

马新成, 黄梦宇, 于潇洵, 等. 2012. 一次副热带高压后部层状云降水中山区层状云宏微物理结构探测分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 711–718, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.08. Ma Xincheng, Huang Mengyu, Yu Xiaowei, et al. 2012. An observational study of macro/microphysical structures of stratiform cloud in a high-pressure system rear over mountain [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 711–718.

一次副热带高压后部层状云降水中山区层状云 宏微物理结构探测分析

马新成^{1,2} 黄梦宇¹ 于潇洵³ 金华^{1,2} 毕凯¹ 董鹏捷¹
张磊¹ 张蔷^{1,2}

1 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

2 北京市气象局云降水物理研究与云水资源开发北京市重点实验室, 北京 100089

3 95959 部队气象科, 北京 100195

摘 要 利用2010年8月18日副热带高压后部层状云降水中山区层状云的飞机穿云观测资料, 结合雷达、卫星云图及天气图等资料, 详细分析了此次高后降水中山区层状云的宏观特征、微物理结构, 并对降水形成机制进行初步探讨。结果表明: 此个例由两层云构成, 上层为冷云, 下层主要为暖云; 冷层粒子图像显示主要以板状为主, 平板柱状、柱状和霰粒为辅, 冰粒子的聚合体在整个冷层都有出现; 降水形成机制为播种—喂养机制, 冷云中观测到丛集和淞附现象, 其中淞附现象主要发生在冷云的中下部靠近融化层附近。

关键词 高后降水 山区层状云 微物理结构 飞机探测

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0711-08

中图分类号 P412.24

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.08

An Observational Study of Macro/Microphysical Structures of Stratiform Cloud in a High-Pressure System Rear over Mountain

MA Xincheng^{1,2}, HUANG Mengyu¹, YU Xiaowei³, JIN Hua^{1,2}, BI Kai¹, DONG Pengjie¹,
ZHANG Lei¹, and ZHANG Qiang^{1,2}

1 *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089*

2 *Beijing Key Laboratory of Cloud, Precipitations, and Water Resources, Beijing Meteorological Bureau, Beijing 100089*

3 *Meteorological Office, Unit 95959, Beijing 100195*

Abstract A detailed analysis of macro/micro structure for stratiform cloud in a high-pressure system rear over mountain has been conducted on data including airborne DMT(Droplet Measurement Technologies), radar, and weather chart etc. obtained from field campaign on 18 August 2010 in Beijing, and the precipitation formation mechanism is preliminarily discussed. The results show that the stratiform clouds in case consist of two layers, with the top layer the cold clouds and the bottom one the warm clouds. The aggregates of ice particles are found to widely and randomly spread in the whole cold layer, where the ice particle shapes are mainly plate, supplemented by column and graupel. Furthermore, the precipitation results from the seeder–feeder mechanism in which low level supercooled clouds are seeded with ice crystals from above. In addition, both aggregation and riming (accretion of liquid water) growth of ice crystals are also observed in the cold clouds, and the riming mainly occurs close to melting layer in the lower–middle part of the cold layer.

收稿日期 2012-08-28 收到, 2012-09-29 收到修定稿

资助项目 北京市优秀人才培养项目 20081D0200800058, 公益性行业(气象)科研专项资助项目 GYHY200906025, 国家重点基础研究发展计划项目 2011CB403401

作者简介 马新成, 男, 1978 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事人工影响天气和云降水物理研究。E-mail: fellow_007@163.com

Keywords High-pressure system rear, Stratiform cloud over mountain, Microphysical structure, Aircraft observation

1 引言

层状云是我国北方主要降水云系（游来光等，2002），层状云的降水机制非常复杂，分析其宏观结构特征和研究其降水形成机制对以后的催化作业意义重大。外场观测研究是认识云物理过程的重要途径，其中外场飞机探测是获取云中宏微观参数的重要手段。我国自 20 世纪 80 年代起，引进美国的机载粒子测量系统（Particle Measurement Systems, PMS）对北方的层状云开展了一系列研究（张连云和冯桂利，1997；李仑格和德力格尔，2001；李淑日等，2001；李照荣等，2003；苏正军等，2003；李淑日，2006；胡朝霞等，2007），揭示了北方层状云结构和降水特征的区域性。

北京地区是我国水资源短缺的区域之一，对北京地区降水层状云的了解显得尤为重要。张佃国等（2007）利用 2003 年 PMS 资料分析了北京及周边地区层状云中云粒子（冰粒子）浓度、粒子谱型、液态水含量等微观特征。金华等（2008）利用新的云和降水探测设备（DMT-PMS）对北京一次春季层状云中冰雪晶浓度进行了分析。这些研究对降水机制讨论不多。副热带高压后部层状云（高后）降水形势是北京地区重要的降水类型，对这种类型下

的了解有一定的意义。本文利用 2010 年 8 月 18 日高后降水中山区层状云的飞机穿云观测资料，结合雷达和天气图等资料，详细分析了此次高后降水中山区层状云的宏观特征、微物理结构，并对降水形成机制进行初步探讨。

2 高后降水形势

高后降水形势中的高压通常有两种方式构成：一是冷高压入海后变性，北京位于入海高压的后部，地面图呈现出东高西低的形势；另一种是夏季副热带高压北上，副高脊线跳过 30°N ，这时华北进入雨季。2010 年 8 月 18 日高压属于后一种方式（图 1）。

第二种形势的高后型降水主要特征为：夏季副热带高压北上，当副高脊线越过 30°N 时，华北进入雨季，副高西进东退的日变化，通常导致北京持续数日的雷阵雨天气；当太平洋高压脊线在华东沿海、黄海或者日本海一带稳定时（图 1），其副高外围提供了源源不断的水汽，高层的西风槽（图 2）、中层的低涡（图 3）以及地面的锋面辐合促成上升运动，副高对其造成阻挡，而持续影响华北地区。在此条件下，华北将发生大面积的持久的降水过程。

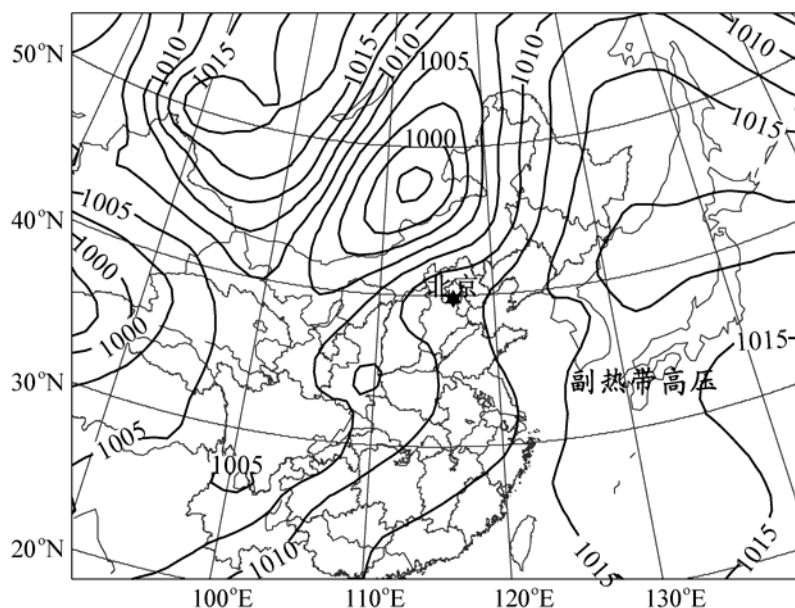


图1 2010年8月18日11:00（北京时间，下同）地面形势

Fig. 1 The geopotential height at the surface at 1100 LST 18 Aug 2010

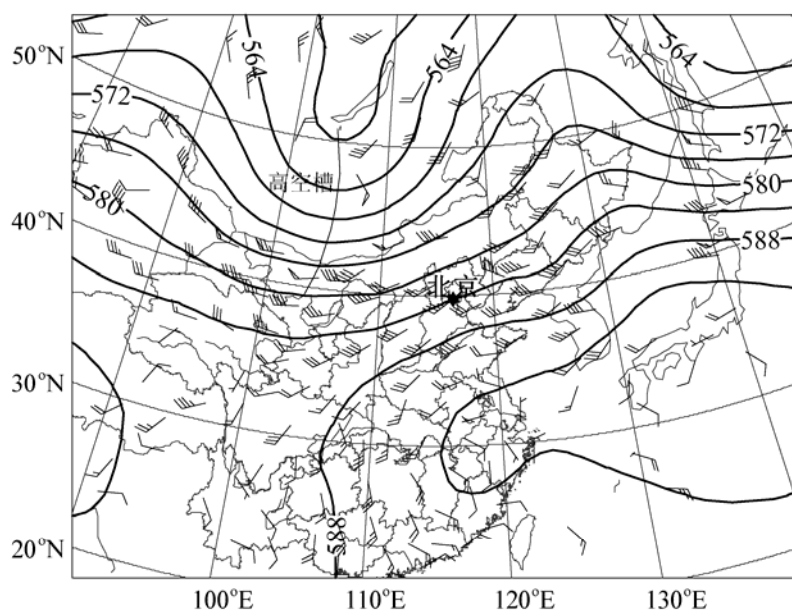


图2 2010年8月18日08:00 500 hPa 天气形势

Fig. 2 The geopotential height at the level of 500 hPa at 0800 LST 18 Aug 2010

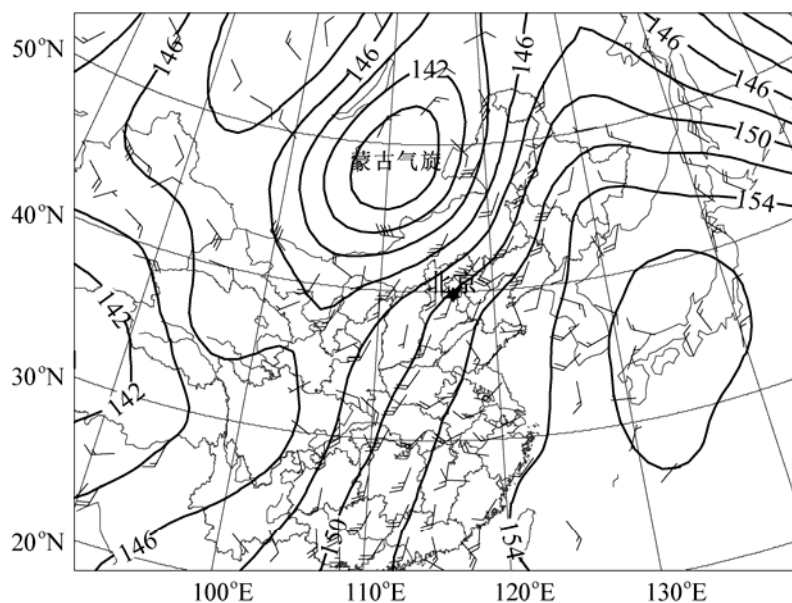


图3 同图2, 850 hPa 天气形势

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for 850 hPa

3 探测飞机及观测仪器

以运-12 飞机为探测平台, 其上所载探测仪器为最新的 DMT 机载粒子测量系统 (由美国 DMT 公司生产)。它主要包括数据采集设备、气溶胶粒子探头 PCASP[测量范围为 $0.10 \sim 3.00 \mu\text{m}$, 整个量程被分为 30 个间隔不完全相同的测量通道, 分辨率为 $0.01 \mu\text{m}$ (在最小的测量通道上)]、CAPS 探

头 (Cloud Aerosol and Precipitation Spectrometer), 在 CAPS 中集成了温度、空速、含水量、气溶胶和云粒子以及降水粒子探头 (气溶胶云粒子探头 CAS 总量程为 $0.3 \sim 50 \mu\text{m}$; 二维云粒子图象仪器 CIP 的测量范围是 $25 \sim 1550 \mu\text{m}$, 分辨率为 $25 \mu\text{m}$)、降水粒子探头 PIP (Precipitation Imaging Probe) (探头的测量范围为 $100 \sim 6200 \mu\text{m}$, 分辨率为 $100 \mu\text{m}$)、CCN 是云凝结核计数器, 机上还装有 AIMMES-20 (Aircraft Integrated Meteorological Measurement

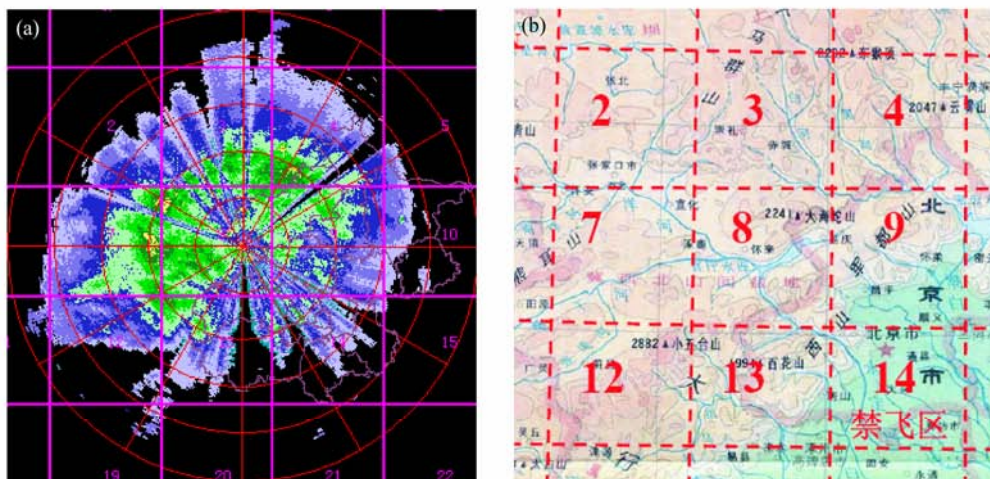


图4 雷达 (a) PPI 回波和 (b) 垂直探测区域及雷达位置

Fig. 4 (a) PPI radar scans and (b) the locations of aircraft and radar

System) 常规气象探头 (常称为 ADP), 可以探测温度、湿度、气压、GPS 定位、以及空速, 同时该探头还能够测量三维风速包括水平和垂直风速, 此外还有 Edgtech V-C1 露点仪是由美国 Edgetch 公司生产, 用来进行露点观测。

4 高后降水中山区层状云探测情况及宏观结构

8 月 18 日 11:15 位于河北怀来 X 波段偏振雷达 (雷达站海拔高度 510 m, 图 4b) 平面位置显示器 (Plan Position Indicator, PPI, 简称平显) (3.5°) 显示为稳定的层状云降水回波。11:20 飞机在张家口和崇礼之间的山区 (图 4b, 山区海拔高度约 2000 m) 爬升到云顶 6500 m 开始盘旋下降进行垂直探测。根据雷达回波由西向东移动方向, 飞机盘旋垂直探测轨迹逐渐向崇礼推移, 尽量保证云的整层探测的同一性。11:36 垂直探测到山区最低安全高度 3800 m 接近云底附近, 飞机窗舷外出现雨线, 说明所探测的层状云正处于降水期间, 从图 5 崇礼逐时雨量资料也看出该飞机垂直探测期间 (11:20 至 11:36) 该区域的雷达回波已经产生了降水。

图 6 为 11:31 飞机垂直探测期间雷达在该方位的距离高度显示器 (RHI) 回波图, 垂直探测山区的海拔高度在 2000 m, 对应图中回波为层状云回波, 回波顶高约在 7000 m, 回波强中心位置约在 4000~4700 m 左右, 宏观记录显示该高度区域处于零度层附近的暖层, 且飞机出现强烈的颠簸, 对应飞机在 4800 m 高度拍摄的云图 (见图 7) 来看, 云

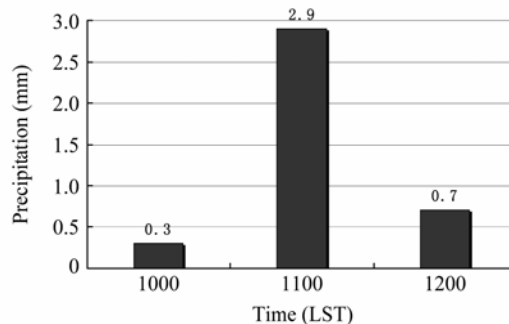


图5 2010年8月18日河北崇礼逐时雨量

Fig. 5 Hourly rainfall at Chongli County, Hebei Province on 18 Aug 2010

层至少分为上下两层, 下层云顶隆起, 结合飞机出现颠簸, 可能有较大的上升气流, 观测飞机机舱内出现小冰粒子, 可能是上层云中大量冰粒子落入融化层后已经融化或者未及时融化而产生的降水水粒子。

5 高后降水中山区层状云微物理分布特征

5.1 云滴的分布

图 8 给出了由机载仪器 CAS 获得的云滴数浓度和有效直径垂直分布图。云体整层比较深厚, 云厚约为 3000 m, 其中冷层厚度约 2200 m, 暖层厚度约 800 m。零度层的高度约在 4600 m, 根据机载粒子图像 (CIP 和 PIP) 判断融化层的高度约在 4800~4600 m 之间。如果根据云滴 (直径 $>2 \mu\text{m}$) 数浓度 $>10 \text{ cm}^{-3}$ 确定为云水区, 整层分层明显, 云

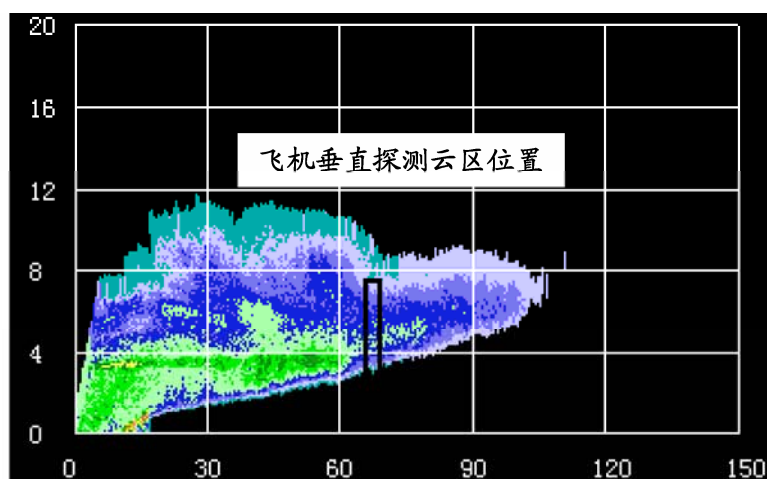


图6 2010年8月18日雷达 RHI 回波强度

Fig. 6 Range-height Indicator (RHI) radar scans on 18 Aug 2010



图7 飞机在4800 m 高度拍摄的探测云情况

Fig. 7 Cloud image from aircraft at 4800 m

水区主要分布在暖层（暖层云顶凸起，在暖层的中下部和 中上部出现两个峰值，浓度达 1000 cm^{-3} ）和融化层（融化层处于冷层的底部，云滴浓度最大达 1000 cm^{-3} ）。

5.2 液态含水量

FLWC 为通过云粒子探头 CAS 订正后的计算含水量，KLWC 为机载热线含水量仪实测的数据。从图 9 的垂直分布来看，暖层和冷层底部的融化层里 FLWC 和 KLWC 两者的分布趋势基本一致，量级上也差别不大。冷层以上两者分布不太一致，热线含水量仪可能受冰相粒子的影响，计算含水量数值可以作为参考。从前面的宏观和微观特征显示暖层也就是第一层云，其液态含水量垂直分布呈双峰型，峰区位置在第一层云的云顶隆起区域（也是融化层）和云底，最大达到约 $0.8 \sim 1.0 \text{ g/m}^3$ ，融化层位于云顶隆起区域，宏观记录显示颠簸严重，里面

存在较大的上升气流，结合图 8 显示上升气流的作用导致液水含量和云滴数浓度的增加以及粒子平均直径的减小。

5.3 冷云区特征

从图 10 冰雪晶的垂直分布上来看，冰雪晶浓度的峰值区正好处于云水区，ADP 探头风速观测显示冷层在高度 $6200 \sim 5800 \text{ m}$ 区间存在垂直速度正值区，这有利于托住大的冰晶和雪晶，这也与此层云滴数浓度较高相对应；云水和冰质点的存在促进贝吉龙过程的发展，对降水的形成有利。峰值区的冰晶浓度约在 $250 \sim 350 \text{ L}^{-1}$ ，雪晶浓度约在 $12 \sim 16 \text{ L}^{-1}$ 。结合图 11 中冷区粒子图像来看，融化层处于第一层云的云顶区，粒子图像显示为圆形雨滴和融化的冰粒子共存；两层云的中间观测有大量冰粒子从上层云中落入下层云云顶的融化层；第二层云几乎都是冰相粒子，整层都存在着冰粒子聚合成雪片

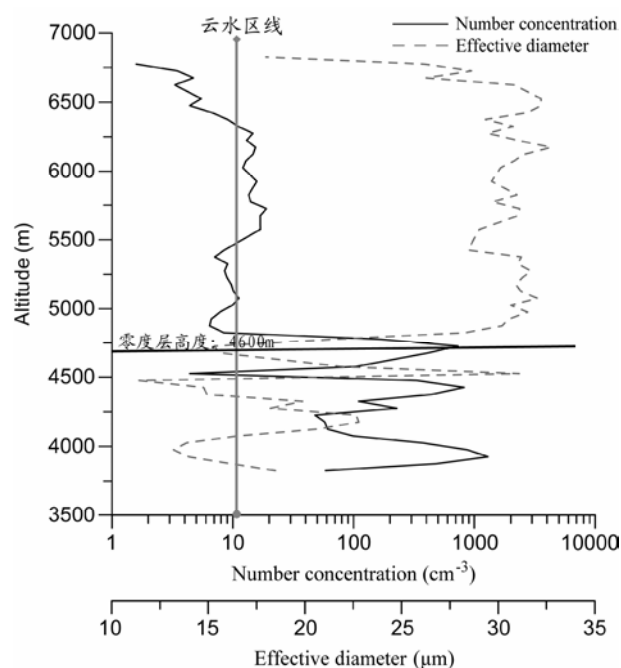


图8 云滴数浓度和有效直径垂直分布

Fig. 8 The vertical distributions of the number concentration and effective diameter of cloud particle

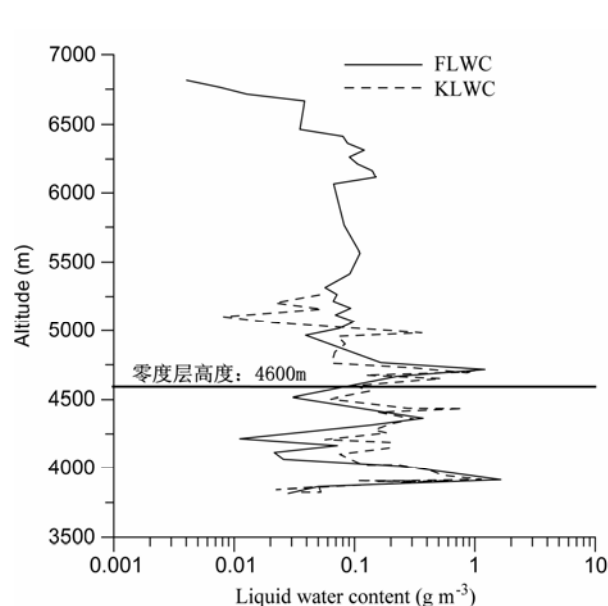


图9 液态含水量垂直分布 (FLWC 为 CAS 云滴探头计算含水量; KLWC 为热线含水量仪实测含水量)

Fig. 9 The vertical distributions of liquid water content (FLWC is from CAS; KLWC is from King)

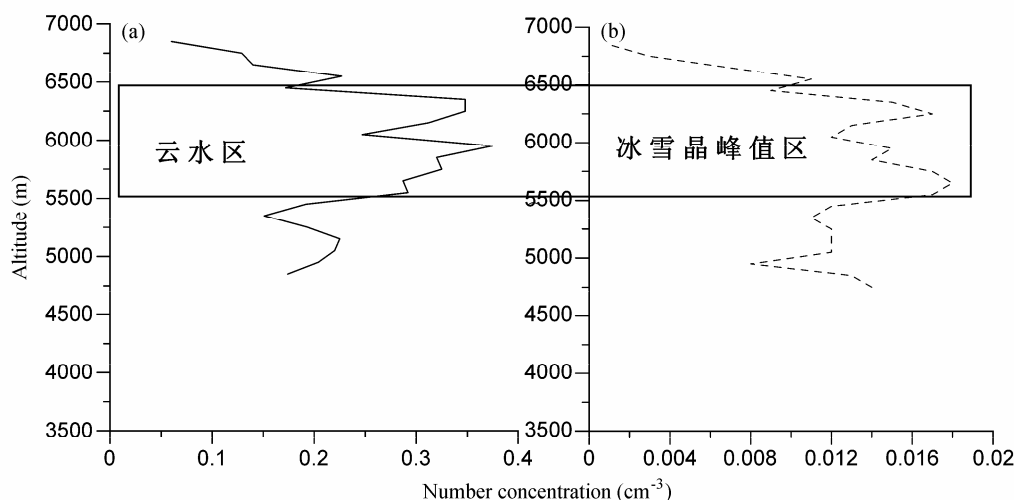


图10 冰晶和雪晶数浓度垂直分布

Fig. 10 The vertical distributions of the concentration of ice crystal and snow crystal

或者雪团现象, 整层主要由板状组成, 云中下部开始出现霰粒和一些柱状冰粒子, 线轴状(平板柱状)冰粒子主要集中在云中上部和云下部。

5.4 降水机制探讨

这次云的垂直探测处于山区层状云降水期间, 从宏观观测和微观分析降水云总体上分为两层云构成, 第一层云的云顶隆起, 主要为暖云占整层云的 30%, 第二层云为冷云, 其冷层厚度占整层云的 70%, 所以综合来讲主要是冷云降水机制。

图 11 给出一个简要的降水机制示意图。降水物理过程大致如下: 第二层云的云顶附近为纯冰云没有液水, 从雷达 RHI 看出探测云区周边多为云顶 8~10 km 高的云体, 探空 08:00 与极轨卫星时探测也如此, 因此, 该高度探测的冰晶或雪晶可能也与周边云更高部位生成的冰雪晶有关, 可能存在着凝华增长、异质核化等方式形成冰晶。云顶之下, 随着冰雪晶浓度的增加, 由于液态水并不充分, 在云中上部就观测到冰粒子间的聚合现象, 所以云的中

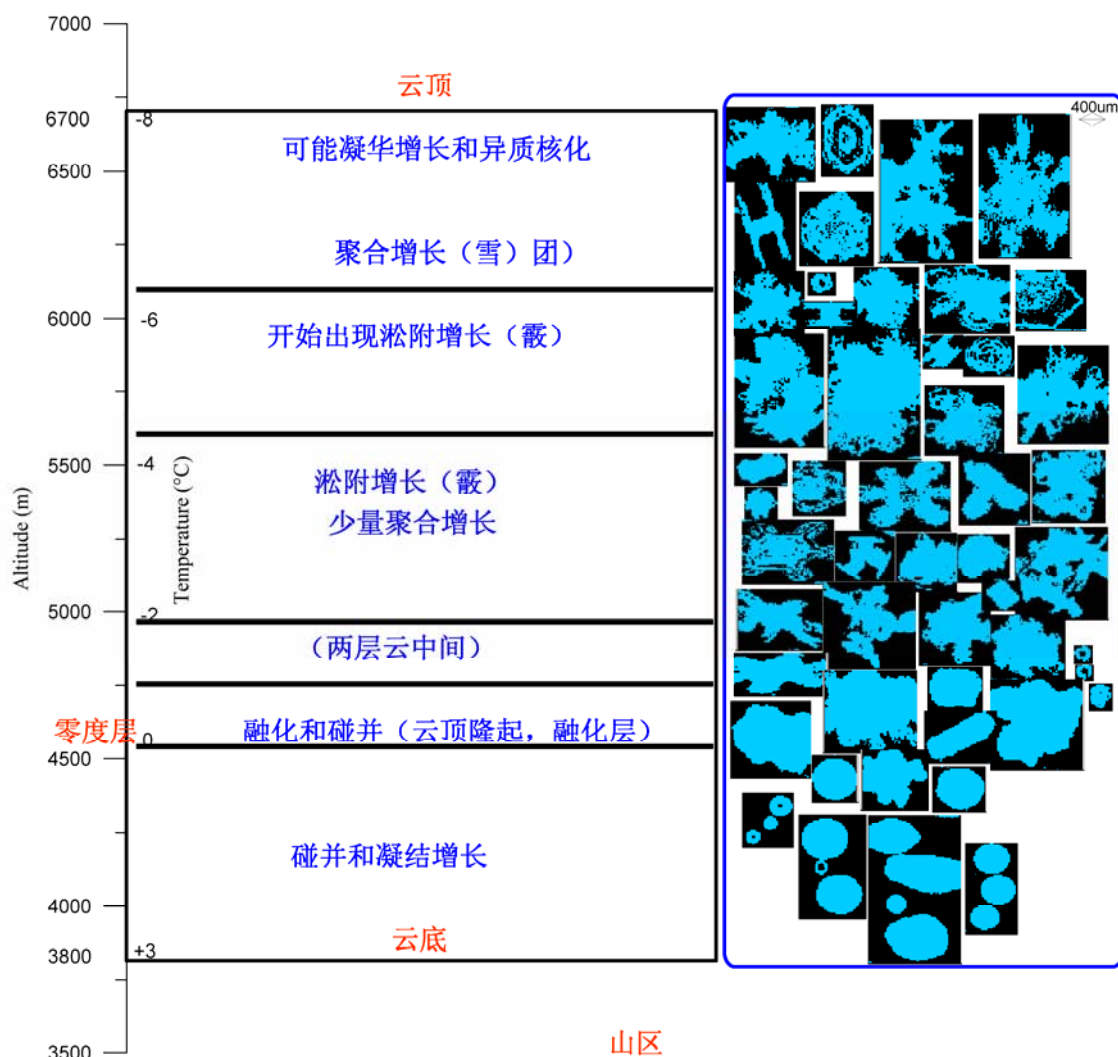


图11 降水机制示意图

Fig. 11 Schematic of precipitation mechanism

上部以聚合增长为辅；云的中部实测显示该区域处于云水较丰富区域，这样一部分冰晶与过冷水滴通过淞附机制产生开始出现霰粒，同时部分冰雪晶之间通过碰并增长产生了攀附现象；第二层云的云底出现了大量霰粒说明主要以淞附增长为主，同时粒子图像显示出现少量冰雪粒子聚合体，所以还以聚合增长为辅；上下两层云的中间观测显示有大量冰粒子落入第一层云中；第一层云的云顶附近处于零度层，也正好位于融化层，上层云中淞附过程产生的霰粒以及聚合增长产生的雪片或雪团落入到融化层，融化成雨滴，与云顶处上升气流携带上来的小云滴进一步碰并增长，再往下层是暖云，此处是最大的凝结中心区，实测液态水也相当大 ($0.8 \sim 1.0 \text{ g/m}^3$)，除了凝结增长形成云滴外，暖层在雨滴增长中起了相当大的作用，非常有利于冰雪晶融化成雨

滴之后与云滴之间迅速碰并增长。飞机探测出云底以后发现机窗上有大量雨线现象，说明云底以下已经产生降水。

6 总结

利用 2010 年 8 月 18 日高后降水中山区层状云的飞机穿云观测资料，结合雷达、卫星云图及天气图等资料，详细分析了此次高后降水中山区层状云的宏观特征、微物理结构，并对降水形成机制进行初步探讨。得到如下结论：

(1) 高后降水中山区层状云个例分层结构明显，云由上下两层构成，上层云完全为冷云，下层云主要为暖云，其云顶隆起，里面上升气流的作用导致液水含量和云滴数浓度的增加以及粒子平均

直径的减小。

(2) 通过比较由云粒子探头 CAS 获得的计算含水量和由热线含水量仪的实测含水量,发现在暖层两者一致性较好。

(3) 冷云区粒子图像显示高后降水中山区层状云中冰粒子主要以板状为主,其他观测到冰粒子形状有平板柱状、柱状和霰粒,冰粒子的聚合体在整个冷层都有出现。

(4) 高后降水型天气下山区层状云的降水属于播种—喂养机制,冷层深厚,暖层液水含量高。冷云中观测到丛集和淞附现象,其中淞附现象主要发生在冷云的中下部靠近融化层附近,这样非常有利于促使冰雪晶长大落入下层融化后,在高液水含量的暖层中碰并产生较大的降水。

参考文献 (References)

- 金华, 马新成, 黄梦宇, 等. 2008. 2008年北京一次春季层状云探测分析 [J]. 干旱气象, 26 (4): 35–40. Jin Hua, Ma Xincheng, Huang Mengyu, et al. 2008. An aircraft observation of stratiform cloud in Beijing spring [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 26 (4): 35–40.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007. 降水性层状云系结构和降水过程的观测个例与模拟研究 [J]. 大气科学, 31 (3): 425–439. Hui Zhaoxia, Lei Hengchi, Guo Xueliang, et al. 2007. Studies of the structure of a stratiform cloud and the physical processes of precipitation formation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (3): 425–439.
- 李仑格, 德力格尔. 2001. 高原东部春季降水云层的微物理特征分析 [J]. 高原气象, 20 (2): 191–196. Li Longge, De Ligeer. Analyses of microphysical features for spring precipitation cloud layers in east of Qinghai [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 20 (2): 191–196.
- 李淑日. 2006. 西北地区云和降水微物理特征个例分析 [J]. 气象, 32 (8): 59–63. Li Shuri. 2006. Case study of cloud and precipitation microphysics structure over Northwest China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 32 (8): 59–63.
- 李淑日, 王广河, 刘卫国, 等. 2001. 降水性层状云微物理结构个例分析 [J]. 气象, 27 (11): 17–21. Li Shuri, Wang Guohe, Liu Weiguo, et al. 2001. A case study of micro-structure of perceptible stratiform clouds [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (11): 17–21.
- 李照荣, 李荣庆, 李宝梓. 2003. 兰州地区秋季层状云垂直微物理特征分析 [J]. 高原气象, 22 (6): 583–589. Li Zhaorong, Li Rongqing, Li Baozi. 2003. Analyses on vertical microphysical characteristics of autumn stratiform cloud in Lanzhou region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (6): 583–589.
- 苏正军, 刘卫国, 王广河, 等. 2003. 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, 14 (s1): 27–35. Su Zhengjun, Liu Weiguo, Wang Guanghe, et al. 2003. Microphysical characteristics of a precipitation process in Qinghai Province [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (s1): 27–35.
- 游来光, 马培民, 胡志晋. 2002. 北方层状云人工降水试验研究 [J]. 气象科技, 30 (增刊): 19–56. You Laiguang, Ma Peiming, Hu Zhijing. 2002. Experimental study on artificial precipitation of stratiform clouds in the North [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 30 (S1): 19–56.
- 张佃国, 郭学良, 付丹红, 等. 2007. 2003年8~9月北京及周边地区云系微物理飞机探测研究 [J]. 大气科学, 31 (4): 596–610. Zhang Dianguo, Guo Xueliang, Fu Danhong, et al. 2007. Aircraft observation on cloud microphysics in Beijing and its surrounding regions during August–September 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 596–610.
- 张连云, 冯桂利. 1997. 降水性层状云的微物理特征及人工增雨催化条件的研究 [J]. 气象, 23 (5): 3–7. Zhang Lianyun, Fen Guili. 1997. Study of the microphysical structure and seedable conditions of stratiform clouds in spring and fall [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 23 (5): 3–7.