冷大滴,过冷滴一般是直径小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的小液滴,也不排除是小冰晶的情况,但在飞机结冰情况下可以佐证这里面存在大量的过冷滴。

3.1.3 大气结冰条件分析

大气连续(间歇)最大结冰强度由云层液态水含量、云层水滴平均有效直径和周围温度三个变量决定^②,对应每一个确定的云滴平均有效直径和环境

气温,存在一个云层液态水含量(LWC)的可能最大值。1964 年以来,连续最大(层云)大气结冰条件一直用来设计和检测飞机机身的防除冰功能,间歇最大(积云)大气结冰条件用来设计和检测飞机引擎(Jeck,2002)。按照附录 C 中 LWC 随飞行距离变化的比例系数,Jeck(2002)将最大大气结冰条件转换为 LWC 与水平距离相关,对某一特定平均有效

②美国联邦航空运输类飞机适航标准,United States Code of Federal Regulations, 2021. Title 14-Aeronautics and Space, Chapter 1-Federal Aviation Administration, Department of Transportation, Subchapter C-Aircraft. Part25-Airworthiness Standards; Transport Category Airplanes, Appendix C, Part I -Atmospheric Icing Conditions. <http://federal.elaws.us/cfr/title14.chapter1.subchapterc.part25.appc>.



图 8 2021 年 5 月 31 日 13:35:37

播撒器外表面颗粒状积冰

Fig. 8 Granular ice on the outside surface of the seeding machine carried by the aircraft at 13:35:37 BT 31 May 2021

直径和环境气温,距离平均的云层最大可能 LWC 随有效飞行距离(云层 $LWC \geq 0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)增加而降低。

31 日 11:24:11—14:02:16, 总的有效飞行距离在 310 n mile (574 km) 以内。如图 10 所示, 在有效飞行距离达到 145 n mile (268 km) 以后, 测量的 LWC 达到环境气温为 -10°C (0°C), 云滴平均有效直径为 $20 \mu\text{m}$ ($25 \mu\text{m}$) 时对应的液态水含量。12:25:00—13:40:38, 测量的云滴平均有效直径的平均值为 $13.7 \mu\text{m}$, 13:29:30—13:40:38, 云滴平均

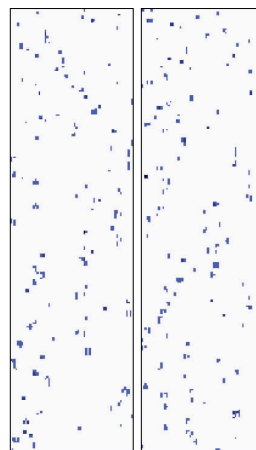


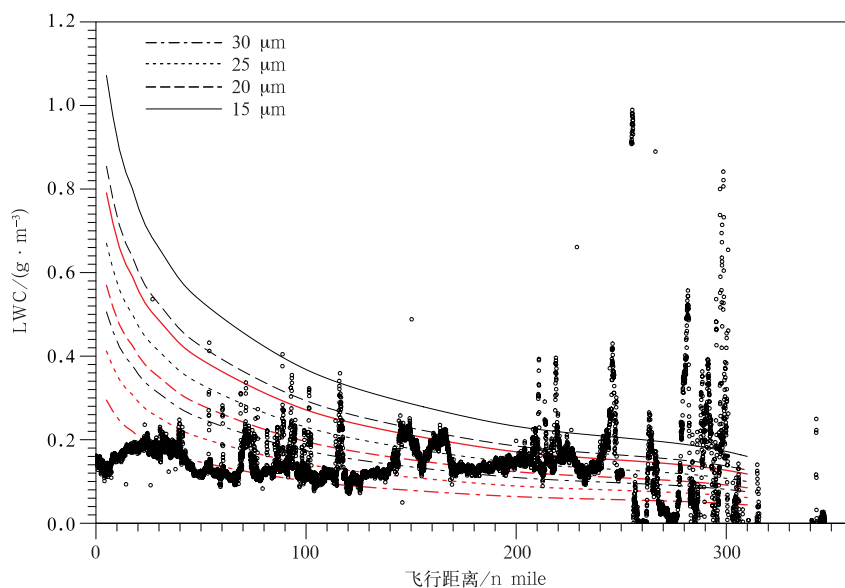
图 9 2021 年 5 月 31 日 13:31:22:92

CIP 采集的二维降水粒子图像

Fig. 9 Particle images produced by CIP at 13:31:22:92 BT 31 May 2021

有效直径为 $15 \sim 100 \mu\text{m}$ 的粒子浓度明显偏高, 因此, 虽然航路上的云滴平均有效直径时高时低, 但是航路上的确存在着连续最大(层云)大气结冰条件。

大气最大结冰条件, 对温度、液态水含量和云滴平均有效直径的分布都有要求, 一般需要有更高的过冷水含量。当云层过冷水含量相对较低时, 飞机在云滴平均有效直径更大的环境中飞行更易于产生积冰。



注: 句点表示该时段热线仪每秒测量的液态水含量; 黑线和红线分别代表 0°C 和 -10°C 时对应云滴平均有效直径的距离平均云层最大液态水含量。

图 10 2021 年 5 月 31 日 11:24:11—14:02:16 连续最大(层云)大气结冰条件

Fig. 10 Continuous maximum (stratiform clouds) atmospheric icing conditions during 11:24:11—14:02:16 BT 31 May 2021

3.2 2021年5月31日第二次积冰探测

5月31日17:16起飞,17:35—18:45期间共燃烧14根碘化银烟条进行增雨作业,飞机航线主要位于碘化银播撒区。在飞机积冰探测过程中,飞机外部探测设备表面,发动机出气孔、机身侧面和飞机进气孔结冰,积冰呈揪块样,不透明。

3.2.1 DMT探测设备数据分析

31日17:25:14—20:01:06,飞机探测的环境气温低于 0°C ,19:30:00后的云中粒子数明显减少, $\text{LWC} < 0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,对这部分数据不进行分析。如图11所示,17:26:56—17:46:23和17:53:22—19:30:00,飞机在3.5 km高度平飞,平均大气压力

642 hPa,空气密度为 $0.836 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;17:48:42—17:50:47,飞机平飞高度约为4.16 km。飞机积冰的环境温度为 $-5 \sim -4^{\circ}\text{C}$,温度露点差低于 1°C 时,相对湿度大于90%(最高达到95%~100%),飞机速度为 $57 \sim 79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

空气垂直速度在零值附近波动(图12),一般不超过 $\pm 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,数值大小受飞机垂直位移影响显著。在整个探测过程中,垂直速度与飞机在垂直方向的位移是相反的,飞机上升时垂直速度是负值,飞机降低高度时,垂直速度为正值。

如图13所示,5月31日17:25:14—17:41:57测量的平均LWC为 $1.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,环境温度露点差低于 0°C (图11),水汽压大于饱和水汽压,空气过饱

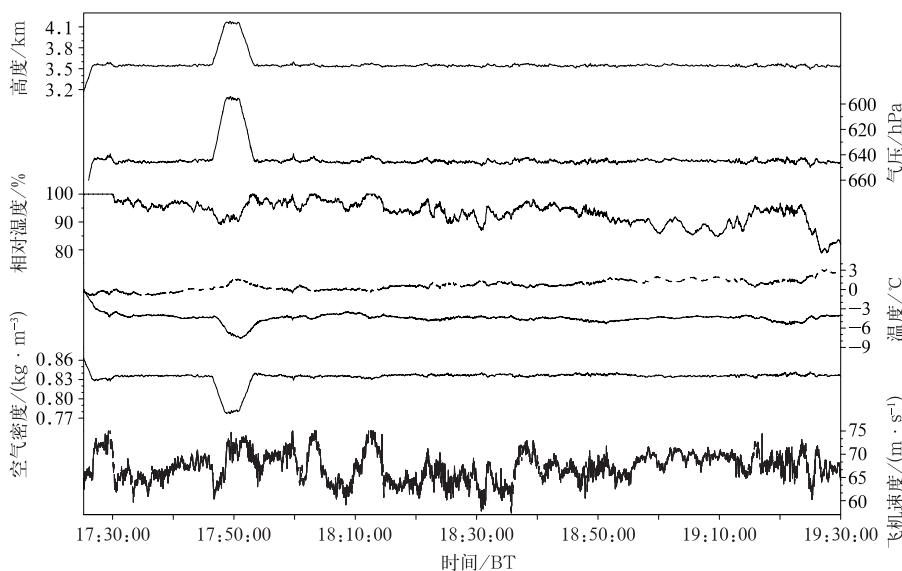


图11 2021年5月31日17:25:14—19:30:00机载探测设备每秒测量的海拔高度、气压、相对湿度、温度(实线)和温度露点差(虚线)、空气密度和飞机速度

Fig. 11 The onboard equipments-measured 1 second altitude, pressure, relative humidity, temperature (solid line) and the difference between temperature and dewpoint (dashed line), air density and flying speed of aircraft during 17:25:14—19:30:00 BT 31 May 2021

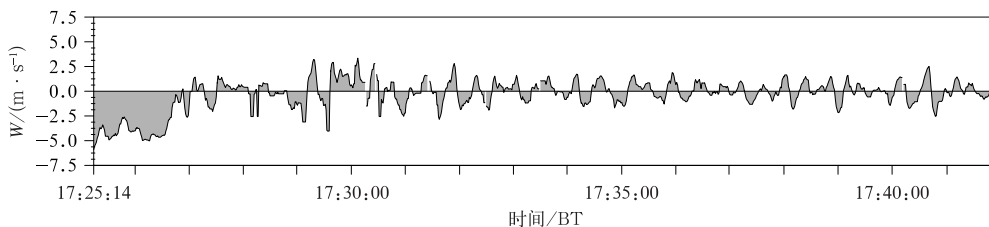
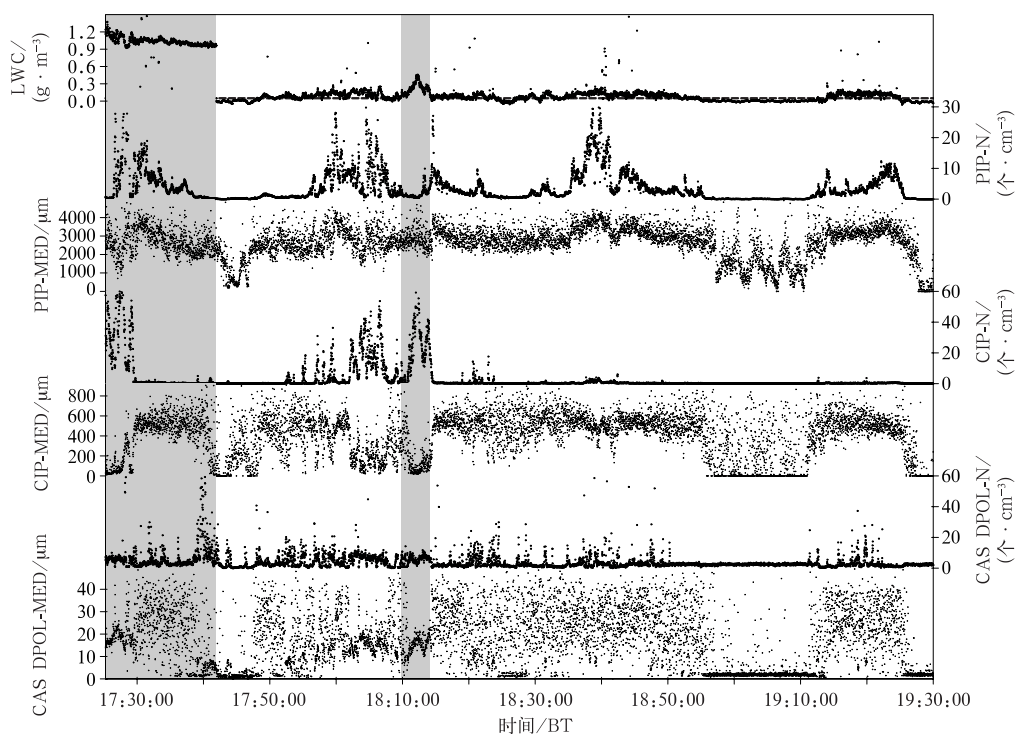


图12 2021年5月31日17:25:14—17:41:57 AIMMS-20测量的大气垂直速度

Fig. 12 Air vertical velocity measured by the AIMMS-20 during 17:25:14—17:41:57 BT 31 May 2021



注:灰色阴影区表示 LWC 高值时段。

图 13 2021 年 5 月 31 日 17:25:14—19:30:00 机载探测设备每秒测量的液态水含量 (虚线: $LWC=0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 等值线)、粒子浓度和云滴平均有效直径

Fig. 13 The onboard equipments-measured 1 second LWC (dashed line: $LWC=0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$), cloud particle number concentration and the mean effective diameter of cloud drops during 17:25:14—19:30:00 BT 31 May 2021

和,各设备都探测到高值的粒子浓度,随机人员反映结冰速度特别快;17:41:58—19:30:00 探测的 LWC 普遍较低,去除负值和零值后的平均 LWC 为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

17:25:14—19:30:00,把 PIP、CIP 和 CAS DPOL 测量的云滴数据组合在一起,如图 14 所示,粒子尺度分布显示出对流天气特有的尺度不连续特征。选取 17:25:14—17:29:59 和 18:00:44—18:42:39 期间 $LWC \geq 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的云滴谱特征进行分析表明,高值液态水含量时所显示的云滴平均有效直径集中在 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

3.2.2 云和降水粒子图像分析

DMT 探测设备计时范围为 17:14:05—20:03:33,测得的气温变化范围为 $-7.59 \sim 10.21^\circ\text{C}$ 。对 PIP 采集的粒子图像进行选择举例,温度范围为 $-7.46 \sim 4.25^\circ\text{C}$,如图 15 所示,在气温为 4.25°C 时,云中为液态雨滴; $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 时,雨滴和形状不规则的未完全融化冰块共存,能够看到大块的冰水聚合物; $-1 \sim -2^\circ\text{C}$ 时,云中存在大量球形冰粒;针形和柱形冰粒主要

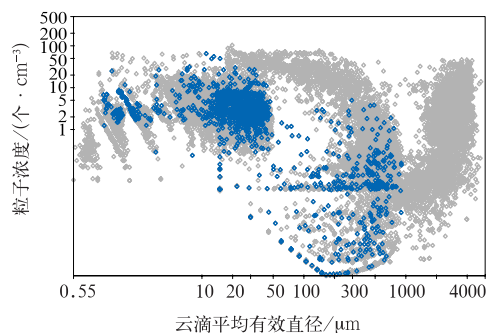
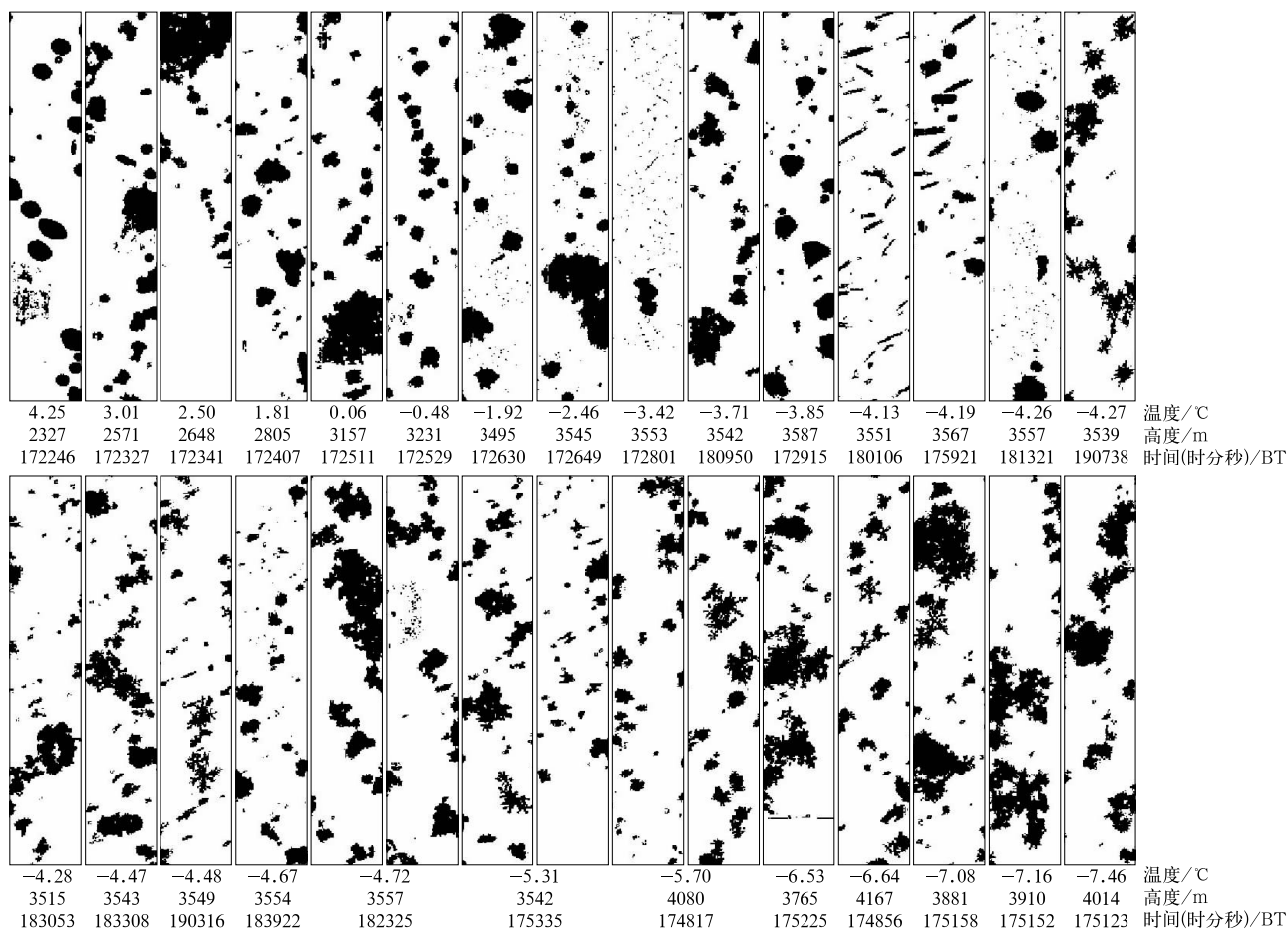


图 14 2021 年 5 月 31 日 17:25:14—19:30:00(灰色)和 17:25:14—17:29:59,18:00:44—18:42:39 (蓝色,取 $LWC \geq 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的测量值) PIP、CIP 和 CAS DPOL 测量的云粒子浓度随云滴平均有效直径的变化

Fig. 14 The PIP, CIP and CAS DPOL-measured cloud particle number concentration changing with the mean effective diameter of cloud drops during 17:25:14—19:30:00 BT (grey) and 17:25:14—17:29:59 BT, 18:00:44—18:42:39 BT (blue, $LWC \geq 0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) on 31 May 2021



注:图像下方标注了图像采集时刻的温度、飞机高度和图像采集时间。

图 15 2021 年 5 月 31 日 17:22:46—19:07:38 PIP 采集的二维降水粒子图像

Fig. 15 Particle images produced by PIP during 17:22:46—19:07:38 BT 31 May 2021

分布在 $-6\sim-4^{\circ}\text{C}$,球形冰粒在温度为 $-6\sim 2^{\circ}\text{C}$ 的范围内都能看到,单片的雪花出现在气温低于 -4°C 的云内环境中。下午,云层中的粒子直径明显增大,在低于 -4°C 的环境条件下,直径为 $0.5\sim 1.2\text{ mm}$ 结构密实边缘融化的球形冰粒,与雪花、针形和柱形冰粒,及其他球形冰粒之间相互碰并粘附增长(图 15, 18:30:53, 19:07:38 的粒子图像),云层中的冰晶粒子存在显著的淞附增长过程。17:25:14—17:41:57, LWC 高时,云中主要分布着 $2.0\sim 2.5\text{ mm}$ 的软雹, CIP 图像上看到的仍然是高浓度的过冷云滴和微小冰粒(图 16),几个大粒子是冰晶,同时出现飞机机身结冰,说明飞行环境中存在过冷水,飞机是在混合相态的云层中飞行。

3.2.3 大气结冰条件分析

随着飞机在云中有效飞行距离($\text{LWC}\geq 0.05\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$)的增加,飞机自然结冰对过冷水含量的要求降

低。17:25:14—17:41:57,在过饱和大气环境中的

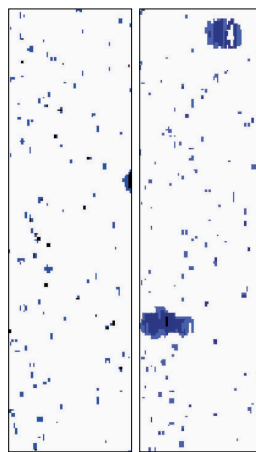


图 16 2021 年 5 月 31 日 17:29:03:27

CIP 采集的二维降水粒子图像

Fig. 16 Particle images produced by CIP at 17:29:03:27 BT 31 May 2021

液态水含量可能满足间歇最大(积云)大气结冰条件;17:41:58—19:30:00,探测的 LWC 普遍较低,去除负值和零值后的平均 LWC 为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

4 结 论

2021年5月,呼伦贝尔市在高空冷涡天气系统中进行了7个架次飞机积冰探测,其中重度飞机积冰出现在高空冷涡的东南象限。本文通过对飞机携带的 DMT 探测设备取得的资料进行分析,得到了飞行环境的高度、温度、湿度、空气密度和气压等物理量,以及飞机速度、云层液态水含量、云粒子图像、云滴浓度和尺度等方面的特征,结合人工拍摄的影像资料,分析了飞机结冰的特征和机制,对大气结冰条件进行了讨论;为了更好地保障飞行安全,本文还使用了欧洲中期天气预报中心数值预报产品、卫星遥感和探空资料等,对飞机结冰探测的环境场特征进行了分析。得到的主要结论有:

(1)做飞机积冰测试,从飞机起飞到安全降落的全过程,需要防范出现强对流、强风切变和强天气引发低能见度的风险。在高空冷涡东南部进行飞机积冰试验,以下环境场条件可供参考:①不出现深对流,云顶高度不超过 11.3 km ;②对流不稳定能量 $\text{CAPE} \leq 236 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, 500 hPa 和 850 hPa 两个气压层的温差 $T_{500-850} \geq -31.2^\circ\text{C}$;③低压中心海平面气压 3 h 变压低于 2.5 hPa , 12 h 平均变压低于 0.6 hPa ,地面低压中心气压持续下降的程度远小于爆发性气旋;④ 300 hPa 高度急流轴心风速为 $50 \sim 55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,飞机距离高空强风剪切的位置大于 45 km 。

(2)5月31日2个架次飞机探测的巡航高度为 $3.5 \sim 4.2 \text{ km}$,环境气温为 $-8 \sim -4^\circ\text{C}$,飞机速度为 $57 \sim 79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。热线仪测量的 LWC,在低值时段的平均值为 $0.08 \sim 0.15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$;在高值时段的平均值达到 $0.25 \sim 1.04 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,主要来自高浓度的过冷云滴,导致飞机外壳出现瞬时积冰。液态水含量高值时段,云滴平均有效直径为 $15 \sim 100 \mu\text{m}$ 的粒子浓度显著偏高,达到 $100 \sim 200 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

(3)飞机采集到冷涡东南象限航线上的云层粒子图像,有雨滴,软雹,球形、线形和柱形冰粒,及雪花等,云粒子增长方式主要表现为碰并聚合和淞附增长。下午,飞机探测设备测量到的云粒子直径明显增大,在 $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 的环境大气中,存在未完全融化

的冰块和冰水聚合物。

(4)5月31日,第一架次飞行,通过增加飞行距离能够满足连续(层云)大气结冰条件;第二架次飞行,在过饱和大气环境中飞机结冰速度很快,可能满足间歇(积云)大气结冰条件。

(5)对飞机积冰程度的评估要求在探测过程中对同一结冰部位每5分钟进行一次拍摄取证,在飞机结冰取证方面需要进一步的完善;云层 LWC 是云物理研究的重要内容,可以同时使用多个设备进行测量。本文对飞机结冰的特征和机制进行了初步的讨论,探测设备测量的云滴平均有效直径反映了粒子尺度的平均效果,云层过冷水含量与云滴直径分布情况的联系有待进行更细致的计算和研究。

致谢:感谢中国科学院大气物理所黄敏松老师指导完成了 DMT 探测设备简表,提供了 CIP 粒子图像。

参考文献

- 白婷,黄毅梅,樊奇,2020.河南一次降水天气过程人工增雨作业条件综合分析[J].气象,46(12):1633-1640. Bai T, Huang Y M, Fan Q, 2020. Comprehensive analysis on the conditions of artificial precipitation enhancement during a precipitation weather process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 46(12):1633-1640 (in Chinese).
- 蔡兆鑫,蔡森,李培仁,等,2021.华北地区一次气溶胶与浅积云微物理特性的飞机观测研究[J].大气科学,45(2):393-406. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al, 2021. An in-situ case study on micro physical properties of aerosol and shallow cumulus clouds in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):393-406(in Chinese).
- 曹丽霞,纪飞,刘健文,等,2004.云微物理参数在飞机积冰分析和预报中的应用研究[J].气象,30(6):8-12. Cao L X, Ji F, Liu J W, et al, 2004. On application of cloud microphysical parameters to aircraft icing forecasting[J]. Meteor Mon, 30(6):8-12(in Chinese).
- 陈跃,马培民,游来光,1989.飞机积冰环境下的液态水含量及滴谱个例分析[J].气象,15(4):24-28. Chen Y, Ma P M, You L G, 1989. A case study of droplet spectra and liquid water content measurements in aircraft icing environments[J]. Meteor Mon, 15(4):24-28(in Chinese).
- 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. Chi Z P, 2007. Statistical analysis and numerical prediction experiment of weather conditions for aircraft icing[J]. Meteor Sci Technol, 35(5):714-718(in Chinese).
- 范烨,郭学良,张佃国,等,2010.北京及周边地区2004年8、9月层积云结构及谱分析飞机探测研究[J].大气科学,34(6):1187-1200. Fan Y, Guo X L, Zhang D G, et al, 2010. Airborne particle measuring system measurement on structure and size distribution of stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas[J]. Chin J Atmos Sci, 34(6):

- 1187-1200(in Chinese).
- 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 Q J, Niu S J, Hou T J, et al, 2021. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall cloud in Shanxi Province[J]. Chin J Atmos Sci, 45(5): 1146-1160(in Chinese).
- 金华,王广河,游来光,等,2006.河南春季一次层状云降水云物理结构分析[J].气象,32(10):3-10. Jin H, Wang G H, You L G, et al, 2006. On physical structure of stratiform cloud during a precipitation process in Henan Province[J]. Meteor Mon, 32(10): 3-10(in Chinese).
- 李佰平,戴建华,孙敏,等,2018.一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究[J].气象,44(11):1377-1390. Li B P, Dai J H, Sun M, et al, 2018. An improved aircraft natural icing potential algorithm[J]. Meteor Mon, 44(11): 1377-1390(in Chinese).
- 李子良,黄仪方,2008.重力惯性波及其不稳定-急流附近飞机颠簸产生的可能机制[J].高原气象,27(4):859-865. Li Z L, Huang Y F, 2008. Gravity wave and inertial instability-possible mechanism of atmospheric turbulence and airplane bumps[J]. Plateau Meteor, 27(4): 859-865(in Chinese).
- 廖捷,任芝花,2011.我国飞机观测气温和常规高空观测气温的对比分析[J].气象,37(3):263-269. Liao J, Ren Z H, 2011. Comparative analysis on aircraft and radiosonde temperatures in China[J]. Meteor Mon, 37(3): 263-269(in Chinese).
- 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 P, Guo X L, Lu G X, 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]. Chin J Atmos Sci, 43(6): 1365-1384(in Chinese).
- 孙晶,蔡森,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 J, Cai M, Wang F, et al, 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area[J]. Meteor Mon, 45(10): 1341-1351(in Chinese).
- 孙艳辉,李泽椿,寿绍文,2012.2007年3月3—5日辽宁省暴雪和大风天气的中尺度分析[J].气象学报,70(5):936-948. Sun Y H, Li Z C, Shou S W, 2012. A mesoscale analysis of the snowstorm event of 3—5 March 2007 in Liaoning Province[J]. Acta Meteor Sin, 70(5): 936-948(in Chinese).
- 孙艳辉,李泽椿,寿绍文,2017.东北地区两次历史罕见暴风雪天气过程的分析[J].高原气象,36(2):549-561. Sun Y H, Li Z C, Shou S W, 2017. Analysis of two cases of extremely severe snowstorms in Northeast China[J]. Plateau Meteor, 36(2): 549-561(in Chinese).
- 王磊,李成才,赵增亮,等,2014.飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J].气象,40(2):196-205. Wang L, Li C C, Zhao Z L, et al, 2014. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon, 40(2): 196-205(in Chinese).
- 汪学林,陆煜钧,李占柱,等,1982.河套低压降水性层状云的云雨特征[J].大气科学,6(4):432-441. Wang X L, Lu Y J, Li Z Z, et al, 1982. The characteristics of cloud and precipitation for precipitus stratiform cloud in He-Tao cyclone[J]. Chin J Atmos Sci, 6(4): 432-441(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 J F, Hu X F, Lei H C, et al, 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang Mountains[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1): 88-106(in Chinese).
- 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等,2005.河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J].高原气象,24(1):84-90. Yang W X, Niu S J, Wei J G, et al, 2005. Airborne observation for microphysical structure of precipitation system of stratiform cloud in Hebei Province[J]. Plateau Meteor, 24(1): 84-90(in Chinese).
- 叶家东,范蓓芬, Cotton W R, 等, 1992. 一个缓慢移动的中尺度对流复合体内层状降水区的微结构分析[J]. 大气科学, 16(4): 464-475. Ye J D, Fan B F, Cotton W R, et al, 1992. Microphysical structure in the stratiform cloud region of a slow-moving MCC[J]. Chin J Atmos Sci, 16(4): 464-475(in Chinese).
- 周星旭,李昀英,张潮,2023.飞机积冰预报方法及应用场景研究[J].气象,49(4):415-426. Zhou X X, Li Y Y, Zhang C, 2023. Study on the forecasting method and application scenario of aircraft icing[J]. Meteor Mon, 49(4): 415-426(in Chinese).
- Hobbs P V, Rangno A L, 1985. Ice particle concentrations in clouds[J]. J Atmos Sci, 42(23): 2523-2549.
- Jeck R K, 2002. Icing design envelopes (14 CFR Parts 25 and 29, Appendix C) converted to a distance-based format[R]. U. S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.
- Minser E J, 1938. Studies of synoptic free-air conditions for icing of aircraft[J]. Bull Am Meteor Soc, 19(3): 111-122.
- Politovich M K, 1989. Aircraft icing caused by large supercooled droplets[J]. J Appl Meteor Climatol, 28(9): 856-868.
- Riley J A, 1937. Aircraft icing zones on the Oakland-Cheyenne airway[J]. Mon Wea Rev, 65(3): 104-108.
- Sand W R, Cooper W A, Politovich M K, et al, 1984. Icing conditions encountered by a research aircraft[J]. J Appl Meteor Climatol, 23(10): 1427-1440.
- Schultz P, Politovich M K, 1992. Toward the improvement of aircraft-icing forecasts for the continental United States[J]. Wea Forecasting, 7(3): 491-500.
- Tattelman P, 1982. An objective method for measuring surface ice accretion[J]. J Appl Meteor Climatol, 21(4): 599-612.

(本文责编:俞卫平 王蕾)