

四川盆地一次飞机积冰的云微物理特征研究

袁 敏, 张云峰, 马琳辉, 王 超

(中国民用航空飞行学院 航空气象学院, 四川 广汉 618307)

摘要:飞机积冰严重威胁飞行安全,其形成受到云中微物理特征及过程的影响和制约,因此研究积冰的微物理环境有重要的意义。利用 DMT 公司生产的机载粒子探测设备,计算探测的云粒子数浓度、平均体积直径和液水含量等物理量,分析 2015 年 12 月 13 日四川盆地的一次飞机积冰云系的微物理特征。结果表明:云系可分为 3 层,其中上层云和中层云的过冷水含量丰富,分别超过 0.1 g/m^3 和 0.25 g/m^3 ,上层云云滴数浓度大,云滴较小,中层云云滴数浓度较小,云滴较大;积冰发生的高度上,过冷水含量丰富,但随时间变化较大,最大值超过 0.35 g/m^3 ,冰晶浓度较低,有利于过冷水的维持。

关键词:飞机积冰;微物理;过冷水滴

中图分类号:V321.229 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)07-0263-05

飞机积冰对安全飞行产生严重威胁,会恶化空气动力性能,降低发动机等动力装置的效率。当飞机在空中遇到结冰气象条件时,机翼表面会发生结冰现象,从而改变机翼的气动外形,导致升力下降、阻力升高,影响飞行安全^[1]。飞机积冰是由于云中或降水中的过冷水碰到机体后冻结而成,其形成受到云中微物理特征及过程的影响和制约。气象部门进行人工影响天气作业时,机载云粒子激光测量系统可以直接探测到云中的微物理参数,是开展飞机积冰云微物理特征研究的重要手段^[2]。陈跃等^[3]利用 PMS 公司的机载粒子探头分析了 1986—1987 年冬季运 12 飞机在新疆地区积冰试验时的云中含水量、中值体积直径和云滴谱等特征。王磊等^[4]利用 PMS 公司的机载粒子探头对 2005—2006 年北京地区 7 个飞机积冰个例的云相态、液水含量、中值体积直径和过冷大滴浓度等云微物理特征进行了统计分析。袁敏等^[5]利用 DMT 公司的机载粒子探头分析了 2014 年 3 月 12 日宜昌非降水云系发生轻度积冰的云微物理特征。孙晶等^[6]利用 DMT 分析了安庆地区一次飞机积冰探测试验的微观结构特征。

以上研究结果表明,积冰微物理特征的时空差

异较大。本文针对四川省气象局提供的 2015 年 12 月 13 日发生在四川盆地的一次飞机积冰事件,利用机载粒子探测资料和云粒子计算方法,对该积冰云系的微观物理特征进行分析研究。

1 资料与方法

1.1 探测仪器

本文使用的飞行探测仪器是由美国 DMT 公司生产的机载探测设备,包括云滴探头(CDP),探测范围为 $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$,分为 30 档,前 12 档分辨率为 $1\text{ }\mu\text{m}$,后 18 档分辨率为 $2\text{ }\mu\text{m}$;二维云粒子图像探头(CIP),探测范围为 $25\sim 1\,550\text{ }\mu\text{m}$,分为 62 档,分辨率为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。CDP 用于测量云粒子谱,CIP 用于测量大云粒子谱及二维图像,还使用了常规气象探头 AIMMS-20,记录了湿度、温度、GPS 定位、空速等信息。

1.2 资料处理方法

按照以下方法对探测的云粒子进行计算和统计,得到了数浓度、平均体积直径和液水含量等微物理量。

粒子平均体积直径:

$$D_v^3 = \frac{1}{N} \int_0^\infty D_i^3 n(D_i) dD_i \quad (1)$$

粒子数浓度:

收稿日期:2022-11-23

基金项目:国家自然科学基金民航联合研究基金项目(U1333130);国家重点研发计划“交通基础设施”重点专项 2021 年“揭榜挂帅”榜单项目(2021YFB2601701-01);四川省科技计划项目(2022NSFSC1149)。

作者简介:袁敏(1982—),男,云南大理人,中国民航飞行学院航空气象学院,副教授,博士,研究方向为航空气象;张云峰(1996—),男,河南漯河人,中国民用航空飞行学院航空气象学院,硕士研究生,研究方向为飞机积冰;马琳辉(1997—),女,陕西渭南人,中国民用航空飞行学院航空气象学院,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理;王超(1990—),男,安徽池州人,中国民用航空飞行学院航空气象学院,讲师,博士,研究方向为旱涝异常、飞机积冰。

$$N(D_i) = n(D_i)/(V\Delta D) \tag{2}$$

粒子总数:

$$N = \sum_{i=1}^{30} [n(D_i)V] \tag{3}$$

液水含量:

$$C_{lw} = \frac{\pi}{6}\rho \times 10^{-12} \sum_{i=1}^{30} [D_i^3 n(D_i)\Delta D] \tag{4}$$

取样体积:

$$V = S_E T_{AS} T \tag{5}$$

式中: D_i 为*i*档云粒子的中值直径, μm ; $N(D_i)$ 为单位体内*i*档云粒子的数浓度, $\text{cm}^3/\mu\text{m}$; N 为单位体积内云粒子总数, cm^3 ; 各档谱分布用 $N(D_i)\Delta D$ 表示; V 为有效取样体积, cm^3 ; $n(D_i)$ 为 1 帧内*i*档云粒子的个数; T_{AS} 为飞机的真空速; S_E 为仪器的有效取样面积; T 为每帧谱数据的取样时间。由于 CIP 的探测范围与 CDP 有重复,剔除了 CIP 前 3 档 ($25\sim100\ \mu\text{m}$) 的数据,以免误差较大造成结果干扰。并以 CDP 粒子数浓度大于 $10\ \text{cm}^3$ 和等效液水含量大于 $10^{-3}\ \text{g}/\text{m}^3$ 作为入云判断标准^[7]。

2 积冰云系微物理特征

2.1 天气情况

GPS 测量的航迹(图 1)和飞行高度温度图(图 2)综合显示,2015 年 12 月 13 日 18:48 飞机在机场起飞后上升至海拔高度 2 350 m 进行平飞探测,然后向东南方向上升到 4 000 m 后下降至 3 650 m进行了 1 h 的平飞探测,然后向北下降高度,分别在 3 050、2 470、2 000 m 进行平飞探测,整个飞行历时 2 h40 min。

分析天气形势(图 3)可知,500 hPa 上,四川地区位于低压槽底部,受西风控制,700 hPa 相对湿度较大,飞机探测的地区高达 80%~90%,表明低层水汽充足湿度大。风云卫星云顶亮温产品(图 4)显示飞行探测区

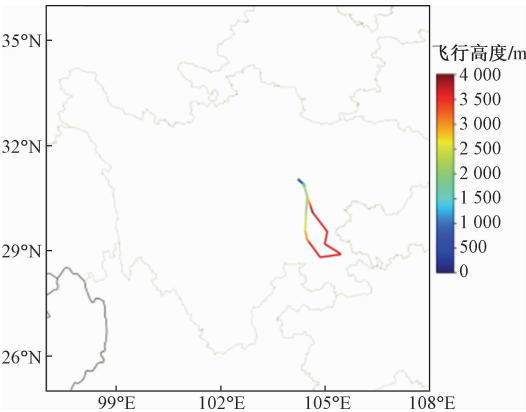


图 1 飞行轨迹

域云顶温度较为均匀,大约在 250~260 K,以层状云为主,风云卫星云分类产品显示该区域为层积云。

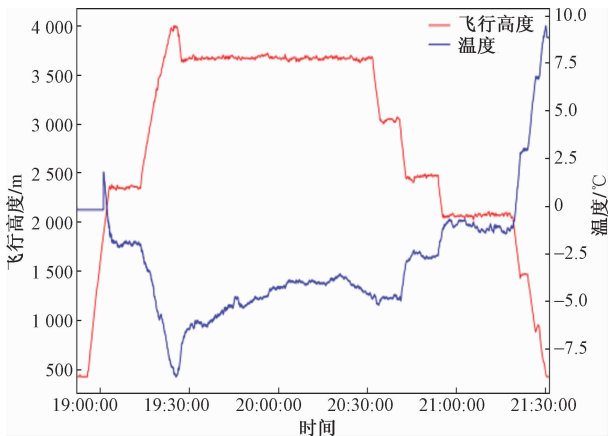


图 2 飞行高度和温度的时间变化

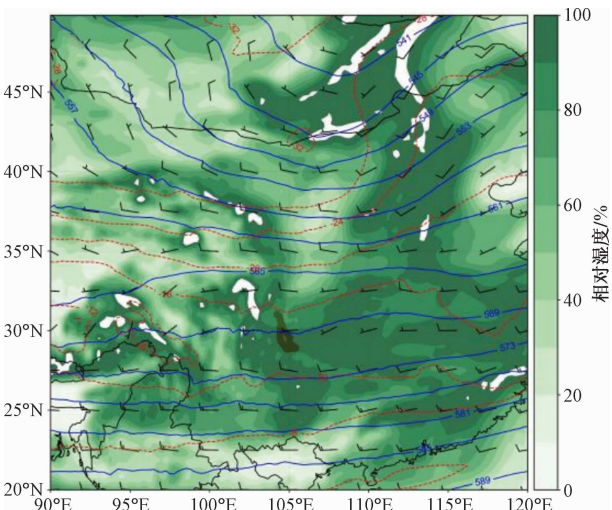
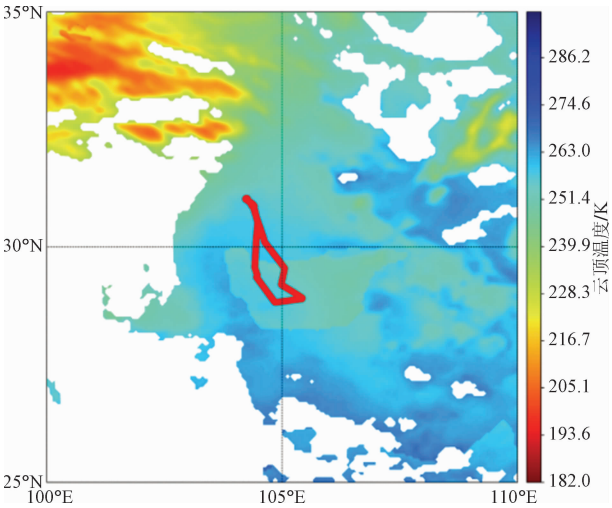


图 3 2015 年 12 月 13 日 20 时 ECWMF 在分析资料 500 hPa 位势高度(蓝线)、风场和 700 hPa(阴影)相对湿度叠加图



图中红线为飞行轨迹

图 4 2015 年 12 月 13 日 20 时风云卫星云顶温度

2.2 垂直特征

图 5 为整个飞行阶段温度、CDP 和 CIP 探测的
微物理量 10 m 平均的垂直分布。由图 5(a)可知,
0℃层位于 2 100 m 左右的高度。从 CDP 垂直分
布可看出[图 5(b)],云系大致分为 3 层,其中下层
云 2 400~2 600 m、中层云 2 900~3 500 m,上层云
3 650~4 000 m,3 层云均在 0℃层以上,属于冷云。
上层云的 CDP 粒子数浓度(Conc)较大,最大
值超过 2 000 cm⁻³,中层云和下层云 CDP 粒子数浓
度较小,最大值低于 1 000 cm⁻³。中层云的 CDP 粒
子平均体积直径(Mvd)较大,最大数值接近 20 μm,
上层云和下层云的较小,低于 10 μm。由 CDP 等效

水含量垂直分布可看出,中层云中的过冷水含量较
大,最大值出现在 3 400 m 左右高度,数值超过
0.2 g/m³,下层云和上层云过冷水含量较小,数值
低于 0.1 g/m³。CDP 云滴谱显示[图 5(d)],上层
云和下层云的谱宽较窄,为单峰结构,峰值小于
10 μm,以小云滴为主,中层云谱宽较宽,大致为双
峰结构,峰值出现在 5 μm 和 20 μm,云滴存在碰并
过程。图 5(c)为 CIP 探测的直径大于 100 μm 的
微物理量的垂直分布,图中可以看出上层云和下层云
CIP 数浓度较小,数值低于 5 L⁻¹,表明冰晶含量较
小,中层云 CIP 数浓度随高度升高而减小,最大值
接近 20 L⁻¹。

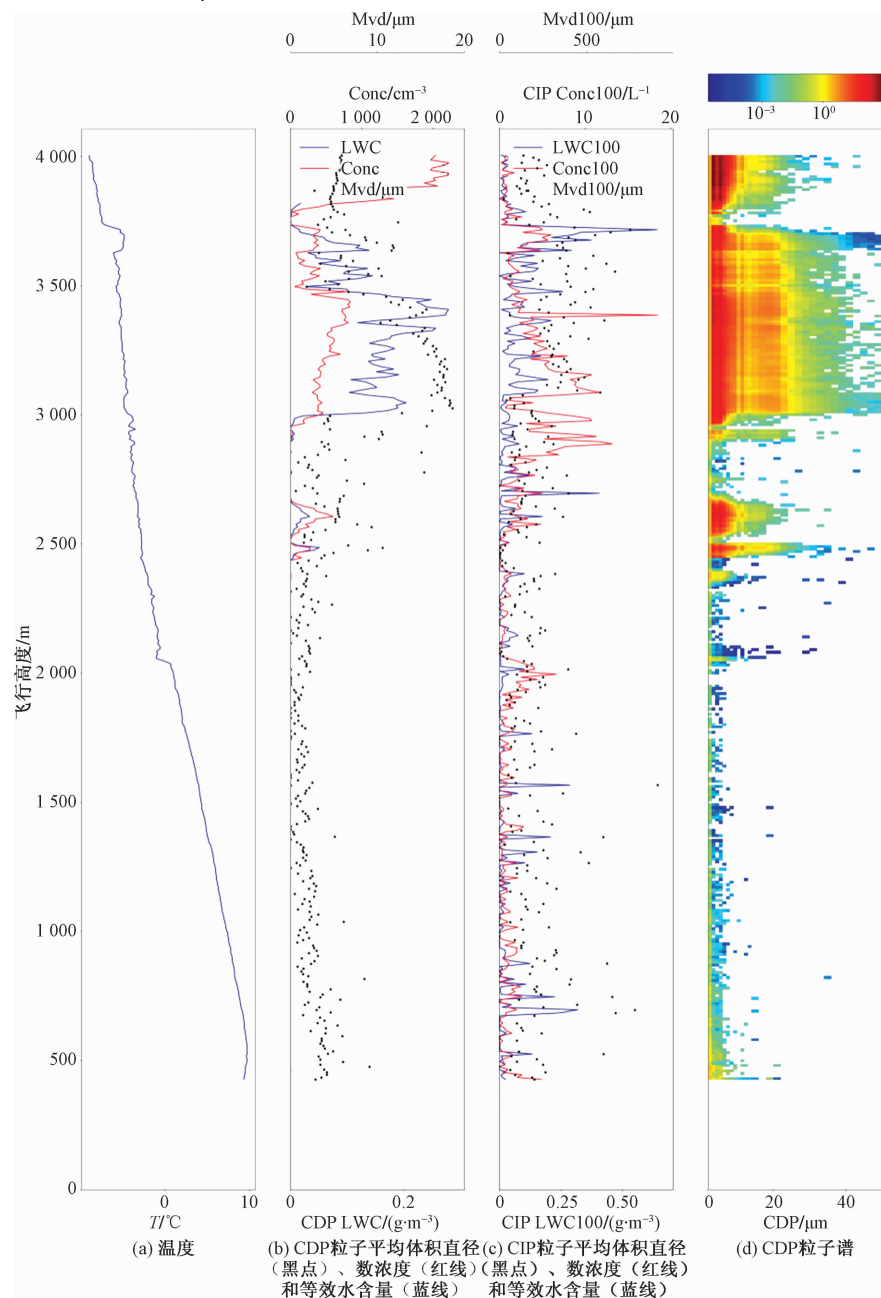


图 5 整个飞行阶段微物理量垂直分布

2.3 水平特征

由以上分析可知,飞机在中层云 3 650 m 高度进行了长时间平飞探测,此高度 CDP 探测的过冷水含量丰富,是发生飞机积冰的有利条件,以下就这个高度的微物理特征进行分析。由图 6(a)可知,此高度的温度范围为 $-4.8\sim-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。图 6(b)显

示,CDP 平均体积直径变化范围为 $5\sim15\text{ }\mu\text{m}$ 。CDP 数浓度最大值接近 $1\,500\text{ cm}^{-3}$,CDP 等效含水量最大值可达 0.35 g/m^3 以上,过冷水含量丰富。CDP 粒子谱显示[图 6(d)]谱呈双峰分布,CIP 探测的冰晶数浓度变化较大,大部分时间浓度低于 20 L^{-1} ,有利于过冷水的维持[图 6(c)]。

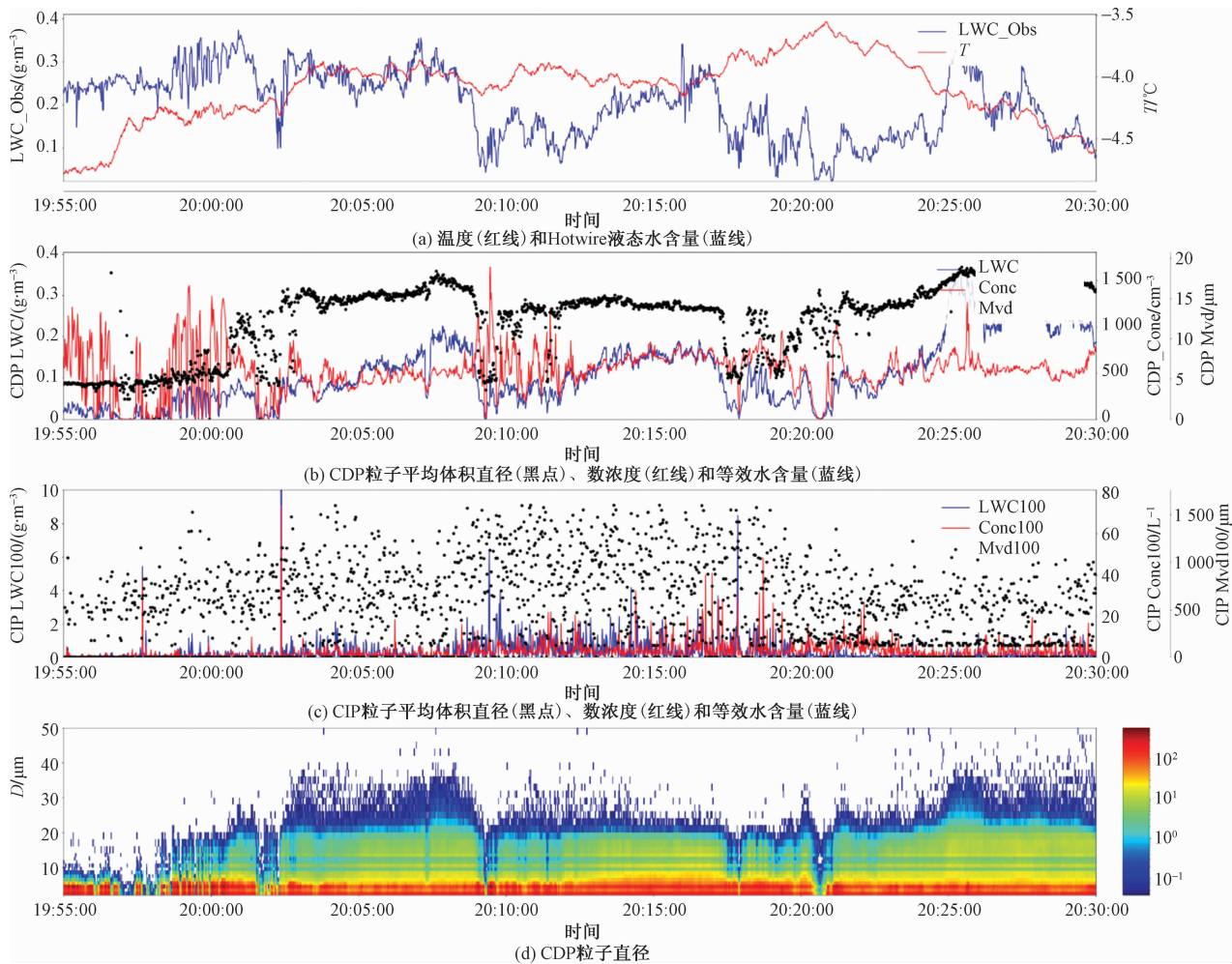


图 6 3 650 m 高度平飞探测的各物理量时间变化序列

3 结束语

本文利用机载粒子探测资料和云粒子计算方法,计算了飞机积冰云系的云粒子的数浓度、平均体积直径和液水含量等微物理量,该方法剔除了 CIP 前 3 档的数据,能更准确反映过冷水的信息。计算结果显示,此次积冰云系的云粒子浓度大,冰晶浓度较低,过冷水含量丰富,是发生飞机积冰的有利环境。

参考文献

[1] 姜寒,朱春玲.后掠翼结冰数值模拟及实验研究[J]. 科学与技术,2021,21(21):9123-9128.
[2] 郭学良,付丹红,郭欣,等.我国云降水物理飞机观测研究

进展[J].应用气象学报,2021,32(6):641-652.
[3] 陈跃,马培民,游来光.飞机积冰环境下的液态水含量及滴谱个例分析[J]. 气象,1989,15(4):24-28.
[4] 王磊,李成才,赵增亮,等.飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J]. 气象,2014,40(2):196-205.
[5] 袁敏,黄敏松,段炼.一次飞机积冰环境中的云微物理特征[J]. 气象科技,2018,46(1):170-177.
[6] 孙晶,蔡森,王飞,等.安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象,2019,45(10):1341-1351.
[7] RANGNO A L, HOBBS P V. Microstructures and precipitation development in cumulus and small cumulonimbus clouds over the warm pool of the tropical Pacific Ocean [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 131: 639-673.

A Case Study of Microphysical Properties in Aircraft Icing in Sichuan Basin

YUAN Min, ZHANG Yunfeng, MA Linhui, WANG Chao

(School of Aeronautical Meteorology, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, Sichuan, China)

Abstract: Aircraft icing accumulation is a serious threat to flight safety, and its formation is influenced and constrained by microphysical features and processes in clouds, so it is important to study the microphysical environment of ice accumulation. Using airborne particle detection equipment produced by DMT, physical quantities such as detected cloud particle number concentration, average volume diameter and liquid water content were calculated to analyze the microphysical characteristics of an aircraft cumulus cloud system in the Sichuan Basin on December 13, 2015. The results show that the cloud system can be divided into three layers, among which the upper and middle clouds are rich in supercooled water content, exceeding 0.1 g/m^3 and 0.25 g/m^3 , respectively, with large cloud droplet number concentration and smaller cloud droplets in the upper layer and smaller cloud droplet number concentration and larger cloud droplets in the middle layer. Ice accumulation occurs at heights where supercooled water is abundant but varies greatly with time, with a maximum value of more than 0.35 g/m^3 and a low concentration of ice crystals, which is conducive to the maintenance of supercooled water.

Keywords: aircraft icing; microphysics; supercooled water