

董晓波,麦榕,李军霞,2025. 近 20 年河北地区气溶胶及云降水微物理特征飞机观测研究进展[J]. 气象,51(2):143-152. Dong X B, Mai R, Li J X, 2025. Research progress of aircraft measurements on the aerosol, cloud and precipitation microphysical properties over Hebei Province in recent 20 years[J]. Meteor Mon, 51(2):143-152(in Chinese).

近 20 年河北地区气溶胶及云降水微物理特征 飞机观测研究进展^{*}

董晓波^{1,2,3} 麦 榕³ 李军霞⁴

1 中国气象局雄安大气边界层重点开放实验室,雄安新区 071800

2 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050020

3 河北省人工影响天气中心,石家庄 050020

4 中国气象局人工影响天气中心,中国气象局云降水物理与人工影响天气重点开放实验室,北京 100081

提 要: 河北省利用加装云物理探测仪器的人工影响天气飞机常年开展气溶胶和云微物理观测研究,在气溶胶、云凝结核(CCN)、云降水宏微观结构特征和人工影响天气催化作业试验等领域取得了系列的研究成果。对近 20 年来利用飞机平台在河北地区开展气溶胶和云降水物理观测取得的研究成果进行系统总结,归纳了具有统计意义的气溶胶、CCN 和云微物理特征参数的垂直结构、空间分布以及季节变化等特征。结合四次针对飞机人工增雨作业及效果检验的观测试验,展示了在催化作业前后云中过冷水区宏微观特征量变化的物理证据。在总结已有研究成果的基础上提出未来发展方向,为华北区域乃至全国开展气溶胶与云物理飞机观测和飞机催化作业提供建议与参考。

关键词: 气溶胶,云微物理,飞机观测,河北地区

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.071501

Research Progress of Aircraft Measurements on the Aerosol, Cloud and Precipitation Microphysical Properties over Hebei Province in Recent 20 Years

DONG Xiaobo^{1,2,3} MAI Rong³ LI Junxia⁴

1 CMA Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area 071800

2 Key Laboratory of Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang 050020

3 Hebei Weather Modification Center, Shijiazhuang 050020

4 CMA Cloud-Precipitation Physics and Weather Modification Key Laboratory, CMA Weather Modification Centre, Beijing 100081

Abstract: Observational researches of aerosols and cloud microphysics have been carried out by means of aircraft carrying cloud physics detection instruments for many years in Hebei Province, China. A series of research results have been obtained and published in the fields of aerosols, cloud condensation nuclei (CCN), clouds and precipitation macro and micro structure characteristics, especially some weather modification catalytic experiments by aircraft. In this paper, the research progresses of aerosols and cloud precipitation physical observations over Hebei Province in the recent 20 years are systematically summarized. The microphysical characteristics of aerosols, CCN and clouds, such as vertical structure, spatial distribution and seasonal variation, are summarized. Four observation field campaigns for aircraft precipitation

^{*} 河北省自然科学基金项目(D2023304001)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J038)共同资助

2023 年 11 月 4 日收稿; 2024 年 6 月 6 日收修定稿

第一作者:董晓波,主要从事云降水物理和人工影响天气研究. E-mail: xb.dong@qq.com

通讯作者:李军霞,主要从事气溶胶-云相互作用和人工影响天气研究. E-mail: ljx22258@126.com

enhancement operation and the effect test are introduced in detail. The physical evidence of macro and micro physical characteristic changes in the supercooled water area before and after cloud catalysis is objectively demonstrated. In addition, the future development direction is put forward on the basis of summarizing a large number of research results, with some suggestions for aerosol-cloud physical aircraft observation and weather modification activities through aircraft catalysis in North China.

Key words: aerosol, cloud microphysical property, aircraft measurement, Hebei Province

引 言

气溶胶和云在大气研究中非常重要。云作为大气中水循环过程的重要组成部分,通过形成降水可为陆地生态系统提供大量水资源,而云的微物理特征包括云粒子的尺度、形状和数浓度等都是决定其是否能形成降水的关键因子(Andreae and Rosenfeld, 2008; Li et al, 2016; 2019; Lohmann and Feichter, 2005; Zhao et al, 2020)。因此,通过观测云的微物理结构特征,深入研究降水形成机理,是科学指导开展人工影响天气作业的必要手段。

气溶胶对云和降水的影响,对于气候系统、大气环境以及水循环至关重要。气溶胶对气候的影响可分为直接影响和间接影响。直接影响指大气中的气溶胶粒子吸收和散射太阳辐射,从而影响地气系统的辐射收支。间接影响指气溶胶粒子作为云凝结核(CCN)和大气冰核(IN)可影响云的微物理过程,进而影响雨、雪、雹以及其他形式的降水(Twomey, 1977; Albrecht, 1989; Berg et al, 2011; Feingold et al, 2003; Garrett et al, 2004; Qiu et al, 2017; Wang et al, 2014; Zhao et al, 2012; Yang et al, 2019),而气溶胶间接效应的不确定性更为明显。河北地区人口稠密,环抱京津冀大城市群,一直以来是我国重要的能源和化工基地之一,随着经济的快速发展,大量的工业排放和人为排放的气溶胶粒子显著增加,对该地区的云和降水都产生巨大影响。

由于受地理位置和季风气候的影响,河北地区气候干燥,降水量比较少,20 世纪 50 年代年平均降水量为 585.1 mm,90 年代减少到 512.3 mm(段英等, 2006)。由于自然降水较少,随着社会的发展,需水量却在显著增加,干旱缺水、水资源匮乏的矛盾日趋增大。因此,对具有降水潜力的云在适当的部位和时机进行人工催化,成为科学利用空中云水资源的有效途径。对于目前人工增雨技术来讲,就是要在过冷水含量丰富而缺少冰核的云中人为地增加冰

核、制造冰晶,并通过贝吉龙过程成长为大粒子,从而促进降水形成,达到人工增雨的目的。但是,人工催化云影响降水,如何量化开展云催化一直是存在的难题,理论的催化条件也存在一定的限制(Flossmann et al, 2019)。如何评判人工催化云效果一直以来也是人工影响天气科研试验和业务工作的核心问题(王飞等, 2022)。

近 20 年来,河北省利用加装云物理探测仪器的飞机开展了大量的气溶胶和云降水物理飞机观测,并常年实施飞机增雨作业,在气溶胶、CCN、云降水宏微观物理特征观测和飞机云催化试验等领域取得了一系列的研究成果,但对河北地区气溶胶和云降水物理飞机观测的进展、取得的成果系统性总结较少。近几年,随着我国人工影响天气工作快速发展,加装全套云物理探测设备的高性能增雨作业飞机、大型无人机等陆续投入使用,我国各个地区也陆续开展了一系列的外场观测试验,新的探测装备、观测手段、催化技术的应用也促进了新成果和新发现的产出。本文针对近 20 年来河北地区气溶胶和云降水物理飞机观测的现状、取得的成果进行系统总结,旨在为华北区域乃至全国开展气溶胶与云物理飞机观测和飞机云催化作业提供建议与参考。

1 河北地区气溶胶与云降水微物理特征飞机观测技术介绍

1.1 机载观测设备

提升精密监测能力是科学开展人工影响天气作业的前提。2003 年,河北省从美国引进具有国际先进水平的机载 PMS 粒子测量系统,并改装一架夏延 III A 飞机。2016 年,河北省购买一架空中国王 350HW 和两架运十二增雨作业飞机,建成由三架安装有气溶胶和云降水物理探测系统的飞机组成的探测和增雨作业飞机平台。

河北地区云降水物理探测和增雨作业飞机平台

加装的机载探测设备主要包括:气溶胶粒子谱探头、云滴谱探头、二维云粒子和降水粒子探头、云凝结核计数器、云粒子图像探头、热线总水/液态水含水量仪、温压湿风等气象要素探头、露点仪等(表 1)。

表 1 河北地区云物理探测和增雨作业飞机机载探测设备功能一览表

Table 1 Detailed information list of airborne cloud physical detection equipment in Hebei Province				
设备名称	测量范围	探测功能	厂家	加装飞机
被动腔气溶胶分光仪 PCASP-100X	0.1~3 μm	用于测量气溶胶粒子数浓度、尺度谱等	DMT	夏延空中国王运十二
单云室云凝结核计数器 CCN-100	0.75~10 μm	云凝结核粒子数浓度	DMT	夏延运十二
双云室云凝结核计数器 CCN-200	0.75~10 μm	云凝结核粒子数浓度	DMT	空中国王
云滴谱探头 FSSP-100-ER	1~95 μm	用于测量云滴粒子数浓度、尺度谱、云中含水量等	DMT	夏延
云滴谱探头 CDP	2~50 μm 测量精度:2 μm		DMT	运十二
快速云滴谱探头 FCDP	2~50 μm 测量精度:2 μm		SPEC	空中国王
云粒子组合探头 CCP	云滴谱探头 CDP;2~50 μm	用于测量云滴粒子数浓度、尺度谱、云中含水量等	DMT	空中国王
	二维云粒子图像探头 CIP;12.5~1550 μm			
	液态含水量探头 LWC;0~5 g·m ⁻³	用于测量云中液态含水量		
二维光阵灰度云粒子探头 OAP-2D-GA2	25~1550 μm 图像分辨率:25 μm	用于测量大云滴、冰雪晶粒子数浓度、尺度谱、粒子图像等	DMT	夏延
二维云粒子图像探头 CIP	7.5~930 μm 图像分辨率:15 μm		DMT	运十二
二维立体云粒子图像探头 2DS	10~1280 μm 图像分辨率:10 μm		SPEC	空中国王
二维光阵灰度降水粒子探头 OAP-2D-GB2	150~9300 μm 图像分辨率:150 μm	用于测量冰雪晶、雨滴粒子数浓度、尺度谱、粒子图像等	DMT	夏延
二维降水粒子图像探头 PIP	100~6200 μm 图像分辨率:100 μm		DMT	运十二
高体积分降水粒子探头 HVPS	150~19200 μm 图像分辨率:150 μm		SPEC	空中国王
云粒子图像探头 CPI	2.3~2000 μm 图像分辨率:2.3 μm	获取云滴、冰雪晶、雨滴粒子图像	SPEC	空中国王
总含水量传感器 Nevzorov LWC/TWC	0.003~3 g·m ⁻³	液态水和总含水量	Nevzorov	空中国王
热线含水量仪 LWC-200	0~3 g·m ⁻³	液态水含量	DMT	运十二
综合气象要素探头 AIMMS-20	—	获取空速、高度、攻角、侧滑角、GPS 等飞机飞行参数和气压、温度、相对湿度等大气环境参数	Aventech	空中国王运十二
温度传感器	-54~71℃ 测量精度:0.002%	温度	Goodrich	夏延空中国王
露点仪 Edgtech 137 Vigilant	-40~60℃; -50~90℃	大气露点温度	Edgtech	空中国王运十二
结冰探测传感器	—	飞机结冰	Goodrich	空中国王

1.2 气溶胶与云降水微物理特征飞机观测设计

飞机观测设计对开展气溶胶、云微观物理结构观测和云催化效果物理检验,获取高时空分辨率观

测数据具有十分重要的意义。河北省开展气溶胶与云降水微物理飞机观测一般采用垂直与水平观测相结合的方式,先是飞机到达观测区后以半径 5~10 km 由低到高盘旋上升或由高到低盘旋下降的方

式垂直飞行,飞行高度一般在 600~7000 m(图 1);在观测区内垂直飞行观测结束后,选择合适的观测高度区间,以垂直间隔 300 m 或 600 m 为一层,开展阶梯式的下降或上升平飞观测,平飞 3~5 min(图 2)。飞机垂直观测目的是观测气溶胶或云微物理垂直结构特征,获取垂直分布状态。水平观测目的是对气溶胶和云降水的各参数进行持续观测取样,以了解气溶胶和云降水微物理结构水平分布特征及气溶胶与云的相互作用关系,一般在云底以下 300 m、云底、云中、云顶和云顶以上 300 m 分层开展水平观测。

以飞机云催化效果物理检验为目的的催化作业和观测设计主要采用两种飞行方式,一种方式是在适合作业的高度层垂直于高空风方向进行S型或8字

型航线飞行充分播撒作业,考虑催化剂扩散,航线从高空风的下游逐步向上游延伸,当作业完成后,为验证作业效果,可在同高度垂直于作业航线或到催化作业下游区域飞行并在催化作业以下的高度进行云结构参数的追踪观测(图 3)。另外一种方式是在过冷水云的云顶位置以半径 5~10 km 绕圈平飞实施飞机催化作业,在云顶位置进行催化作业目的是便于结合卫星观测,绕圈进行催化作业有利于飞机催化后能够及时观测到云滴向冰晶粒子转化的微物理响应。作业完成后在同高度层继续按照原飞行路线绕圈飞行,获取催化后云微物理量参数,分析催化后云微物理响应;然后飞机下降 300 m,观测云催化后形成的冰晶粒子生长情况,同时,结合卫星云图、天气雷达、地面雨滴谱等观测结果验证催化效果(图 4)。

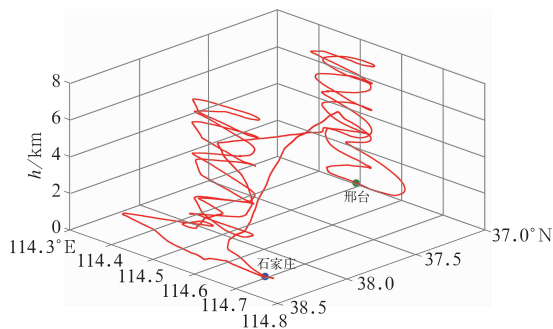
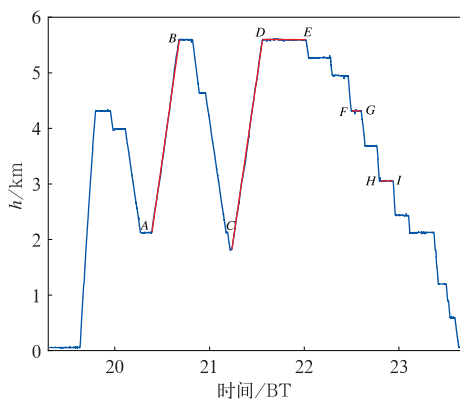


图 1 2013 年 9 月 30 日华北重度霾期间气溶胶飞机观测轨迹(董晓波等,2018)

Fig. 1 Observed flight track of aerosol during heavy haze days in North China on 30 September 2013 (Dong et al, 2018)



注:AB、CD 代表垂直探测,DE、FG、HI 代表在不同高度层的水平探测。

图 2 2018 年 5 月 21 日层状云微物理特征飞机观测轨迹(杨洁帆等,2021)

Fig. 2 Observed flight track of stratiform clouds with microphysical characteristics on 21 May 2018 (Yang et al, 2021)

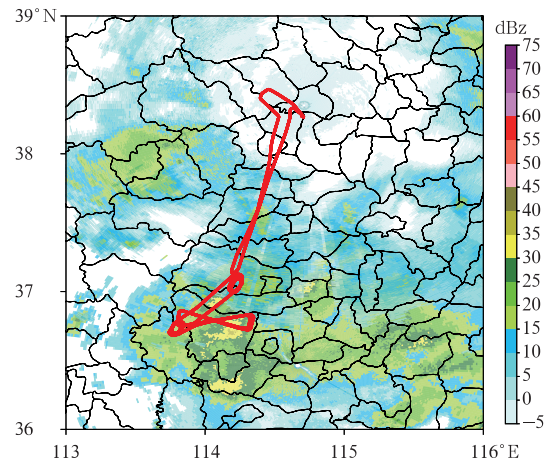


图 3 2023 年 4 月 3 日飞机飞行轨迹(红线)与 17:00 天气雷达 PPI(填色)叠加图

Fig. 3 Flight track (red line) superimposed with weather radar PPI (colored) at 17:00 BT 3 April 2023

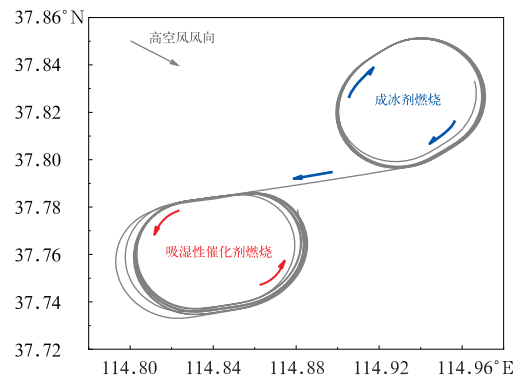


图 4 2020 年 7 月 6 日一次催化剂燃烧试验飞行轨迹(董晓波等,2023)

Fig. 4 Flight track of a catalyst combustion test on 6 July 2020 (Dong et al, 2023)

2 河北地区气溶胶和云凝结核分布及特征

2.1 气溶胶分布及特征

气溶胶粒子可以通过对太阳辐射和地球长波辐射的散射和吸收,影响大气加热或冷却率,并进而影响整个地气系统的辐射收支;同时作为云凝结核或大气冰核改变云的微物理结构进而影响降水(董晓波等,2010;董晓波,2018;孙玉稳等,2012;孙霞等,2012)。河北省从2005年开始,利用机载气溶胶粒子探头 PCASP-100X 对河北地区常年开展气溶胶的飞机观测,得到了该地区气溶胶垂直分布、季节变化、污染与晴好天气变化等特征。

气溶胶粒子垂直分布特征。利用河北地区2006—2010年104架次(孙霞,2013)和2008—2016年103架次(董晓波,2018)的气溶胶飞机观测数据分析表明:河北地区气溶胶粒子垂直分布与近地层大气层结密切相关。气溶胶粒子在近地层累积,粒子数浓度随高度整体呈负指数递减分布,近地面气溶胶粒子数浓度最高,平均为 10^3 cm^{-3} 量级。4000 m左右气溶胶粒子数浓度约为 150 cm^{-3} ,4000 m以上气溶胶粒子数浓度随高度变化不大。不同天气形势下气溶胶的垂直廓线可总结为三种分布形态:指数递减型(ED型),该型中近地面500 m高度内气溶胶粒子数浓度平均值为 2205 cm^{-3} ;近地面出现气溶胶层(SAL型),该型中地面至2000 m高度内气溶胶粒子数浓度平均值为 2237 cm^{-3} ;边界层高度出现气溶胶层(BAL型),该型中气溶胶粒子数浓度平均值为 1596 cm^{-3} ;三种分布形态所占比例分别为52.9%、29.8%和17.3%。SAL型和BAL型数浓度谱分布均呈现单峰型,峰值平均直径分别在 $0.28\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.16\text{ }\mu\text{m}$ 左右。同时通过大量飞机观测数据,获得了不同高度气溶胶谱分布特征及对数正态分布拟合特征参数(孙霞,2013),这些特征参数的取得可为区域云模式参数化方案的改进提供重要参考。

气溶胶粒子季节变化特征。河北地区春季气溶胶粒子平均体积直径约为 $1.7\text{ }\mu\text{m}$,随高度呈线性递减,6000 m高度平均体积直径约为 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。秋季气溶胶粒子平均体积直径略小于春季,近地层气溶胶粒子平均体积直径约为 $1.2\text{ }\mu\text{m}$,6000 m左右气溶胶粒子平均体积直径约为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。秋季气溶胶

粒子数浓度在1200 m以下存在边界层累积,边界层以上气溶胶粒子数浓度呈近似线性递减。春季、夏季、秋季的气溶胶标高平均值分别为1.0、1.6、1.0 km;风速大小与近地面气溶胶粒子数浓度有很好的负相关性,降雨对气溶胶有明显清除作用;边界层高度和对流稳定度与气溶胶垂直分布也密切相关。不同季节气溶胶粒子特征差异,可能与气团的来向不同有关,西北来向的沙尘气溶胶粒径较大,浓度较低,且往往对应较大风速天气,对局地气溶胶有清除作用;而偏南和偏东来向的人为气溶胶粒子数浓度高,二次气溶胶粒径较小,且大多对应静稳天气,造成污染物浓度升高。

污染与晴好天气下气溶胶粒子特征。河北地区在霾和沙尘天气下的气溶胶飞机观测(董晓波等,2018;2021;张瑜等,2012;孙霞等,2011)结果表明,边界层逆温的出现会阻碍垂直输送,形成一层相对湿度较小、气溶胶含量较高的“穹顶”结构。霾天气下的气溶胶粒子数浓度高于晴好天气1个量级,达到 10^4 cm^{-3} ,细粒子有效直径在 $0.1\sim0.7\text{ }\mu\text{m}$,粗粒子有效直径在 $1.6\sim4.4\text{ }\mu\text{m}$,细粒子数密度明显大于粗粒子。沙尘天气下平均直径为 $0.4\sim3.0\text{ }\mu\text{m}$ 沙尘层的气溶胶粒子数浓度是沙尘层下气溶胶粒子数浓度的1.3~4.1倍,而沙尘过程对不同高度气溶胶粒子谱的谱型影响较小。晴好天气下,气溶胶粒子数浓度基本上在 10^3 cm^{-3} 以下,以细粒子为主,粒子平均直径小于 $0.19\text{ }\mu\text{m}$ (董晓波等,2010;2023;孙霞等,2011)。

2.2 云凝结核分布及特征

云凝结核(CCN)是指在云中水汽过饱和条件下能够活化为云滴的气溶胶粒子,它可以直接定量地将气溶胶和云相联系,因此CCN数浓度的确定是气溶胶、云以及气候之间相互作用研究中的一个重要环节。2005、2009、2013年对河北地区开展的CCN飞机观测表明,该地区的CCN主要集中在3500 m高度范围内,数浓度垂直分布随高度升高而下降,逆温层同样对CCN的数浓度有累积作用。霾天气下,CCN数浓度比晴好天气高1个量级,城市上空的CCN数浓度(过饱和度为0.3%)最高值可达到 5889 cm^{-3} 以上,受污染的乡村上空比清洁的乡村上空CCN数浓度高5倍以上,河北省中南部城市上空的CCN数浓度在0.1%、0.3%、0.5%和1.0%过饱和度下,是渤海湾区域曹妃甸上空的

6.15、4.08、2.69、3.39 倍。该地区 CCN 具有明显的日变化,从 06 时以后数浓度开始上升,上午至中午前后达到极大值,下午一直下降。同时,云对 CCN 具有明显的消耗作用,雨天 CCN 的垂直分布呈现出很大的离散性,降雨对 CCN 有清除作用,而降雨结束后 CCN 数浓度会略有上升。CCN 活化谱参数 C 值明显较大(大于 1000),拟合系数 k 值较高(约 0.7),表明该地区 CCN 具有大陆性特征(石立新和段英,2007;孙霞等,2012;孙霞,2013;董晓波等,2018;2023)。

3 河北地区云微物理特征

3.1 层状云微物理特征

在中国华北地区,层状云降水是春季和秋季的主要降水云系,也是开展飞机增雨作业的主要对象,层状降水云系往往与大尺度天气过程密切相关,云系具有复杂的中尺度结构,常由多个云(雨)带组成(周毓荃,2004)。

对河北地区 2006—2018 年春季层状云特征的飞机观测结果表明(孙玉稳等,2015a;2015b;2017;杨文霞等,2018),河北地区层状云季节分布特征较为明显。春秋季层状云发展初期垂直上分三层结构,最上层为尺度较小的冰晶,中间为混合层,下层为暖层。层状云系中云滴粒子平均数浓度为 149.5 cm^{-3} ,低云内云滴粒子数浓度为 249.1 cm^{-3} ,中云内为 95.4 cm^{-3} ;云滴粒子数浓度受云层不同发展阶段影响,降水前为 173.2 cm^{-3} ,降水中为 186.1 cm^{-3} ,降水后为 112.1 cm^{-3} 。降水云冰晶粒子平均数浓度为 39.5 L^{-1} ,平均含水量为 $0.06\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冰晶粒子数浓度高值区主要以针状和柱状冰晶为主,冰晶粒子数浓度低值区的冰晶形状基本以片状或枝状为主, -5°C 层及以上的冰晶粒子增长主要以凝华和聚并增长为主,淞附过程很弱。云水含量峰值区的粒子主要以直径 $10\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 的云滴为主,伴随着少量聚合状冰晶。 0°C 层区域的过冷水含量约在 $0.05\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,冰晶粒子形态主要以聚合状、淞附状及霰粒子为主。液水层则主要以球形液滴及半融化状态的冰晶粒子为主。 0°C 层以上的冰晶粒子数浓度呈现随高度递增的趋势。在发展稳定的层状云内,混合层的过冷水含量很低,冰晶粒子主要通过凝华和聚并过程增长,云体冰晶化程度较高。而在发展较

为旺盛的层状云区里过冷水含量较高,大量液滴的存在也表明混合层冰-液相之间的转化不充分。不同温度层的粒子谱显示,过冷水含量高值区的冰晶粒子平均数浓度比过冷水低值区高,但平均直径比过冷水低值区小。

对河北地区 2017—2022 年冬季降雪层状云特征飞机观测结果表明(Dong et al,2020;2021;刘伟等,2021;付娇等,2023;王晓青等,2023;闫非等,2023;赵利伟等,2023),冬季降水性层状云多为混合相态云,云中普遍存在过冷水层。与春秋季降水性层状云系相比,冬季降雪性层状云发展稳定,云顶高度起伏较小,云顶高度多数低于 3500 m ,普遍低于春秋季降水性层状云云顶高度。部分云系存在分层,为两到三层云,云层之间存在明显干层。云中过冷水含量分布在 $0.10\sim 0.38\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,不同天气过程的云中过冷水含量差距较大。直径 $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$ 的云粒子数浓度最大值在 $100\sim 1240\text{ cm}^{-3}$ 。直径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的冰晶或降水粒子数浓度普遍在 $0.2\sim 23\text{ L}^{-1}$,冰晶主要以柱状、板状、辐枝状和聚合体形态存在,冰晶形态主要与云内温度和相对湿度相关。

对河北地区一次层状暖云降水的飞机观测发现(Dong et al,2022),暖云的云顶高度约为 3456 m ,温度为 2.8°C ,云滴粒子谱较窄,粒子直径范围为 $3\sim 27\text{ }\mu\text{m}$,粒子数浓度在直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 处达到峰值,云顶附近没有雨滴只有云滴粒子。从云顶到云底,云滴粒子数浓度峰值在不同温度所对应的粒子直径分别为: $21\text{ }\mu\text{m}$ (温度 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$), $24\text{ }\mu\text{m}$ (温度 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$), $27\text{ }\mu\text{m}$ (温度 $6\sim 7^{\circ}\text{C}$), $16\text{ }\mu\text{m}$ (云底,温度 8.2°C);不同温度下雨滴粒子最大直径分别为: $1050\text{ }\mu\text{m}$ (温度 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$), $1350\text{ }\mu\text{m}$ (温度 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$), $2100\text{ }\mu\text{m}$ (温度 $6\sim 7^{\circ}\text{C}$), $2250\text{ }\mu\text{m}$ (云底,温度 8.2°C)。雨滴粒子谱从云顶到云底随着温度的升高谱型越来越宽,反映了暖云中粒子下落过程中的碰并增长,云顶和云底附近云滴粒子直径较小,可能是受到夹卷和蒸发的影响。

3.2 积层混合云微物理特征

积层混合云系是河北地区重要的降水云系,由大范围层状云和镶嵌其中的对流泡组成,常出现在河北地区的春末夏初。对河北地区典型积层混合云的飞机观测表明(亓鹏等,2019;朱士超和郭学良,2014;秦彦硕等,2017;孙玉稳等,2019;王元等,2017;杨洁帆等,2021),积层混合云由冷云和暖云组

成,部分云系存在薄的干层。积层混合云中大部分过冷水位于云的上部,嵌入式积云区含水量最大值、云滴谱峰值直径和数浓度均大于层云区。高层冷云中存在高浓度冰晶粒子,直径大于 $100\ \mu\text{m}$ 的冰晶粒子数浓度最大值可达到 $85\ \text{L}^{-1}$,冰晶粒子形态主要包括板状、针柱状、帽状、辐枝状和不规则状。高层冰晶粒子下落过程中的增长在不同区域存在明显差异,在含有高过冷水含量的对流泡中,冰晶粒子增长主要是聚并和淞附增长,随着过冷水含量增多,淞附增长也相应增加。而在过冷水含量较低的区域以聚并增长为主。由于聚并增长形成的冰晶粒子密度低,下落速度小,穿过 0°C 层时间更长,出现大量半融化的冰晶粒子,使融化现象更为明显。镶嵌在层状云中的对流泡一般处于 $-10\sim 0^\circ\text{C}$ 层,垂直和水平尺度约 $2\ \text{km}$ 。对流泡内平均液态水含量是周围云区的2倍左右,云滴粒子平均浓度比周围云区高1个量级,冰晶粒子的数浓度也更高。在具有较高过冷水含量的对流泡或层状云中降水形成符合“播撒-供给”机制,但在过冷水含量较低的区域并不符合这一机制。

4 飞机增雨效果物理检验

人工播云的效果是指受人工催化影响后,目标云的微物理过程和降水过程发生的变化。按照评估手段,可分为统计检验、物理检验和模式检验。其中,人工增雨作业效果的物理检验是通过对云降水过程物理参量的系列观测,获得人工催化后应该发生的各项物理变化的证据(王飞等,2022)。通过2018、2019、2020、2021年四次对河北地区过冷水云开展飞机观测并进行碘化银催化作业试验,结合地面双偏振天气雷达、雨滴谱、葵花-8和风云四号遥感卫星等“星-空-地”一体观测数据,研究分析了过冷水云微物理特征及云催化对其相关降水的影响,获得了飞机云催化效果的物理检验证据。

四次飞机云催化作业前对过冷水云微物理特征观测表明:在降水后期或者云顶位置,当大气中没有充足的冰核使液态云滴转化为冰晶粒子时,易形成液态云滴为主的过冷水云。2018年1月22日、2020年11月21日和2021年5月15日三次降水后期过冷水云内云滴粒子数浓度平均为 $300\ \text{cm}^{-3}$,过冷水含量平均为 $0.1\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,云内直径大于 $100\ \mu\text{m}$ 的冰晶粒子数浓度很小,均低于 $1\ \text{L}^{-1}$ 。2019年11月29日在

混合相态云的云顶位置云粒子以过冷液滴形态存在,云滴粒子数浓度平均为 $159\ \text{cm}^{-3}$,而冰晶粒子数浓度平均为 $7.7\ \text{L}^{-1}$,具有较好的云催化潜力。

飞机催化作业后,由于向过冷液态云中添加冰核促使贝吉龙过程更快发生,从而使云的粒径谱变宽。相应地,过冷液态云的云微物理结构发生了显著变化,具体而言,受催化影响的云内,云滴粒子数浓度急剧降低到 $10\ \text{cm}^{-3}$ 以下,甚至达到 $0\ \text{cm}^{-3}$;冰晶粒子数浓度显著增加,从 $0\ \text{L}^{-1}$ 可以增长到每升数百个;同时,液态水含量明显降低,冰水含量显著增加,机载云粒子图像探头可以观测到催化后形成板状、辐枝状等不规则的冰晶和降水粒子(Dong et al,2020;2021;2022;Yang et al,2022)。由于催化作业后云的微物理特征发生了改变,卫星、地面天气雷达能够观测到云和降水特性所发生的明显变化。云催化促使过冷云滴变成冰晶,冰晶的出现提高了碰撞聚结的效率,形成足够大的粒子向下降落,从而在卫星云图上出现了沿云催化轨迹形成的“云沟”现象。由于天气雷达对云滴粒子的观测能力较弱,当云催化形成直径大于 $100\ \mu\text{m}$ 、数浓度高于 $140\ \text{L}^{-1}$ 的冰晶粒子后能够促使天气雷达反射率回波加强,从而形成与飞机催化轨迹一致的雷达回波带,并且随着冰晶粒子长大、下落,雷达反射率回波也由生成、加强到最后消散(Dong et al,2020;2021)。

针对降水后期形成较弱的过冷水云进行催化,虽然通过飞机、卫星等观测手段较易获取催化后的物理响应,但催化后形成的弱降水却较难观测到,2020年11月21日个例利用地面雨滴谱在受云催化影响的地区观测到云催化后产生了降水量为 $0.04\ \text{mm}$ 的短期弱降雨,降水粒子直径小于 $1000\ \mu\text{m}$,下落末速度小于 $2.5\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。从开始催化到地面观测到弱降水,大约 $50\ \text{min}$,降水持续时间约 $6\sim 9\ \text{min}$,进一步证实了云催化形成降水的有效性(Dong et al,2021)。

5 结论与思考

本文总结了近20年来在河北地区开展的气溶胶和云降水微物理飞机观测研究成果,总结出具有统计意义的气溶胶、CCN和云微物理结构空间分布及季节变化等特征,对利用飞机开展的增雨催化作业效果检验试验和结果进行了详细阐述,为华北区

域开展飞机云物理观测和飞机催化作业提供参考。

(1) 基于飞机观测的气溶胶和 CCN 研究, 总结出河北地区上空气溶胶垂直分布、季节变化、污染与晴好天气变化的统计特征。近地面气溶胶粒子数浓度与风速大小有很好的负相关性, 边界层逆温的出现会阻碍垂直输送, 形成一层相对湿度较小、气溶胶含量较高的“穹顶”结构。垂直分布上, 呈现近地面高值型、边界层高值型和指数递减型三种分布类型。春季和秋季气溶胶粒子数浓度变化相近, 春季气溶胶粒子数浓度略低于秋季, 而春季气溶胶粒子平均体积直径高于秋季。河北地区的 CCN 具有明显的日变化, 并且具有大陆性特征。

(2) 基于已开展的层状云和积层混合云的飞机观测研究成果, 总结得出河北地区层状云、积层混合云不同季节的微物理结构特征。而对于目前人工增雨主要作业对象的过冷水云来说, 过冷水的识别和分布特征至关重要, 飞机观测是识别过冷水的一种有效途径, 利用机载云滴谱探头、二维云粒子和降水粒子探头、积冰传感器和热线含水量仪综合判断, 可以得到过冷水的含量、尺度、图像等特征。同时, 过冷水的存在往往与水汽含量、大气气溶胶、冰核等参量有一定关系, 在水汽含量丰富而大气冰核较少的区域往往容易存在过冷水, 一般位于云顶的位置, 或降水过后由于降水的冲刷作用使得大气清洁, 也容易发现过冷水的存在。经观测发现在河北地区华北回流天气往往会有较好的水汽输送, 在冬季容易形成较大范围的过冷水区。

(3) 通过飞机增雨作业效果物理检验试验, 得出人工云催化的物理响应证据及机理, 为人工催化触发贝吉龙过程的观测研究提供了观测证据。按照试验结果, 一般过冷水区催化作业后几分钟碘化银就可以发生核化作用, 20 min 后增长为大粒子, 可被雷达或者卫星观测到, 催化影响持续时间一般在 1.0~2.5 h。对于以过冷水为主的非降水性层状云进行云催化后, 云内形成直径在 200 μm 以上的降水质点, 并且浓度足以产生 10 dBz 的雷达反射率因子时, 地面可能会产生降水。当过冷水含量大于 $0.1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 一次性点燃 8 根左右的冷云焰条 (每根的碘化银含量为 18 g) 可以用飞机观测到较为明显的催化物理证据, 而一架次飞机催化作业使用 36 根冷云焰条也远不会产生过量催化的效果。

(4) 关于飞机云降水物理探测及飞机人工影响天气作业的几点思考。一是由于机载探测设备技术

更新较快, 精细化程度越来越高, 在观测试验中发现新旧机载探测设备存在一定的误差, 因此, 针对不同云系和不同目的需求, 科学设计机载探测任务系统, 不断丰富探测数据种类, 提高探测数据精细化程度。二是更加科学设计观测和作业方案, 发展适用于不同云系的机载催化作业技术, 进而研究区域协同、空地协同的催化作业技术方法。三是加强开展针对飞机人工影响天气作业效果的试验, 寻找飞机作业前后云微物理特征量的变化, 结合云中和地面实际观测资料, 开展作业前后云降水响应的物理检验技术研究, 发现更多的“云沟”“云洞”及其云降水物理参量匹配变化证据。四是提高飞机观测数据质量控制水平, 构建飞机云物理观测数据集, 建立气溶胶、云微物理结构等参数化方案, 结合数值模拟和人工智能等多种手段, 进一步提升飞机观测数据在云物理研究、作业条件识别监测及效果检验等的应用水平 and 价值。

参考文献

- 董晓波, 2018. 河北中南部地区大气气溶胶垂直特征的飞机探测研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Dong X B, 2018. Aircraft measurement study of atmospheric aerosol vertical distribution in central and southern of Hebei [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology (in Chinese).
- 董晓波, 麦榕, 李军霞, 2023. 成冰剂和吸湿性催化剂机载催化的气溶胶和 CCN 飞机观测试验分析 [J]. 气象, 49(8): 985-994. Dong X B, Mai R, Li J X, 2023. Aircraft measurements of aerosol and CCN for airborne glaciogenic and hygroscopic seeding agents for cold and warm cloud seeding [J]. Meteor Mon, 49(8): 985-994 (in Chinese).
- 董晓波, 麦榕, 王红磊, 等, 2021. 石家庄一次沙尘大气污染物与边界层相互作用 [J]. 中国环境科学, 41(3): 1024-1033. Dong X B, Mai R, Wang H L, et al, 2021. An interaction study between atmospheric pollutants and boundary layer during a dust storm weather in Shijiazhuang [J]. China Environ Sci, 41(3): 1024-1033 (in Chinese).
- 董晓波, 王高磊, 吕峰, 等, 2010. 一次晴空条件下华北中南部上空气溶胶的飞机观测及特征分析 [J]. 气象与环境科学, 33(1): 48-51. Dong X B, Wang G L, Lv F, et al, 2010. An airplane detection and character analysis on aerosol over middle-south of North China in clear day [J]. Meteor Environ Sci, 33(1): 48-51 (in Chinese).
- 董晓波, 杨军, 杨洋, 等, 2018. 华北重度霾过程期间大气气溶胶粒子的微物理垂直特征 [J]. 科学技术与工程, 18(2): 204-211. Dong X B, Yang J, Yang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics in the vertical direction of atmospheric aerosol particles of North

- China during the heavy haze process background[J]. *Sci Technol Eng*, 18(2):204-211(in Chinese).
- 段英, 吴志会, 游来光, 等, 2006. 河北地区自然降水变化趋势及其物理成因的初步分析[C]//中国气象学会2006年年会“人工影响天气作业技术专题研讨会”分会场论文集. 成都:中国气象学会.
- Duan Y, Wu Z H, You L G, et al, 2006. A primary study on the variable tendency of the natural precipitation and its physical cause of formation in Hebei Province Area[C]//Collection of Discussion Papers from the Subsession of the 2006 Annual Conference of the Chinese Meteorological Society on Artificial Weather Modification Operations Technology. Chengdu: Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 付娇, 张丹, 董晓波, 等, 2023. 一次基于飞机观测的河北中南部降雪云系微物理结构的对比分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 17(5):64-70.
- Fu J, Zhang D, Dong X B, et al, 2023. Comparative analysis of microphysical structure of snowfall cloud system in central and southern Hebei based on aircraft observation[J]. *Desert Oasis Meteor*, 17(5):64-70(in Chinese).
- 刘伟, 孙玉稳, 谢祥永, 等, 2021. 河北省冬季低槽冷锋层状云结构特征和可播性分析[J]. *气象与环境学报*, 37(3):110-116.
- Liu W, Sun Y W, Xie X Y, et al, 2021. Analysis of the structure characteristics and seeding possibility of stratiform clouds with low cold front in Hebei Province in winter[J]. *J Meteor Environ*, 37(3):110-116(in Chinese).
- 亓鹏, 郭学良, 卢广献, 等, 2019. 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[J]. *大气科学*, 43(6):1365-1384.
- Qi P, Guo X L, Lu G X, et al, 2019. 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[J]. *Chin J Atmos Sci*, 43(6):1365-1384(in Chinese).
- 秦彦硕, 蔡森, 刘世玺, 等, 2017. 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[J]. *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[J]. *Acta Meteor Sin*, 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[J]. *气象学报*, 65(4):644-652.
- Shi L X, Duan Y, 2007. Observations of cloud condensation nuclei in North China[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(4):644-652(in Chinese).
- 孙霞, 2013. 华北平原气溶胶时空分布特征和云微观结构观测分析[D]. 南京:南京信息工程大学.
- Sun X, 2013. Observational study of aerosol spatial and temporal distribution and cloud microstructure over the North China Plain[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology(in Chinese).
- 孙霞, 银燕, 韩洋, 等, 2012. 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征[J]. *中国环境科学*, 32(7):1165-1170.
- Sun X, Yin Y, Han Y, et al, 2012. Distribution characteristics of cloud particles and cloud condensation nuclei during haze/fog events in Shijiazhuang[J]. *China Environ Sci*, 32(7):1165-1170(in Chinese).
- 孙霞, 银燕, 孙玉稳, 等, 2011. 石家庄地区春季晴、霾天气气溶胶观测研究[J]. *中国环境科学*, 31(5):705-713.
- Sun X, Yin Y, Sun Y W, et al, 2011. An observational study of aerosol particles using aircraft over Shijiazhuang Area in clean and hazy days during spring[J]. *China Environ Sci*, 31(5):705-713(in Chinese).
- 孙玉稳, 董晓波, 李宝东, 等, 2019. 太行山东麓一次低槽冷锋降水云系云物理结构和作业条件的飞机观测研究[J]. *高原气象*, 38(5):971-982.
- Sun Y W, Dong X B, Li B D, et al, 2019. The physical properties and seeding potential analysis of a low trough cold front cloud system at Mountain Taihang based on aircraft observations[J]. *Plateau Meteor*, 38(5):971-982(in Chinese).
- 孙玉稳, 李宝东, 刘伟, 等, 2015a. 河北秋季层状云物理结构及适播性分析[J]. *高原气象*, 34(1):237-250.
- Sun Y W, Li B D, Liu W, et al, 2015a. Study on physical structure of Hebei stratiform clouds in autumn and its seedability condition[J]. *Plateau Meteor*, 34(1):237-250(in Chinese).
- 孙玉稳, 孙霞, 刘伟, 等, 2015b. 一次雨夹雪降水过程人工增水作业的综合观测研究[J]. *气象*, 41(11):1341-1355.
- Sun Y W, Sun X, Liu W, et al, 2015b. Study of integrated observation on aircraft artificial operation during a sleet event[J]. *Meteor Mon*, 41(11):1341-1355(in Chinese).
- 孙玉稳, 孙霞, 银燕, 等, 2012. 华北地区气溶胶数浓度和尺度分布的航测研究——以石家庄为例[J]. *中国环境科学*, 32(10):1736-1743.
- Sun Y W, Sun X, Yin Y, et al, 2012. Aerosol distribution in North China Plain under different weather conditions[J]. *China Environ Sci*, 32(10):1736-1743(in Chinese).
- 孙玉稳, 银燕, 孙霞, 等, 2017. 冷云催化宏微观物理响应的探测与研究[J]. *高原气象*, 36(5):1290-1303.
- Sun Y W, Yin Y, Sun X, et al, 2017. Observation and study of macro and micro response in cold cloud catalysis[J]. *Plateau Meteor*, 36(5):1290-1303(in Chinese).
- 王飞, 李集明, 姚展予, 等, 2022. 我国人工增雨作业效果定量评估研究综述[J]. *气象*, 48(8):945-962.
- Wang F, Li J M, Yao Z Y, et al, 2022. Advances of quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China[J]. *Meteor Mon*, 48(8):945-962(in Chinese).
- 王晓青, 董晓波, 闫非, 等, 2023. 河北冬季一次冷锋降雪云系微物理演变特征综合观测分析研究[J]. *气象科技*, 51(2):233-244.
- Wang X Q, Dong X B, Yan F, et al, 2023. A comprehensive observational study of micro-physical evolution characteristics of a snowfall cloud system under winter cold front in Hebei Province[J]. *Meteor Sci Technol*, 51(2):233-244(in Chinese).
- 王元, 牛生杰, 雷恒池, 2017. 利用三架飞机联合探测资料分析层积混合云催化物理效应[J]. *大气科学学报*, 40(5):686-696.
- Wang Y, Niu S J, Lei H C, 2017. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded convection using the joint observational data of three aircrafts[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(5):686-696(in Chinese).

- 闫非,杨洁帆,董晓波,等,2023. 冬季中尺度降雪系统暖输送带云微物理垂直特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 47(5): 1451-1465. Yan F, Yang J F, Dong X B, et al, 2023. Airborne observations of the cloud vertical microphysical characteristics of warm conveyor belt within a winter mesoscale snowstorm[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1451-1465 (in Chinese).
- 杨洁帆,胡向峰,雷恒池,等,2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 45(1): 88-106. Yang J F, Hu X F, Lei H C, et al, 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang Mountains[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1): 88-106 (in Chinese).
- 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 W X, Hu Z X, Dong X B, et al, 2018. A study on the microphysical structure and the correlation of microphysical parameters of the precipitation stratiform cloud[J]. Trans Atmos Sci, 41(4): 525-532 (in Chinese).
- 张瑜,银燕,石立新,等,2012. 华北地区典型污染天大气气溶胶飞机探测个例分析[J]. 高原气象, 31(5): 1432-1438. Zhang Y, Yin Y, Shi L X, et al, 2012. An observational study of aerosol property under typical polluted weather condition[J]. Plateau Meteor, 31(5): 1432-1438 (in Chinese).
- 赵利伟,孙玉稳,张健南,等,2023. 一次基于飞机探测的降雪云系微物理特征研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 17(3): 66-70. Zhao L W, Sun Y W, Zhang J N, et al, 2023. Microphysical characteristics of cloud system in winter based on aircraft detection[J]. Desert Oasis Meteor, 17(3): 66-70 (in Chinese).
- 周毓荃,2004. 河南层状云系多尺度结构和人工增雨条件的研究[D]. 南京:南京气象学院. Zhou Y Q, 2004. Study on the stratiform cloud multi-scale structures and artificial rainfall increase in Henan Province[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology (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[J]. 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[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 366-389 (in Chinese).
- Albrecht B A, 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness[J]. Science, 245(4923): 1227-1230.
- Andreae M O, Rosenfeld D, 2008. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols[J]. Earth-Science Reviews, 89(1/2): 13-41.
- Berg L K, Berkowitz C M, Barnard J C, et al, 2011. Observations of the first aerosol indirect effect in shallow cumuli[J]. Geophys Res Lett, 38(3): L03809.
- Dong X B, Sun X S, Yan F, et al, 2022. Aircraft observation of a two-layer cloud and the analysis of cold cloud seeding effect[J]. Front Environ Sci, 10: 855813.
- Dong X B, Zhao C F, Huang Z C, et al, 2021. Increase of precipitation by cloud seeding observed from a case study in november 2020 over Shijiazhuang, China[J]. Atmos Res, 262: 105766.
- Dong X B, Zhao C F, Yang Y, et al, 2020. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based seeding experiment[J]. Earth Space Sci, 7(8): e2020EA001196.
- Feingold G, Eberhard W L, Veron D E, et al, 2003. First measurements of the Twomey indirect effect using ground-based remote sensors[J]. Geophys Res Lett, 30(6): 1287.
- Flossmann A I, Manton M, Abshaev A, et al, 2019. Review of advances in precipitation enhancement research[J]. Bull Amer Meteor Soc, 100(8): 1465-1480.
- Garrett T J, Zhao C, Dong X, et al, 2004. Effects of varying aerosol regimes on low-level arctic stratus[J]. Geophys Res Lett, 31(17): L17105.
- Li Z Q, Lau W K M, Ramanathan V, et al, 2016. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia[J]. Rev Geophys, 54(4): 866-929.
- Li Z Q, Wang Y, Guo J P, et al, 2019. East Asian study of tropospheric aerosols and their impact on regional clouds, precipitation, and climate (EAST-AIRCPC)[J]. J Geophys Res Atmos, 124(23): 13026-13054.
- Lohmann U, Feichter J, 2005. Global indirect aerosol effects: a review[J]. Atmos Chem Phys, 5(3): 715-737.
- Qiu Y M, Zhao C F, Guo J P, et al, 2017. 8-year ground-based observational analysis about the seasonal variation of the aerosol-cloud droplet effective radius relationship at SGP site[J]. Atmos Environ, 164: 139-146.
- Twomey S, 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds[J]. J Atmos Sci, 34(7): 1149-1152.
- Wang F, Guo J P, Wu Y R, et al, 2014. Satellite observed aerosol-induced variability in warm cloud properties under different meteorological conditions over eastern China[J]. Atmos Environ, 84: 122-132.
- Yang Y, Zhao C F, Dong X B, et al, 2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical properties of shallow cumulus cloud using aircraft observations[J]. Atmos Res, 221: 27-33.
- Yang Y, Zhao C F, Fu J, et al, 2022. Response of mixed-phase cloud microphysical properties to cloud-seeding near cloud top over Hebei, China[J]. Front Environ Sci, 10: 865966.
- Zhao C F, Klein S A, Xie S C, et al, 2012. Aerosol first indirect effects on non-precipitating low-level liquid cloud properties as simulated by CAM5 at ARM sites[J]. Geophys Res Lett, 39(8): L08806.
- Zhao C F, Yang Y K, Fan H, et al, 2020. Aerosol characteristics and impacts on weather and climate over the Tibetan Plateau[J]. Natl Sci Rev, 7(3): 492-495.

(本文责编:俞卫平)