# 华北中部夏季气溶胶垂直分布及其与 CCN 和云滴转化关系 的飞机观测研究

李义宇1郭学良2金莲姬3李培仁1孙鸿娉1赵德龙4马新成4

1山西省人工增雨防雷技术中心,太原 030002

2 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

3 南京信息工程大学 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044

4 北京市人工影响天气办公室,北京 100089

**摘要** 气溶胶的时空分布及其核化成云的转化过程是云降水物理研究的重点,也是气候变化 中气溶胶间接效应关注的热点问题。利用 2013-2014 年期间在华北中部山西地区开展的 9 架 次夏季晴天和积云天气情况下的气溶胶、云凝结核(CCN)及云滴数浓度观测资料,分析研 究了气溶胶的垂直分布、谱分布、来源特征及其与云凝结核、云滴数浓度的转化关系。研究 结果表明,大气边界层逆温层结对气溶胶、CCN 垂直分布有重要影响,不同天气条件下气 溶胶谱型在低层差异较大而高层基本一致;垂直方向上 CCN 数浓度与气溶胶数浓度有较好 的相关性,过饱和度 0.3%条件下 CCN 比率(CCN/CN)与气溶胶有效直径呈线性关系;积 云云下气溶胶与云滴的线性拟合方程为 y=1.3x-616.3,拟合相关系数为 0.96,气溶胶转化为 云滴的比率可达到 47%。在过饱和度 0.3%条件下,云下 CCN 与云滴的线性拟合方程为 y=1.6x-473.8,拟合相关系数也为 0.96,CCN 转化为云滴的比率可达到 69%。

关键词 气溶胶 云凝结核 云滴数浓度 飞机观测 华北中部

文章编号 中图分类号 P412.24 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

## Aircraft measurements on summer vertical distributions of

aerosols and transitions to CCN and cloud droplets in Central

# **Northern China**

LI Yiyu<sup>1</sup>, GUO Xueliang<sup>2</sup>, JIN Lianji<sup>3</sup>, LI Peiren<sup>1</sup>, SUN Hongping<sup>1</sup>,

# <sup>1</sup>ZHAO Delong<sup>4</sup>, and MA Xincheng<sup>4</sup>

1 Shanxi Weather Modification Center, Taiyuan 030002

**收稿日期** 2020-12-30 ; **网络预出版日期** 作者简介 李义字, 男, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事云物理降水研究。E-mai:294554707@qq.com 通讯作者 郭学良, E-mail:guoxl@mail.iap.ac.cn 资助项目 国家重点研发计划项目 2019YFC1510301, 国家自然科学基金项目 41575133 Funded by National Key Research and Development Plan (Grants 2019YFC1510301), National Natural Science Foundation of China (Grant 41575133) 2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science&Technology, Nanjing 210044
4 Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089

Abstract Aerosols impose great influences on cloud microphysical properties and climate change by acting as cloud condensation nuclei (CCN). The properties of vertical distribution, size distribution and source regions of aerosols, as well as their transition relationships with CCN and cloud droplet number concentration are investigated using nine flights of aircraft measurements under clear and cloudy conditions in Shanxi, Central Northern China. Results indicate that the structure of atmospheric boundary inversion layer has an important impact on the vertical distributions of aerosols and CCN. The size distributions under different weather conditions are similar in the upper atmospheric layers but quite different in the lower layers. There is a high positive linear correlation between aerosol number concentrations and CCN number concentrations in vertical at 0.3% supersaturation. A linear regression of y=1.3x-616.3 is established between cloud droplet number concentrations and aerosol number concentrations near the cumulus cloud bases with a correlation coefficient of 0.96, and the conversion rate from aerosol number concentrations to cloud droplet number concentrations was about 47%. A good linear regression of y=1.6x-473.8 is also found between CCN number concentrations and cloud droplet number concentrations near the cumulus cloud bases with a correlation coefficient of 0.96 at 0.3% supersaturation, and the conversion rate is about 69%.

**Keywords** Aerosol, Cloud condensation nuclei (CCN), Cloud droplet number concentration, Aircraft measurements, Central Northern China

#### 1 引言

气溶胶是云降水形成的重要组成部分。由于对气溶胶时空分布、化学组分及 其核化特性等方面认识仍然不足,导致气溶胶的间接气候效应在辐射强迫中具有 很大的不确定性(IPCC, 2007)。气溶胶的间接气候效应主要是通过云凝结核 (CCN)和冰核(IN)影响云覆盖、生命史和降水形成和演变过程,从而改变大 气辐射平衡。因此,深入了解气溶胶的时空分布特征、来源及其与 CCN、云滴 数浓度的关系,对于认识气溶胶核化成云及其间接气候效应具有重要的意义。

在 20 世纪 50 年代,国外科学家就开始关注气溶胶对云宏、微观特性的影响 (Cunn et al., 1957; Squires, 1955; Squires and Twomey, 1960; Warner, 1968; Warner and Twomey, 1967),研究指出人类活动所产生的高浓度气溶胶、CCN 可以增加 云滴数浓度,潜在地降低了降水效率。Terliuc et al. (1971) 在地面及飞机上进行

的 CCN 观测研究表明,雨天、干燥天 CCN 谱呈典型的大陆性分布,CCN 浓度 变化受风向影响显著,CCN 对降水机制起重要作用。Hudson et al. (1993)的研究 表明,人为 CCN 会影响层云,最明显的证据是 1987 年卫星观测到了船烟迹云。 Rosenfeld (1999)利用 TRMM 卫星观测资料,分析了森林大火后,烟尘对热带对 流云中暖云降水过程的影响,发现烟尘影响到云的形成,降水受到抑制。Rosenfeld (2000)认为,随着污染的加重,城市居住区降水将有所减少。Chuang et al. (2000)、Snider and Brenguier (2000)、Ramanathan et al. (2001a, 2001b)通过分 析机载 CCN、云粒子探测资料发现,CCN 的增加会导致云滴浓度的增加,但 CCN 浓度的进一步增加,云滴浓度的增加将趋于停止。

通过飞机观测可以最直接有效地开展气溶胶与云物理特性的研究。自 20 世 纪 90 年代以来,我国学者相继在华北、华东和华中等地区开展了一系列气溶胶 与云凝结核的飞机观测试验。在气溶胶特征的飞机观测方面, Zhang et al.(2005)、 范烨等(2007)、陈鹏飞等(2012)、马新成等(2016)、段婧等(2019)、杨怡曼等(2020)、 董晓波等(2021)在我国不同地区开展研究,包括不同天气背景下气溶胶分布特征 对比, 晴天和重污染天气下气溶胶垂直分布, 气溶胶垂直分布与大气边界层的关 系,不同模态气溶胶空间分布特征,以及海洋与大陆气溶胶垂直分布特征的对比。 范烨等 (2007) 分析了 2004 年的 8-9 月北京地区 8 架次气溶胶飞行探测资料,发 现风速较小的晴天和阴天都有可能使气溶胶浓度出现高值,大气有逆温层存在时, 逆温层底有气溶胶粒子的明显累积,气溶胶粒子浓度谱为单峰分布。孙霞等(2011) 对比分析石家庄地区春季晴、霾天气溶胶数浓度的垂直分布,发现霾天粗粒子气 溶胶的数浓度比晴天高一个量级。张瑜等(2011)综合分析 2005-2007 年河北秋季 不同天气下的气溶胶垂直分布特征,发现气溶胶在降水天气呈双峰分布,其余天 气以单峰分布为主,陆地上空的气溶胶比海洋上空高一个量级。在云微物理特征 的飞机观测方面, Deng et al.(2009)、李军霞等(2014)、庞朝云等(2016)、郝囝等 (2019)、蔡兆鑫等(2019)针对不同云系、不同区域和不同过程中的云微物理参数 的时空分布开展了相关研究。石立新等 (2007) 发现华北地区的 CCN 主要来源 于地面,近地层 CCN 浓度较高, CCN 浓度随高度增加而减少; 污染地区乡村上空 CCN 浓度比无污染地区乡村高5倍以上。卢广献等 (2012) 研究了 2009 年春季 北京周边大气气溶胶的分布、来源特征及其与云凝结核(CCN)的转化关系,结

果表明,高浓度气溶胶基本分布在 4500 m 以下的区域,气溶胶平均粒子谱呈双 (多)峰分布,而在 4500 m 以上基本为单峰分布。Zhang et al. (2011) 分析了北京 2008 年 7 月的气溶胶观测资料,发现云滴数浓度 (N<sub>c</sub>)和气溶胶数浓度 (N<sub>a</sub>) 的比 (N<sub>c</sub>/N<sub>a</sub>) 与气溶胶尺度和化学组分有关,其中 N<sub>c</sub>/N<sub>a</sub> 与粒径呈线性关系;尺度大的气溶胶粒子能促进 CCN、云滴的形成。Li et al. (2015) 分析了山西地区 2013 年的气溶胶观测资料,发现过饱和度越大,CCN 核化比率越大。然而,由于飞行费用、飞行安全、空域限制等原因,利用飞机开展气溶胶和云物理空间分 布的观测研究仍然较为缺乏。

云下气溶胶与 CCN 及云中云滴数浓度的关系可以揭示气溶胶成云的特征, 利用飞机对淡积云下气溶胶、CCN 与云底之上云滴进行原位测量,在国内鲜有, 气溶胶、CCN、云滴三者的拟合关系可以为改进模式提供重要的依据。O.Dowd et al. (1999)分析了北大西洋和东太平洋云下 N<sub>a</sub>和 N<sub>c</sub>之间的关系,得到了云滴数 和气溶胶浓度的关系式。本文利用 2013-2014 年期间在华北中部山西地区开展的 9 架次飞机观测资料,分析了气溶胶垂直分布、谱分布和来源特征,以及与 CCN、 云中云滴数浓度的转化关系,为揭示气溶胶在成云过程中的作用提供科学依据。 2 仪器与观测数据

观测资料来源于 2013-2014 年期间山西省人工降雨防雹办公室运-12 飞机观 测数据,该飞机观测平台搭载美国 DMT (Droplet Measurement Technologies)公 司的机载云降水粒子测量系统。本文用到的仪器有气溶胶谱仪 PCAPS-100X (Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe),量程为 0.1-3µm,分为 15 个不同间 隔的通道。虽然 PACSPS-100X 探头测量范围有限,只能代表积聚模态(0.1-1µm) 和部分粗粒子模态(1-3µm)的气溶胶粒子。但 PCAPS-100X 探头是专用的机载设 备,其观测数据相对可靠。蔡兆鑫等(2021),Yang et al.(2020)都用 PCAPS-100X 探头来研究气溶胶的垂直分布。本文用到 0.1-3µm 的气溶胶作为凝结核(CN),计 算所得的 CCN 比率 (CCN/CN) 较实际值偏大;云凝结核计数器 CCN-200 (Cloud Condensation Nuclei Counter-200);云粒子谱仪 CDP (Cloud Droplet Probe),量 程为 3-50µm,分为 30 个不同间隔的通道。仪器采样频率都为 1Hz,每年按时返 回美国 DMT 公司进行标校,并每次观测前对仪器进行维护,以确保观测数据质 量。 飞行方案是起飞后进行垂直探测获得气溶胶和 CCN 浓度的垂直分布数据, 晴空时在目标区域以 300m 或 600m 为间隔分层盘旋平飞探测,获得不同高度层 的气溶胶资料。在淡积云天气时,飞机在云底之下 100m-300m 范围平飞探测, 获得云下气溶胶和 CCN 的分布数据,然后在云底之上 100m-200m 水平穿云探测, 获得云中云滴粒子数据。2014 年 8 月 11 日起飞过程 CCN 工作状态异常,因而 没做这次 CCN 数据分析。飞行区域如图 1 所示,主要在山西省中部的忻州、文 水地区。



Fig. 1. Experimental area for aircraft measurements in Northern China. (The rectangular area denotes the aircraft flight region)

本文依据大气边界层逆温情况,将 2013-2014 年夏季气溶胶垂直分布分为两 类,一类是大气边界层有明显的逆温情况,大气边界层顶高度一般在 1500m 左 右。另一类无明显逆温情况。

3 结果分析

3.1 气溶胶和 CCN 的垂直分布及来源特征

## 3.1.1 不同大气层结条件下的气溶胶垂直分布特征

图2和图3分别给出了边界层有无逆温情况的气溶胶数浓度与有效直径随高度的变化,同时左边给出了对应的温湿度廓线。从图2可以看到,在有边界层逆温的情况下,由于逆温层的阻挡作用,使气溶胶主要集中在边界层顶(1500m)以下,气溶胶在边界层内出现明显的累积现象,气溶胶数浓度最大值达到

3000-4000 cm<sup>-3</sup>以上。而边界层顶以上气溶胶浓度出现剧减现象,可减小 2 个量 级左右。可见,因逆温造成的稳定性边界层对气溶胶的累积效应,在低能见度雾 -霾天气形成过程中起到至关重要的作用。由于边界层内强烈的湍流混合作用, 使气溶胶混合均匀,有效半径均在 0.4µm 左右。而无边界层逆温存在的情况下(图 3),气溶胶垂直扩散混合作用加强,无明显累积效应。不同大气层结条件下的垂 直扩散程度不同,图 3 中 2013 年 8 月 30 日显示的情况表示大气温度随高度的递 减率大,大气层结不稳定性高,垂直扩散作用强,从地面到 3000m 高度的气溶 胶浓度均在 500 cm<sup>-3</sup>,但有效直径出现随高度递减现象,这是因为上升扩散气流 对不同大小的气溶胶粒子具有筛选作用,小粒子易被上升气流带到高层,而大粒 子留在低层。可见此种情况下的对流扩散比较强烈,有利于地面污染气溶胶向上 输送,对气溶胶参与云和降水形成过程提供了有利条件。而其他两个例子 2014 年 8 月 11 日和 2014 年 8 月 12 日的大气温度随高度的递减率较小,不稳定性较 弱,垂直扩散作用偏小,气溶胶浓度和大小均出现明显的垂直递减现象,进入空 中的气溶胶量明显减小。

表1给出了6个例子在不同高度的气溶胶数浓度统计特征,可以看到,逆温 情况下1500m以下气溶胶数浓度的平均值为3189 cm<sup>-3</sup>,而无逆温情况下边界层 内的气溶胶浓度平均值只有1509 cm<sup>-3</sup>。逆温情况下气溶胶有效直径(ED)在 1500m以下平均值为0.36µm;在1500m以上气溶胶有效直径随高度的增加呈现 增大的趋势,1500m-3000m气溶胶有效直径平均值为0.42µm,3000m以上,气 溶胶有效直径平均值为0.53µm。在逆温情况下,出现气溶胶有效直径随高度增 大情况应与气溶胶来源不同有关,在后面详细讨论。没有边界层逆温的情况下, 1500m以下,气溶胶有效直径平均值为0.45µm;1500m-3000m气溶胶有效直径 平均值为0.35µm;3000m以上,气溶胶有效直径平均值为0.32µm。气溶胶有效 直径随高度变化很小或出现减小现象,这与垂直扩散气流对粒子输送过程的筛选 作用有关。



图2 边界层逆温条件下气溶胶数浓度(a)与有效直径(b)的垂直分布及温湿度廓线(c)(绿色、红色和蓝色分别 代表2013年8月3日、2013年8月4日和2013年8月12日;实现为温度,点划线为相对湿度)

Fig.2 .Vertical distributions of (a) Na, (b) ED, (c) temperature and relative humidity for that with atmospheric inversion condition. (Green, red and blue refer to 3 August 2013, 4 August 2013 and 12 August 2013, respectively. Solid lines are temperature, dash lines are relative humidity.)



图3 边界层无逆温条件下气溶胶数浓度(a)与有效直径(b)的垂直分布及温湿度廓线(c)(青色、蓝色和粉色分别代表2013年8月30日、2014年8月11日和2014年8月12日)

Fig.3. As in Fig. 2 but for that without atmospheric inversion (Cyan, blue and pink refer to 30 August 2013, 11

August 2014 and 12 August 2014, respectively.)

#### 表1 不同高度气溶胶数浓度统计特征

Table 1 Statistical summary of  $\mathbf{N}_{\mathbf{a}}$  at different heights in each flight.

边界层	时间	数浓度(cm <sup>-3</sup> )	数浓度(cm <sup>-3</sup> )	数浓度(cm <sup>-3</sup> )
状况	(年月日)	(地面-1500m)	(1500m-3000m)	(3000m 以上)

		平均值	最大值	平均值	最大值	平均值 最	大值
逆温	20130803	2926	4257	647	972	331	538
	20130804	3099	4416	603	1324	558	947
	20130812	3542	5541	1173	2663	930	1626
	平均	3189	4738	807	1653	606	1037
无逆温	20130830	689	785	690	1271	142	490
	20140811	1522	1725	512	1110	544	761
	20140812	2318	3158	1431	2026	705	1116
	平均	1509	1889	877	1469	463	789

#### 表 2 不同高度气溶胶有效直径统计特征

Table 2 Statistical summary of ED at different heights in each flight.

	高度	地面-1500m		1500m-3000m		3000m 以上	
		有效直径 (µm)		有效直径(µm)		有效直径(µm)	
		平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
边界	20130803	0.4	0.45	0.43	0.76	0.69	0.86
层有	20130804	0.39	0.46	0.44	0.74	0.45	0.88
逆温	20130812	0.3	0.35	0.38	0.62	0.45	0.93
	平均	0.36	0.42	0.42	0.71	0.53	0.89
边界	20130830	0.43	0.53	0.34	0.5	0.29	0.46
层无	20140811	0.57	0.71	0.4	0.68	0.35	0.47
逆温	20140812	0.35	0.45	0.3	0.35	0.31	0.39
	平均	0.45	0.56	0.35	0.51	0.32	0.44

## 3.1.2 不同大气层结条件下的 CCN 浓度垂直分布特征

图 4 是不同大气层结条件下 CCN 浓度(过饱和度为 0.3%)的垂直分布。从 图中可以看出, CCN 数浓度垂直分布与气溶胶数浓度垂直分布相似,也与大气 稳定度密切相关。在边界层有明显逆温的稳定大气层结条件下(图 4a), CCN 数 浓度在边界层内也存在明显累积现象,然后随高度出现剧减,CCN 数浓度最大 值可以达到 2000-3000 cm<sup>-3</sup>,而对应的气溶胶数浓度最大值为 3000-4000 cm<sup>-3</sup>, 说明在过饱和度为 0.3%的条件下,边界层内累积的高浓度气溶胶具有很高的核 化率。在无明显逆温的不稳定大气层结条件下(图 4b), CCN 数浓度在边界层内 无明显累积现象,而是随高度呈递减趋势。

表 2 给出了 5 个例子的 CCN 数浓度的平均值和最大值。逆温层结条件下, 1500m 以下 CCN 数浓度平均值为 1992 cm<sup>-3</sup>,最大值为 2656 cm<sup>-3</sup>;1500m-3000m 高度,CCN 数浓度平均值为 610 cm<sup>-3</sup>,最大值为 1119 cm<sup>-3</sup>;3000m 以上,CCN 数浓度平均值仅为 475 cm<sup>-3</sup>,最大值为 562 cm<sup>-3</sup>。无明显逆温层结条件下,1500m 以下的 CCN 数浓度平均值为 1190 cm<sup>-3</sup>,最大值为 1826 cm<sup>-3</sup>;1500m-3000m 高 度层,CCN 数浓度平均值为 701 cm<sup>-3</sup>,最大值为 885 cm<sup>-3</sup>;在 3000m 以上,CCN 数浓度平均值为 360 cm<sup>-3</sup>,平均值为 586 cm<sup>-3</sup>。对比两种类型的 CCN 数浓度垂直 分布,可以看出,在边界层内,逆温情况下的 CCN 数浓度约为无逆温层结情况 下的 1.5 倍,而在 1500m-3000m、3000m 以上,两种类型的 CCN 数浓度较为接 近,这与两类气溶胶数浓度的垂直分布趋势基本一致。



图4 云凝结核数浓度(过饱和度为0.3%)垂直分布:(a)有边界层逆温(b)无边界层逆温(绿色、红色、蓝色、 青色和粉色分别代表2013年8月3日、2013年8月4日、2013年8月12日、2013年8月30日和2014年8月12日) Fig. 4 Averaged vertical distributions of N<sub>CCN</sub> at 0.3%SS (a) with atmospheric inversion condition (b) without atmospheric inversion condition. (Green, red, blue, cyan and pink refer to 3 August 2013, 4 August 2013 and 12 August 2013, 30 August 2013, and 12 August 2014, respectively.) 表3 不同高度 CCN 数浓度(过饱和度为 0.3%)统计特征 Table 3 Statistical summary of N<sub>CCN</sub> at 0.3% supersaturation at different heights in each case

	2 0011	1	8
高度	地面-1500m	1500m-3000m	3000m 以上

	日期	N <sub>ccn</sub> (cm	N <sub>ccn</sub> (cm <sup>-3</sup> )		N <sub>ccn</sub> (cm <sup>-3</sup> )		$N_{ccn} \ (cm^{-3})$	
		Mean	Max	Mean	Max	Mean	Max	
边界	20130803	1682	2161	425	537	387	467	
层有 逆温	20130804	2046	2771	390	699	368	400	
	20130812	2249	3038	1015	2121	670	819	
	Mean	1992	2656	610	1119	475	562	
边界	20130830	515	722	403	573	124	383	
层无	20140012	10.00	2021	1000	1100	507	700	
逆温	20140812	1866	2931	1000	1198	596	/89	
	Mean	1190	1826	701	885	360	586	

## 3.1.3 气溶胶来源分析

为解释气溶胶浓度或尺度随高度增加,但 CCN 浓度不一定增加的现象(如图 2a 和图 4a),了解不同高度气溶胶的来源具有重要意义。利用 HYSPLIT\_4 (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)模式分别对 6 次个例在不同高度气溶胶粒子做了后向轨迹分析。图 5 为 6 次个例在距地面 500m、1200m、2200m、2700m 高度的气团 72 小时的后向轨迹。

可以看出,2013 年 8 月 3 日、8 月 4 日和 8 月 12 日三次大气探测过程中, 低层气溶胶主要来自本地源,以城市群人类活动排放源为主,而高层气溶胶来自 西北地区,其中 2013 年 8 月 3 日来自柴达木盆地,2013 年 8 月 4 日和 2013 年 8 月 12 日来自新疆地区,经过戈壁沙漠之后进入山西。因此,由于这三次探测期 间高层气溶胶来自西北地区远距离输送的尺度较大沙尘粒子,而低层气溶胶主要 来自局地城市群人类活动排放的尺度较小的粒子,又因为有边界层逆温阻碍垂直 输送,气溶胶垂直混合受阻,造成气溶胶有效直径随高度增加呈现增大的趋势。 一般情况下,沙尘粒子为非吸湿性气溶胶粒子,因此,核化成 CCN 的浓度较小。 2013 年 8 月 30 日低层气溶胶来自东北地区输送,高层气溶胶来自蒙古地区的输 送。2014 年 8 月 11 日低层气溶胶来自蒙古地区而高层气溶胶来自西北地区。2014 年 8 月 12 日,低层气溶胶来自局地的排放,高层气溶胶来自西北地区。可见 2013 年 8 月 30 日和 2014 年 8 月 11 日低层气溶胶有效直径较大,是因为低层气溶胶 有来自其他地方的输送,而三次观测的高层气溶胶均来自西北或蒙古地区的远距 离输送,而高层气溶胶有效直径比较小,这可能是由于云对气溶胶的湿清除作用, 尺度较大的气溶胶容易形成云滴,因此,气溶胶有效直径出现随高度增加呈现减 小或不变的趋势。



图5 观测期间不同高度72小时后向轨迹:(a)2013年8月3日 (b) 2013年8月4日 (c) 2013年8月12日 (d) 2013年8 月30日 (e) 2014年8月11日 (f) 2014年8月12日

Fig. 5. Backward trajectories of air masses in Taiyuan station: (a) 3 August, 2013, (b) 4 August, 2013, (c) 12 August, 2013, (d) 30 August, 2013, (e) 11 August, 2014 and (f) 12 August, 2014.

#### 3.2 气溶胶谱分布及其与 CCN 的相关性和转化关系

利用 2013 年 7 月 31 日、8 月 3 日、8 月 4 日三次在山西文水地区不同高度 层飞机水平盘旋探测数据,分析了不同高度层的气溶胶粒子谱分布。其中 2013 年 7 月 31 日探测时,空中有一层较薄的云层,2013 年 8 月 3 日、2013 年 8 月 4 日为晴空天气。

这三次飞行探测的方案是,在山西文水地区从最低飞行安全高度 1200m 开始,以 300m 或 600m 为间隔分层水平盘旋飞行探测,在每一个高度层大约飞行 5min。图 6 是三次探测相同高度盘旋平飞时的气溶胶谱。图 6a 中 7 月 31 日、8 月 4 日、8 月 3 日气溶胶谱均呈单峰分布,不同日期相同尺度的气溶胶浓度相差 较大,图 6b-图 6d 中 8 月 3 日和 8 月 4 日气溶胶谱呈双峰分布,而 7 月 31 日气 溶胶谱呈单峰分布,图 6c-图 6d 中 7 月 31 日气溶胶谱与 8 月 3 日和 8 月 4 日气 溶胶谱型差异较大,直径小于 1.2μm 的气溶胶浓度与 8 月 3 日和 8 月 4 日相比较

小,而直径大于 1.2µm 的气溶胶浓度较大,这是由于 7 月 31 日平飞探测时,飞 机在 1800m-2500m 位于云中,由于湿增长作业而使得气溶胶粒子增大;图 6e-图 6f 中三次探测气溶胶谱型较为一致,都呈单峰分布,说明不同日期 3000m 以 上气溶胶分布差异较小。

综上,不同日期气溶胶谱型在低层差异较大而高层基本一致;因为低层受人 为排放的气溶胶影响较大,造成不同日期气溶胶谱型相差较大;而不同高度的气 溶胶谱型不同,1200m 气溶胶谱呈单峰或双峰分布,1500m-2500m 气溶胶谱呈 双峰分布,3100m-3700m,气溶胶谱呈单峰分布;云中气溶胶谱呈单峰分布,与 晴空相比,直径小于1.2μm 的气溶胶浓度小,而直径大于1.2μm 的气溶胶浓度较 大。



Fig. 6. Aerosol particle size distributions at different levels.

图 7 为不同高度的平均气溶胶谱分布,可以看出,气溶胶粒子主要集中在小 粒子端,大粒子端的气溶胶浓度较小;低层各粒径段的气溶胶数浓度都比较高, 随着高度的增加各粒径段的气溶胶数浓度都有所减小,特别是小粒子端,气溶胶 数浓度减小非常明显,从而使高层气溶胶中大粒子所占的比例有所增加,从后向 轨迹来看,观测期间低层的气溶胶粒子主要来自近地面的局地排放;而高层的气 溶胶粒子来自西北地区的远距离输送,高层气溶胶大粒子所占比例增加,就是由 于来自西北地区沙尘气溶胶的影响,但整个气溶胶谱型没有明显变化,说明大粒 子气溶胶对本地气溶胶谱型的影响较小。



Fig. 7. Averaged aerosol particle size distributions at different levels.

由以上分析可知, 气溶胶数浓度与 CCN 数浓度的分布趋势较为一致, 因此 我们做了二者的相关性分析。图 8 所示是 5 架次的飞行探测过程中, 气溶胶数浓 度与 CCN 数浓度(过饱和度为 0.3%)相关性分析。CCN 数浓度与气溶胶数浓 度有较好的相关性, 决定系数 R<sup>2</sup>可达到 0.8 以上, 决定系数 R<sup>2</sup>达到 0.9 以上的 有两次, 分别是 2013 年 8 月 3 日和 2013 年 8 月 4 日的飞行探测过程, 决定系数 R<sup>2</sup>分别为 0.91 和 0.96。其余三次的 R<sup>2</sup>都在 0.8-0.9 之间, 为此我们统计了不同 日期气溶胶的平均有效直径, 如表 3 所示,可以看出, 2013 年 8 月 3 日和 2013 年 8 月 4 日探测过程中, 气溶胶粒子的平均有效直径较大,均大于 0.4μm, 而其 余三日气溶胶粒子的平均有效直径都小于 0.4μm, 因此,华北中部夏季垂直方向 上, 气溶胶数浓度与 CCN 数浓度有较好的相关性,并且当气溶胶粒子平均有效 直径大于 0.4μm 时, 气溶胶数浓度与 CCN 数浓度的相关性更好。



图 8 飞机探测过程中, CCN 数浓度与气溶胶数浓度的相关性

Fig. 8. Linear regressions between CCN number concentration and Na in five flights

表 4 垂直探测过程中不同日期气溶胶数浓度与 CCN 数浓度的决定系数及气溶胶有效直径的统计特征

Table 4. Statistical properties for the correlation coefficient values between CCN number concentration,

N.	and	ED
_ <b>⊥</b> ¶ g	anu	LU

日期	2013-08-03	2013-08-04	2013-08-12	2013-08-30	2014-08-12
决定系数 R <sup>2</sup>	0.91	0.96	0.8	0.82	0.89
平均有效直径(μm)	0.51	0.45	0.37	0.35	0.32

气溶胶成为 CCN 的能力与尺度和化学组分有很大的关系。在不了解气溶胶 详细化学组分的情况下,为了进一步了解气溶胶尺度与气溶胶活化能力的关系, 我们分析了 0.3%过饱和度条件下, CCN 比率 (CCN/CN) 与有效直径 (ED) 的 关系。图 9 为 2013 年 8 月 03 日飞行探测时,整个探测过程中 CCN/CN 与 ED 的 关系图。可以看出, CCN/CN 的比率与 ED 呈线性关系,随着 ED 的增大, CCN/CN 的比率也增大,当 ED 为 0.25µm 时, CCN/CN 大约为 0.25,即约 25%的气溶胶 可以作为 CCN,当 ED 为 0.6µm 时, CCN/CN 大约为 0.45,即约 45%的气溶胶 可以作为 CCN,当 ED 为 0.9µm 时, CCN/CN 大约为 0.65,即约 65%的气溶胶 可以作为 CCN,表明尺度越大的气溶胶越容易成为 CCN。



图 9 2013 年 8 月 3 日飞行探测过程中 CCN/CN 与 ED 的关系

Fig. 9. Relationship between CCN/CN and ED during the fight on August 3, 2013.

为了研究不同高度气溶胶的活化能力,分析了低层和高层的 CCN/CN 与 ED 的关系(图 10)。图 10a 为低层(1500m 以下) CCN/CN 与 ED 的关系图,图中 可以看出,低层气溶胶 ED 值较小,大部分集中在 0.5µm 以下,低层 CCN/CN 的比率与 ED 也呈线性关系,随着 ED 的增大,CCN/CN 的比率也增大,当 ED 为 0.25µm 时,CCN/CN 大约为 0.2,即约 20%的气溶胶可以作为 CCN,当 ED 为 0.4µm 时,CCN/CN 大约为 0.35,即约 35%的气溶胶可以作为 CCN;同样,图 10b 为高层(3000 以上)CCN/CN 与 ED 的关系图,图中可以看出,高层气溶 胶 ED 值较大,高层 CCN/CN 也与 ED 呈线性关系,随着 ED 的增大,CCN/CN 也增大,当 ED 为 0.4µm 时,CCN/CN 大约为 0.4,即约 40%的气溶胶可以作为 CCN/CN 也增大,当 ED 为 0.4µm 时,CCN/CN 大约为 0.65,即约 65%的气溶胶可以作为 CCN,当 ED 为 0.9µm 时,CCN/CN 大约为 0.65,即约 65%的气溶胶可以作为 CCN。

由以上分析可以得出, CCN/CN 随着高度增加而增大。CCN 活化率受到气溶 胶粒子尺度和气溶胶化学成分的影响, Fitzgerald et al. (1973)和 Kuwat et al. (2008)

等研究表明粒子尺度对活化率的影响高于化学成分的影响。本文中不涉及化学成分的研究,从物理的角度来讲,过饱和度较高的情况下,CCN/CN 受到粒子尺度影响很大。故虽然低层和高层粒子来源不同,但由于高层粒子尺度较大,受到粒子尺度的影响,高层 CCN/CN 的值较大。



图 10 2013 年 8 月 3 日飞行探测过程不同高度 CCN/CN 与 ED 的关系(a) 1500m 以下,(b) 3000m 以上 Fig. 10 Relationships between CCN/CN and ED of different levels (a for 0-1500m, b for 3000-4000m) during the flight on August 3, 2013

### 3.3 云下气溶胶、CCN 浓度与云中云滴数浓度的关系

CCN 活化谱是 CCN 数浓度随过饱和度的变化曲线, CCN 数浓度观测的一 个很重要的应用就是 CCN 活化谱。通常用经验公式 N=CS<sup>K</sup>来拟合,其中,C、 K 为拟合参数,N 为过饱和度 S 下的 CCN 数浓度,气溶胶粒子的尺度或化学组 分的信息隐含在拟合参数 C、K 之中。根据拟合参数 C、K 的值,把 CCN 活化 谱分为海洋型(C<1000 cm<sup>-3</sup>,K<1)、过渡型(1000 cm<sup>-3</sup><C<2000 cm<sup>-3</sup>,K>1)、大 陆型(C>2200 cm<sup>-3</sup>,K<1) 三种。

云下气溶胶粒子能否成为 CCN,对云的形成及云的微物理特征有重要的意义。在以往的研究中,很少有在云底之下 300m 范围内直接对气溶胶和 CCN 进行观测,所以本次对 CCN 活化谱的研究所选取的观测位置是位于云底之下 100m-300m 范围和云外的区域,图 11 中 2014 年 7 月 15 日是在云外做的观测,高度 3700m 做水平飞行,2014 年 7 月 19 日是在云底之下 100m (高度为 3100m)做云底之下保持高度水平盘旋飞行,过饱和度分别设置为 0.4、0.6、0.8。C、K 值如表 4 所示,2014 年 7 月 15 日的云外观测属于过度型活化谱,过饱和度分别设置为 0.2、0.4、0.6。2014 年 7 月 19 日的云底之下观测属于清洁大陆型活化谱,

而封秋娟<sup>[21]</sup>等对山西省地面做的 CCN 活化谱属于典型大陆型活化谱。



Fig. 11. The CCN spectrum were observed below cloud bases and the environment.

#### 表 5 CCN 活化谱拟合参数值

#### Table 5. Parameters of CCN Spectrum

日期	位置	С	К	$R^2$	类型
2014-07-15	空中云外	1970	2.1	0.99	过渡型
2014-07-19	空中云底之下 200m	679	0.61	0.84	清洁大陆型
2008-10-17 <sup>[21]</sup>	地面	20393	0.86		大陆型

气溶胶不仅对云的形成及云的宏微观特征有重要的影响,气溶胶还可以通过 影响云的宏微观特征而影响气候,而气溶胶对云的影响又具有很大的不确定性, 本研究想通过对云下气溶胶粒子与云底之上的云滴粒子进行观测,确定气溶胶粒 子与云滴粒子的转化关系。气溶胶粒子能否活化成为云滴粒子,与气溶胶粒子的 物理化学性质、环境过饱和度以及上升速度等有关系,本研究只做了气溶胶浓度、 CCN 浓度和云滴浓度的观测分析。

利用 2014 年 8 月 11 日的观测资料,分析了气溶胶数浓度与云滴数浓度以及 CCN 数浓度与云滴数浓度之间的关系。本次观测的飞行方式是在云底之下 200m (高度为 3400m)做保持高度水平盘旋飞行,大约水平盘旋 5min 之后从云底入 云,在云底之上 100m (高度 3700m)做保持高度水平盘旋飞行。在云底之下盘 旋平飞为了获取气溶胶和 CCN 的观测资料,在云底之上盘旋平飞为了获取云滴 粒子的观测资料。在不了解实际过饱和度、上升速度以及气溶胶化学组分的情况 下,我们希望在气溶胶和云滴之间找到一种简单的线性关系,如图 12 所示,拟 合方程为 y=1.3x-616.3,拟合相关系数为 0.96,计算得到气溶胶转化为云滴的比 率为47%。

此外,本次研究还做了在固定过饱和度 0.3%条件下,CCN 数浓度与云滴数 浓度之间的关系,如图 13 所示,拟合方程为 y=1.6x-473.8,拟合相关系数也为 0.96,计算得到 CCN 转化为云滴的比率为 69%。



图 12 云底之下 200m 高度层气溶胶数浓度与云底之上 100m 高度层云滴数浓度的关系

Fig. 12. Relationship between Na and Nc near cumulus cloud base



图 13 过饱和度 0.3%条件下云底之下 200m 高度层 CCN 数浓度与云底之上 100m 高度层云滴数浓度的关系 Fig. 13. Relationship between the CCN number concentration (0.3% supersaturation) and cloud droplet number concentrations near cumulus cloud base

### 4. 结论

本文分析了山西省9架次的夏季云物理飞机探测资料,得到如下主要结论:

(1) 大气边界层逆温层结对大气气溶胶粒子的垂直分布有重要的影响。当大气边界层有逆温存在时,边界层内气溶胶粒子数浓度高且气溶胶有效直径在边界层内比较均匀;当大气边界层无逆温层结时,气溶胶粒子可随大气垂直输送到较高的高度,边界层内气溶胶数浓度较小。有逆温时,边界层内气溶胶数浓度大约为无逆温时的2倍;两类气溶胶数浓度的垂直分布都呈随高度增加而减小的趋

势。相同日期里 CCN 数浓度的垂直分布趋势与气溶胶数浓度的垂直分布趋势基本一致,有逆温时,边界层内 CCN 数浓度大约为无逆温时 1.5 倍。

(2) 华北中部夏季高层一般受到来自西北或蒙古等地的气团影响,造成晴空 时高层气溶胶尺度大,平均有效直径在 0.45µm 以上,有云时,高层尺度较大的 气溶胶活化成为云滴,造成高层气溶胶尺度小,平均有效直径在 0.35µm 以下; 低层气溶胶以局地排放为主时,气溶胶尺度小,平均有效直径在 0.4µm 以下。

(3) 气溶胶谱型在低层差异较大而高层基本一致;因为低层受局地排放的气溶胶影响较大,造成不同日期气溶胶谱型相差较大;而不同高度的气溶胶谱型不同,1200m 气溶胶谱呈单峰分布,1500m-2500m 气溶胶谱呈双峰分布, 3100m-3700m,气溶胶谱呈单峰分布;云中气溶胶谱呈单峰分布。与晴空相比, 直径小于1.2µm 的气溶胶浓度小,而直径大于1.2µm 的气溶胶浓度大。低层气溶 胶各粒径段的粒子浓度均高于高层,高层气溶胶由于受到来自西北地区沙尘气溶 胶的影响,大粒子所占比例增加,但整个气溶胶谱型没有明显变化,说明大粒子 气溶胶对本地气溶胶谱型的影响较小。

(4) 垂直方向上,气溶胶数浓度与 CCN 数浓度有较好的相关性,相关系数 都在 0.8 以上,并且当气溶胶粒子平均有效直径大于 0.4µm 时,气溶胶数浓度与 CCN 数浓度的相关性好于气溶胶粒子平均有效直径小于 0.4µm 的情况。2013 年 8 月 03 日整个探测过程中 CCN/CN 与 ED 呈线性关系,随着 ED 的增大,CCN/CN 也增大,并且低层、高层均表现出这种关系。气溶胶粒子尺度是影响 CCN/CN 的重要因素。

(5) 用 N=CS<sup>K</sup> 拟合得到的山西地区空中 CCN 活化谱参数, 云外属于过度型 核谱, 云底之下 300m 范围内属于清洁大陆型核谱。

(6) 积云云下气溶胶与云滴的线性拟合方程为 y=1.3x-616.3, 拟合决定系数为 0.96, 气溶胶转化为云滴的比率为 47%。过饱和度 0.3%条件下, 云下 CCN 与 云滴的线性拟合方程为 y=1.6x-473.8, 拟合决定系数也为 0.96, CCN 转化为云 滴的比率为 69%。

#### 参考文献(References)

蔡兆鑫,蔡淼,李培仁,等. 2019.大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究 [J].大气科学,43(06):1191-1203. Cai Z X, Cai M, Li P R, et al. 2019. Aircraft Observation Research on Macro and Microphysics Characteristics of Continental Cumulus Cloud at DifferentDevelopment Stages[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 43(6): 1191-1203.

- 蔡兆鑫, 蔡淼, 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 45(2): 393-406.
- 陈鹏飞, 张蔷, 权建农,等. 2012. 北京上空气溶胶浓度垂直廓线特征[J]. 环境科学研究, 25(011):1215-1221. Chen P F, Zhang Q, Quan J N, et al. 2012. Vertical Profiles of Aerosol Concentration in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 25(11):1215-1221
- Chuang P Y, Collins D R, Pawlowska H, et al. 2000. CCN measurements during ACE 2 and their relationship to cloud microphysical properties[J]. Tellus B, 52(2): 843-867.
- Deng Z , Zhao C , Qiang Z , et al.2009. Statistical analysis of microphysical properties and the parameterization of effective radius of warm clouds in Beijing area[J]. Atmospheric Research,, 93(4):888-896.
- 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(03):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 Environmental Science, 41(03):1024-1033.
- 段婧,楼小凤,陈勇,等. 2019. 基于航测的珠三角气溶胶垂直分布及活化特性[J].应用气象学 报,30(06):677-689. Duan J, Lou X F, Chen Y, et al. Aircraft measurements of aerosol vertical distributions and its activation efficiency over the Pearl River Delta[J]. Appl Meteor Sci, 30(6): 677-689.
- 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[J]. Climate and Environmental Research, 12.(1): 49-62.
- 封秋娟, 李培仁, 樊明月, 等. 2012. 华北部分地区云凝结核的观测分析[J]. 大气科学学报, 35:533-540. Feng Q J, Li P R, Fan M Y, et al.2012. Observational analysis of cloud condensation nuclei in some regions of North China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 35:533-540.

- Fitzgerald, James, W. 1973. Dependence of the Supersaturation Spectrum of CCN on Aerosol Size Distribution and Composition[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 30(4), 628-634.
- Gunn R, Phillips B B. 1957. An experimental investigation of the effect of air pollution on the initiation of rain[J]. Journal of Meteorology, 14(3): 272-280.
- 郝囝,陈景华,濮梅娟,等.2019.华东地区夏季云微物理结构的飞机观测分析[J].气象科学, 39(04):524-531. Hao J, Chen J H, Pu M J, et al. 2019. Aircraft measurements of microphysical properties of clouds over eastern China in summer[J]. Journal of the Meteorological Sciences,39(4):524-531.
- Hudson, James G. 1993. Cloud condensation nuclei over the Springtime Arctic[J]. Journal of Applied Meteorology; 32.4:596-607.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis.[M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge:Cambridge University Press,145pp.
- Kuwata M , Kondo Y , Miyazaki Y , et al. 2007. Cloud condensation nuclei activity at Jeju Island, Korea in spring 2005[M]. Springer Netherlands, 8,2933-2948.
- 李军霞, 李培仁, 陶玥,等.2014. 山西春季层状云系数值模拟及与飞机探测对比[J]. 应用气象 学报, 25(1):22-32. Li J X, Li P R, Tao Y, et al. 2014. Numerical simulation and flight observation of stratiform precipitation clouds in spring of Shanxi Province. J Appl Meteor Sci, 25(1): 22-32.
- Li J, Yin Y, Li P, et al. 2015. Aircraft measurements of the vertical distribution and activation property of aerosol particles over the Loess Plateau in China[J]. Atmospheric Research, 155:73-86.
- 卢广献, 郭学良. 2012. 环北京春季大气气溶胶分布, 来源及其与 CCN 转化关系的飞机探 测. 科学通报, 57.(15): 1334-1344. 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)[J]. Chin Sci Bull, 57.(15): 1334-1344.
- 马新成,毕凯,田海军,等.2016.北京地区沙尘天气气溶胶飞机观测特征[J].气象科 技,44(01):95-103. Ma X C, Bi K, Tian H J, et al. 2016. Aircraft Measurements of Aerosol Characteristics during Dust Evens in Bejing[J]. Meteorological Science and Technology, 44(01):95-103.
- O'Dowd C D, Lowe J A, Smith M H, et al. 1999. The relative importance of non sea salt sulphate and sea salt aerosol to the marine cloud condensation nuclei population: An

improved multi - component aerosol - cloud droplet parametrization[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 125(556): 1295-1313.

- 庞朝云,张丰伟,张建辉,等.2016.甘肃夏季不同天气系统层状云的微物理结构特征[J].兰州大学 学报(自然科学版), 52(02):227-234. Pang C Y, Zhan F W, Zhang J H, et al. 2016. The microphysical structure of stratiform cloud in different weather systems in Gansu in summer[J].Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 52(02):227-234.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Kiehl J T, et al. 2001a. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. science, 294(5549): 2119-2124.
- Ramanathan V, Crutzen P J, Lelieveld J, et al. 2001b. Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo - Asian haze[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012), 106(D22): 28371-28398.
- Rosenfeld, Daniel. 1999. TRMM observed first direct evidence of smoke from forest fires inhibiting rainfall. Geophysical research letters, 26.(20): 3105-3108.
- Rosenfeld, Daniel. 2000. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution. Science, 287.(5459): 1793-1796.

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 Condensations Nuclei in North China[J]. Acta Meteorologica Sinica,65 (4): 644-652.

Snider J R, Brenguier J L. 2000. Cloud condensation nuclei and cloud droplet measurements during ACE - 2[J]. Tellus B, 52(2): 828-842.

Squires P. 1958. The microstructure and colloidal stability of warm clouds[J]. Tellus, 10(2): 262-271.

- Squires P, Twomey S. 1960. The relation between cloud droplet spectra and the spectrum of cloud nuclei[C]//Physics of Precipitation: Proceedings of the Cloud Physics Conference, Woods Hole, Massachusetts, Eds. American Geophysical Union,: 211-219.
- 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(05):705-713. Sun X, Yin Y, Sun Y W, et al. 2011. An observational study of aerosol particles tlsing aircroft over Shijiazhuang Area in clean and hazy days during spring[J].China Environmental Science, 31(05):705-713.
- Terliuc, B., Gagin A. 2010. Cloud Condensation Nuclei and their Possible Influence on Precipitation[J]. Journal of Applied Meteorology, 10 (3): 474-481.
- Warner J. 1968. A reduction in rainfall associated with smoke from sugar-cane fires-An inadvertent weather modification[J]. Journal of Applied Meteorology, 7(2): 247-251.

- Warner J, Twomey S. 1967. The production of cloud nuclei by cane fires and the effect on cloud droplet concentration[J]. Journal of the atmospheric Sciences, 24(6): 704-706.
- Yang J, Li J, Li P et al., 2020, Spatial Distribution and Impacts of Aerosols on Clouds Under Meiyu Frontal Weather Background Over Central China Based on Aircraft Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125,e2019JD031915.
- 杨怡曼,周毓荃,蔡兆鑫.2020. 气溶胶垂直分布及活化特性的飞机观测个例研究[J].气象, 46(09):1199-1209. Yang M Y, Zhou Y Q, Cai Z X. 2020. A Case Study of Aircraft Observation of Aerosol Vertical Distribution and Activation Characteristics[J]. Meteorological Monthly, 46(09):1199-1209.
- Zhang, Q, Quan J, Tie X, et al. 2011. Impact of aerosol particles on cloud formation: Aircraft measurements in China. Atmospheric Environment, 45(3): 665-672.
- Zhang Q, Zhao C, Tie X, et al. 2006. Characterizations of aerosols over the Beijing region: A case study of aircraft measurements[J]. Atmospheric Environment, 40(24):4513-4527.
- 张瑜,银燕,石立新,等.2011.河北地区秋季气溶胶飞机探测资料分析[J].气象科学, 31(06):755-762. Zhang Y, Yin Y, Shi L X, et al. 2011. An Observational Study of the Aerosol Distributions over Hebei area during autumn[J]. Journal of the Meteorological Sciences, (6):755-762.

