

# 对梅雨锋降水云微物理结构的 摄像探空观测和分析<sup>①</sup>

杨 静 王鹏云 杨绍忠 徐宝祥

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

## 提 要

利用球载摄像探空仪对梅雨锋降水云微物理结构进行了观测,得到云中5种类型粒子(冰晶、霰、雪片、冻滴、雨滴)直径、数浓度、质量浓度的垂直分布及各高度层上的温、压、湿分布。对观测结果的分析表明:在梅雨锋雨带的对流云团中,冰晶、霰和雪片对降水形成起着重要作用。

**关键词:** 摄像探空仪 云微物理结构 梅雨锋降水

## 引 言

每年6~7月,在长江中下游地区经常阴雨连绵,有一大片稳定持久的雨区,一般称为梅雨。对梅雨的研究已有许多,主要从天气学和热力动力学方面研究,如高低空急流的耦合作用、次天气尺度和天气尺度的相互关系、暴雨区能量的相互转化关系、不稳定理论和位涡与辐射冷却的诊断分析等<sup>[1-4]</sup>。随着数值预报技术的发展,更多的人采用数值模式进行模拟,以此来分析研究各物理量(如降雨量、风场、热通量、位势涡度等)的结构和演变<sup>[5]</sup>。模拟研究发现云微物理过程与天气系统的相互作用很重要,微物理过程不仅受宏观热力动力过程制约,而且有很强的反馈作用<sup>[6]</sup>。数值模拟的结果是否能真实反映暴雨云中云物理结构和过程,需要观测资料加以验证。但以往对梅雨锋暴雨中云物理结构的直接观测很少。1999年6~7月,中国气象科学研究院与日本高桥教授合作,在上海宝山气象站用特制的摄像探空仪对降水云中云微物理结构进行了观测。本文通过对观测结

果分析,研究云中的微物理过程。从而,对梅雨锋降水发生发展的云物理机制有了更具体的了解,为深入研究云物理与中尺度热力动力过程的相互作用提供基础。

## 1 摄像探空仪

摄像探空仪的主要部分是一台摄像机,用来拍摄和记录下落降水粒子的图像,一个电感线圈,用来测量降水粒子的荷电极性。红外感应元件在照相机的上方15 mm处,当直径大于0.5 mm的粒子从顶部落入,阻断红外光束,触发装在镜头上的闪光灯。在红外感应元件和闪光触发器之间有一套延时电路,记录粒子图像。粒子图像信息被转化为频率在10 Hz到1 MHz之间的信号,通过1680 MHz的载波送回地面站。在地面站,粒子图像实时显示到接收机的显示屏上,并同时记录到录像带上供事后分析。此外,在摄像探空仪中,还有一套与常规探空仪类似的传感器,观测并记录上升过程中各高度上的气压、温度、湿度,并将信息传回地面。仪器构造原理见图1<sup>[7]</sup>。

<sup>①</sup> 资助项目:中国暴雨试验研究 G19980040907,国家自然科学基金项目 49735180

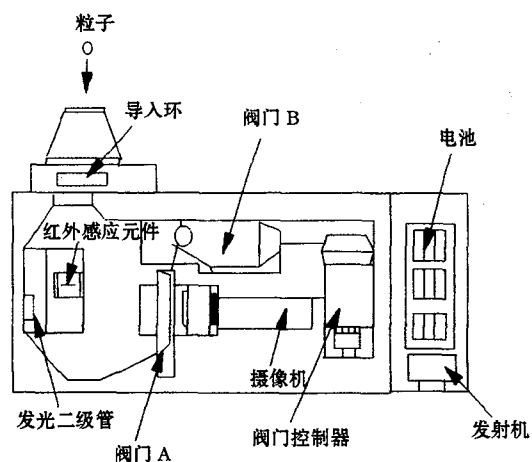


图1 摄像探空仪结构示意图

在本次实验中,于1999年6月24~30日的降水过程中,在上海宝山站共施放了12次探空气球,其中8次带有红外摄像探头,另外的4次还带有显微摄像探头,可以更清晰地观测粒子形状。

从接收机(放像机)屏幕上显示的粒子形状、透明度和气泡可知粒子相态、类别。而通过显示屏右侧的标尺及屏幕底部的光斑可定量读出粒子的大小、电荷极性、及云中温、压、湿的量值。摄像探空仪在探空气球的携带下垂直上升穿过云层,通过观测和计算,可得到垂直方向上粒子的分布及温、压、湿的垂直分布,获得从地面至云顶连续的粒子分布状况。进一步根据取样体积和粒子的密度计算其数浓度和质量浓度分布。

观测时由上海市气象局 WSR-88D 多普勒雷达观测帮助选择探空观测的时机,使得探空气球能进入到降水较强的云团中。

## 2 资料的获取

从6月24~30日,上海地区连续几天发生了强降水天气,日降水量依次为 65.8mm、32.1mm、42.5mm、23.7mm、31.9mm、1.7mm、151.7mm。在此期间,共施放了12次探空气球,获得了云中粒子分布的一些资料。其中,24日施放了2次探空气球,26日共施放了4次探空气球,27、28和30日分别

施放了2次、1次和3次探空气球。

在6月24日的天气图上,静止锋维持在长江下游及上海附近,静止锋北侧多阴雨天气,有大雨、暴雨产生,雨区范围大。24日上海的降水较多,日降水量达65.8mm,仅次于30日。雨量分布不均,24日08时和09时雨量最大,雨强为 $7.3\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在雨强分别为 $7.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $5.5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的07时和09时30分,我们施放了 up.11(带有红外探头)和 mix.10(带有红外探头和显微探头)探空气球(见图2)。因风速不大,探空气球垂直上升的水平偏移不大。以下将对这两次观测结果进行重点分析。

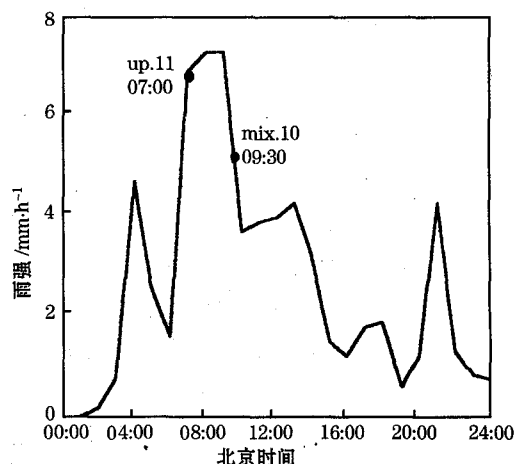


图2 1999年6月24日24小时雨强图

图中黑点为施放摄像探空仪时间

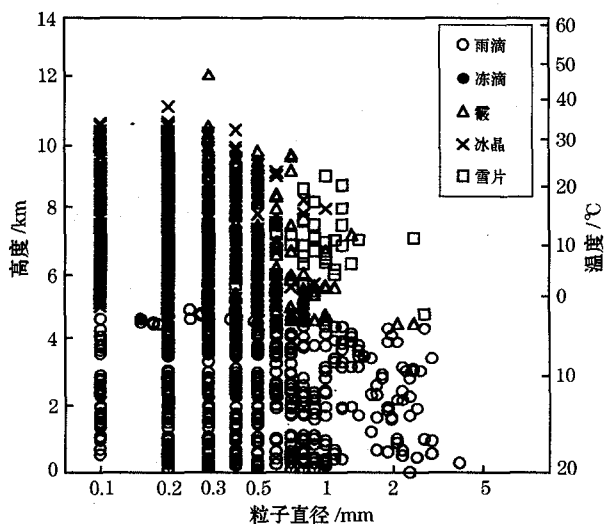
### 2.1 up.11 观测

当07时观测到宝山地区雷达回波强度达45dBz时,开始施放 up.11 探空气球。在PPI回波图上,大片回波中有分布凌乱的点块状回波,这些小回波强度大,为对流性云团。宝山位于 $320^\circ$ 的方位角上,距雷达中心约28nm(52km),雷达回波强度达48dBz。而沿方位角和距雷达中心距离分别为 $301^\circ$ 、31nm(57km), $339^\circ$ 、28nm(52km)的两点所做的垂直剖面图上,宝山地区(距RHI图原点10海里处)云系发展旺盛,回波强度大,云顶发展至10km。在4.5 km高度附近,有一

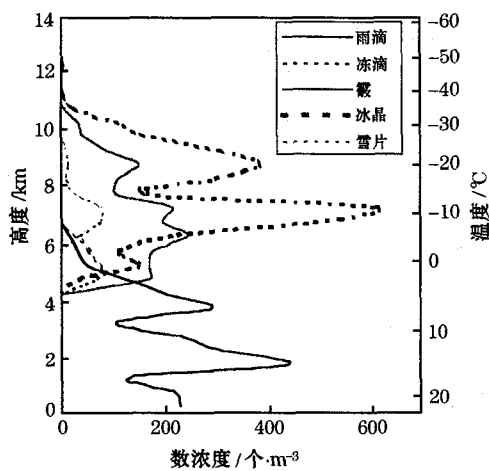
个较强的雷达回波区,值为 35dBz。7时30分的 GMS 红外卫星云图显示宝山地区的云处于梅雨锋云带的后部,发展旺盛,云顶温度为  $-45.5^{\circ}\text{C}$ ,云高 11.94km。

up.11 总共观测到 1475 个粒子,其中有许多直径小于 1mm 的冰晶粒子,而霰的直径

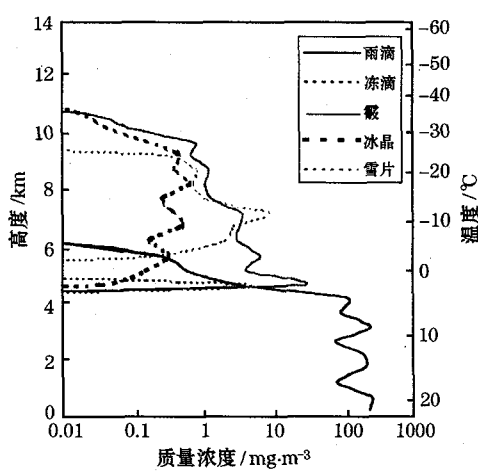
大小在 0.5 ~ 2.5mm 之间,大致分布在 4.5km 至云顶范围内。零度层附近有一些冻滴,零度层以下有少许直径较大的霰和雪片,最大直径为 2.5mm 的霰位于  $3^{\circ}\text{C}$  处,这是直径更大的粒子在零度层以下未完全融化的部分(图 3)。



(a) 各种粒子随高度的分布



(b) 粒子数浓度的垂直分布



(c) 粒子质量浓度的垂直分布

图 3 粒子谱分布

对摄像探空仪所获得的粒子在垂直方向上的分布进行统计,每间隔 500m 做一次统计(表 1),得到粒子数浓度随高度的分布。由粒子数浓度分布图(图 3b)可见,冰晶的数

浓度最大,平均浓度为  $300 \sim 400$  个/ $\text{m}^3$ ,峰值在  $-10^{\circ}\text{C}$  附近,浓度值为  $610$  个/ $\text{m}^3$ 。霰随高度分布趋势与冰晶一致,但数浓度比冰晶小,最大值是  $250$  个/ $\text{m}^3$ 。雪片的数浓度

最小,每立方米仅几十个。冻滴主要分布在零度层附近,在5km处存在一峰值,其值为81个/m<sup>3</sup>。

表1 每500m观测到的总粒子数

高度/km	mix.10	up.11	高度/km	mix.10	up.11
0~0.5	14	58	7~7.5	21	125
0.5~1	5	51	7.5~8	17	59
1~1.5	15	34	8~8.5	11	76
1.5~2	8	96	8.5~9	13	80
2~2.5	13	70	9~9.5	13	73
2.5~3	32	59	9.5~10	13	46
3~3.5	18	27	10~10.5	21	33
3.5~4	25	69	10.5~11	14	8
4~4.5	20	51	11~11.5	15	1
4.5~5	15	81	11.5~12	16	0
5~5.5	17	91	12~12.5	3	1
5.5~6	31	79	12.5~13	4	0
6~6.5	47	98	13~13.5	2	0
6.5~7	21	109	13.5~14	1	0

假定雨滴的密度为 $1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,冻滴的密度为 $0.9\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,霰的密度为 $0.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,冰晶和雪片的密度为 $0.1\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,用粒子的等效直径算出粒子体积,进而得到每500m总的粒子质量,得出粒子质量浓度的分布<sup>[7]</sup>(图3c)。质量浓度不仅与数浓度有关,还与粒子的密度及体积有关。而冰晶、霰等粒子的大小不一,因此质量浓度的分布规律与数浓度不完全一致。在整个粒子群中,霰所占的成分最大,在4.75km的高度上其峰值为 $25.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,在零度层以上,质量浓度随高度递减。雪片次之,峰值在 $-10^{\circ}\text{C}$ ,值为 $8.8\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冰晶的质量浓度较小,还未达到 $1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冻滴集中在零度层附近,峰值为 $5.1\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

## 2.2 mix.10 观测

当up.11观测过程结束后,在09时30分又施放了mix.10摄像探空仪,此时雨强降到 $5.5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。对粒子交替进行红外扫描和显微扫描,得到粒子的具体形状和分布状况。此次观测中,共有446个粒子进入视野范围,最大粒子直径为3mm。冻滴出现在

5.3~6km处,也即零度层上方附近,最大冻滴直径为0.5mm。冰晶所处的范围较大,大多数冰晶的直径在0.1~0.4mm之间,最大直径可达1mm,位于 $-16^{\circ}\text{C}$ 处,霰的分布范围也很广,从零度层以上一直延续到云顶。大多数霰的直径为0.5~0.9mm,有一最大直径1.7mm的霰存在于 $-4^{\circ}\text{C}$ 的高度上。在6km和11km附近,霰的数目较多,为霰的密集区。雪片分布在几个高度层上,呈不连续分布(图略)。

在粒子数浓度分布图上,冰晶数浓度最大,其峰值位于 $-8^{\circ}\text{C}$ 处,为61个/m<sup>3</sup>,另一峰值在 $-45^{\circ}\text{C}$ 处,值为60个/m<sup>3</sup>。霰的数浓度随高度的分布趋势与冰晶大致相同,在 $-5^{\circ}\text{C}$ 处,最大数浓度达44个/m<sup>3</sup>。雪片的浓度峰值在 $-40^{\circ}\text{C}$ 处,值为15.58个/m<sup>3</sup>(图略)。

冰晶的最大质量浓度是 $0.6\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,位于零度层附近;在 $-18^{\circ}\text{C}$ 处,冰晶的质量浓度也较大,为 $0.23\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。霰的质量浓度平均比冰晶大一个量级,其峰值达 $3.45\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,位于零度层附近。在浓度分布中,雪片的作用不容忽视。在 $-9^{\circ}\text{C}$ 处,雪片质量浓度最大值是 $4.2\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。在一定的高度间隔内,雪片质量浓度都有一个较大值(图略)。

## 3 对观测结果的分析

雷达回波图和卫星云图显示,梅雨锋云系层次较丰富,在宽广的梅雨锋云带中,嵌置着一个个发展旺盛的对流云团。因此,该梅雨锋云带是一宽广的混合云带,在层状云中包含着对流云。两次观测中探空气球上升速度较快,处于上升气流较强的云层中,从卫星云图和雷达回波剖面图可知,摄像探空观测主要集中在梅雨锋云带后部的对流云团中。

摄像探空仪从云底至云顶连续观测,能较好反映云中粒子的分布状况和微物理结构。两次观测中,第一次观测时雨量较大,第

二次观测时雨量较小, up.11 摄像探空仪观测到的粒子数多于 mix.10。up.11 观测的冰晶直径大致分布在 0.1~1mm, 冰晶数浓度平均浓度大, 峰值达每立方米几百个。观测到许多直径较大的霰, 最大直径可达 2.5mm, 还有一定数量的雪片, 三者浓度随高度的变化趋势大体一致。mix.10 观测的冰晶的直径普遍偏小, 大多数直径在 0.1~0.4mm 之间; 霰的直径也小, 最大霰粒子也未达到 2mm。冰晶数浓度平均每立方米仅几十个, 霰的数浓度比冰晶小, 雪片最小, 冰晶和霰数浓度随高度的变化趋势也一致。对比这两次观测结果, 雨量大时云发展旺盛, 云中液态和固态粒子显著增加。两次观测结果都显示霰的数浓度虽比冰晶小, 但质量浓度大于冰晶质量浓度。在两次观测中, 冰晶数浓度峰值都位于 -10℃ 附近, 说明此处的冰水饱和差值大, 是大量冰晶发生和增长的部位。冰晶在下落过程中通过相互粘连和碰撞过冷水滴, 直径变大。因此, 在云的中下层, 冰晶较大。冰晶与小云滴冻结在一起形成白色不透明的霰。由于霰的形成与冰晶相关, 所以霰的数浓度分布规律与冰晶相似。但是, 霰的密度和尺寸比冰晶大, 故霰的质量浓度比冰晶大, 在云中起着主导地位。另外, 雪片在粒子分布中, 也占有一定的比重, 对降水有一定贡献。当云发展旺盛时, 云内通过凝华、撞冻、淞附、粘连等过程, 易生成雪片。云发展越旺盛, 雪片越多, 对降水的贡献也越大。在零度层附近, 存在相当数量的冻滴, 冻滴平均直径为 0.4mm, 其质量浓度在雨量大时可达  $5\text{mg}\cdot\text{m}^{-1}$ 。

在零度层以下, 还存在一些固态粒子。尤其是霰粒子, 由于未来得及融化, 在零度层下还保持着较大直径和较高的质量浓度。云下雨滴直径和质量浓度都很大, 平均浓度达  $100\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最大雨滴直径为 4mm, 最大雨滴质量浓度在 8℃ 处达  $247\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。随高度

降低, 质量浓度增大, 雨滴滴谱展宽。这表明冰粒子和冻滴落到暖区融化后和小雨滴碰并增长及雨滴间的碰并增长。

对 26 日的 4 次摄像探空观测也进行了分析, 得到与 24 日的观测结果类似结论: 冰晶和霰在粒子分布中占着主导地位, 冰晶浓度和霰浓度随高度的变化规律相似, 霰质量浓度比冰晶大一个量级。

#### 4 摄像探空仪观测和计数中存在的问题

由于云滴直径较小, 一般在  $50\mu\text{m}$  以下, 最大直径才为 0.1mm, 而只有直径大于 0.5mm 的粒子才能触发闪光灯, 使其图像被拍摄并记录下来, 而粒子尺度较小的云滴不易被记录。当探空仪进入云中, 尤其是零度层以上, 云中存在大量的冰晶、霰等微粒, 在某一时刻有多个粒子进入传感器, 当直径大的微粒触发红外光束引起闪光, 该视野范围内所有大于 0.1mm 的粒子都将被记录下来。由于同一视野内存在较多大小各异的粒子, 因而忽略掉直径小于 0.1mm 的粒子。当进入某一视野范围内的所有粒子直径  $< 0.5\text{mm}$  时, 不能触发红外光束, 则该视野内的粒子将被忽略掉, 使得某些高度上的粒子数偏少。另外, 摄像机闪光后需重新充电, 充电时间不能观测计数。这些因素可能使粒子浓度分布出现虚假多峰。落入到摄像探空仪的粒子, 由于所拍摄的角度不同, 一些板状冰晶可能被误认为柱状, 长柱状也可能变成短柱状, 读得的粒子大小将有偏差。探空仪拍摄的图像是二维的, 而把粒子视为球形, 用其等效直径计算体积, 这对总体积的计算造成一定的误差, 并影响到质量浓度分布的计算。

相对于摄像探空仪, 飞机探测所取得的粒子数要多一些。通常在对流云中, 根据粒子测量系统(PMS)2DC 探头的探测结果所得的浓度比探空仪所测得的浓度将近大一倍<sup>[8]</sup>。但它存在一定局限性, 如飞机探测在云中的时间很短, 且只能获得几个高度上水

平方向的粒子资料,同时,飞机难以进入雷达回波很强的区域,而这些区域往往又是重要降水过程发生的关键地区。因此,尽管摄像探空仪探测在定量上存在一些误差,但它能获得垂直方向上连续的粒子分布,并能直接看到粒子的形状和大小,这对研究梅雨锋中的对流性降水是有很大帮助的。

### 5 小结

在梅雨锋降水过程中,用摄像探空仪对云内微物理结构进行观测,比较云内各种粒子的大小,浓度分布规律,分析粒子对降水的贡献情况,得到如下结果:

(1)梅雨锋暴雨云中冰相的存在是普遍的现象(本文虽只给出两次观测结果,但在12次探测中只有一次未见冰相粒子)。云中以霰和雪片为主要降水元,霰对降水的贡献尤其重要。

(2)在零度层上方有过冷水与冰粒子的混合区。由此可认为,冷却过程是造成梅雨锋雨带中对流性雨团暴雨的主要云物理过程。

### 参考文献

- 1 陈受钧. 梅雨末期暴雨过程中高低空环流的耦合—数值实验. 气象学报, 1989, 47(1): 8~15.
- 2 薛秋芳, 刘金良, 丁一汇. 一次暴雨过程中天气尺度与次天气尺度系统的相互作用. 中尺度天气和动力学研究. 北京: 气象出版社, 1996: 35~40.
- 3 余志豪, 陆汉城. 梅雨锋暴雨的中尺度雨带和雨团. 中国科学, 1988, (B辑)9: 1002~1010.
- 4 洪延超, 胡朝霞, 古谷军等. 梅雨锋暴雨及其形成的物理机制. 国际暴雨洪涝学术讨论会. 北京: 气象出版社, 1992: 37~39.
- 5 翟国庆, 高 坤. 江南地面热通量对江淮气旋暴雨影响的模拟. 中尺度天气和动力学研究. 北京: 气象出版社, 1996: 282~293.
- 6 J. Reisner, R. M. Rasmussen, R. T. Bruintjes. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. Q. J. R. Meteorol. Soc., 1998, 124: 1071-1107.
- 7 T. Takahashi, Kenji Suzuki. Precipitation mechanisms of cloud systems developed in a semi arid area of Pingliang, China: Videosonde observation. J. M. S., 1995, 73(6): 1191-1211.
- 8 L. Stith 等. 刘静波译. 湿夏与干夏对流云微物理特征的比较. 国外云和降水研究. 第十二届国际云和降水会议论文选编. 北京: 气象出版社, 1998: 70~73.

## Videosonde Observations and Analyses for Cloud Microphysical Structures in Mei-yu Front Precipitation System

Yang Jing Wang Pengyun Yang Shaozhong Xu Baoxiang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

### Abstract

Cloud micro-physical structures for mei-yu front rainfall were observed by using the balloon-borne Precipitation Particle Image Sensor during June and July 1999 at Shanghai. The observations including vertical distributions of various particle size, their number density and mass density are obtained. Analyses show that ice crystals, graupels, snowflakes and frozen droplets often coexist with the liquid phase in the convective cloud clusters inbanded in mei-yu front rainband. They and their interactions play important roles in the formation and evolution of rainfall.

**Key Words:** video sonde cloud microphysical structure mei-yu front rainfall