

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).

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^{*}

董晓波^{1,2} 麦榕² 李军霞³

1 河北省气象与生态环境重点实验室, 石家庄 050020

2 河北省人工影响天气中心, 石家庄 050020

3 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

提 要: 为研究目前人工影响天气广泛使用的两类催化剂(成冰剂和吸湿性催化剂)在自然大气中燃烧后对气溶胶的影响, 及其初生粒子的核化特性, 利用搭载气溶胶和云凝结核(CCN)观测设备的增雨飞机设计开展了一次晴空成冰剂、吸湿性催化剂燃烧的尝试性观测试验。结果发现, 机载探测设备由于观测尺度范围受限未能检测到成冰剂燃烧前后气溶胶和 CCN 的微小物理变化; 吸湿性催化剂燃烧后, 观测到气溶胶和 CCN(0.3% 过饱和度)粒子数浓度明显增加, 分别达到 1772.4 cm^{-3} 和 1809.01 cm^{-3} , 是燃烧前的 4 倍以上, 粒子谱峰值是燃烧前的 4.8 倍; 播撒产生的气溶胶粒子尺度范围在 $0.5 \mu\text{m}$ 以下, 峰值直径从播撒前的 $0.17 \mu\text{m}$ 减小到播撒后的 $0.14 \mu\text{m}$ 。文章基于观测事实对焰条催化燃烧后成核率以及新型催化方式进行了探讨, 试验方法可为更深入研究催化剂以及各种复合燃料燃烧后产生粒子的物理和化学特性提供参考, 研究成果可为云催化模式特别是暖云催化模型的建立提供客观的初始场数据支持。

关键词: 飞机观测, 气溶胶, 云凝结核, 成冰剂, 吸湿性催化剂

中图分类号: P481, P414

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050601

Aircraft Measurements of Aerosol and CCN for Airborne Glaciogenic and Hygroscopic Seeding Agents for Cold and Warm Cloud Seeding

DONG Xiaobo^{1,2} MAI Rong² LI Junxia³

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

2 Hebei Weather Modification Center, Shijiazhuang 050020

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

Abstract: In order to study the influence of two kinds of cloud seeding agents, glaciogenic agents and hygroscopic agents, which are widely used in weather modification, on microphysical characteristics of aerosol particles produced by combustion in natural atmosphere, an experimental study on the combustion of seeding agents for cold and warm cloud seeding in clear sky was carried out based on a weather modification aircraft equipped with aerosol and cloud condensation nuclei (CCN) observation equipment. The results show that the airborne detection equipment could not get the microphysical changes of aerosol particles and CCN before and after the combustion of glaciogenic agent due to the limited observation scale of the aerosol equipment. However, after the combustion of hygroscopic agents, we found that the aerosol and CCN

^{*} 河北省省级科技计划(20375402D)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J038)和国家重点研发计划(2018YFC1507900)共同资助

2022 年 11 月 15 日收稿; 2023 年 5 月 15 日收修定稿

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

通讯作者: 李军霞, 主要从事云降水物理与人工影响天气研究. E-mail: ljx22258@126.com

particle number concentrations increased significantly, reaching 1772.4 cm^{-3} and 1809.01 cm^{-3} respectively, which were more than 4 times of those values before the hygroscopic agents combustion. Most of the aerosol particles' sizes were below $0.5 \mu\text{m}$ with peak diameters decreasing from $0.17 \mu\text{m}$ before seeding to $0.14 \mu\text{m}$ after seeding, and the peak value of particle spectrum was 4.8 times of that before combustion, so it had the significant characteristics of forming CCN. Based on the observation results, the nucleation rate after flame catalytic combustion and the new catalytic ways are discussed. The method used in this aircraft experiment could provide scientific references for further studying the physical and chemical characteristics of the particles generated by combustion of cloud seeding agents. Furthermore, the research results could provide objective initial field data support for the establishment of cloud catalytic models, especially for warm cloud catalytic models.

Key words: aircraft observation, aerosol, cloud condensation nuclei (CCN), glaciogenic agent, hygroscopic agent

引 言

人工影响天气是在认识云降水自然规律基础上,施加人为影响,使得局部天气过程朝着有利于人类预期的方向发展,实现趋利避害的科学活动。目前最广泛应用的人工影响天气方法是运用飞机、高炮、火箭等运载工具将催化剂送入云中适当位置进行播撒,以达到增加降水、防雹或减弱云和降水的目的(段婧等,2017;毛节泰和郑国光,2006;董晓波等,2020)。目前国际上人工影响天气作业催化剂主要有冰核、致冷剂和吸湿性催化剂三大类。人工冰核和致冷剂主要用于冷云催化,吸湿性催化剂主要用于暖云和混合云中的暖区催化。冷云催化的主要目的是在云中通过引入人工冰核(如碘化银等)或通过播撒制冷剂(如干冰、液氮等)生成冰晶,启动或加速贝吉龙过程。已经有很多研究发现将碘化银释放到过冷云中,可使过冷液滴转化为冰晶和降水粒子下落的物理现象(Rosenfeld et al, 2005; Dong et al, 2020; 2021; 2022; Wang et al, 2021)。碘化银是迄今应用最多的人工冰核物质,它具有成冰阈值高及成核率高的优点,在冷云催化中得到广泛应用(楼小凤等, 2021; 段婧等, 2020; 史月琴等, 2021)。Blair et al(1973)利用风洞云室成雾,发现该环境下不同燃烧材料的碘化银成核效率与温度密切相关,而实际云内多变的环境给定量测量碘化银的成核效率增加了不确定因素。暖云催化技术主要以吸湿性催化为主,主要目的是拓宽云滴谱,启动或加速碰并过程。传统暖云催化方法是向云中播撒吸湿性物

质,如氯化钠、氯化钙、尿素等,但是播撒这些物质携带量大、对飞机有腐蚀,后来更多的是采用与冷云催化剂类似的方法,通过燃烧将吸湿性物质播撒入云(武玉忠和陈光学,2004;汪晓滨等,2005)。在南非、墨西哥、泰国等地开展的吸湿性焰条催化试验,得到了暖云催化可使降水增强的统计结果(苏正军等,2009)。催化剂通过燃烧后的成核率和粒子尺度对于催化效果来说非常关键,碘化银焰剂燃烧产生催化剂气溶胶时,会发生布朗碰并过程,从燃烧生成单个 80 nm 的粒子聚并成平均尺度为 $0.15 \mu\text{m}$ 、最大达 $1 \mu\text{m}$ 的粒子,大部分粒子尺度范围在 $0.005 \sim 0.3 \mu\text{m}$ (楼小凤等,2021),而暖云焰剂燃烧后一般能够形成 $0.5 \mu\text{m}$ 的粒子(苏正军等,2009;武玉忠和陈光学,2004;鄢大雄,2008)。

一般情况下,燃烧类催化剂的成核率特性是在云室内进行试验检测的(姚展予,2006;杨绍忠和陈跃,2018;苏正军等,2019;孔君等,2016),催化效果也多以模式模拟为主(楼小凤等,2019;刘佩等,2019)。游来光等(2000)曾选用不同碘化银含量的焰剂附以外加气流进行成核率检测,指出外加气流速度对于碘化银含量较高和较低的焰剂成核率有很大影响。杨绍忠(2006)指出催化剂动态检测的必要性。飞机携带催化剂焰剂燃烧时,热量和空气交换的影响会改变燃烧后形成的催化剂气溶胶粒子的大小和数浓度,从而影响催化剂的成核率,进而影响催化效果。那么实际的飞机人工增雨(雪)作业中,在降水云系中或者自然大气中催化剂燃烧后会对气溶胶有什么影响?进而对于凝结核或者冰核有什么影响?类似的催化试验还鲜有报道。基于这些问题,

本研究利用河北省人工影响天气中心飞机作业平台,开展了一次空中成冰剂和吸湿性催化剂燃烧的观测试验,并利用机载被动腔气溶胶分光仪(PCASP-100X)和云凝结核计数器(CCNC)对成冰剂和吸湿性催化剂燃烧对应的作业区域气团进行回穿直接观测,详细记录了催化剂燃烧前后气溶胶及云凝结核(CCN)微物理特性的变化,对两类催化剂燃烧后对气溶胶及其成核率的影响进行了详细分析。

1 试验概况

1.1 试验区域及天气背景

飞行试验日期为 2020 年 7 月 6 日,飞行垂直探测和成冰剂、吸湿性催化剂燃烧试验均在同一试验区(图 1)。试验区位于石家庄赵县地区,该区域以农业为主,区域内大气污染程度较轻。

试验日,飞行区域天气晴朗,无云、无雾霾,飞机起降机场温度为 30°C ,风向为西风,风速为 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,能见度大于 10 km 。结合欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料天气形势图(图 2)可以看出,试验区在 500 hPa 和 700 hPa 位于槽后西北气流控

制中, 700 hPa 湿度低于 60% ,整层大气湿度较小。

1.2 观测设备和催化剂

本次试验使用河北省人工影响天气中心的空中国王 350 增雨飞机。试验主要用到的机载探测设备有:总温探头、露点仪、被动腔气溶胶分光仪(PCASP-100X)、云凝结核计数器(CCNC)(详见表 1)。

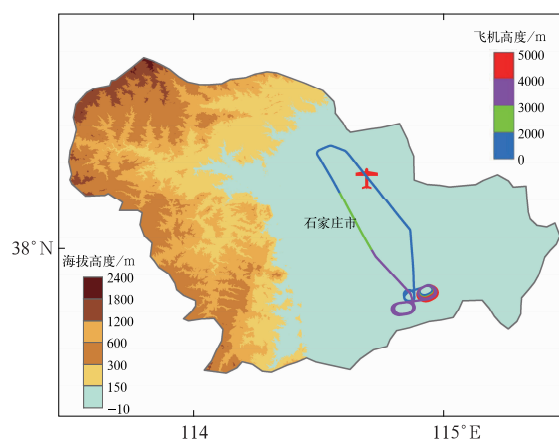
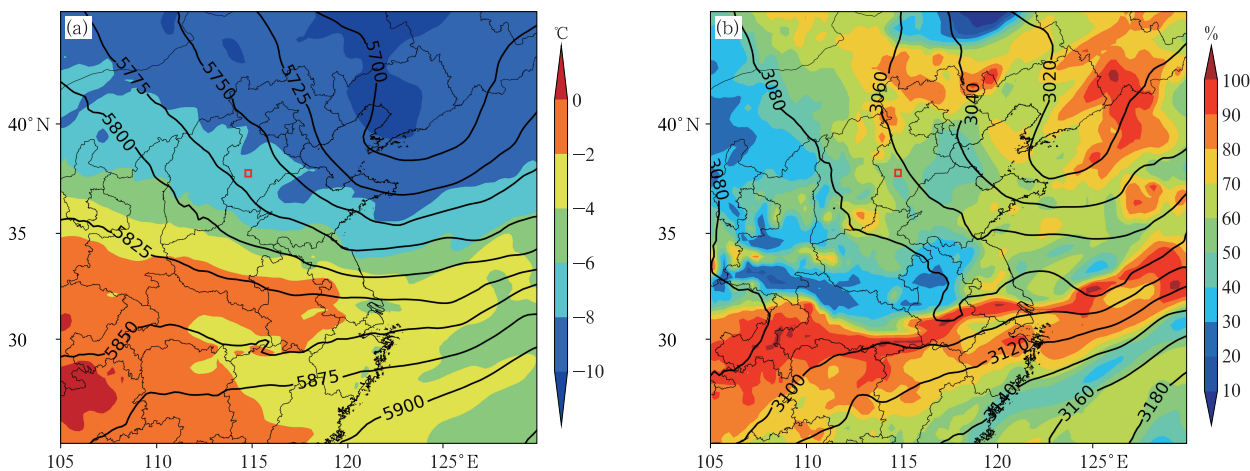


图 1 2020 年 7 月 6 日试验飞行
航线及飞行区域

Fig. 1 The experiment area and flight
track of the experiment on 6 July 2020



注:红框为本次试验区位置。

图 2 2020 年 7 月 6 日 10:00(世界时,下同)欧洲中期天气预报中心 ERA5 再分析资料

(a) 500 hPa 高度(等值线,单位: gpm)和温度(填色),

(b) 700 hPa 高度(等值线,单位: gpm)和相对湿度(填色)分布

Fig. 2 ERA5 reanalysis data from ECMWF at 10:00 UTC 6 July 2020

(a) temperature (colored) at 500 hPa (contour, unit: gpm),

(b) relative humidity (colored) at 700 hPa (contour, unit: gpm)

表 1 本试验使用的机载探测设备

Table 1 List of the airborne detection equipment used in this experiment		
仪器名称	探测要素	探测范围
被动腔气溶胶分光仪(PCASP-100X)	用于测量气溶胶粒子数浓度、尺度谱等	0.1~3.0 μm
云凝结核计数器(CCNC)	用于测量云凝结核粒子浓度	0.75~10 μm(粒子活化后)
Remote 总温探头	用于观测大气环境温度	-54~71℃
露点仪 Edgtech 137 Vigilant	用于观测大气露点温度,进而计算大气相对湿度	-40~60℃

试验使用的成冰剂和吸湿性催化剂分别为机载冷云焰条(FT-61L)和暖云焰条(FT-61N)。两款焰条均适用于空中国王飞机安装的播撒架,弹长为335 mm,质量为1.25 kg,燃烧时间:(300 s±30 s)/支。其中,冷云焰条(成冰剂)的配方主要物质有:高氯酸铵、碘化银、铝粉、酚醛树脂和碘化钾。暖云焰条(吸湿性催化剂)的配方主要物质有:高氯酸钾、氯化钙、氯化钾、酚醛树脂和镁铝合金粉。

1.3 试验飞行方案

飞机于2020年7月6日09:43(世界时,下同)从机场起飞后,直接飞往石家庄赵县试验区,到达试验区后,先下降到600 m,然后盘旋上升至4900 m,做垂直探测飞行,获取自然大气气溶胶垂直分布特征。由于受到空域限制,飞机下降到3600 m开展催化剂燃烧试验,以半径10 km绕圈进行催化剂燃烧和探测,飞行一圈约需要3 min。

(1)成冰剂(碘化银)燃烧试验:飞机顺时针绕圈飞行约20 min,一次点燃8根碘化银焰条,边播撒边探测,在3600 m高度一共飞行约6圈。

(2)吸湿性催化剂燃烧试验:完成成冰剂燃烧试验和探测后,根据3600 m高度层的高空风向,为避开试验(1)影响区域,选择飞往试验(1)西南方向,在同一高度层绕圈飞行,同时点燃6根吸湿性催化剂进行燃烧试验和探测,飞行11圈约33 min(图3)。

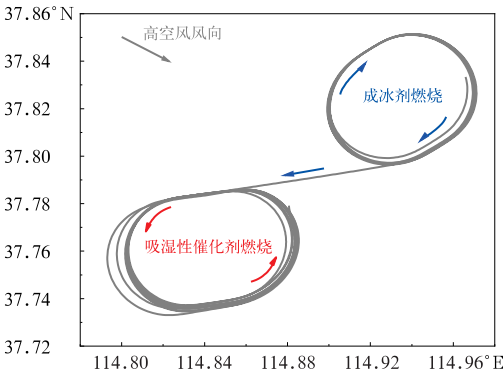


图3 2020年7月6日10:33—11:28时段内3600 m高度层开展的催化剂燃烧试验时飞行轨迹

Fig. 3 The flight track of the aircraft during the two catalytic burning tests from 10:33 UTC to 11:28 UTC 6 July 2020

一次性大剂量点燃催化剂的目的是为了获取高浓度的燃烧后粒子。采取边播撒边绕圈观测的飞行方法,目的是为了在最短的时间内让飞机飞回到催化剂燃烧后的粒子气团内,采集燃烧后的粒子样本。

1.4 数据处理

本次试验飞机观测主要获取试验区域经纬度、飞行高度、大气温度、相对湿度、气溶胶粒子数浓度和粒子谱分布、CCN粒子数浓度等数据(表2)。为

表 2 本试验机载探测设备数据采集情况

Table 2 Data acquisition of airborne detection in this experiment						
试验类型	时间/UTC	飞行高度/m	飞行区域	获取数据	数据来源	数据范围
成冰剂 燃烧 试验	10:33:28— 10:53:28	3677	37.833°N、 114.966°E	温度	Remote 总温探头	5.1~5.7℃
				相对湿度	露点仪 Edgtech 137 Vigilant	47.9%~65.9%
				气溶胶粒子数浓度、谱分布	PCASP-100X	137.8~599.81 cm ⁻³
				云凝结核数浓度	CCNC	177.26~625.3 cm ⁻³
吸湿性 催化剂 燃烧 试验	10:55:08— 11:28:37	3677	37.75°N、 114.805°E	温度	Remote 总温探头	5.0~6.4℃
				相对湿度	露点仪 Edgtech 137 Vigilant	50.3%~65.6%
				气溶胶粒子数浓度、谱分布	PCASP-100X	246.03~1772.41 cm ⁻³
				云凝结核数浓度	CCNC	50.26~1809.01 cm ⁻³

了消除大气气压变化对采样气流的影响,根据大气环境气压的变化对 PCASP-100X 的采样体积进行了实时订正。同时,为了剔除噪声的影响,气溶胶数据分析时去除了第 1 个通道的数据(李军霞等, 2014;董晓波等,2021),数据质量控制后观测到的气溶胶粒子尺度范围为 $0.11\sim 3.00\ \mu\text{m}$ 。CCNC 用于飞机观测时,当飞机上升或下降,外界大气压的快速变化会造成 CCNC 内部压力不稳定,而压力稳定之前 CCN 观测的数据不可靠。因此为了避免外界气压变化所带来的影响,在 CCNC 进气口处安装了常压控制器,开展催化剂燃烧试验阶段 CCNC 设置的采样气压值为 500 hPa,同时利用大气环境气压与 CCNC 采样气压对 CCN 粒子数浓度进行了二次订正。另外,在飞行观测前对 CCNC 过饱和度进行了校正,本次观测过饱和度(SS)设置为 0.3%(Wang et al, 2018; Rose et al, 2008)。从华北地区多地开展的近地面气溶胶分粒径活化特性观测结果来看,在 0.3% 过饱和度下,可观测到粒径 50 nm 以上的粒子开始活化为 CCN(Deng et al, 2011; Li Y N et al, 2017)。

2 试验结果

2.1 试验区内大气本底气溶胶与 CCN 垂直分布特征

图 4 显示了温度、相对湿度、气溶胶粒子数浓度、CCN 粒子数浓度以及气溶胶粒子平均直径的垂直廓线。飞机从 600 m 到 4900 m 盘旋上升,整个飞行过程中,温度范围为 -2.9°C (4900 m) $\sim 28.7^{\circ}\text{C}$ (600 m), 0°C 层位于 4550 m。由温度垂直廓线图可以看到在 1400 m 和 2000 m 有两个较弱的逆温层。3000 m 以下相对湿度在 20% $\sim$ 55%, 3000 m 以上逐渐增加,最大值为 65%。

气溶胶与 CCN 粒子数浓度的变化趋势一致。气溶胶粒子数浓度平均值为 $315\ \text{cm}^{-3}$, CCN 粒子数浓度平均值为 $456\ \text{cm}^{-3}$, 低层的 CCN 粒子数浓度高于 PCASP-100X 气溶胶粒子数浓度。这是因为 PCASP-100X 观测到的仅仅是积聚模态的气溶胶粒子($0.1\sim 3.0\ \mu\text{m}$),并不是大气中的所有的气溶胶粒子。并且为了剔除噪声的影响,本文在气溶胶数据分析时去除了第 1 个通道的数据,质量控制后观测到的气溶胶粒子为尺度范围 $0.11\sim 3.00\ \mu\text{m}$ 的气

溶胶粒子。CCNC 记录的是大气中能够活化为 CCN 的粒子数,背景气溶胶是指大气中粒子的总数,而不仅仅是积聚模态($0.1\sim 3.0\ \mu\text{m}$)的气溶胶粒子。根据观测经验,在较高的过饱和度下(SS 为 0.2% 以上),会有大量小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的小粒子和大于 $3.0\ \mu\text{m}$ 的大粒子可以活化为 CCN,而这部分小粒子超出了 PCASP-100X 的观测范围,无法被记录到,因此导致 CCN 粒子数浓度比 PCASP-100X 观测到的气溶胶粒子数浓度大(Zhang et al, 2014; Li J X et al, 2015; 2017; Li Y N et al, 2017; Deng et al, 2011; Cai et al, 2022; 蔡兆鑫等, 2021)。在西北气流控制下,地面气溶胶不利于垂直向上输送,虽然 2500 m 以下的气溶胶和 CCN 粒子数浓度出现波动,但 2500 m 以上气溶胶和 CCN 粒子数浓度变化幅度不大,本次两类催化剂燃烧试验的高度范围为 3600 m,因此 2500 m 以上高空气溶胶粒子数浓度可视作当天的大气背景气溶胶粒子数浓度。从气溶胶粒子平均直径垂直廓线看,气溶胶粒子直径在 $0.16\sim 0.21\ \mu\text{m}$, 主要以小粒子为主。2500 m 以下的气溶胶粒子主要集中在 $0.19\ \mu\text{m}$ 附近, 2500 $\sim$ 4900 m 的气溶胶粒子平均直径在 $0.17\ \mu\text{m}$ 左右。

对流层内 4000 $\sim$ 5000 m 以上的气溶胶粒子因受地面直接影响较弱,粒子数浓度随高度变化不大,其尺度分布类似于稳定的背景气溶胶(孙霞等, 2011)。所以在 4000 m 以上的高度开展此次试验应为最好的方案,可以较为明显地观测到催化剂燃烧前后气溶胶粒子的变化。但是受到空域限制,试验的飞行高度最高只能到 3600 m。通过对上述大气垂直分布特征分析表明,3600 m 高度已经在边界层以上,受地面气溶胶的影响较小,所探测到的气溶胶粒子浓度较稳定,因此在该高度开展试验同样是可行的。

2.2 催化前后大气气溶胶粒子数浓度特征对比分析

无论是成冰剂还是吸湿性催化剂,都是复合型催化剂(武玉忠和陈光学, 2004)。例如,国内外现有碘化银焰剂配方,其组成一般为碘化银、氧化剂、燃烧剂、添加剂和粘合剂等,其主要成分包括:高氯酸铵、热塑性酚醛树脂及热固性酚醛树脂、碘化钾、碘化银及石油醚等助燃剂,其中高氯酸铵为氧化剂,碘化银是对云体催化的有效物质,碘化钾具有相当大的吸湿性,可通过凝结机制诱导水分子向冰核吸附,同时,大量碘离子的存在会抑制碘化银分解。碘化

银焰剂通过燃烧产生高温,将碘化银分散为具有冰核活性的气溶胶。暖云催化剂焰条一般是以氯化钾、氯化钠等吸湿性物质为主,同时为提高燃烧温度,还添加了镁粉等金属物质。本次试验所用成冰剂焰条和吸湿性催化剂焰条成分与上述成分基本相同(见 1.2 节)。

关于成冰剂燃烧试验的观测资料,飞机飞行高度为 3600 m,飞机观测时段温度值约在 5~6℃,平均温度 5.5℃,平均相对湿度为 57.6%,PCASP-100X 观测背景气溶胶粒子数浓度平均为 418 cm^{-3} ,CCN 粒子数浓度平均为 407 cm^{-3} 。10:35:05,点燃成冰剂焰条 8 根,焰条燃烧 5 min。通过图 5 发现,成冰剂

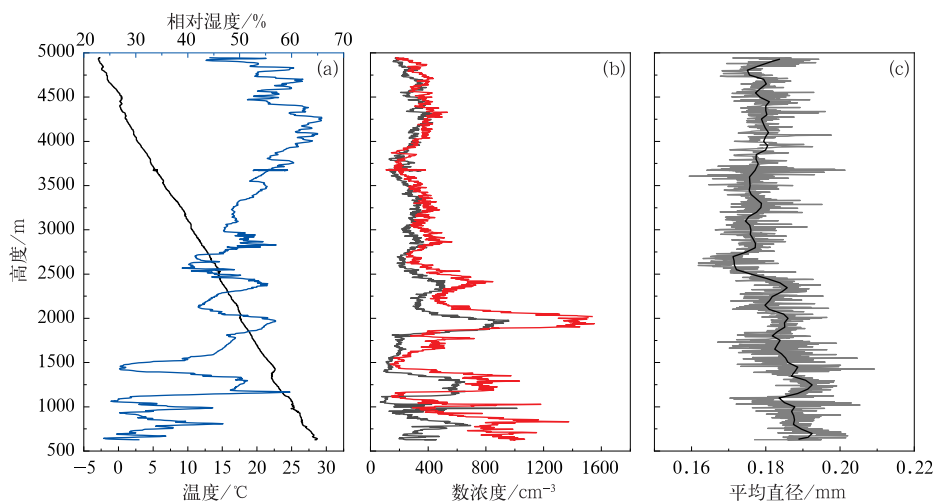
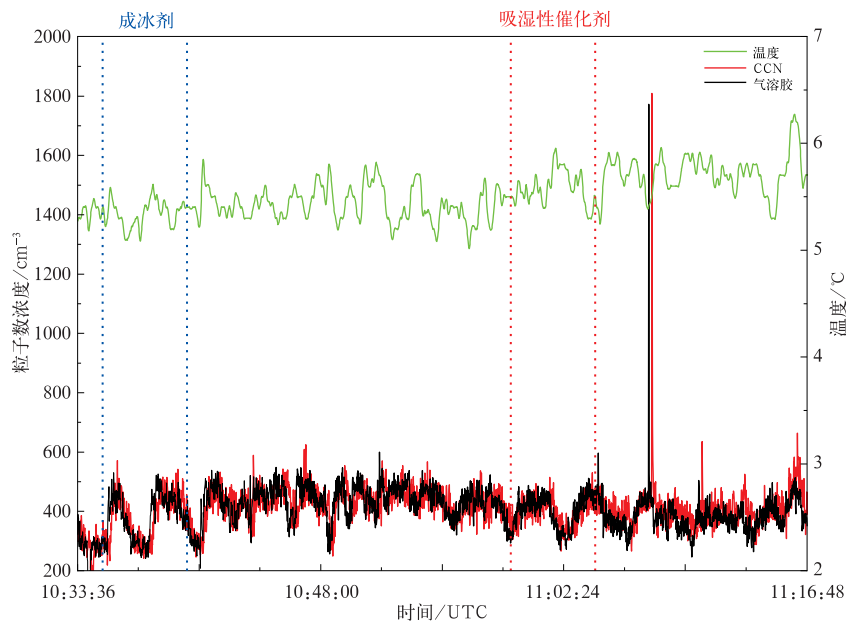


图 4 2020 年 7 月 6 日 10:02—10:23 试验区(a)温度(黑线)和相对湿度(蓝线),
(b)气溶胶粒子(灰线)和 CCN 粒子(红线)数浓度,(c)气溶胶粒子平均直径垂直廓线
Fig. 4 Vertical profiles of (a) temperature (black line) and relative humidity (blue line),
(b) aerosol particle (grey line) and CCN particle number concentrations (red line),
and (c) aerosol particle average diameter from 10:02 UTC to 10:23 UTC 6 July 2020



注:蓝色和红色虚线分别标注成冰剂、吸湿性催化剂燃烧时段。

图 5 2020 年 7 月 6 日 10:33:36—11:16:48 催化试验前后大气温度、气溶胶和 CCN 粒子数浓度时间序列
Fig. 5 Time series diagram of temperature aerosol and CCN particle number concentration before and after catalytic combustion test from 10:33:36 UTC to 11:16:48 UTC 6 July 2020

焰条燃烧后,气溶胶和 CCN 粒子数浓度并没有发生显著的变化,燃烧后的粒子数浓度与燃烧前基本一致。

根据楼小凤等(2021)、苏正军等(2009)、武玉忠和陈光学(2004)、孔君等(2016)的研究成果,碘化银催化剂在 -5°C 以下可以核化形成冰晶。在正温度区燃烧,碘化银焰剂燃烧后产生的是一种多相态气溶胶系统,包括大量气体和气溶胶,其中气体逸散,气溶胶可被采集到。碘化银燃烧后的大部分粒子尺度范围为 $0.005\sim 0.300\ \mu\text{m}$,一般有两个典型峰值,第一个峰值直径约为 $0.60\sim 0.10\ \mu\text{m}$,次峰值在 $0.20\sim 0.25\ \mu\text{m}$,平均直径小于 $0.17\ \mu\text{m}$ (苏正军等,2008)。从本次试验结果来看,由于小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的粒子占多数,不能被 PCASP-100X 有效地探测到,因此成冰剂焰条燃烧后探测到的气溶胶和 CCN 粒子数浓度较燃烧前没有观测到明显变化。

成冰剂催化剂燃烧试验结束后,为避免成冰剂燃烧试验的影响,选择在同高度层(3600 m)西南约 11 km 外的另一块区域开展吸湿性催化剂燃烧试验,该高度层风向为 320° ,风速平均为 $11\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。10:59:16,一次性点燃 6 根吸湿性催化剂,飞行 1 圈的时间仍然约为 3 min。图 5 显示,催化后约 8 min,PCASP-100X 在 11:07:25,CCNC 在 11:07:36、11:07:37 分别观测到粒子数浓度出现显著增加现象。吸湿性催化剂燃烧后,PCASP-100X 观测的气溶胶粒子数浓度的峰值为 $1772.4\ \text{cm}^{-3}$,约是该高度平均气溶胶粒子数浓度的 4.2 倍;CCNC 观测到的 CCN 粒子数浓度峰值为 $1809.01\ \text{cm}^{-3}$,约是该高度平均 CCN 粒子数浓度的 4.4 倍。

为验证气溶胶和 CCN 粒子数浓度出现高浓度值点是否在吸湿性催化剂燃烧后形成的粒子气团内,图 6 标注了吸湿性催化剂播撒的起止点和气溶胶粒子数浓度出现高浓度值的位置,可以看出,飞机开始播撒吸湿性催化剂至播撒结束大约飞行 1 圈半,然后继续飞行将近 1 圈时在吸湿性催化剂燃烧的飞行轨迹上探测到高粒子数浓度气溶胶和 CCN 值。

2.3 催化前后大气气溶胶粒子谱分布特征分析

吸湿性催化剂燃烧前后气溶胶粒子谱分析表明(图 7),燃烧后的粒子尺度范围在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下,燃

烧前后粒子谱峰值都在 $0.14\ \mu\text{m}$ 处,燃烧前为 $5107.21\ \text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,燃烧后为 $24688.67\ \text{cm}^{-3}\cdot\mu\text{m}^{-1}$,燃烧后的粒子谱峰值约是燃烧前的 4.8 倍。通过计算吸湿性催化剂燃烧前后气溶胶粒子中值直径发现,燃烧前平均粒子中值直径为 $0.17\ \mu\text{m}$,燃烧后平均粒子中值直径为 $0.14\ \mu\text{m}$,中值直径略有减小,说明燃烧后新生成的粒子多数为小粒子,导致燃烧后粒子谱分布在小粒子段数浓度明显升高,粒子谱谱宽减小。

苏正军等(2009)、武玉忠和陈光学(2004)、鄢大雄(2008)研究结果,吸湿性催化剂燃烧产物以氯化钾、氯化钠等吸湿性物质为主,这些燃烧产生的粒子平均粒径为 $0.3\ \mu\text{m}$,最大能达到 $0.5\ \mu\text{m}$ 左右,这样

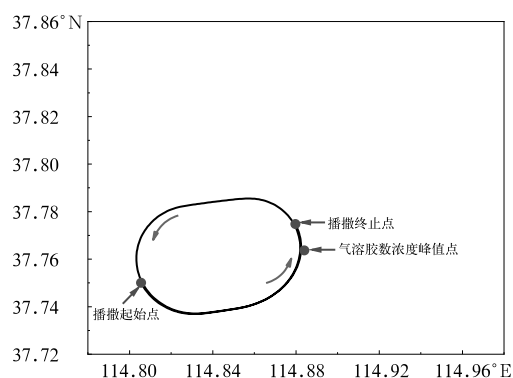


图 6 2020 年 7 月 6 日 10:59—11:04
吸湿性催化剂燃烧轨迹

Fig. 6 The warm cloud catalyst combustion trajectory from 10:59 UTC to 11:04 UTC 6 July 2020

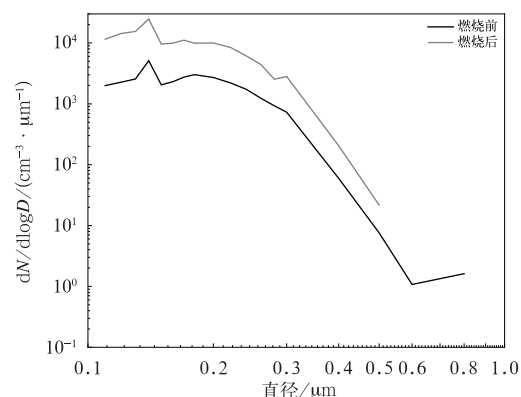


图 7 吸湿性催化剂燃烧前(10:55)和
燃烧后(11:07)气溶胶粒子谱分布

Fig. 7 Aerosol particle spectrum distribution before (10:55 UTC) and after (11:07 UTC) the warm cloud catalyst combustion

粒径范围的粒子能有效被 PCASP-100X 观测到,且这些粒子吸湿性很强,很容易活化为 CCN,因此焰条燃烧后观测到试验区域内气溶胶和 CCN 粒子浓度都有明显的增加(前期同类观测一般都是室内实验)。

3 结论与讨论

本试验利用搭载气溶胶和 CCN 观测设备的增雨飞机设计开展了一次晴空成冰剂、吸湿性催化剂燃烧的尝试性观测试验研究,发现了一些新的有趣的现象。同时,我们对试验过程及结果进行了分析和探讨,得出以下结论。

(1)对于成冰剂燃烧前后的结果分析讨论。成冰剂燃烧后通过机载探测仪器并未观测到气溶胶和 CCN 的粒子数浓度的明显变化,可能有两个原因:

成冰剂焰条燃烧后产生的粒子直径多数小于 $0.1\ \mu\text{m}$, PCASP-100X 和 CCNC 无法有效地观测到。成冰剂属于复合型催化剂,焰条助燃剂燃烧后可能会产生氯化钾和碘化钾等具有吸湿性成分的气溶胶粒子,但是由于生成的粒子尺度非常小,受限于 PCASP-100X 的观测范围,小于 $0.1\ \mu\text{m}$ 的粒子信息不易被捕捉到。在人工增雨实际业务工作中,有时因空域或者飞机性能等多种因素限制,飞机无法飞到最适宜开展冷云催化作业的高度层。那么如果在 0°C 层左右进行成冰剂焰条燃烧催化,除碘化银的成冰作用外,其他助燃剂燃烧产生的吸湿性的粒子是否会起到暖云催化的作用? 武玉忠和陈学光(2004)指出,目前的吸湿性催化剂燃烧产物平均粒径一般在 $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$,这样的粒径对暖云催化来说仍然偏小,作为暖云催化剂,粒径能提高到 $1\ \mu\text{m}$ 或更大才会有明显的效果。从本次燃烧试验结果看,这些助燃剂产生的吸湿性粒子由于粒径太小,基本起不到吸湿成核的作用。

(2)对于吸湿性催化剂燃烧前后结果的分析与思考。本次试验中吸湿性催化剂焰条燃烧后生成的粒子尺度大多在 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下,而目前国内外吸湿性催化剂燃烧后平均为 $0.5\ \mu\text{m}$,略小于之前同类观测结果。吸湿性催化剂燃烧后的粒子能够被 CCNC 采集到(说明该粒子具备形成 CCN 的特性),吸湿性催化剂焰条燃烧后观测到试验区域内气溶胶和

CCN 粒子数浓度都有明显的增加。目前在实际的暖云催化工作中,一般是直接在暖云内进行催化,基于本次飞机观测结果,在无云状态下燃烧吸湿性催化剂焰条可产生大量的吸湿性粒子,那实际工作中是否可以采取云外催化,例如在云下开展燃烧催化,利用上升气流将产生的大量吸湿性粒子输送至云内产生催化作用? 或者是否可尝试在局地对流云形成之前开展燃烧催化,提前增加大气中吸湿性核的浓度,如果云中具备较好的水汽条件,则可以激发对流云的发生发展乃至形成降水?

(3)飞机观测试验方案还需改进,机载探测设备还需完善。该个例仅为一次飞机试验个例,目的尝试观测两种催化剂燃烧以后形成的粒子有什么样的特征,对于气溶胶以及粒子核化有什么影响,也获取到了一些有意义的观测结果,但是若想开展更深入的研究,还需科学设计开展更多的飞行观测试验,且需要在飞机上同时挂载一些气溶胶及大气成分的观测设备,能更有效观测到催化剂以及各种复合燃剂燃烧后产生粒子的物理和化学特性,同时要在云室内进行更多的试验,将室内试验结果与飞机观测相结合来开展深入研究。

参考文献

- 蔡兆鑫,蔡森,李培仁,等,2021. 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[J]. 大气科学,45(2):393-406. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al, 2021. An in-situ case study on micro physical properties of aerosol and shallow cumulus clouds in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):393-406(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,王晓青,付娇,等,2020. 人工增雨防雹火箭弹道跟踪系统的研制及初步试验[J]. 气象,46(6):850-856. Dong X B, Wang X Q, Fu J, et al, 2020. Development and preliminary test on ballistic tracking system of artificial precipitation enhancement and anti-hail rocket[J]. Meteor Mon, 46(6):850-856(in Chinese).
- 段婧,楼小凤,卢广献,等,2017. 国际人工影响天气技术新进展[J]. 气象,43(12):1562-1571. Duan J, Lou X F, Lu G X, et al, 2017. International recent progress in weather modification technologies[J]. Meteor Mon, 43(12):1562-1571(in Chinese).
- 段婧,楼小凤,汪会,等,2020. 人工影响天气用碘化银催化剂对区域环境影响的研究进展[J]. 气象,46(2):257-268. Duan J, Lou X

- F, Wang H, et al, 2020. Research progress on impact of AgI in weather modification operations on environment in related areas [J]. Meteor Mon, 46(2):257-268 (in Chinese).
- 鄯大雄, 2008. 关于冷、暖云催化剂的一些考虑 // 中国气象学会. 第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议论文集 (I) [C]. 北京: 气象出版社: 388-389. Feng D X, 2008. // Chinese Meteorological Society. Proceedings of the 15th National Conference on Cloud and Precipitation and Weather Modification (I) [C]. Beijing: China Meteorological Press: 388-389 (in Chinese).
- 孔君, 王广河, 房文, 等, 2016. 含 AgI 焰剂成冰性能与物化特征的实验研究 [J]. 气象, 42(1): 74-79. Kong J, Wang G H, Fang W, et al, 2016. Laboratory study on nucleating properties and microstructure of AgI pyrotechnics [J]. Meteor Mon, 42(1): 74-79 (in Chinese).
- 李军霞, 银燕, 李培仁, 等, 2014. 山西夏季气溶胶空间分布飞机观测研究 [J]. 中国环境科学, 34(8): 1950-1959. Li J X, Yin Y, Li P R, et al, 2014. Aircraft measurements of aerosol spatial distribution properties in Shanxi Province in summer [J]. China Environ Sci, 34(8): 1950-1959 (in Chinese).
- 刘佩, 银燕, 陈倩, 等, 2019. 吸湿性播撒对暖性对流云减雨影响的数值模拟 [J]. 应用气象学报, 30(2): 211-222. Liu P, Yin Y, Chen Q, et al, 2019. Numerical simulation of hygroscopic seeding effects on warm convective clouds and rainfall reduction [J]. J Appl Meteor Sci, 30(2): 211-222 (in Chinese).
- 楼小凤, 傅瑜, 孙晶, 2019. 一次浙江对流云催化数值模拟试验 [J]. 应用气象学报, 30(6): 665-676. Lou X F, Fu Y, Sun J, 2019. A numerical seeding simulation of convective precipitation in Zhejiang, China [J]. J Appl Meteor Sci, 30(6): 665-676 (in Chinese).
- 楼小凤, 傅瑜, 苏正军, 2021. 人工影响天气碘化银催化剂研究进展 [J]. 应用气象学报, 32(2): 146-159. Lou X F, Fu Y, Su Z J, 2021. Advances of silver iodide seeding agents for weather modification [J]. J Appl Meteor Sci, 32(2): 146-159 (in Chinese).
- 毛节泰, 郑国光, 2006. 对人工影响天气若干问题的探讨 [J]. 应用气象学报, 17(5): 643-646. Mao J T, Zheng G G, 2006. Discussions on some weather modification issues [J]. J Appl Meteor Sci, 17(5): 643-646 (in Chinese).
- 史月琴, 刘卫国, 王飞, 等, 2021. 一次对流云人工消减雨作业云条件预报和作业预案合理性分析 [J]. 气象, 47(2): 192-204. Shi Y Q, Liu W G, Wang F, et al, 2021. Forecast on convective cloud condition and analysis on seeding plan of an artificial rainfall mitigation case [J]. Meteor Mon, 47(2): 192-204 (in Chinese).
- 苏正军, 郭学良, 诸葛杰, 等, 2019. 云雾物理膨胀云室研制及参数测试 [J]. 应用气象学报, 30(6): 722-730. Su Z J, Guo X L, Zhuge J, et al, 2019. Developing and testing of an expansion cloud chamber for cloud physics research [J]. J Appl Meteor Sci, 30(6): 722-730 (in Chinese).
- 苏正军, 郑国光, 鄯大雄, 2009. 吸湿性物质催化云雨的研究进展 [J]. 高原气象, 28(1): 227-232. Su Z J, Zheng G G, Feng D X, 2009. The review of hygroscopic seeding [J]. Plateau Meteor, 28(1): 227-232 (in Chinese).
- 苏正军, 郑国光, 关立友, 等, 2008. 含 AgI 人工冰核粒子的电泳分析 [J]. 应用气象学报, 19(2): 137-144. Su Z J, Zheng G G, Guan L Y, et al, 2008. Particle sizing analysis on AgI pyrotechnics with the electron microscope [J]. J Appl Meteor Sci, 19(2): 137-144 (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 over Shijiazhuang Area in clean and hazy days during spring [J]. China Environ Sci, 31(5): 705-713 (in Chinese).
- 汪晓滨, 张蕾, 陈跃, 等, 2005. 新型 AgI 末端燃烧器在北京飞机增雨作业中的使用分析 [J]. 气象, 31(7): 54-58. Wang X B, Zhang Q, Chen Y, et al, 2005. Analysis of data of airborne AgI flame seeding generator in Cheyenne III A in Beijing [J]. Meteor Mon, 31(7): 54-58 (in Chinese).
- 王玉忠, 陈光学, 2004. 烟火技术在人工影响天气中的应用 [J]. 火工品, (4): 31-33, 37. Wu Y Z, Chen G X, 2004. Application of pyrotechnics technology in weather modification [J]. Initiators Pyrotech, (4): 31-33, 37 (in Chinese).
- 杨绍忠, 2006. 含碘化银人工冰核检测问题 [J]. 气象, 32(11): 25-31. Yang S Z, 2006. Detection about AgI-type seeding agents of China [J]. Meteor Mon, 32(11): 25-31 (in Chinese).
- 杨绍忠, 陈跃, 2018. 一种纳米纯 AgI 气溶胶的制备方法 及其成冰核活性的检测 [J]. 气象, 44(3): 442-448. Yang S Z, Chen Y, 2018. Preparation of pure AgI nano-aerosol and its efficiency of ice nucleation in laboratory experiment [J]. Meteor Mon, 44(3): 442-448 (in Chinese).
- 姚展予, 2006. 中国气象科学研究院人工影响天气研究进展回顾 [J]. 应用气象学报, 17(6): 786-795. Yao Z Y, 2006. Review of weather modification research in Chinese Academy of Meteorological Sciences [J]. J Appl Meteor Sci, 17(6): 786-795 (in Chinese).
- 游来光, 王广河, 鄯大雄, 2000. 人工增雨催化技术系统研究 [J]. 中国气象科学研究院年报, (1): 26-27. You L G, Wang G H, Feng D X, 2000. Cloud seeding technique system for precipitation enhancement [J]. Annu Repo CAMS, (1): 26-27 (in Chinese).
- Blair D N, Davis B L, Dennis A S, 1973. Cloud chamber tests of generators using acetone solutions of AgI-NaI, AgI-KI and AgI-NH4I [J]. J Appl Meteor, 12(6): 1012-1017.
- Cai Z X, Li Z Q, Li P R, et al, 2022. Vertical distributions of aerosol and cloud microphysical properties and the aerosol impact on a continental cumulus cloud based on aircraft measurements from the Loess Plateau of China [J]. Front Environ Sci, 9: 808861. DOI:10.3389/fenvs.2021.808861.
- Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, et al, 2011. Size-resolved and bulk activation properties of aerosols in the North China Plain [J]. Atmos Chem Phys, 11(8): 3835-3846.
- 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. DOI: 10. 3389/fenvs. 2022. 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. DOI: 10. 1016/j. atmosres. 2021. 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. DOI: 10. 1029/2020EA001196.
- Li J X, Li P R, Yuan L, et al, 2017. Physical and optical properties of atmospheric aerosols in Summer at a suburban site in North China[J]. *Aerosol Air Qual Res*, 17(6): 1374-1388.
- Li J X, Yin Y, Li P R, et al, 2015. Aircraft measurements of the vertical distribution and activation property of aerosol particles over the Loess Plateau in China[J]. *Atmos Res*, 155: 73-86.
- Li Y N, Zhang F, Li Z Q, et al, 2017. Influences of aerosol physiochemical properties and new particle formation on CCN activity from observation at a suburban site of China[J]. *Atmos Res*, 188: 80-89.
- Rose D, Gunthe S S, Mikhailov E, et al, 2008. Calibration and measurement uncertainties of a continuous-flow cloud condensation nuclei counter(DMT-CCNC): CCN activation of ammonium sulfate and sodium chloride aerosol particles in theory and experiment[J]. *Atmos Chem Phys*, 8(5): 1153-1179.
- Rosenfeld D, Yu X, Dai J, 2005. Satellite-retrieved microstructure of AgI seeding tracks in supercooled layer clouds[J]. *J Appl Meteor*, 44(6): 760-767.
- Wang J, Yue Z G, Rosenfeld D, et al, 2021. The evolution of an AgI cloud-seeding track in central China as seen by a combination of radar, satellite, and disdrometer observations[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 126 (11): e2020JD033914. DOI: 10. 1029/2020JD033914.
- Wang Y Y, Li Z Q, Zhang Y J, et al, 2018. Characterization of aerosol hygroscopicity, mixing state, and CCN activity at a suburban site in the central North China Plain[J]. *Atmos Chem Phys*, 2018, 18(16): 11739-11752.
- Zhang F, Li Y, Li Z, et al, 2014. Aerosol hygroscopicity and cloud condensation nuclei activity during the AC3Exp campaign: implications for cloud condensation nuclei parameterization[J]. *Atmos Chem Phys*, 14(24): 13423-13437.

(本文责编:俞卫平)