

降水性层状云微物理结构个例分析

李淑日 王广河 刘卫国

(中国气象科学研究院,北京 100081)

提 要

对2000年4月14日河南省一次降水性层状云系进行了飞机探测。利用探测所取得的微物理资料,配合同期的天气、卫星、雷达等资料对云的微物理特征进行了分析,讨论了云中液态水含量、云粒子平均直径和粒子谱等的水平和垂直微物理结构特征。

关键词: 云微物理 液水含量 粒子谱

引 言

不同的天气系统和不同地形条件下,层状云系的宏、微观结构和降水物理过程存在着多变性和复杂性^[1,2],为了提高人工催化的效果和成功率,必须对层状云的宏观、微观物理结构有比较详细的了解,才能更好的选择催化作业时机和最佳作业部位。本文根据2000年4月14日专题组对河南省的一次层状云降水过程的飞机观测资料,结合同期的天气、卫星、雷达资料分析了该次降水的天气过程、云的宏、微观物理特征,讨论了云带的水平及垂直结构特征、云中液态水含量、云粒子平均直径和粒子谱等特征。

1 观测设备

观测过程中使用的考察飞机装有 FSSP-100(量程:0.5~47 μm)和 OAP-2D-C(量程:25~800 μm),国产 DS-1 返流式铂电阻测温仪(量程:-50~50 $^{\circ}\text{C}$)。其中 FSSP 用于测量云滴谱,OAP-2D-C 用于测量云粒子谱和粒子二维图象。上述仪器均装于机翼中翼下部前缘。

2 天气形势

2000年4月13~14日伴随一次冷空气入侵,河南省产生了一次小雨天气,过程最大雨量8mm(发生在新县测站)。4月13日20时,500hPa高空形势为一槽一脊型,低槽位于巴彦毛道、平凉到成都一线,槽线呈东北-西南走向,14日08时,低槽向东移至延安、

恩施到贵阳一线,移动速度约40 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,高空温度槽落后于高度槽,河南省处于槽前的暖湿西南气流中,具有水汽供应条件。低槽继续东移,并明显减弱,到20时河南省已转受槽后脊前偏北气流控制。地面图上,14日02时冷锋位于长江流域,08时,长江下游已经出现气旋波,波动中心位于杭州南部,波动迅速东移,河南省在短期内即转入了西高东低的气压场里,本次影响系统移动较快,天气过程较弱。

3 卫星云图

2000年4月13日08~14时可见光云图上500hPa高空槽前有一浓密的盾状云团,随着低槽的东移而向东移动,同时长江以南的带状云系缓慢向北扩展,13日15时,两云系交汇,覆盖了我国中部和东部大部分地区,受此云系影响,此时河南部分地区已开始降水。14日8~11时,云系在我国中、东部地区维持并有所减弱,12时后云系随着系统的移动缓慢东移并进一步减弱,河南降水渐停。

4 雷达资料分析

14日05时雷达回波PPI图上河南省西部、西南部出现大范围的层状云系,云系回波不强,约20dBz。07时,云系东移,强度有所增强,回波带经过郑州,呈东北-西南走向。飞机先向东北方向云区再向西南方向云区进行穿云飞行,在穿云探测的同时进行催化剂播撒。云系继续东移,09时,飞行航线附近

出现强回波带,从雷达 PPI 图上看到在郑州东北部方位角 50° 、距离 $33\sim 70\text{km}$ 处和西南部方位角 180° 、距离 30km 处均出现了强度达 35dBz 的强回波(图略),估计是由于催化剂的播撒使云发展,其中东北方向方位角 50° 回波的垂直剖面图(图略),距郑州 $33\sim 70\text{km}$ 处回波最大,达 43dBz ,强回波及地,说明有降水发生,实际观测到东北部封丘、延津两个测站有 6.0mm 和 5.0mm 的降水(12 小时降水)。10 时云系继续东移并减弱,至 14 时,云系已基本移出河南。

5 飞行概况

4 月 14 日共飞行三架次,本文取第一架次的飞行探测资料。飞机于 7 时 06 分从新郑机场起飞,起飞时雨区已经进入河南省,新郑已开始了降水。飞机先向东北方向雷达探测到的云区方向飞行,飞至长垣后转向西南经尉氏穿越西南部的云区到达平顶山,然后转向西北,经温县后又折向西南、东南飞经登封,再向东过新密返回新郑机场着陆。飞机 7 时 16 分开始接触系统云区底部,7 时 34 分飞至封丘以东 4023m 高度时开始播撒催化剂进行催化作业,之后在 4000m 左右高度平飞并继续作业,航行速度 $250\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,9 时 29 分下降至新郑以北停止作业,9 时 37 分返回新郑机场着陆。此次飞行历时 2 小时 21 分钟。

6 云物理量结构特征

6.1 云的宏观特征

飞机观测表明:本次冷锋降水云具有两层结构,上部为锋上 As op 云系,下部为一层

较薄的锋下 Sc 云系,两层云之间夹有干层。As op 云顶高约 $5800\sim 6500\text{m}$ (雷达探测高度),底高 2600m ,Sc 云厚约 100m ,位于 $1800\sim 1900\text{m}$ 高度。

图 1 为温度随高度的变化,可以看出锋区内出现逆温,温度递增率 $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$,逆温层厚约 300m 。As op 云内降温率为 $0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。

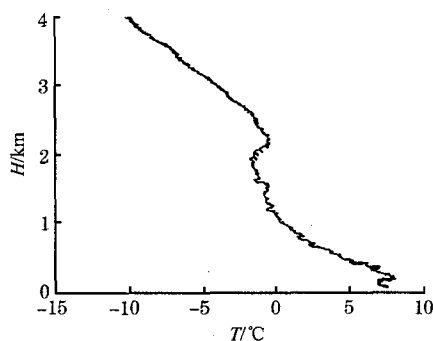


图 1 温度随高度分布

6.2 云的微物理特征

6.2.1 云的垂直分布特征

云中物理量的垂直结构图见图 2:图中 a、b、c 分别是云粒子浓度、粒子平均直径和云中液水含量随高度的分布,可以看出,Sc 云云底以上粒子浓度呈双峰结构,分别在 Sc 云和 As op 云中出現云粒子浓度大值区,最大粒子浓度分别达到 $170\text{个}/\text{cm}^3$ 和 $258\text{个}/\text{cm}^3$,粒子浓度的量级为 $10^0\sim 10^2\text{个}/\text{cm}^3$,与以往的观测结果一致^[2]。陈万奎等^[3]曾用 FSSP 测得四川、新疆等地降水性层状云中温度为 $0\sim -30^\circ\text{C}$,含水量平均值为 $10^{-2}\sim$

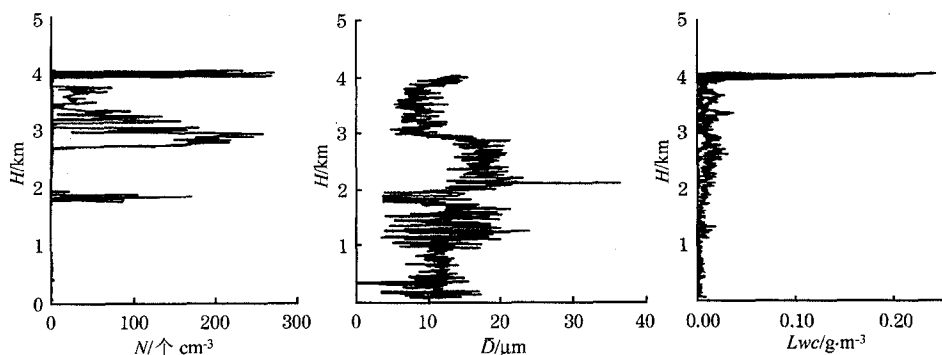


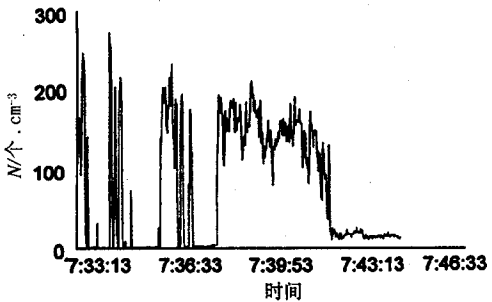
图 2 云中物理量垂直分布

10^{-1}g/m^3 , 本次探测结果与之有相同量级。2800m 以下(温度小于 0°C)含水量基本上随高度略有增加, 其值小于 0.025g/m^3 。2800m 以上其值振荡增减, 4000m 高度上出现大于 0.1g/m^3 的丰水区, 峰值达 0.246g/m^3 。干层粒子浓度较低, 均在 0.01 个/ cm^3 以下。

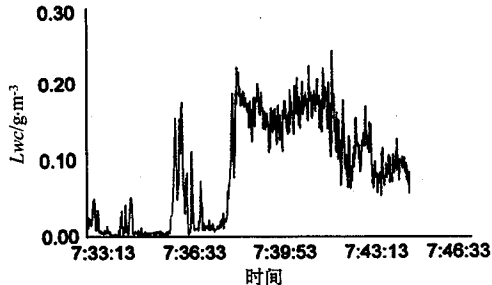
粒子平均直径没有系统的变化: 1800m 以下平均直径在 $12\mu\text{m}$ 左右振荡, 并随高度有所增大, 1800~1900m 高度粒子平均直径变小, 平均 $6\sim 8\mu\text{m}$, 说明 Sc 云中主要是一些直径较小的云滴, 到 2000~2700m 平均直径

突然跃增至 $14\sim 18\mu\text{m}$, 估计是由于上层较小的云滴下落到干层蒸发, 只剩下直径较大的粒子。As op 云内半径又有所减小, 到 4000m 高处再度增大。由于本次飞行高限 4190m, 其上的数据资料无法获得。

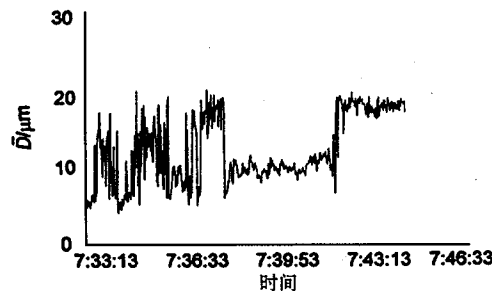
从图中可以看出, 此三者配合较好: Sc 云和 As op 云的下半部虽然粒子浓度较大, 但由于粒子直径小, 因而计算所得的含水量较小; 而在 4000m 高度处, 粒子浓度和直径均较大, 出现了含水量的大值区。



粒子浓度随时间的分布

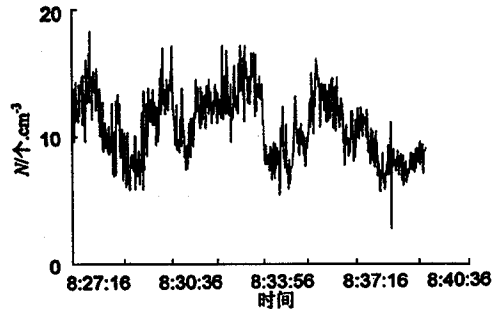


云中含水量随时间的分布

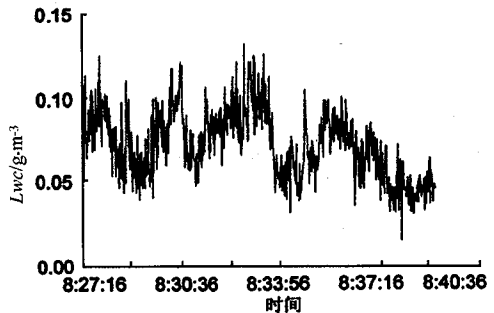


粒子直径随时间的分布

图3 东北部云区云粒子浓度(上)、云中含水量(中)和粒子直径(下)随时间分布



粒子浓度随时间的分布



云中含水量随时间的分布

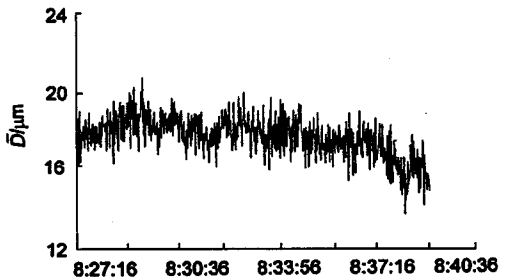


图4 西南部云区云粒子浓度(上)、云中含水量(中)和粒子直径(下)随时间分布

6.2.2 云的水平分布特征

图 3.4 为飞机在 7:33~7:46 穿越东北部云区和 8:27~8:40 穿越西南部云区(取许昌至平顶山段)飞行时观测的云中粒子浓度、液水含量和平均直径随时间的分布,可以看出粒子浓度、平均直径与液水含量随时间的分布具有很好的相关性:较高的粒子浓度、较大的平均直径对应着较高的含水量。尤其可从 8:27~8:40 飞行时段明显看出:由于该时段粒子直径变化很小(均为 $15\mu\text{m}$ 左右),因此粒子浓度与含水量分布趋势几乎完全一致。7:33~7:46 时段则由于粒子直径变化较大,分布不完全一致,但总体分布趋势是一致的,7:42 以后粒子浓度非常低,而直径较之前变化不大,却出现较高的含水量,估计是由于误差所致。穿云飞行过程中所测的最大含水量为 $0.246\text{g}/\text{m}^3$ 。最大粒子浓度 250 个/ cm^3 ,均出现在对应着强回波的东北部云区。云中粒子浓度和含水量的水平分布具有明显的空间分布不均匀性,说明云体在发展的不同阶段、不同部位的物理量特征差别很大^[4]。

6.2.3 不同高度上的云粒子谱

图 5 给出了不同高度上的云中粒子谱,此次降水云粒子谱宽较宽,各高度上的云中粒子谱和干层区中的粒子谱型存在明显差异^[5],干层区粒子浓度远远低于云中粒子浓度。在小粒子段,云中粒子浓度高于干层 3~4 个量级,较大的云粒子($30\mu\text{m}$ 以上)浓度高于干层浓度 1~2 个量级。云中不同高度上的粒子谱型非常相似,均表现为随粒子直径的增大浓度单调下降,4000m、2800m 和 1800m 高度上的粒子谱分别可以拟合为以下公式: (1) $\ln Y = -3.2258 \ln X + 7.0504$, (2) $\ln Y = -3.6314 \ln X + 8.0892$, (3) $\ln Y = -2.7067 \ln X + 5.1999$ 。可以看出三条谱线拟合公式仅仅在系数上略有不同,可以归纳为 $\ln Y = -a \ln X + b$ (其中 a, b 为系数),该拟合公式仅根据本次探测资料得出,有待

于今后收集大量不同地区资料后进一步完善。

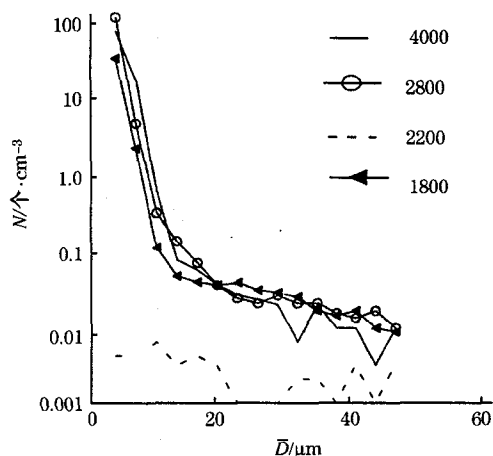


图 5 云中粒子谱

6.2.4 二维粒子特征分析

从 2D-C 图像上看,低层主要是直径为 $300\sim 500\mu\text{m}$ 的小雨滴,7 时 12 分飞到零度层高度以上开始出现直径较小的冰晶。从郑州西南部云区平飞(高度 4000m)探测到的粒子二维图象资料(取样速率为 1 秒)可以看出,云中粒子的大小、浓度水平分布不均匀,晶体形状也有很大不同,包括空间枝状、雪团、六角片状和柱状等。其中空间枝状晶型可辨,有较强的凇附,它的胚胎一般形成于 $-20\sim -25^\circ\text{C}$ 的环境,冰胚形成后由于重力作用下落,在下落过程中,在温度为 -15°C 左右的环境下吸附过冷水在冰胚四周产生枝星型枝杈形成枝状,可以推测此处高积云发展旺盛,云体达到很高的高度;雪团是枝状冰晶在下落过程中吸附环境中的过冷水产生凇附,并相互碰撞合并形成的,其直径较大,超过 $1200\mu\text{m}$,说明 4000m 高度以上云内仍有较好的过冷水条件,并且这一区域的冰晶浓度较高,因而碰撞几率较大;六角片状冰晶,其形成温度约为 -3°C ,估计是在较低高度形成,被向上的扰动携带至高层。柱状冰晶的形成温度为 $-5\sim -8^\circ\text{C}$,即在飞机的飞行高

度上形成。观测到的冰晶各自形成于不同的高度,晶型较为复杂,说明了 As op 云处于不同的发展阶段,云顶高度变化很大,并且有较强的云内扰动。飞行观测的大部分冰晶平均直径为 $400 \sim 800 \mu\text{m}$, 部分区域发现有大于 $1200 \mu\text{m}$ 的较大粒子(如雪团),说明在对流层高层某些区域有较好的冰晶增长条件,具有引晶催化进行人工增雨的条件。

7 结语

(1)本次冷锋降水云云体有明显分层:上层为分布不均、处于不同发展阶段的锋上 As op 云系,下层为较薄的锋下 Sc 云系,两层云之间夹有干层。由于此次飞行高限为 4190m ,所以 As op 云上部的物理量无法得到,观测所得的云中含水量虽然曾出现过 $0.246\text{g}/\text{m}^3$ 的较大值,但总体来说平均含水量较低。

(2)锋区内温度随高度增加,呈现逆温层结,温度递增率约 $0.6^\circ\text{C}/100\text{m}$ 。

(3)本次天气过程降水较小,最大过程雨量仅有 8mm ,估计是由于云中含水量较低,同时,干层的存在又导致云滴或雨滴蒸发,不利于降水的形成。

(4)在给定高度上(平飞高度)云中粒子浓度与含水量具有空间分布不均匀性,起伏

较大,但二者有很好的相关性,高粒子浓度区对应高含水量区。

(5)不同高度上的云中粒子谱型相似,均为随直径增大粒子浓度单调下降,直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的粒子占 80% 以上。干层粒子浓度远远小于云中粒子浓度。

(6)根据二维粒子图象,可以分析出云体处于不同的发展阶段,云顶高度各不相同,同时看出平飞高度以上部分区域有较好的过冷水条件,对流层高层有较好的冰晶增长条件,有进行引晶催化以增加降水的条件。但本次飞行高度偏低,未能达到最佳催化高度。

参考文献

- 1 Arlin B. Super and Bruce A. Boe. Wintertime Cloud Liquid Water Observations over the MOGOLLON RIM of ARIZONA. The Journal of Weather Modification. 1988, 20 (1).
- 2 胡志晋. 层状云人工增雨机制、条件和方法的探讨. 应用气象学报, 2001, 12(增刊): 10~13.
- 3 陈万奎, 严采繁. 冰相雨胚转化水汽密度差的试验研究. 应用气象学报, 2001, 12(增刊), 23~29.
- 4 吴志会. 河北省春夏季层状云微物理结构及人工增雨潜力的初步研究. 云降水物理和人工增雨技术研究, 北京: 气象出版社, 1994.
- 5 王广河, 游来光. 乌鲁木齐冬季冷锋锋上云带和锋下层积云的微物理结构及其降雪特征. 气象, 1989, 15(3).

A Case Study of Micro-Structure of Precipitable Stratiform Clouds

Li Shuri Wang Guanghe Liu Weiguo

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

An aircraft equipped with the Particle Measuring System (PMS) probed the precipitable stratiform clouds over Henan province on April 14, 2000. The micro-physical characteristics of the cloud systems are analysed by means of micro-physical data from the aircraft measurement in conjunction with the corresponding period data of weather, radar and satellite, etc. The horizontal and vertical variation of LWC, MND and droplet spectra are discussed.

Key Words: micro-physics of cloud liquid water content droplet spectra