

切变线降水系统微物理特征及降水机制个例分析

刘健 齐彦斌 蒋彤 陈知新 米长树 纪瑛英

(吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062)

摘要 利用机载云粒子探测系统(PMS),对 2004 年 7 月 1 日影响吉林省的一次切变线降水过程进行了探测飞行,利用所获取的宏微观资料对此次降水过程的微物理结构、降水机制进行综合分析。结果表明:此次切变线降水云系主要由高层云、雨层云、碎云构成,高层云和雨层云中间夹有 1100 m 左右的无云区;3 类云中平均云滴浓度、平均云滴直径各不相同;云水含量随高度分布不均匀,云的不同部位云水含量起伏较大;冰晶浓度平均为 17.3 个/L;此次探测的降水云系符合 Bergeron 提出的催化云-供水云相互作用导致降水的概念。根据云图及其他探测资料综合分析,冰晶主要产生于高层云上部或卷层云的冰晶播撒,供水云为高层云中下部和雨层云。

关键词 切变线降水 PMS 资料 微物理特征 降水机制

引言

研究和观测表明,虽然层状云较积状云易于探测,但层状云结构和降水过程具有很复杂的特性,存在着多尺度有机组合、动力和微物理过程之间复杂的相互作用过程^[1~6],层状云对积云的发展与降水亦有着非常重要的影响^[7],另外层状云是大部分北方地区冬春季的重要降水云系,与人们生活和农业生产有着密切的关系,是目前人工增雨和人工影响天气研究的主要对象。正因如此,层状云宏微观结构及其降水过程的研究在云物理与降水学的研究中很重要。切变线天气系统是影响吉林省降水的重要天气系统,也是人工影响天气工作的主要研究对象。吉林省自 1963 年在飞机上安装了苏联研制的手动微物理探测仪器,到目前引进的美国 PMS 公司生产机载粒子测量系统,结合天气动力条件分析,曾对影响吉林省几大天气系统:河套低压、蒙古气旋、江淮气旋和冷暖锋雨系进行过一系列研究^[8~11],全面分析了几大天气系统的云雨宏微观结构特征、降水的发生发展机制及人工影响潜力等问题,也曾对人工增雨效果作过一些统计分析^[12]。但是,对切变线系统尚未做过类似的工作。因此,针对 2004 年 7 月 1 日受切变线影响的天气过程,利用现

代化指挥系统,首次开展了微观探测仪器、卫星、雷达、探空、天气、地面观测结合在一起的综合探测方法,全面分析了这次天气过程的云雨微物理特征。

1 天气及探测区域

此次切变线降水系统从 7 月 1 日凌晨开始影响吉林省,从 03:00、04:00、06:00、14:00 的卫星云图上可以看出,云场的分布与地面切变线一致,有一条东北—西南走向的云带,主要分布在吉林省的西南部,03:00、04:00 云带结构西南松散、密度小,东北方向云厚度较厚,结构不均匀,到 06:00,吉林省西南部云层加厚,此时,有利于作业探测飞行。整条云带随时间向东南方向移动,到 14:00,云带基本移出吉林省,主要覆盖黑龙江东南和朝鲜半岛。06:20~09:20 为探测飞行时间,此时探测区域位于整个云系的东南方向(124°32'E, 43°34'N~124°47'E, 43°34'N)。表 1 为探测区域地面雨量分布。

表 1 2004 年 7 月 1 日各站点 03:00~14:00 雨量

	德惠	农安	长春	公主岭	梨树	四平	九台
雨量/mm	4.0	8.0	15.0	25.0	24.0	24.0	6.0
	双阳	伊通	吉林	烟筒山	磐石	辉南	桦甸
雨量/mm	11.0	17.0	5.0	7.0	7.0	15.0	10.0

2 探测及资料来源

06:20 飞机从长春机场起飞,探测云层主要为碎云(Fn)、雨层云(Ns)、透光高层云(Asop),飞机于07:17由云底飞至6100 m高度(未出云),随后于07:54下降至1100 m高度,由此完成了飞机对自然云的探测。分析资料来自机载粒子测量系统(PMS),该系统包括3个探头:FSSP-100(前向散射粒子谱仪)量程为 $0.5\sim 47\ \mu\text{m}$,OAP-2D-C(二维光阵云滴谱探头)量程为 $25\sim 800\ \mu\text{m}$,OAP-2D-P(二维光阵雨滴谱探头)量程为 $200\sim 6400\ \mu\text{m}$ 。可以测量大气中气溶胶、云滴、雨滴、冰晶以及雪晶的尺度谱分布。

3 微物理特征分析

从图1、2、3中可以看出,本次天气系统的降水云系主要由高层云(As)、雨层云(Ns)、碎云(Fn)云组成,高层云和雨层云中间为无云区,飞机探测未达云顶。从云系的垂直结构特征来看,是典型的暖锋云系。其中高层云云底高3700 m左右,云顶在6000 m以上,云厚2500 m以上;雨层云云底高700 m,云顶高2600 m,云厚1900 m;雨层云下面分布不均的碎云;高层云和雨层云中间夹有1000 m左右的干层。 $0\ ^\circ\text{C}$ 层高度4200 m,高层云中上部为冷云,冷云厚度在

2000 m以上,高层云下部和雨层云为暖云。

3.1 云滴浓度和尺度的垂直分布

图1、2、3为一维云粒子探头FSSP在爬升过程中探测到的云滴浓度、云滴平均直径、云水含量随高度的分布情况。从图1和图2可以看到,云滴浓度在垂直方向分布很不均匀,雨层云云滴浓度明显比高层云云滴浓度要大。其中高层云云滴平均浓度 $10.4\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大浓度 $120\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,位于高层云的下部,对应高度3900 m;雨层云平均浓度 $181\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,最大浓度 $528\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$,位于雨层云的下部;碎云最大浓度为 $269\ \text{个}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。高层云和雨层云有一个共同特征,即下部浓度比中上部要高。高层云平均直径 $15.6\ \mu\text{m}$,随高度变化不大;雨层云平均直径 $6.5\ \mu\text{m}$,雨层云云滴尺度随高度升高明显增大,抬升凝结增长作用比较明显。

3.2 云水含量随高度的分布

图3是FSSP探测的云水含量垂直分布,从图中可以看到,高层云中平均云水含量 $0.03\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大 $0.078\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对应温度 $-0.8\ ^\circ\text{C}$;云水含量随高度分布不均匀,云的不同部位云水含量起伏较大,上、下部位含水量较小,中层相对较大。雨层云平均云水含量也为 $0.03\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但最大云水含量为 $0.098\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,云水含量随高度增加而增大。碎云含水量一般小于 $0.015\ \text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

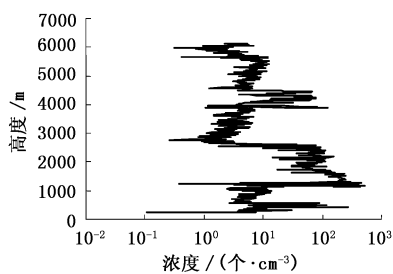


图1 云滴浓度随高度分布

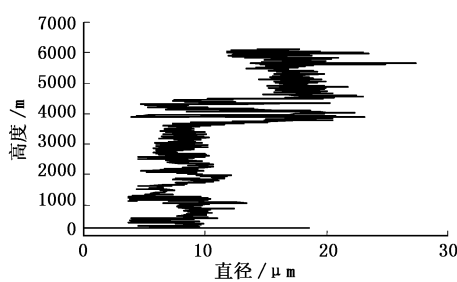


图2 云滴平均直径随高度分布

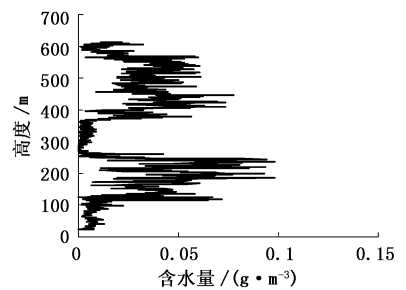


图3 云水含量随高度的分布

图4为在6100 m高度层观测到的二维图像,在这一层观测到了 $0.8\ \text{mm}$ 的霰粒子,说明飞行层以上仍然有丰富的过冷水存在,这对降水粒子增长具有很重要的意义。

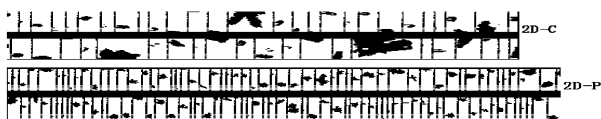


图4 6100 m高度二维粒子图像($-7.8\ ^\circ\text{C}$)

3.3 冰晶随高度分布

通过分析发现,云层中,在 $0\ ^\circ\text{C}$ 层以上的冰晶浓度随高度分布是不均匀的。 $-4\sim -5\ ^\circ\text{C}$ 层和 $-8\sim -9\ ^\circ\text{C}$ 层分别存在极大值,温度低于 $-9\ ^\circ\text{C}$ 的云层未观测。冰晶浓度平均为 $17.3\ \text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,汪学林等在20世纪60年代曾作过冰晶飞行观测,统计结果是吉林地区层状云中冰晶浓度平均为 $14.8\ \text{个}\cdot\text{L}^{-1}$,本次观测统计结果与之接近。

3.4 雪晶随高度分布

通过分析 2D-P 探头的资料发现,4200~5000 m 雪晶浓度随高度升高而增加,5000 m 以上随高度增加而减小。雪晶平均浓度为 $1487 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$,5044 m 左右存在极大值,最大浓度为 $4810 \text{ 个} \cdot \text{m}^{-3}$,对应温度为 $-1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。4200~5000 m 高度层内,粒子浓度随高度降低而减小,粒子尺度随高度降低而增加,初步估计在该层潮湿的冰雪晶存在着粘连增长。2D-P 粒子尺度在 3800 m 左右明显减小,与冰雪晶粒子融化有关。

4 云降水机制分析

如果泛义地定义催化云(Seeder Cloud)为大量产生降水胚的云,供水云(Feeder Cloud)为供应降水胚增长所需水分的丰水云,则本次探测的降水云系符合 Bergeron 提出的催化云-供水云相互作用导致降水的概念。

本次飞行未能飞到云顶观测,根据云图及其他探测资料综合分析,冰晶主要产生于高层云上部或卷层云的冰晶播撒,供水云为高层云中下部和雨层云。冰雪晶在过冷云中的增长,主要有凝华、淞附和丛集增长过程。

淞附增长(碰冻增长)是指冰雪晶与过冷水滴碰撞并冻结的增长过程。从 2D-C 和 2D-P 的二维图像资料可以看到,在过冷云层冰雪晶粒子淞附增长非常明显,在高度为 6100 m、温度为 $-7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层观测的冰雪晶图像显示,冰雪晶粒子存在着淞附增长,一些冰雪晶粒子由于淞附增长几乎无法分辨其晶形而模糊(图 4)。

丛集增长过程是指通过冰晶之间的相互粘连作用而增长的过程,冰晶的聚合机制与温度有密切关系,有粘连和连锁两种机制。当温度接近于 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,具有潮湿表面的冰雪晶相互接触而粘连在一起,即粘连增长。当温度在 $-17 \sim -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间时,如有较高的冰面饱和度,则枝状冰晶的出现占优势,它们接触时可以相互“锁”在一起,即连锁机制。本次观测在 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层附近和 $-7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 都观测到了粒子的冰晶聚合体,说明存在着明显的丛集增长过程,见二维图像(图 4)。在 $-7.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 观测到的冰晶聚合体推测可能产生于 $-17 \sim -12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层,估计在这一层也存在着比较丰富的过冷水。

降水粒子在雨层云中主要是融化和碰并增长(图 5,图 6)。从图 5 可以看到,2D-C 探测的粒子在下落

过程中,平均直径从 $70 \mu\text{m}$ 左右增长到 $240 \mu\text{m}$ 左右,平均直径增长 3 倍多;从图 6 可以看到,2D-P 探测的大雨滴在下落过程中,平均直径从 $600 \mu\text{m}$ 左右增长到 $1100 \mu\text{m}$ 左右,平均直径增长近 80%。

本次切变线系统有稳定的低空急流将黄渤海和 7 号台风的水汽源源不断的向东北区输送,由于在暖锋和中低空切变线之间具有较强的辐合,在中低层形成含水量丰富的供水云,为降水粒子增长提供了丰富的云水。而高空催化云自然播撒的冰晶浓度比较低,存在着很好的人工催化潜力。

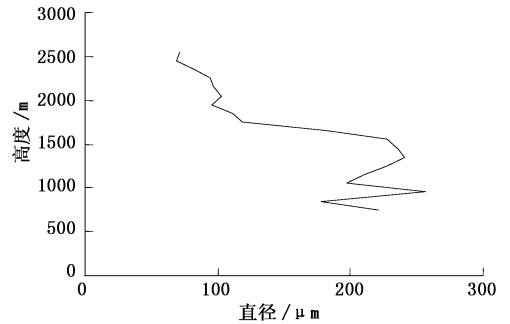


图 5 雨层云中 2D-C 粒子直径随高度变化

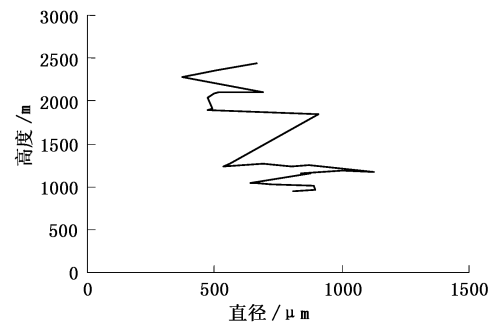


图 6 雨层云中 2D-P 粒子直径随高度变化

5 结语

(1) 本次天气系统的降水云系主要由高层云(As)、雨层云(Ns)、碎云(Fn)组成,高层云和雨层云中间夹有干层。从云系的垂直结构特征来看,是典型的暖锋云系。

(2) 3 类云中平均云滴浓度、平均云滴直径各不相同;云水含量随高度分布不均匀,云的不同部位云水含量起伏较大;冰晶浓度平均为 $17.3 \text{ 个} \cdot \text{L}^{-1}$,在 $-4 \sim -5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层和 $-8 \sim -9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层存在冰晶繁生的可能。

(3) 本次探测的降水云系符合 Bergeron 提出的催化云-供水云相互作用导致降水的概念。冰晶主

要产生于高层云上部或卷层云的冰晶播撒,供水云为高层云中下部和雨层云。

参考文献

- [1] Browning K, Harrold T W. Air motion and precipitation growth at a cold front [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1969, 96: 369 - 389.
- [2] Matejka T J, Houze R A Jr, Hobbs P V. Microphysics and dynamics of the clouds associated with mesoscale rainbands in extratropical cyclones [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, 106: 29 - 56.
- [3] Hobbs P V. High concentrations of ice particles in a layer cloud [J]. *Nature*, 1974, 251: 694 - 696.
- [4] 胡志晋, 秦瑜, 王玉彬. 层状冷云数值模拟[J]. *气象学报*, 1983, 41: 194 - 202.
- [5] 田广元, 王永亮. 辽宁省人工增雨天气概念模型[J]. *气象科技*, 2007, 35(2): 264 - 268.
- [6] 吴志会, 段英, 张晶, 等. 不同降水天气系统自然降水特征及火箭人工增雨潜力分析[J]. *气象科技*, 2005, 33(增刊): 14 - 20.
- [7] 黄美元, 洪延超, 徐华英. 层状云对积云发展和降水的影响——一种云与云之间影响的数值模拟[J]. *气象学报*, 1987, 45(1): 72 - 77.
- [8] Hobbs P V. The nature of winter clouds and precipitation in the Cascade Mountains and their modification by artificial seeding part I, II, III [J]. *J. Appl. Met.*, 1975, 14: 783 - 858.
- [9] Gabriel K R. The Israeli Rainmaking Experiment 1961 - 67; Final Statistical Tables and Evaluation [R]. *Tech. Rep.*, Jerusalem, Hebrew University, 1970: 47.
- [10] Gagin A, Neumann J. The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of the results [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1981, 20: 1301 - 1331.
- [11] Nirel R, Rosenfeld D. The third Israeli rain enhancement experiment—an intermediate analysis [C]. *Proceedings, Sixth WMOS ci. Conf. Wea. Mod.*, Peastum, Italy. 1994 (II): 569 - 572.
- [12] Rosenfeld D, Farbstein H. Possible influence of desert dust on seed ability of clouds in Israel [J]. *J. Appl. Meteor.*, 1992, 31: 722 - 731.

Analysis of Micro-Physical Structure Characteristics and Precipitation Mechanisms of a Shear-Line Precipitation Case in Jilin Province

Liu Jian Qi Yanbin Jiang Tong Chen Zhixin Mi Changshu Ji Yingying

(Jilin Provincial Weather Modification Office, Changchun 130062)

Abstract: A composite sounding flight was made during a shear-line precipitation process in Jilin Province on 1 July 2004. The micro-physical structure, precipitation mechanisms of this precipitation process are analyzed by means of the airborne Particle Measuring System (PMS) data, and the micro-physical structure characteristics of the shear-line precipitation cloud system and the physical mechanisms of rainfall formation are analyzed compositely. The results show that this shear-line rainfall clouds mainly consist of altostratus, nimbostratus, and fractus; the average cloud droplet concentration and average cloud droplet diameter are different in three kinds of clouds; the cloud water content is distributed unevenly with increasing height; and the different parts of the clouds have different cloud water contents. The precipitation cloud system measured by PMS conforms to the concept of Bergeron seeder-feeder cloud mechanism. The comprehensive analysis of cloud pictures and other sounding data shows that ice crystals mainly appeared in the upper part of altostratus or resulted from the spreading of ice crystals in cirrostratus, and feeder clouds are the central and lower parts of altostratus and nimbostratus.

Key words: shear-line precipitation, PMS (Particle Measuring System) data, micro-physical characteristic, precipitation mechanism