

高性能机载云粒子成像仪研制及应用*

郭学良^{1,2} 于子平³ 杨泽后⁴ 李培仁⁵ 伍波⁴ 史晓丁⁴ 王广河¹
杜运理³ 苏正军¹ 樊冬⁴ 李义宇⁵ 齐彦斌⁶ 方春刚¹ 卢广献¹
GUO Xueliang^{1,2} YU Ziping³ YANG Zehou⁴ LI Peiren⁵ WU Bo⁴ SHI Xiaoding⁴ WANG Guanghe¹
DU Yunli³ SU Zhengjun¹ FAN Dong⁴ LI Yiyu⁵ QI Yanbin⁶ FANG Chungang¹ LU Guangxian¹

1. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

2. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

3. 中国兵器科学研究院, 北京, 100089

4. 中国兵器集团公司第209研究所, 成都, 610041

5. 山西省人工防雹增雨办公室, 太原, 030032

6. 吉林省人工防雹增雨办公室, 长春, 130062

1. Key Laboratory for Cloud Physics/Weather Modification Centre, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. China Research and Development Academy of Machinery Equipment, Beijing 100089, China

4. Southwest Institute of Technical Physics, China North Industries Group Corporation Limited, Chengdu 610041, China

5. Shanxi Weather Modification Office, Taiyuan 030032, China

6. Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062, China

2020-05-18 收稿, 2020-06-30 改回.

郭学良, 于子平, 杨泽后, 李培仁, 伍波, 史晓丁, 王广河, 杜运理, 苏正军, 樊冬, 李义宇, 齐彦斌, 方春刚, 卢广献. 2020. 高性能机载云粒子成像仪研制及应用. 气象学报, 78(6): 1050-1064

Guo Xueliang, Yu Ziping, Yang Zehou, Li Peiren, Wu Bo, Shi Xiaoding, Wang Guanghe, Du Yunli, Su Zhengjun, Fan Dong, Li Yiyu, Qi Yanbin, Fang Chungang, Lu Guangxian. 2020. Development and application of the high-performance airborne cloud particle imager. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(6):1050-1064

Abstract The airborne imager of cloud particles is a key scientific instrument that can directly obtain the properties of size distributions and images in clouds. It plays an important role in probing cloud microphysical structures, verifying remote sensing data, improving cloud microphysical processes in numerical weather models and operating weather modification. Therefore, it is important to continuously improve and develop the instrument of higher probing ability. This study introduces the principles of measurement, the main performance indexes, the calibration method and the application results of observational experiments using the airborne cloud imager that was newly developed in 2011. By repeated trials for several years, some key technologies such as beam homogenization, weak signal detection, multiplex parallel processing algorithm and particle diffraction elimination have been either solved or greatly improved. The homogenization and consistence of optical power have been greatly increased. The mean optical power density in light spot is increased by about three times, and thus the imaging ability has been greatly improved. The higher resolution of linear photo diode array is used with high response speed, which apparently increases the detection ability for small-size cloud particles. A series of basic tests of parameters, system optimization and environmental adaptation, and over 60 in-situ flights have been conducted during the period of study and development of the instrument. Compared with observations of an imported instrument in two flights on 5 November 2018, the preliminary experiment results using the newly development instrument indicate

* 资助课题: 国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ110059)、中国气象科学研究院科技发展基金(2020KJ016)。

作者简介: 郭学良, 主要从事云降水物理研究。E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

that the accuracy of number concentrations for small-size particles can increase up to one order of magnitude. Meantime, the instrument has higher stability and reliability during the flight, and can correctly obtain clearer cloud habits.

Key words Airborne, Cloud particles imager, Research and development, Observational test

摘 要 机载云粒子成像仪是目前直接观测云中粒子谱分布和形状特征的关键设备,在云物理结构探测、遥感反演验证、数值模式云物理过程改进和人工影响天气等领域具有十分重要的作用。因此,针对现有进口仪器性能和应用方面的不足,开发更高性能的云粒子探测仪器十分必要。通过2011年启动的国家重大科学仪器设备开发专项——机载云粒子谱仪与成像仪研制项目,研制出国产高性能机载云粒子测量系统。经过多年的研制和反复测试,解决和显著改进了激光光束均匀化、弱信号探测、多路并行处理及微粒消衍射等关键技术,从而提高了探测器像元的光功率均匀性和一致性,使光斑区域内平均光功率密度提高约3倍,从而改进了粒子成像能力。采用更高分辨率国产光电阵列探测器,测量响应时间明显缩短,对小云粒子的探测能力明显提高。研制的仪器通过一系列基础参数测试、系统优化、环境适应性实验和累计60多架次的飞行测试。对2018年11月5日进行的两架次对比探测结果的初步分析表明,新研制的云粒子成像仪对小粒子浓度的测量精度较进口仪器提高一个量级左右,测量数据起伏更小,稳定性更高,并且可正确获得更清晰可靠的云粒子形态特征。

关键词 机载,云粒子成像仪,研制,测试检验

中图法分类号 P414.9

1 引 言

自然云中存在大量不同尺度和形状的粒子,尺度可以从亚微米、微米到厘米量级,可反映云中水分转化和降雨形成的过程,同时对电磁波传播具有反射和衰减作用。因此,定量描述云中粒子谱分布和形态,对不同波长的大气遥感信息反演、数值天气预报模式的物理过程方案和气候变化研究等方面均具有重要意义,直接获取云中粒子定量化信息遇到的最大难题是缺乏可靠的机载观测仪器。

早期开展的飞机对云中粒子的测量主要依靠手工采样和读数的方式,如铝箔碰撞采样方法(Jones, 1960; Durbin, 1958; 孙可富等, 1965; 黄美元等, 1983)。20世纪70年代,美国一些研究机构的云物理学科人员牵头组成了一个研究小组,成立了机载云粒子测量系统(Particle Measuring System, PMS)公司,采用激光技术,研发了可覆盖从 $2\text{ }\mu\text{m}$ 到 $6400\text{ }\mu\text{m}$ 粒径的云粒子谱和较大云粒子图像激光测量仪器。20世纪90年代,美国DMT(Droplet Measurement Technologies)公司购买了PMS公司的专利技术,改进和研发了云粒子谱探头(CDP)、云图像探头(CIP)和云粒子谱联合探头(CAPS)等。

1979年创建的美国另一家公司——SPEC(Stratton Park Engineering Company),后期也研制了类似的云降水粒子测量仪器,包含了云粒子图像仪(CPI)、二维光阵谱仪(2D-S)、快速云滴探头和快速前向散射谱探头(FCDP-100/FFSSP-100)、高

精度立体降水谱仪(HVPS)、2D-S和CPI合成三维立体云粒子成像仪(3V-CPI)等。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)(Fugal, et al, 2009),可测量粒子尺度(等效直径 $23\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$)、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大小不依赖粒子尺度或空气速度,可检测破碎的粒子,相对DMT和SPEC的仪器,其仪器设备的应用范围小,配套不够齐全,未能完全实现商业化。

目前国际上广泛使用的机载云和降水粒子测量系统只有美国DMT和SPEC公司生产,并且开展了大量云物理观测试验研究,取得了云中粒子相态、谱分布和转化的重要成果(Herzogh, et al, 1980; Lawson, et al, 1993, 2009; McFarquhar, et al, 2004; Evans, et al, 2005)。

中国早期对云中粒子的测量也是采用铝箔取样器方法(孙可富等, 1965; 黄美元等, 1983),这种方法可以实现对直径大于 0.1 mm 的云粒子进行采样,依靠显微镜读取云粒子数、尺度等数据,这种测量方法十分费时费力,而且测量精度不高,只能对大的降水粒子浓度和图像进行测量。

20世纪80年代初从美国引进了第一套机载云粒子测量系统,主要包括云粒子谱仪(FSSP-100)、云粒子图像仪(2D-C)和降水粒子图像仪(2D-P),并开始应用于内蒙古、新疆等地,开展了大量北方层状云飞机观测研究(陈万奎等, 1987; 王谦等,

1987; 刘玉宝等, 1988; 游来光等, 1989, 1992)。到目前为止, 包括中国科学院大气物理研究所、中国气象科学研究院以及北京、河北、山西等省人工影响天气办公室已引进了 10 多套机载云降水测量系统, 包括气溶胶(PCASP)、云凝结核(CCN)、云和降水粒子谱仪和图像仪等, 广泛应用于气溶胶-云-降水物理过程观测研究(雷恒池等, 2008; 郑国光等, 2012; Guo, et al, 2015), 包括空中气溶胶观测(范烨等, 2007; 石立新等, 2007; Lu, et al, 2012)、云微物理过程观测(牛生杰等, 1992; 杨文霞等, 2005, 2014; 张佃国等, 2007, 2011; 胡朝霞等, 2007; 范烨等, 2010; Hou, et al, 2010; 王黎俊等, 2013; 朱士超等, 2014; Zhu, et al, 2015; Chang, et al, 2019)、人工影响天气作业条件和效果检验观测(辛乐等, 2011; 秦彦硕等, 2017)、大气遥感观测验证(赵增亮等, 2011; 刘黎平等, 2012)、模式云物理过程验证(Hou, et al, 2013; 朱士超等, 2015)和飞机结冰(曹丽霞等, 2004)等方面, 取得了大量科研成果, 对于深入了解中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。

中国近几年对机载云降水测量仪器的应用需求明显增加, 特别在人工影响天气、数值模式物理过程改进、遥感反演验证等领域应用需求的增加。由于仪器性能指标不能完全满足科研需要, 特别是对小云粒子谱分布的探测精度不高。另外, 进口仪器价格高, 仪器的稳定性差, 维修周期长, 维护困难, 不利于大规模人工影响天气业务应用, 因此研制满足科研、业务需求的更高性能、稳定可靠的机载云降水测量系统十分必要。

2 仪器研制、测量原理和主要性能指标

2.1 仪器研制及其测量原理

“机载云降水粒子谱仪与成像仪研制”项目为 2011 年科技部立项的国家首批重大科学仪器设备开发专项, 研制周期为 2011—2015 年。项目由中国气象科学研究院牵头, 联合了中国兵器科学研究院、中国兵器工业 209 研究所、山西省人工防雹增雨办公室和吉林省人工防雹增雨办公室等单位。该项目共研制了具有不同测量功能的 3 套仪器, 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), 可分别测量直

径 2—50 μm 范围的云粒子谱、25—1550 μm 的云粒子图像和谱分布及 100—6200 μm 的降水粒子图像和谱分布。3 套仪器同时使用可获得 2—6200 μm 的云中粒子谱分布和 25 μm 以上云降水粒子的图像和谱分布信息。

新研制仪器采用了先进的整体设计、光学系统设计、高速信号处理模块设计及软件设计技术, 解决了系统整机技术、激光光束均匀化技术、弱信号探测技术、多路并行处理算法及微粒消衍射等关键技术, 同时研制仪器需满足飞行速度 10—200 m/s 和环境温度在 -40 — 40°C 的条件, 具有抗飞行颠簸和结冰等能力, 因此, 对研制仪器的灵敏性、稳定性和可靠性要求很高。

云粒子谱仪采用云粒子对激光的前向米散射原理, 采用一个功率约 200 mW 的半导体激光器提供光源, 利用光学系统定义了一个很小的激光聚焦散射空间(激光束宽度约为 0.28 mm, 景深约为 1.2 mm), 云粒子在该空间内引起激光束散射。在 4° — 12° 角的前向散射光被引导到两个相互垂直放置的探测器中进行对比探测。根据米散射理论, 粒子大小不同, 会导致散射功率不同。因此, 根据散射功率, 位于光学系统景深内的不同尺度大小粒子的散射光, 将进入探测器及数据采集处理系统的不同通道中进行计数。而计数值将反映相应大小云粒子的多少。通过系统标定及对比测量, 可以实现云粒子尺度谱测量。云粒子谱仪由机械系统、光学系统、信号处理系统和软件系统组成。

云粒子成像仪利用云粒子移动中对线形激光光束的切割遮挡, 通过线阵探测器及图像算法, 实现对 25—1550 μm 直径范围内的云粒子谱分布和形状的测量。云粒子成像仪采用红光激光器作为光源, 处于探测区域的粒子经由光学系统成像到 64 单元线性阵列探测器上形成阴影, 而成像以外的区域则为背景光源照明。在任一时刻探测器记录粒子的一个影像切片并存储, 这样当粒子通过采样区时, 将会依次存储各个影像切片, 将此影像切片同步组合便得到完整的粒子二维图像。每个探测器单元有一定的尺度, 正比于一定的粒子尺寸, 单个粒子所有影像切片的最大值即对应粒子的直径。系统工作时, 红光半导体激光器首先经消球差透镜扩束准直, 然后整形为强度均匀的光斑, 整形

光束通过光学系统成像到探测器上。探测器为并行多路输出,无粒子信号时各单元输出高电平信号,当降水粒子穿过线形光束采样区时,由于遮挡了部分光束,探测器各单元将根据遮挡情况输出脉冲信号,光敏元件被遮挡与否的量化标准定为其面积被遮挡的 50%,等于或高于此标准即认为被遮挡。每一路信号分别经放大器放大后送入通过比较器输出电平,然后进行数字化处理,经现场可编程门阵列(FPGA)中的信号处理电路进行相应计算,计算出粒子的大小,同时将得到粒子的二维图像信息,并临时储存在内存中。在达到规定的采集时间后,图像探测仪将粒子的分布、尺度以及二维图像数据通过中控系统发送到控制计算机。

降水粒子成像仪的测量原理与云粒子成像仪相同,主要区别在于成像放大倍数为 3 倍,粒子采样区域长度也有所增加。此外,系统集成大气综合参数测量功能,可测量包括真空速、气温、气压、高度以及位置信息在内的多个参数。

2.2 仪器主要性能指标和标定

表 1 给出了国产机载云粒子谱仪、云粒子成像仪和降水粒子谱仪的主要性能指标和相关参数。

国产成像仪与进口线阵探测器参数对比见表 2。两者的主要差别表现在以下几个方面:

(1)发射光束均匀化整形效果更好。国产成像仪采用“鲍威尔棱镜+柱面镜”方案,对圆形高斯光束进行线形整形及均匀化处理,与美国 DMT 采用柱透镜方案相比,使得光束高斯效应减弱,光斑均匀性提高。从而提高了 64 路探测器像元的光功率均匀性和一致性,避免震动导致成像“虚线”,使光斑区域内平均光功率密度提高 3 倍以上,降低后续信号放大电路放大增益需求,使得信号带宽增大,从而改善了粒子图像边缘毛刺现象,同时提高了光源利用效率。

(2)采用更高分辨率的国产线阵探测器。国产仪器像元分辨率为 0.15 mm,而最初研制的一代仪器采用的进口美国 OSI 公司制造的探测器分辨率为 0.28 mm。另外,探测器响应时间明显降低,测量响应速度显著提高。在结构和系统电路方面采用了流线型结构、防震动、除冰消雾加热装置、电压自适应等设计,以保证测量系统的稳定性和可靠性。

新研制的云粒子谱仪的标定采用标准粒子法,这里不再详细介绍。新研制的云粒子成像仪和降

表 1 国产机载云降水粒子谱仪与成像仪主要技术指标
Table 1 Main technological specifications for airborne spectrometer and imager of clouds and precipitation particles developed in China

	云粒子谱仪(ZBT-CPS)	云粒子成像仪(ZBT-CPI)	降水粒子成像仪(ZBT-PPI)
测量参数	云粒子谱	云粒子谱和图像	降水粒子谱和图像
测量原理	前向散射	切割遮挡	切割遮挡
分辨率	1.86 μm	25 μm	100 μm
测量范围	2—50 μm	25—1550 μm	100—6200 μm
数浓度范围	1—10000 cm ⁻³	1—10000 cm ⁻³	1—10000 cm ⁻³
采样面积	0.3 mm×1.2 mm	1.55 mm×80 mm	6.2 mm×300 mm
粒子通道数	32	62	62
采样频率	0.1—1 Hz	0.1—1 Hz	0.1—1 Hz
光收集角度	4°—12°	—	—
激光器	635 nm, 250 mW	650 nm, 40 mW	650 nm, 40 mW
系统电源	28 V DC, 2 A	28 V DC, 10 A	28 V DC, 10 A
空速范围	10—200 m/s	10—200 m/s	10—200 m/s
工作环境	温度: -40—40℃; 湿度: 0—100%; 高度: 0—15 km	温度: -40—40℃; 湿度: 0—100%; 高度: 0—15 km	温度: -40—40℃; 湿度: 0—100%; 高度: 0—15 km
标定方式	标准玻璃球	标定圆盘	标定圆盘
仪器重量	7.5 kg	11 kg	12.5 kg
仪器尺寸	36 cm×21 cm×23 cm (L×W×H)	92 cm×20 cm(L×W)	90 cm×42 cm(L×W)

表2 国产与进口线阵探测器参数对比

Table 2 Comparison of technological specifications of linear diode arrays developed in China with that imported

	国产	美国OSI公司	指标
探测器像元分辨率	0.15 mm×0.12 mm	6.45 mm×0.28 mm	分辨率
相邻单元间隙	0.03 mm	0.03 mm	横向直径测量精度
响应度	0.4 A/W	0.46 A/W	放大电路增益
暗电流	5 nA	10 nA	噪声
响应时间	2 ns	50 ns	测量速度

水粒子谱仪均采用标定圆盘法。调节标定转盘,使得标准圆点过圆心的线状区域恰好处于光学采样区域中心,从上位机软件读取成像宽度,即为圆点直径。标定转盘静止时,标准圆点所成的像在上位机软件界面上为具有一定宽度的长条,其宽度等于标准圆点直径。激光云粒子成像谱仪探测器共64像素,25 μm 粒子所成的像恰好覆盖一个像素,因此标准圆点直径等于被遮挡的像素个数为25 μm 。

激光云粒子成像谱仪的分辨率测试采用3组不同大小的标准圆点进行,分别为75和100 μm 、475和500 μm 、1475和1500 μm 。对每组2个标准圆点进行3次测量,记录其“成像宽度”,并计算二者差值,记为 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 ,则分辨率 $R_1 = \min\{\delta_1, \delta_2, \delta_3\}$ 且不等于0,对于3组标准圆点,可得到3个分辨率(R_1 、 R_2 、 R_3)。若 R_1 、 R_2 、 R_3 均为25 μm ,则可判定激光云粒子成像谱仪粒径分辨率合格。降水粒子谱仪的标定采用与云粒子成像仪同样的方法。由中国气象局科技司组织专家对国产云粒子成像仪和降水粒子成像仪分辨率进行测试的结果分别为25和100 μm 。

3 云粒子成像仪飞行观测和对比试验

3.1 飞行观测试验概况

项目研制仪器测试飞行平台采用山西人工防雹增雨办公室运-12型人工增雨飞机(图1)。项目研制的云粒子成像仪(ZBT-CPI)挂载在飞机右侧机翼下方,美国生产的云粒子成像仪(DMT-CIP)挂载在飞机左侧机翼下方,用于对同一目标云系进行对比观测试验,飞机同时搭载大气综合参数采集处理系统,用于实时测量飞行的温、压、湿、风、过冷水等特征参量。

先对项目研制的云粒子成像仪进行单独挂载飞行,测试仪器性能;然后采用项目研制云粒子成像仪与美国DMT-CIP仪器同时挂载测试方式,进



图1 国产机载云粒子成像仪(ZBT-CPI)飞行探测对比试验(上图为运-12飞机,左下图为ZBT-CPI探头,右下图为DMT-CIP探头)

Fig. 1 In-situ experiment and comparison of airborne Cloud Particle Imager (ZBT-CPI) developed in China with DMT-CIP (Upper column: Y-12 aircraft platform; down-left column: ZBT-CPI; down-right column: DMT-CIP)

行观测数据对比测试。将两台仪器同时挂载在同一架飞机上,分别进行空中爬升阶段数据对比,空中不同高度平飞数据对比,从地面到飞机爬升的极限或云顶,检验仪器空中响应能力以及空中低温时仪器的运行状态,对比云中不同部位两种仪器测量的冰粒子数浓度、有效直径、谱分布、图像数据。

仪器自研制以来,已累计进行了60多架次的飞行测试和对比试验。试验结果表明,国产化云粒子谱仪与成像仪在整体性能和数据质量与国外产品具有较高的一致性,下面给出一些飞行探测的结果。

2018年11月5日在山西省开展了2架次同时挂载新研制云粒子成像仪和美国DMT-CIP的飞行试验,图2给出了飞行高度和对应飞行时的雷达回

波分布。飞机在不同高度层开展了垂直和水平飞行探测,获得了粒子数浓度、尺度以及图像信息。

2018年11月5日受高空槽和低层切变线共同影响,山西省中南部大部分地区有层状云系覆盖,出现了大范围的降水天气。第一次测试飞行时间从11时38分(北京时间,下同)开始(图2a),到14时45分结束,飞行区域为山西省南部襄汾、垣曲、阳城、安泽,飞行区域大范围为层状云系覆盖,飞行高度从云底到云顶(500—6500 m)。飞机在地面通电检查仪器正常后,于11时38分从临汾机场起飞,起飞后爬升到3700 m改为平飞,然后继续爬升到4600 m改为平飞,平飞后爬升到6200 m继续平飞,之后下降至5700 m平飞,再下降到5200 m平飞,然后下降到4700 m平飞,直到返航落地。

2018年11月5日的第2次测试飞行从16时56分开始,18时48分结束(图2b),飞行区域为山西省南部临汾地区,飞行高度500—4000 m,飞机主要在4000和3600 m高度平飞探测。

3.2 云中不同高度云粒子谱分布的对比

为对比ZBT-CPI和DMT-CIP对云粒子谱分布的测量情况,分别对飞机在1500、3700、4600、5100、5600和6100 m高度上两种仪器测量的云粒子谱进行平均,对比其平均谱分布。

图3a显示在1500 m高度,两种云粒子成像仪探测的粒子谱型均为负指数型分布,谱分布形态比较一致,但也有两个比较明显的差别,一是ZBT-

CPI测量的谱分布起伏较小,而DMT-CIP测量的起伏较大,这应该与两种仪器不同采样频率有关,ZBT-CPI的采样频率高,平均后谱分布更为平滑。另外一个较明显的差别是对小粒子端和大粒子端的谱分布测量,ZBT-CPI测得的小粒子浓度更高,而大粒子浓度较低,从云粒子负指数分布的一般规律而言,ZBT-CPI的测量结果更合理,对小云粒子具有更高的测量精度。ZBT-CPI测得的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-4} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$),并且达到最大测量量程1550 μm ,而DMT-CIP探测的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-5} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$),可以看到小粒子的浓度差一个量级,而大粒子端只达到1400 μm ,没有达到其设定的测量量程。两种仪器在粒径为575—900 μm 的一致性较好。通过指数拟合公式 $y=ax^b$ 分别对ZBT-CPI和DMT-CIP探测的谱分布进行了指数拟合,得到拟合曲线和方程,两条拟合曲线之间的均方差为 1.17×10^{-5} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$)。

图3b显示两设备探测粒子数密度的决定系数(R^2)达到0.86,具有较强的相关,说明谱分布趋势比较一致。图3c是1500 m高度处探测的粒子谱和均方差分布,显示两设备在400—800 μm 范围内探测结果很接近,但小粒子和大粒子端离散程度较大,这与仪器的探测精度不同有关,ZBT-CPI具有更高的采样频率和探测精度。

图4为3700 m高度水平飞行探测结果的比较。与1500 m相比,3700 m的测量结果小粒子端的差

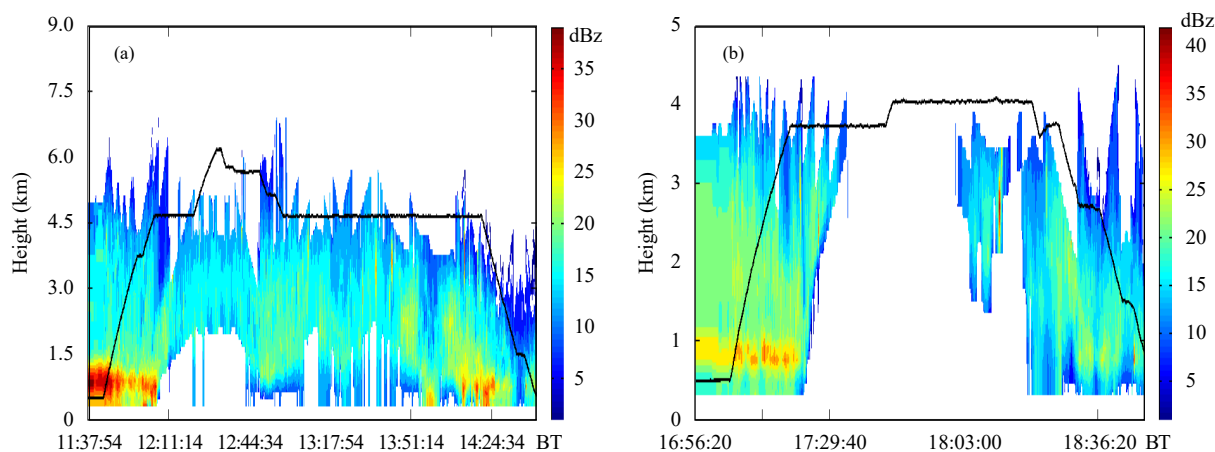


图2 2018年11月5日飞行高度(黑色线)和雷达回波(色阶)的时间变化
(a. 11时38分—14时45分, b. 16时56分—18时48分)

Fig. 2 Time-height distributions of flight altitude (black solid line) and radar echo (color shaded) on 5 November, 2018
(a. 11:38—14:45 BT, b. 16:56—18:48 BT)

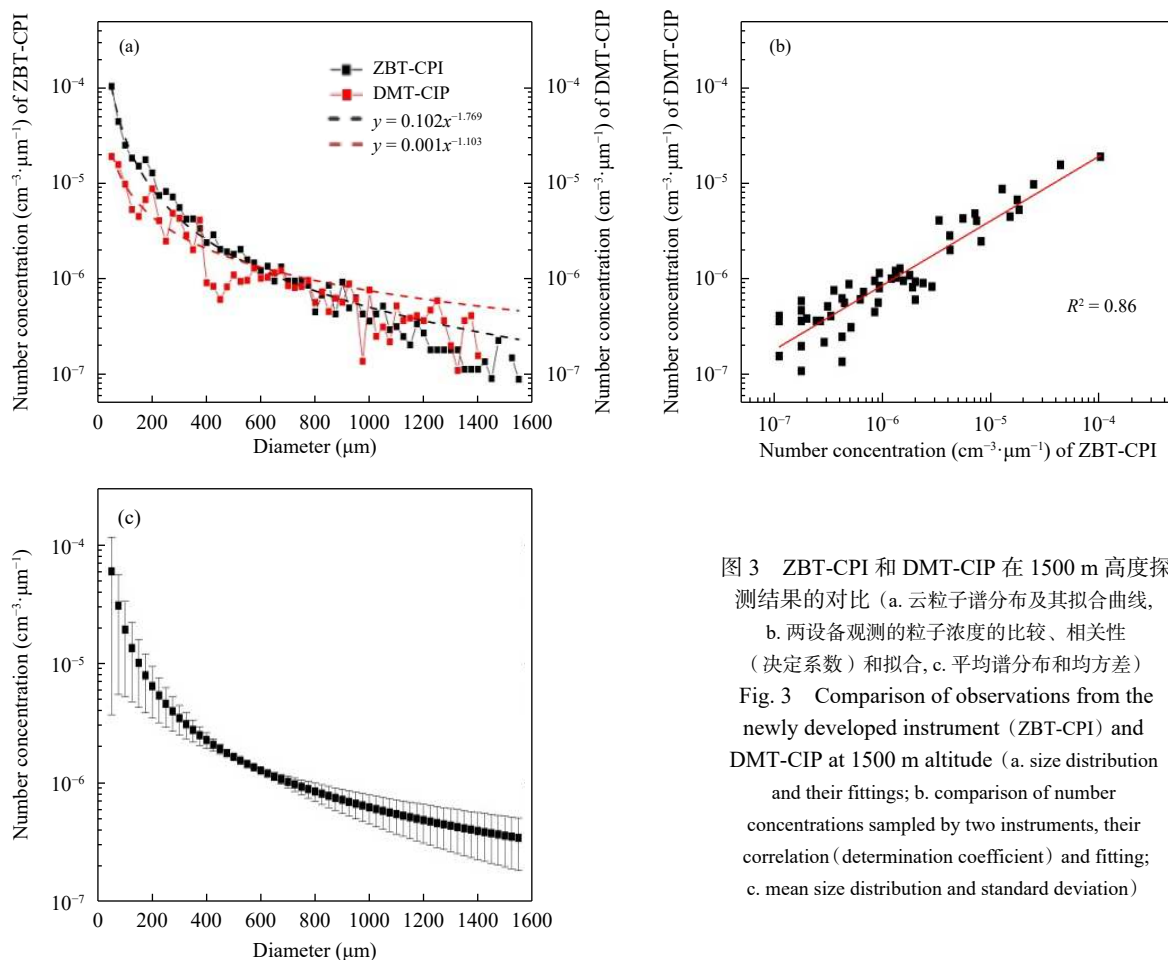


图3 ZBT-CPI和DMT-CIP在1500 m高度探测结果的对比 (a. 云粒子谱分布及其拟合曲线, b. 两设备观测的粒子浓度的比较、相关性(决定系数)和拟合, c. 平均谱分布和均方差)
Fig. 3 Comparison of observations from the newly developed instrument (ZBT-CPI) and DMT-CIP at 1500 m altitude (a. size distribution and their fittings; b. comparison of number concentrations sampled by two instruments, their correlation (determination coefficient) and fitting; c. mean size distribution and standard deviation)

别更大。由于1500 m高度主要探测到的是雨滴,两者的差距较小,而在3700 m高度小冰粒子浓度较高,所以小粒子端的测量差别变大。ZBT-CPI探测的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-4} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$,而DMT-CIP探测的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-5} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$ 。两条拟合曲线之间的均方差为 8.26×10^{-5} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$,均方差变大。两设备探测的粒子数密度之间的决定系数(R^2)为0.79,相关性变小(图4b)。3700 m高度的平均谱分布和均方差(图4c)显示,两设备在800 μm 以下的离散程度较大,而在800 μm 以上粒子的探测结果一致性较高。

图5为4600 m高度水平飞行探测结果比较。图5a显示两仪器观测一致性普遍较好,ZBT-CPI探测的粒子数浓度为 10^{-6} — 10^{-3} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$,而DMT-CIP探测的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-4} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$ 。两条拟合曲线之间的均方差为 9.76×10^{-5} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$ 。尽管DMT-CIP观测的浓度起伏仍然较大,但两仪器观测的谱分布形态整体上一致性较好,两设备探

测粒子数密度的决定系数(R^2)达到0.90(图5b)。图5c显示的平均谱和离散度也比较好。

图6为5100 m高度水平飞行探测结果比较。图6a显示两个设备观测谱分布形态比较一致,但存在系统性差别。ZBT-CPI探测的云粒子数浓度值为 10^{-7} — 10^{-4} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$,而DMT-CIP测量值为 10^{-7} — 10^{-5} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$ 。两条拟合曲线之间的均方差为 7.46×10^{-5} 个/ $(\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m})$ 。由于两设备观测的谱分布形态相似度高,所观测的数密度之间的决定系数(R^2)为0.90(图6b)。平均谱分布和离散度显示(图6c),两仪器在整个粒径范围内的离散度均较大。

图7为5600 m高度水平飞行探测结果比较。图7a显示DMT-CIP探头在小于700 μm 小粒子端的测量中出现较大的起伏变化,这可能与仪器的稳定性或仪器探头处在云不同位置有关,两个仪器分别装在飞机两侧的机翼,由于云内不均匀性会造成比较大的差异。ZBT-CPI测得的粒子数浓度为

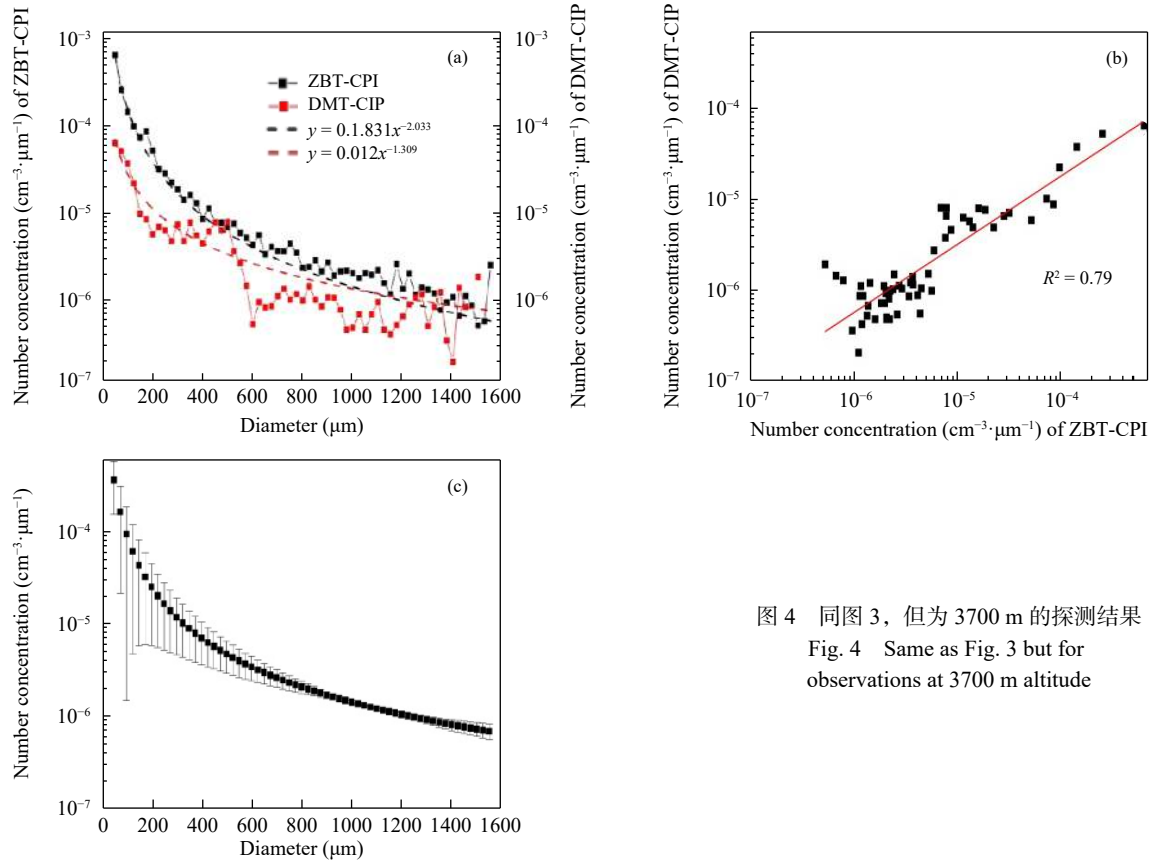


图4 同图3, 但为3700 m的探测结果
Fig. 4 Same as Fig. 3 but for observations at 3700 m altitude

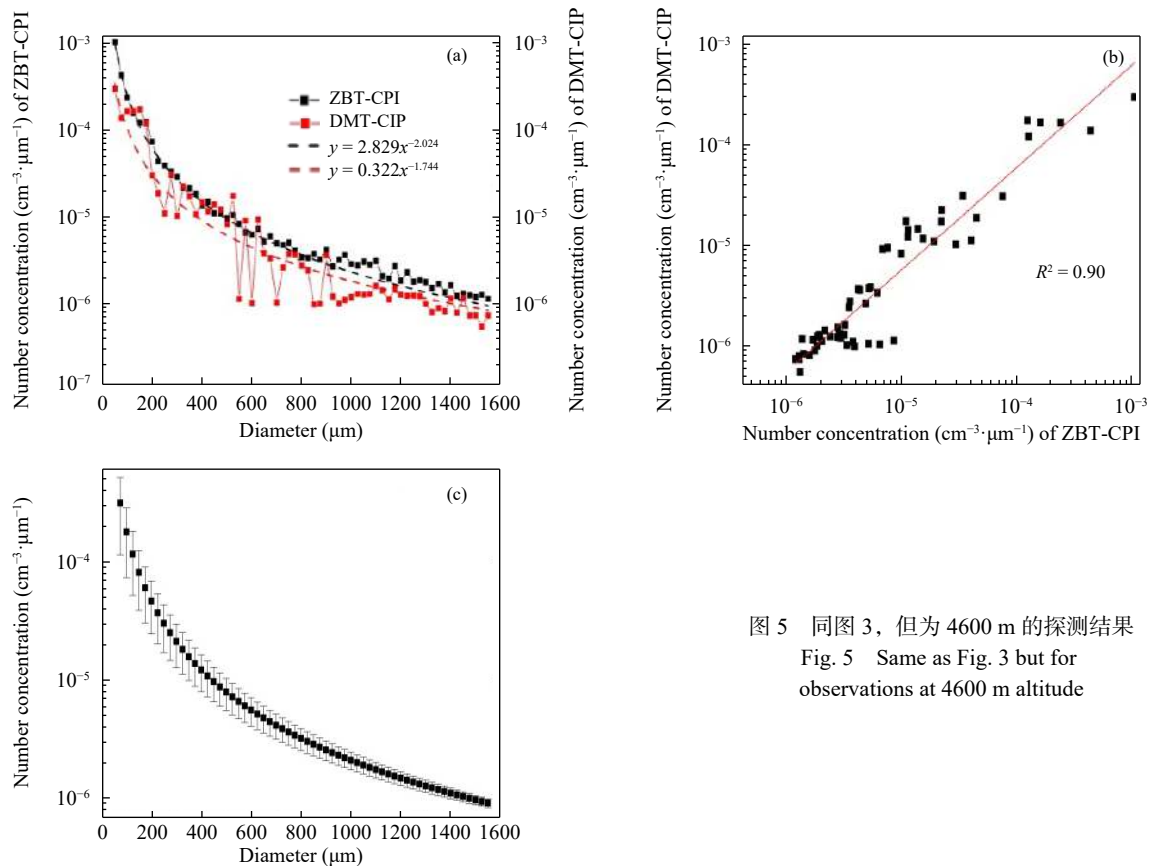


图5 同图3, 但为4600 m的探测结果
Fig. 5 Same as Fig. 3 but for observations at 4600 m altitude

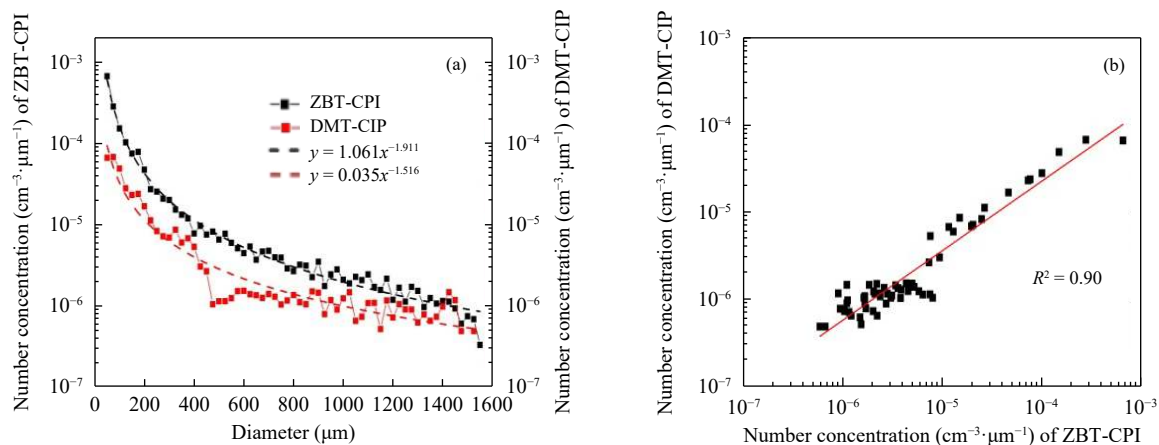


图6 同图3, 但为5100 m的探测结果
Fig. 6 Same as Fig. 3 but for observations at 5100 m altitude

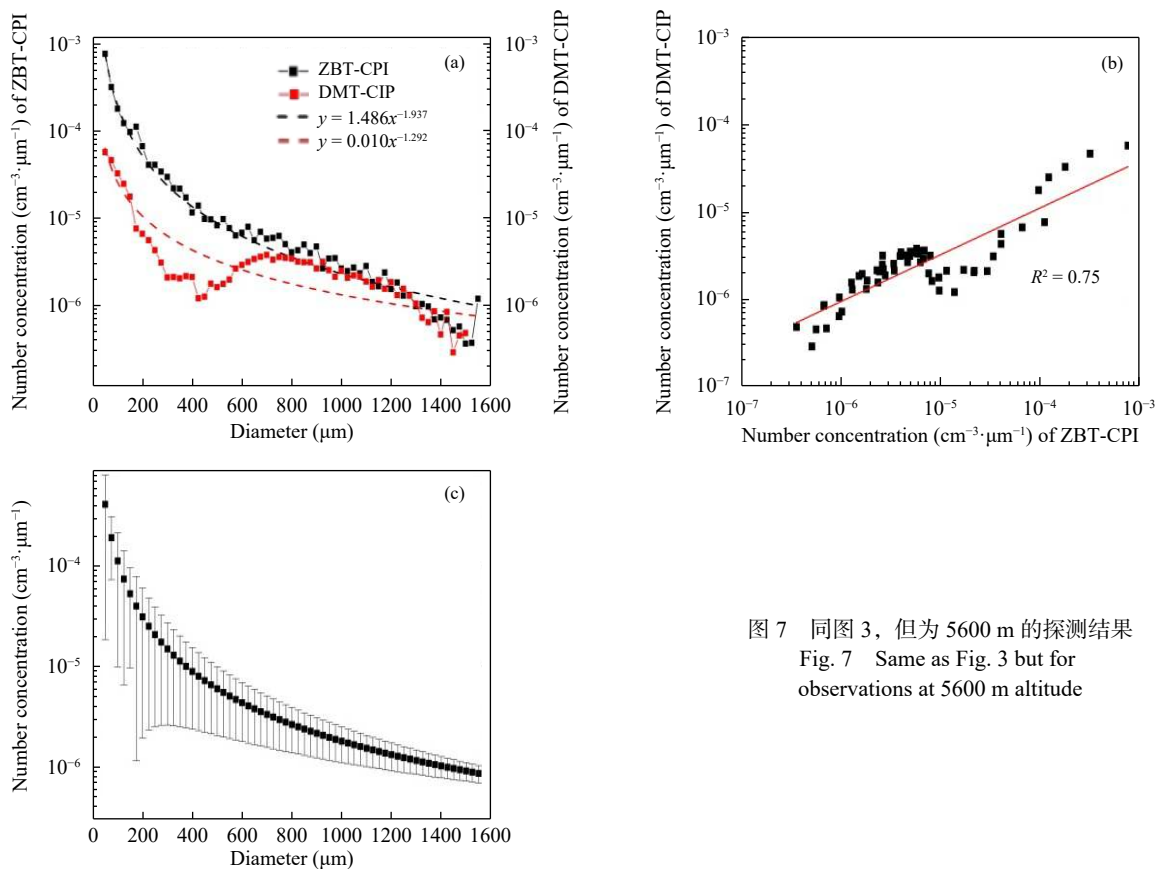


图7 同图3, 但为5600 m的探测结果
Fig. 7 Same as Fig. 3 but for observations at 5600 m altitude

10^{-7} — 10^{-4} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$), 而 DMT-CIP 探测的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-5} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$)。两条拟合曲线之间的均方差为 10^{-4} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$), 差别比较大。两设备探测粒子数浓度之间的决定系数(R^2)为 0.75(图 7b)。由于两仪器在 $700 \mu\text{m}$ 以下探测数据差别较大, 导致与平均谱分布的离散度较大(图 7c)。

图 8 为 6100 m 高度水平飞行探测结果比较。图 8a 显示两设备的差别仍然表现在小粒子端粒子浓度的测量。ZBT-CIP 探测的粒子数浓度为 10^{-7} — 10^{-4} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$), 而 DMT-CIP 探测值为 10^{-7} — 10^{-5} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$)。两条拟合曲线之间的均方差为 8.04×10^{-5} 个/($\text{cm}^3 \cdot \mu\text{m}$)。由于两设备观测的谱分布形态比较一致, 特别是粒径在 $700 \mu\text{m}$ 以上谱分布相似度比较高, 两设备测量的粒子谱分布之间的决定系数(R^2)达到 0.89(图 8b)。与平均谱分布的离散度显示, 小粒子端测量离散度较大(图 8c)。

由以上分析可见, 在云粒子谱分布测量方面,

两者的差别主要表现在对小粒子浓度的测量方面。ZBT-CIP 对小粒子浓度的测量精度高于 DMT-CIP 仪器一个量级左右。越到高层, 小粒子浓度越高, 两者测量差别越大。另外, ZBT-CIP 测量数据的起伏较小, 而 DMT-CIP 探头测量起伏较大, 特别是云低层的大粒子浓度, 这可能与两仪器不同分辨率和响应时间有关, 需要进一步研究确定。但两仪器测量数据的相关较高, 决定系数(R^2)超过 0.75, 在一些探测层二者的决定系数可达到 0.9。

3.3 云中不同高度云粒子形状对比

对 2018 年 11 月 5 日 11 时 38 分—14 时 45 分的第一次飞行两仪器同时探测的图像数据进行比较分析。从给出的云粒子形状随温度的垂直变化(图 9)可以看到, 两仪器探测的云粒子形态随温度的变化具有较好的一致性, 0°C 层以下为液态雨滴粒子(液滴), 0 — -4°C 层以板状、淞附枝状和柱状粒子为主, -4 — -10°C 层主要以柱状、柱帽状、枝状粒子形态为主, -10 — -17°C 层以板状、枝状和柱帽

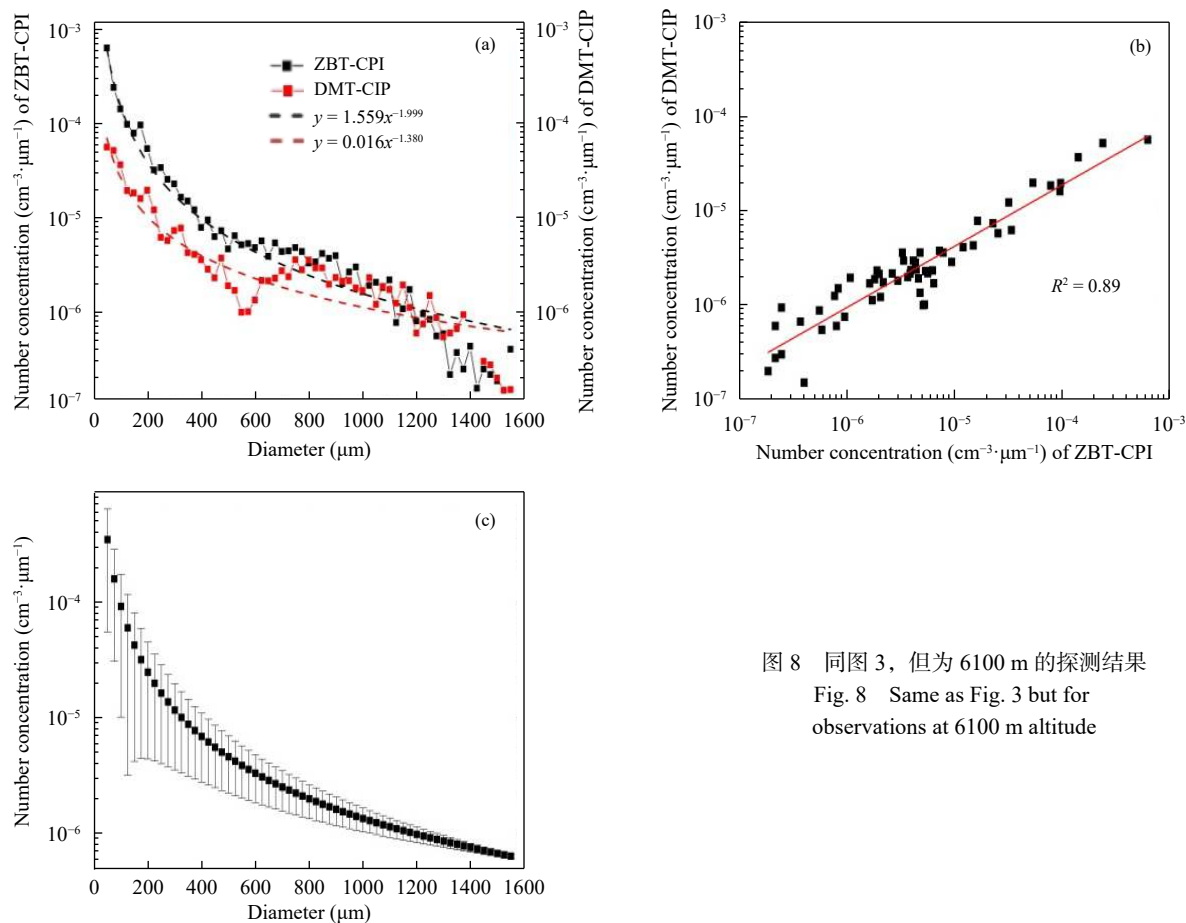


图 8 同图 3, 但为 6100 m 的探测结果
 Fig. 8 Same as Fig. 3 but for observations at 6100 m altitude

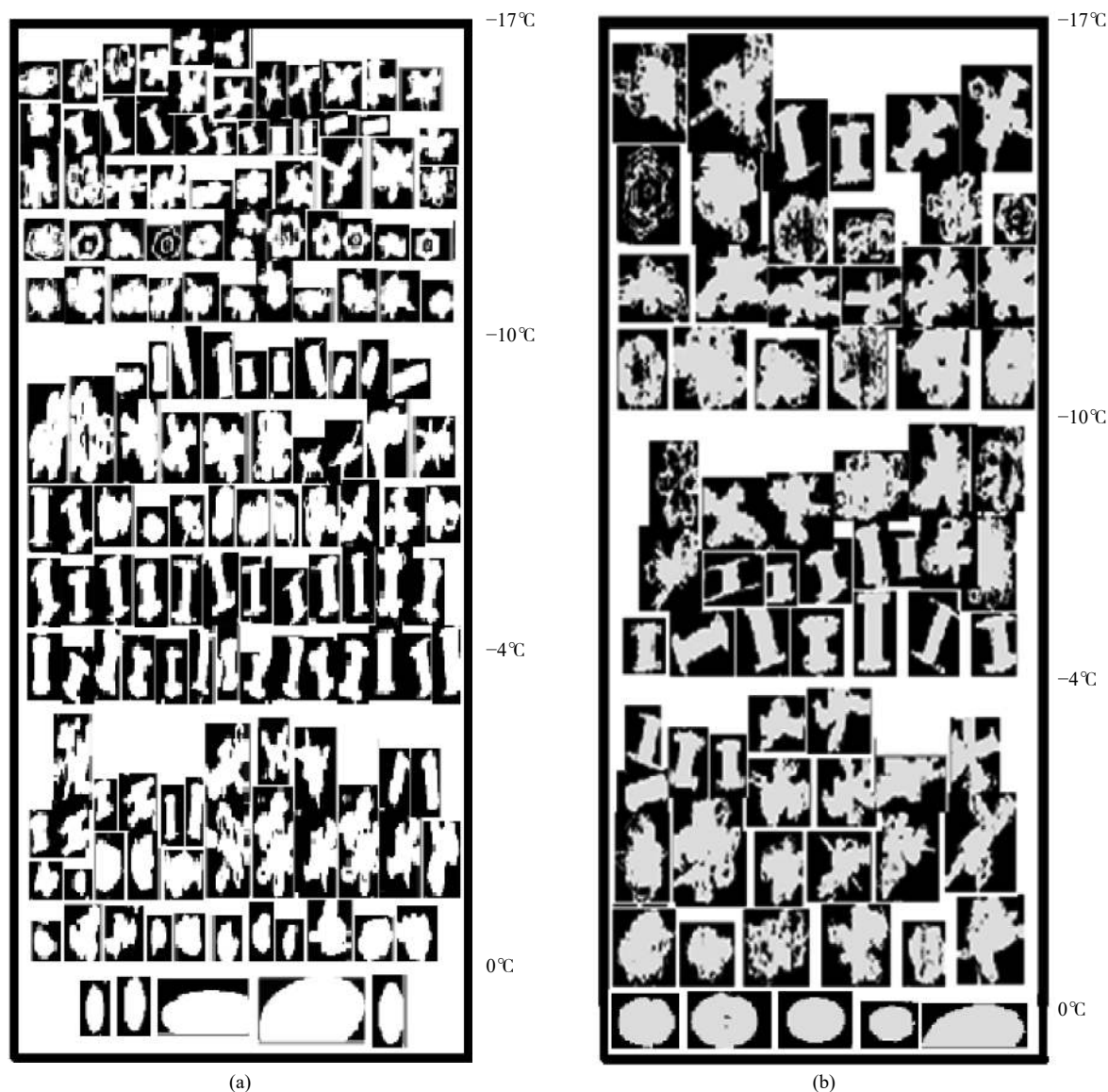


图9 2018年11月5日11时38分—14时45分云粒子成像仪探测的云粒子形状随温度的垂直分布
(a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

Fig. 9 Vertical distributions of cloud habit with temperature during 11:38—14:45 BT 5 November 2018
(a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

状粒子为主。与 DMT-CIP 相比, ZBT-CPI 能够探测到更清晰的六角板状、枝状和柱状粒子形态。

为进一步比较两仪器同步观测时获取的云粒子形态的时间变化情况,图 10 给出了飞机在 2200—4665 m 高度进行垂直飞行期间(11 时 51 分—12 时 04 分)探测的云粒子图像随时间的变化。选取同一秒的图像数据作为这一秒对应分钟的图像,分析图像随时间的变化规律。比较同一时间两个仪器测量的云粒子形态可以看到,测量的云粒子形态的一致性很好。11 时 51 分飞机从 2200 m 高度

开始爬升,均测量到柱帽状和枝状冰粒子,11 时 52 分以枝状和板状冰粒子为主,11 时 53—56 分基本为柱帽状。11 时 58 分—12 时 04 分的粒子形态种类比较复杂,包括柱帽状和枝状粒子,而且凇附程度较高。

12 时 05 分飞机爬升到 4665 m 开始水平飞行(图 11)。水平飞行时经历了不同云区,粒子形状前期(12 时 05—14 分)主要以枝状为主,后期(12 时 17—22 分)以柱帽状和板状为主。12 时 22 分从 4665 m 高度继续爬升,12 时 32 分到达飞行的最高

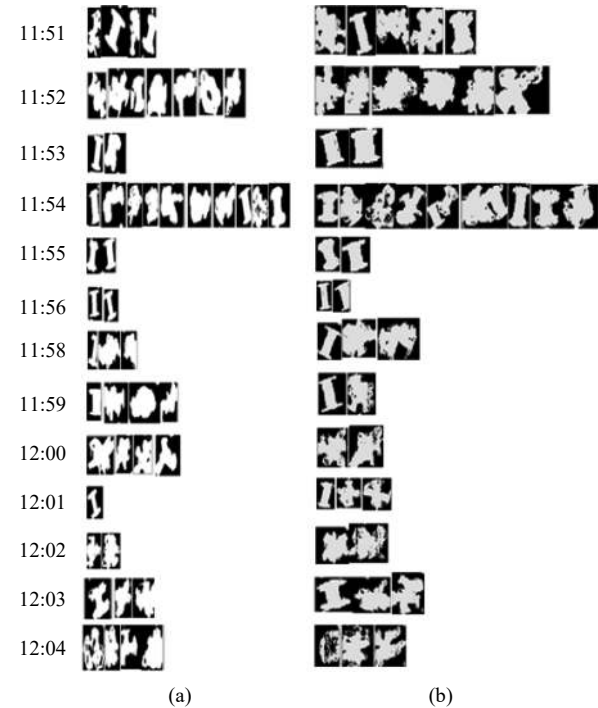


图 10 飞机在 2200—4665 m 高度垂直飞行期间 (11 时 51 分—12 时 04 分) 探测的云粒子图像随时间的变化 (a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

Fig. 10 Temporal variations of cloud habit during aircraft flight period 11:51–12:04 BT from 2200 to 4665 m altitude (a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

高度(6160 m, 图 12)。粒子形态以柱状、枝状和板状为主。ZBT-CPI 观测到更为清晰的六角板状、柱状和枝状形态。

由以上分析可见,不论是观测的云粒子形态随温度的变化,还是水平和垂直观测的云粒子形态变化,ZBT-CPI 与 DMT-CIP 相比,两者具有较高的一致性,并且 ZBT-CPI 能获得更清晰的云粒子形态,观测期间仪器稳定,未发生任何故障。

4 结论和讨论

机载云降水测量仪器在云物理过程探测、遥感反演验证、数值模式物理过程和人工影响天气业务等领域具有重要作用,但目前进口仪器在探测性能、稳定性和维护等方面有很多不足,针对这些问题,不断开发更高性能的云粒子探测仪器十分必要。文中介绍了国家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”项目研制的高性能机载云降水粒子谱仪和成像仪设备的情况、测量原理、主要性能指标、标定方法和观测试验应

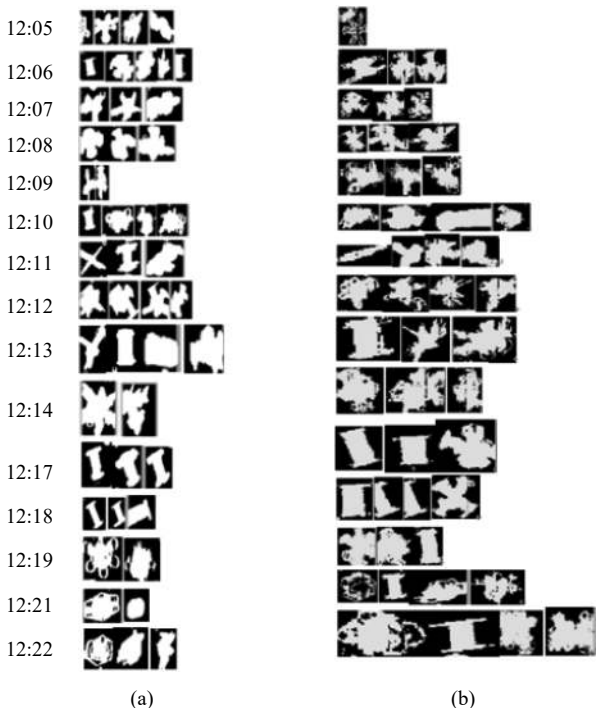


图 11 飞机在 4665 m 高度水平飞行期间 (12 时 05 分—12 时 22 分) 探测的云粒子图像随时间的变化 (a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

Fig. 11 Temporal variations of cloud habit during aircraft flight period 12:05–12:22 BT at 4665 m altitude (a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

用结果。

(1)研制的云粒子成像仪采用了先进的整体设计、光学系统设计、高速信号处理模块设计及软件设计技术。经过多年的反复试验,解决和显著改进了激光光束均匀化、弱信号探测、多路并行处理及微粒消衍射等关键技术,从而提高了探测器像元的光功率均匀性和一致性,使光斑区域内平均光功率密度提高约 3 倍,从而改进了粒子成像能力。采用了更高分辨率的国产线状探测器,测量响应时间明显缩短,提高了对小云粒子的探测能力。同时,新研制仪器可满足飞行速度在 10—200 m/s 和环境温度在-40—40℃ 范围条件下观测,以及满足在高风速、飞行颠簸和结冰等复杂大气环境下观测的灵敏度、稳定性和可靠性。

(2)对 ZBT-CPI 进行了一系列基础参数测试、系统优化、环境适应性试验及外场飞行试验,已累计进行了 60 多架次的飞行试验,并与 DMT-CIP 进行了对比。试验结果表明,新研制仪器在粒子测量数据方面与国外产品具有较高的一致性,并且在小

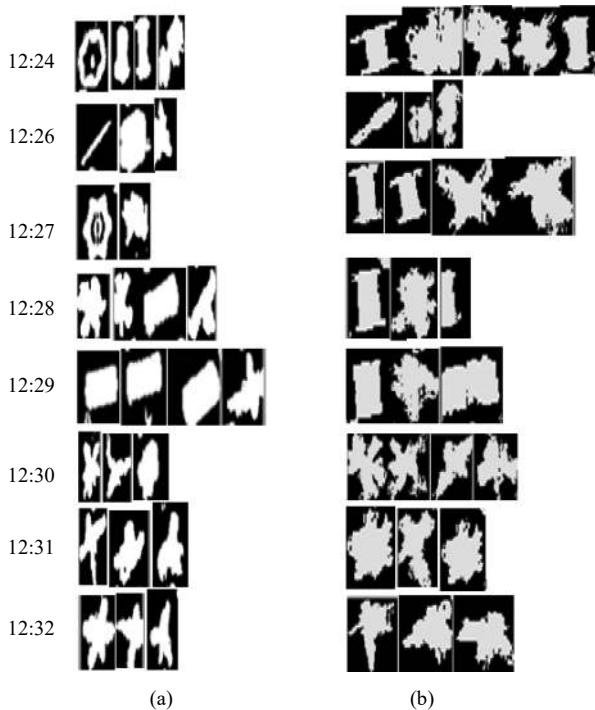


图 12 飞机在 4665—6160 m 高度垂直飞行期间 (12 时 24—32 分) 探测的云粒子图像随时间的变化 (a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

Fig. 12 Temporal variations of cloud habit during aircraft flight period 12:24—12:32 BT from 4665 to 6160 m altitude (a. ZBT-CPI, b. DMT-CIP)

云粒子浓度、图像探测、稳定性和可靠性等方面有明显改进。

(3) 对 2018 年 11 月 5 日进行的两架次 ZBT-CPI 与 DMT-CIP 探测结果进行了深入对比分析。结果表明, 在云粒子谱分布测量方面, 两者的差别主要表现在对小粒子浓度的测量方面。ZBT-CPI 对小粒子浓度的测量精度高于 DMT-CIP 一个量级左右。云中越到高层, 小粒子浓度越高, 两者测量差别变大。另外, ZBT-CPI 测量数据的起伏较小, 而 DMT-CIP 测量数据起伏较大, 特别是云低层的大粒子浓度。但两仪器测量数据的相关性较高, 决定系数 (R^2) 超过 0.75, 在一些探测层二者的决定系数可达到 0.9。不论是观测的云粒子形态随温度的变化, 还是水平和垂直观测的云粒子形态的时间变化, ZBT-CPI 与 DMT-CIP 相比, 两者具有较高的一致性, 并且新研制仪器能获得更清晰的云粒子形态, 观测期间仪器稳定, 未出现任何故障。

从以上分析可以看到, 在机载云粒子测量仪器的国产化和性能方面取得了很明显的进展, 特别是

涉及的一些关键核心技术, 如探测器、激光光束、弱信号检测和并行运算等方面均实现了国产化, 是目前中国唯一实现关键核心部件国产化的机载云粒子测量系统, 这对大规模业务化应用十分重要。但如何不断提高国产云粒子测量仪器的性能, 仍然具有很高的挑战性。研制的成像仪器采用的仍然是国际上普遍使用的云粒子对激光束的遮挡测量原理。要想进一步提高对小云粒子的成像和谱测量, 需要不断提高探测器的分辨率和精度。全息云粒子测量仪器目前还未商业化应用。另外, 随着显微摄像技术的提高, 可以探索在云中开展类似的观测试验, 但也要解决相应的技术问题。

参考文献

- 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. *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. *Meteor Mon*, 30(6): 8-12 (in Chinese)
- 陈万奎, 游来光. 1987. 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*, 2(2): 143-150. Chen W K, You L G. 1987. A case study on microphysical characteristics of precipitation particles near the melting layer. *J Academy Meteor Sci*, 2(2): 143-150 (in Chinese)
- 范烨, 郭学良, 付丹红等. 2007. 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*, 12(1): 49-62. Fan Y, Guo X L, Fu D H, et al. 2007. Observational studies on aerosol distribution during August to September in 2004 over Beijing and its surrounding areas. *Climatic Environ Res*, 12(1): 49-62 (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. *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. *Chinese J Atmos Sci*, 34(6): 1187-1200 (in Chinese)
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良等. 2007. 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*, 31(3): 425-439. Hu Z X, Lei H C, Guo X L, et al. 2007. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation. *Chinese J Atmos Sci*, 31(3): 425-439 (in Chinese)
- 黄美元, 何珍珍, 沈志来. 1983. 暖性层积云中云大水滴分布特征. *气象学报*, 41(3): 358-364. Huang M Y, He Z Z, Shen Z L. 1983. Distribution characteristics of large-size cloud droplets in warm stratocumulus clouds. *Acta Meteor Sinica*, 41(3): 358-364 (in Chinese)
- 雷恒池, 洪延超, 赵震等. 2008. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. *大气科学*, 32(4): 967-974. Lei H C, Hong Y C, Zhao Z, et al. 2008. Advances in cloud and precipitation physics and weather modification in

- recent years. *Chinese J Atmos Sci*, 32(4): 967-974 (in Chinese)
- 刘黎平, 宗蓉, 齐彦斌等. 2012. 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*, 14(9): 64-71. Liu L P, Zong R, Qi Y B, et al. 2012. Microphysical parameters retrieval by cloud radar and comparing with aircraft observation in stratiform cloud. *Eng Sci*, 14(9): 64-71 (in Chinese)
- 刘玉宝, 游来光, 胡志晋. 1988. 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*, 3(1): 36-45. Liu Y B, You L G, Hu Z J. 1988. A study on the frontal snowfall in Zhungeer basin of Xinjiang in winter. Part I: Precipitation pattern. *J Academy Meteor Sci*, 3(1): 36-45 (in Chinese)
- 牛生杰, 马铁汉, 管月娥等. 1992. 宁夏夏季降水性层状云微结构观测分析. *高原气象*, 11(3): 241-248. Niu S J, Ma T H, Guan Y E, et al. 1992. Observation analysis of the microstructures of precipitation sheet clouds in summer over Ningxia. *Plateau Meteor*, 11(3): 241-248 (in Chinese)
- 秦彦硕, 蔡森, 刘世玺等. 2017. 华北秋季一次低槽冷锋层混合云宏微物理特征与催化响应分析. *气象学报*, 75(5): 835-849. Qin Y S, Cai M, Liu S X, et al. 2017. 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*, 75(5): 835-849 (in Chinese)
- 石立新, 段英. 2007. 华北地区云凝结核的观测研究. *气象学报*, 65(4): 644-652. Shi L X, Duan Y. 2007. Observations of cloud condensation nuclei in North China. *Acta Meteor Sinica*, 65(4): 644-652 (in Chinese)
- 孙可富, 游来光. 1965. 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*, 37(3): 265-272. Sun K F, You L G. 1965. Crystals of ice and snow in precipitating stratiform clouds from April to June of 1963 in the Jilin region. *Acta Meteor Sinica*, 37(3): 265-272 (in Chinese)
- 王黎俊, 银燕, 李仑格等. 2013. 三江源地区秋季典型多层层状云系的飞机观测分析. *大气科学*, 37(5): 1038-1058. Wang L J, Yin Y, Li L G, et al. 2013. Analyses on typical Autumn multi-layer stratiform clouds over the Sanjiangyuan National Nature Reserve with airborne observations. *Chinese J Atmos Sci*, 37(5): 1038-1058 (in Chinese)
- 王谦, 游来光, 胡志晋. 1987. 新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究: 个例的观测结果与分析. *气象学报*, 45(1): 2-11. Wang Q, You L G, Hu Z J. 1987. The study on the winter stratocumulus cloud over üürmqi, Xinjiang, China: Structure and evolution. *Acta Meteor Sinica*, 45(1): 2-11 (in Chinese)
- 辛乐, 姚展予. 2011. 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*, 37(2): 194-202. Xin L, Yao Z Y. 2011. Studies on the microphysical characteristics of an aircraft seeding in convective line with trailing stratiform cloud. *Meteor Mon*, 37(2): 194-202 (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. *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. *Plateau Meteor*, 24(1): 84-90 (in Chinese)
- 杨文霞, 周毓荃, 孙晶等. 2014. 一次西风槽过程过冷云水分分布特征观测研究. *气象学报*, 72(3): 583-595. Yang W X, Zhou Y Q, Sun J, et al. 2014. Observational studies of distribution characteristics of supercooled cloud water during a westerly trough process. *Acta Meteor Sinica*, 72(3): 583-595 (in Chinese)
- 游来光, 王守荣, 王鼎丰等. 1989. 新疆冬季降雪微结构及其增长过程的初步研究. *气象学报*, 47(1): 73-81. You L G, Wang S R, Wang D F, et al. 1989. The microphysical structure of snow cloud and the growth process of snow in winter in Xinjiang. *Acta Meteor Sinica*, 47(1): 73-81 (in Chinese)
- 游来光, 李炎辉, 刘玉宝. 1992. 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*, 50(2): 232-238. You L G, Li Y H, Liu Y B. 1992. On the nucleation processes of ice crystal and the collision efficiency between the dendritic snow crystal and droplets in natural clouds. *Acta Meteor Sinica*, 50(2): 232-238 (in Chinese)
- 张佃国, 郭学良, 付丹红等. 2007. 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*, 31(4): 596-610. Zhang D G, Guo X L, Fu D H, et al. 2007. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during August-September 2003. *Chinese J Atmos Sci*, 31(4): 596-610 (in Chinese)
- 张佃国, 郭学良, 龚佃利等. 2011. 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*, 69(1): 195-207. Zhang D G, Guo X L, Gong D L, et al. 2011. 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*, 69(1): 195-207 (in Chinese)
- 赵增亮, 毛节泰, 王磊等. 2011. 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*, 69(3): 521-527. Zhao Z L, Mao J T, Wang L, et al. 2011. In situ aircraft observations of one typical stratocumulus cloud process compared with the satellite measurements. *Acta Meteor Sinica*, 69(3): 521-527 (in Chinese)
- 郑国光, 郭学良. 2012. 人工影响天气科学技术现状及发展趋势. *中国工程科学*, 14(9): 20-27. Zheng G G, Guo X L. 2012. Status and development of sciences and technology for weather modification. *Eng Sci*, 14(9): 20-27 (in Chinese)
- 朱士超, 郭学良. 2014. 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*, 72(2): 366-389. Zhu S C, Guo X L. 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 366-389 (in Chinese)
- 朱士超, 郭学良. 2015. 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*, 39(2): 370-385. Zhu S C, Guo X L. 2015. 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*, 39(2): 370-385 (in Chinese)
- Chang Y, Guo X L, Tang J, et al. 2019. Aircraft measurement campaign on

- summer cloud microphysical properties over the Tibetan Plateau. *Sci Rep*, 9(1): 4912
- Durbin W G. 1958. Recent aircraft research into cloud physics. *Weather*, 13(5): 143-151
- Evans A G, Locatelli J D, Stoelinga M T, et al. 2005. The IMPROVE-1 storm of 1-2 February 2001. Part II: Cloud structures and the growth of precipitation. *J Atmos Sci*, 62: 3456
- Fugal J P, Shaw R A. 2009. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument. *Atmos Meas Tech*, 2(1): 259-271
- Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. 2015. Advances in cloud physics and weather modification in China. *Adv Atmos Sci*, 32(2): 230-249
- Herzogh P H, Hobbs P V. 1980. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones, II: Warm-frontal clouds. *J Atmos Sci*, 37: 597-611
- Hou T J, Lei H, Hu Z. 2010. A comparative study of the microstructure and precipitation mechanisms for two stratiform clouds in China. *Atmos Res*, 96(2-3): 447-460
- Jones R F. 1960. Size-distribution of ice crystals in cumulonimbus clouds. *Quart J Roy Meteor Soc*, 86(368): 187-194
- Lawson R P, Stewart R E, Strapp J W, et al. 1993. Aircraft observations of the origin and growth of very large snowflakes. *Geophys Res Lett*, 20: 53-56
- Lawson R P, Zuidema P. 2009. Aircraft microphysical and surface-based radar observations of summertime arctic clouds. *J Atmos Sci*, 66: 3505-3529
- Lu G X, Guo X L. 2012. 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*, 57(19): 2460-2469
- McFarquhar G M, Black R A. 2004. Observations of particle size and phase in tropical cyclones; Implications for mesoscale modeling of microphysical processes. *J Atmos Sci*, 61: 422-439
- Zhu S C, Guo X L, Lu G X, et al. 2015. Ice crystal habits and growth processes in stratiform clouds with embedded convection examined through aircraft observation in northern China. *J Atmos Sci*, 72(5): 2011-2032