

郭学良,付丹红,郭欣,等. 我国云降水物理飞机观测研究进展. 应用气象学报, 2021, 32(6): 641-652.

DOI: 10.11898/1001-7313.20210601

# 我国云降水物理飞机观测研究进展

郭学良<sup>1)\*</sup> 付丹红<sup>1)</sup> 郭欣<sup>2)</sup> 方春刚<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

<sup>2)</sup>(北京市人工影响天气中心, 北京 100089)

<sup>3)</sup>(中国气象局云雾物理环境重点开放实验室, 北京 100081)

## 摘 要

飞机观测是云中粒子相态、分布和转化特征的重要探测技术。我国云降水物理飞机观测开始于 20 世纪 60 年代, 经过 60 多年的发展, 在飞机平台、机载测量技术、云微物理结构和降水形成机制认识等方面均取得了长足进步。发现积层混合云中对流泡区具有更高的过冷水含量, 淞附增长起重要作用, 符合“播撒-供给”降水形成机制, 而在层云区, 当云厚度较小时, 过冷水含量很少, 冰雪晶的凝华、聚并增长起主导作用, 并不符合“播撒-供给”降水形成机制, 而当云厚度较大时, 过冷水含量较为丰富, 凝华、聚并和淞附增长起主导作用, 基本符合“播撒-供给”降水形成机制; 我国北方冬季降雪过程的形成机制主要是凝华-聚并机制, 只有在水汽非常充足、云较厚的情况下, 淞附增长过程才具有重要作用。近年虽然在人工影响天气播撒效应、数值模式云物理过程验证、卫星及雷达遥感数据检验、对流云结构观测等方面也取得了一些进展, 但仍较薄弱, 亟待加强。

**关键词:** 云降水物理; 飞机观测; 降水形成机制

## 引 言

云中粒子的微物理形成、增长和转化过程与云粒子的相态、形态和谱分布密切相关, 是揭示降水形成的重要物理过程。同时, 云微物理过程在人工影响天气、数值天气预报模式云物理过程参数化、大气遥感信息反演、辐射效应与气候变化, 以及大气化学过程等方面均具有十分重要作用。飞机云物理观测是目前获取云中粒子原位探测信息的重要手段。

飞机探测可实现对大气温度、湿度等基本气象要素的测量<sup>[1-2]</sup>, 也可开展对云和降水物理过程的观测。60 多年来, 我国在云降水物理飞机观测方面开展了大量工作, 对我国飞机探测试验活动, 包括飞机平台类型、机载设备、探测试验情况等的详细总结参见文献[3-4]。对基于飞机观测取得的云降水物理过程和形成机制的认识在一些综述性论文<sup>[5-8]</sup>中也

有涉及, 但缺乏比较系统的总结。

我国云降水物理飞机观测研究可划分为两个阶段: 第 1 阶段是 20 世纪 60—80 年代初, 在部分省份人工影响天气飞机上安装苏制或仿制的云物理观测设备, 以及美国冰晶计数器、云凝结核计数器、冰核计数器等设备, 但由于这些早期仪器标定困难、稳定性差等原因, 使用效果均不理想。部分飞机观测主要采用人工取样技术, 如利用涂油或氧化镁玻璃片的枪式采样器、铝箔板碰撞采样器等, 这种人工取样技术通过在飞机上采样后, 借助实验室显微镜读取云粒子数、尺度、图像等数据信息<sup>[9-12]</sup>。我国早期开展的云降水物理飞机观测技术与当时国际上普遍采用的技术类似<sup>[13-14]</sup>。但这种飞机测量技术费时费力, 且测量精度不高, 只能对直径大于 0.1 mm 的降水性云粒子进行采样, 可获取降水粒子的谱分布和图像信息。第 2 阶段是 20 世纪 80 年代后, 采用激光测量技术, 以美国引进的云粒子激光测量系统为主。

2021-10-04 收到, 2021-10-19 收到再改稿。

资助项目: 第二次青藏高原综合科学考察(2019QZKK0104), 西北人影工程试验项目(ZQC-R18208-1), 中国气象科学研究院发展基金(2020KJ016)

\* 邮箱: guoxl@mail.iap.ac.cn

20世纪70年代,美国研制了机载云粒子测量系统(Particle Measuring System, PMS),该观测系统包括前向散射云粒子探头 FSSP-100 (forward scattering spectrometer probe), 测量粒径范围为  $0.5\sim 47\ \mu\text{m}$ , 二维光阵云粒子探头 OAP-2D-C (two-dimensional optical array cloud probe), 测量粒径范围为  $25\sim 800\ \mu\text{m}$  和二维光阵降水粒子探头 OAP-2D-P (two-dimensional optical array precipitation probe), 测量粒径范围为  $200\sim 6400\ \mu\text{m}$ 。

20世纪90年代,美国 DMT (Droplet Measurement Technologies) 公司改进和研发了云粒子谱探头 CDP (cloud droplet probe), 实现测量粒径范围为  $2\sim 50\ \mu\text{m}$  的云粒子, 云粒子图像探头 CIP (cloud imaging probe), 测量粒径范围为  $25\sim 1550\ \mu\text{m}$  (可选择  $15\sim 930\ \mu\text{m}$ ) 的云和降水粒子的尺度和形状, 降水图像探头 PIP (precipitation imaging probe), 可测量粒径范围为  $100\sim 6200\ \mu\text{m}$  降水粒子的尺度和形状。另外还有机载气溶胶探头 PCASP-100X (passive cavity aerosol spectrometer probe), 测量粒径范围为  $0.1\sim 3\ \mu\text{m}$  的气溶胶粒子谱分布。云凝结核计数器 CCN-100/200 (cloud condensation nuclei counter-100/200), 热线液态含水量仪 (hot-wire liquid water content), 测量范围为  $0.05\sim 3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的云中液态水含量, 以及黑碳、生物气溶胶测量仪器和云降水粒子联合探头等。

1979年创建的美国 SPEC 公司 (Stratton Park Engineering Company), 后期也研制了类似的云降水粒子测量仪器, 包含云粒子图像仪 CPI (cloud particle imager), 二维立体光阵谱仪 2D-S (stereo), 快速云滴探头和快速前向散射谱探头 FCDP-100 (fast CDP-100) 和 FFSSP-100 (fast FSSP-100), 高采样体积降水粒子谱仪 HVPS (high volume precipitation spectrometer), CPI 组合云粒子成像仪 3V-CPI (3-view CPI) 等, 形成了测量精度更高的云降水粒子机载测量系统。美国密执安技术大学物理系研发了全息云粒子测量仪器 HOLODEC (holographic detector for clouds)<sup>[15]</sup>, 可测量粒子尺度 (等效直径  $23\sim 1000\ \mu\text{m}$ )、三维状态和二维冰粒子图像, 全息测量方法的优点是采样体积不依赖粒子尺度或空气速度, 可检测破碎的粒子。

随着我国对机载云降水测量仪器的应用需求明显增加, 大量进口仪器返厂维修周期长, 仪器价格和维护成本出现快速增加情况, 造成大规模业务应用

困难。为此, 机载云降水物理仪器的国产化研制十分迫切。从2007年开始, 国家先后启动了多个项目开展机载云降水物理观测仪器的国产化研制, 其中由中国气象科学研究院牵头的国家首批重大科学仪器设备开发专项——机载云降水粒子谱仪与成像仪研制于2011年启动, 研制出包括云粒子谱仪 (ZBT-CPS)、云粒子成像仪 (ZBT-CPI) 和降水粒子成像仪 (ZBT-PPI) 的机载云粒子测量系统, 可分别测量粒径范围为  $2\sim 50\ \mu\text{m}$  的云粒子谱、 $25\sim 1550\ \mu\text{m}$  的云粒子图像和谱分布及  $100\sim 6200\ \mu\text{m}$  的降水粒子图像和谱分布。该套机载云降水粒子测量系统已在山西、吉林、云南和甘肃等省份实现业务应用, 并取得比较可靠的观测数据<sup>[16]</sup>。最近也在我国第1个由翼龙-II改装的甘肃大型人工影响天气无人机甘霖-I上成功应用。

机载云降水粒子激光测量系统的广泛应用, 极大促进了国际云降水物理的飞机观测研究, 取得云中粒子相态、谱分布和转化的重要成果<sup>[17-21]</sup>。1981年我国从美国引进了第1套机载 PMS 云粒子测量系统, 该系统包括 FSSP-100, OAP-2D-C 和 OAP-2D-P, 在北方降水性层状云、层积混合云等方面开展了大量飞机观测试验研究<sup>[3-4, 22-26]</sup>。

到目前为止, 我国已引进20多套机载云降水测量系统, 包括 DMT 公司、SPEC 公司生产的气溶胶、云凝结核、云和降水粒子谱仪和图像仪等, 及配套大气参数测量系统, 广泛应用于我国气溶胶-云-降水物理过程观测研究。在大气气溶胶及云凝结核分布与转化<sup>[27-30]</sup>、北方层状云及积层混合云微物理特征与降水形成机制<sup>[31-41]</sup>、北方降雪云系微物理特征与降雪形成机制<sup>[42-45]</sup>、对流云微物理特征观测<sup>[46-49]</sup>、数值模式云物理过程验证<sup>[50-55]</sup>、飞机播撒效果检验<sup>[56-60]</sup>、大气遥感观测信息验证<sup>[61-62]</sup> 和飞机结冰研究<sup>[63-64]</sup> 等方面取得大量科研成果, 对于深入了解我国云降水物理过程形成机理, 提高人工影响科技水平发挥了重要作用。另外, 我国云降水物理飞机探测平台也得到快速提升。早期主要依赖空军和民航飞机, 目前以运-12、新舟-60、空中国王等民用飞机为主, 特别是通过国家东北、西北等人工影响天气工程建设, 建设了多架装载先进探测设备的新舟-60、空中国王飞机, 飞机探测平台性能得到显著提升。

尽管从20世纪60年代开始, 我国就开展了飞机云微物理探测研究, 并取得一系列重要成果, 但针对我国云降水物理飞机观测的进展、取得的重要成

果和存在问题等方面系统性总结很少。随着云物理过程飞机观测研究的不断发展,在人工影响天气科学作业设计、新型催化剂试验、台风等天气探测等方面的应用需求将显著增加<sup>[65-68]</sup>,对定量降水数值预报、遥感探测信息反演、环境和气候变化等领域的重要性凸显,对我国云降水物理飞机观测现状、取得成果及存在问题进行系统总结十分必要,不仅有利于进一步提高云物理飞机观测水平,还有利于促进相关学科和技术发展。

需要说明的是,本文主要基于国内期刊报道,关注与云和降水相关的飞机观测研究结果,并不侧重云降水物理飞机观测历史。

## 1 飞机观测技术进展

我国飞机云降水物理观测始于20世纪60年代。1980年以前用于人工影响天气作业的飞机类型主要以租用空军和民航飞机为主,如杜-2、里-2、安-2、伊尔-12、轰-5、歼教-5及C-47(美国DC-3飞机的军用型)等,但由于当时机载探测设备缺乏,搭载云物理探测仪器的飞机平台较少,部分省份人工影响天气飞机上安装苏制或仿制的云物理观测设备,如苏联中央高空观象台A-27型含水量仪、地球物理观象总台的云滴谱仪,另外美国产冰晶计数器、云凝结核计数器MEE-130、冰核计数器MEE-150也在一些飞机平台上使用。但因这些早期仪器标定、稳定性差等原因,使用效果均不理想,尽管开展了大量观测试验,但相关分析结果报道较少。大部分早期研究基于自制的手动冰雪晶取样器观测的结果较多。另外,在此期间我国自行研制了三用滴谱仪、总含水量仪等云物理观测设备,但主要用于高山云雾观测。20世纪70年代末,也尝试研制过一维激光光阵粒子谱探头,但未能成功。

利用涂油或氧化镁玻璃片的枪式采样器、铝箔碰撞采样器等手工采样和读数的方法在我国早期的飞机观测中应用较多。铝箔采样器测量技术是在飞机侧窗口处安装取样装置,如1963年吉林层状云飞机观测中<sup>[9-10]</sup>,铝箔取样器为长80 cm、宽4 cm的长杆,杆的取样端安装长12 cm、宽5 cm的取样板,取样板上垫上微孔橡胶片,将铝箔置于橡胶片上用金属框固定,采样时需将取样板伸出飞机侧窗口外25 cm的云中。铝箔有效采样面积为 $4 \times 10 \text{ cm}^2$ ,取样暴露时间约为5 s,如果飞机航速为 $80 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,

取样体积可以达到 $1.6 \text{ m}^3$ 。取样后,借助实验室显微镜可以获得较为清晰的云粒子图像数据,这与国外同期采用技术类似<sup>[13]</sup>。这种手工采样技术可实现对直径大于0.1 mm的降水性粒子进行采样,采样后通过显微镜读取粒子数、大小、图像等信息,但这种测量方法十分费时费力,且测量精度不高,只能获取大的降水粒子尺度、浓度和图像数据。

1980年后,部分省份的人工影响天气飞机仍然搭载仿制的TPZ-2型含水量仪、TPM-1型云滴谱仪和手动铝箔取样器等,有些省份的飞机开始改装使用引进的机载PMS云物理探测系统,搭载探测系统的飞机平台类型开始增加。人工影响天气飞机平台由最初的伊尔-14、安-26、运-12等飞机类型,扩展到运-7、运-8、双水獭(DHC-6)、夏延III A(Cheyenne)、空中国王B-200,新舟-60、空中国王350ER等,后期的飞机装载进口云粒子测量系统的显著增加。

机载云粒子激光测量技术从20世纪70年代应用以来,从早期的PMS探测系统到DMT及SPEC探测系统,仪器的稳定性、测量精度等性能得到较大幅度提高。激光云粒子测量仪器的原理对不同云粒子有所差异,激光云粒子谱仪是对 $2 \sim 50 \mu\text{m}$ 的小云粒子谱分布的测量,基于云粒子对激光的前向米散射原理。根据米散射理论,不同大小的云粒子会造成散射功率不同。根据散射功率,光学系统景深内的不同大小粒子的散射光将进入探测器和数据采集处理系统中的不同通道计数,计数值反映的是相应大小云粒子数量。通过系统标定和对比测量,实现对云粒子谱的测量。

云粒子成像仪是采用云粒子移动中对线型激光光束的切割遮挡原理,实现对 $25 \sim 1550 \mu\text{m}$ 直径范围内云粒子谱分布和图像的测量。降水粒子成像仪与云粒子成像仪的测量原理相同,主要区别在于成像放大倍数,粒子采样区域长度也有一定增加。但自然界中冰粒子形状非常复杂,通过激光阵探测器要完全识别出粒子形状挑战性大<sup>[69]</sup>。此外,激光云粒子测量系统还需配套大气综合参数测量系统,包括真空速、气温、气压、高度和全球定位系统(GPS)信息等参数的测量。

## 2 气溶胶、云微物理特征及降水形成机制

### 2.1 华北气溶胶分布及云凝结核转化特征

气溶胶是云形成的重要组成部分,是云凝结核

和冰核主要来源。利用飞机开展气溶胶、云凝结核和冰核的分布及转化研究,对了解云和降水形成具有重要意义。由于缺乏观测仪器,我国早期气溶胶、云凝结核和冰核相关研究基本局限在地面观测试验和室内实验研究,机载气溶胶、云凝结核观测仪器广泛应用后,这一工作才得以实现,但机载冰核观测仪器至今没有完全实现商业化,相关飞机观测研究很少,今后需要加强。

我国气溶胶飞机观测研究主要集中在华北地区<sup>[27-29]</sup>,近年在南方地区也开展了一些观测研究<sup>[30]</sup>。利用机载 PMS-PCASP 探头观测的 2004 年、2009 年夏秋季华北地区气溶胶浓度最大值量级为  $10^2 \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,主要以细粒子为主,平均粒径为  $0.21 \sim 0.31 \mu\text{m}$ ;气溶胶粒子谱呈单(多)峰分布,与高低空气流来源及二次气溶胶形成有关,高空西北或北方冷空气会带来较大的沙尘气溶胶粒子;气溶胶的垂直分布与大气层结状况密切相关,逆温层对低层气溶胶有明显的累积效应,高气溶胶浓度基本分布在 4500 m 高度以下大气层<sup>[27-28]</sup>。

对 2005 年、2006 年和 2009 年春秋季节华北地区云凝结核浓度和分布观测表明,云凝结核分布与地面源地及高空气流来源密切相关。污染的乡村地区上空的云凝结核浓度,比清洁的乡村地区高 5 倍以上,且云凝结核具有明显的日变化特征,白天浓度上升明显,夜间浓度下降,这种现象与污染气体通过光化学过程形成二次气溶胶有关。另外,在过饱和度为 0.3% 的情况下,大气低层的气溶胶转化为云凝结核的比例较低,小于 20%,这是由于受到局地或区域地面污染的影响,形成的二次气溶胶是细粒子,核化为云凝结核时,所需过饱和度高,因此从气溶胶到云凝结核的转化率低,而在 4500 m 高度以上的大气层中转化率高达 50%,说明这种较大尺度气溶胶粒子具有高可溶性,从而转化为云凝结核的比率显著提高<sup>[28-29]</sup>。

## 2.2 北方降雨层状云和积层混合云微物理特征

我国北方降雨层状云、积层混合云微物理特征飞机观测研究在春季、夏季、秋季开展较多,但早期有关飞机观测数据报道较少。由于观测条件的限制,主要研究云中大粒子的浓度、尺度、形状等特征。1963 年 4—6 月在吉林省 15 次降水性层状冷云的飞行中,用铝箔取样器观测了云中的冰晶(直径小于  $300 \mu\text{m}$ )与雪晶(直径大于  $300 \mu\text{m}$ )数据,揭示降水性层状冷云中冰晶与雪晶的一些基本特征,如冰雪

晶浓度的空间分布、形状及温度与浓度的关系;云中直径为  $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$  的冰晶平均浓度为  $26.2 \text{ L}^{-1}$ ,直径为  $1 \text{ mm}$  雪晶的平均浓度为  $0.18 \text{ L}^{-1}$ ;并发现云中冰晶与雪晶的平均浓度与云顶温度密切相关,云顶温度愈低,云中冰晶与雪晶的平均浓度愈大<sup>[9-10]</sup>。1988—1989 年 5—7 月利用铝箔取样器对宁夏降水性层状云特征开展大量比较系统的飞机观测研究,揭示了春夏季西北层状云中粒子浓度和尺度分布特征<sup>[12]</sup>。

机载 PMS,DMT 和 SPEC 激光探测仪器应用以来,在华北等地区开展了大量飞机观测试验研究,在云降水粒子浓度、尺度、形态和液态水含量,以及云微物理、动力结构和降水形成机制等方面取得了重要研究成果,极大提高了对我国北方层状云和积层混合云微物理过程和降水形成机制的认识。相对而言,在华北地区开展的飞机观测试验最多,在北方其他地区的飞机观测较少。西北地区在青海、甘肃的飞机观测相对较多。青海三江源地区秋季一次层状云垂直结构的 PMS 探测资料分析表明:云系具有复杂的垂直组成,高层由卷云和高层云的冰云组成,下层由高层云和层积云的混合相态云组成<sup>[35]</sup>。

高空西风槽是华北降水性云系的重要影响天气系统。对华北 2003 年、2004 年夏秋季西风槽层状云、层积混合云的飞机探测表明:直径为  $2 \sim 50 \mu\text{m}$  的云滴、冰晶粒子的最大浓度为  $120 \sim 320 \text{ cm}^{-3}$ ,平均直径为  $7 \sim 16 \mu\text{m}$ 。暖锋云系中的云粒子浓度较高,达到  $320 \text{ cm}^{-3}$ ;大云粒子和降水粒子(直径为  $25 \sim 800 \mu\text{m}$ )的最大浓度为  $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$ ;最大液态水含量为  $0.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。柱状冰晶和少量结冻体分布在  $-8 \sim -5.9^\circ\text{C}$  层,结冻粒子主要在  $-12 \sim -8^\circ\text{C}$  层,枝状冰粒子在  $-20^\circ\text{C}$  层。大冰粒子浓度在  $0.01 \sim 1 \text{ L}^{-1}$  范围;冷锋层积云系中以霰粒、柱状和针状冰晶为主,并且存在多个干层,过冷水含量为  $0.26 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。暖锋云系中以霰粒、结冻冰粒子和冰雪晶聚合物为主<sup>[31-32]</sup>。

对华北 2004 年和 2005 年夏季飞机观测的两个层状云个例的比较表明<sup>[33]</sup>:具有干层的 2004 年个例过冷水含量低于  $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,而 2005 年的个例过冷水含量可达  $0.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对 1989—2008 年山东省 23 架次秋季降水云系云结构的 PMS 探测数据分析表明:最大过冷水含量可达  $0.36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,云中冰晶浓度最大可达  $12.8 \sim 406 \text{ L}^{-1}$ ,云粒子谱分布为单峰型<sup>[34]</sup>。对河北秋季一次西风槽降水云系

的飞机观测表明:西风槽前云系过冷水含量较高,近槽云系冷云区有干层,槽后云系中过冷水含量较低,冷、暖云之间也有干层存在<sup>[36]</sup>。在稳定性层状云中过冷水含量很低。在深厚层状云中过冷水含量较高,大量液滴的存在也说明冰-液相转化不充分<sup>[41]</sup>。

对2009年春季环北京地区3架飞机联合云探测试验数据分析表明,积层混合云中温度在 $-16\sim 0^{\circ}\text{C}$ 区间的冰晶主要为板状、针柱状、柱帽状、辐枝状等<sup>[37-38]</sup>。云顶温度高于 $-8^{\circ}\text{C}$ 时,云中低层的冰晶以板状和针柱状为主;云顶温度低于 $-13^{\circ}\text{C}$ 时,云中低层有辐枝状冰晶存在;云顶温度低于 $-18^{\circ}\text{C}$ 时,云低层有柱帽状冰晶存在。在嵌入对流区有比较多的淞附状冰粒子。云中不同高度区因过冷水含量不同,造成云中粒子拓宽增长速率出现明显差别。

针对华北春季积层混合云中的对流泡和融化层的飞机探测结果表明:高层高浓度大冰粒子在下落到对流泡中的增长主要是聚并和淞附增长,而在层云区主要为聚并增长<sup>[39]</sup>。聚并增长过程形成的冰粒子密度低、下落速度小,在 $0^{\circ}\text{C}$ 层时间更长,导致融化现象更为明显。对流泡一般在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 温度(高度为6 km到4 km)范围内,水平和垂直尺度约为2 km,最大上升气流速度为 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。泡内平均液态水含量是周围层云区的2倍左右,小云粒子平均浓度比周围高1个量级。对流泡中的降水形成机制符合“播撒-供给”机制,但在过冷水含量低的层云区不符合“播撒-供给”机制。

利用机载Ka波段云雷达和DMT机载云粒子测量系统对山东春季一次积层混合云的协同观测研究表明:对流泡中的冰晶浓度是层云区的5.5倍,平均直径是层云区的1.7倍<sup>[40]</sup>。对流泡中的降水形成机制主要依赖过冷水含量。过冷水含量大时,冰粒子通过淞附增长形成霰;过冷水含量小时,冰粒子通过水汽凝华过程形成冰雪晶,然后通过聚合增长。

综上所述,层状云、积层混合云的微物理特征除与云顶温度、水汽含量、云厚度等密切相关外,也与云系所处高空槽、低层冷暖锋面云系的区域有关。一般而言,槽前暖锋面云系中的过冷水更为丰富,冰晶浓度低,而槽后的冷锋面云系过冷水较少,冰晶浓度高,且有干层存在。积层混合云中的对流泡区具有更高的过冷水含量,冰粒子淞附增长起重要作用,符合“播撒-供给”降水形成机制,而在层云区,当云厚度较小时,过冷水含量很少,冰雪晶的凝华、聚并增长起主导作用,并不符合“播撒-供给”降水形成机

制,而当云厚度较大,过冷水含量较为丰富时,凝华、聚并和淞附增长起主导作用,基本符合“播撒-供给”降水形成机制。

### 2.3 北方冬季降雪云微物理结构特征

利用安装在伊尔-14飞机上的首套进口PMS,冬季在新疆乌鲁木齐地区开展了大量降雪过程的飞机观测研究<sup>[3-4]</sup>。一些观测个例表明:雪主要在2000 m高度以下的低层产生,云中无明显过冷液态水,降雪产生的机制可能是凝华-聚并机制,冰晶粒子图像显示存在明显的聚并现象<sup>[22-25]</sup>。

2022年北京冬季奥运会申办成功以来,在北京及周边地区开展了冬季降雪云系飞机观测研究。对北京2015年1月和11月两次山区降雪云的微物理结构和降雪形成机制研究表明:当水汽输送强时,过冷水含量高,降雪形成以凝华和淞附为主,凝华过程占78%,淞附过程占20%,表现为雨夹雪天气;当水汽输送弱时,降雪形成以凝华和聚并为主,凝华过程占88%~92%,聚并过程占2%~5%,表现为降雪天气<sup>[42]</sup>。对2017年3月北京海坨山地区的一次降雪过程的研究表明:此次降雪云低层过冷水含量低,回波强度小于20 dBZ,回波顶高低于7 km,雪的下落速度小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。降雪粒子谱分布以直径1 mm为主,为干雪<sup>[43]</sup>。对2019年2月北京海坨山由低槽形成的降雪过程飞机观测表明,冰雪晶的凝华和聚并增长是主要形成机制<sup>[44]</sup>。对2011年11月山西一次降雪特征分析表明:雷达回波强度为10~20 dBZ的层状云回波,但镶嵌了超过30 dBZ的强回波,直径大于 $50\ \mu\text{m}$ 和 $200\ \mu\text{m}$ 的冰雪晶主要产生在降雪云上部,极大值出现在 $-9.3^{\circ}\text{C}$ 附近,高层主要为凝华增长<sup>[45]</sup>。

由此可见,我国北方冬季降雪过程的形成机制主要是凝华-聚并机制。只有在水汽非常充足、云较厚的情况下,云中存在过冷水,淞附增长过程才具有重要作用,该结果与华北的飞机观测及早期新疆的飞机观测结果基本一致。

### 2.4 南方暖性层积云结构特征与降水形成机制

我国针对南方云和降水过程的飞机观测研究普遍偏少,主要与南方大部分省份人工影响天气业务部门多采用地面高炮、火箭和烟炉作业有关。近年,南方部分省份开始使用飞机作业,但相关的飞机观测数据分析仍然明显不足。值得一提的是,早期我国开展了大量南方云物理观测试验,但限于当时的观测试验条件,取得的一系列创新性研究成果主要

集中在高山云降水物理观测研究方面<sup>[3-4]</sup>。

国内首次对暖性层积云结构的系统性飞机观测研究是1979—1986年6—7月在新安江流域开展的暖性层积云飞机观测研究<sup>[11]</sup>,对暖云降水形成机制认识和暖云人工增雨均具有重要意义。飞机观测采用铝箔取样器,由于采样条件所限,只能对大云滴(直径在50  $\mu\text{m}$ 以上)进行较好的观测,飞机共穿云22块,其中16块为产生降雨层积云,云厚为1300~3850 m,6块为不产生降雨层积云,云厚为500~2900 m。所观测的层积云为梅雨期间的锋面云系,且最高的云约4000 m,对应的云顶温度为5 $^{\circ}\text{C}$ ,说明均为暖云。观测结果显示大云滴数量对暖云降水十分重要:当云厚小于2 km时,产生降雨的层积云中大云滴(直径大于80  $\mu\text{m}$ )的浓度可达到 $10^2 \text{ m}^{-3}$ 的频率占94%,浓度达到 $10^3 \text{ m}^{-3}$ 的频率占50%,而对应的不产生降雨的层积云中大云滴浓度频率仅为32%,浓度达到 $10^3 \text{ m}^{-3}$ 的频率为零;对直径大于200  $\mu\text{m}$ 雨滴浓度,产生降雨的层积云中频率为63%,不产生降雨的仅为5%。当云厚大于2 km时,有雨层积云和无雨层积云之间最大的区别是大云滴数量和大云滴在云中出现的频率。

因此,层积混合云产生降雨的条件是云中数量大于 $10^2 \text{ m}^{-3}$ 的大云滴(直径大于80  $\mu\text{m}$ )出现频率超过94%,即云中的绝大部分区域均出现大滴数浓度超过 $10^2 \text{ m}^{-3}$ 。另外,对没有产生降雨的层积云,直径最大的云滴出现在云顶部,而产生降雨的层积云,直径最大的云滴出现在云的中上部。这一观测事实说明,对于没有产生降雨的暖云,最大上升气流应在云顶,这与热带地区经常出现的边界层云结构非常类似。从云动力学形成方面考虑,有降雨和无降雨的层积云的动力学产生机制应不同,从而导致云微物理结构特征出现显著差异。因此,很有必要继续对暖性层积混合云开展更加深入的观测和数值模拟研究。

## 2.5 对流云微物理特征

由于对流云飞机观测难度大,我国相关的飞机观测试验较少。对2003年7月一次东北冷涡对流云带的飞机观测表明:过冷水含量最大可达 $3.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,云上部过冷水含量为 $2.0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对流云带上部冰粒子浓度最大值为 $1062 \text{ L}^{-1}$ ,在-6.8 $^{\circ}\text{C}$ 层处,这种特征对降水形成具有重要作用<sup>[46]</sup>。在第三次青藏高原大气科学试验中,我国首次在青藏高原中部地区开展青藏高原对流云发展初期的飞机综合

观测研究,取得了一些重要成果。如发现高原对流云内过冷水含量丰富,云滴粒子具有尺度大、浓度小的特性,高原对流云中霰粒子浓度高,夏季对流云易产生降水等特征<sup>[47]</sup>。2014年夏季在山西开展的两个非降水性浅积云飞机观测个例表明:不同发展阶段积云的云微物理特征不同,云粒子浓度为 $10^2 \sim 10^3$ ,粒子直径随高度增加而增大,积云内部存在云粒子水平分布不均匀情况<sup>[48-49]</sup>。

## 2.6 数值模式云微物理过程验证

飞机观测数据是检验和改进数值模式中的云物理过程的重要途径。利用一次东北夏季层状云飞机观测数据,对模拟的云垂直结构检验表明<sup>[50]</sup>:第1层以冰晶凝华增长为主,冰晶的碰并过程次之;第2层冰晶和雪增长是凝华过程,贝吉隆过程具有重要作用;第3层是暖雨和融化过程。第1层对第2层有播种作用,冰晶层对降水的贡献为7%,过冷水层对降水的贡献为54%,暖水层对降水的贡献为39%,冷暖云过程均在降水形成中具有重要作用。对层状云雨滴分档模式的检验表明:从上到下各层对降水贡献占比为3.5%,38.5%和58%<sup>[51]</sup>。利用2010年4月20日山西省一次春季层状降水云系的飞机探测数据,对中国气象科学研究院中尺度云参数化模式进行验证和对比,结果表明:数值模拟与飞机探测的高空温度、湿度基本一致,模拟的不同高度云粒子相态、垂直方向云水比含水量与飞机探测获取的云粒子图像和云液态水含量的垂直结构基本吻合,但数值模拟的云中各种水成物粒子出现的高度较飞机探测结果偏高<sup>[52]</sup>。

利用环北京3架飞机同时观测数据,对WRF(Weather Research and Forecasting)模式模拟的微物理结构验证表明<sup>[53]</sup>:云中液态水含量模拟值与飞机观测值较一致,但在-6 $^{\circ}\text{C}$ 到-10 $^{\circ}\text{C}$ 层,模拟的雪粒子依附增长较大,聚合发生的高度偏高,使模拟的固态水凝物含量高于观测值。另外,模式中粒子谱分布斜率与观测接近,但截距偏大,模式中谱形参数应随高度变化。用同样飞机观测数据对WRF模拟的积层混合云微物理特征的比较表明<sup>[54]</sup>:积云区水成物的比例为雪占51.9%,霰占31.0%,雨占16.0%;层云区水成物的比例为雪占90.4%,雨占6.1%,冰晶占3.5%。将WRF模拟的北京秋季一次弱降水层积混合云与飞机观测比较表明,冰雪晶的融化是地面降水形成的主要机制<sup>[55]</sup>。

综上,飞机观测数据对验证数值模式中的云物理过程具有重要意义,但目前的研究仍不够深入,特别在通过飞机观测数据改进模式物理过程和参数化方面亟待加强。

### 3 飞机播撒效果检验、遥感观测信息验证和飞机结冰研究

#### 3.1 飞机播撒效果检验

2000年春季在山东进行了两次飞机碘化银播撒试验,飞机观测结果显示:播撒碘化银后约5 min,可观测到过冷液态水减小、冰雪晶浓度增加和云粒子谱拓宽现象<sup>[56]</sup>。对2005年春季河南层状云飞机播撒试验分析表明:播撒后云粒子数和液态水含量均出现减小现象,播撒层下方的变化更大,平均直径增加明显<sup>[57]</sup>。对2009年4月张家口一次飞机播云试验分析表明:播撒后液态含水量降低明显,粒子平均直径增大;播撒后冰晶出现减少现象,大粒子出现显著增加情况<sup>[58]</sup>。

2013年10月13日张家口地区积层混合云飞机作业前后的微物理变化结果表明:云粒子在作业前时段内的平均浓度为 $31\text{ cm}^{-3}$ ,高于作业后平均浓度 $17.6\text{ cm}^{-3}$ ;作业后冰晶粒子通过贝吉龙过程消耗过冷水长大,浓度由之前的 $0.86\text{ L}^{-1}$ 增至 $4.27\text{ L}^{-1}$ ,平均直径增至 $550\text{ }\mu\text{m}$ ;降水粒子浓度也相应升高,谱明显变宽<sup>[59]</sup>。针对2017年3月19日陕西飞机碘化银增雨作业后卫星和雷达数据显示的云迹线和地面雨滴谱仪观测的雨强、雨滴数浓度、雨滴直径的变化,通过建立增雨影响回波强度与地面雨强的拟合关系,定量研究了人工增雨的时空演变并对飞机播云效果进行检验<sup>[60]</sup>。

此外,依据飞机探测数据和实际作业效果,人工影响天气业务部门归纳出一些飞机作业指标<sup>[65]</sup>,并建立了飞机作业实时监测系统<sup>[66]</sup>。

#### 3.2 遥感观测信息验证

卫星、雷达等遥感观测信息的飞机观测验证是一项非常重要的工作,对于改进云遥感信息反演算法具有重要意义,但我国相关研究亟待加强。

1999年6月华北一次层积云飞机垂直探测结果输入辐射传输模式SBDART2.4,用正演方式与GMS5/VISSR及NOAA15/AVHRR反射通道数据对比分析结果表明:相对偏差为7%,没有明显系统性偏差,表明用飞机探测数据计算云辐射是可行

的<sup>[61]</sup>。利用云雷达回波强度、粒子下落速度和速度谱宽数据反演液态水含量和滴谱参数,与飞机观测对比结果表明,云雷达反演的微物理参数与飞机观测具有一致性<sup>[62]</sup>。

#### 3.3 飞机结冰研究

飞机探测的云微物理数据也可用于飞机积冰的研究和预报<sup>[63]</sup>。北京人工影响天气办公室基于2014—2017年积冰个例观测数据和再分析数据,以气温、相对湿度、垂直速度和云量为参数建立积冰指数,使积冰事件的判别准确率明显提高<sup>[64]</sup>。

## 4 结论与讨论

我国云降水物理飞机观测研究取得如下主要进展:

1) 我国飞机云降水物理观测技术取得重要进展。飞机观测平台经历了从苏制、美制军用飞机到国产运-系列飞机、新舟-60和美国空中国王等不同阶段。20世纪60年代机载观测设备主要为苏制或仿苏机载仪器、美国MEE公司云凝结核、冰核计数器,80年代初引进第1代激光云粒子测量系统,目前普遍采用DMT, SPEC机载云粒子测量系统,在飞机平台、机载测量技术和基于飞机观测的云降水物理研究方面均取得显著进步。

2) 基于飞机观测的云降水物理研究取得重要进展。我国空中大气气溶胶分布及其云凝结核转化过程与大气层结、气溶胶来源和二次气溶胶形成过程关系密切。逆温层对低层气溶胶具有明显的累积效应,低层污染过程形成的二次气溶胶向云凝结核的转化率较低,而高空沙尘气溶胶向云凝结核的转化率较高;北方层状云、积层混合云的微物理特征与云顶温度、水汽含量、云厚度等密切相关,也与云系所处高空槽、低层冷暖锋面云系的区域有关。积层混合云中的对流泡区具有更高的过冷水含量,冰粒子淞附增长起重要作用,符合“播撒-供给”降水形成机制,而在层云区,当云厚度较小时,过冷水含量很少,冰雪晶的凝华、聚并增长起主导作用,并不符合“播撒-供给”降水形成机制,而当云厚度较大,过冷水含量较为丰富,凝华、聚并和淞附增长起主导作用,基本符合“播撒-供给”降水形成机制;我国北方冬季降雪过程的形成机制主要是凝华-聚并机制。只有在水汽非常充足、云比较厚的情况下,云中存在过冷水含量,淞附增长过程才具有重要作用。



3) 在数值模式云物理过程验证、飞机播撒效果检验和遥感观测信息验证等方面也取得重要进展。飞机观测数据对验证数值模式中的云物理过程具有重要作用,但目前研究局限于观测数据的直接比较,通过飞机观测云微物理过程参数化改进模式物理过程方面较薄弱。我国在对流云、南方暖云微物理过程飞机观测试验,以及飞机人工影响天气作业效果、遥感观测信息的飞机观测检验等方面的应用研究也亟待加强。

飞机观测研究仍然是未来云降水物理研究十分重要的组成部分。飞机平台会向更高性能有人或无人驾驶飞机平台发展,特别是长航程、适宜复杂大气环境和强对流天气系统飞行的无人机将会得到快速发展;机载仪器从目前单一的气溶胶、云物理探测仪器向大气动力过程、大气辐射、化学、生物、电过程等方面扩展,特别是各种机载遥感仪器设备将快速发展。

### 参考文献

- [1] 廖捷,熊安元.我国飞机观测气象资料概况及质量分析.应用气象学报,2010,21(2):206-213.  
Liao J, Xiong A Y. Introduction and quality analysis of Chinese aircraft meteorological data. *J Appl Meteor Sci*, 2010, 21(2):206-213.
- [2] 马舒庆,汪改,潘毅,等.微型探空飞机解析测风方法.大气科学,1999,23(3):377-384.  
Ma S Q, Wang G, Pan Y, et al. An analytical method for wind measurements by a mini-aircraft. *Chinese J Atmos Sci*, 1999, 23(3):377-384.
- [3] 李大山.人工影响天气现状与展望.北京:气象出版社,2002:65-86.  
Li D S. Status and Prospect of Weather Modification. Beijing: China Meteorological Press, 2002:65-86.
- [4] 郭学良,郑国光.中国人工影响天气事业50年回顾与展望—中国人工影响天气事业50周年纪念文集.北京:气象出版社,2009:136-160.  
Guo X L, Zheng G G. Review and Prospect of Weather Modification for 50 Years in China: Collections for the 50th Anniversary of Weather Modification in China. Beijing: China Meteorological Press, 2009:136-160.
- [5] 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.大气科学,2008,32(4):967-974.  
Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in recent years. *Chinese J Atmos Sci*, 2008, 32(4):967-974.
- [6] 郑国光,郭学良.人工影响天气科学技术现状及发展趋势.中国工程科学,2012,14(9):20-27.  
Zheng G G, Guo X L. Status and development of sciences and technology for weather modification. *Eng Sci*, 2012, 14(9):20-27.
- [7] Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. Advances in cloud physics and weather modification in China. *Adv Atmos Sci*, 2015, 32(2):230-249.
- [8] 郭学良,方春刚,卢广献,等.2008—2018年我国人工影响天气技术及应用进展.应用气象学报,2019,30(6):641-650.  
Guo X L, Fang C G, Lu G X, et al. Progresses of weather modification technologies and applications in China from 2008 to 2018. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6):641-650.
- [9] 游来光,熊光莹,高明忍,等.春季吉林地区层状冷云中冰晶的形成与雪晶增长特点.气象学报,1965,37(4):423-433.  
You L G, Xiong G Y, Gao M R, et al. Ice crystal formation and snow crystal growth in stratiform cold clouds in the spring of Jilin region. *Acta Meteor Sinica*, 1965, 37(4):423-433.
- [10] 孙可富,游来光.1963年4—6月吉林地区降水性层状冷云中的冰晶与雪晶.气象学报,1965,37(3):265-272.  
Sun K F, You L G. Crystals of ice and snow in precipitating stratiform clouds from April to June of 1963 in the Jilin region. *Acta Meteor Sinica*, 1965, 37(3):265-272.
- [11] 黄美元,何珍珠,沈志来.暖性层积云中云大水滴分布特征.气象学报,1983,41(3):358-364.  
Huang M Y, He Z Z, Shen Z L. Distribution characteristics of large-size cloud droplets in warm strati-cumulus clouds. *Acta Meteor Sinica*, 1983, 41(3):358-364.
- [12] 牛生杰,马铁汉,管月娥,等.宁夏夏季降水性层状云微结构观测分析.高原气象,1992,11(3):241-248.  
Niu S J, Ma T H, Guan Y E, et al. Observation analysis of the microstructures of precipitation sheet clouds in summer over Ningxia. *Plateau Meteor*, 1992, 11(3):241-248.
- [13] Jones R F. Size-distribution of ice crystals in cumulonimbus clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1960, 86(368):187-194.
- [14] Durbin W G. Recent aircraft research into cloud physics. *Weather*, 1958, 13(5):143-151.
- [15] Fugal J P, Shaw R A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument. *Atmos Meas Tech*, 2009, 2(1):259-271.
- [16] 郭学良,于子平,杨泽后,等.高性能机载云粒子成像仪研制及应用.气象学报,2020,78(6):1050-1064.  
Guo X L, Yu Z P, Yang Z H, et al. Development and application of the high-performance airborne cloud particle imager. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(6):1050-1064.
- [17] Herzegh P H, Hobbs P V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. II: Warm-frontal clouds. *J Atmos Sci*, 1980, 37:597-611.
- [18] Lawson R P, Stewart R E, Strapp J W, et al. Aircraft observations of the origin and growth of very large snowflakes. *Geophys Res Lett*, 1993, 20:53-56.



- [19] Lawson R P, Zuidema P. Aircraft microphysical and surface-based radar observations of summertime Arctic clouds. *J Atmos Sci*, 2009, 66: 3505-3529.
- [20] McFarquhar G M, Black R A. Observations of particle size and phase in tropical cyclones: Implications for mesoscale modeling of microphysical processes. *J Atmos Sci*, 2004, 61: 422-439.
- [21] Evans A G, Locatelli J D, Stoeilinga M T, et al. The IMPROVE-1 storm of 1-2 February 2001. Part II: Cloud structures and the growth of precipitation. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 3456-3473.
- [22] 游来光, 王守荣, 王鼎丰, 等. 新疆冬季降雪微结构及其增长过程的初步研究. *气象学报*, 1989, 47(1): 73-81.  
You L G, Wang S R, Wang D F, et al. The microphysical structure of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang. *Acta Meteor Sinica*, 1989, 47(1): 73-81.
- [23] 游来光, 李炎辉, 刘玉宝. 自然云中冰晶生成的核化过程及雪晶对过冷云滴的撞冻. *气象学报*, 1992, 50(2): 232-238.  
You L G, Li Y H, Liu Y B. On the nucleation processes of ice crystal and the collision efficiency between the dendritic snow crystal and droplets in natural clouds. *Acta Meteor Sinica*, 1992, 50(2): 232-238.
- [24] 王谦, 游来光, 胡志晋. 新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究——一个例的观测结果与分析. *气象学报*, 1987, 45(1): 2-12.  
Wang Q, You L G, Hu Z J. The study on the winter stratocumulus cloud over Ürümqi, Xinjiang, China—Structure and evolution. *Acta Meteor Sinica*, 1987, 45(1): 2-12.
- [25] 刘玉宝, 游来光, 胡志晋. 新疆准噶尔盆地冬季系统性降水研究——I. 降水模型. *气象科学研究院院刊*, 1988, 3(1): 36-45.  
Liu Y B, You L G, Hu Z J. A study on the frontal snowfall in Zhungeer basin of Xinjiang in winter. Part I: Precipitation pattern. *J Academy Meteor Sci*, 1988, 3(1): 36-45.
- [26] 陈万奎, 游来光. 融化层附近降水粒子微物理特征的个例分析. *气象科学研究院院刊*, 1987, 2(2): 143-150.  
Chen W K, You L G. A case study on microphysical characteristics of precipitation particles near the melting layer. *J Academy Meteor Sci*, 1987, 2(2): 143-150.
- [27] 范焯, 郭学良, 付丹红, 等. 北京及周边地区 2004 年 8、9 月间大气气溶胶分布特征观测分析. *气候与环境研究*, 2007, 12(1): 49-62.  
Fan Y, Guo X L, Fu D H, et al. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas. *Clim Environ Res*, 2007, 12(1): 49-62.
- [28] Lu G X, Guo X L. Distribution and origin of aerosol and its transform relationship with CCN derived from the spring multi-aircraft measurements of Beijing Cloud Experiment (BCE). *Chinese Sci Bull*, 2012, 57: 2460-2469.
- [29] 石立新, 段英. 华北地区云凝结核的观测研究. *气象学报*, 2007, 65(4): 644-652.  
Shi L X, Duan Y. Observations of cloud condensation nuclei in North China. *Acta Meteor Sinica*, 2007, 65(4): 644-652.
- [30] 段婧, 楼小凤, 陈勇, 等. 基于航测的珠三角气溶胶垂直分布及活化特性. *应用气象学报*, 2019, 30(6): 677-689.  
Duan J, Lou X F, Chen Y, et al. Aircraft measurements of aerosol vertical distributions and its activation efficiency over the Pearl River Delta. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(6): 677-689.
- [31] 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2003 年 8~9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究. *大气科学*, 2007, 31(4): 596-610.  
Zhang D G, Guo X L, Fu D H, et al. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during August-September 2003. *Chinese J Atmos Sci*, 2007, 31(4): 596-610.
- [32] 范焯, 郭学良, 张佃国, 等. 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. *大气科学*, 2010, 34(6): 1187-1200.  
Fan Y, Guo X L, Zhang D G, et al. Airborne particle measuring system measurement on structure and size distribution of stratocumulus during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas. *Chinese J Atmos Sci*, 2010, 34(6): 1187-1200.
- [33] Hou T, Lei H, Hu Z. A comparative study of the microstructure and precipitation mechanisms for two stratiform clouds in China. *Atmos Res*, 2010, 96(2/3): 447-460.
- [34] 张佃国, 郭学良, 龚佃利, 等. 山东省 1989—2008 年 23 架次飞机云微物理结构观测试验结果. *气象学报*, 2011, 69(1): 195-207.  
Zhang D G, Guo X L, Gong D L, et al. The observational results of the clouds microphysical structure based on the data obtained by 23 sorties between 1989 and 2008 in Shandong Province. *Acta Meteor Sinica*, 2011, 69(1): 195-207.
- [35] 王黎俊, 银燕, 李仑格, 等. 三江源地区秋季典型多层次云系的飞机观测分析. *大气科学*, 2013, 37(5): 1038-1058.  
Wang L J, Yin Y, Li L G, et al. Analyses on typical autumn multi-layer stratiform clouds over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne observations. *Chinese J Atmos Sci*, 2013, 37(5): 1038-1058.
- [36] 杨文霞, 周毓荃, 孙晶, 等. 一次西风槽过程过冷云水分布特征观测研究. *气象学报*, 2014, 72(3): 583-595.  
Yang W X, Zhou Y Q, Sun J, et al. Observational studies of distribution characteristics of supercooled cloud water during a westerly trough process. *Acta Meteor Sinica*, 2014, 72(3): 583-595.
- [37] 朱士超, 郭学良. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究. *气象学报*, 2014, 72(2): 366-389.  
Zhu S C, Guo X L. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements. *Acta Meteor Sinica*, 2014, 72(2): 366-389.
- [38] Zhu S C, Guo X L, Lu G X, et al. Ice crystal habits and growth processes in stratiform clouds with embedded convection examined through aircraft observation in northern China. *J At-*

- mos Sci*, 2015, 72(5): 2011-2032.
- [39] 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等. 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. *大气科学*, 2019, 43(6): 1365-1384.
- Qi P, Guo X L, Lu G X, et al. 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. *Chinese J Atmos Sci*, 2019, 43(6): 1365-1384.
- [40] 张佃国, 王烁, 郭学良, 等. 基于机载 Ka 波段云雷达和粒子测量系统同步观测的积层混合云对流泡特征. *大气科学*, 2020, 44(5): 1023-1038.
- Zhang D G, Wang S, Guo X L, et al. The properties of convective generating cells embedded in the stratiform cloud on basis of airborne Ka-band precipitation cloud radar and droplet measurement technologies. *Chinese J Atmos Sci*, 2020, 44(5): 1023-1038.
- [41] 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究. *大气科学*, 2021, 45(1): 88-106.
- Yang J F, Hu X F, Lei H C, et al. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang Mountains. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(1): 88-106.
- [42] 高茜, 郭学良, 刘香娥, 等. 北京北部山区两次降雪过程微物理形成机制的观测-模拟研究. *大气科学*, 2020, 44(2): 407-420.
- Gao Q, Guo X L, Liu X E, et al. Numerical simulation and observation study on microphysical formation processes of two different snowfall cases in northern mountain area of Beijing. *Chinese J Atmos Sci*, 2020, 44(2): 407-420.
- [43] 黄钰, 郭学良, 毕凯, 等. 北京延庆山区降雪云物理特征的垂直观测和数值模拟研究. *大气科学*, 2020, 44(2): 356-370.
- Huang Y, Guo X L, Bi K, et al. Vertical observation and numerical simulation of the clouds physical characteristics of snow-producing over Yanqing Mountain area in Beijing. *Chinese J Atmos Sci*, 2020, 44(2): 356-370.
- [44] 马新成, 董晓波, 毕凯, 等. 北京海坨山区低槽降雪云系演变特征的观测研究. *气象学报*, 2021, 79(3): 428-442.
- Ma X C, Dong X B, Bi K, et al. The characteristics and evolution of low trough snowfall cloud system in the Haituo Mountain, Beijing. *Acta Meteor Sinica*, 2021, 79(3): 428-442.
- [45] 封秋娟, 牛生杰, 侯团结, 等. 山西一次降雪云物理特征的飞机观测研究. *大气科学*, 2021, 45(5): 1-15.
- Feng Q J, Niu S J, Hou T J, et al. Aircraft-based observation of the physical characteristics of snowfall cloud in Shanxi Province. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(5): 1-15.
- [46] 齐彦斌, 郭学良, 金德镇. 一次东北冷涡中对流云带的宏微物理结构探测研究. *大气科学*, 2007, 31(4): 621-634.
- Qi Y B, Guo X L, Jin D Z. An observational study of macro/microphysical structures of convective rainbands of a cold vortex over Northeast China. *Chinese J Atmos Sci*, 2007, 31(4): 621-634.
- [47] Chang Y, Guo X L, ang J, et al. Aircraft measurement campaign on summer cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau. *Sci Rep*, 2019, 9(1): 4912.
- [48] 蔡兆鑫, 蔡森, 李培仁, 等. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微物理特性的飞机观测研究. *大气科学*, 2019, 43(6): 1191-1203.
- Cai Z X, Cai M, Li P R, et al. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages. *Chinese J Atmos Sci*, 2019, 43(6): 1191-1203.
- [49] 蔡兆鑫, 蔡森, 李培仁, 等. 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. *大气科学*, 2021, 45(2): 393-406.
- Cai Z X, Cai M, Li P R, et al. An in-situ case study on microphysical properties of aerosol and shallow cumulus clouds in North China. *Chinese J Atmos Sci*, 2021, 45(2): 393-406.
- [50] 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. *大气科学*, 2007, 31(3): 425-439.
- Hu Z X, Lei H C, Guo X L, et al. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation. *Chinese J Atmos Sci*, 2007, 31(3): 425-439.
- [51] 杨洁帆, 雷恒池, 胡朝霞. 一次层状云降水过程微物理机制的数值模拟研究. *大气科学*, 2010, 34(2): 275-289.
- Yang J F, Lei H C, Hu Z X. Simulation of the stratiform cloud precipitation microphysical mechanism with the numerical model. *Chinese J Atmos Sci*, 2010, 34(2): 275-289.
- [52] 李军霞, 李培仁, 陶玥, 等. 山西春季层状云系数数值模拟及与飞机探测对比. *应用气象学报*, 2014, 25(1): 22-32.
- Li J X, Li P R, Tao Y, et al. Numerical simulation and flight observation of stratiform precipitation clouds in spring of Shanxi Province. *J Appl Meteor Sci*, 2014, 25(1): 22-32.
- [53] 朱士超, 郭学良. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究. *大气科学*, 2015, 39(2): 370-385.
- Zhu S C, Guo X L. A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in northern China. *Chinese J Atmos Sci*, 2015, 39(2): 370-385.
- [54] 高茜, 郭学良, 何晖, 等. 基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究. *大气科学*, 2020, 44(5): 899-912.
- Gao Q, Guo X L, He H, et al. Numerical simulation study on the microphysical characteristics of stratiform clouds with embedded convections in northern China based on aircraft measurements. *Chinese J Atmos Sci*, 2020, 44(5): 899-912.
- [55] 刘香娥, 高茜, 何晖, 等. 一次积层混合云系垂直结构和降水机制的飞机观测资料分析与数值模拟. *气象学报*, 2020, 78(2): 277-288.
- Liu X E, Gao Q, He H, et al. Analysis of aircraft observation data and numerical simulation of vertical structure and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections. *Acta Meteor Sinica*, 2020, 78(2): 277-288.

- [56] 王以琳,雷恒池.冷云飞机人工引晶检验.大气科学,2003,27(5):929-938.  
Wang Y L,Lei H C. Test of cold cloud seeding. *Chinese J Atmos Sci*,2003,27(5):929-938.
- [57] 于丽娟,姚展予.一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析.气象,2009,35(10):8-24.  
Yu L J,Yao Z Y. Studies on the microphysical characteristics of a stratiform cloud and its response to aircraft cloud seeding. *Meteor Mon*,2009,35(10):8-24.
- [58] 辛乐,姚展予.一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析.气象,2011,37(2):194-202.  
Xin L,Yao Z Y. Studies on the microphysical characteristics of an aircraft seeding in convective line with trailing stratiform cloud. *Meteor Mon*,2011,37(2):194-202.
- [59] 秦彦硕,蔡森,刘世玺,等.华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏微物理特征与催化响应分析.气象学报,2017,75(5):835-849.  
Qin Y S,Cai M,Liu S X, et al. A study on macro and micro physical structures of convective-stratiform mixed clouds associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China. *Acta Meteor Sinica*,2017,75(5):835-849.
- [60] 岳治国,余兴,刘贵华,等.一次飞机冷云增雨作业效果检验.气象学报,2021,79(5):1-11.  
Yue Z G,Yu X,Liu G H, et al. Effect evaluation of an operational precipitation enhancement in cold clouds by aircraft. *Acta Meteor Sinica*,2021,79(5):1-11.
- [61] 赵增亮,毛节泰,王磊,等.一次典型层积云的飞机观测结果及与卫星资料的对比分析.气象学报,2011,69(3):521-527.  
Zhao Z L,Mao J T,Wang L, et al. In situ aircraft observations of one typical stratocumulus cloud process compared with the satellite measurements. *Acta Meteor Sinica*,2011,69(3):521-527.
- [62] 刘黎平,宗蓉,齐彦斌,等.云雷达反演层状云微物理参数及其与飞机观测数据的对比.中国工程科学,2012,14(9):64-71.  
Liu L P,Zong R,Qi Y B, et al. Microphysical parameters retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation in stratiform cloud. *Eng Sci*,2012,14(9):64-71.
- [63] 曹丽霞,纪飞,刘健文,等.云微物理参数在飞机积冰分析和预报中的应用研究.气象,2004,30(6):8-12.  
Cao L X, Ji F, Liu J W, et al. On application of cloud microphysical parameters to aircraft icing forecasting. *Meteor Mon*,2004,30(6):8-12.
- [64] 齐晨,金晨曦,郭文利,等.基于模糊逻辑的飞机积冰预测指数.应用气象学报,2019,30(5):619-628.  
Qi C, Jin C X, Guo W L, et al. Icing potential index of aircraft icing based on fuzzy logic. *J Appl Meteor Sci*,2019,30(5):619-628.
- [65] 樊志超,周盛,汪玲,等.湖南秋季积层混合云系飞机人工增雨作业方法.应用气象学报,2018,29(2):200-216.  
Fan Z C, Zhou S, Wang L, et al. Methods of aircraft-based precipitation enhancement operation for convective-stratiform mixed clouds in autumn in Hunan Province. *J Appl Meteor Sci*,2018,29(2):200-216.
- [66] 李德泉,李抗抗,李宏宇,等.飞机作业监测移动应用系统的设计与实现.应用气象学报,2019,30(6):745-758.  
Li D Q, Li K K, Li H Y, et al. Design and implementation of mobile application for real-time monitoring of weather-modification aircraft operations. *J Appl Meteor Sci*,2019,30(6):745-758.
- [67] 常婉婷,高文华,端义宏,等.云微物理过程对台风数值模拟的影响.应用气象学报,2019,30(4):443-455.  
Chang W T, Gao W H, Duan Y H, et al. The impact of cloud microphysical processes on typhoon numerical simulation. *J Appl Meteor Sci*,2019,30(4):443-455.
- [68] 楼小凤,傅瑜,苏正军.人工影响天气碘化银催化剂研究进展.应用气象学报,2021,32(2):146-159.  
Lou X F, Fu Y, Su Z J. Advances of silver iodide seeding agents for weather modification. *J Appl Meteor Sci*,2021,32(2):146-159.
- [69] 黄敏松,雷恒池.改进的Holroyd云粒子形状识别方法及其应用.气象学报,2020,78(2):289-300.  
Huang M S, Lei H C. An improved Holroyd cloud particle habit identification method and its application. *Acta Meteor Sinica*,2020,78(2):289-300.

## Advances in Aircraft Measurements of Clouds and Precipitation in China

Guo Xueliang<sup>1)</sup> Fu Danhong<sup>1)</sup> Guo Xin<sup>2)</sup> Fang Chungang<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> (*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

<sup>2)</sup> (*Beijing Weather Modification Center, Beijing 100089*)

<sup>3)</sup> (*Key Laboratory for Cloud Physics of China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

### Abstract

Aircraft measurement is an important way in observing the phase, distribution and conversion of clouds and precipitation particles in clouds. The data of aircraft measurements are the foundation for clarifying cloud microphysical structure and precipitation formation mechanism, as well as the parameterization of cloud physical processes in numerical model. The main achievements in technology, instrument and research of aircraft measurements in China are summarized.

The aircraft measurements of clouds and precipitation started in the 1960s with an airborne aluminum foil sampler in China, and then size distribution, number concentration and images were acquired with a microscope. Early in the 1980s, the particle measuring system (PMS) was firstly imported and used. After 60 years of development, China has made important advances and achievements in aircraft measurement platform, airborne measurement technology and research in cloud microphysical processes and precipitation formation mechanisms. Some important research results are summarized as follows. First, the properties of atmospheric aerosols and conversion into cloud condensation nuclei (CCN) are found to be closely related with atmospheric stratification, aerosol origins and secondary aerosol formation. The atmospheric inversion plays a critical role in the accumulation of aerosols in low levels. The secondary aerosols formed in air pollution events have low conversion rate as CCN since the aerosols are fine particles and need higher supersaturation for nucleation, and the high-level large-size dust aerosols have higher conversion rate. Second, the microphysical properties of stratiform clouds and stratiform clouds with embedded convection are closely associated not only with cloud-top temperature, water vapor content and cloud thickness, but also with the location in the high-level trough and cold/warm frontal system. The embedded convection region has more supercooled water and the riming process is critical, and the precipitation formation follows the seeder-feeder mechanism. In the thinner stratiform region, the supercooled water content is less, deposition and aggregation are dominant, and therefore the precipitation formation cannot follow the seeder-feeder mechanism. However, when clouds grow moister and thicker, the deposition, aggregation, and riming processes are dominant. Third, the microphysical formation mechanism in winter snow events in northern China are mainly due to deposition and aggregation processes. Only under the condition with plentiful water vapor and deeper cloud, the riming process is important. Aircraft measurements are important in verifying the microphysical processes in numerical model, however, the current studies are only limited in direct comparisons. The improvements of microphysical processes in a model through parameterization of aircraft measurements are very limited. In addition, aircraft measurements in convective clouds, warm-rain microphysics and applications in cloud seeding effectiveness evaluation and verification in remote sensing observational data are still insufficient.

**Key words:** clouds and precipitation; aircraft measurements; precipitation formation mechanism