

一次飞机积冰环境中的云微物理特征

袁敏¹ 黄敏松² 段炼¹

(1 中国民用航空飞行学院空中交通管理学院, 广汉 618307; 2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029)

摘要 2014 年 3 月 12 日利用机载粒子探头(DMT)对我国宜昌及周边地区的非降水云系进行了探测时发现了少量的飞机积冰,本文分析了积冰云层中云微物理量的分布特征。垂直平均分布表明,CAS、CIP 和 PIP 粒子数浓度分别大于 $300 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、 $1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $10^{-5} \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,粒子中值直径最大值分别为 $3 \mu\text{m}$ 、 $89 \mu\text{m}$ 和 $1389 \mu\text{m}$ 。谱分布表明,3650 m 高度重力碰并和淞附过程使得 CIP 和 PIP 粒子谱较宽,3650 m 以下谱宽较窄,粒子以凝结增长为主,大粒子和冰晶粒子主要是由高层下落造成。平飞观测统计表明,3350 m 的 CAS 和 CIP 粒子平均数浓度均大于 3650 m 的值,但 PIP 粒子数浓度、粒子平均和最大中值直径则相反。平飞时间变化表明,3350 m 高度 CAS 粒子数浓度和直径大致呈反相关,3650 m 大云滴和冰雪晶粒子的数浓度和中值直径随时间波动较大。

关键词 飞机积冰;数浓度;中值直径;等效液水含量;谱分布

中图分类号: P426 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20170069 **文献标识码:** A

引言

飞机积冰严重危害飞行安全,它恶化飞机的空气动力学性能,减小升力,增大阻力,轻则影响飞机的稳定性和操纵性,重则导致机毁人亡的恶性事故。据统计,1982—2000 年,共有 800 多人死于与飞机积冰有关的事故^[1]。我国通用航空事业正处于飞速发展期,飞机遭遇积冰的概率必然会比以往增多,飞机积冰的问题越来越受到重视。

飞机积冰是由云中或降水中的过冷水滴与机体相碰冻结而成,积冰强度与过冷水滴的浓度、大小及含量密切相关,因此飞机探测所得的各种微物理量数据是研究飞机积冰最有效和可靠的方式。国外有关飞机积冰的研究开展得较早,从上世纪中期开始,美国对自然环境中的飞机积冰及其对飞行的影响做了大量的探测和理论研究^[2-7],制定了飞机自然积冰环境中的飞行标准^[8],要求飞机制造商在飞机设计和制造中,必须满足此标准。国内,陈跃等^[9]在上世纪 80 年代分析了新疆地区冬季飞机积冰环境中的液态水含量、体积中值直径和滴谱等微物理参数

特征。王磊等^[10]利用有积冰报告的飞机探测资料,分析了积冰云的微物理特征。刘烈霜等^[11]用 AM-DAR 资料诊断分析了贵阳机场飞机报告的两次强积冰过程。虽然国内专门对飞机积冰微物理环境的研究相对较少,但对于飞机积冰密切相关的过冷水云的理论研究,已经积累了大量的工作^[12-16],对层状云模型及其中过冷水层的形成也有不断的认识和发展^[17-21]。

对于降水云中过冷水以及降水云积冰的研究已经积累了大量的工作,而对非降水云中飞机积冰的研究却开展得较少。2014 年 3 月 12 日,一架装有 DMT 粒子测量系统的飞机对湖北宜昌等地的非降水云进行了飞行探测,在探测过程中发现机身上出现了少量的冰层。本文利用探测资料对此次非降水云系积冰过程的云结构和粒子谱分布进行了分析,揭示该云系自然积冰形成的物理过程。

1 探测飞行概况及云系宏观结构特征

1.1 探测飞行概况

本次飞行使用的探测仪器为美国 DMT 公司生

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家自然科学基金(U1333130,41775166,41705142),中国民用航空飞行学院项目(J2009-12,ZJ2014-02)资助

作者简介:袁敏,男,1982 年生,博士,讲师,主要从事飞行气象环境研究,Email: yuanm@aliyun.com

收稿日期:2017 年 2 月 13 日;定稿日期:2017 年 8 月 11 日

产的机载粒子探测设备。包括云和气溶胶粒子探头 (Cloud Aerosol Spectrometer, CAS) 和二维云粒子图像探头 (Cloud Imaging Probe, CIP), 其中 CAS 探头的探测范围为 $0.61\sim50\text{ }\mu\text{m}$, 分为 30 个档, CIP 探头的测量范围为 $25\sim1550\text{ }\mu\text{m}$, 分为 62 个档, 分辨率为 $25\text{ }\mu\text{m}$ 。降水粒子探头 (Precipitation Imaging Probe, PIP) 测量范围为 $100\sim6200\text{ }\mu\text{m}$, 分为 62 个档, 分辨率为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 。常规气象探头 (AIMMS-20) 记录温度、湿度、气压、GPS 定位等。另外还装有 Hotwire_LWC 热线含水量仪、露点仪等设备, 所有设备采样数量的频率为 1 次/s。其中

Hot_LWC 热线含水量仪不能正常工作, 无法得到液水含量的数据。

2014 年 3 月 12 日 11:31, GPS 测量的航迹 (图 1a) 显示, 飞机从宜昌机场起飞后向北盘旋上升至海拔高度 2750 m 进行第 1 次平飞探测, 随后向南飞行, 在 3050 m 和 3350 m 上分别进行了 2 次平飞探测, 到达湖南石门县境内的实验区后实施分层东西巡回垂直探测飞行, 在 3650 m、3350 m 和 3050 m 进行了 6 次平飞探测, 最后向北返回机场。这次探测飞行共耗时 2 h 42 min, 在此期间, 观察到机身表面出现少量积冰。

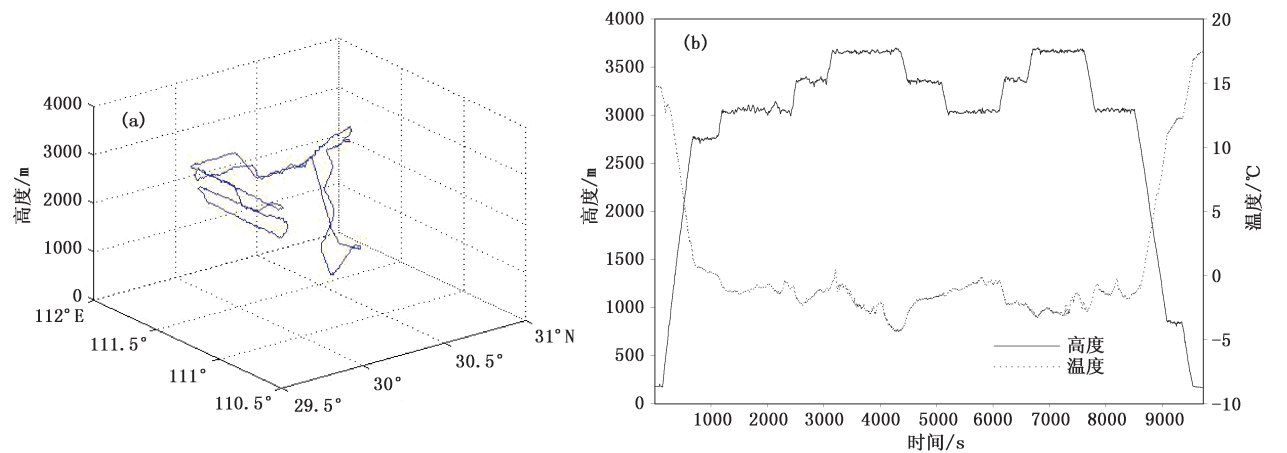


图 1 2014 年 3 月 12 日飞行 GPS 航迹图(a)、飞行高度与温度的时间变化序列(b)

1.2 云系宏观结构特征

观测记录表明, 云系分为 2 层, 下层云底出现在约 2800 m, 云厚约 100~200 m, 3200 m 以上为上层云, 3000~3200 m 为干层。图 1b 显示, 飞机在 2750 m、3050 m、3350 m 和 3650 m 进行了 9 次平飞探测, 从各层平飞探测的时段、高度、云层位置及温度的分布 (表 1) 可看出, 1 次平飞探测位于 2750 m 的下层云中, 温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属于暖云; 3 次平飞探测发生在 3050 m 的干层; 5 次平飞探测位于 3350 m 和 3650 m 的上层云中, 整个上层云系都位于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层以上, 因此可推断飞机积冰就是发生在上层云中。

2 云微物理量垂直分布特征

2.1 粒子浓度

计算了 CAS、CIP 和 PIP 探头所测粒子数浓度每百米平均的垂直分布, CAS 小云滴粒子数浓度随高度的分布 (图 2a) 显示, 2600 m 以下基本小于

表 1 各层平飞探测的时间段、高度、云层位置和温度范围

平飞探测时段/s	高度/m	云层位置	温度/ $^{\circ}\text{C}$
668~922	2750	下层云	$0.3\sim1.9$
1190~2428	3050	干层	$-1.5\sim-0.4$
2510~3052	3350	上层云云底	$-1.7\sim-0.9$
3145~4369	3650	上层云云中	$-4.5\sim-0.45$
4497~5029	3350	上层云云底	$-2.9\sim-1.6$
5187~6116	3050	干层	$-1.5\sim-0.1$
6212~6598	3350	上层云云底	$-2.4\sim-1.9$
6696~7618	3650	上层云云中	$-3.3\sim-1.3$
7812~8511	3050	干层	$-1.8\sim-0.2$

$10\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$, 下层云和上层云中迅速增加, 2800 m 和 3300 m 分别出现 $233\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $395\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的最大值, 整个上层云的值都大于 $300\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。CIP 大云滴粒子数浓度的垂直分布表明 (图 2b), 从

2600 m 粒子数浓度迅速增加,在下层云中的 2900 m 高度达到 $0.03 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,干层中有所减少,上层云中 3600 m 出现最大值 $2.48 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。图 2c 为降水粒子探头 PIP 粒子数浓度随高度分布,由于该云系为非降水云系,因此 PIP 探测的为冰雪晶粒子。

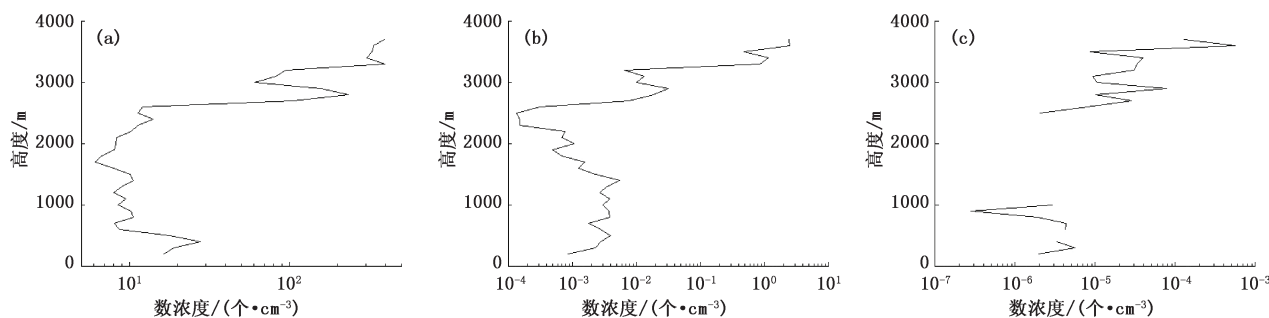


图2 2014年3月12日飞机探测的粒子数浓度随高度分布:(a)CAS;(b)CIP;(c)PIP

2.2 粒子中值直径

CAS 粒子中值直径随高度的分布可看出(图 3a),3200 m 高度以下云滴中值直径约 $1 \mu\text{m}$,从 3300 m 的上层云开始增加,最大值接近 $3 \mu\text{m}$,出现在 3600 m。CIP 大云滴粒子中值直径随高度的分布图显示(图 3b),从 2600 m 开始粒子中值直径开

始迅速增大,下层云中 2900 m 高度和上层云中 3600 m 高度达到 2 个最大值 $56 \mu\text{m}$ 和 $89 \mu\text{m}$,3000 ~ 3500 m 随高度有波动,数值在 $10 \sim 30 \mu\text{m}$ 之间。PIP 粒子中值直径随高度分布显示(图 3c),2900 m 出现 $542 \mu\text{m}$ 的次峰值,3400 m 开始随高度迅速增加,3700 m 达到最大值 $1389 \mu\text{m}$ 。

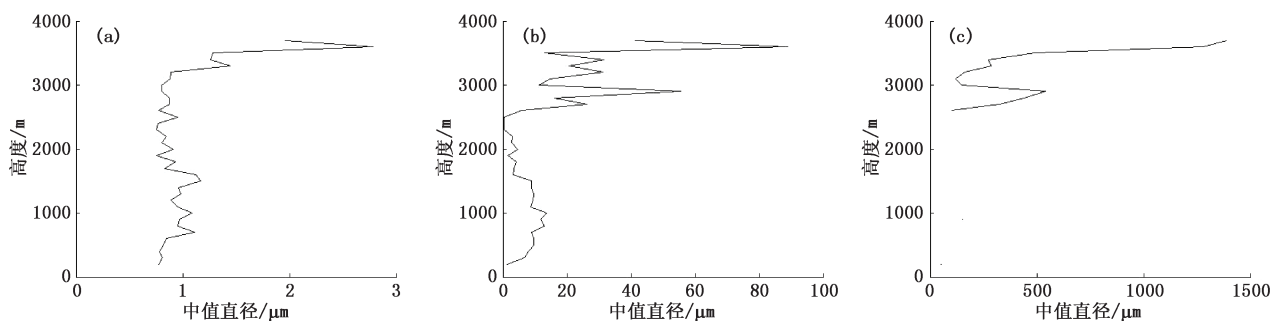


图3 2014年3月12日飞机探测的粒子中值直径随高度分布:(a)CAS;(b)CIP;(c)PIP

2.3 等效水含量

CAS、CIP 和 PIP 等效液水含量随高度的分布(图 4)与数浓度分布十分类似,2 者峰值出现高度大致相同。其中 CAS 等效水含量在 2600 m 以上迅速增加,2800~2900 m 之间等效水含量达到 $10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上,3600 m 高度达到峰值 $8.3 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。CIP 等效水含量在 2900 m 达到 $2.2 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,3600 m 达到峰值 $0.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。PIP 等效水含量在 2900 m 高度达到 $3.8 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,3600 m 高度达到峰值 $0.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.4 粒子尺度谱的垂直分布

选取下层云底部(2750 m)、下层云云中(2820 m、2860 m、2900 m)、干层(3000 m、3200 m)、上层云(3300 m、3380 m、3550 m、3650 m)的多个高度进行粒子谱分析(各高度取 10 m 范围的平均值)。CAS 粒子谱显示(图 5a),下层云底部(2750 m)和中部(2820 m)的粒子谱都为双峰分布,2 μm 附近为第 1 峰值,7 μm 附近出现第 2 峰值,云中部的粒子浓度比云底大 1 个量级,3000 m 干层的谱宽明显变窄且不连续,粒子浓度显著下降,上层云中(3300 m)粒子谱为负指数型,3650 m 上为双峰型,

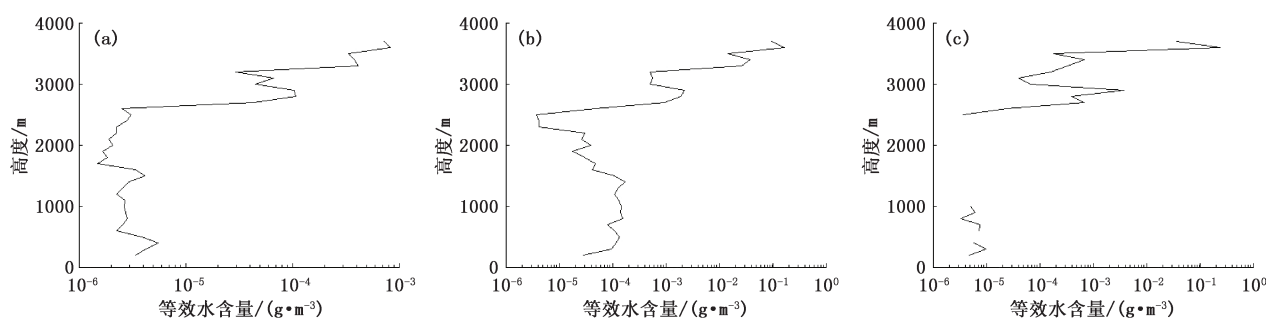
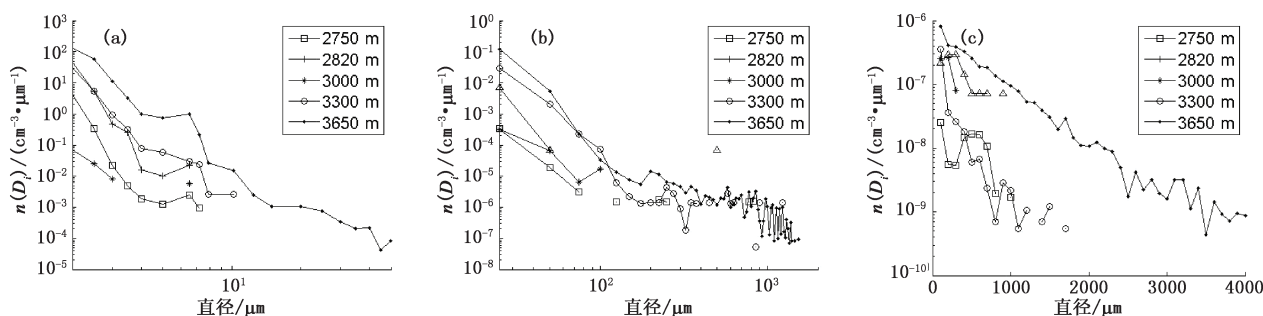


图 4 飞机探测的等效水含量随高度分布:(a)CAS;(b)CIP;(c)PIP

图 5 各高度上不同探头探测的粒子谱 $n(D)$ 分布:(a)CAS;(b)CIP;(c)PIP

主峰值和次峰值分别出现在 $2\ \mu\text{m}$ 和 $7\ \mu\text{m}$ 附近,谱宽显著变宽,最大谱宽达 $40\ \mu\text{m}$ 。CIP 粒子谱显示(图 5b),下层云底部(2750 m)粒子谱为负指数型且谱宽不连续,下层云云中(2860 m)粒子数浓度显著增加但谱宽很窄,集中在 $20\sim 50\ \mu\text{m}$,大多为小云滴,干层(3200 m)的粒子数浓度比下层云云中下降 1 个量级,上层云(3380 m 和 3650 m)谱宽显著增宽,谱宽达 $1000\ \mu\text{m}$,谱型为呈多峰型,大云滴的数浓度也显著增加。图 5c 为 PIP 冰雪晶粒子的谱分布,下层云底部(2750 m)的粒子谱为双峰型,峰值出现在 $100\ \mu\text{m}$ 和 $500\ \mu\text{m}$ 附近,下层云云中(2900 m)粒子谱为单峰型,浓度峰值比云底部大 1 个量级,干层(3000 m)的谱宽很窄,上层云(3550 m)谱宽大于 $1500\ \mu\text{m}$,但谱型不连续。3650 m 高度谱宽显著增宽,谱型为呈多峰型,粒子浓度也达到最高值。

3650 m 高度上 3 种粒子谱宽都比较连续,此时直径较大的过冷大云滴通过重力碰并增长,冰晶通过与过冷水滴碰并增长,因此 CIP 和 PIP 的谱宽都比较宽。3650 m 以下的各高度,从 CAS 谱分布可

知谱宽不到 $10\ \mu\text{m}$,为小云滴粒子,云滴增长以凝结增长为主,很难形成大云滴,因此大粒子和冰晶粒子主要是由高层下落造成。

3 积冰云层微物理量水平分布特征

由上文可知,飞机在 2750 m、3050 m、3350 m 和 3650 m 进行了 9 次平飞探测,选取发生积冰的 3350 m 和 3650 m,分析积冰环境的微物理参数。表 2 列出了 2 次平飞探测的粒子数浓度、中值直径和等效液水含量的统计特征值。由表 2 可看出,CAS 小云滴粒子和 CIP 大云滴粒子平均数浓度在 3350 m 上分别为 $553\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $2.54\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,均大于 3650 m 的值,但 3650 m 的 CAS 和 CIP 数值波动较大,最大值分别为 $889\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $17.1\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,3350 m 的 PIP 冰雪晶粒子平均浓度比 3650 m 低 1 个量级。3650 m 3 个探头探测的粒子平均和最大中值直径都大于 3350 m 的值。3350 m 的 CAS 平均等效水含量大于 3650 m 高度的值,而 CIP 和 PIP 则和 CSA 相反。

表 2 3350 m 和 3650 m 飞机平飞探测数据统计

高度	温度	探头	N_{ave}	N_{max}	D_{ave}	D_{max}	LWC_{ave}	LWC_{max}
m	℃		个·cm ⁻³	个·cm ⁻³	μm	μm	g·m ⁻³	g·m ⁻³
3350	-2.9~-1.6	CAS	553	815	1.75	4.39	7.56×10^{-4}	2.17×10^{-3}
		CIP	2.54	9.83	20	1280	7.97×10^{-2}	0.983
		PIP	3.28×10^{-5}	6.42×10^{-4}	53	550	7.59×10^{-5}	2.8×10^{-3}
3650	-4.5~0.45	CAS	339	889	2.58	46.9	7.02×10^{-4}	1.53×10^{-2}
		CIP	1.95	17.1	74.2	1510	0.12	6.41
		PIP	3.98×10^{-4}	1.54×10^{-2}	131	5212	0.146	15.2

注: N_{ave} 和 N_{max} 为平均和最大数浓度, D_{ave} 和 D_{max} 为平均和最大粒子中值直径, LWC_{ave} 和 LWC_{max} 为平均和最大等效液水含量。

从 3350 m 平飞探测的各物理量随时间变化可看出, 温度范围为 $-2.9 \sim -1.6$ ℃ (图 6e), CAS 粒子中值直径大都为 $1 \sim 3$ μm 之间的小粒子 (图 6c), CAS 粒子数浓度最小值为 66 个·cm⁻³, 最大值为 815 个·cm⁻³ (图 6a), 粒子数浓度和粒子直径大致呈反相关, CIP 粒子数浓度在 10 个·cm⁻³ 以下波动 (图 6b), 中值直径大都低于 25 μm (图 6d)。CIP 二维粒子图像显示 (图 8a) 此高度粒子直径大都小于 25 μm (当前粒子图像包含约 2 粒子, 每个粒子直径

低于 25 μm)。3650 m 平飞探测的各物理量随时间变化发现, 温度范围介于 $-4.5 \sim 0.45$ ℃ 之间 (图 7e), CAS 和 CIP 粒子数浓度在 3400 s 之后增大, 最大值分别为 889 个·cm⁻³ 和 17 个·cm⁻³ 左右 (图 7a、b), 粒子中值直径大值出现在 $3150 \sim 3300$ s 之间, 数值分别大于 40 μm 和 1500 μm。CIP 二维粒子图像显示 (图 8b) 此高度以冰雪晶粒子为主 (当前粒子直径达 925 μm, 37 slices $\times$ 25 μm)。

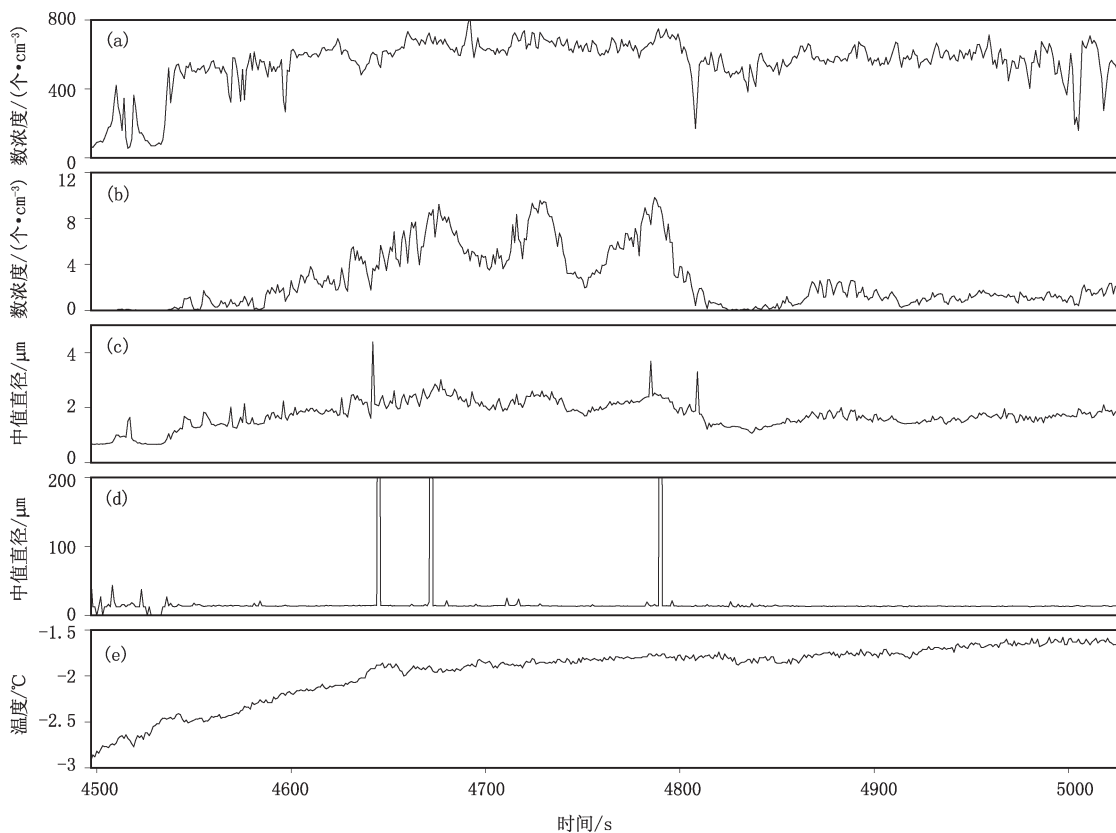


图 6 3350 m 高度飞机平飞探测的各物理量时间变化序列:

(a)CAS 数浓度;(b)CIP 数浓度;(c)CAS 中值直径;(d)CIP 中值直径;(e)温度

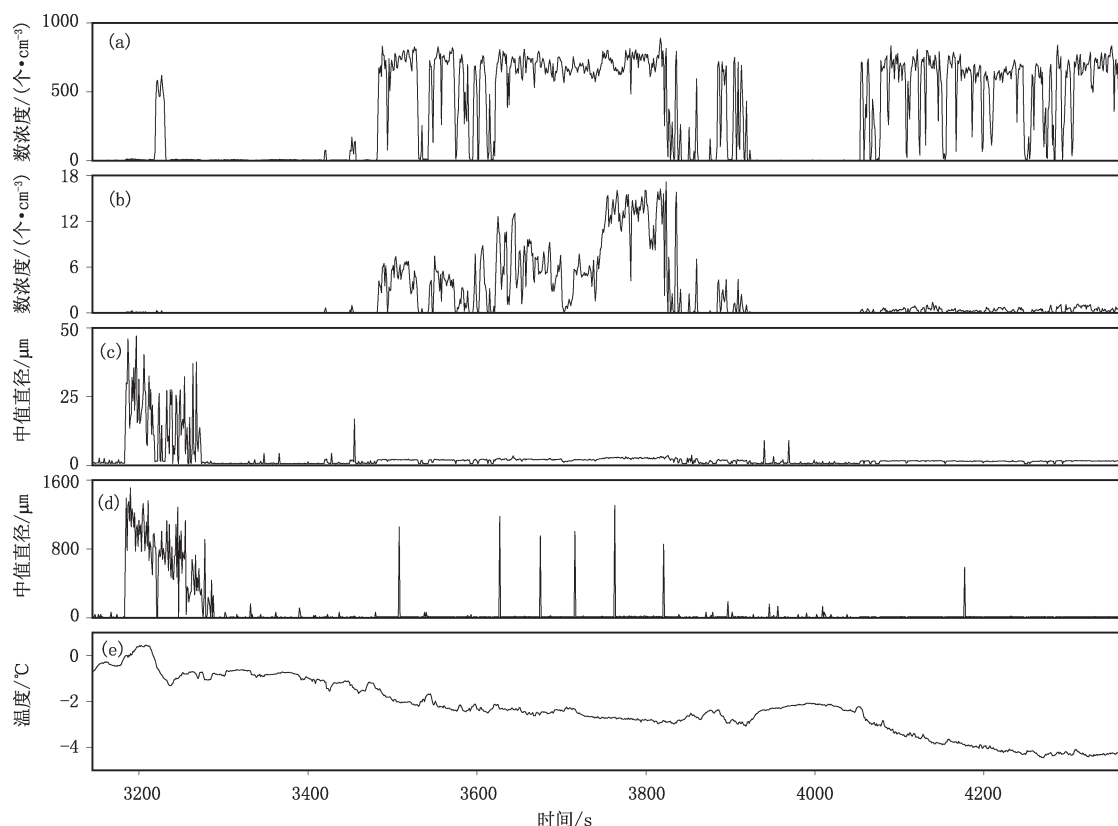


图 7 3650 m 高度飞机平飞探测的各物理量时间变化序列:
(a)CAS 数浓度;(b)CIP 数浓度;(c)CAS 中值直径;(d)CIP 中值直径;(e)温度

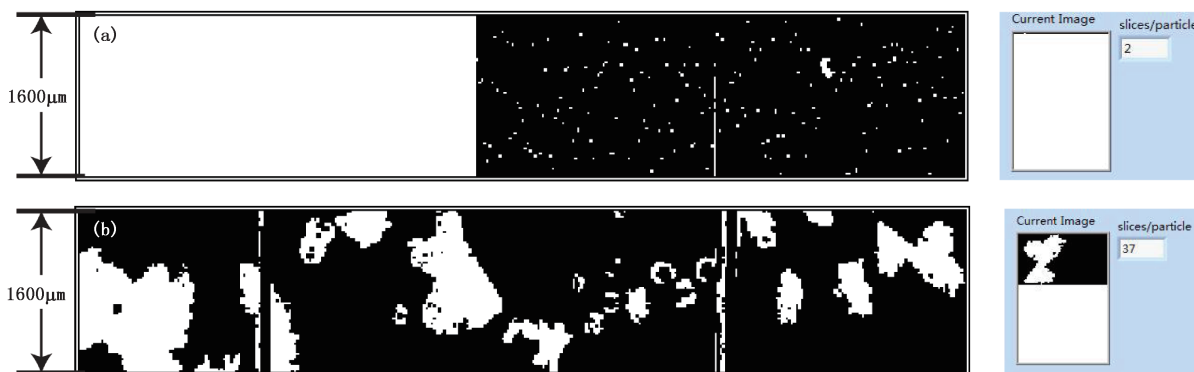


图 8 平飞探测时段中 CIP 探测的粒子二维图像:(a)3350 m;(b)3650 m
(图像宽度为 1600 μm ,白色为粒子图像,Current Image 为当前粒子图像,slices/particle 为当前粒子的直径(1 slices=25 μm))

4 结论

(1)发生飞机积冰的上层云中,CAS 粒子数浓度大于 $300 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,粒子中值直径介于 $1 \sim 3 \mu\text{m}$ 之间,等效水含量超过 $3.0 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。CIP 粒子数浓度大于 $1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,粒子中值直径在 3600 m 达到最大值 $89 \mu\text{m}$,等效水含量大于 $1.0 \times 10^{-2} \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。PIP 粒子数浓度在 3600 m 高度达到

最大值 $5.56 \times 10^{-4} \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,中值直径在 3700 m 高度达到最大值 $1389 \mu\text{m}$,等效水含量在 3600 m 达到峰值 $0.24 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2)3650 m 高度 3 种粒子谱宽较宽且较连续,重力碰并增长和淞附过程形成大云滴和冰晶粒子,3650 m 以下谱宽较窄,粒子以凝结增长为主,大云滴和冰晶粒子主要由高层下落造成。

(3)平飞观测统计表明,3350 m 的 CAS 和 CIP 粒子平均数浓度均大于 3650 m 的值,但 PIP 相反。3650 m 上 3 种粒子平均和最大中值直径均大于 3350 m。等效水含量在 2 层的特征与数浓度一致。平飞探测随的时间变化序列表明,3350 m 上 CAS 粒子数浓度和直径大致呈反相关,3650 m 有大云滴和冰雪晶粒子,粒子数浓度和中值直径随时间波动较大。

(4)由于本文研究的是非降水云系中的积冰,过冷水滴的直径和等效水含量比其他研究结果偏低。另外,积冰与温度关系密切,但本文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的相关结论。

参考文献

- [1] Bellucci M, Vernillo P, Auletta A, et al. SONACA icing Test Campaign on a 2D Model at CIRA IWT [M]// Translation in the Digital Age Routledge, 2007: 657-663.
- [2] Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al. Current icing potential: Algorithm description and comparison with aircraft observations [J]. Journal of Applied Meteorology, 2005, 44(7): 969-986.
- [3] Bernstein B C, Omeron T A, Politovich M K, et al. Surface weather features associated with freezing precipitation and severe in-flight aircraft icing [J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1): 57-73.
- [4] Politovich M K. Response of a research aircraft to icing and evaluation of severity indices [J]. Journal of aircraft, 1996, 33(2): 291-297.
- [5] Isaac G A, Cober S G, Strapp J W, et al. Recent Canadian research on aircraft in-flight icing [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 2001, 47(3): 213-221.
- [6] Cober S G, Isaac G A. Characterization of aircraft icing environments with supercooled large drops for application to commercial aircraft certification [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(2): 265-284.
- [7] Marwitz J. Comments on "Characterization of Aircraft Icing Environments with Supercooled Large Drops for Application to Commercial Aircraft Certification" [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(7): 1670-1672.
- [8] Federal Aviation Administration. U. S. Code of Federal Regulations, Title 14 (Aeronautics and Space), Part 25 (Airworthiness Standard; Transport Category Airplanes), Appendix C [S]. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration, U S Government Printing Office, Washington D C, 20402-9328, 1999.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘烈霜, 金山, 刘开宇. 用 AMDAR 资料分析两次强飞机积冰过程[J]. 气象科技, 2013, 41(4): 764-770.
- [12] 顾震潮. 云雾降水物理基础[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 219.
- [13] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.
- [14] 洪延超, 雷恒池. 云降水物理和人工影响天气研究进展和思考[J]. 气候与环境研究, 2012, 17(6): 951-967.
- [15] 郭学良, 付丹红, 胡朝霞. 云降水物理与人工影响天气研究进展(2008~2012年)[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 351-363.
- [16] 孙鸿娉, 李培仁, 闫世明, 等. 山西省 2008—2010 年 64 架次飞机云物理观测结果分析[J]. 气象科技, 2014, 42(4): 682-689.
- [17] 游来光, 马培民, 胡志晋. 北方层状云人工降水试验研究[J]. 气象科技, 2002, 30(增刊): 19-56.
- [18] 洪延超, 周非非. "催化—供给"云降水形成机理的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2005, 29(6): 885-896.
- [19] 周非非. 层状云系人工增雨潜力的数值研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005.
- [20] 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究[J]. 大气科学, 2007, 31(3): 425-439.
- [21] 赵震, 雷恒池. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 323-334.

A Case Study of Microphysical Properties in Aircraft Icing Environment

Yuan Min¹ Huang Minsong² Duan Lian¹

(1 College of Air Traffic Management, Civil Aviation Flight University of China, Sichuan, Guanghan 618307;

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract: By using the probe of DMT (Droplet Measurement Technologies), the aircraft icing in non-precipitation clouds on 12 April in 2014 over Yichang and its surrounding areas were probed. The vertical distributions show that the number concentrations of CAS (Cloud Aerosol Spectrometer), CIP (Cloud Imaging Probe) and PIP (Precipitation Imaging Probe) are greater than 300 cm^{-3} , 1 cm^{-3} and 10^{-5} cm^{-3} , respectively. The maximum median diameters are $3 \mu\text{m}$, $89 \mu\text{m}$ and $1389 \mu\text{m}$, respectively. The spectral distribution shows that the gravitational collision and riming processes result in forming a wider spectra at 3650 m, while relatively narrow below 3650 m, where particles grow mainly depend on condensation process, big cloud particles and ice crystals are dropping from upper levels. The horizontal probe shows that the number concentrations of CAS and CIP at 3350 m are greater than those at 3650 m, while the number concentration of PIP, the median diameter and the maximum median diameter are opposite. The time series of horizontal probe show that the number concentration and the median diameter at 3350 m have an inverse relationship, and the number concentration and the median diameter of big cloud particles and ice crystals are fluctuant.

Keywords: aircraft icing; number concentration; median diameter; effective liquid water content; spectral distribution