

# 石家庄地区雾霾天气下云滴和云凝结核的分布特征

孙霞<sup>1</sup>, 银燕<sup>1\*</sup>, 韩洋<sup>1</sup>, 肖辉<sup>1</sup>, 孙玉稳<sup>2</sup>, 李宝东<sup>2</sup> (1.南京信息工程大学, 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044; 2.河北省人工影响天气办公室, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 2009年5~10月在石家庄地区对雾霾天气下的近地面到高空的云雾滴和云凝结核(CCN)进行了7架次飞机探测.利用PMS云粒子测量仪器、机载温湿仪和连续气流纵向热梯度云凝结核仪获得的云雾粒子和云凝结核(CCN)探测资料,分析了层积云(Sc)和高积云(Ac)中云粒子浓度、液态含水量、粒子算术平均直径和粒子有效平均直径的垂直分布特征;分析了CCN垂直和水平分布特征以及谱分布.结果表明雾霾天气状况下,云滴数浓度在 $10^2$ 个/cm<sup>3</sup>量级上.高云粒子粒径总体大于低云粒子.云含水量平均值范围为0.03~0.14g/m<sup>3</sup>,地面到600m高度内,CCN值的平均值为 $3034\text{cm}^{-3}$ (过饱和度 $S=0.3\%$ ).对CCN的活化谱进行拟合表明石家庄属于典型大陆性核谱,云对CCN有消耗作用,逆温层的存在使得该区CCN浓度累积增加.

**关键词:** 石家庄地区; 云粒子; 云凝结核; 分布特征; 飞机探测

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)07-1165-06

**Distribution characteristics of cloud particles and cloud condensation nuclei during haze/fog events in Shijiazhuang.** SUN Xia<sup>1</sup>, YIN Yan<sup>1\*</sup>, HAN Yang<sup>1</sup>, XIAO Hui<sup>1</sup>, SUN YU-wen<sup>2</sup>, LI Bao-dong<sup>2</sup> (1.Key Laboratory for Atmospheric Physics and Environment, China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Weather Modification Office of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, China). *China Environmental Science*, 2012,32(7): 1165~1170

**Abstract:** Cloud droplets and cloud condensation nuclei (CCN) over Shijiazhuang area, Northern China, were measured based on airborne instruments during May to October, 2009. The data obtained from 7 flights were used to analyze the characteristics of number concentration, liquid water content, the mean diameter and the effective diameter of cloud droplets, as well as the spatial, temporal and spectral distribution of CCN in stratocumulus and altocumulus clouds under foggy/hazy weather conditions. The results show that the number concentration of cloud droplets was in the  $10^2$  orders of magnitude high under foggy/hazy weather conditions, and that the sizes of cloud particles measured at higher levels were larger than that at lower levels. The mean values of the cloud water content calculated from the droplet size spectra were between 0.03 to 0.14g/m<sup>3</sup>, and the mean value of CCN concentration averaged between the surface and at 600m high was  $3034\text{cm}^{-3}$  (for supersaturation of 0.3%). The size distribution of CCN was fitted with a power law function and was shown of continental type. The results also show that clouds had a scavenging effect on CCN, but the CCN concentration could be increased remarkably due to present of an inverse layer.

**Key words:** Shijiazhuang area; cloud droplets; cloud condensation nuclei; distribution characteristics; aircraft measurements

云对大气起着重要的动力和热力作用,云的潜热释放、降水以及辐射作用都受云内微物理过程影响,这些过程包括暖云粒子和冰相粒子的形成、增长及其间相互作用<sup>[1]</sup>.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<sup>[2-3]</sup>.

机载粒子测量系统(PMS)在20世纪70年代开始投入国际上的一些云系观测试验<sup>[4-5]</sup>.我国于

收稿日期: 2011-10-24

基金项目: 公益性行业(气象)科研专项(GYHY(QX)2007-6-36);江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

\* 责任作者, 教授, yinyan@nuist.edu.cn

20世纪80年代初期开始在一些观测试验中使用PMS系统<sup>[1]</sup>。目前国内对云微物理结构飞机探测多是结合人工影响天气作业来展开的<sup>[6-9]</sup>。而对云凝结核的观测,多是以地面观测和飞机观测结合展开<sup>[10-15]</sup>。

霾天气下的高气溶胶粒子浓度更能显著影响地球表面和大气中的辐射平衡,通过改变云凝结核浓度和组成来间接影响气候<sup>[16]</sup>。雾霾期间对云雾滴和云凝结核物理特性进行观测研究是准确认识雾霾过程的环境效应的基础。杨军等<sup>[17]</sup>利用2007年南京冬季雾霾转换过程的大气气溶胶和雾滴尺度谱分布同步观测资料进行分析得出粗粒子的数浓度、表面积浓度和体积浓度在霾阶段浓度最低。

云雾滴及CCN浓度具有很大的地域差异,对当地云和降水进行准确预报及人工影响,需要对该地云雾滴及CCN分布特征进行系统研究,从微物理过程上认识云和降水发展演变机制、降水效率及人工影响潜力。专门针对雾霾天气下的云雾滴和云凝结核研究甚少。2009年5~10月,河北省人工影响天气办公室利用改装后的夏衍-III飞机搭载云物理探测仪器在石家庄地区上空进行了云雾滴和CCN的飞机观测,本文采用其中7架次雾霾天气下的探测数据进行云雾滴和CCN的分析,为霾天气下的云雾滴和云凝结核的数值模拟研究提供观测事实。

## 2 飞机探测与分析方法

### 2.1 探测仪器

FSSP-100-ER探头主要用于测量云粒子,其测量的粒子直径范围为1~95 $\mu\text{m}$ ,分为4个量程,每个量程内又等分为15个测量通道,该探头的最小分辨率为1 $\mu\text{m}$ (采用量程3),有效采样面积为0.310 $\text{mm}^2$ ,可以直接测量运动速度为20~125 m/s的粒子<sup>[18]</sup>。本文分析的数据是使用FSSP-100-ER探头在量程设置为1情况下采集的,此时测量范围为2~47 $\mu\text{m}$ ,每通道间隔为3 $\mu\text{m}$ 。

河北省人工影响天气办公室自2004年起采用美国DMT公司生产的CCN仪,装载在经改装后的夏衍-III飞机上。DMT CCN仪的核心部分是一个高50cm、内径2.3cm的圆柱形连续气流纵向热梯度云室<sup>[19]</sup>。DMT CCN仪在飞机和地面均可使用,设置的S范围为0.1%~2.0%。可以设置单一S进行连续测量,也可以设置最多5个不同S进行连续循环测量,计数频率为1Hz<sup>[12]</sup>。

### 2.2 飞行概况

本研究采用2009年5~10月7架次雾霾天气下的飞机探测数据进行分析。观测期间CCN探测仪设置的单一观测时过饱和度(S)为0.3%,循环观测设置的S为0.1%、0.3%、0.5%和1%。表1为7次探测的宏观记录,飞机观测高度一般能达到6900,主要探测区域在石家庄市和南部周边县市,飞行时间在上午、中午和晚上,最长飞行时间188min,最短141min。垂直地面方向上的飞行路线基本上采用爬升—平飞—爬升方式。

表1 探测飞行概况

Table 1 Flight survey

日期	探测时间	天气现象	探测区域	探测高度范围(m)	温度区间( $^{\circ}\text{C}$ )	0 $^{\circ}\text{C}$ 层(m)
2009-05-14	14:18:21~17:08:10	雾	石家庄、邢台、邯郸	6917	-13.79~17.36	5106
2009-09-03	10:14:47~12:35:57	雾	石家庄	5121	0.18~21.94	/
2009-09-14	10:36:25~13:10:07	轻雾、霾	石家庄	6043	-8.72~28.39	3770
2009-09-28	14:52:26~17:40:51	霾	石家庄	6959	-18.58~24.44	4043
2009-10-10	19:59:23~22:54:38	阴霾	石家庄、邯郸、邢台	6933	-18.96~20.57	2919
2009-10-11	09:58:58~13:07:27	轻雾	石家庄、邯郸、邢台	6931	-21.61~17.34	3021
2009-10-25	14:51:28~17:39:40	重霾	石家庄	6936	-30.53~23.40	3157

注:“/”表示缺失

### 2.3 分析方法

根据前人的研究,定义云的出现有几种标准,

例如 a) $N>10$ 个/ $\text{cm}^3$ ; b) $\text{LWC}>0.01\text{g}/\text{m}^3$ ; c) $N>0.1$ 个/ $\text{cm}^3$ ,  $\text{LWC}>0.0005\text{g}/\text{m}^3$ 。本研究中,当  $N>10$  个/ $\text{cm}^3$ ,

LWC>0.001g/m<sup>3</sup>时定义云的出现,其中  $N$  为云滴数浓度,LWC 为液态水含量.云雾滴数浓度  $N$ 、平均直径  $D$ 、有效直径  $R_e$ 、计算含水量 LWC 由下式算出:

$$N = \sum n_i \quad (1)$$

$$D = \sum (D_i \cdot N_i) / N \quad (2)$$

$$R_e = \sum n_i r_i^3 / \sum n_i r_i^2 \quad (3)$$

$$\text{LWC} = \sum n_i r_i^3 \rho_w 4\pi/3 \quad (4)$$

式中:  $D_i$  为  $i$  通道粒子的中值直径, $\mu\text{m}$ ;  $n_i$  为 1 帧内  $i$  通道粒子的个数;  $N_i$  为单位体积内  $i$  通道粒子的数浓度,个/cm<sup>3</sup>;  $\rho_w$  为水的密度;  $N$  为单位体积内粒子总数;  $D$  为粒子算术平均直径,单位为  $\mu\text{m}$ ;  $R_e$  为粒子有效平均直径, $\mu\text{m}$ ; LWC 为计算液态含水量,单位为 g/m<sup>3</sup>.

### 3 结果

#### 3.1 雾霾天气下云雾滴的分布特征

利用 2009 年 5 月 14 日~10 月 25 日 7 架次的飞行资料进行筛选,共找出 4 次云区探测架次,用来研究云微物理特征.

4 架次在整个飞行阶段天气形势及宏观特征如下:2009 年 5 月 14 日石家庄 20h 位于

500hPa 高空槽,700hPa 存在低空切变线及低空急流;2009 年 9 月 3 日石家庄 08:00 位于 500hPa 短波槽,925hPa 有暖脊,地面处于暖平流弱气压场;2009 年 9 月 28 日石家庄地区 20:00 高空 500hPa 存在弱西北气流.2009 年 10 月 10 日 20:00 500hPa 高空冷涡位于贝湖,河套附近有短波槽,石家庄上空为偏西气流,地面处于高压底部.

3.1.1 云粒子的微物理参量 表 2 给出了 4 架次在整个飞行阶段探测到的云粒子的数浓度、算术平均直径、有效直径和计算含水量统计结果.平均值是对探测到的云体进行垂直平均的结果.石家庄雾霾天气下 FSSP-100-ER 探测到的小云粒子浓度均值除 2009 年 9 月 28 日架次都为 10<sup>1</sup> 个/cm<sup>3</sup> 量级,9 月 28 达到 10<sup>2</sup> 个/cm<sup>3</sup> 量级.比范焯等<sup>[20]</sup>对北京地区夏季小云粒子分析的均值浓度大一个量级,和李照荣等<sup>[6]</sup>对西北地区兰州秋季小云粒子分析的均值浓度量级相当.浓度和计算含水量最大值均发生在 9 月 28 日,分别为 1846 个/cm<sup>3</sup>、2.89g/m<sup>3</sup>.平均直径最大值出现在 9 月 3 日,为 14.76 $\mu\text{m}$ .有效直径的最大值为 5 月 14 日的 27.09 $\mu\text{m}$ .粒子直径均值小于北京的 31 $\mu\text{m}$ .霾天气下的云雾滴的计算含水量量级较小,平均值范围为 0.03~0.14g/m<sup>3</sup>.

表 2 雾霾天气下石家庄地区云雾滴的主要微物理参量

Table 2 Micro-physical parameters of cloud particles during haze/fog events in Shijiazhuang area

日期	数浓度(个/cm <sup>3</sup> )		平均直径( $\mu\text{m}$ )		有效直径( $\mu\text{m}$ )		计算含水量(g/m <sup>3</sup> )	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
2009-05-14	31.52	240.08	7.36	12.30	14.76	27.09	0.14	0.45
2009-09-03	71.42	244.46	4.88	14.76	7.16	18.40	0.13	1.53
2009-09-28	130.69	1846.32	1.89	7.24	3.09	10.61	0.05	2.89
2009-10-10	49.34	209.61	3.15	11.04	5.67	19.74	0.03	2.14

3.1.2 云粒子的时空分布特征 如图 1 所示,2009 年 5 月 14 日云粒子数浓度的大值集中在 3 个阶段,分别是 1610~2419m、3000~3740m、6600~6700m.整个云的垂直探测过程中,云粒子浓度在 10~175 个/cm<sup>3</sup> 变化,最大值出现在 2028m 高度上,平均浓度为 43 个/cm<sup>3</sup>.平均直径的分布较不均匀,主要在 3.50~29.50 $\mu\text{m}$  范围内波动,最

大值出现在 6775m 高度上,平均值为 5.26 $\mu\text{m}$ ;2009 年 10 月 10 日云粒子数浓度随高度分布出现若干个峰值,在 10~210 个/cm<sup>3</sup> 范围内变化,最大值出现在 2969m 高度上,平均浓度为 48 个/cm<sup>3</sup>.平均直径大值主要集中在 2750m 高度以上,主要在 1.50~13.50 $\mu\text{m}$  范围内,最大值出现在 5204m 高度上,平均值为 1.76 $\mu\text{m}$ .10 月 10 日云层中在较高

的云粒子浓度下,云滴粒径反而变小.

可以看出霾天气状况下,云滴数浓度在  $10^2$  个/ $\text{cm}^3$  量级上.高空云粒子粒径总体大于低空云粒子,云粒子的平均直径较小.

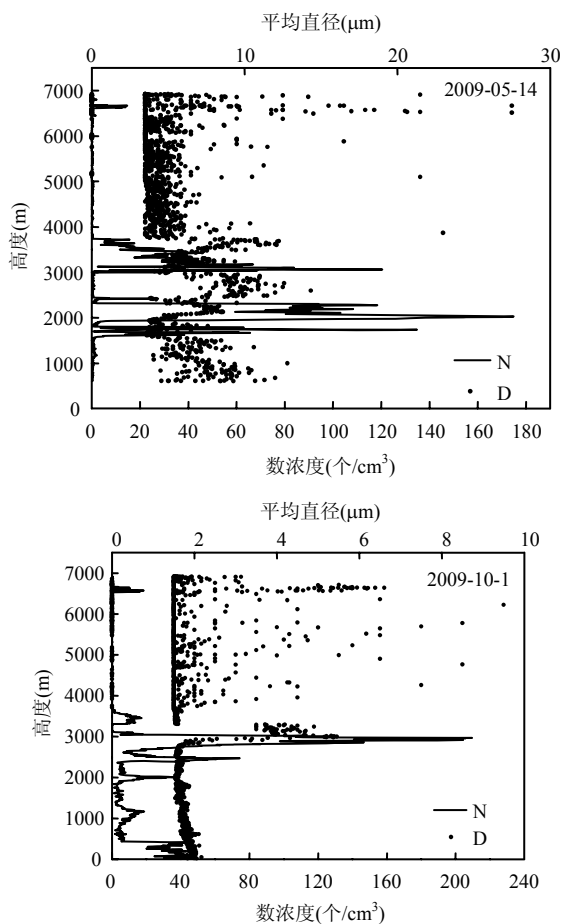


图1 2009年5月14日和10月10日上升阶段云中粒子的浓度和平均直径的垂直分布

Fig.1 Vertical profiles of cloud particle concentration and mean diameter during the ascending phase on May 14 and Oct. 10 in 2009

由图2可见,5月14日1610~2419m高度Sc结构LWC的最大值为  $0.299\text{g/m}^3$ , 10月10日2405~3099m高度间Ac结构LWC的最大值为  $0.165\text{g/m}^3$ .可以看出,云层中的LWC出现极值的高度与图1中云粒子浓度出现极值的高度相对应.结合两架次云体探测的结果来看,霾天气下,高云较低云的的计算含水量低.

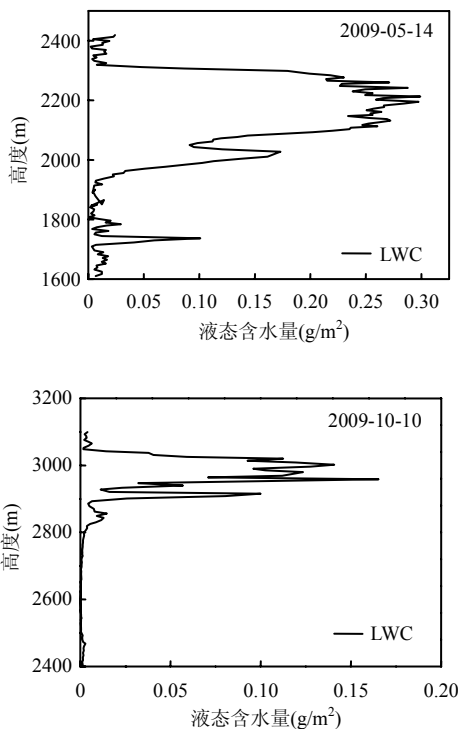


图2 石家庄市上空垂直探测到的云层中计算含水量分布

Fig.2 Vertical profiles of calculated water content in clouds above Shijiazhuang area

(a)2009年5月14日Sc结构(1610~2419m);(b)2009年10月10日垂直探测Ac结构(2405~3099m)

### 3.2 雾霾天气下CCN的分布特征

取距地面600m高度内CCN分布值作为CCN的近地面特征,2009年10月25日石家庄高空气流比较平直,08:00 850hPa有暖脊,地面处于弱气压场,重霾.地面到600m高度内,CCN值的平均值为  $3034$  个/ $\text{cm}^3$ ,最大值为  $3763$  个/ $\text{cm}^3$ ,最小值为  $2299$  个/ $\text{cm}^3$  ( $S=0.3\%$ ),低于夏季地面日均值  $7000$  个/ $\text{cm}^3$  [19].

3.2.1 CCN垂直分布 图3为2009年10月25日石家庄市上空的一次垂直探测结果,可以看出,CCN主要集中在3500m高度范围内,3500~6920m高度范围内CCN浓度均值只有  $10$  个/ $\text{cm}^3$ .近地面至3500m间,CCN浓度随高度的变化可以分为4个阶段,600~950m高度间,CCN浓度处于较高值,在一均值周围上下浮动;950~1580m高度间,CCN浓度随高度增加迅速减小,数值降低了

一个量级,由 2182 个/cm<sup>3</sup> 降至 646 个/cm<sup>3</sup>; 1580~1890m 高度间,CCN 浓度呈增加趋势;1890~3500m 高度间,CCN 浓度垂直分布呈现较为缓慢的下降趋势.这 4 个阶段的 CCN 平均浓度分别为 (2325±134)个/cm<sup>3</sup>、(1164±439)个/cm<sup>3</sup>、(861±80)个/cm<sup>3</sup>、(286±214)个/cm<sup>3</sup>.由于气溶胶的主要源在地面以及大气湍流扩散,使得 CCN 浓度随高度递减,这与石立新等<sup>[12]</sup>的研究结果相一致.温度对 CCN 浓度的影响主要体现在逆温层上,逆温层的存在阻挡了由地面湍流运动上升所带来的 CCN 向上输送,造成 CCN 在逆温层下的累积,CCN 浓度在 1580~1890m 高度间增加与此有关.

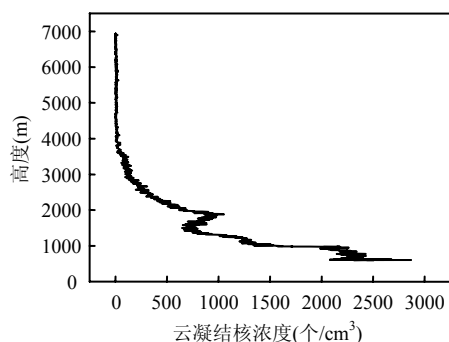


图 3 石家庄市上空 CCN 的垂直分布(2009 年 10 月 25 日,  $S=0.3\%$ )

Fig.3 Vertical profile of CCN above the city of Shijiazhuang (on Oct.25 in 2009,  $S = 0.3\%$ )

邢台市位于河北省南部,是冀南重要的中心城市和新型工业基地.2009 年 10 月 10 日在河北省石家庄市和邢台市上空 CCN 分布进行了同架次对比观测.该日 20:00 500hPa 高空冷涡位于贝湖,河套附近有短波槽,石家庄上空为偏西气流,地面处于高压底部.分析表明,两城市上空的 CCN 浓度都是随高度递减.近地面至 2500m 高度范围内,当  $S=0.3\%$  时,邢台市 CCN 浓度平均值为 1365 个/cm<sup>3</sup>,而石家庄市 CCN 浓度平均值为 651 个/cm<sup>3</sup>.2500~6920m 高度范围内两城市上空的 CCN 浓度垂直分布无显著差异.

**3.2.2 CCN 水平分布** 为研究云内外 CCN 的变化,2009 年 10 月 11 日在正定-邢台区间上空进行了水平穿越淡积云云簇的观测.该日 08:00 石

家庄 500 hPa 高空存在槽前西南气流,处于偏南气流里,地面弱气压场.地面下过雨,湿度大.分析云滴浓度及 CCN 在穿云过程中的水平变化发现,CCN 数浓度的峰值位置对应云滴浓度的谷值位置,穿云时 CCN 浓度明显减少,此时云中的一部分 CCN 活化成云滴,造成云内外 CCN 的显著差异.

对 2009 年 9 月 14 日在石家庄市 600m 高度水平飞行时  $S(0.1\%,0.3\%,0.5\%$  和  $1.0\%)$  循环观测结果进行分析可以发现,CCN 数浓度随过饱和度的增加而呈整体增长趋势. $S$  为  $0.1\%,0.3\%,0.5\%$  和  $1.0\%$  时,CCN 数浓度的平均值分别为 753 个/cm<sup>3</sup>、1285 个/cm<sup>3</sup>、1898 个/cm<sup>3</sup> 和 2856 个/cm<sup>3</sup>.一般 CCN 的活化谱公式可用  $N=CS^k$  表示.式中  $N$  为某一过饱和度下的 CCN 浓度. $S$  为过饱和度(%), $C$  和  $k$  为参数.Hobbs 等<sup>[20]</sup>根据  $C$ 、 $k$  值把 CCN 谱分为大陆型( $C \geq 2200$  个/cm<sup>3</sup>,  $k < 1$ )、过渡型( $1000$  个/cm<sup>3</sup>  $< C < 2200$  个/cm<sup>3</sup>,  $k > 1$ )、海洋型( $C < 1000$  个/cm<sup>3</sup>,  $k < 1$ ).本次观测中该高度拟合的 CCN 活化谱为  $N=2853S^{0.61}$ .可见,石家庄市 CCN 具有典型的大陆性特征.

## 4 结论

**4.1 石家庄雾霾天气下 FSSP-100-ER 探测到的小云粒子浓度均值可达  $10^2$  个/cm<sup>3</sup> 量级,浓度和计算含水量最大值分别为 1846 个/cm<sup>3</sup>、 $2.89\text{g/m}^3$ .算术平均直径和有效平均直径最大值分别为  $14.76\mu\text{m}$ 、 $27.09\mu\text{m}$ .霾天气下的计算的云雾滴的含水量量级较小,平均值范围为  $0.03\sim 0.14\text{g/m}^3$ .**

**4.2 高空云粒子粒径总体大于低空云粒子.云层中的 LWC 出现极值的高度与云粒子浓度出现极值的高度相对应.霾天气下,高云较低云的含水量低.**

**4.3 石家庄和邢台市上空的 CCN 浓度都呈随高度递减趋势.近地面至 2500m 高度范围内,石家庄市 CCN 浓度平均值较邢台市少一个量级;2500~6920m 高度范围内两城市上空的 CCN 浓度垂直分布无显著差异.**

**4.4 CCN 数浓度的峰值位置对应云滴浓度的**

谷值位置,穿云时 CCN 浓度明显减少,此时云中的一部分 CCN 活化成云滴,造成云内外 CCN 的显著差异.石家庄上空的CCN具有典型的大陆性特征.

#### 参考文献:

- [1] 雷恒池,洪延超,赵震,等.近年来云降水物理和人工影响天气研究进展 [J]. 大气科学, 2008,32(4):967-974.
- [2] 段婧,毛节泰.气溶胶与云相互作用的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008,23(3):252-261.
- [3] Twomey S, Squires P. The influence of cloud nucleus population on the microstructure and stability of convective clouds [J]. Tellus, 1959,11:408-411.
- [4] Gordon G L, Marwitz J D, Bradford M. Hydrometeor distributions in California rainbands [C]// Conference on Cloud Physics, Chicago, 1982:207-210.
- [5] Grabowski W, Wu X, Moncrieff M. Cloud resolving modeling of tropical clouds systems during Phase III: Effects of cloud microphysics [J]. J. Atmos.Sci., 1999,56,2384-2402.
- [6] 李照荣,李荣庆,李宝梓,等.兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析 [J]. 高原气象, 2003,22(6):583-589.
- [7] 张佃国,郭学良,付丹红,等.2003 年 8-9 月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究 [J]. 大气科学, 2007,31(4):596-610.
- [8] 王扬锋,雷恒池,樊鹏,等.一次延安层状云微物理结构特征及降水机制研究 [J]. 高原气象, 2007,26(2):388-394.
- [9] 苏正军,黄世鸿,刘卫国,等.一次华北冷涡降水的云物理飞机探测特征 [J]. 气象, 2000,26(6):16-25.
- [10] 赵增亮,毛节泰,魏强,等.西北地区春季云系的垂直结构特征飞机观测统计分析 [J]. 气象, 2010,36(5):71-77.
- [11] 樊曙先,安夏兰.贺兰山地区云凝结核浓度的测量和分析 [J]. 中国沙漠, 2000,20(3):338-340.
- [12] 石立新,段英.华北地区云凝结核的观测研究 [J]. 气象学报, 2007,65(4):643-651.
- [13] 岳岩裕,牛生杰,桑建人,等.干旱区云凝结核分布及其影响因子的观测研究 [J]. 中国环境科学, 2010,30(5):593-598.
- [14] 岳治国,刘贵华,贺文彬,等.晴空云凝结核垂直探测个例分析 [J]. 气象科技, 2011,39(2):231-235.
- [15] 薛丽坤,丁爱军,任宇,等.东北吉林地区云水化学航测研究 [J]. 中国环境科学, 2010,30(9):1162-1167.
- [16] Chung Chul Eddy, Ramanathan V, Kiehl Jeffrey T. Effects of the South Asian absorbing haze on the Northeast Monsoon and surface-air heat exchange [J]. Journal of Climate, 2002,15: 2642-2643.
- [17] 杨军,牛忠清,石春娥,等.南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征 [J]. 环境科学, 2010,31(7):1425-1431.
- [18] 刘卫国,苏正军,王广河,等.新一代机载 PMS 粒子测量系统及应用 [J]. 应用气象学报, 2003,14(13):11-18.
- [19] Roberts G C, Nenes A. A continuous-flow streamwise thermal-gradient CCN chamber for atmospheric measurements [J]. Aeros. Sci. Tech., 2005, 39:206-221.
- [20] 范焯,郭学良,张佃国,等.北京及周边地区 2004 年 8、9 月层积云结构及谱分析飞机探测研究 [J]. 大气科学, 2010,34(6): 1188-1192.
- [21] 段婧,毛节泰.污染城市气溶胶和云凝结核日变化特征分析 [C]//杭州:第 26 届中国气象学会年会人工影响天气与大气物理学分会, 2009:37-41.
- [22] Hobbs P V, Bowdle D A, Radke L F. Particles in the lower troposphere over the high plains of the united states, Part 2:Cloud condensation nuclei and deliquescent particles [J]. Journal of Applied Meteorology and Climate, 1985,42:1358-1369.

**作者简介:** 孙霞(1988-),女,河北石家庄人,南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为大气气溶胶与云降水相互作用、大气成分及其气候效应.发表论文 4 篇.