

河南春季一次云降水过程的 宏微观物理特征分析

彭 亮¹ 姚展予¹ 戴 进² 濮江平³ 汪晓滨¹ 廖 菲⁴

- (1. 中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室,北京,100081;
2. 陕西省气象科学研究所;3. 解放军理工大学气象学院;
4. 中国科学院大气物理研究所,中国科学院研究生院)

提 要:云降水的宏微观物理特征的观测和研究,有助于建立典型的云降水多尺度结构模型,为确定科学的人工增雨催化方案提供重要依据。借助于雷达、卫星等多种遥感探测手段,结合飞机的云中观测,对2004年3月31日河南云降水观测外场试验区(31.5~35°N,111~114°E)的一次云降水过程实施了综合探测,综合分析了此次云降水过程的宏微观物理特征。此次云降水系统属于比较典型的低槽、冷锋活动所造成的一次小至中雨过程。根据GOES卫星云图和天气图可以看出,沿锋面云系的后部,有一槽线,它对试验区的降水起主要作用,地面冷锋位于云带的前沿。雷达PPI回波显示为一条窄而长的回波带,宽度较窄,强度不大;RHI显示回波高度不高,回波云顶高度平均在5~6km左右,除存在一些20~30dBz的回波团外,回波强度比较均匀,回波中存在明显的0℃层亮带。这次降水为锋上高积云(Ac)和其下部液水较为丰沛的层积云(Sc)结合而成,在Ac云的4340m(-4.8℃)和3670m(0℃)液态水含量出现高值,分别为0.072g/m³和0.086g/m³,在Sc云中的0℃附近液态水含量出现高值。降水形成前,云中粒子谱型主要为单峰型,粒子直径大部分在5~10μm之间变化,大粒子浓度很低,不到0.1个/cm³,且呈不连续分布,随着云中微物理过程的发展和降水的形成,粒子谱型逐渐转为双峰或多峰型,粒子浓度明显增高,粒子直径逐渐增大。

关键词:冷锋 云降水 宏微观特征 PMS

Macroscale and Microscale Characteristics of a Process of Cloud and Precipitation in Spring of Henan Province

Peng Liang¹ Yao Zhanyu¹ Dai Jin² Pu Jiangping³ Wang Xiaobin¹ Liao Fei⁴

- (1. Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;
2. Meteorological Institute of Shaanxi Province;3. Meteorological Institute, PLA University of Science and Technology;
4. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

资助项目:国家自然科学基金项目(40375001)和国家“十五”科技攻关项目(2001BA610A-06)

收稿日期:2006年7月15日; 修定稿日期:2007年2月5日

Abstract: The observations and investigations for macroscale and microscale characteristics of clouds and precipitations are helpful to establish their typical multi-scale patterns and technological system of scientific seeding, and also supply the important foundations for seeding schemes of precipitation enhancement. Integrated observations for a cloud and precipitation process which occurred in the experiment region of Henan Province (31.5~35°N, 111~114°E) on 31 March, 2004 were carried out by means of radar, satellite, as well as airborne PMS (Particle Measurement System) and GPS (Globe Positioning System), etc. The physical properties of this process of cloud and precipitation are analyzed. This rainfall process, ranged from small to middle level, was caused by a typical cold front with a trough. There appeared a front cloud system with a trough at its rear part from the GEOS satellite image. The cold front at the surface was located at the head of the cloud belt. The PPI (Plan Position Indicator) radar echo displayed a narrow and long echo belt with a not very large intensity, while the RHI (Range Height Indicator) echo showed that the average altitude of cloud top was 5~6km. The radar echo was almost uniform except for some individual echo clusters whose intensity ranged from 20 to 30 dBz, and there was an obvious bright belt of 0°C. The main clouds formed precipitation were altocumulus (Ac) above the front and cumulostratus (Sc) below which contained abundant liquid water. The maximum liquid water contents in Ac were 0.072g/m³ and 0.086g/m³ at the height of 4340 m and 3670 m, respectively, where temperatures were -4.8°C and 0°C, while the maximum liquid water content in Sc under Ac was $9 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ where temperature was 0°C. Before formation of precipitation, the spectral shape of particles was single-peak and the particle diameters varied from 5 to 10 μm . The concentration of large particles was very low, less than 0.1 cm^{-3} , with an inconspicuous distribution. With the development of microphysical processes and precipitation formation, the spectral shape turned to double-peak or multi-peak, and the particle concentrations and their diameters increased obviously.

Key Words: cold front cloud and precipitation macroscale and microscale characteristics PMS

引 言

利用飞机探测云的宏微观结构,是云和降水物理研究的一项重要工作^[1]。借助于雷达、卫星、飞机等多种综合探测手段,可以更进一步地了解云的宏微观特征及云中不同部位上的云降水物理过程,通过云系的宏微观结构来分析人工增雨的播撒条件,有助于建立典型的云降水的多尺度结构模型,为确定科学的人工增雨催化方案提供重要依据^[2-3]。

“十五”期间,利用自行研制的空一地数据传输系统等,选择改装的中国民航飞行学院“夏延-III A”云降水探测和人工增雨作业专用飞机,进行了河南、河北、北京、青海等省

(市)人工增(雪)雨的综合探测作业方案设计和实施,取得了丰富的云降水系统的综合探测资料^[4-5],并得到了有关云降水物理特性研究和作业技术分析方面的诸多成果^[6-11]。

我国自 1980 年代引进 PMS(粒子测量系统)系统以来,曾独立进行我国一些典型区域的云降水条件的观测分析,其后还结合一些省份的人工增雨外场试验进行了多种天气类型的云降水物理参数的观测和分析^[1]。1987 年,王广河^[13]根据大兴安岭火区上空所取得的云降水粒子的飞机水平观测资料,分析认为在层积云顶部粒子浓度较低(100~500 个/m³)区域存在较好的催化引晶条件。冯桂利等^[14]利用山东云降水探测作业时的机载 PMS 资料,卫星云图及天气图资料分

析了1989年9月山东半岛一次典型冷锋降水过程,认为锋前云区存在较为丰富的过冷水(最大值 $0.36\text{g}/\text{m}^3$),具有较好的人工催化条件。周德平等^[15]根据1995年6月辽宁省一次层状云降水过程的飞机探测资料及播撒试验作业数据,认为过冷水含量较大($0.02\sim 0.03\text{g}/\text{m}^3$)但冰雪晶相对较少($1000\sim 2000$ 个/ m^3)的云层($-4.5\sim -13.8^\circ\text{C}$)具有较好的作业条件。

过冷水含量一直是人工增雨作业关心的重要云微观特征之一,陶树旺等^[16]指出,自然冰晶浓度如果太大(>20 个/L),可能不利于播撒,因此分析云中粒子与液态水的分布规律对人工增雨潜力区的判断非常重要。游来光等^[12]通过分析1978、1979年宁夏飞机观测层状云的云液水含量资料,指出 0°C 层存在丰富的过冷水区,具有一般积状云的含水量值。杨文震等^[17]分析了1991年5月和1992年6月4架次飞机探测河北省春季层状云降水系统的PMS资料,认为在逆温层顶下方存在云水含量的峰值($0.0802\text{g}/\text{m}^3$),而与较大冰晶浓度值($0.237\text{g}/\text{m}^3$, 4170m)所对应的过冷水含量较小($<0.01\text{g}/\text{m}^3$)。苏正军等^[18]利用机载PMS仪器研究了1999年5月山东一次降水过程,探测到降水云系存在分层,中间干层会影响降水的发展,降水发展后期粒子浓度低于发展初期,但粒子谱增宽($0\sim 30\mu\text{m}$),粒子浓度、直径随高度增加而增大。苏正军等^[19-20]还利用飞机云降水探测资料分析研究了2001年春末夏初青海地区降水云结构特征,认为西部高原降水云系在降水形成发展阶段也有分层现象,云系成熟后上下层贯通,云中液态水分布多呈双峰或多峰的特征,4次降水过程中观测到较大含水量与温度为 0°C 和 $-5\sim -7^\circ\text{C}$ 的云层相对应,云粒子谱明显加宽,且浓度增加一个以上数量级,这与苏正军等^[18]所分析的山东个例相反,可能高原层状云降水的发展维持机理与沿海的还是存在一定差别。

“九五”期间,中国气象科学研究院人影

所在河南利用飞机、雷达、卫星等多种探测手段对河南省降水性层状云系进行了研究。李淑日等利用飞机探测云微物理资料结合天气、卫星、雷达等资料^[21]分析了河南2000年4月的一次冷锋低涡降水,分析表明,此次降水云系上下分层,平飞高度(4000m 左右)云中粒子浓度与含水量空间分布不均匀,但有很好的相关性,推测对流层高层有较好的冰晶增长条件和丰富的过冷水,存在较好的引晶催化条件。金华等^[22]分析表明此次冷锋降水云系前部丰水区较多,云水含水量略大于青海和河北观测的平均结果。为进一步了解河南层状云的结构特征,2004年3月20日—4月20日,中国气象科学研究院和河南省气象局在河南省人工增雨试验示范基地实施了进一步的人工增雨外场试验和观测。探测区域: $31.5\sim 35^\circ\text{N}$, $111\sim 114^\circ\text{E}$,探测飞机为夏延(Cheyenne-III A)探测飞机,机载设备包括King含水量仪、反流式温度计、PMS云降水粒子探测设备、GPS全球定位飞机航迹记录显示系统等。PMS云降水粒子测量系统探头包括:FSSP-100($0.5\sim 47\mu\text{m}$), FSSP-100-ER($1\sim 95\mu\text{m}$), PCASP-100X($0.1\sim 3\mu\text{m}$), OAP-2D-GA2($17.75\sim 1565\mu\text{m}$),可测量大气中 $0.1\sim 1565\mu\text{m}$ 粒子的数密度、谱分布,以及 $17.75\sim 1565\mu\text{m}$ 粒子的二维粒子图像资料^[23]。地面还配备有车载C波段多普勒雷达、714CD天气雷达等,以获取系统的综合配套外场试验资料。本文以2004年3月31日的一次冷锋降水过程为例,根据机载仪器探测资料,结合卫星、雷达等多种探测资料综合分析可观测的降水云系的宏微观物理特性。

1 天气形势概况

3月31日试验区降水属于比较典型的低槽、冷锋活动所造成的层积云降水过程。雨带基本呈东北-西南走向,与高空低槽的移向基本一致。

1.1 高空形势

在 500hPa 高空图上,31 日 08 时,试验区受西北气流控制,新疆东部有一下滑槽携带冷空气向东南方向移动;31 日 20 时,冷槽东移到河套地区,槽底位置偏北,试验区南部处于偏西气流中,其它地区受槽前西南气流影响。4 月 1 日,冷锋到达 115°E ,试验区的大部分地区位于槽后。

在 700hPa 高空图上,影响系统有两个,分别为北支槽和南支槽,南支槽较北支槽位置偏东,在 31 日白天移过试验区偏南地区,由于此时试验区仍处于地面低压前部的偏南气流中,500hPa 为偏西气流,辐合较弱,对降水发展不利;而北支低槽抵达试验区偏北地区时,高空 500hPa 转西南气流,地面有冷锋配合,故可能会促进试验区偏北地区的降水发展。在 850hPa 图上,影响系统也是低槽,低槽影响范围在 32°N 以北。

从卫星云图资料来看,我国大陆受两个天气尺度系统控制。东北—华北地区主要来自西伯利亚和中亚地区的冷锋影响,卫星云图上表现为一条东北—西南走向的连续云带,云带的前界清楚、光滑整齐,说明该处风切变较为明显,地面冷锋位置处于云带的前沿。锋面经过试验区时,境内云量明显增加、云层变厚。随着冷锋东移,云带边缘曲率减小,云带变宽^[24]。

1.2 地面冷锋

地面图上相应的地面冷锋位于高空槽前,是移速缓慢的上滑西路冷锋,锋前(或锋上)呈窄状的平行回波云带。根据 3 月 31 日 21 时至 22 时的郑州 714CD 天气雷达 PPI 图(图略),西北部有较为明显的带状回波,回波边缘离郑州市区越近越模糊,郑州市区附近呈比较均匀的环形结构,强度较小($< 10\text{dBz}$),回波带由西北方向往郑州市区移近。可以看出云带发生源在锋线前,以老单体的消亡、新单体的生成向前传播。随着高

空槽的东南移动,也伴之向东南方向移动。3 月 31 日 22 时 27 分 PPI 回波图(图略)显示为一条窄而长的回波带,宽度较窄,约为 15km 左右,强度不太大,回波边缘呈絮状;郑州市区呈现的环状结构的回波的强度较云带未到达市区时大近 30dBz。3 月 31 日 22 时 29 分 RHI 回波图(图略)显示回波高度不高,云顶高度平均在 5~6km 左右,回波顶比较平坦,除了个别的强度为 20~30dBz 回波团外,没有明显的对流单体的存在;在比较均匀的回波中间存在空隙。从 RHI 图中还可以看出回波中有明显的 0°C 层亮带, 0°C 层附近融化层回波强度有所增强,这可能是层状云降水中存在的明显的冰水转换层引起的^[25]。

3 月 31 日 08 时,西路冷锋到达河西地区,锋面位于巴音毛道、达日-托托河一线。试验区处于河套低压带前部的偏南气流里。11 时,冷锋继续向东南移动,试验区仍处于低压带前部少云区内。14 时,冷锋向东南移到河套地区,试验区受低压前部东南气流的影响,云量增加。17 时,冷锋移到试验区西部,试验区处于低压环流前部的东南气流里,锋面附近开始有阵性降水出现。20 时,冷锋进入试验区西北部,西北部出现阵性降水。随后冷锋移过试验区,试验区大部分地区有降水。4 月 1 日 02 时,随着冷锋移过试验区,试验区主要降水过程结束,处于锋后西北气流里。

2 飞行作业航迹

中国气象科学研究院与河南省气象局联合对本次降水过程进行了飞行探测。探测时间为 3 月 31 日 22:03—22:48。飞机在锋面的前沿云系爬升探测,返回下降过程中锋面已经过境。图 1 为机载 GPS 的航迹数据结果。

图 1a、b、c 分别为根据飞机飞行 GPS 经纬度数据所做的飞机飞行平面轨迹图、三维航迹图及飞行高度随时间变化图。其中图

1a、b、c中相同的线型对应飞机飞行相同的时段。图1c中坐标原点为新郑机场,本场海拔高度为150.7m,地面温度13℃,场压994hPa,地面风速 $2.7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。探测从新郑(图1a中最南站点)开始,飞机沿临汝走廊向西北方向爬升飞行,经郑州市继续向东北爬升飞行,爬升到最大高度5180m左右(细实线),然后略微下降飞行到新乡(点划线),在新乡附近折回下降飞行至3680m左右(粗实线),保持高度平飞10多分钟进行云系探测(细点线),最后飞机飞行高度不断下降向东飞行后再折回新郑机场(粗虚线)。飞机爬升探测阶段在3150m目测入云,观测到层积云和高积云,舷舱外侧有小雨滴附着,4219m

出云,可见月光,目测上部无云。飞机飞行达到5180m左右后下降,在4500m目测入云,有三层云,高积云、层积云和碎雨云(Ac、Sc、Fn),且云层之间有二至三百米的干层。下降至3680m左右飞机保持高度飞行,探测到云中有大雨滴,随着飞行持续了大约一分钟左右。飞机在锋区空域附近受到强烈颠簸,说明这一区域存在较强的垂直扰流。最后目测发现附近云中有闪电,为安全起见飞机返航回新郑机场。

图1d为温度随高度的变化曲线。 0°C 层在3550m左右。从地面到950m存在逆温层,4600~4900m存在等温层。

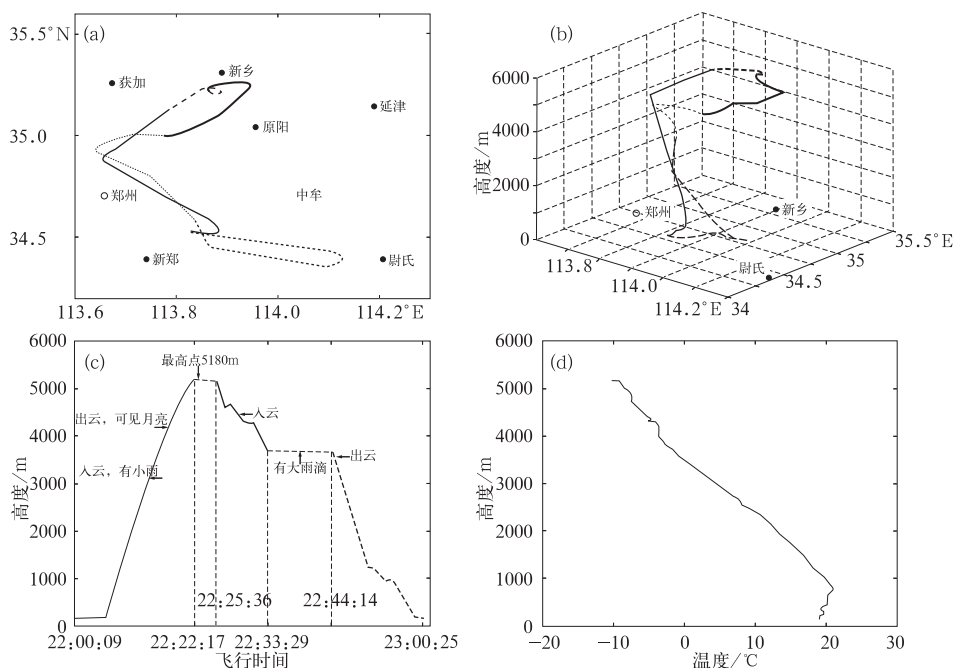


图1 GPS航迹

a: 飞机飞行平面轨迹, b: 飞机飞行三维轨迹, c: 飞机飞行高度随时间的变化, d: 飞机爬升阶段温度随高度的变化(a、b、c中相同的线型对应飞机飞行相同的时段)

3 云粒子浓度垂直分布特征

图2为云粒子浓度的垂直分布图。OAP-2D-GA2所测得的云粒子浓度,在飞机爬升探测阶段(图2a),从1000~2400m,随着高度升高而变化较小;在2500m左右开始

入云,云粒子浓度迅速增加至 $3.5\text{个}/\text{cm}^3$;在2800~4200m,云粒子浓度迅速减小,随高度继续上升,云粒子浓度很小,不足 $0.1\text{个}/\text{cm}^3$ 。云顶浓度再度增加,达到 $1\text{个}/\text{cm}^3$ 。在下降阶段中,从4600~3870m随着高度的降低云粒子浓度迅速增大,最大值达到 $3\text{个}/\text{cm}^3$ 。

FSSP-100-ER 所测得的云粒子浓度,在上升阶段中较小,仅在 3750~3960m 有 3~6 个/cm³ 左右。在下降阶段,变化较大,出现两个峰值区:4200~4700m、3700~3900m,云粒子浓度普遍高于锋面前沿,两个峰值区之间有三百米左右的低值区。平飞阶段有起伏,其中出现的最大峰值为 66 个/cm³。

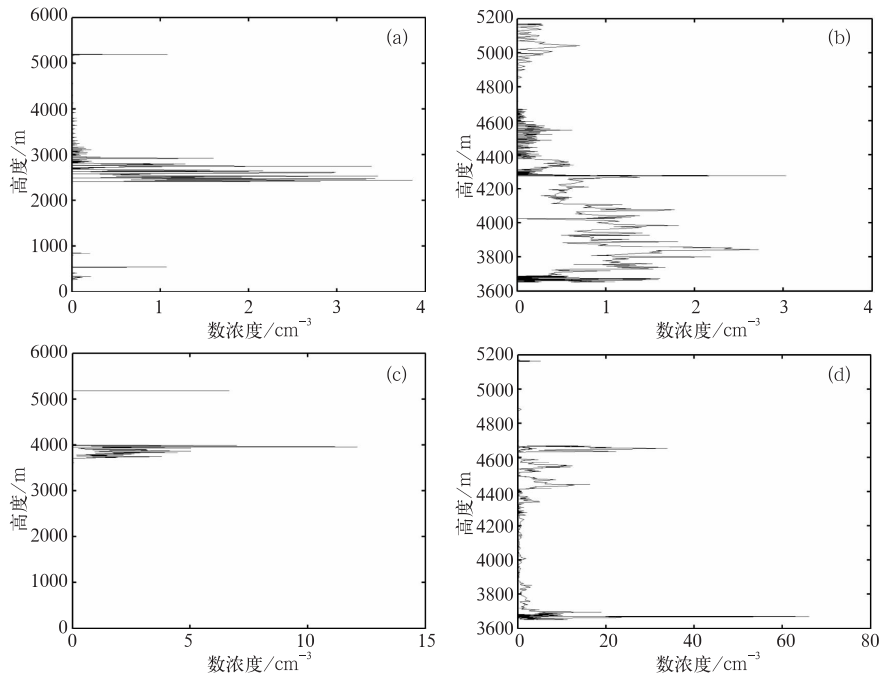


图 2 粒子浓度的垂直分布

a: 飞机爬升阶段 OAP-2D-GA2 探测结果, b: 飞机下降阶段 OAP-2D-GA2 探测结果,
c: 飞机爬升阶段 FSSP-100-ER 探测结果, d: 飞机下降阶段 FSSP-100-ER 探测结果

3.1 粒子直径分布特征

图 3 为 FSSP-100-ER 所测云粒子直径的垂直分布。飞机爬升探测阶段(图 3a),云中粒子直径介于 5~10 μ m。飞机下降探测阶段(图 3b),5180~4800m 云粒子直径随高度变化不大,大部分在 20 μ m 左右,最大到 30 μ m;4700~4500m 之间云粒子直径大部分在 10 μ m 左右,4400~4280m 云粒子直径逐渐增大,4300m 左右达到峰值 27 μ m,4300~3684m 粒子直径随高度起伏较小大多在 8~10 μ m,3684~3600m 之间由于包含飞机平飞探测阶段,粒子直径变化较大,大都在 8~

结合图 2 可看出:云滴浓度随距云底高度的增加而增大。在飞机爬升探测阶段,云粒子浓度较小且变化不大;在下降阶段,云粒子呈间断分布且有多峰值出现、云粒子浓度明显增大。由于 OAP-2D-GA2 和 FSSP-100-ER 探测粒子直径范围不同,所以相同高度会存在较为明显的差异。

17 μ m,最大到 30 μ m 以上。一般在浓度大值的高度上,云滴平均直径较小,随着高度升高,直径渐渐增大,接近云顶附近达到最大。飞机在上升阶段主要在锋面的前沿云系探测,下降探测过程主要在锋面过境以后的云系中探测,说明锋面后部云系云粒子尺度较大。

3.2 云中云滴含水量垂直分布特征

图 4 为根据 FSSP-100-ER 计算的云滴液态水含量垂直分布。飞机爬升探测阶段云粒子液态水含量较小(3800~4000m)为 0.005~0.027g/m³,且随高度增大云粒子含水量有所增加。下降阶段在 4340m(-4.8 $^{\circ}$ C)和

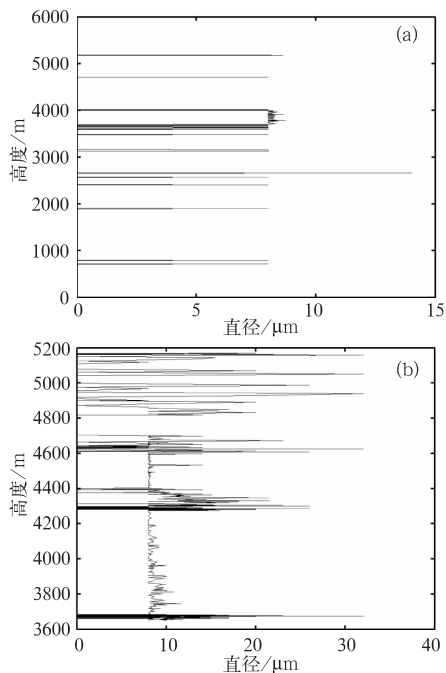


图 3 粒子直径的垂直分布

a: 飞机爬升阶段 FSSP-100-ER 探测结果,
b: 飞机下降阶段 FSSP-100-ER 探测结果

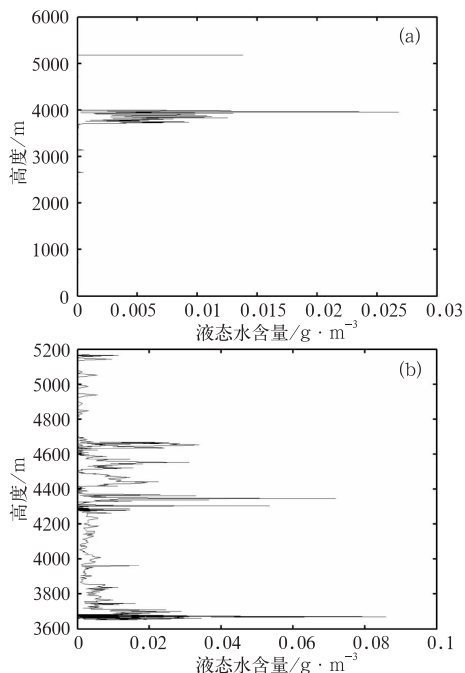


图 4 据 FSSP-100-ER 所计算的液态水含量($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)垂直分布

a: 飞机爬升探测阶段, b: 飞机下降探测阶段

3670m(0°C)出现峰值,分别为 $0.072\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.086\text{g}/\text{m}^3$ 。在 -5°C 、 0°C 左右云中云粒子液水含量较丰富,含水量主要随云滴直径的增大而增大,而与云滴数浓度的关系不大。而云底云粒子含水量很小,云滴直径不大,云滴数密度却较大,云粒子含水量主要取决于云滴数浓度。结合温度层结特征及云粒子浓度的垂直分布特征,可看出,云粒子浓度最大值所在高度与逆温区的高度基本一致,说明逆温层抑止了粒子的向上运动,这样有利于粒子的持续增长形成较大的液态云滴,在 4340m 可能存在过冷水丰水区,同时 0°C 层之上的雪晶和雪片下落通过该层时,开始融化,成为下落较快的雨滴,因此,融化的那一层下面含水量急剧减小,使得 0°C 层附近相近的云滴含水量较为丰富^[26]。

3.3 云粒子谱分布特征

图 5 为飞机爬升阶段(a)和下降阶段(b) FSSP-100 所测不同高度云粒子谱。爬升阶段分别选取 1628m、2920m、3317m、3806m 各高度上 FSSP-100 每五秒的平均值,对比云的微物理参数变化。飞机入云前云粒子浓度虽较大,峰值在 $10^5 \sim 10^6$ 个/ cm^3 ,但是谱较窄。入云后云粒子浓度略有减小,云粒子谱加宽,云中大粒子明显增多。对比云粒子

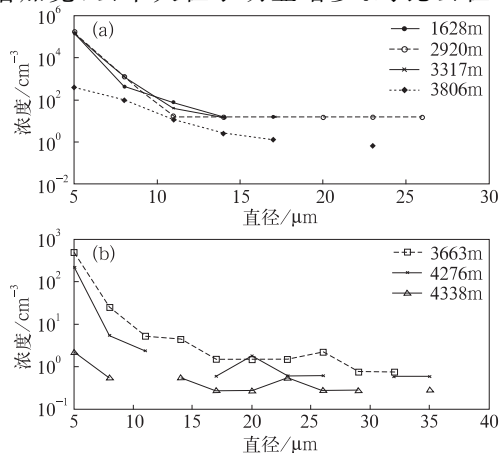


图 5 FSSP-100 所测量的不同高度云粒子谱

a: 飞机爬升探测阶段, b: 飞机下降探测阶段

浓度可见,云中下部云粒子浓度最大,云底云粒子浓度次之,云顶云粒子浓度最小(小近 10^3 个量级)。在下降阶段 4336m、4276m、3663m 高度上,和上升阶段同一高度上相比,云粒子浓度相差不大,谱宽有所加大,且多呈现双峰或多峰型。

图 6 为飞机爬升阶段(a)和下降阶段(b) OAP-2D-GA2 所测量的不同高度云粒子谱。爬升阶段,在低层(1891m,目测无云),却存在很高的云粒子浓度及较大的云粒子直径。根据云粒子直径及云粒子浓度的关系,在 2920 和 3079m 高度,由于随机碰并、重力碰并及零度层的雪粒子融化等的作用,形成由大云滴、雨滴组成的云,谱型呈多峰型。飞机上升至 5189m 左右的高度时,其云粒子浓度较前两个高度上的值有所增大,云粒子谱较前两个高度也有很大的加宽,其谱型可近似地看作负指数型。下降阶段 4664m、4292m、3678m 分析表明云顶中下部粒子浓度很高且谱较宽(云层中间有干层的情况排除在外)。

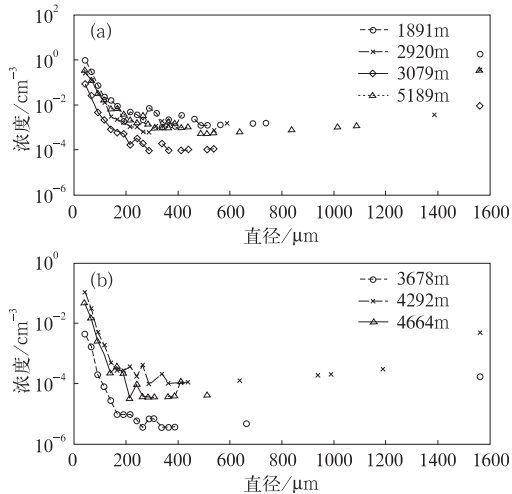


图 6 OAP-2D GA2 所测量的不同高度云粒子谱
a: 飞机爬升探测阶段, b: 飞机下降探测阶段

从云粒子谱的分布来看,飞机爬升阶段和下降阶段,各个高度上谱分布的差异较大,即使同一块云体,其云粒子谱特征差异也很大。云滴谱有三类,第一类,浓度很高,云粒子的直径较小,谱宽较窄;第二类,浓度较高,

云粒子直径较大,谱宽较宽;第三类,浓度较小,谱宽很宽,这与赵仕雄等^[27]的观测结果相似。但是,从高层至低层,其谱型有较强的规律性。云粒子谱型主要有单峰型、负幂次型、双峰以及多峰型。从本次飞机观测云的结果来看,层积云粒子谱型在降雨形成前,主要为单峰型。

4 结 论

通过对河南试验区 2004 年 3 月 31 日一次云降水过程的宏微观物理特征的探测和分析,得出以下结论:

(1) 这次云降水过程属于比较典型的低槽、冷锋活动所造成的层积云降水过程。雨带基本呈东北-西南走向,与高空低槽的移向基本一致。受到高空槽区及地面冷锋的影响,在锋区和锋后冷区形成一次小至中雨过程。

(2) 在个例中,雷达 PPI 回波区显示为一条窄而长的回波带,宽度较窄,强度不大。RHI 显示回波高度不高,云顶高度平均在 5km 左右,回波顶比较平坦,内部存在一些强度为 20~30dBz 回波团,但飞机观测发现附近有雷电,比较均匀的回波中间存在空隙,在 RHI 回波中有明显的 0°C 层亮带。

(3) 飞机在这次锋区区域探测飞行时受到强烈颠簸,说明探测区域存在较强的对流运动;对比宏观记录和仪器探测结果,夜航目测受客观条件的限制会有所限制,仪器的测量可能会更为客观。

(4) 河南这次降水天气系统层积云粒子谱型在锋面前沿主要为单峰型,随着系统的发展,谱型逐渐转为双峰或多峰。

(5) 这次降水云系主要由锋上高积云和其下部液水丰沛的层积云组成。锋上的高积云在 4340m(-4.8°C)和 3670m(0°C)附近出现液态水含量峰值,与苏正军等在青海观测的结果类似^[19-20],液态水含量峰值分别为 0.072g/m³和 0.086g/m³,与杨文霞等^[17]、苏正军等^[19-20]分析得到的液态水含量值比较接

近。锋下层积云在 0°C 附近出现液态云水含量峰值。层状云在垂直方向的云滴液态水含量分布表明,高含水量出现在层状云系的中、低层,即锋上的高积云(或高层云)和锋下的层积云中。在 Ac 和 Sc 云层之间有二到三百米的干层。这和北方地区层状云催化潜力分析的结果一致。这也说明这次飞机探测数据品质与我国以往飞机观测结果较为接近。

(6) 尽管这个云系中云下粒子浓度较高,但发展阶段的云中粒子直径大部分在 $5\sim 10\mu\text{m}$ 之间变化。在零度层附近云粒子液态水含量急剧增加。大粒子浓度很低, OAP-2D-GA2 所测得的粒子浓度为 0.005 个/ cm^3 ,且呈不连续分布,随高度的增加,粒子浓度变化也很小,说明自然冰晶较少,是适宜催化的阶段。在降水云发展成熟阶段,随着高度的降低粒子浓度明显增大,在 3870m 处达到 3 个/ cm^3 ,云中粒子直径逐渐增大,至 4700m 达到峰值 $45\mu\text{m}$,大部分在 $30\mu\text{m}$ 左右,表明云中大的降水粒子明显增加。

参考文献

- [1] You L G, Wang G H, Wang X B. The Study of Cloud Physics and Seedability of Artificial Precipitation with Particle Measurement System[R]. ANNUAL REPORT 1994—1995:66-78.
- [2] 李大山. 人工影响天气现状与展望[M]. 北京:气象出版社, 2000:362-382.
- [3] 王广河, 姚展予. 人工增雨综合技术研究[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 1-10.
- [4] Zheng G G. A national key research project-Demonstration of precipitation enhancement techniques [G]. Eighth WMO Scientific Conference on Weather Modification Casablanca, Morocco, April (7~12), 2003: 31-33.
- [5] 姚展予, 濮江平, 刘卫国, 等. 飞机探测云物理数据建立的建立和应用[J]. 应用气象学报, 2004, 15(增刊): 19-26.
- [6] 石爱丽, 郑国光, 黄庚等. 2002年秋季河南省层状云降水的雨滴谱特征[J]. 气象, 30(8): 12-17.
- [7] 李淑日, 黄庚, 胡志晋. 黄河上游河南省地面大气冰核观测分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 41-48.
- [8] 石爱丽. 层状云降水微物理特征及降水机制研究概述[J]. 气象科技, 2005, 33(2): 104-108.
- [9] 廖菲, 郑国光, 洪延超, 等. 2002年河南春季一次层状云降水特征的研究[J]. 南京气象学院学报, 27(2): 160-168.
- [10] 汪晓滨, 张蕃, 陈跃, 等. 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, 2005, 31(7): 54-58.
- [11] 许晨海, 姚展予, 陈进强. 黄河上游降水的时空变化及其环流特征[J]. 气象, 2004, 30(2): 51-54.
- [12] 游来光, 吴兑. 层状云中的液水含量与降水条件[J]. 气象, 1981, 7(3): 20-22.
- [13] 王广河. 大兴安岭火区上空云和降水微物理结构特征个例研究[J]. 气象, 1992, 8(2): 17-21.
- [14] 冯桂利, 赵增亮, 王以琳. 一次西北冷锋云系微结构特征及人工引晶催化条件的分析[J]. 山东气象, 1994, 55(2): 33-40.
- [15] 周德平, 宫福久, 高建春, 等. 一次飞机播云的微物理效应分析[J]. 气象, 2004, 24(4): 405-412.
- [16] 陶树旺, 刘卫国, 李念童, 等. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究[J]. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 14-22.
- [17] 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, 25(1): 84-90.
- [18] 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): 16-25.
- [19] 苏正军, 王广河, 刘卫国, 等. 青海省春季降水云的微物理特征分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 36-40.
- [20] 苏正军, 刘卫国, 王广河, 等. 青海一次春季透雨降水过程的云物理结构分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(增刊): 27-35.
- [21] 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, 2001, 27(11): 17-21.
- [22] 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.
- [23] 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(增刊): 11-18.
- [24] 陈渭民. 卫星气象学[M]. 北京:气象出版社, 2003:232-292.
- [25] 李子华, 宫福久. 雷达在天气导变中的应用[M]. 北京:气象出版社, 1994:112-113.
- [26] 梅森. 云物理学. 北京:科学出版社[M]. 1978:349, 478-479.
- [27] 赵仕雄, 陈文辉, 杭洪宗. 青海东北部春季系统性降水高层云系微物理结构分析[J]. 高原气象, 2002, 21(3): 281-287.