## 山东省 1989—2008 年 23 架次飞机云 微物理结构观测试验结果<sup>\*</sup>

张佃国<sup>1</sup> 郭学良<sup>2</sup> 龚佃利<sup>1</sup> 姚展予<sup>2</sup> ZHANG Dianguo<sup>1</sup> GUO Xueliang<sup>2</sup> GONG Dianli<sup>1</sup> YAO Zhanyu<sup>2</sup>

1. 山东人民政府人工影响天气办公室,济南,250031

2. 中国气象科学研究院,北京,100081

1. Shandong Weather Modification Office, Jinan 250031, China

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2009-08-03 收稿,2010-03-19 改回.

# Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Gong Dianli, Yao Zhanyu. 2011. The observational results of the clouds microphysical structure based on the data obtained by 23 sorties between 1989 and 2008 in Shandong Province. Acta Meteorologica Sinica, 69(1): 195-207

**Abstract** By using the Particles Measuring System(PMS)via 23-sortie flying the cloud structure in autumn precipitating clouds was sampled from 1989 to 2008 in Shandong Province. The distribution of supercooled water and ice crystal concentration within the clouds is analyzed. The results show that there is high supercooled water in the clouds in Shandong Province with the supercooled water maximum being 0. 36 g/m<sup>3</sup> and the maximum number concentration of ice crystals being 12. 8 – 406 L<sup>-1</sup>. The distribution changes in the could particle concentration, diameter and supercooled water with temperature are also analyzed for the period of 2006 – 2008. The cloud particle spectrum shows that cloud spectrum follows the unimodal distribution, and the maximum concentration values are mainly located in the side of small-size particles.

Key words Autumn precipitation cloud system, Microphysical property, Particle measuring system

摘 要 利用山东省 1989—2008 年 23 架次秋季降水云系云结构的粒子测量系统(PMS)探测试验资料,分析了云中过冷水以 及冰晶浓度的分布特征。结果表明,山东省降水云系中存在较为丰富的过冷水,最大可达 0.36 g/m<sup>3</sup>,云中冰晶浓度最大可达 12.8—406 L<sup>-1</sup>。对 2006—2008 年探测的云粒子浓度、直径及过冷水随温度变化特征进行了分析。云粒子谱分析表明,云粒 子谱为负指数型单峰谱,峰值在小值端。

关键词 秋季降水云系,微物理结构,机载,云粒子测量系统 中图法分类号 P426

## 1 引 言

云中粒子的相态、谱分布特征与演变过程在降 水形成中具有重要作用(Yang, et al, 1995; Pruppacher, et al, 1997; 李娟等, 2004; 石立新等, 2007)。但由于探测困难,有关这方面的系统研究一 直比较少,20世纪70年代以后,机载云粒子测量系统(PMS)研制成功,并应用于云结构的探测研究,相关的研究才逐渐增多。

Houze 等(1979)利用 PMS 对美国温带气旋计 划中锋面云中降水粒子尺度谱分布进行了探测研 究,发现锋面雨带中降水粒子谱符合 M-P 分布。

<sup>\*</sup> 资助课题:国家科技支撑计划课题"混合云人工增雨技术研究"(2006BAC12B02)、山东省气象局重点课题"山东省积层混合云微物理特征分析"(2009sdqxz16)。

作者简介:张佃国,主要从事云降水物理与人工影响天气研究。E-mail zdg131415@sohu.com.

Herzegh等(1980)对美国中纬度气旋云系的中尺度和 微尺度结构做了比较系统的观测研究,给出了2.1— 6.4 km高度层中冷锋雨带各部分降水量的相对值。 Grabowski等(1999)对俄罗斯冬季层状云和人工影响 天气过程进行了飞机探测研究。Wood(2005)研究了 英国边界层云的厚度、液态水路径分布及云粒子浓度 的分布情况。Hobbs等(2007)研究了云中冰晶粒子 浓度分布特征与冰晶的增长机制。

中国在 20 世纪 80 年代引进了 PMS 系统,主要 用于云微物理结构特征的探测和人工增雨作业的物 理效果检验等方面。早期主要开展了中国北方层状 云结构的飞机探测研究(王谦等,1987;游来光等, 1989)。近年来,中国先后引进了多套改进的 PMS 观测系统,在一些省份进行了飞机观测研究。对吉 林降水云系的微物理结构探测个例的分析研究发 现,云中存在明显的过冷水高值区,具有较大的增雨 潜力(齐彦斌等,2007;胡朝霞等,2007;封秋娟等, 2007)。通过飞机观测资料,分析了河北地区云系结 构与增雨潜力,发现西来槽类、冷锋、高空低涡类以 及切变线等天气系统为河北地区的主要降水系统, 并且增雨潜力较大(杨文霞等,2005;石立新等, 2007)。在河南省也进行了飞机人工增雨的物理效 应、云系宏微观特征以及作业增雨效果的研究,结果 显示催化前后云微物理特征有明显的变化。降水 前,云中粒子谱型主要是单峰型,随着云中微物理过 程的发展和降水的形成,粒子谱型逐渐为双峰或多峰 型,粒子浓度明显增高,粒子直径增大(陶树旺等, 2001;李念童等,2001;彭亮等,2007)。1989—1992年 山东省进行了秋季降水云系的研究(王俊等,1999;陈 文选等,1999;胡志晋等,2001;王以琳等,2001),提出 了适合增雨的降水系统、云水转换生长机制和人工增 雨的条件。其他北方省份也作了一些飞机观测研究 (陈万奎等,2001;张佃国等,2007;陈保国等,2002), 并结合数值模式进行了一些理论研究(许焕斌等, 1999;洪延超等,1996;李伦格等,2001;陶玥等,2007)。 这些研究主要集中在云系人工增雨潜力、云中粒子的 形成和转换的机制、降水机制以及效果检验的方法 等,提出了云中降水粒子形成的概念模型,为人工增 雨外场作业提供了有力的科学依据。

以上大部分工作基本局限于飞机探测个例的分 析研究,特别是在山东开展的飞机探测研究,缺乏对 降水云系的垂直结构的系统研究,由于探测个例少, 不利于凝炼飞机人工增雨指标。本文利用山东 1989—2008年23个架次的飞机探测资料,采用统 计方法,分析了云中过冷水含量、冰晶粒子浓度空间 分布特征。并根据2006—2008年的云物理资料,分 析了过冷层中云粒子、冰晶粒子谱分布以及过冷水 的空间分布,提出了飞机人工增雨的最佳作业层。

## 2 仪器和方法

1989—1992年的12架次飞行探测试验采用的 设备是中国气象科学研究院的机载 PMS 云粒子测 量系统,探测设备安装在"AN-26"飞机两侧机翼下 方,共4个探头,分别为ASASP-100(0.12-3.12,  $\Delta D = 0.2 \ \mu m$ , FSSP-100(2-47  $\mu m$ ,  $\Delta D = 3 \ \mu m$ ), 2D-C(25—800  $\mu$ m,  $\Delta D$  = 50  $\mu$ m) 和 2D-P(200— 6400 μm, ΔD = 400 μm); 2006-2008 年租用了中国 科学院大气物理研究所的 PMS 探测设备,取得了 11 架次云微物理资料,该设备有3个探头:FSSP-100、2D-C和2D-P,其量程和测量粒子间隔与中国 气象科学院的探测设备一样,但探测飞机的型号是 "运-12"。另外,飞机上还安装有 GPS, King LWC 热线含水量仪及温压湿传感器,由计算机控制数据 采集、存储和处理,采样速率大。两套设备均可获得 温度、气压、高度和湿度等宏观数据以及云粒子浓 度、尺度和液态水含量等微物理数据。2D-C、2D-P 能够探测二维云粒子图像。机载温度传感器所测温 度与大气实际温度约有3℃的增温误差,我们采用 实测温度分析资料,有利于在实际作业时进行判断。 本文结合天气形势、卫星、雷达等宏观资料,对 FSSP-100、2D-C 探测资料进行了综合分析。

PMS 云微物理参数主要有平均直径、数浓度、 总浓度、液态水含量等,其观测的云粒子计算方 法为

粒子平均直径:  $D_1 = \sum [D_i \times N(D_i)]/N$ 粒子数浓度:  $N(D_i) = n(D_i)/(V \times \Delta D)$ 粒子总浓度:  $N = \sum [n(D_i)/V]$ 液态水含量:

$$C_{\rm lw} = \frac{\pi}{6} \rho \times 10^{-12} \sum \left( D_i^3 N(D_i) \Delta D \right)$$

采样体积:  $V = S_{\rm E} \times T_{\rm AS} \times T$ 

其中, $D_i$ 代表i等级云粒子的中值直径(单位:  $\mu$ m), $N(D_i)$ 为单位体积内i等级云粒子的数浓度 (单位:cm<sup>-3</sup> $\mu$ /m),N为单位体积内云粒子总数(单 位: $cm^{-3}$ ), $n(D_i)$ 为1帧内i等级云粒子的个数,  $T_{AS}$ 为飞机的真空速(单位:cm/s), $S_E$ 为探测设备 的有效采样面积(单位: $cm^2$ ),T为每帧谱数据的取 样时间(单位:s), $C_{lw}$ 为液态含水量(单位: $g/cm^3$ ), 数据为1s采样一次,样本数为采样数据的总和,表 1中统计样本数不同主要是探测设备采样时间不 同,或者是根据需要选择有效数据段,统计最大值为 探测设备取样的瞬时值,平均值为整个飞行时段(除 掉0数据段)的平均值。

## 3 国内外降水云微物理参数比较

#### 3.1 云微物理参数

表1给出了1989-2008年秋季 PMS 探测所测

云微物理参数特征,包括:探测日期、过冷水含量最 大值和平均值,冰晶浓度最大值和平均值及数据样 本数。由表1可见,1989—2008年探测时间段主要 集中在秋季9、10月,共探测23架次,过冷水最大值 范围为0.04(2008年10月22日)—0.361(1989年 9月24日)g/m<sup>3</sup>,平均值范围为0.0024(1992年9 月28日)—0.093(2008年9月19日)g/m<sup>3</sup>。2D-C 探头测量冰晶粒子极大值在12.8(2007年10月27 日)—406(2008年10月5日)L<sup>-1</sup>,平均值范围为 6.29—53.7 L<sup>-1</sup>,由于探测时长不同,有效样本数有 比较大的差异,从2006年10月16日781个到2008 年9月27日13120个。

	表 1 198	9—2008 年秋李	PMS 所测云	微物理参	数特征		
Table 1	The values of the close	ıd microphysical	parameters	sampled w	vith PMS	from 198	9 to 2008

				-		
序号	时间	$LWCmax(g/m^3)$	LWCave(g/m <sup>3</sup> )	$ICEmax(L^{-1})$	$ICEave(L^{-1})$	样本数
1	1989.9.10	0.157	0.0341	23.6	10.5	5493
2	1989.9.21	0.271	0.0206	35.7	12.2	8580
3	1989.9.21	0.134	0.0312	42.6	13.53	6483
4	1989.9.23	0.130	0.0214	83.4	14.38	8284
5	1989.9.24	0.361	0.0403	24.3	7.41	980
6	1989.9.25	0.152	0.0502	35.7	8.24	7895
7	1989.9.25	0.201	0.0198	78.2	12.21	1589
8	1989.9.26	0.164	0.0403	21.0	7.93	6851
9	1989.9.26	0.173	0.0208	47.5	11.6	2658
10	1989.10.10	0.206	0.0652	52.6	13.9	6854
11	1989.10.14	0.138	0.0142	23.4	10.4	4587
12	1992.9.28	0.103	0.0024	35.8	7.82	6754
13	2006.10.16	0.052	0.005	52.6	23.6	781
14	2006.10.18	0.083	0.042	13.4	7.54	1961
15	2007.10.12	0.159	0.0413	101.0	13.7	2318
16	2007.10.27	0.106	0.0492	12.8	6.29	8850
17	2008.9.19	0.148	0.093	48.3	15.4	3932
18	2008.9.27	0.066	0.045	106.0	15.0	13120
19	2008.10.05	0.303	0.069	406.0	32.2	9096
20	2008.10.20	0.134	0.041	99.8	15.9	6883
21	2008.10.21	0.131	0.055	76.3	8.89	10097
22	2008.10.21	0.227	0.053	379.0	53.7	7877
23	2008.10.22	0.040	0.033	35.1	7.3	8772

#### 3.2 过冷水含量

云中过冷水含量是决定人工增雨潜力的重要指标。过冷水含量越高,可播撒增雨潜力越大。为方便比较,表2给出了国内外(金德镇等,2005;吴志会等,1994;王成恕等,1994;WMO/TD-No.537,1992)不同区域飞机探测降水云中过冷水含量最大值和平均值对比情况。可以看出,山东省过冷水含量的最大值、

平均值都比较大,最大值可达0.36 g/m<sup>3</sup>(1989年9月 24日),仅小于英国及中国河北省。平均值范围为 0.0024—0.093 g/m<sup>3</sup>,大于中国其他省份。吉林省、 陕西省和新疆3省区降水云中过冷水最大值、平均值 比较小,最大值分别为0.17、0.24及0.28 g/m<sup>3</sup>,新疆 平均值为0.08 g/m<sup>3</sup>。河北省过冷水含量最大值大于 其他省,可达0.49 g/m<sup>3</sup>,平均值却小于山东省和新疆 地区,为0.04 g/m<sup>3</sup>。美国、加拿大、英国过冷水含量均 小于山东省和河北省,其中英国最大,可达 0.4 g/m<sup>3</sup>, 美国次之,仅为0.21 g/m<sup>3</sup>,加拿大最小,为 0.15 g/m<sup>3</sup>。 综上分析,山东省降水云系过冷水含量比较丰

富,23 架次中观测最大过冷水含量高于 0.1 g/m<sup>3</sup> 架次大于 82.6 %,平均值大于 0.04 g/m<sup>3</sup> 架次大于 56.5 %,说明大部分作业云系中都含有较为丰富的 过冷水,增雨潜力较大。

表 2 国内、外过冷水含量观测比较

Table 2 Comparison between the supercooled water contents observed with the King probes at home and abroad

-	美 国	加拿大	英 国	新 疆	陕 西	吉 林	河 北	山东
LWCmax (g/m <sup>3</sup> )	0.21	0.15	0.4	0.28	0.24	0.17	0.49	0.36
LWCave $(g/m^3)$				0.08			0.04	0.0024-0.093

## 3.3 冰晶浓度

云中自然冰晶浓度是决定人工播云的另一个重要指标。一般来说,自然冰晶浓度越高,可播撒增雨潜力越小。表3是国内外(吴志会等,1994;王成恕等,1994;WMO/TD-No.537,1992)降水云中冰晶浓度最大值、平均值比较情况。山东省23架次探测到的冰晶浓度平均值范围在6.29—53.7 L<sup>-1</sup>,冰晶浓度平均值高于河北省15.6 L<sup>-1</sup>的占17.39 %,高于吉

林省冰晶浓度平均值 26.2 L<sup>-1</sup> 仅占 8.6 %。宁夏自 治区冰晶浓度平均值范围为 26.5—39.6 L<sup>-1</sup>,内蒙冰 晶浓度平均值范围最大可达 46.5 L<sup>-1</sup>。澳大利亚冰晶粒 子浓度平均值范围最大可达 40—130 L<sup>-1</sup>,以色列平 均值范围较小为 1—30 L<sup>-1</sup>。因此,山东省降水云中 冰晶浓度平均值偏低,但部分降水云存在较强不稳定 时,也出现比较大的值(如 2008 年 10 月 5 日探测的 冰晶浓度最大值 406 L<sup>-1</sup>)。

表3 国内、外不同地区冰晶粒子浓度观测比较

Table 3 Comparison between the ice crystal particle concentrations sampled with

the 2D-C probes in the different areas at home and abroad

	宁夏	吉林	陕西	新疆	内蒙	以色列	澳大利亚	河北	山东
平均值 (L <sup>-1</sup> )	26.5-39.6	26.2	28.6	174	46.5	1-30	40—130	15.6	6.29-53.7
最大值(L-1)	410	222	49.5					562	12.8 - 406

山东省 23 架次飞行资料统计得到冰晶粒子浓 度最大值范围为 12.8—406 L<sup>-1</sup>。高于吉林省冰晶 浓度最大值(222 L<sup>-1</sup>)的架次仅占 8.69 %,明显低 于河北省和宁夏自治区。经比较认为,山东省降水 云系中冰晶浓度最大值偏低,云水的自然转化效率 较低,说明可播撒增雨潜力较大,播撒适量冷云催化 剂,可增加冷云的冰核浓度,使更多云水转化为雨 水,提高空中水资源利用效率,缓解山东省水资源严 重不足的问题。

## 3.3 云粒子垂直分布及可播性分析

图 1 给出 2006—2008 年 FSSP-100、2D-C 和 King LWC 所测降水云中云粒子数浓度、平均直径 及过冷水含量随温度分布情况(1 ℃平均资料)。根 据有关云中粒子的相态区分的方法(游来光等, 1994),图 2a 显示的 FSSP-100 所测粒子谱型为连续 变化负指数型单峰谱,在较大值端比较平滑,可以判 别为云滴。在 = 1— = 12 ℃温度层中(图 1a、b),云滴 数浓度基本上大于 20 cm<sup>-3</sup>,集中在 10—100 cm<sup>-3</sup>范 围内,在 = 1 ℃附近出现了云滴数浓度最大值 (300 cm<sup>-3</sup>)。在 = 1— = 5 ℃云滴浓度随温度下降而 减小,直径随温度降低而增大,直径基本在 2— 20  $\mu$ m;在 = 7 ℃左右云滴浓度出现了峰值为 100 cm<sup>-3</sup>,云滴直径随温度降低逐渐减小。 = 1— = 8 ℃温度层中过冷水含量相对稳定,基本在 0.02— 0.08 g/m<sup>3</sup>,有的飞行架次过冷水含量在 = 1 ℃附近 出现峰值,可达 0.16 g/m<sup>3</sup>(图 1c)。冰晶粒子浓度基 本在 20 L<sup>-1</sup>以下(图 1d、1e),并且随温度降低逐渐减 小,少数冰晶浓度超过 20 L<sup>-1</sup>,最大可达 60 L<sup>-1</sup>,冰晶 直径分布比较均匀,大部分稳定在 200—300  $\mu$ m,在 0 ℃层附近部分较小,最小值仅为 75  $\mu$ m。





图 1 2006—2008 年 FSSP-100、2D-C 和 King LWC 探测粒子特征量随温度的分布 (a. 云粒子浓度,b. 云粒子直径,c. 过冷水含量, d. 冰晶粒子浓度,e. 冰晶粒子直径)

Fig. 1 Distributions of the cloud microphysical values as a function of temperature from 2006 to 2008 observed with the FSSP-100,2D-C and King LWC (a. number concentration of cloud particles, b. diameter of cloud particles, c. supercooled water content, d. number concentration of ice crystal particles, and e. diameter of ice crystal particles)

按陶树旺等(2001)提出的可播性指标:当 FSSP-100 所测云粒子浓度  $N \ge 20 \text{ cm}^{-3}$ ,具有可播

撒性,2D-C 所测粒子浓度 N<20 L<sup>-1</sup>,具有较强可 播撒性,N≥20 L<sup>-1</sup>具有可播撒性,山东秋季降水系 统绝大部分都具有较强的播撒性,播撒层基本上在 -2---7℃。

#### 3.4 过冷层粒子谱分布特征

图 2 给出了 2006—2008 年利用 FSSP-100、2D-C探测的山东省降水云过冷层中云滴和冰晶平均 谱分布特征。从图 2a 可以看出,山东省秋季降水云 系内 FSSP-100 探测平均云滴谱型具有一定相似性,呈现负指数型单峰分布,谱宽较宽,可达 45.5 μm,粒子浓度有比较大的差异,峰值在小云滴端。由图 2b 可见,2D-C 探测冰晶粒子谱基本为单峰谱,大冰晶端比较集中,相差不大,峰值在 120 μm 附近。



## 4 典型个例分析

选取 2008 年 10 月两次飞行探测资料进行分析。 2008 年 10 月 5 日降水天气过程是由西北冷空气入侵 造成的。08 时 500 hPa 高空形势在河套地区形成东 北一西南走向的高空槽,山东省处于槽前的暖湿西南 气流中,具有较好的水汽供应条件。700 hPa配合有 切变线,850 hPa存在较弱的气旋性辐合上升气流,有 利于形成地面降水。2008 年 10 月 21 日 08 时 500 hPa主要是西南风,高空中有比较充足的水汽供 应,700 hPa有较弱的切变线,850 hPa 配合辐合上升 气流,在山东省境内形成一次降水天气过程。

## 4.1 雷达探测分析

从 10 月 5 日的雷达回波演变过程看(图 3),降 水云系是一个减弱的过程,降水云带由 08 时 54 分 的两条,逐渐分裂成4条及以上,探测云层雷达回波 呈东北一西南走向,由西北向东南移动,回波间有间 隙,分布不均匀,由测站向外减弱,最大为45 dBz,地 面出现不均匀降水,为典型冷锋降水云系。此次探 测过程基本上都是在云中,探测飞行路线可分为上 升、平飞和下降3个阶段,08 时 30 分从遥墙机场起 飞,11 时 51 分落地,历时 201 min。

图 4 雷达回波表明,10 月 21 日为典型的稳定 性降水云,雷达回波呈块状,回波分布不均匀,山东 北部地区回波较强,最大超过 35 dBz,南部回波较 弱,最大不超过 20 dBz,总的来看,云系也是处于逐 渐减弱阶段,从 GPS 航迹上可以看出,探测范围基 本处于弱回波区,探测路线分为上升、平飞、下降 3 个阶段,09 时 07 分从遥墙机场起飞,12 时 14 分落 地,历时 193 min,地面降水比较均匀。 张佃国等:山东省 1989-2008 年 23 架次飞机云微物理结构观测试验结果



图 3 2008 年 10 月 5 日雷达 PPI 回波图及飞行 GPS 航迹 (a.08 时 54 分, b. 09 时 31 分, c.09 时 56 分, d. 10 时 26 分; 图 c 中白线为 GPS 飞行作业航迹, 航线上箭头指示航向,红点为起降机场,红色箭头标示回波移动方向,蓝框为重点探测区) Fig. 3 Radar PPI and GPS tracks at (a) 08:54 BT, (b) 09:31 BT, (c) 09:56 BT, and (d) 10:26 BT on 5 October 2008 (The white line in Fig. 3c indicates the flight course, red dot is for the landing site, red arrow indicites the moving direction of radar echo, the blue square in Fig. 3c is the key measaring area mark)

## 4.2 云垂直结构特征

为研究云中微物理垂直结构特征,飞机起飞后 先穿云上升至云顶附近(4350 m),然后降低 200 m 高度在云中飞行,再降低高度在0℃附近水平飞行, 最后穿云下降至地面。从10月5日过冷层中云粒 子和过冷水垂直分布特征(图 5a)可见,FSSP-100 所测粒子浓度分布不均匀,随温度呈现多峰变化,在 -7.8—-4.2 ℃(3250—4100 m)层出现小值区,峰 值区分别在 -1 ℃(2600 m)、 -2.3 ℃(2800 m)、 -3.9 ℃(3185 m)和-7.8 ℃(4158 m)温度层附近。 在-4.2-0.5 ℃(2300-3250 m)温度层内平均浓度 约 280 cm<sup>-3</sup>,最大浓度为 888 cm<sup>-3</sup>。对应平均直径 是 4.5 μm, 直径随温度变化在 - 4.2-0.5 ℃(2300-3250 m)比较均匀(约4.5 μm)。在 - 8.4 - - 4.2 ℃ 也呈现多峰变化,峰值区分别出现在-6℃和-8℃ 温度附近,对应在粒子浓度小值区,两者呈现负相关 关系,在-8℃、-1℃粒子浓度峰值区,对应丰富的 过冷水,最大可达0.18 g/m<sup>3</sup>。从 2D-C 资料(图 5b) 可以看出, -7.5-0 ℃温度层内,粒子浓度较小,平 均直径比较相近约 275 μm,随温度的降低分布较为 均匀,在-8.4--7.5 ℃温度层内粒子浓度出现峰 值区,最大可达 406 L<sup>-1</sup>,对应粒子直径也比较大,最 大可达 345 μm。

10月21日采用分层巡回法进行飞机探测获取 数据,先是穿云升至云顶附近,然后飞行 60 km 左右 下降 500 m,折回平飞 60 km,然后再下降 500 m,再 折回飞行 60 km 共 4 层。从图 6a 可以看出,在 -6.3-0 °C (3500-4706 m)FSSP-100 所测粒子浓度 起伏较小,粒子浓度平均值为 100 cm<sup>-3</sup>,在 -0.4 °C (3630 m)、 -4 °C (4386 m)和 -6.3 °C (4706 m)温度 层附近出现 3 个峰值,最大值可达 300 cm<sup>-3</sup>,对应粒 子直径分布不均匀,随温度递减呈现双峰分布,小值 区在 -2.6--1.2 °C (3700-3824 m)和 -6.3--4.1 °C (4357-4706 m)温度层内,基本在 5  $\mu$ m 左 右,在-1℃(3650 m)和-4℃(4360 m)附近出现 峰值区,温度层内平均值约为20μm,最大值可达 42.5 μm, 在粒子浓度峰值区对应较大的过冷水含量, 最大值为 0.16 g/m<sup>3</sup>。



图 4 2008 年 10 月 21 日雷达 PPI 回波图及飞行 GPS 航迹 (a. 08 时 32 分, b. 09 时 16 分, c. 10 时 36 分, d. 11 时 17 分; 图 c 说明同图 3c) As Fig. 3 but at (a) 08:32 BT, (b) 09:16 BT, (c) 10:36 BT and (d) 11:07 BT 21 October 2008.



Fig. 5 Distributions of the cloud microphysical values as a function of temperature on 5 October 2008

(a. number concentration, diameter and LWC observed with the FSSP-100,

b. number concentration and diameter sampled with the 2D-C, c. temperature profile)

在低于-6.3 ℃温度层内,云粒子浓度很小,此 温度层已至云顶。由图 6b(2D-C 资料)可见,粒子 浓度相对集中,随温度变化呈现单峰分布,峰值在 -3.9 ℃(4160 m),最大可达80 L<sup>-1</sup>,对应粒子直径

比较大,平均值约为 265 µm,最大值可达 345 µm, 在 - 3.8—0°C (3560—4136 m)和 - 10.1— - 4.1 ℃(4357—5440 m)温度层内粒子浓度较小,最大仅 为3L<sup>-1</sup>,对应直径比较小。





0

2180 m,

 $0^{\circ}_{1}C$ 



0°C



0

Fig. 7 Plots of the particle shape obtained with the 2D-C probe as a fuction of temperature (a) on 5 October and (b) on 21 October 2008 图 7a 给出了不稳定性降水云系过冷层中二维 粒子图像的垂直变化特征。可见在-8.3—-7.1℃ (4281—4318 m)温度层内,粒子形状为枝状、不规 则形状、小冰针和冰晶聚合体,对应丰富的过冷水层 (图 5a),说明此温度层内可能存在冻结水滴碎裂和 冰晶碰撞碎裂等冰晶形成过程。在-4.8— -2.5℃(2971—3320 m)温度层内,冰晶形状为小 冰针形、不规则形状、柱状,对应过冷水含量较少,基 本在 0.03 g/m<sup>3</sup> 左右,这说明该温度层内小冰针主 要是高层下落冰雪晶碰撞破碎产生,不规则形状冰 晶应该是冰晶聚合形成的。在-1.5—-0.2℃ (2210—2782 m)温度层内,冰晶形状为冰针、圆形 和不规则形,对应丰富的过冷水,小冰针可能是冻结 水滴产生的,圆形冰晶可能是冻结水滴产生的软雹。

从稳定性降水云系过冷层中二维粒子图像的垂 直变化特征(图7b)可以看出,-10—-6.3 ℃ (4706—5400 m)温度层中,冰晶以小冰粒子和不规 则形状冰晶为主,根据宏观观测记录,结合二维粒子 图像,小冰粒子可能是雪花和冰晶碰撞破碎产生的, 不规则形状冰晶应该是冰晶聚合形成的。-4.1— -3.7 ℃(4336—4357 m)温度层内,冰晶以针状、冰 晶聚合体和不规则形状冰晶为主,并且此处对应丰 富的过冷水含量(图6a),说明此温度层应该存在冰 晶碰撞破碎和冻结水滴碎裂等冰晶形成过程。 -2.8—-0.5 ℃(3748—3928 m)温度层中,冰晶以 软雹、针状冰晶和不规则形状冰晶为主,说明软雹是 冻结水滴产生的。

## 4.3 云水平结构特征

图 8 给出了 10 月 5 日 - 8 °C、10 月 21 日 -4 °C温度层 FSSP-100、2D-C 及 King LWC 观测 的云粒子数浓度、平均直径和过冷水含量随时间的 变化及对应二维粒子图像。由图 8a 可见,云粒子水 平分布不均匀,前 60 秒为云粒子浓度峰值区,最大 值为 500 cm<sup>-3</sup>,粒子直径基本在 4.5—8.0  $\mu$ m;60— 180 秒云粒子数浓度平均仅为 5 cm<sup>-3</sup>,粒子直径较 小在 3.5—6.5  $\mu$ m。从图 8c 可以看出,冰晶粒子分 布也不均匀,在 60 秒处出现冰晶粒子浓度大值区, 最大值为 200 L<sup>-1</sup>,直径较大,平均在 200  $\mu$ m 左右, 过冷水含量较小,主要以冰晶聚合体和霰粒子(见图 8c 中圆形较大的冰晶)为主。130 秒处出现冰晶浓度小值区,都小于 40 L<sup>-1</sup>,直径都在 200  $\mu$ m 以下, 对应丰富的过冷水,以不规则形状冰晶和小冰针为 主,未出现冰晶聚合体,说明此处云层较为稳定,冰 晶和过冷水冻结产生很多小冰针。图 8b 表明,云粒 子分布比较均匀,浓度变化不大,浓度最大为 189.8 cm<sup>-3</sup>,最小为 38.3 cm<sup>-3</sup>,粒子直径在 4— 9  $\mu$ m。冰晶分布也是比较均匀,浓度平均值在 20 L<sup>-1</sup>以下,直径较大基本在180—340  $\mu$ m(图 8d), 高值区和低值区冰晶形状有比较大的差异,高值区 以针状冰晶为主,小值区以冰晶聚合体、软雹及不规 则形状冰晶为主。过冷水含量比较小,最大值仅为 0.125 g/m<sup>3</sup>,最小值为 0.105 g/m<sup>3</sup>,差别不大,说明 小值区存在冰晶与冰晶的攀联、碰冻过程。

新疆观测结果(齐彦斌等,2007)表明,云中过冷 层中,直径在3.5-45.5 µm 的粒子,是由液态云滴 和固态云晶(直径小于100 μm)组成。直径在3.5-18.5 µm 的粒子多为液态云滴,直径在 21.5-45.5 μm 范围内多为液固粒子共存。假如直径在 3.5— 18.5µm 的云滴浓度很低或完全没有时,直径在 21.5-45.5 µm 范围内的粒子则是以冰晶为主,浓 度量级为100-10<sup>-3</sup> cm<sup>-3</sup>。由图 9a 可见,山东不稳 定性降水云在-8.3—-7.7 ℃和-4.8—-0.5 ℃ 温度层内存在大于 18.5 µm 的过冷液滴,在 -6.5--5.9 ℃温度层内只有 18.5 µm 以下的过 冷水滴。2D-C(图 9c)探测的粒子浓度大值区在 -8.3--6.8 ℃温度层内,峰值对应粒子直径约为 120 µm,随温度降低有降低趋势,并且高值区对应 丰富的过冷水(图 5a)。稳定性降水云(图 9b)在 -5.5—-0.5 ℃温度层中大部分为小于18.5 µm过 冷液滴,在-0.5℃、-3.5℃温度层中存在大于 18.5 µm 过冷液滴,在-9.9—-5.5 ℃的温度层内 没有小云粒子。2D-C(图 9d)观测的粒子浓度大值 区在-4.1--0.5 ℃温度层内,峰值对应粒子直径 约为150 µm,随温度降低而减小,粒子直径比较大。 因此,山东省地处沿海地带,降水云系水汽条件、热 力条件明显优于新疆。





supercooled water content sampled with the 2D-C on 5 and 21 October 2008 (a. and b. cloud number concentration and diameter, c. and d. number concentration of ice crystal, diameter and supercooled water content; a. and c. are for 5 October b. and d. for 21 October)





Fig. 9 Distribution of the cloud particle spectrum sampled with the FSSP-100 (a,b) and the 2D-C (c,d) at the various temperatures -8 °C (a,c) on 5 October and -4 °C (b,d) on 21 October 2008

## 5 结 论

通过分析 1989—2008 年山东省 23 架次 PMS 探测的云微物理观测资料,得出如下结论:

(1)山东省秋季降水云系过冷水含量是比较丰富的。冰晶浓度偏低,云水的自然转化效率较低,播 撒适量冷云催化剂,增加冷云的冰晶浓度,使更多的 云水转化为雨水,可以达到有效利用空中水资源的 目的。

(2)依据陶树旺等(2000)提出可播性方法,山 东春秋季降水云具有较强的播撒性,播撒层基本上 在-2--7℃温度层。 (3)山东省降水冷云中,小云滴谱型比较相似, 基本为单调单峰谱,最大谱宽都能达到约45.5 μm, 不同架次探测的粒子浓度有比较大的差异,小滴端 相差2-3个量级,峰值在小云滴端。冰晶粒子谱基 本为单峰谱,小冰晶端有近2个量级的变化,大冰晶 端比较集中,相差不大,峰值在120 μm 附近。

(4)不稳定降水云中,云粒子和冰晶粒子浓度、 尺度分布极不均匀,在-9--6.5℃附近存在峰值 区,并且对应高值区有丰富的过冷水存在;稳定性降 水云中,云粒子浓度、尺度分布相对均匀,但是也存 在冰晶浓度高值区在-4℃左右,高值区存在丰富 的过冷水。 张佃国等:山东省 1989—2008 年 23 架次飞机云微物理结构观测试验结果

**致谢:**感谢审稿和编辑部老师耐心细致地审阅了稿件 并提出了宝贵的修改意见。

#### 参考文献

- 陈保国,樊鹏,雷崇典等. 2005. 2002 年秋季陕北地区一次锋面云系 综合探测分析. 气象,31(1): 45-49
- 陈万奎,严采蘩. 2001. 冰相雨胚转化水汽密度差的实验研究. 应用 气象学报,12(增刊):24-29
- 陈文选,王俊,刘文. 1999. 一次冷涡过程降水的微物理机制分析. 应用气象学报,10(2):191-198
- 封秋娟,牛生杰,雷恒池等.2007.吉林省一次层状云降水宏微观特征的观测研究.南京气象学院学报,30(6):771-778
- 洪延超. 1996. 积层混合云数值模拟研究([):模式及其微物理过程 参数化. 气象学报,54(5):545-557
- 胡朝霞,雷恒池,郭学良等.2007.降水性层状云系结构和降水过程的 观测个例与模拟研究.大气科学,31(3):426-439
- 胡志晋.2001. 层状云人工增雨机制、条件和方法的讨论. 应用气象 学报,12(增刊):10-13
- 金德镇,张景红,谷淑芳等. 2005.人工增雨催化物理验证//中国气 象年会 2005 年年会文集.北京:气象出版社,618-629
- 李娟,毛节泰,胡志晋等. 2004. 冰核浓度变化对云辐射的模拟试验. 气象学报,62(1):78-86
- 李仑格,德力格尔. 2001.高原东部春季降水云层的微物理特征分 析.高原气象,20(2):192-196
- 李念童,李铁林,郑宏伟. 2001. 河南省飞机人工增雨试验方案设 计. 应用气象学报,12(增刊): 201-205
- 廖飞佳,张建新,黄钢. 1996. 北疆冬季层状云微物理结构初探. 新疆 气象,16(5):31-33
- 彭亮,姚展予,戴进等. 2007.河南春季一次云降水过程的宏微观物 理特征分析. 气象,33(5):4-11
- 齐彦斌,郭学良,金德镇.2007.一次东北冷涡中对流云带的宏微物 理结构探测研究.大气科学,31(4):622-634
- 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):645-652
- 陶玥,洪延超. 2007. 云中粒子谱形状因子变化对云及降水影响的数 值研究. 气象学报,65(2):222-229
- 陶树旺,刘卫国,李念童等.2001. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究. 应用气象学报,12(增刊):15-22
- 王俊,张连云,陈金敏等.1999.秋季层状云中高值过冷水区的微物理 特征. 气象,25(12):24-27
- 王谦,游来光,胡志晋. 1987. 新疆乌鲁木齐地区冬季层积云研究个 例的观测结果与分析. 气象学报, 45(1):3-12

- 王成恕. 1994.山东省春秋季降水系统的云物理概念特征.山东气象,14(4):8-12
- 王以琳,王俊,龚佃利. 2001. 江淮气旋和冷锋相结合天气过程的宏、 微观结构分析. 应用气象学报,12(增刊): 31-38
- 吴志会.1994.河北省春夏季层状云微物理及人工增雨潜力的初步分 析//云降水物理和人工增雨技术研究.北京:气象出版社
- 许换斌. 1995. 云系模式研究: 云场的宏微观结构模拟. 气象学报, 53 (3): 350-357
- 杨文霞,牛生杰,魏俊国等.2005.河北省层状降水系统微物理结构 的飞机观测研究.高原气象,24(1):85-90
- 游来光,王守荣,王鼎丰等. 1989. 新疆冬季降雪微结构及其增长过 程的初步研究. 气象学报,47(1):74-81
- 游来光. 1994.利用粒子测量系统研究云物理过程和人工增雨条件 //云降水物理和人工增雨技术研究.北京:气象出版社,236-249
- 张佃国,郭学良,付丹红. 2007.2003 年 8—9 月北京及周边地区云系 微物理飞机探测研究. 大气科学, 31(4): 597-610
- 张连云,冯桂利. 1997. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化 条件的研究. 气象,23(5): 3-7
- Grabowski W W, Wu W X, Moncrieff M W. 1999. Cloud resolving modeling of tropical clouds systems during Phase Ⅲ: Effects of cloud microphysics. J Atmos Sci, 56: 2384-2402
- Herzegh P H, Hobbs P V. 1980. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. []: Warm-frontal clouds. J Atmos Sci, 37(3): 597-611
- Houze R A, Hobbs P V, Herzegh P H, et al. 1979. Size distributions of precipitation particles in frontal clouds. J Atmos Sci, 36:156-162
- Peter V Hobbs, Arthur L Rangno. 1985. Ice particle concentrations in clouds. J Atmos Sci, 42(23): 2523-2549
- Pruppacher H R, Klett J D. 1997. Microphysics of Clouds and Precipitation. Kluwer Academic Publishers, 954pp
- WMO/TD No. 537. 1992. Proceedings on WMO Workshop on Cloud Microphysics and Application to Global Change, Toronto, Canada, 10 - 14 August 1992
- Wood R. Drizzle in stratiform boundary layer clouds. Part I : Vertical and horizontal structure. J Atmos Sci, 2005, 62: 3011-3033
- Yang M J, Houze R A Jr. 1995. Sensitivity of squall-line rear inflow to ice microphysics and environmental humidity. Mon Wea Rev, 123: 3175-3193