

李铁林,雷恒池,刘艳华,等. 河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析[J]. 气象,2010,36(9):74-80.

河南春季一次层状冷云的微物理结构特征分析^{*1}

李铁林¹ 雷恒池² 刘艳华¹ 张晓庆²

1 河南省人工影响天气中心, 郑州 450003

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

提 要: 利用 2007 年 3 月 3 日 PMS 粒子测量系统对河南层状云的探测资料, 分析了云的微物理结构特征。结果表明, 云垂直和水平分布不均匀特性很明显。在云的中上部, FSSP-100 测量的小云粒子(云滴、冰晶)最大浓度为 $125 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均值为 $21.3 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 平均直径多在 $6 \sim 20 \mu\text{m}$ 。2D-C 观测大云粒子($50 < d \leq 300 \mu\text{m}$)随高度上升浓度增多, 浓度值变化在 $5.24 \sim 192 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均直径为 $211 \mu\text{m}$ 。此层云中过冷液态水含量变化在 $0.035 \sim 0.118 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 随高度增加过冷液态水含量减少。在云的底部区域, 观测到两个逆温层顶的下方分别存在有云水含量的峰值。由不同高度云粒子谱分析表明, 在 $4046 \sim 4600 \text{ m}$ 高度层, 粒子谱型有负指数型、单峰型、双峰型和多峰型; $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层以下融化带内的粒子谱型多为负指数型; 云的底部粒子谱型以负指数型和单峰型为主。

关键词: 云微物理特征, 飞机探测, 谱分布

Microphysical Characteristics of a Precipitation Process in Henan Province

LI Tielin¹ LEI Hengchi² LIU Yanhua¹ ZHANG Xiaoqing²

1 Henan Weather Modification Center, Zhengzhou 450003

2 Laboratory of Cloud Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmosphere Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: The cloud microphysical data sampled with probes of Particles Measuring System (PMS) on 3 March 2007 in Henan Province are analyzed. The results show that the maximum number concentration of small particles sampled with FSSP-100 probe is 125 cm^{-3} at altitudes of 2875 m to 4600 m. The mean concentration is 21.3 cm^{-3} . The mean diameter is around $6 \sim 20 \mu\text{m}$. The data of 2D-C probe show that the maximum number concentration of large particles changes from 5.24 L^{-1} to 192 L^{-1} . The maximum water content explored with King-LWC probe is $0.035 \sim 0.118 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. The inversion is detected by aircraft ascending and descending on 3 March 2007. There is a peak value of liquid water content (LWC) below the top of the inversion layer. The cloud droplet spectra are analyzed. Both vertical and horizontal distributions in stratiform clouds show obviously inhomogeneous features.

Key words: cloud microphysical property, aircraft observation, size distribution

引 言

层状云微物理结构的探测研究不仅是云和降水

物理研究的重要内容, 而且对科学实施人工影响天气作业也很重要。通过对不同类型云系的云微物理探测, 了解云系微物理结构及产生降水的机制, 有利于有针对性地开展人工增雨作业。不同地区的云和

* 河南省重大科技攻关项目(0522030400)、河南省气象科学技术研究项目(Z200407)共同资助
2009 年 7 月 31 日收稿; 2010 年 5 月 10 日收修定稿
第一作者: 李铁林, 主要从事云降水物理与人工影响天气研究. Email: hnl12005@126.com

降水微物理特征因其气象和地形条件的差异会有不同。叶家东等^[1]对一个中纬中尺度对流复合体层状降水区的微物理结构进行了分析,指出 MCC 层状区内某些部位盛行冰晶聚集体,它们分布在相当厚的过冷气层内(0.5~−14 °C 或更冷),冰晶聚并过程是层状区内降水质点增长的主要机制。金华、彭亮等利用 PMS 探测资料分析了河南层状云中过冷水、云粒子谱等物理量分布特征^[2-4]。陈文选等^[5]对山东一次冷涡天气过程的云物理量分布特征、降水机制进行了分析,指出云中过冷水的含量分布极不均匀。苏正军等^[6]对华北冷涡降水的云物理飞机探测资料分析表明云粒子直径、浓度空间分布等存在不均匀特性,且其降水云系存在明显分层。杨文霞等^[7]对河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究表明,河北省春季层状云降水系统存在不均匀性,表现之一为较强降水云带,在飞机上升和下降过程中两次在 2000 m 左右探测到较强的云内逆温,逆温层顶下方存在云水含量的峰值。党娟、于翡等^[10-11]对甘肃省夏季层状云微物理特征及积层混合云降水的实例做了个例分析和数值模拟分析,这些研究结果反映了不同地区的云和降水微物理特征。

由于河南省所观测的云微物理资料不多,因此对河南省层状云系微物理结构的研究比较少。2007 年春季,按照河南省云水资源开发利用技术研究计划,我们在河南省实施了人工增雨外场综合试验,进行了云和降水的宏微观物理探测。本文使用 2007 年 3 月 3 日所观测的资料,分析了云微物理结构特征及人工增雨潜力。

1 仪器设备和观测情况

使用的探测飞机是国产 Y-12 型飞机,飞行航速为 252 km·h⁻¹,最大爬升高度 7 km。飞机上安装了机载 PMS 云微物理测量仪器,使用了 3 个探头,分别为 FSSP-100 (量程: 2~47 μm)、2D-C (量程: 25~800 μm)、2D-P (量程: 200~6400 μm)。FSSP-100 用于测量云粒子谱,2D-C 和 2D-P 分别用于测量云粒子和降水粒子谱及二维图像。飞机上还安装了 King 热线含水量仪、GPS 卫星定位系统和温、湿度探头。观测仪器能连续记录探测结果,结合 GPS 卫星定位系统资料,可确定出机载仪器探测的云微物理量时空位置。

在降水云系影响期间,郑州、三门峡、驻马店的

新一代多普勒雷达进行了连续观测,郑州 714-CD 雷达侧重对降水云系作了 RHI 观测。全省气象站进行了常规地面观测,郑州、南阳两个探空站作了 3 小时 1 次的加密观测。

探测飞机对位于扶沟、鄢陵、临颖、许昌、新郑的层状云系进行了观测。飞机探测区位于系统的西南气流区,西南气流较强,风速在 18~22 m·s⁻¹,飞机探测路线如图 1 所示。

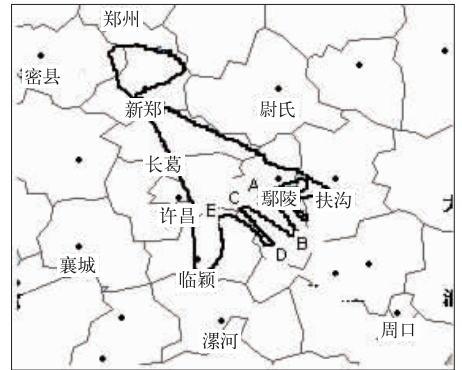


图 1 探测飞机飞行路线图

Fig. 1 Flight trajectory of the aircraft

2 天气形势

2007 年 3 月 3 日 08 时,500 hPa 低槽位于 105°E 附近,河南省受槽前西南气流影响,且风速较大,多在 14~16 m·s⁻¹ 之间。700 hPa 图上,在陕西西南部和四川东北部一带有一低压中心,切变线位于河南南部地区,河南省上空的温度露点差接近饱和,在 08 时到 20 时,由于冷平流的侵入,低压中心发展东北移至山西中南部和河南省北部一带,河南省处于低压前部的西南气流里,风速达 16~18 m·s⁻¹ 的西南急流携带水汽向东北输送至河南省上空,河南省北部和东部地区出现明显的风速辐合,有利于水汽的辐合上升。850 hPa 图上,河南省位于相对湿度大于 90% 的湿区内。地面图上,河南省处在倒槽顶部和东路冷空气的底部,从山东半岛附近不断有冷空气扩散南下影响河南省。受上述系统影响,形成了大范围的层状云降水云系(见图 2),整个云系向东北方向移动,移动速度约 40 km·h⁻¹。飞机探测区在图 2 中所示的矩形区内,探测区地面为东北风,6~8 m·s⁻¹,地面温度 6.6 °C,低空为层云或雨层云,高空为高层云,低云高为 300~600 m。云内温度分布如图 3 所示。

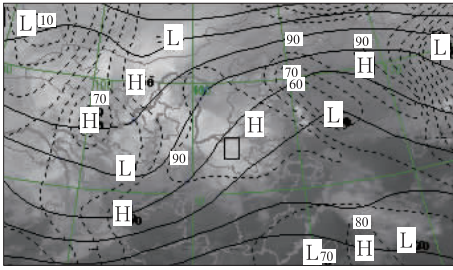


图2 2007年3月3日08时500 hPa高度场、850 hPa相对湿度和FY-2C红外云图

图中实线为500 hPa高度等值线，
虚线为850 hPa相对湿度等值线

Fig. 2 Weather chart at 500 hPa at
0800 BT 3 March 2007

The solid line is geopotential height.
The dashed line is relative humidity

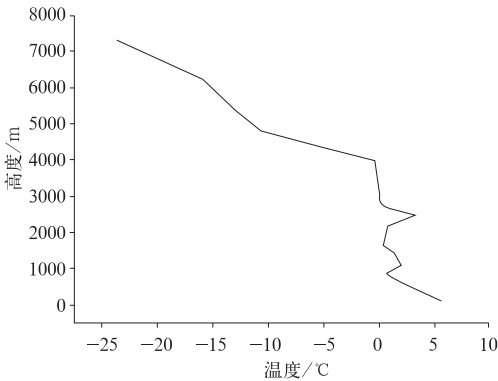


图3 2007年3月14日郑州
上空温度垂直分布图

Fig. 3 Sounding curves of the temperature
at Zhengzhou Station on 3 March 2007

根据郑州714CD雷达观测,降水云系的回波强度为20~35 dBz,郑州南部的回波强度较强,为30

~35 dBz。12:57(时:分)雷达对扶沟方向飞机探测云区做了RHI剖面观测,表明降水云系为典型的层状云回波,平均云顶高约6.5 km,0℃层亮带在2.8 km(14时郑州探空0℃高度在2875 m),亮带的平均回波强度为35~40 dBz。亮带以上的回波强度在20~25 dBz,在5 km到云顶的回波平均强度在10~15 dBz。

3 云微物理量的垂直分布

飞机在12:17:56(时:分:秒)开始起飞,12:20:40上升到975 m,稍平飞后,飞机继续升高。12:53:54上升到4590 m,云中温度为-7.5℃。随后,飞机在4600 m左右平飞。13:13:35,探测飞机从4600 m又开始下降,直到467 m。利用飞机上升和下降过程中的垂直探测资料,对云系不同高度的云微物理特征进行了分析。图4给出了各探头观测的云微物理量随高度的垂直分布,探测高度为400~4610 m。根据探空观测资料,本次观测云系的0℃层高度为2875 m。由FSSP-100探头观测资料表明,在500 m高度处,粒子浓度明显增多,粒子尺度相应增大,因此该高度可以确定为云底的高度。云顶高度约6300 m,由于客观条件限制,飞机仅向上探测到4610 m高度。根据云内温度的垂直分布,对本次观测云系按高度分三个层次分析不同高度云的微物理特征。三个层次分别为从云底所在高度的500~2375 m、2375~2875 m、2875~4600 m。

表1 2007年3月3日FSSP-100、2D-C、2D-P及King热线含水量仪所测的粒子特征

Table 1 Statistical properties of cloud particles sampled with probes
of FSSP-100, 2D-C, 2D-P and using King-LWC on 3 March 2007

高度层/m	探头	$N_{c_max}/\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$	$N_{c_av.}/\text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$	$D_{c_max}/\mu\text{m}$	$D_{c_av.}/\mu\text{m}$	$CLW_{max}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$CLW_{av.}/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
2875~4600	FSSP-100	125	21.3	46	15.88	0.117	0.059
	2D-C	0.28	0.108	788	211		
	2D-P	0.0169	0.01	2280	887		
2375~2875	FSSP-100	229	68.07	36.45	5.89	0.127	0.119
	2D-C	0.061	0.028	753	144		
500~2375	FSSP-100	939	278	36.7	4.79	0.274	0.196
	2D-C	0.319	0.029	706	121		

注: max., av. 表示最大值和平均值。Nc、Dc和CLW分别表示云粒子浓度和直径以及液态含水量

在2875~4600 m高度层,对应温度为0~-7.5℃。FSSP-100测量的小云粒子平均直径多在6~20 μm,且随高度上升而增大。小云粒子总数浓度随高度上升而减少,最大值为125个·cm⁻³。2D-C观测在此高度区间大云粒子(50<d≤300

μm)随高度上升浓度增多,浓度值变化在5.24~192个·L⁻¹,平均值为70.91个·L⁻¹。此高度区间大云粒子平均直径平均为211 μm。2D-P观测到的冰相粒子最大直径在此高度区间出现峰值(3400 μm)。利用King含水量仪观测了该高度层云中液

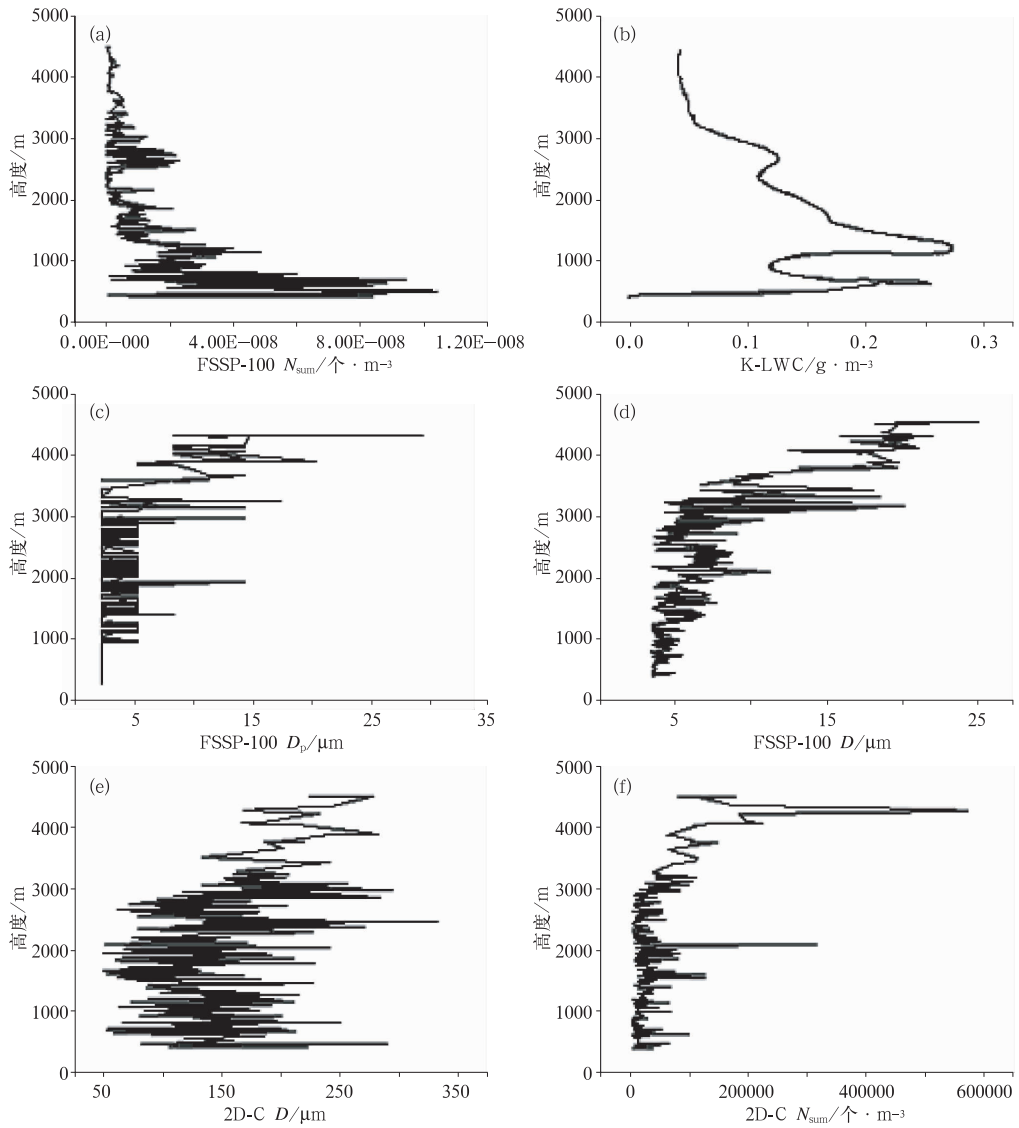


图 4 2007 年 3 月 3 日云微物理量垂直分布

(a) FSSP-100 离子浓度, (b) King 含水量(K-LWC), (c) FSSP-100 粒子峰值直径,
(d) FSSP-100 粒子平均直径, (e) 2D-C 粒子平均直径, (f) 2D-C 离子浓度

Fig. 4 Vertical distributions of cloud microphysical values on 3 March 2007

(a) The number concentration of cloud particles sampled with FSSP-100 probe; (b) King liquid water content (K-LWC); (c) The peak value diameter of cloud particles with FSSP-100 probe; (d) The mean diameter of cloud particles with FSSP-100 probe; (e) The mean diameter of cloud particles with 2D-C probe; (f) The number concentration of cloud particles sampled with 2D-C probe

态含水量, 由于该层温度低于 0°C , 因此该层云中液态含水量为过冷云水。观测资料表明, 此层云中过冷液态水含量变化在 $0.035\sim 0.118\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 随高度增加过冷液态水含量减少。在 $2875\sim 3700\text{ m}$ (对应温度为 $0\sim -0.6^{\circ}\text{C}$) 过冷液态水含量较多, 平均为 $0.094\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, 在 4570 m 高度附近 (对应温度为 -7.5°C) 还有一个平均值为 $0.07\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的过冷液态水含量大值区。从 2D-C 图像上 (图 5) 可以看

出有明显的单个的霰和冰雪晶聚合物。综合分析可见, 在这一高度区间, 随高度上升, 小云粒子数浓度减少, 而冰晶浓度增加。该层是过冷液态水滴与冰相粒子共存的区间, 冰相粒子通过凝华过程而迅速增长。过冷云水量垂直分布很不均匀, 在 $2875\sim 3700\text{ m}$ 和 4570 m 高度附近存在过冷液态水相对高值区。

在 $2375\sim 2875\text{ m}$ 高度层 (0°C 高度层以下 500

m), 对应温度为 $2.2 \sim 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于这里温度高于 0°C , 是降水元的融化区和碰并增长区。2D-C 图像上(图 5) 可以看出有半融化的冰相粒子和液态水滴。FSSP-100 探测的小云粒子的平均直径为 $3.70 \sim 9.13 \text{ }\mu\text{m}$, 平均浓度为 $68.1 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ (最大浓度为 $229 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$)。2D-C 观测大云粒子平均直径在 $61 \sim 333 \text{ }\mu\text{m}$, 粒子直径在 $50 < d \leq 300 \text{ }\mu\text{m}$ 的大云粒子的平均浓度为 $6.6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 最大浓度为 $28.1 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, King 热线含水量仪观测, 该层液态

含水量为 $0.110 \sim 0.127 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。平均为 $0.119 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。该层液态含水量随高度降低先增大, 在 2712 m 有一个 $0.127 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 峰值, 随后又减小。该含水量大值区可能与降水元的融化有关(含水量峰值位于 0°C 高度层以下 163 m), 冰相粒子下落到 0°C 层以下后开始融化, 使液态水含量增加, 融化后液态水滴的降落速度增大, 使得单位体积内降水粒子数目减少, 导致液态水含量又减小。

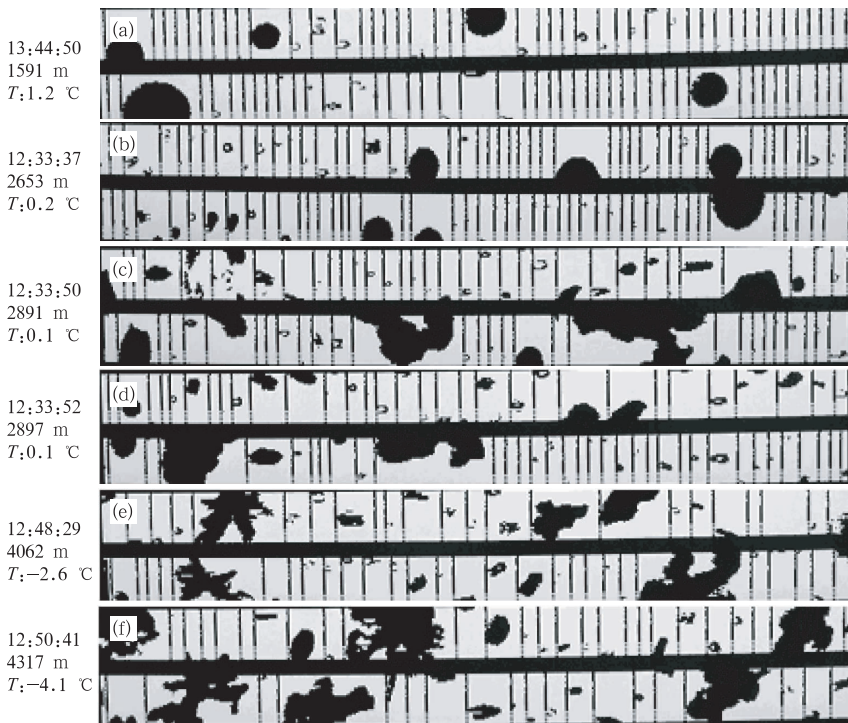


图 5 2007 年 3 月 3 日 2D-C 观测的云粒子二维图像

Fig. 5 Two-dimensional particle images with probe 2D-C on 3 March 2007

在 $500 \sim 2375 \text{ m}$ 高度层, 对应温度为 $1.9 \sim 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在此高度区间, FSSP-100 探测的小云滴平均浓度为 $281 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$, 随高度降低小云粒子浓度增加, 平均直径减小; 粒子直径在 $50 < d \leq 300$ 的大云滴平均直径增大, 总浓度最大为 $72.2 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 $8.0 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$ 。2D-C 二维图像资料表明, 云中水凝物粒子以液态水滴为主。King 热线含水量仪观测, 此高度区间平均液态含水量为 $0.196 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在 1253 m 出现最大峰值 $0.274 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 次大液态含水量峰值 ($0.256 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$) 出现在 690 m , 对比探空所取温度资料分析, 与这两个液态含水量峰值区相对应有两个逆温层存在, 一个在 $1250 \sim 1300 \text{ m}$, 逆温层厚度 50 m , 逆温幅度 $0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。另一个在 $750 \sim 1000 \text{ m}$, 逆温层厚度 250 m , 逆温幅度 $1.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这

些含水量大值区的存在有利于降水元的碰并增长。综合以上云的垂直结构分析, 在 $2875 \sim 4600 \text{ m}$ 高度层, 对应温度为 $0 \sim -7.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 为云粒子的快速增长层, 凝华增长和冰晶聚合增长是重要的物理过程; 在 0°C 层以下有一融化和碰并增长层; 在 $500 \sim 2375 \text{ m}$ 高度层 ($1.9 \sim 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 为云粒子碰并增长层并有水汽的凝结增长。

4 云中微物理量的水平分布

12:43—13:22, 飞机在 $4500 \sim 4600 \text{ m}$ 高度(对应温度 $-6.4 \sim -7.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$)作水平探测飞行, 同时进行人工增雨作业。使用催化剂为液态二氧化碳和碘化银烟弹。作业飞行路线见图 1。飞机沿 A—B—

C—E 路径探测并实施作业。据 14 时探空资料分析,在 3000~7000 m 高度,高空风均为 SWS 风,因此,在作业过程中的探测资料应为未催化自然云资料。表 2 给出了 FSSP-100 水平探测的云微物理特征值,云中粒子浓度平均为 $12 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,最大为 $73 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,最小为 $2 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。计算含水量平均值为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大为 $0.146 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小为 $0.014 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。粒子平均直径 $18 \mu\text{m}$,而峰值直径多为 $12 \mu\text{m}$ 。利用 King 含水量仪探测 4500~4600 m 高度的液态含水量,云中过冷液态水含量平均值

为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最大为 $0.07 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,最小为 $0.03 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在水平探测阶段,2D-C 探头观测的粒子平均浓度为 $12.7 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,极大值 $36.6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,粒子平均直径的变化范围为 $144 \sim 351 \mu\text{m}$ 。粒子直径在 $50 < d \leq 300$ 的大云滴浓度最大为 $27.3 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 $8.6 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,2D-C 观测的图像资料表明该高度有单个的霰、冰晶和冰雪晶聚合物。可见在 4500~4600 m 高度层,云中微物理量的水平分布不均匀,云中存在着过冷液态水,冰晶浓度值偏低,具有人工增雨催化潜力。

表 2 2007 年 3 月 3 日 4500~4600 m 高度层 FSSP-100 和 King 观测云微物理量特征值

Table 2 Statistical properties of cloud particles sampled with probes of FSSP-100 and King LWC at the height of 4500~4600 m on 3 March 2007

	K-LWC/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$N_{\text{sum}}/10^7 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$	$W_{\text{lwc}}/\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$D/\mu\text{m}$	$D_p/\mu\text{m}$	$D_{\text{max}}/\mu\text{m}$
A—B 平均	0.04876	1.287	0.0813	18.6	12.9	46.8
最大	0.0636	4.727	0.1461	24.82	21.5	47
B—C 平均	0.04000	1.885	0.09	16.83	10.88	46.8
最大	0.0462	7.3542	0.1243	24.02	18.5	47
C—D 平均	0.04405	1.191	0.081	18.96	12.81	46.8
最大	0.0600	2.0055	0.1400	22.63	21.5	47
D—E 平均	0.0649	1.142	0.079	19.24	13.79	46.9
最大	0.0702	1.7403	0.1194	24.35	24.5	47

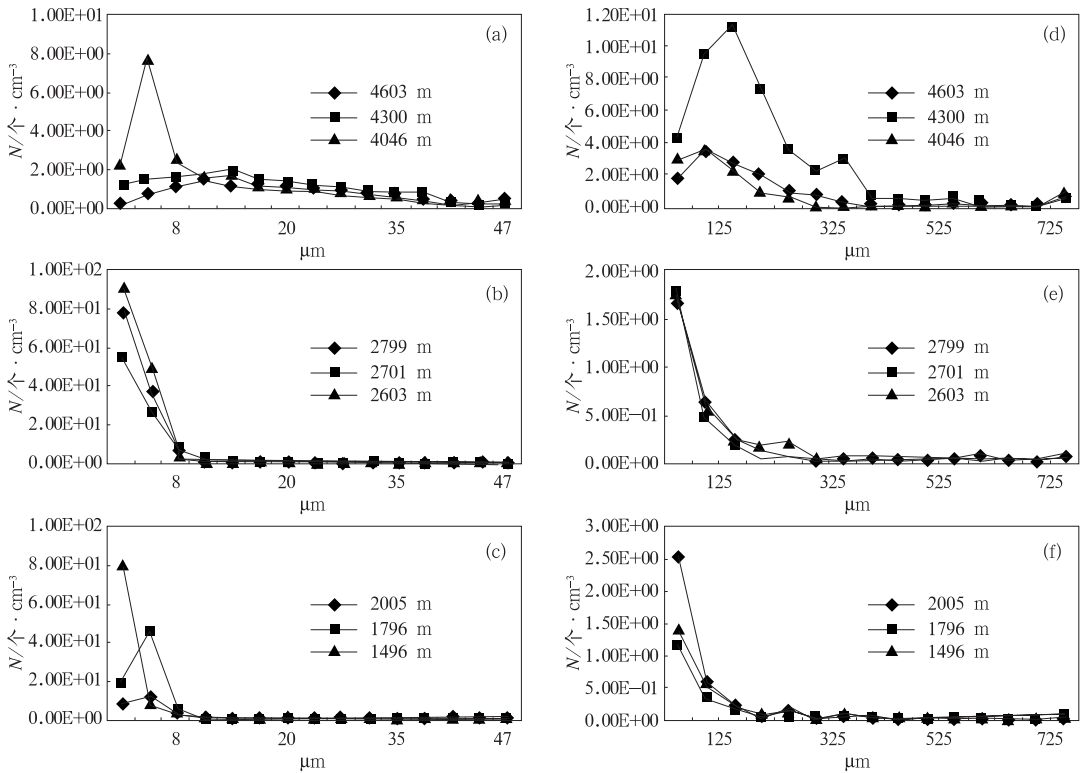


图 6 不同高度云粒子谱分布
 (a)、(b)、(c)是 FSSP-100 小云粒子谱分布, (d)、(e)、(f)是 2D-C 大云粒子谱分布
 Fig. 6 The size distribution of cloud particles at different levels.
 (a), (b) and (c) are size distributions of cloud particles of FSSP-100 probe.
 (d), (e) and (f) are size distributions of cloud particles of 2D-C probe

5 云中粒子谱分布

图6给出了2007年3月3日在不同高度PMS各探头测到的粒子谱。由图可以看出,粒子谱型有负指数型、单峰型、双峰型和多峰型。粒子谱型的特征反映了云层的垂直方向很不均匀。在云的中上部,由图6a 4603 m、4300 m和4046 m高度FSSP-100粒子谱可以看出,随高度的降低,小粒子段($d < 14 \mu\text{m}$)粒子数浓度是增加的,但粒子直径为 $18 \sim 47 \mu\text{m}$ 的云粒子,随高度的降低浓度无明显变化。从图6d可知,在4603 m高度,对应温度为 $-7.5 \text{ }^\circ\text{C}$,大云滴粒子谱型为单峰型,峰值为小滴端 $d < 175 \mu\text{m}$ 的冰晶浓度。在4300 m高度,对应温度为 $-5.0 \text{ }^\circ\text{C}$,粒子谱型为双峰型, $50 < d < 375 \mu\text{m}$ 的粒子浓度明显增加,这部分粒子主要为冰相粒子。由于该高度层为过冷水滴和冰相粒子共存的混合层,过冷水将通过贝吉隆过程向冰晶转化,使冰晶进一步增大,在此过程中亦出现了冰晶之间、雪晶之间及冰晶与雪晶之间的聚并。根据二维图像资料,可观测到该高度有雪花、雪团、冰晶聚合体和少量的霰粒子。

图6b、6e是 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下融化带内不同高度层(2603 m、2701 m和2799 m)的粒子谱分布图,其粒子谱型均为负指数型。FSSP-100粒子谱主要以 $8 \mu\text{m}$ 以下的小云滴为主,2D-C粒子谱主要以 $125 \mu\text{m}$ 以下的粒子为主。图6c、6f是1496 m、1796 m和2005 m三个高度的云粒子谱分布图,F-100粒子谱型为负指数型和单峰型,2D-C谱型为负指数型。FSSP-100测到 $2 \sim 8 \mu\text{m}$ 粒子随高度的降低而逐渐增加,这可能是低层水汽上升过程中发生凝结所导致。2D-C观测到的小滴端 $25 \sim 125 \mu\text{m}$ 粒子浓度随高度的降低而减少, $375 \sim 525 \mu\text{m}$ 的大粒子浓度随高度的降低而增大,说明大粒子在下降过程中碰并小粒子,导致了大粒子的浓度增加和直径增大。

6 小结

(1) 通过对河南2007年3月3日降水性层状云微物理结构特征及降水机制的分析,该降水云系为催化—供给云结构,云中微物理量的垂直和水

平分布不均匀。FSSP-100所测小云粒子浓度平均值为 $95.2 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-3}$,平均直径 $12 \mu\text{m}$ 。2D-C所测大云粒子浓度平均值为 $77.9 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,平均直径 $192 \mu\text{m}$ 。

(2) 在2875~4600 m高度层(对应温度为 $0 \sim -7.5 \text{ }^\circ\text{C}$),小云粒子数浓度随高度上升减少,而冰晶浓度增加。该层是过冷液态水滴与冰相粒子共存的区间,冰相粒子通过凝华过程而迅速增长。过冷云水量垂直分布很不均匀,在2875~3700 m和4570 m高度附近存在过冷液态水相对高值区。

(3) King热线含水量仪观测,液态含水量高值区在云的底部,在1253 m出现最大峰值 $0.274 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$,还有一个液态含水量峰值($0.256 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)出现在690 m,对比探空所取温度资料分析,与这两个液态含水量峰值区相对应有两个逆温层存在,且位于逆温层顶的下方。

(4) 由不同高度云粒子谱分析表明,在4046~4600 m高度层,粒子谱型有负指数型、单峰型、双峰型和多峰型; $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 层以下融化带内的粒子谱型多为负指数型;云的底部粒子谱型以负指数型和单峰型为主。

参考文献

- [1] 叶家东,范蓓芬.一个缓慢移动的中尺度对流复合体内层状降水区的微结构分析[J].大气科学,1992,16(4):464-475.
- [2] 金华,王广河,游来光,等.河南春季一次层状云降水云物理结构分析[J].气象,2006,32(10):3-10.
- [3] 彭亮,姚展予,戴进,等.河南春季一次云降水过程的宏观物理特征分析[J].气象,2007,33(5):4-11.
- [4] 于丽娟,姚展予.一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J].气象,2009,35(10):8-24.
- [5] 陈文选,王俊,刘文.一次冷涡降水过程的微物理机制分析[J].应用气象学报,1999,10(2):190-198.
- [6] 苏正军,黄世鸿,刘卫国.一次华北冷涡降水的云物理飞机探测特征[J].气象,2000,26(6):16-20.
- [7] 杨文霞,牛生杰,魏俊国,等.河北省层状云降水系统微物理结构的飞机观测研究[J].高原气象,2005,24(1):84-90.
- [8] 李照荣,李荣庆,李宝祥.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.
- [9] 李淑日,王广河,刘卫国.降水性层状云微物理结构个例分析[J].气象,2006,32(11):7-12.
- [10] 党娟,王广河,刘卫国.甘肃省夏季层状云微物理特征个例分析[J].气象,2009,35(1):24-36.
- [11] 于翥,姚展予.一次积层混合云降水实例的数值模拟分析[J].气象,2009,35(12):3-11.