

河南一次罕见飞机积冰过程云系宏微观特性的综合观测研究

彭冲^{1,2,3}, 宋灿^{1,2,3}, 蔡淼^{2,4}

1 河南省人工影响天气中心, 河南 郑州 450003

2 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081

3 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南 郑州 450003

4 中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

摘要 2018年12月10日, 河南省人工影响天气中心探测到本省飞机增雨有史以来的最强积冰, 积冰出现高度为3600m(-7.9~-12.9°C), 机头及机翼最厚积冰达到16.2cm。利用机载DMT云物理探测资料, 结合FY-4A卫星反演云参数和雷达等综合观测, 对本次过程的云宏、微观结构特征进行了细致分析。结果表明, 此次过程强积冰区域位于700hpa切变线东侧附近, 西南急流持续输送水汽, 且大气有深厚逆温层存在, 有利于水汽和液水的堆积。产生积冰的云系云顶高度约4000~5000m, 云顶温度-15~-20°C, 云光学厚度大于30。FY-4A云顶相态与观测结果较为一致, 对过冷水和飞机积冰区域具有一定指示意义。强积冰区域液水含量丰沛, 最大液态含水量可达 0.818g 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。由于强积冰区域缺少尺度超过毫米量级的冰晶粒子, 其S波段天气雷达回波值较弱, 甚至明显低于非积冰区域。因此在使用天气雷达监测时, 单靠回波强度来判断积冰强度存在一定的局限性。

关键词 飞机积冰 FY-4A 卫星 机载探测 云宏微观特性

Comprehensive study of the cloud macro- and micro- structure of a rare aircraft icing case in Henan

Peng Chong^{1,2}, Song Can^{1,2}, Cai Miao^{2,3}

1 Weather Modification Center of Henan Province, Zhengzhou 450003;

2 Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081;

3 Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard Application Technique CMA, Zhengzhou 450003;

4 Weather Modification Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract The strongest aircraft icing was observed by Henan Weather Modification Center in the history of their precipitation enhancement operation by aircraft on 10 December 2018. The strong icing occurred during 16:16~16:47, at the height of 3600m(-7.9~-12.9°C), with the thickest icing in the nose and wings reaching 16.2 cm. Using the airborne DMT observation, combining with FY4A satellite retrieval cloud parameters and radar observation, the macrostructure and microstructure of cloud was analyzed in detail. The strong ice accretion area was located in front of the 700hpa shear line, and water vapor was transported continuously by the southwest jet stream. Deep inversion layer provided favorable conditions for the accumulation of water vapor and liquid water. In the area with strong icing, the cloud top height(CTH) was about 4000~5000m, and the cloud top temperature(CTT) was in the range of -15~-20°C, and the cloud optical thickness(COT) was larger than 30. FY4A cloud top phase(CTP) production is in good agreement with the observations, which has certain indication significance for

收稿日期 2021-12-22; 网络预出版日期 20xx-xx-xx

作者简介 彭冲, 男, 1988年生, 硕士, 研究方向: 大气物理与大气环境。E-mail: rushpeng@163.com

通讯作者 宋灿, E-mail: songcan94@163.com

资助项目 中国气象局云雾物理环境重点开放实验室开放课题(2017Z016); 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用技术研究基金(KQ202022, KM202220); 国家重点研发计划(2016YFA0601701)共同资助

Funded by Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration (Grant 2017Z016), The Key R&D Program of Henan Province (Grant KQ202022, KM202220), The National Key R&D Program of China (Grant 2016YFA0601701)

39 supercooled water and aircraft icing area. During strong icing period, liquid water content is abundant and the
40 maximum liquid water content reaches up to 0.818 g m^{-3} . The existence of a large number of spherical supercooled
41 droplets and large supercooled droplets with a radius of more than $50 \mu\text{m}$ is important reasons for ice accumulation.
42 Due to the lack of ice crystal particles with scales exceeding the mm scale in the area of strong ice accumulation,
43 the S-band weather radar echo is weak, even significantly lower than that in non-icing areas. When using weather
44 radar for monitoring, there are certain limitations in inferring ice accretion intensity only by the echo intensity.
45 **Keywords** Aircraft icing, FY-4A satellite, Airborne detection, Cloud macro and micro structure

46 1 引言

47 飞机积冰会造成飞行速度降低和飞行姿态不稳定,对飞行安全驾驶造成严重影响,引起了航空和气象
48 界的广泛关注(周莉等,2010;易贤等,2017)。飞机积冰的产生与飞行姿态和气象条件有着密切的联系(李子良,
49 1999;王磊等,2014),其中云中过冷水存在是导致积冰的重要因素,飞机在含有 0°C 以下液态水滴的云中
50 飞行时,水滴在机身表面冻结会形成积冰。因此,对过冷水区的气象条件分析,如:宏观天气系统、大气
51 温湿条件等气象要素以及云宏微观物理特征的研究具有重要意义。

52 锋面天气系统是发生飞机积冰较多的一种天气系统。37 个飞机积冰个例与天气系统关系的研究表明
53 (Bernstein et al., 1997),暖锋前部 $250\sim 600 \text{ km}$ 范围是容易发生积冰的区域。美国科罗拉多东北部地区 1990~
54 1994 年冬季积冰条件观测发现,该地区飞机产生积冰大部分与冷锋天气系统相关(Politovich et al., 2010)。除
55 锋面系统外,空中槽线和切变线也是产生飞机积冰的天气系统(李子良,1999)。飞机积冰通常出现在 $0\sim -12^\circ\text{C}$
56 之间的高湿度区域,且积冰区域通常有上升运动(庞朝云和张逸轩,2008;刘开宇等,2008;陈静和吕环宇,
57 2006;刘烈霜等,2013)。逆温层有利于水汽的堆积,是形成积冰的有利条件(张利平等,2014; Sergio
58 Fern ández-Gonz ález et al., 2014)。

59 除上述大尺度宏观条件,云内含水量的多少以及云滴谱分布情况也会对积冰强度造成影响,因此积冰
60 环境下的云微物理特征的研究十分必要。Cober et al.(1994)利用 31 架次飞机观测资料,分析了飞机积冰环境,
61 发现含有过冷水的云区平均水平尺度为 4.3 km ,平均云滴数浓度约 130 cm^{-3} ,平均液水含量为 0.13 g m^{-3} ,
62 平均有效粒子半径为 $18 \mu\text{m}$ 。研究表明,科罗拉多东北部冬季的过冷水云具有典型冬季大陆层状云特征,粒
63 子半径较小且液水含量较低,造成的积冰多为轻到中度,且多为霜状(Politovich et al., 2010)。在相同含水量
64 情况下,过冷毛毛雨产生的积冰比过冷小云滴更严重,往往会导致明冰(Hansman, 1989)。在含有浓度 $0.1\sim$
65 1 cm^{-3} 的过冷大滴 ($30\sim 400 \mu\text{m}$) 云中飞行不到 10 min 即可造成爬升能力的明显降低(Politovich, 1989)。过
66 冷大滴的形成方式通常有两种:一种是存在逆温层的情况下,冰晶粒子在暖层融化,再次进入温度低于 0°C
67 的区域形成;另一种则是通过云中的凝结和碰撞-凝聚机制形成(Sergio Fern ández-Gonz ález et al., 2014)。Cober
68 et al.(2001)在北美三个不同地理区域的六个实地观测中,从 134 次飞行中收集了包含直径大于 $100\mu\text{m}$ 的过
69 冷大液滴的飞机结冰环境观测结果,指出在温度低于 -13°C 时不需要再考虑冻雨影响。

70 国内学者对积冰环境的云微物理特征也开展了一些研究。陈跃等(1989)对新疆乌鲁木齐地区自然积
71 冰情况下的大气环境进行了探测分析,发现该地区过冷水云的液水含量随高度增加而增加,云顶有逆温层,
72 液水含量最大值出现在云顶附近。袁敏等(2018)对宜昌一次飞机积冰环境的云微物理特征分析发现,云和气
73 溶胶探头(Cloud and Aerosol Spectrometer, CAS)、云粒子图像探头(Cloud Image Probe, CIP)和降水粒子
74 图像探头(Precipitation Image Probe, PIP)探测的粒子数浓度分别大于 300 cm^{-3} 、 1 cm^{-3} 和 5 cm^{-3} ,粒子中
75 值直径的最大值分别为 $3 \mu\text{m}$ 、 $89 \mu\text{m}$ 和 $1389 \mu\text{m}$ 。王磊等(2014)利用北京地区 7 个架次有积冰报告的飞机探
76 测资料,详细分析了不同温度区间内过冷大滴的浓度特征,发现积冰环境下过冷大滴浓度的平均值随温度
77 降低而降低, $0\sim -5^\circ\text{C}$ 间过冷大滴的平均浓度为 5.05 L^{-1} 。杨文霞等(2014,2018)对西风槽过程中降水性层状
78 云的过冷水分布特征的研究表明,槽前云系过冷水区宽厚且过冷水含量较高,其峰值常出现在云内逆温层
79 的上方;利用云粒子探测系统(Particle Measurement System, 简称为 PMS)分析的过冷水云演变特征与卫
80 星和雷达资料具有较高的一致性。针对我国民航 2013~2016 年间的飞机积冰报告数据统计发现,飞机积冰

81 冬季发生次数多，夏季发生次数少，且发生次数最多的高度区间为 2000~6000 m(孟鹏程，2019)。

82 2018 年 12 月 10 日，河南省开展了两架次人工增雨飞机作业，其中下午的飞行探测过程中观测到了本
83 省飞机增雨有史以来的最强积冰。针对本次强积冰事件，本文利用机载云物理探测资料，结合地面和高空
84 观测、FY-4A 卫星反演云产品及天气雷达观测资料，分析了积冰产生的天气形势、云系的宏微观特征以及
85 积冰形成的机制。

86 2 资料、天气形势及飞行概况

87 2.1 资料介绍

88 本文使用的数据包括：2018 年 12 月 10 日 FY-4A 卫星数据、郑州和驻马店多普勒雷达数据(SA 波段)、
89 micaps 数据、L 波段探空秒数据和机载云物理探测数据。其中，机载云物理观测使用高性能 Modern Ark-60
90 增雨飞机，巡航速度约 $100\sim 120\text{m s}^{-1}$ ，机上装载云粒子探测系统(Droplet Measurement Technologies, DMT)，
91 主要包括：(1)飞机综合气象要素测量系统 AIMMS-20(Aircraft Integrated Meteorological Measurement
92 System)，用于测量经纬度、高度、气温、气压、湿度、空速、风速、风向等信息。(2)云粒子探头(Cloud
93 Droplet Probe, CDP)，探测范围为 $2\sim 50\ \mu\text{m}$ ，共有 30 个档位，前 12 档的分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ ，后 18 档的分辨
94 率为 $2\ \mu\text{m}$ ，用于探测云滴粒子。(3)云粒子图像探头(CIP)，探测范围为 $25\sim 1550\ \mu\text{m}$ ，共有 62 个档位，
95 分辨率为 $25\ \mu\text{m}$ ，用于探测冰晶和大云滴。(4)降水粒子图像探头(PIP)，探测范围为 $100\sim 6200\ \mu\text{m}$ ，
96 共有 62 个档位，分辨率为 $100\ \mu\text{m}$ ，用于探测降水粒子。机上还装载了云宏观影像分析设备，包括： 360°
97 全景摄像机、工作环境摄像机、和作业监控摄像机，用于飞行过程中对云宏观尺度、云降水粒子状态、飞
98 机积冰状况和催化剂播撒作业等情况的实时监测。为尽量减少探测过程中仪器自身造成的系统误差，参考
99 McFarquhar and Cober(2004)和 McFarquhar et al(2007)的处理方法，每次探测之前，所有机载设备均经过标定
100 维护。

101 文中使用机载设备参数包括：CDP 探测的粒子数浓度 N_{CDP} (单位： cm^{-3})，CDP 探测粒子谱计算的有效
102 直径 ED_{CDP} (单位： μm)，CDP 探测粒子谱计算的液态含水量 LWC (单位： g m^{-3})；CIP 探测的粒子数
103 浓度 N_{CIP} (单位： cm^{-3})，CIP 探测粒子谱计算的有效直径 ED_{CIP} (单位： μm)；PIP 探测的粒子数浓度 N_{PIP}
104 (单位： cm^{-3})。

105 2.2 天气形势及飞行概况

106 2018 年 12 月 10 日的天气形势分析表明，本次过程河南省主要受高空低槽、低层西南急流、地面冷高
107 压的共同影响(图 1)。10 日 02 时(北京时，下同)的地面图上，河南省已处于高压带中。08 时，500hpa
108 上空天水-绵阳-乐山一线有一低槽；700hpa 上空平凉-汉中一线有一切变线，持续向东移动，西南急流不断
109 输送水汽；850hpa 受冷高压控制；地面图上，河南省处于冷高压底部的偏北气流中。20 时，500hpa 上空低
110 槽位于济源-西峡-房县一线；700hpa 上空切变线位于安阳-许昌-南阳一线，西南急流持续输送水汽；850hpa
111 及地面持续受冷高压控制，在近地层形成冷垫面，低层暖湿空气沿冷垫爬升，空间上形成了深厚的逆温层。

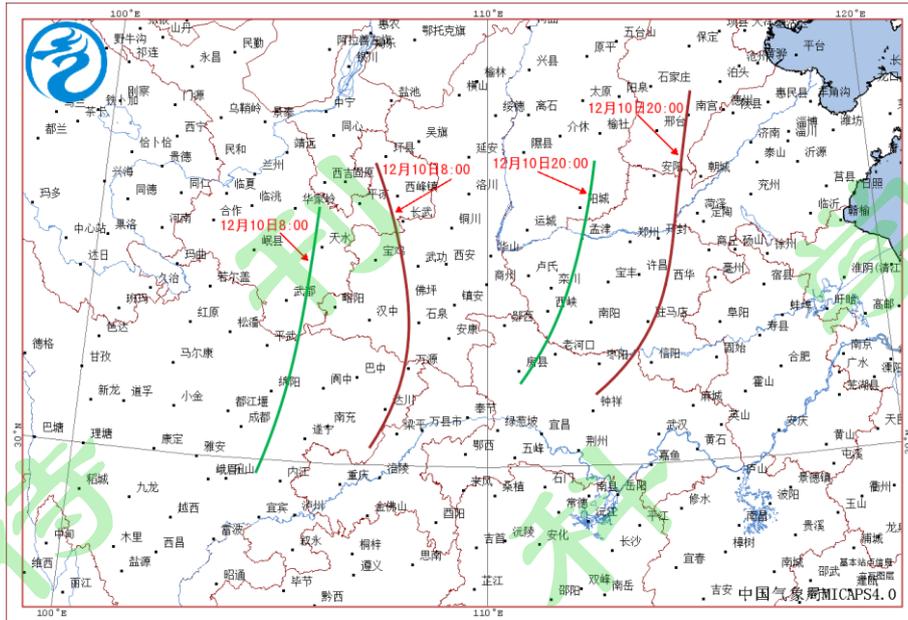


图 1 2018 年 12 月 10 日 08 时和 20 时 500hPa (绿线) 槽线和 700hPa (红线) 切变线移动路径

Fig.1 Moving paths of the troughs of 500 hPa (green lines) and the shear line of 700 hPa (red lines) at 08:00 and 20:00 on 10 December 2018

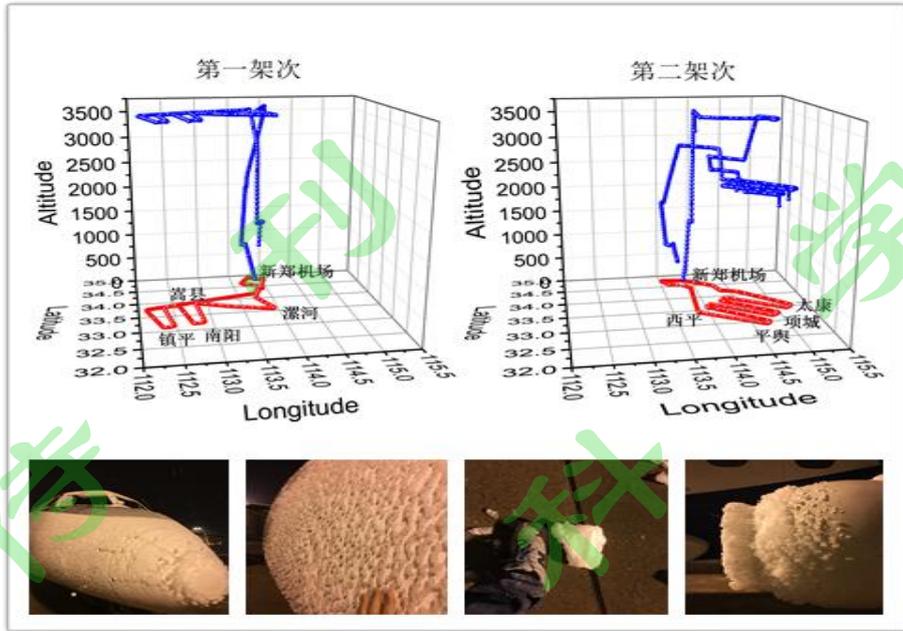
河南省人工影响天气中心按照设定航线于 10 日 09:55~12:26 和 16:06~18:50 开展了两架次飞机探测(表 1)。其中, 第一架次飞行区域位于当时 700 hpa 切变线东侧约 4.5 个经度, 飞行过程中云层较薄, 播云条件一般。第二架次飞行区域位于当时 700 hpa 切变线东侧附近, 飞行过程中于 16:16~16:47 探测到本省飞机增雨有史以来的最强积冰, 累积积冰最厚处达到 16.2 cm, 积冰实际情况如图 2 所示。

根据 10 日 08 时和 20 时郑州和南阳站的探空云结构分析(图 3), 当日白天(08 时)河南地区云层较薄, 云厚约 1 km, 云顶高度约 3 km 左右。夜间(20 时)云层变厚, 云顶高度明显升高。郑州上空出现多层云, 最高层云位于 9~10 km, 其下部有约 2 km 的干层, 7 km 以下为 3 层云, 且云夹层较薄, 云底高度约 909 m, 与第二架次的飞机宏观记录(表 1)基本一致。南阳上空为双层云, 8 km 附近有一层浅薄的高云, 4.5 km 以下为相对深厚的低云, 云底高度为 553 m。

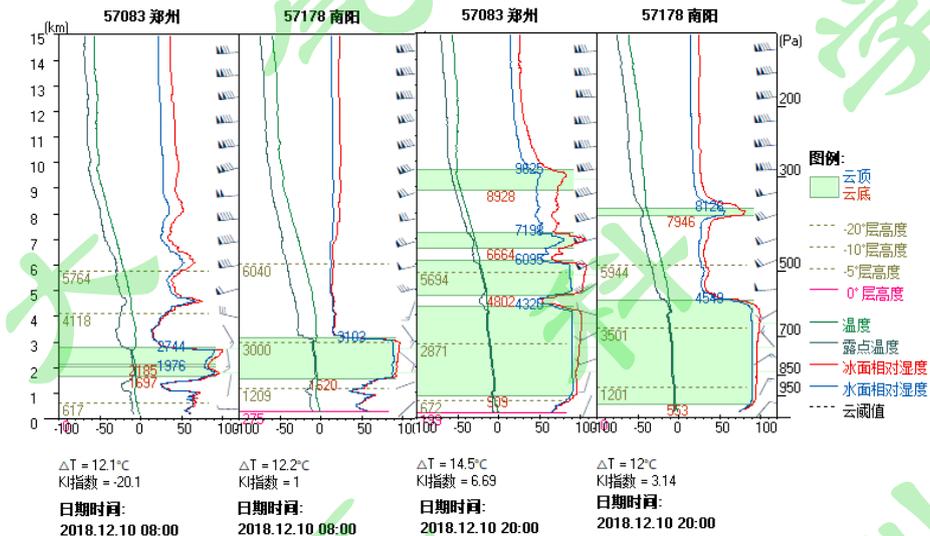
表 1 2018 年 12 月 10 日两架次探测飞行概况

Table1 Overview of the two flights on 10 December 2018

日期	架次编号	飞行时间	飞行航线	宏观记录
20181210	第一架次 (flight 1)	9:55~12:26	新郑机场~嵩县~镇平~南阳~鲁山~方城~平顶山~许昌~新郑机场	起飞前机场气温-1.2℃, 多云, 云底高度 1600 m 左右, 能见度 5000 m, 起飞后保持 3600 m 高度平飞, 云层较薄。
20181210	第二架次 (flight 2)	16:06~18:50	新郑机场~西平~平舆~漯河~项城~西华~周口~太康~新郑机场	起飞前机场气温 0.0℃, 阴有小雪, 云底高度 1000 m 左右, 能见度 6000 m, 起飞后上升至 3600 m 平飞(-12℃), 由于 16:16~16:47 积冰过于严重, 飞行安全考虑, 逐渐阶梯平飞降低高度至 2300 m(-7.5℃)。飞行全程无剧烈颠簸。



127
 128 图 2 2018 年 12 月 10 日两架次飞行轨迹及第二架次积冰实况
 129 Fig.2 Two flight trajectories and aircraft icing observation of the fight 2 on 10 December 2018



130
 131 图 3 2018 年 12 月 10 日 8:00 和 20:00 郑州、南阳 L 波段探空云垂直结构分析
 132 Fig.3 Cloud vertical structure analysis based on L-band radio sounding of Zhengzhou and Nanyang station at 08:00 and 20:00 on 10
 133 December 2018, respectively

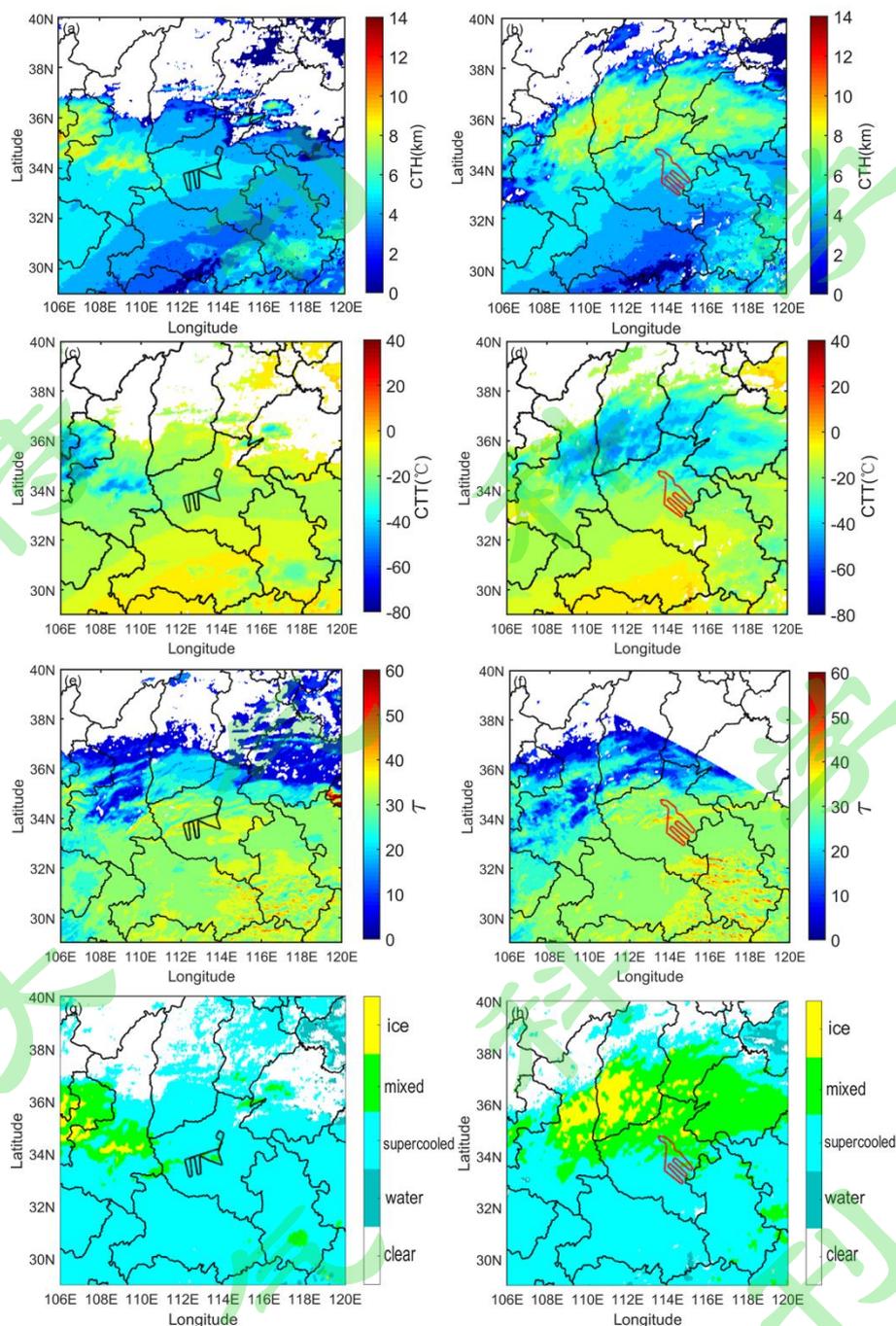
134 **3 云宏观特征**

135 **3.1 FY-4A 卫星云参数分析**

136 2018 年 12 月 10 日，受高空低槽、低层西南急流及切变线的共同影响，我国中西部地区有片状云系持
 137 续覆盖并产生降水。利用 10 日 8:00~21:00FY-4A 卫星 10.8 μm 红外通道数据分析该云带的移动及演变（图
 138 略），发现整个云带自西向东移动，主云带由若干个不连贯的大范围层状云系组成，云带东-西方向长约 640

139 km, 南-北方向宽约 245 km。云带发展深厚, 主云带的云黑体亮温 (cloud black body brightness temperature,
140 TBB) 约-50~-70 °C, 外围云系的 TBB 约-20~-40 °C。外围云系于 10:00 开始移入河南省西部区域, 随着
141 时间推移, 主云带自西向东逐渐从豫北地区过境, 河南中南部的三门峡至开封一线以南部分区域, 逐渐受
142 主云带外围云系的影响。河南省上空 14:00~19:00 为云系发展加强阶段, 尤其 16:00~18:00 云系发展最为
143 旺盛, 21:00 之后河南上空云区开始逐渐消散。当日第一架次 (9:55~12:26) 飞行区域在豫中、豫西南, 起
144 飞时主云带刚到达豫西的省界边缘, 新郑机场仅有少量薄云, 飞机降落时主云带移至三门峡、洛阳, 此时
145 新郑机场位于云带外围边缘。当日第二架次 (16:06~18:50) 飞行区域在豫中、豫东南, 位于主云带南部。

146 利用 2018 年 12 月 10 日 FY-4A 卫星的云顶高度 (cloud top height, CTH)、云顶温度 (cloud top temperature,
147 CTT)、云相态 (cloud phase, CLP) 和云光学厚度 (cloud optical thickness, COT) 产品, 进一步深入分析云
148 系宏观参数特征及降水潜力条件的演变, 图 4 展示了上述 4 类云产品典型时刻的空间分布。由图可见,
149 10:00 豫中地区云顶高度约 6 km 左右, 云顶温度约-20 °C 左右; 豫南和豫北地区云顶高度约 4 km 左右, 云
150 顶温度-10 °C 左右; 此时整个河南上空云顶为过冷水云。随着主云带从豫北过境, 16:00 豫北地区的云顶高
151 度达到 6~8 km, 云顶温度约-25~-40 °C, 云相态显示该区域为混合相态云。此时, 漯河以南地区的云顶高
152 度约 4~5 km, 云顶温度约-15~-20 °C, 处于“播云温度窗”的峰值范围; 云相态表明, 漯河以南地区为过冷
153 水云。18:00 以后, 豫中、豫南的云顶高度降至 4~6 km, 云顶温度范围约-15~-20 °C, 郑州以南地区云顶
154 均为过冷水云 (图略)。此次过程, 河南上空云光学厚度逐渐加强, 第一架次飞行时段内的 11:00~12:00
155 飞行区域云光学厚度约 30~40, 随着云系不断发展, 至 14:00 该区域最大光学厚度已达 40~50, 光学厚度
156 反演受到太阳高度角的影响, 16:00 时光学厚度产品不再能覆盖河南区域, 但根据前文云系发展演变趋势的
157 分析可推断第二架次飞行区域的光学厚度也较大。



158

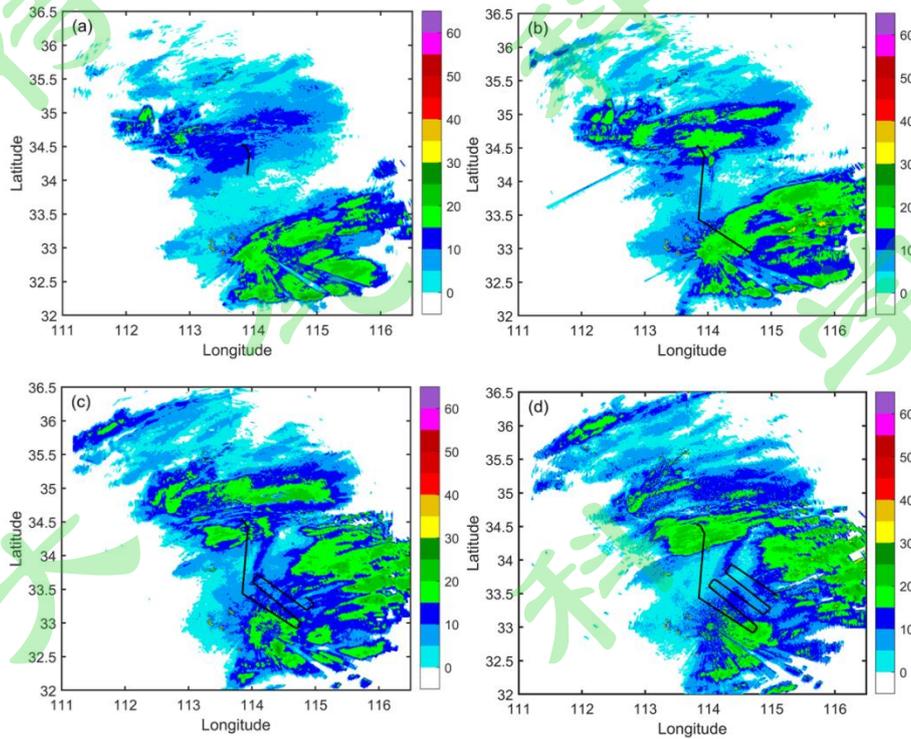
159 图4 2018年12月10日FY-4A卫星反演云参数: 10:00(a)、16:00(b)云顶高度; 10:00(c)、16:00(d)云顶温度; 12:00(e)、14:00(f)
 160 云光学厚度; 10:00(g)和16:00(h)云相态。图中黑色实线为第一架次探测飞行轨迹, 红色实线为第二架次探测飞行轨迹

161 Fig.4 Evolution of cloud parameters retrieved by FY4A satellite on 10 December 2018: cloud top height(CTH)at 10:00(a) and
 162 16:00(b) ; cloud top temperature at 10:00(c) and 16:00(d),(e)-(f),cloud optical thickness(COT)at 12:00(c) and 14:00(d), cloud
 163 phrase(CLP)at 10:00(g) and 16:00(h), respectively. Black solid line represents the track of flight 1 observed during 9:55~10:26,and
 164 red solid line represents the track of flight 2 observed during 16:06~18:50

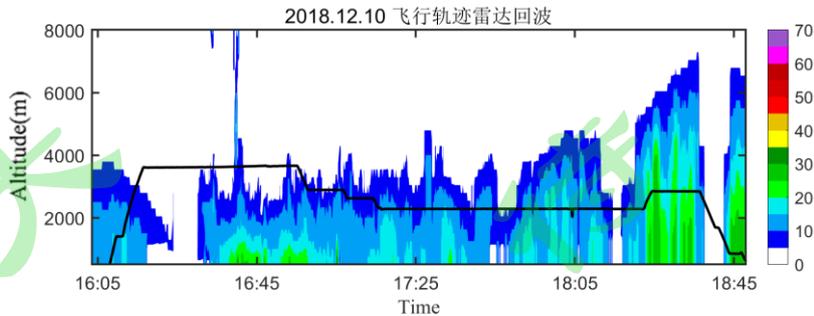
165 3.2 雷达回波分析

166 第一架次飞行时段(9:55~12:26), 探测区域基本无降水回波(图略)。第二架次飞机探测区域有降

167 水回波出现，回波水平分布均匀，层状云特点明显（图 5）。表 1 中强积冰时段 16:16~16:47，对应区域的
 168 雷达回波 5~25 dBz。雷达回波垂直结构（图 6）分析显示，飞行高度（3600 m）回波较弱甚至没有降水回
 169 波，随着降水粒子在下落过程中增长，2500 m 以下开始出现 5~10 dBz 的弱回波；且回波随高度降低而增
 170 强，近地面回波值达到 15~30 dBz。由此可见，强积冰区域云内缺少尺度较大的降水粒子，与下文中微物
 171 理谱的分析结论较为一致。顾宇（2017）对过冷水和雷达回波结构的研究也表明，飞机观测的过冷水丰沛
 172 区雷达回波强度较弱（<15 dBz），本文的观测结果与其结论较为吻合。18:15~18:40 飞机返回郑州途中穿
 173 越强回波区，此时回波顶高 7000 m 左右，强回波值约 20~30 dBz，高度位于 4000 m 以下。结合下文微物
 174 理分析可知，此区域为大尺度六角板状和不规则的辐枝状冰雪晶粒子，由于雷达反射率因子与粒子尺度的
 175 六次方成正比，因此该区域的回波强度较大。由于强积冰区域缺少尺度超过毫米量级的冰晶粒子，其 S 波
 176 段天气雷达回波值较弱，甚至明显低于非积冰区域；因此在使用天气雷达监测时，单靠回波强度来判断积
 177 冰强度存在一定的局限性。



178
 179 图 5 2018 年 12 月 10 日第二架次飞行期间 16:18(a),16:48(b),17:30(c),18:00(d) 的飞行轨迹叠加雷达组合反射率，黑色实线为截
 180 止到雷达回波对应时刻的飞机轨迹
 181 Fig.5 Aircraft trajectory overlaid by radar reflectivity at 16:18(a),16:48(b),17:30(c),18:00(d) during the second flight on 10
 182 December 2018. Black solid line is the trajectory of the aircraft until the time corresponding to the radar echo

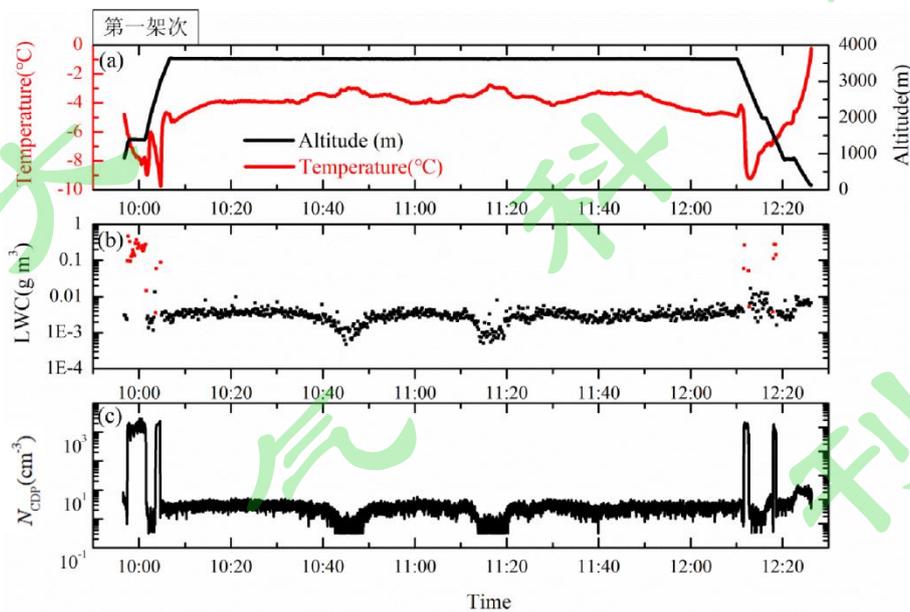


183
 184 图 6 2018 年 12 月 10 日第二架次沿飞行轨迹的雷达回波垂直结构
 185 Fig.6 Evolution of vertical radar echo for the second flight on 10 December 2018

187 4.1 云微物理量和谱分布演变特征

188 判断飞机入云的标准,国外有如下方法:(1)机载探头 FSSP 测得的云粒子浓度 $N_{FSSP} > 10 \text{ cm}^{-3}$ (Rangno
189 and Hobbs, 2005); (2)热线含水量仪测得 $LWC > 0.01 \text{ g m}^{-3}$ (Gultepe et al., 1996); (3) $N_{CDP} > 0.1 \text{ cm}^{-3}$
190 且 $LWC > 0.0005 \text{ g m}^{-3}$ (Gultepe and Isaac, 2004); 其中第一种方法被普遍接受和使用 (Zhang et al., 2011; 蔡
191 兆鑫, 2019)。而对于仅含有冰晶粒子的云,由于冰晶粒子尺度相对较大,超出 FSSP ($2 \sim 47 \mu\text{m}$) 和 CDP
192 ($2 \sim 50 \mu\text{m}$) 等云粒子探头探测范围,其测出的云粒子浓度不会达到 10 cm^{-3} , 因此上述标准实际更适用于
193 混合云和水云。Cober et.al(2001)和 McFarquhar and Cober(2004)利用大量的飞机观测资料对冰云的界定条件
194 为:机载探头的图像上可以明显看到冰晶且冰晶的总数浓度大于 0.11 L^{-1} 。综合考虑冰云、水云和混合相云
195 的判别依据,本文根据 $N_{CDP} > 10 \text{ cm}^{-3}$ 或 $N_{CIP} > 0.11 \text{ L}^{-1}$ 时,判断为飞机入云。

196 图 7 展示了 2018 年 12 月 10 日第一架次 (9:55~12:26) 机载仪器探测物理量随时间的演变。飞机在起
197 飞与降落过程中均穿越较厚的逆温层,爬升阶段的逆温层位于 $1621 \sim 2010 \text{ m}$ ($-8.9 \sim -6.0 \text{ }^\circ\text{C}$) 和 $3026 \sim 3444$
198 m ($-9.7 \sim -4.7 \text{ }^\circ\text{C}$), 降落阶段的逆温层位于 $2692 \sim 3362 \text{ m}$ ($-9.2 \sim -4.1 \text{ }^\circ\text{C}$) (图 7a)。逆温有利于水汽堆积
199 形成液水含量较高的区域,从而有利于降雪天气的发生。第一架次探测时段和区域处于天气系统刚入境的
200 云系发展初期阶段,仅在飞机起飞 (9:57~10:05) 和降落过程 (12:11~12:18) 中穿越冷云区 (温度低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$
201 的云区),过冷水出现在 $1258 \sim 3185 \text{ m}$ 的高度范围, N_{CDP} 平均值为 953.28 cm^{-3} , LWC 的最大值为 0.61 g m^{-3} ,
202 LWC 的平均值约 0.2 g m^{-3} 。飞机探测云顶高度与探空观测较为一致,卫星反演云顶高度略高于其他两种观
203 测。



204 图 7 2018 年 12 月 10 日 9:55~12:26 飞机探测的温度和高度(a)、液态含水量 LWC(b)演变及 CDP 探测数浓度 N_{CDP} (c)(图 b 中红
205 色散点为冷云区探测)

206 Fig.7 Evolution of the temperature and altitude (a), liquid water content (LWC) (b) number concentration with time (c) detected by
207 aircraft from 9:55 to 12:26 10 December 2018(The red scatters in fig.b shows the cold-cloud region)

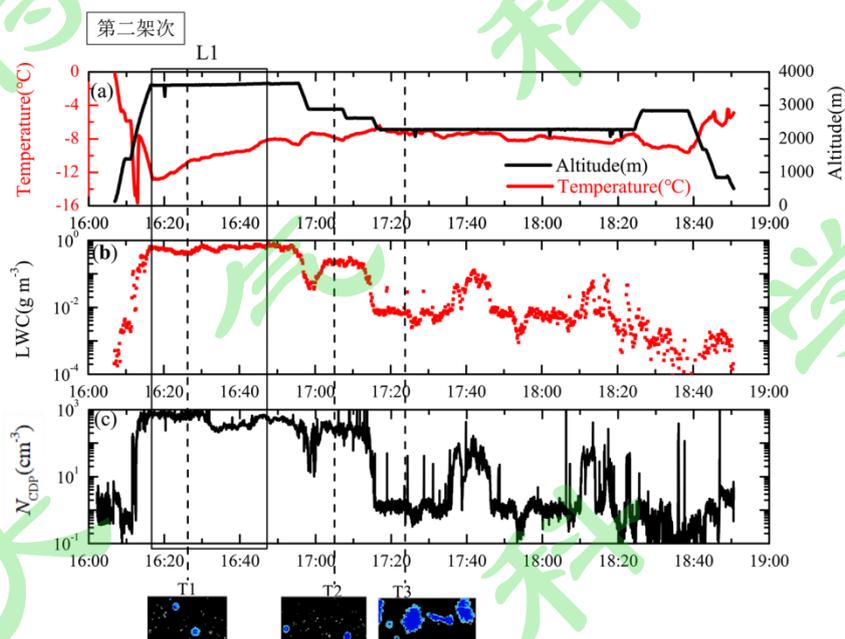
208 第二架次 (16:06~18:50) 飞机探测物理量的演变如图 8 所示。分析可见,第二架次探测区域在垂直空
209 间上仍然存在逆温层,爬升阶段逆温层位于 $2379 \sim 2731 \text{ m}$ ($-15.7 \sim -8.0 \text{ }^\circ\text{C}$), 降落阶段逆温层相对较薄,
210 位于 $840 \sim 965 \text{ m}$ ($-6.4 \sim -4.7 \text{ }^\circ\text{C}$)。该架次液态含水量丰沛,过冷水主要分布于 $1676 \sim 3659 \text{ m}$ 的高度范围。
211

212 16:17~16:55, 飞机飞行高度为 3600 m , 温度范围 $-7.9 \sim -12.9 \text{ }^\circ\text{C}$ (图 8a), 平均温度 $-10.0 \text{ }^\circ\text{C}$; 其中的

213 16:17~16:47(图 8L1)为飞机宏观记录超强积冰时段。此高度 N_{CDP} 平均值为 514.21 cm^{-3} , LWC 的最大值可达
 214 0.818 g m^{-3} , 平均值约 0.585 g m^{-3} 。前人研究表明,层状云中典型的 LWC 为 $0.05\sim 0.25 \text{ g m}^{-3}$ (杨军等, 2011; 牛
 215 生杰, 2012), 一般小于 0.5 g m^{-3} (中国气象局科技发展司, 2003; 邓北胜, 2011)。而本架次探测过程中, 3600 m
 216 高度附近的 LWC 最大值能达到 0.818 g m^{-3} 。此外, 3600m 高度的 CIP 观测图像显示(图 8T1), 此高度云区
 217 内基本无不规则的冰晶, 云中存在大量的球型过冷水滴, 且有半径 $50\mu\text{m}$ 以上的过冷大滴出现。飞机长时间
 218 在此环境下飞行, 导致飞机迎风面碰撞过冷水滴而冻结, 并在充足水汽下不断结凇增长, 而产生了极为严重
 219 的积冰。

220 17:02-17:14, 飞行高度 2600-2887 m, 温度 $-8.2\sim -6.9 \text{ }^\circ\text{C}$, N_{CDP} 和 LWC 较前一时段有明显减小, 其中
 221 N_{CDP} 平均值为 248.42 cm^{-3} , LWC 平均值为 0.20 g m^{-3} 。17:04(图 8T2)的 CIP 粒子图像显示该阶段仍然以球
 222 型粒子为主, 且有部分大滴存在。

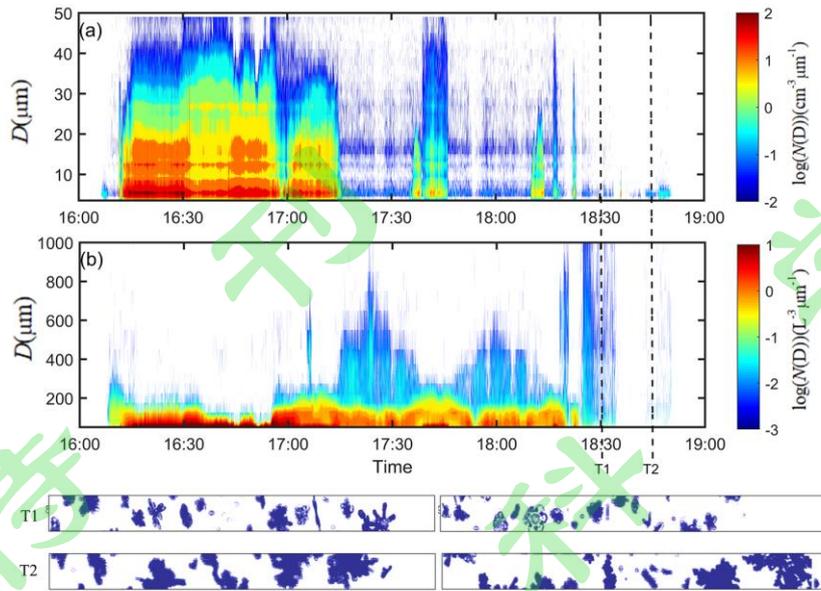
223 17:15~17:34, 飞行高度 2300 m, N_{CDP} 平均值为 1.52 cm^{-3} , LWC 平均值为 0.007 g m^{-3} 。 N_{CDP} 比前两个
 224 阶段低两个量级, 17:23(T3)CIP 粒子图像显示, 该阶段粒子随着下落过程多增长为片状和针状冰晶粒子。



225
 226 图 8 2018 年 12 月 10 日 16:06~18:50 飞机探测的温度和高度 (a) 及液态含水量 LWC (b) 演变及 CDP 探测数浓度 N_{CDP} (c)。
 227 其中 L1 阶段为超强积冰产生的时段, 图中展示了 16:26(T1), 17:04(T2) 和 17:23(T3) 的 CIP 观测图像 (图 b 中红色散点为冷云区
 228 探测)

229 Fig.8 Evolution of the temperature and altitude (a), liquid water content (LWC) (b) and number concentration (N_{CDP}) detected by aircraft
 230 from 16:06 to 18:50 on 10 December 2018. L1 is the period during which super strong ice accretion occurs. CIP images at 16:26 (T1),
 231 17:04 (T2) and 17:23 (T3) are shown in the figure. (The red scatters in fig.b shows the cold-cloud region)

232 为了解超强积冰区域微物理结构, 现对第二架次的 CDP 和 CIP 谱分布进行进一步的分析。图 9 为该架
 233 次飞行 CDP 和 CIP 的谱分布, 由图可见此次过程 CDP 谱分布呈现多峰分布特征。16:16~17:15, CDP 谱分
 234 布谱宽较大, CDP 观测到了大量的小云粒子, 而 CIP 谱宽较小, 基本未观测到 $200 \mu\text{m}$ 以上的冰晶粒子。结
 235 合云中粒子图像, 此阶段云中以过冷水滴为主, 这是该阶段产生超强积冰的主要原因。无大的降水粒子是
 236 该高度层雷达回波较弱的原因。17:05 之后 CDP 直径大于 $20\mu\text{m}$ 的粒子浓度较之前强积冰产生阶段有明显的
 237 减小。17:15~17:35 几乎未观测到 CDP 粒子; 而此时段内的 CIP 探头观测到了大尺度的冰晶粒子, 以片状
 238 和针状冰晶为主。CIP 观测的直径大于 $200 \mu\text{m}$ 的粒子浓度在 17:15 之后明显增加, 说明尺度较大的冰晶粒
 239 子增加。18:24 之后, CIP 和 CDP 观测浓度均大幅减小, CIP 观测数浓度在 $1\sim 50 \text{ L}^{-1}$, 粒子图像显示该阶段
 240 粒子均为尺度较大的六角板状和辐枝状聚合冰晶粒子。



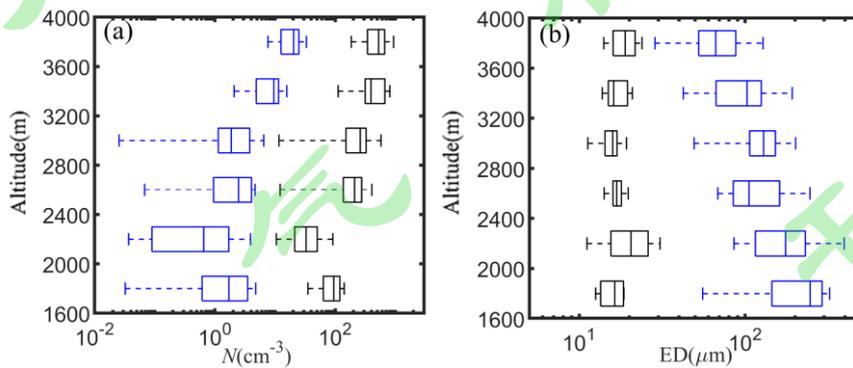
241

242 图9 2018年12月10日16:06~18:50飞机探测CDP谱(a)和CIP谱(b)演变。图中展示了18:30(T1)和18:45(T2)的CIP粒子图
243 像

244 Fig.9 Evolution of CDP spectra (a) and CIP spectra (b) detected by aircraft from 16:06 to 18:50 on 10 December 2018. Images of CIP
245 at 18:25(T1) and 18:35(T2) are also shown in the figure

246 4.2 云垂直结构分析

247 为了解云中微物理过程，对第二架次探测的CDP和CIP粒子浓度(N)及有效直径(ED)的垂直分布
248 特征进行了分析(图10)。由图10可见， N_{CDP} 随高度增加呈增加趋势， ED_{CDP} 随高度增加也有增加的趋势。
249 由于冰晶下落过程中不断消耗过冷水而增长，CIP观测数浓度整体上随高度降低而逐渐减小，而有效直径整体
250 上随高度降低而逐渐增大。云底附近， N_{CDP} 和 N_{CIP} 数浓度均有峰值出现。



251

252 图10 2018年12月10日16:06~18:50(a)数浓度(N)和(b)有效直径(ED)垂直分布，其中黑色代表CDP观测结果，蓝色代表CIP
253 观测结果

254 Fig.10 Vertical distribution of number concentrations(N) and effective diameter(ED) of the cloud from 16:06 to 18:50 on 10 December
255 2018, Black boxplot represents the results observed by CDP, and Blue boxplot represents the results observed by CIP

256 由于积冰过于严重，为保证飞行安全，采用阶梯平飞下降的方式，逐渐从3600m、2800m、2600m下降
257 至2300m保持平飞。为区分粒子下落过程中在不同高度上的分布特征，并精细分析本次过程的云物理降水
258 机制，分别提取以上四个高度层中CDP、CIP、PIP探头观测的冷云区数据，做出各高度层粒子全谱线图11。

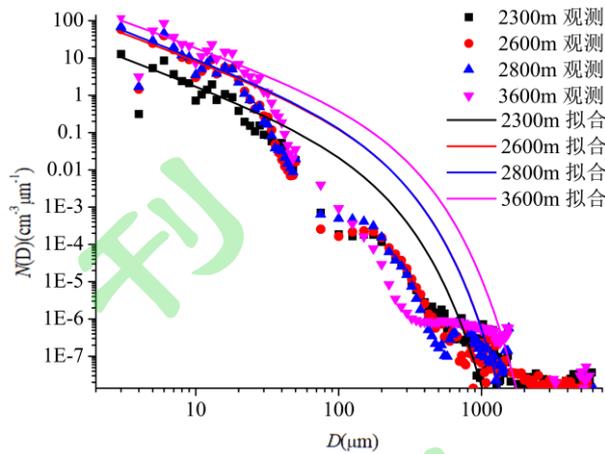


图 11 2018 年 12 月 10 日 16:06~18:50 冷云区不同高度粒子谱

Fig.11 Particle spectrum at different heights in the cold cloud region from 16:06 to 18:50 on 10 December 2018

从图 11 可以看出，2300~3600 m 4 个高度层的 CDP 观测的粒子（2~50 μm）谱型基本一致，其浓度值均呈多峰分布，峰值分别位于 3 μm、6 μm、13 μm。不同高度的粒子谱曲线对比表明，单位尺度间隔内的 CDP 粒子浓度值随高度的降低而减小，3600 m 高度比 2300 m 高度的浓度值大 1 个量级。3600 m 高度上，直径在 50~150 μm 之间的粒子浓度明显高于其他高度，CIP 粒子图像显示有尺度较大的球型粒子（图 8），可见这一高度存在大的过冷水滴。直径大于 1000 μm 的粒子浓度随高度的降低基本呈增大趋势。由于 3600 m 高度层有充足的过冷水供应，且此高度层有过冷大滴的存在，非常容易导致飞机结冰。观测事实表明，在该高度层登机人员观测到了明显强烈的积冰。冰晶在下落过程中不断消耗过冷水增大，因此尺度较大的冰晶在低层的浓度高于上层浓度。

Gamma 分布常被用来描述云和降水粒子谱，本节利用 Gamma 函数对不同高度的云粒子谱进行了拟合。Gamma 分布拟合公式为：

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D) \quad (1)$$

式中， $N(D)$ 为粒子数浓度， N_0 为截距， μ 为形状因子， λ 为斜率， D 为粒子直径。图10中不同颜色的实线为各高度的粒子谱拟合曲线，表2展示了各高度的拟合参数和相关系数。各高度谱分布的拟合相关系数R均大于0.85，说明Gamma分布能够较好地拟合粒子谱分布。不同高度拟合截距参数 N_0 差异较大，随着高度增加， N_0 明显增加。 μ 和 λ 随高度变化不明显。

表 2 2018 年 12 月 10 日 16:06~18:50 冷云区不同高度粒子谱拟合结果

Table 2 Fitting results of particle spectra at different heights in cold cloud area from 16:06 to 18:05 on 10 December 2018

高度 (m)	截距 N_0	形状因子 μ	斜率 λ	相关系数R
2300	60.23	-1.43	-0.013	0.86
2600	238.56	-1.43	-0.011	0.85
2800	325.13	-1.42	-0.016	0.86
3600	603.55	-1.39	-0.010	0.86

5 结论

2018 年 12 月 10 日，随着高空低槽、低层西南急流、地面冷高压系统过境，河南地区云系发展不断增强。河南省人工影响天气中心探测到本省飞机增雨有史以来的最强积冰（16.2 cm）。本文利用飞机微物理探测资料，结合 FY-4A 卫星反演的云产品、雷达数据、L 波段探空数据和天气资料，对此次罕见的超强积冰过程的云宏微观特征以及产生积冰的机制进行了综合分析，主要结论如下：

1) 此次飞行过程积冰区域位于 700hpa 切变线东侧附近，西南急流持续输送水汽，且大气有深厚逆温

285 层存在, 有利于水汽和液水的堆积, 天气条件有利于强积冰的产生。

286 2) 强积冰区的云光学厚度较大 (>30), 云顶高度约 4000~5000m, 云顶温度处于“播云温度窗”的峰
287 值范围 (-15~-20°C)。FY-4A 云顶相态与观测结果较为一致, 对于过冷水区具有一定的指示意义。

288 3) 产生强积冰的高度层过冷水十分丰沛, 最大液态含水量 0.818 g m^{-3} , 平均液态含水量 0.585 g m^{-3} 。
289 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。

290 4) 云系 LWC 随高度降低而减小, 冰晶数浓度整体上也随高度降低而逐渐减小, 冰晶粒子下落过程中
291 消耗过冷水, 尺度不断增大。

292 5) 由于强积冰区域缺少尺度超过毫米量级的冰晶粒子, 其 S 波段天气雷达回波值较弱, 甚至明显低于
293 非积冰区域。因此在使用天气雷达监测时, 单靠回波强度来判断积冰强度存在一定的局限性。

294 本研究仅针对一次强积冰过程进行了分析, 获得的结果仍需要更多的过冷水和飞机积冰观测个例的验证。

295 基于更多的机载观测, 探寻不同程度积冰形成的宏微观物理特征, 统计研究过冷水区和积冰区的卫星和雷
296 达遥感分布特征是未来进一步可以继续图 10 2018 年 12 月 10 日 16:06~18:50 (a)数浓度(N)和(b)有效直径(ED)垂直分布,
297 其中黑色代表 CDP 观测结果, 蓝色代表 CIP 观测结果

298 Fig.10 Vertical distribution of number concentrations(N) and effective diameter(ED) of the cloud from 16:06 to 18:50 on 10 December
299 2018, Black boxplot represents the results observed by CDP, and Blue boxplot represents the results observed by CIP

300 开展的工作。

301 参考文献 (References)

302 Bernstein B C, Omeron T A, Mcdonough F, et al.1997. The relationship between aircraft icing and synoptic-scale weather conditions[J]. Weather & Forecasting,
303 12(4):742-762.

304 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
305 Peiren, et al. 2019. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages [J].
306 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1191-1203.

307 陈静,吕环宇.2006.一次对流不稳定条件下飞机积冰的天气动力诊断分析[J].气象,32(12):66-71. Chen Jing, Lv Huanyu. 2006. Dynamic diagnosis on aircraft
308 icing under a convective instability meteorological condition [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32(12): 66-71.

309 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 Yao, Ma Peimin, You Laiguang. 1989. A case study of
310 droplet spectra and liquid water content measurements in aircraft icing environments[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 15(4): 24-28.

311 Cober S G, Isaac G A., Strapp J W. 1994. Aircraft icing measurements in east coast winter storms[J]. Journal of Applied Meteorology, 34(1):88-100.

312 Cober S G, Isaac G A. 2001. Characterization of aircraft icing environments with supercooled large drops for application to commercial aircraft certification[J].
313 Journal of Applied Meteorology & Climatology, 51(2):265-284.

314 Cober S G, Isaac G A, Korolev A V, et al. 2001. Assessing cloud-phase conditions[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 40(11):1967-1983.

315 邓北胜.2011.人工影响天气技术与管理[M].北京:气象出版社,171pp. Deng Beisheng. 2011. Technology and Management of Artificially Influenced Weather (in
316 Chinese) [M].Beijing: Meteorological Press, 171pp.

317 顾宇.2017.层状云系微物理结构特征的飞机和雷达综合观测分析[D].解放军理工大学硕士学位论文, 66pp. Gu Yu. 2017. Comprehensive observation
318 analysis of the microphysical structures of stratiform cloud using aircraft and radar data. M. S. thesis (in Chinese), Chinese People's Liberation Army
319 Polytechnic University, 66pp.

320 Gultepe I, Isaac G A, Leitch W R,et al.1996.Parameterization of marine stratus microphysics based on in situ observations: Implications for GCMs[J]. J. Climate,
321 9: 345-357.

322 Gultepe I, Isaac G A. 2004.Aircraft observations of cloud droplet number concentration: Implications for climate studies [J]. Q. J. R.Meteorol.Soc, 130:
323 2377-2390.

324 Hansman J. 1989. The Influence of Ice Accretion Physics on the Forecasting of Aircraft Icing Conditions[C].3rd Int. Conf Aviation Wea Sys, Anaheim, Amer
325 Meteor Soc :154-158.

326 李子良.1999.飞机积冰的气象条件分析[J].高原山地气象研究,19(3):56-57. Li Ziliang. 1999. Analysis of meteorological conditions related to aircraft icing
327 [J].Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 19(3): 56-57.

328 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),30(S):330-332.Liu Kaiyu, Zhang Yunjin, Gong Ya. 2008.

329 Diagnosis on meteorologic factor for a aircraft icing[J]. Journal of Yunnan University (in Chinese), 30(S): 330-332.

330 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):764-770. Liu Lieshuang, Jin Shan, Liu Kaiyu. 2013. Diagnostic

331 analysis of two severe aircraft icing events using AMDAR data[J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 41(4):764-770.

332 McFarquhar G M,Cober S G.2004.Single-scattering properties of mixed-phase Arctic clouds at solar wavelengths: Impacts on radiative transfer [J]. J. Climate,

333 17(19):3799-3813.

334 McFarquhar G M, Zhang G, Poellot M R, et al. 2007. Ice properties of single-layer stratocumulus during the mixed-phase Arctic cloud experiment. I:

335 Observations [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 112 (D24): D24201.

336 孟鹏程.2019.我国飞机积冰区云微物理特征分析研究[D].中国民用航空飞行学院硕士学位论文, 78pp. Meng Pengcheng 2019. Analysis and research about

337 cloud microphysical characteristics of aircraft icing area in China[D]. M. S. thesis (in Chinese), Guangan: Civil Aviation Flight University of China, 78pp.

338 牛生杰. 2012. 云降水物理研究[M]. 北京:气象出版社, 172pp. Niu Shengjie. 2012. Physical study of cloud precipitation (in Chinese) [M].Beijing:

339 Meteorological Press, 172pp.

340 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

341 icing in the middle part of Gansu Province [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 26(3): 53-56.

342 Politovich M K. 1989. Aircraft icing caused by large supercooled droplets[J]. Journal of Applied Meteorology, 28(9):856-868.

343 Politovich M K, Bernstein T A O. 2010. Aircraft icing conditions in Northeast Colorado[J].Journal of Applied Meteorology, 41(2):118-132.

344 Rangno A L,Hobbs P V. 2005.Microstructures and precipitation development in cumulus and small cumulonimbus clouds over the warm pool of the tropical

345 Pacific ocean[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,131(606):639-673.

346 Sergio Fernández-González,José Luis, Estébaliz Gascón et al. 2014. Weather features associated with aircraft icing conditions: a case study[J]. The Scientific

347 World Journal, 2014: 1-18.

348 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 Lei, Li Chengcai, Zhao Zengliang, et

349 al.2014.Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteorological Monthly(in Chinese), 40(2): 196-205.

350 杨军,陈宝君,银燕,等.2011.云降水物理学[M].北京:气象出版社, 364pp.Yang Jun, Chen Baojun, Yin Yan, et al.2011.Physics of Cloud Precipitation (in Chinese)

351 [M].Beijing: Meteorological Press, 364pp.

352 杨文霞,周毓荃,孙晶,等.2014.一次西风槽过程过冷云水分布特征观测研究[J].气象学报,72(3):583-595.Yang Wenxia, Zhou Yuquan, Sun Jing, et

353 al.2014.Observational studies of distribution characteristics of supercooled cloud water during a westerly trough process[J].Acta Meteorologica Sinica(in

354 Chinese),72(3):583-595.

355 杨文霞,胡朝霞,董晓波,等. 2018.降水性层状云结构及微物理量相关性分析[J].大气科学学报,41(4):525-532.Yang Wenxia, Hu Zhaoxia, Dong Xiaobo, et

356 al.2018.A study on the microphysical structure and the correlation of microphysical parameters of the precipitation stratiform cloud [J].Trans Atmos Sci(in

357 Chinese),41(4):525-532.

358 易贤,王斌,李伟斌,等. 2017. 飞机结冰冰形测量方法研究进展[J]. 航空学报, 38(2):13-24. Yi Xian, Wang Bin, Li Weibin, et al. 2017. Research progress on

359 ice shape measurement approaches for aircraft icing [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica (in Chinese), 38(2):13-24.

360 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

361 microphysical properties in aircraft icing environment[J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 46(1):170-177.

362 张利平,朱国栋,韩磊.2014.航空器遭遇严重积冰天气分析[J].中国民航飞行学院学报,25(6):57-61. Zhang Liping, Zhu Guodong, Han Lei.2014.Analysis of the

363 weather condition for severe icing[J].Journal of Civil Aviation Flight University of China (in Chinese), 25(6):57-61.

364 Zhang Q, Quan J N, Tie X X, et al.2011.Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China [J]. Atmospheric Environment, 45(3):

365 665-672.

366 中国气象局科技发展司.2003.人工影响天气岗位培训教材[M].北京:气象出版社, 300pp. Department of Science and Technology Development, China

367 Meteorological Administration.2003.Job training materials for Artificially influenced weather(in Chinese) [M] .Beijing: Meteorological Press, 300pp.

368 周莉,徐浩军,龚胜科,等. 2010.飞机结冰特性及防除冰技术研究[J]. 中国安全科学学报, 20(6):105-110. Zhou Li, Xu Haojun, Gong Shengke, et al. 2010.

369 Research of aircraft icing characteristics and anti-icing and de-icing technology [J]. China Safety Science Journal(in Chinese), 20(6):105-110.