

近 20 年河北地区气溶胶及云降水微物理飞机观测研究进展

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

摘要: 河北地区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。本文对近 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

Research progress of aircraft measurements on aerosol, clouds and precipitation microphysical properties over Hebei Province in recent 20 years

Dong Xiaobo^{1,2}, Mai Rong^{1,2}, Li Junxia³

(1 China Meteorological Administration Xiong'an Atmospheric Boundary Layer Key Laboratory, Xiong'an New Area, China, 071800;

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

3 Hebei Provincial Weather Modification Center, Shijiazhuang, China, 050020;

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

Abstract: Aerosols and cloud microphysics observational researches have been carried out by aircraft which equipped with 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 progress of aerosols and cloud precipitation physical observations over Hebei

河北省自然科学基金 (D2023304001)、中国气象局创新发展专项 (CXFZ2023J038) 共同资助

第一作者: 董晓波 (1982-), 正高级工程师, 主要从事云降水物理和人工影响天气方向研究. E-mail: xb.dong@qq.com

通信作者: 李军霞 (1977-), 研究员, 主要从事气溶胶-云相互作用和人工影响天气方向研究. E-mail: ljx22258@126.com

Province in the recent 20 years were systematically summarized, and the microphysical characteristics of aerosols, CCN and clouds, such as vertical structure, spatial distribution and seasonal variation, were summarized. Four observation field campaigns for aircraft precipitation enhancement operation and the effect test are introduced in detail, and the physical evidence of macro and micro physical characteristics changes in the supercooled water area before and after cloud catalysis is objectively demonstrated. This paper puts forward the future development direction on the basis of summarizing a large number of research results, and provides some suggestions for aerosol-cloud physical aircraft observation and weather modification activities through aircraft catalysis in North China.

Key words: Aerosols; clouds microphysical properties; aircraft measurements; Hebei Province, China

1 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,通过观测云系微物理结构特征,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 (Cloud condensation nucleus, CCN) 和大气冰核 (Ice nucleus, IN) 影响云的微物理过程,进而影响雨、雪、雹和其他形式的降水 (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,河北省气候干燥,降水量比较少,全省 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的增加冰

66 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。
 67 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
 68 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
 69 响天气科研试验和业务工作的核心问题（王飞等，2022）。

70 近 20 年来，河北省利用加装云物理探测仪器的飞机在河北地区开展了大量的气溶胶和
 71 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
 72 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
 73 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
 74 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
 75 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
 76 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
 77 测现状、取得成果进行系统总结，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
 78 飞机云催化作业提供建议与参考。

79 2 河北省气溶胶与云降水物理飞机观测技术介绍

80 2.1 机载观测设备

81 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
 82 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 IIIA 飞机。2016 年，河北省
 83 购买一架空中国王 350HW 和两架运十二增雨作业飞机，建成由 3 架安装有气溶胶和云降水
 84 物理探测系统的飞机组成的探测和增雨作业飞机平台。

85 河北省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
 86 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
 87 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（见表 1）。

88 表 1 河北省云物理探测和增雨作业飞机机载探测设备功能一览表

89 Table1 Detailed information list of airborne cloud physical detection equipment in Hebei Province

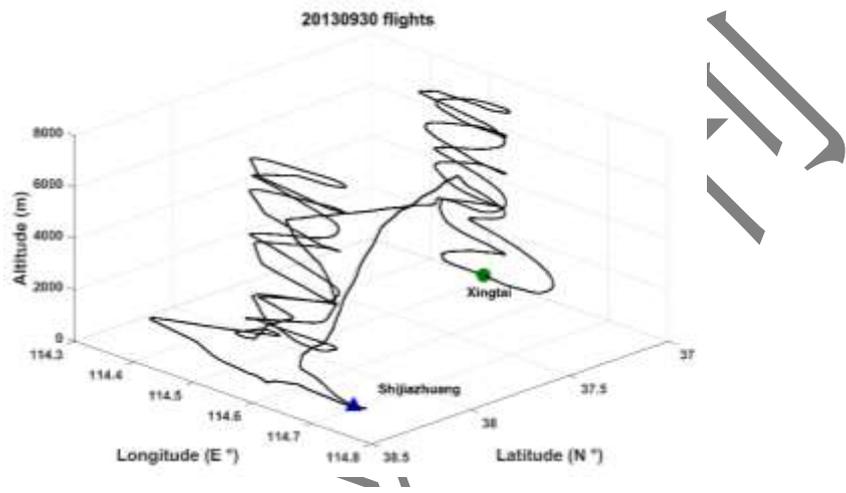
设备名称	测量范围 (μm)	探测功能	厂家	加装飞机
被动腔气溶胶分光仪 PCASP-100X	0.1~3μm	用于测量气溶胶粒子数浓度、尺 度谱等	DMT	夏延 空中国王 运十二
单云室云凝结核计数器 CCN-100	0.75~10μm	云凝结核粒子数浓度	DMT	夏延 运十二
双云室云凝结核计数器 CCN-200	0.75~10μm	云凝结核粒子数浓度	DMT	空中国王
云滴谱探头 FSSP-100-ER	1-95μm	用于测量云滴粒子数浓度、尺度	DMT	夏延

云滴谱探头 CDP	2~50 μm 测量精度: 2 μm	谱、云中含水量计算等;	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	用于测量大云滴、冰雪晶粒子数 浓度、尺度谱、粒子图像等	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			
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 μm ~ 6200 μm 图像分辨率: 100 μm		DMT	运十二
高体积降雨分光仪 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 Rosemount Total Temperature	-54~71 $^{\circ}\text{C}$ 测量精度 0.002%	温度	Goodrich	夏延 空中国王
露点仪 Edgtech 137 Vigilant	-40~60 $^{\circ}\text{C}$; -50~90 $^{\circ}\text{C}$	大气露点温度	Edgtech	空中国王 运十二
结冰探测传感器 Rosemount Icing Detector	—	飞机积冰	Goodrich	空中国王

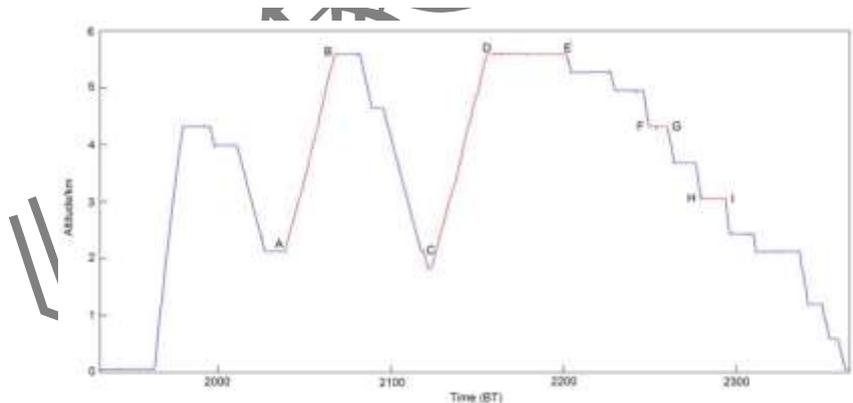
90 2.2 气溶胶与云降水物理飞机观测设计

91 飞机观测设计对开展气溶胶、云宏微观物理结构观测和云催化效果物理检验, 获取高时
92 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物理飞机观测一般采用
93 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

94 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（如图 1）；在观测区
 95 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，
 96 开展阶梯式的下降或上升平飞观测，平飞 3~5 分钟（如图 2）。飞机垂直观测目的是为了
 97 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
 98 水的各参数进行持续观测取样，以了解气溶胶和云降水物理结构水平分布特征及气溶胶与云
 99 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
 100 平观测。



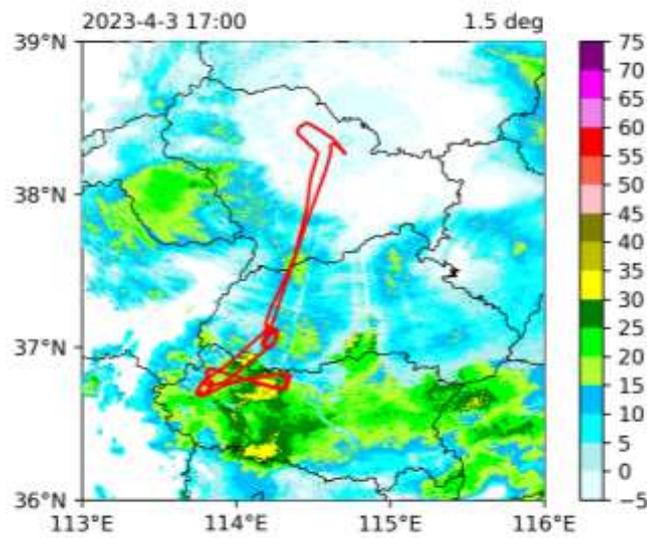
101
 102 图 1 2013 年 9 月 30 日华北重度霾期间气溶胶飞机观测轨迹（董晓波等，2018）
 103 Fig.1 Flight track of aerosols observation during heavy haze days in North China on September 30, 2013 (Dong et
 104 al, 2018)



105
 106 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）
 107 Fig.2 Flight track of stratiform clouds microphysical characteristics observation on May 21, 2018 (Yang et al,
 108 2021)

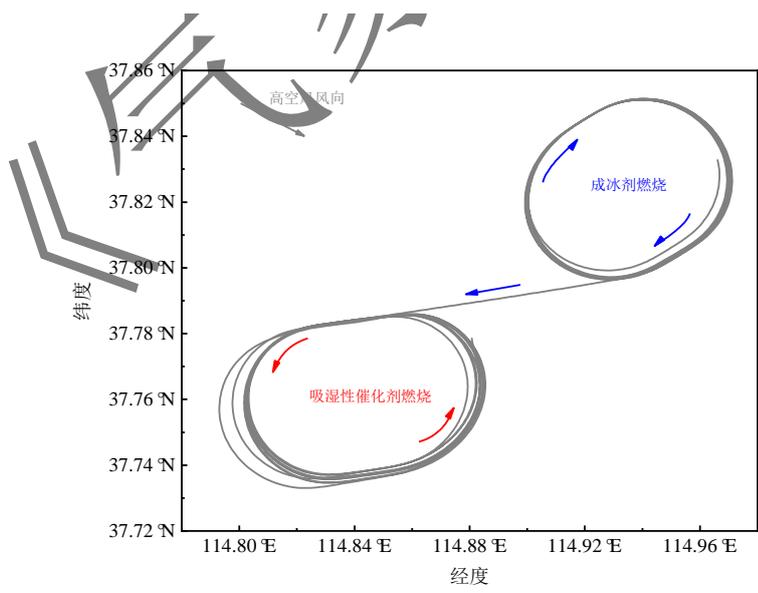
109 以飞机云催化效果物理检验为目的催化作业和观测设计主要采用两种飞行方式，一种方
 110 式是在适合作业的高度层垂直于高空风方向进行 S 型或 8 字型航线飞行充分播撒作业，考
 111 虑催化剂扩散，航线从高空风的下游逐步向上游延伸，当作业完成后，为验证作业效果，可
 112 在同高度垂直于作业航线或到催化作业下游区域飞行并在催化作业以下的高度进行云结构

113 参数的追踪观测（如图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
 114 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
 115 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
 116 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
 117 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、
 118 天气雷达、地面雨滴谱等观测结果验证催化效果（如图4）。



119
 120
 121
 122

图3 2023年4月3日飞机催化作业及效果检验飞行轨迹
 Fig.3 Flight track of aircraft catalytic operation on April 3, 2023



123
 124
 125

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 July 6, 2020 (Dong et al, 2023)

126 3 河北地区气溶胶和云凝结核分布及特征

127 3.1 气溶胶分布及特征

128 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,
129 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
130 而影响降水(董晓波等,2010,2018;孙玉稳等,2012;孙霞等,2012)。河北省从2005年
131 开始,利用机载气溶胶粒子探头 PCASP-100X 常年对河北地区开展气溶胶的飞机观测,得
132 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。

133 气溶胶粒子垂直分布特征。利用河北地区2006~2010年间104架次(孙霞,2013)和
134 2008~2016年间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
135 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
136 度整体成负指数递减分布,近地面气溶胶粒子数浓度最高,平均为 10^3 cm^{-3} 量级。4000m左
137 右气溶胶粒子数浓度约为 150 cm^{-3} ,4000m以上气溶胶粒子数浓度随高度变化不大。不同天
138 气形势下气溶胶的垂直廓线可总结为3种分布形态:指数递减型(ED型, Exponential Decline),
139 该型中气溶胶数浓度近地面500m高度内平均值 2205 cm^{-3} ;近地面出现气溶胶层(SAL型,
140 Surface Aerosol Layer),该型中地面至2km高度内气溶胶数浓度平均值为 2237 cm^{-3} ;边界
141 层高度出现气溶胶层(BAL型, Boundary Aerosol Layer),该型中气溶胶数浓度平均值为
142 1596 cm^{-3} ;三种分布形势所占比例分别为52.9%,29.8%和17.3%。SAL型和BAL型数浓度
143 谱分布均呈现单峰型,峰值直径分别在 $0.28\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.16\text{ }\mu\text{m}$ 左右。同时通过大量飞机观测数
144 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
145 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。

146 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
147 度呈线性递减,6000m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
148 于春季,近地层气溶胶粒子平均体积直径约为 $1.2\text{ }\mu\text{m}$,6000m左右气溶胶粒子平均体积直
149 径约为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 。秋季气溶胶粒子数浓度在1200m以下存在边界层累积,边界层以上气溶胶
150 粒子数浓度呈近似线性递减。春、夏、秋季的气溶胶标高平均值分别为1.0、1.6、1.0km;
151 风速大小与近地面气溶胶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
152 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
153 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,
154 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数浓度高,二次气溶胶粒径较小,

155 且大多对应静稳天气，造成污染物浓度升高。

156 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
157 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
158 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
159 数浓度高于晴好天 1 个量级，达到 10^4 cm^{-3} ，细粒子有效半径在 $0.05 \sim 0.35 \mu\text{m}$ 之间，粗粒
160 子有效直径在 $0.8 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 之间，细粒子数密度明显大于粗粒子。沙尘天气下 $0.4 \sim 3.0 \mu\text{m}$
161 沙尘层的数浓度是沙尘层下数浓度的 $1.3 \sim 4.2$ 倍，是沙尘层上数浓度的 $1.3 \sim 4.1$ 倍，而沙尘
162 过程对不同高度气溶胶数浓度谱型影响较小。晴好天气下，气溶胶粒子数浓度基本上在
163 10^3 cm^{-3} 以下，以细粒子为主，粒子平均直径小于 $0.19 \mu\text{m}$ 。（董晓波等，2010，2023；孙霞
164 等，2011）

165 3.2 云凝结核分布及特征

166 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
167 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
168 用研究中的一个重要环节。2005 年，2009 年，2013 年对河北地区开展的 CCN 飞机观测表
169 明，该地区 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
170 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
171 市上空的 CCN 数浓度（过饱和度为 0.3% ）最高数浓度值可达到 5889 cm^{-3} 以上，受污染的
172 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
173 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
174 和 3.39 倍。该地区 CCN 具有明显的日变化，从清晨 6 时以后数浓度开始上升，上午至中午
175 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
176 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
177 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
178 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
179 等，2018，2023）

180 4 河北地区云微物理特征

181 4.1 层状云微物理特征

182 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
183 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

184 由多个云（雨）带组成（周毓荃，2004）。

185 对河北地区 2006~2018 年秋季层状云特征的飞机观测结果表明（孙玉稳等，2015a，
186 b，2017；杨文霞等，2018），河北地区层状云季节分布特征较为明显。春秋层状云发展
187 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
188 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
189 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} ，
190 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 g/m^3 。冰
191 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
192 片状或枝状为主， $-5 \text{ }^\circ\text{C}$ 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
193 弱。云水含量峰值区的粒子主要以直径 $10\sim 50 \mu\text{m}$ 的云滴为主，伴随着少量聚合状冰晶。 $0 \text{ }^\circ\text{C}$
194 层区域的过冷水含量约在 0.05 g/m^3 左右，冰晶粒子形态主要以聚合状、淞附状及霰粒子为
195 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。 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层以上的冰晶粒子数浓度
196 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
197 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
198 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
199 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
200 区小。

201 对河北地区 2017~2022 年冬季降雪层状云特征观测结果表明（Dong et al, 2020, 2021；
202 刘伟等，2021；付娇等，2023；王晓青等，2023；闫非等，2023；赵利伟等，2023），冬季
203 降水性层状云多为混合相态云，云中普遍存在过冷水层。与春秋降水性层状云系相比，冬季
204 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 ，普遍低于春秋降
205 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
206 冷水含量分布在 $0.1\sim 0.38 \text{ g/m}^3$ 之间，不同天气过程的云中过冷水含量差距较大。 $2\sim 50 \mu\text{m}$
207 的云粒子数浓度最大值在 $100\sim 1240 \text{ cm}^{-3}$ 。大于 $100 \mu\text{m}$ 的冰晶或降水粒子数浓度普遍在
208 $0.2\sim 23 \text{ L}^{-1}$ 之间，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
209 温度和相对湿度相关。

210 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
211 约为 3456 m ，温度 $2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ，云滴粒子谱较窄，粒子直径范围为 $3\sim 27 \mu\text{m}$ ，粒子数浓度在直
212 径 $10 \mu\text{m}$ 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
213 峰值在不同温度所对应的粒子直径分别为： $21 \mu\text{m}$ （温度 $3\sim 4 \text{ }^\circ\text{C}$ ）， $24 \mu\text{m}$ （温度 $5\sim 6 \text{ }^\circ\text{C}$ ），

214 27 μm (温度 6~7 $^{\circ}\text{C}$) , 16 μm (云底, 温度 8.2 $^{\circ}\text{C}$) ; 不同温度下雨滴粒子最大直径分别
215 为: 1050 μm (温度 3~4 $^{\circ}\text{C}$) , 1350 μm (温度 4~5 $^{\circ}\text{C}$) , 2100 μm (温度 6~7 $^{\circ}\text{C}$) , 2250
216 μm (云底, 温度 8.2 $^{\circ}\text{C}$) 。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
217 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
218 蒸发的影响。

219 4.2 积层混合云微物理特征

220 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,
221 常出现在河北地区的春末夏初。对河北典型积层混合云的飞机观测表明(亓鹏等, 2019; 朱
222 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),
223 积层混合云由冷云和暖云组成, 部分云系存在薄的干层。层积混合云中大部分过冷水位于云
224 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
225 存在高浓度冰晶粒子, 大于 100 μm 的冰晶粒子数浓度最大值可达到 85 L^{-1} , 冰晶粒子形态
226 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
227 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,
228 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。
229 由于聚并增长形成的冰晶粒子密度低, 下落速度小, 穿过 0 $^{\circ}\text{C}$ 层时间更长, 出现大量半融化
230 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 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ -10 $^{\circ}\text{C}$ 层之间,
231 垂直和水平尺度约 2 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
232 浓度比周围云区高一个量级, 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
233 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。

234 5 飞机增雨效果物理检验

235 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。
236 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
237 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
238 据(王飞等, 2022)。通过 2018 年、2019 年、2020 年、2021 年四次对河北地区过冷水云
239 开展飞机观测并进行 AgI 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
240 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
241 相关降水的影响, 获得了飞机云催化效果的物理检验证据。

242 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
243 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。
244 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
245 子数浓度平均为 300 cm^{-3} ，过冷水含量平均为 0.1 g/m^3 ，云内直径大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的冰晶粒子数
246 浓度很小，均低于 1 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
247 态存在，云滴数浓度平均为 159 cm^{-3} ，而冰晶粒子数浓度平均为 7.7 L^{-1} ，具有较好的云催化
248 潜力。

249 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
250 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
251 的云内，云滴粒子数浓度急剧降低到 10 cm^{-3} 以下，甚至达到0；冰晶粒子数浓度显著增加，
252 从0可以增长到数百个每升；同时，液态水含量明显降低，冰水含量显著增加，机载云粒子
253 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,
254 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
255 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
256 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
257 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
258 大于 $100\text{ }\mu\text{m}$ ，数浓度高于 140 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
259 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
260 生成、加强到最后消散（Dong et al, 2020, 2021）。

261 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
262 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
263 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 mm 的短期弱降雨，
264 降水粒子直径小于 1 mm ，下落末速度小于 2.5 m/s 。从开始催化到地面观测到弱降水，大约
265 50分钟，降水持续时间约 $6\sim 9$ 分钟，进一步证实了云催化形成降水的有效性（Dong et al,
266 2021）。

267 6 结论与思考

268 本文总结了近20年来在河北地区的开展的气溶胶和云降水物理飞机观测研究成果，总
269 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
270 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

271 测和飞机催化作业提供参考。

272 (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
273 节变化、污染与晴好天气变化的统计特征。近地面气溶胶数浓度与风速大小有很好的负相关
274 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”
275 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
276 秋季气溶胶粒子数浓度变化相近, 春季气溶胶数浓度略低于秋季, 而春季气溶胶粒子平均体
277 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。

278 (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
279 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
280 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
281 载云滴粒子谱探头、二维粒子图像探头、积冰传感器和热线含水量仪综合判断, 可以得到过
282 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
283 等参量有一定关系, 当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
284 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
285 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
286 冷水区。

287 (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,
288 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
289 作业后几分钟碘化银就可以发生核化作用, 20 分钟后增长为大粒子可被雷达或者卫星观测
290 到, 催化影响持续时间一般在 1-2.5 个小时。对于以过冷水为主的非降水性层状云进行云催
291 化后, 云内形成半径在 $100\ \mu\text{m}$ 以上的降水质点, 并且浓度足以产生 10 dBZ 的雷达反射率
292 因子时, 地面可能会产生降水。当过冷水含量大于 $0.1\ \text{g/m}^3$ 时, 一次性点燃 8 根左右的冷云
293 焰条(碘化银含量 18 克/根)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
294 化作业使用 36 根冷云焰条也远不会产生过量催化的效果。

295 (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
296 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
297 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
298 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
299 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
300 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

301 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
302 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控水平,构建
303 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
304 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
305 应用水平和价值。

306 注:本文部分数据来源于“中国气象局邢台大气环境野外科学试验基地”。

307 参考文献

- 308 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):
309 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
310 China in clear day[J]. Meteor Environ Sci, 33(1): 48-51 (in Chinese).
- 311 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
312 measurement study of atmospheric aerosol vertical distribution in central and southern of Hebei[D]. Nanjing: Nanjing University of
313 Information Science & Technology (in Chinese). (查阅网上资料,未找到本条文献信息,请确认)
- 314 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.
315 Dong X B, Yang J, Yang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics in the vertical direction of atmospheric aerosol particles of
316 North China during the heavy haze process background[J]. Sci Technol Eng, 18(2): 204-211 (in Chinese).
- 317 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,
318 Mai R, Wang H L, et al, 2021. An interaction study between atmospheric pollutants and boundary layer during a dust storm weather
319 in Shijiazhuang[J]. China Environ Sci, 41(3): 1024-1033 (in Chinese).
- 320 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
321 X B, Mai R, Li J X, 2023. Aircraft measurements of aerosol and CCN for airborne glaciogenic and hygroscopic seeding agents for
322 cold and warm cloud seeding[J]. Meteor Mon, 49(8): 985-994 (in Chinese).
- 323 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
324 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
325 the variable tendency of the natural precipitation and its physical cause of formation in Hebei province area[C]//Collection of
326 Discussion Papers from the Sub session of the 2006 Annual Conference of the Chinese Meteorological Society on Artificial Weather
327 Modification Operations Technology. Chengdu: Chinese Meteorological Society (in Chinese). (查阅网上资料,未找到母
328 体信息对应的英文翻译,请确认)
- 329 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):
330 64-70. Fu J, Zhang D, Dong X B, et al, 2023. Comparative analysis of microphysical structure of snowfall cloud system in central
331 and southern Hebei based on aircraft observation[J]. Desert Oasis Meteor, 17(5): 64-70 (in Chinese).
- 332 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,
333 Sun Y W, Xie X Y, et al, 2021. Analysis of the structure characteristics and seeding possibility of stratiform clouds with low cold
334 front in Hebei Province in winter[J]. J Meteor Environ, 37(3), 110-116 (in Chinese).
- 335 元鹏,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
336 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
337 convection in eastern taihang mountain of North China: characteristics of embedded convection and melting layer structure[J]. Chin
338 J Atmos Sci, 43(6): 1365-1384 (in Chinese).
- 339 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.
340 Qin Y S, Cai M, Liu S X, et al, 2017. A study on macro and micro physical structures of convective-stratiform mixed clouds
341 associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China[J]. Acta Meteor Sin, 75(5): 835-849 (in Chinese).
- 342 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
343 condensation nuclei in North China[J]. Acta Meteor Sin, 65(4): 644-652 (in Chinese).
- 344 孙霞,银燕,孙玉稳,等,2011.石家庄地区春季晴、霾天气溶胶观测研究[J].中国环境科学,31(5):705-713. Sun X, Yin Y, Sun Y

345 W, et al, 2011. An observational study of aerosol particles using aircraft over Shijiazhuang Area in clean and hazy days during
346 spring[J]. *China Environ Sci*, 31(5): 705-713 (in Chinese).

347 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
348 Y, Han Y, et al, 2012. Distribution characteristics of cloud particles and cloud condensation nuclei during haze/fog events in
349 Shijiazhuang[J]. *China Environ Sci*, 32(7): 1165-1170 (in Chinese).

350 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
351 of aerosol spatial and temporal distribution and cloud microstructure over the North China Plain. Nanjing: Nanjing University of
352 Information Science and Technology (in Chinese).

353 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):
354 1736-1743. Sun Y W, Sun X, Yin Y, et al, 2012. Aerosol distribution in North China Plain under different weather conditions[J].
355 *China Environ Sci*, 32(10): 1736-1743 (in Chinese).

356 孙玉稳, 孙霞, 刘伟, 等, 2015a. 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,
357 Liu W, et al, 2015. Study of integrated observation on aircraft artificial operation during a sleet event[J]. *Meteor Mon*, 41(11):
358 1341-1355 (in Chinese).

359 孙玉稳, 李宝东, 刘伟, 等, 2015b. 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,
360 et al, 2015b. Study on physical structure of Hebei Stratiform clouds in autumn and its Seedability condition[J]. *Plateau Meteor*, 34(1):
361 237-250 (in Chinese).

362 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
363 al, 2017. Observation and study of macro and micro response in cold cloud catalysis[J]. *Plateau Meteor*, 36(5): 1290-1303 (in
364 Chinese).

365 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*,
366 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
367 front cloud system at Mountain Taihang based on aircraft observations[J]. *Plateau Meteor*, 38(5): 971-982 (in Chinese).

368 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
369 al, 2022. Advances of quantitative evaluation studies of artificial precipitation enhancement in China[J]. *Meteor Mon*, 48(8):
370 945-962 (in Chinese).

371 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.
372 Wang X Q, Dong X B, Yan F, et al, 2023. A comprehensive observational study of micro-physical evolution characteristics of a
373 snowfall cloud system under winter cold front in Hebei Province[J]. *Meteor Sci Technol*, 51(2): 233-244 (in Chinese).

374 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
375 Y, Niu S J, Lei H C, 2017. An examination of the microphysical responses to aircraft seeding of stratiform clouds with embedded
376 convection using the joint observational data of three aircrafts[J]. *Trans Atmos Sci*, 40(5): 686-696 (in Chinese).

377 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-
378 1465. Yan F, Yang J F, Dong X B, et al, 2023. Airborne observations of the cloud vertical microphysical characteristics of warm
379 conveyor belt within a winter mesoscale snowstorm[J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(5): 1451-1465 (in Chinese).

380 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,
381 Lei H C, et al, 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang
382 mountains[J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(1): 88-106 (in Chinese).

383 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
384 X, Dong X B, et al, 2018. A study on the microphysical structure and the correlation of microphysical parameters of the precipitation
385 stratiform cloud[J]. *Trans Atmos Sci*, 41(4): 525-532 (in Chinese).

386 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
387 Y, Shi L X, et al, 2012. An observational study of aerosol property under typical polluted weather condition[J]. *Plateau Meteor*,
388 31(5): 1432-1438 (in Chinese).

389 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,
390 Sun Y W, Zhang J N, et al, 2023. Microphysical characteristics of cloud system in winter based on aircraft detection[J]. *Desert Oasis
391 Meteor*, 17(3): 66-70 (in Chinese).

392 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
393 cloud multi-scale structures and artificial rainfall increase in Henan Province[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology (in
394 Chinese). (查阅网上资料, 未找到出版者对应的英文翻译, 请确认)

395 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

396 X L, 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China:
397 Aircraft measurements[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2): 366-389 (in Chinese).

398 Albrecht B A, 1989. Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness[J]. *Science*, 245(4923): 1227-1230, doi:
399 10.1126/science.245.4923.1227.

400 Andreae M O, Rosenfeld D, 2008. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols[J].
401 *Earth-Science Reviews*, 89(1-2): 13-41, doi: 10.1016/j.earscirev.2008.03.001.

402 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*
403 *Lett*, 38(3): L03809, doi: 10.1029/2010GL046047.

404 Dong X B, Zhao C F, Yang Y, et al, 2020. Distinct change of supercooled liquid cloud properties by aerosols from an aircraft-based
405 seeding experiment[J]. *Earth Space Sci*, 7(8): e2020EA001196, doi: 10.1029/2020EA001196.

406 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
407 over Shijiazhuang, China[J]. *Atmos Res*, 262: 105766, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105766.

408 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*
409 *Environ Sci*, 10: 855813.

410 Feingold G, Eberhard W L, Veron D E, et al, 2003. First measurements of the Twomey indirect effect using ground-based remote
411 sensors[J]. *Geophys Res Lett*, 30(6): 1287.

412 Flossmann A I, Manton M, Abshaev A, et al, 2019. Review of advances in precipitation enhancement research[J]. *Bull Amer Meteor Soc*,
413 100(8): 1465-1480.

414 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):
415 L17105, doi: 10.1029/2004GL019928.

416 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,
417 doi: 10.1002/2015RG000500.

418 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
419 climate (EAST-AIR_{CPC})[J]. *J Geophys Res Atmos*, 124(23): 13026-13054, doi: 10.1029/2019JD030758.

420 Lohmann U, Feichter J, 2005. Global indirect aerosol effects: a review[J]. *Atmos Chem Phys*, 5(3): 715-737, doi:
421 10.5194/acp-5-715-2005.

422 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
423 droplet effective radius relationship at SGP site[J]. *Atmos Environ*, 164: 139-146, doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.06.002.

424 Twomey S, 1977. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds[J]. *J Atmos Sci*, 34(7): 1149-1152, doi:
425 10.1175/1520-0469.

426 Wang F, Guo J P, Wu Y R, et al, 2014. Satellite observed aerosol-induced variability in warm cloud properties under different
427 meteorological conditions over eastern China[J]. *Atmos Environ*, 84: 122-132, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.11.018.

428 Yang Y, Zhao C F, Dong X B, et al, 2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical properties of
429 shallow cumulus cloud using aircraft observations[J]. *Atmos Res*, 221: 27-33, doi: 10.1016/j.atmosres.2019.01.027.

430 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,
431 China[J]. *Front Environ Sci*, 10: 865966, doi: 10.3389/fenvs.2022.865966.

432 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
433 by CAM5 at ARM sites[J]. *Geophys Res Lett*, 39(8): L08806, doi: 10.1029/2012GL051213.

434 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*
435 *Rev*, 7(3): 492-495, doi: 10.1093/nsr/nwz184.