

一次积-层混合云系垂直结构和降水机制的飞机 观测资料分析与数值模拟^{*}

刘香娥 高茜 何晖 马新成 毕凯 赵德龙 周嵬
LIU Xiang'e GAO Qian HE Hui MA Xincheng BI Kai ZHAO Delong ZHOU Wei

1. 北京市人工影响天气办公室,北京, 100089
 2. 云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室,北京, 100089
 3. 北京城市气象研究院,北京, 100089
1. *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089, China*
 2. *Key Laboratory of Beijing for Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089, China*
 3. *Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089, China*
- 2018-11-07 收稿, 2019-10-02 改回。

刘香娥, 高茜, 何晖, 马新成, 毕凯, 赵德龙, 周嵬. 2020. 一次积-层混合云系垂直结构和降水机制的飞机观测资料分析与数值模拟. 气象学报, 78(2): 277-288

Liu xiang'e, Gao Qian, He Hui, Ma Xincheng, Bi Kai, Zhao Delong, Zhou Wei. 2020. Analysis of aircraft observation data and numerical simulation of vertical structure and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convective systems. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(2):277-288

Abstract Stratiform clouds with embedded convective systems are important precipitation systems in Beijing. Aircraft observation data are combined with the mesoscale numerical simulation model WRF to analyze a stratiform cloud system with embedded convective systems and related precipitation process in Beijing area that occurred on 23 September 2014. By analyzing the radar echo evolution of the cloud system, it is found that there was no explosive growth in the convective bubble in the cloud, and the echo was not obvious in the vertical direction. Therefore, this process was a horizontal mixed cloud system precipitation process. The analysis of aircraft observations shows that the liquid water content of the cloud system in the morning and afternoon was not high (the maximum was less than 1 g/m^3). At different heights of the cloud system, the shape of ice crystals detected by the aircraft mainly consisted of plate, needle column, radial as well as irregular. Due to the relatively small amount of supercooled water in the cloud, the number of aggregated ice crystals was significantly more than that of the attached ice crystals. The polymerization process of ice crystals was the main process of particle growth in the cloud. The analysis of the source and sink terms of the vertical microphysical structure of the cloud system and the precipitation particles indicates that at upper levels, the ice and snow crystals produced by condensation continuously aggregated, grew and fell in an environment with less supercooled water content. The graupel content was very small, and the melting of ice and snow crystals near the 0°C layer was the main mechanism for generating ground precipitation. In addition, near the melting layer, raindrops catching cloud droplets and falling to the ground were another important source of ground precipitation.

Key words Stratiform cloud with embedded convective systems, Aircraft observation, Numerical simulation

* 资助课题: 国家重点研发计划项目(2016YFA0601704)、北京市自然科学基金项目(8182024)、国家自然科学基金项目(41675138)、北京市气象局云降水物理研究和云水资源开发北京市重点实验室联合基金项目(BMBKJ201905006)。

作者简介: 刘香娥, 主要从事云降水物理与人工影响天气研究。E-mail: lxe3399@163.com

通信作者: 何晖, 主要从事云物理与人工影响天气研究。E-mail: hehui@bj.cma.gov.cn

摘要 积-层混合云是影响北京地区的重要降水云系,运用飞机探测资料结合中尺度数值模式 WRF,对2014年9月23日发生在北京地区的一次积-层混合云系的垂直结构和降水机制进行了探测资料分析和数值模拟研究。通过分析云系的雷达回波演变,发现云中的对流泡没有出现爆发式增长,回波在垂直方向上增长不明显,此次过程属于积-层水平混合型云系降水。飞机探测资料分析显示,上、下午探测云系的液态水含量都不高(最大低于 1 g/m^3);在云系不同高度,飞机探测到的冰晶形状主要有板状、针柱状、辐射状和不规则状,由于云中过冷水含量相对较低,聚合冰晶的数量明显多于凇附冰晶,冰晶的聚合是云中粒子增长的主要过程。对模拟云系垂直微物理结构和降水粒子的源、汇项分析得到:高层,由凝华产生的冰晶和雪晶在过冷水含量较低的环境中不断聚并、长大并下落,云系中霰的含量很低,增大的冰晶和雪晶下落至 0°C 层附近融化是产生地面降水的主要机制。此外,融化层附近,雨滴捕获云滴不断长大并下降至地面也是地面降水的另一个重要来源。

关键词 积-层混合云, 飞机观测, 数值模拟

中图法分类号 P426.61+1

1 引言

积-层混合云是由积状云和层云两种类型的云组成的云系,是影响华北地区的主要降水云型之一,由于其特殊的结构,层云和对流云相互作用对降水形成有利,生命史一般也较长。因此,引起北京地区大范围或持续性降水的云系通常是积-层混合云系。另外,由于积-层混合云中的层云一般都比较深厚,而适量的积-层混合云降水不仅在缓解北京地区干旱和增蓄储水等方面具有较重要的意义,而且该云系也是人工增雨比较理想的云系,对这种云系的形成及降水进行深入研究十分必要(黄美元等, 1986a, 1987a; 赵清云, 1985; 洪延超, 1996a; Guo, et al, 2015)。

积-层混合云在雷达回波上显示为在大片较均匀的层云回波中含有一些形状、尺度和强度等各不相同的对流单体回波,并且回波具有不连续、非均匀的特点(黄美元等, 1987a; 洪延超等, 1983, 1984; 李子华等, 1986; 林长城等, 1991)。积-层混合云中由于积云和层云的相互作用通常会影响降水的持续时间、强度和量级(黄美元等, 1986b, 1987b; Fabry, et al, 1993; Yuter, et al, 2005),有研究显示,层云对积云的发展和降水量的增大起促进作用,降水量可以增大几到几十倍(黄美元, 1986b, 1987a; 洪延超, 1996a, 1996b; Hong, 1997, 1998)。多种观测仪器的应用使得对积-层混合云系宏、微观结构及降水机制等有了更深入的研究。Kusunoki 等(2004)利用多普勒天气雷达、微波辐射计、可视探空气球、二维微物理探头等综合观测资料研究得到,在积-层混合云降水阶段,降水粒子几乎都是由过冷液态水的凇附形成和增长的。对地面光阵雨滴谱仪观测的积-层混合云的雨滴谱谱型、微结构参数及其短

时变化特征的分析得到,积-层混合云的降水谱较宽、大雨滴较多且呈多峰结构,云系雨滴谱较为理想的表达式为 Γ 分布(宫福久等, 1997; 陈宝君等, 1998; 袁成等, 2001; 常伟等, 2016);机载雷达和地基双多普勒天气雷达可用于积-层混合云系微物理特征、成雨机制及风场结构特征的研究(Houze, et al, 1989; 刘黎平等, 2004, 2015)。飞机探测资料则可以给出积-层混合云中不同高度冰晶的形状、分布及增长过程,用以推断云系产生降水的机制(朱士超等, 2014, 2015; 秦彦硕等, 2017; 亓鹏等, 2019)。

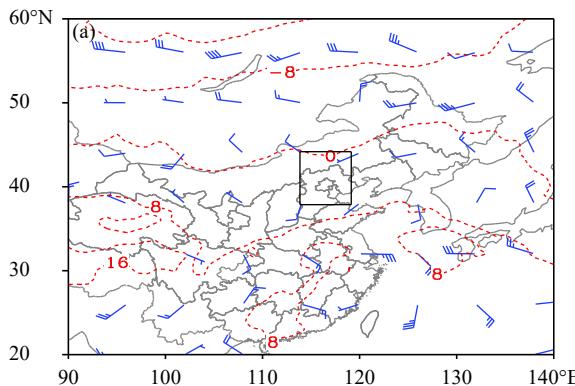
对于尺度范围相对较大的积-层混合云系特征及降水等研究,仪器观测资料具有一定的局限性,数值模式是较好的研究工具。模拟研究表明,不同尺度或维度的模式均能成功模拟出积-层混合云系液态水、积云中的对流过程及云系的微物理特征(Duynkerke, et al, 1999; 王维佳等, 2006, 2007)。在此基础上,针对中国不同时、空分布的积-层混合云系,不同学者运用中尺度数值模式 WRF 已有一些理论研究成果:如积-层混合云系发展过程中,会经历多次并合,并且相当数量的并合过程最初从云的中上部开始(李艳伟等, 2009);阶梯式不均匀的嵌入对流群和平行分布的嵌入对流群降水量的大小与云体内云水含量的高低密切相关(李艳伟等, 2012);均匀上升气流场中的波动会导致稳定层状云中有对流云镶嵌(于蔚等, 2009);积-层混合云中两种云系的“播馈”机制有一定差异,层云简单,积云复杂,积云中降水粒子可以发生上下多次的循环增长,粒子群可以增长得更大(何晖等, 2015)。以上这些研究为利用探测资料和数值模式研究积-层混合云奠定了基础。

文中运用北京市人工影响天气办公室飞机探

测资料和WRF模式对2014年9月23日(除特殊说明外,所用时间均为北京时间)发生在北京地区的一次积-层混合云的垂直结构和降水机制进行研究。

2 个例概况

2014年9月22日14时前后,北京市陆续出现持续性降雨,据北京市气象台自动气象站资料统计,22日19时至23日19时,全市累计平均降水量16.9 mm,中心城区平均10.0 mm,最大降雨出现在大兴采育(48.6 mm)。根据多种观测资料分析,本次过程为典型的积-层混合云降水个例。



3 观测资料分析

3.1 环流背景特征

本次过程降水前期,影响东亚的中高纬度环流较为平直,北京地区处于西风气流的控制下;到22日20时随着台风“凤凰”登陆北上,副热带高压东退,中高纬度的冷空气东移南下,与偏南暖湿气流在华北交汇(图1),700和850 hPa上东北风与西南风形成切变,迫使水汽辐合抬升,造成此次降水天气,北京地区自22日晚间开始降雨,持续至23日。

3.2 卫星图像特征

从本次过程的卫星云顶亮温图像演变(图2)可

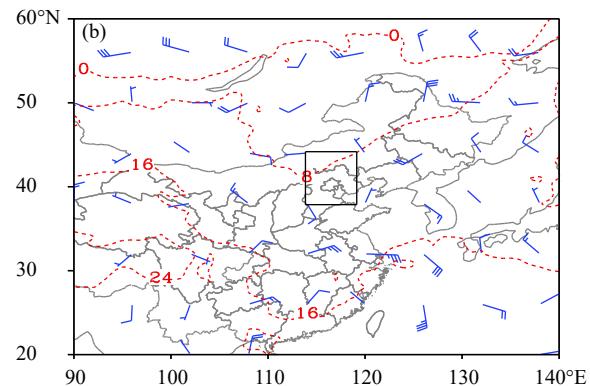


图1 2014年9月22日20时700(a)和850(b)hPa天气形势

(红虚线为等温线,间隔为8℃,蓝色为风场,全杆为4 m/s,黑色框为研究区域)

Fig. 1 700 (a) and 850 (b) hPa isobaric charts at 20:00 BT 22 September 2014

(red dashed lines represent isotherms at 8°C intervals and blue lines represent horizontal wind (full bars: 4 m/s), black box denotes the research area)

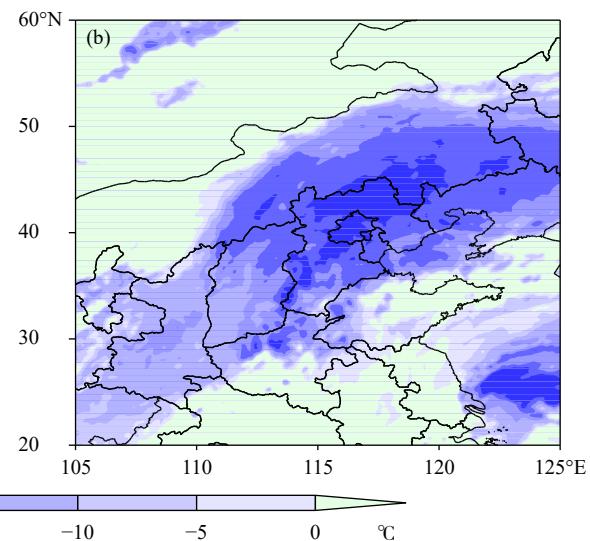
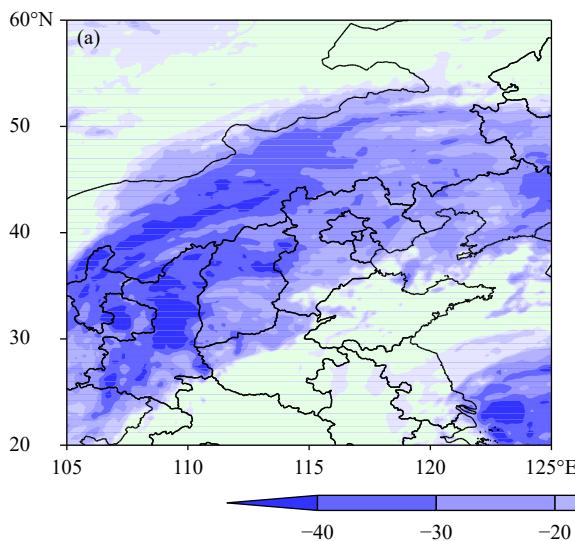


图2 2014年9月23日FY-2C卫星云顶亮温(a. 08时,b.15时)

Fig. 2 TBB images from FY-2C of 23 september 2014 (a. 08:00 BT, b. 15:00 BT)

以看到,过程云系覆盖范围很广,自西南向东北延伸,23日08时北京还处于云系的边缘,云层不厚,云顶不高,黑体亮温为-10℃左右,表明云系发展平稳,大部分以层云为主;至15时,云系有所发展,覆盖整个北京地区,云顶高度升高,温度降低,黑体亮温低于-40℃,表明云内有积云活动。

3.3 雷达回波特征

图3是华北地区雷达回波的时间演变与北京

雷达回波和垂直剖面。从回波的水平分布来看,北京地区23日一直处于大片回波的覆盖区内,回波强度强、弱相间,总体强度不大(不超过40 dBz);从垂直分布来看,回波顶高低于8 km,并且内嵌的相对较强回波在整个云系发展过程中并未出现短时爆发式增长,云系比较稳定,属于水平混合型的积-层混合云系,与已有的一些研究(李艳伟等,2009)结果类似。

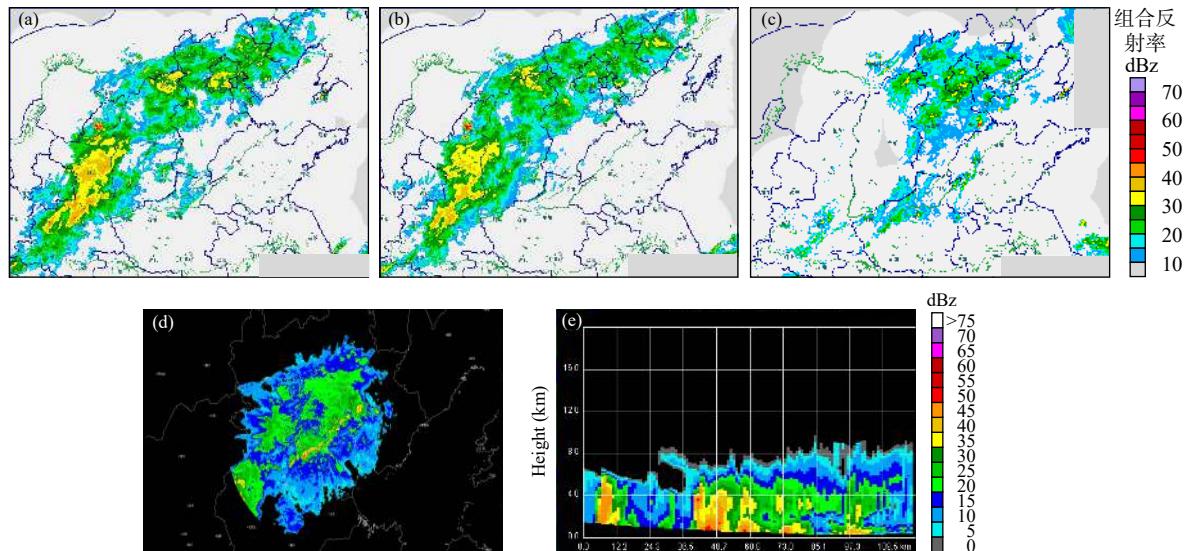


图3 2014年9月23日华北雷达拼图(a, b, c)和北京单站雷达回波(d, 仰角0.6°)及垂直剖面(e)
(a. 08时50分, b. 10时, c. 16时, d. 23日06时30分, e. 沿图(d)中所示直线组合反射率的垂直剖面)

Fig. 3 Radar reflectivity mosaic over North China (a, b, c) and radar reflectivity at Beijing station (d)

(a. 08:50 BT, b. 10:00 BT, c. 16:00 BT, d. 06:30 BT 23 September 2014), (e) cross-section along the line shown in (d)

3.4 飞机探测云系垂直结构和降水机制

北京市人工影响天气办公室人工增雨飞机于23日09时40分—12时10分和16时20分—18时40分分别在北京西北部延庆、河北赤城附近

和北部地区进行了飞行探测(作业)。两个架次飞行都穿越了冷、暖云系。

图4是上、下午的飞行轨迹。结合飞机宏观记录和飞行轨迹可以看到,上午飞机起飞后在3000、

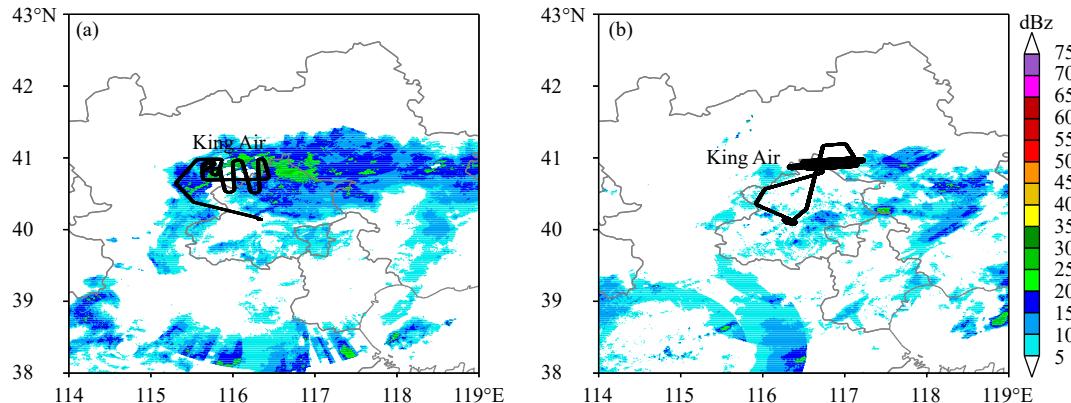


图4 2014年9月23日上午(a)和下午(b)飞行轨迹(黑色线)和雷达回波(色阶)

Fig. 4 Flight tracks (black line) and radar echo (shaded) on 23 September 2014 (a. AM, b. PM)

3700 和 4300 m 附近进行了 3 次平飞探测, 从获取的云中液态水含量(表 1)可以看到, 探测云系含水量不高, 3 个阶段最大液态水含量仅为 0.836 g/m^3 , 平均最大也仅为 0.13 g/m^3 。对应的云粒子图像显

示, 探测到的都是云滴或少量雨滴(图略)。从 11 时 03 分开始, 飞机开始爬升, 在爬升至高度 5000 m 之前(图 5a), 云内温度处于 -8°C 以下, 从爬升过程对应的云粒子图像可以看到, 随着高度的升

表 1 2014 年 9 月 23 日 09 时 40 分—12 时 10 分飞机探测资料
Table 1 Details of flight information and observations during 09:40–12:10 BT 23 September 2014

飞行时间	飞行高度(m)	温度($^\circ\text{C}$)	$\text{LWC}_{\max}(\text{g/m}^3)$	$\text{LWC}_{\text{ave}}(\text{g/m}^3)$
09时44—49分平飞阶段1	3000—3100	1.4—2.8	0.456	0.13
09时50分—10时03分平飞阶段2	3700—3800	-1.1—-2.2	0.532	0.07
10时 06分—11时03分平飞阶段3	4300—4400	-4.1—-5.5	0.836	0.03
11时03—14分爬升阶段	4400—7400	-5.6—-18.7	0.34	0.02
11时14—18分平飞阶段4	7400—7500	-18.7—-19.1	0.032	0.01
11时19—36分下降阶段	7500—3700	-18.8—-3.0	0.168	0.02
11时36—46分平飞阶段5	3700	-3.1—-1.3	0.924	0.01

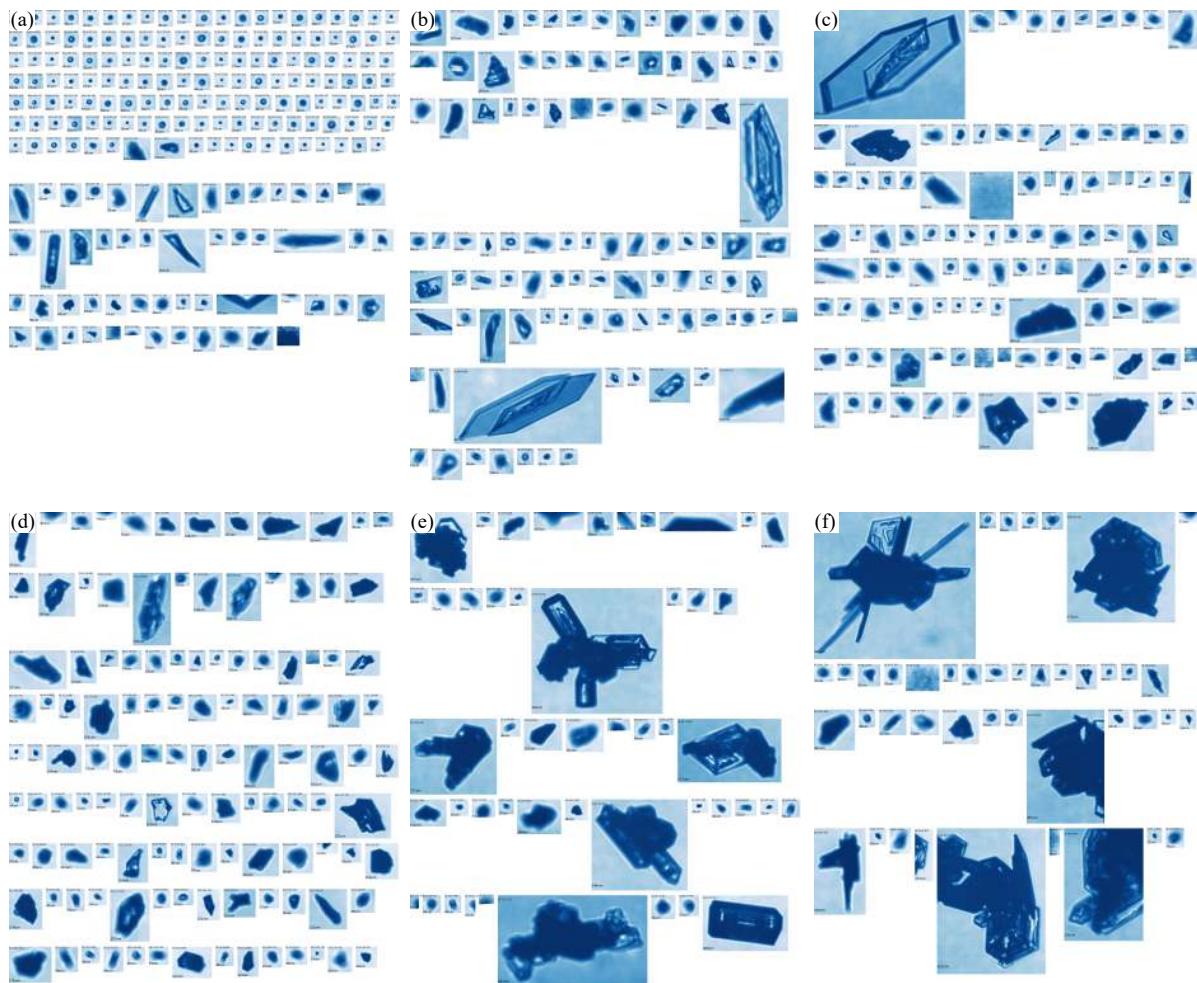


图 5 2014 年 9 月 23 日上午飞机在不同高度处的云粒子图像

(a. 4350 m, b. 5800 m, c. 6200 m, d. 7000 m, e. 7450 m, f. 6000 m)

Fig. 5 Cloud particle images of aircraft at different heights in the morning of 23 September 2014

(a. 4350 m, b. 5800 m, c. 6200 m, d. 7000 m, e. 7450 m, f. 6000 m)

高, 云中分别对应云滴-柱板状小冰晶共存、凇附聚合大冰晶、枝状-板状冰晶共存的情况; 5000—7500 m, 温度处于-8—-19℃, 观测的冰晶形状基本为板状, 并且多为形状清晰的单个冰晶(图 5b、c、d); 7450 m 高度附近的平飞阶段以冰晶聚合体为主, 并没有出现体积较大的雪晶(图 5e)。根据实验室和外场观测的研究可知, 适宜板状冰晶形成的温度为0—-4℃, 适宜柱状冰晶形成的温度为-4—-8℃, 适宜辐枝状冰晶形成的温度为-8—-22℃(Fukuta, et al, 1999; Heymsfield, et al, 2010)。因此, 前述飞机在高于-8℃ 处观测到的聚合大冰晶可能为高层冷云层下落所致, 这与朱士超的观测(朱士超等, 2014; Zhu, et al, 2015)结果比较一致。此外, 由图像分析可以看到, 在飞机自最高处(7400 m附近)盘旋下降至约4000 m 的过程中, 观测到云中有较多的辐枝状冰晶, 并且聚合冰晶的数量明显多于爬升阶段(图 5f), 对比雷达回波和飞行轨迹可以看到, 盘旋下降阶段比爬升阶段晚约20 min, 探测的回波稍强于爬升阶段, 表明下降阶段云中较大粒

径的水成物含量较上升阶段有所升高, 尺度有所增大。由于液态水含量不高, 在整个飞机探测过程中凇附冰晶的数量远少于聚合冰晶, 这在粒子图像中有非常直观的显示, 可以推测, 本次探测的积-层混合云中由于过冷水含量相对较低, 冰晶的聚合和凝华过程可能是云中粒子增长的主要过程, 后面将用数值模式对这一结果进行验证分析。

表 2 和图 6 给出飞机下午探测云系的统计信息和云粒子图像, 对比雷达回波和飞行轨迹可以得到, 下午飞机探测的是云系边缘, 获取的微物理信息都比较微弱, 云中液态水含量比上午探测的云系明显低, 最大为0.38 g/m³, 平均最大也不到0.1 g/m³。值得注意的是, 飞机下降过程中, 云粒子图像在17时40—47分(飞行高度3998—3688 m, 温度-3.8—-1.8℃)先后出现了板状-聚合冰晶、针柱状、辐枝状, 偶有柱帽状(图 6a、b)、凇附冰晶(图 6c、d)出现的过程。对比前面的分析, 低于-4℃ 的温度区间是板状冰晶出现的适宜温度区间, 因此推断, 该多种形态的冰晶多数是来自高空掉落。

表 2 2014年9月23日16时20分—18时40分飞机探测资料
Table 2 Details of flight information and observations during 16:20–18:40 BT 23 September 2014

飞行时间	飞行高度(m)	温度(℃)	LWC _{max} (g/m ³)	LWC _{ave} (g/m ³)
16时35—38分爬升阶段1	3000—4300	2.2—-4.6	0.171	0.052
16时38—56分平飞阶段1	4300	-4.7—-5.3	0.050	0.006
16时56分—17时爬升阶段2	4300—5500	-5.1—-11.7	0.058	0.010
17时00—06分平飞阶段2	5500	-11.5—-12.0	0.380	0.005
17时06—55分下降阶段	5500—3100	-11.7—-0.4	0.164	0.008
17时56分—18时14分平飞阶段3	3000	0.1—-1.4	0.233	0.026

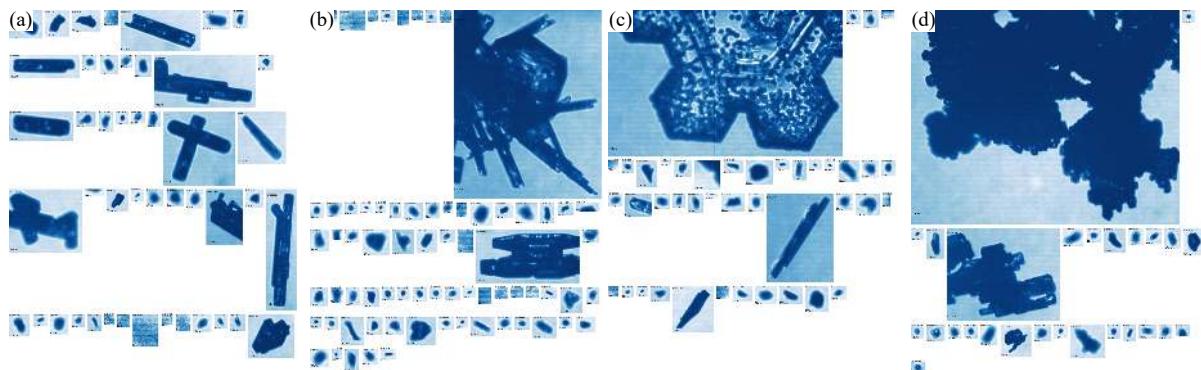


图 6 2014年9月23日下午飞机在3700 m高度测得的云粒子图像

(a. 17时43分, b. 17时43分, c. 17时45分, d. 17时47分)

Fig. 6 CPI images of aircraft at 3700 m in the afternoon of 23 September 2014

(a. 17:43 BT, b. 17:43 BT, c. 17:45 BT, d. 17:47 BT)

从以上分析可以看到，在云系的不同高度处，云降水粒子的形态是有差别的，中、下层存在大量圆形云滴和小雨滴，表明云内暖云过程是普遍存在的；云系中部存在较多的过冷云滴和板状、针柱状以及单个不规则形状的小冰晶，高层以聚合、辅枝状冰晶为主，冷云过程明显。冰相粒子的存在对中、低层有播撒效应，在暖区融化为雨滴或大云滴，有利于增强云中的暖云过程，促进云水向降水的转化。

4 数值模拟研究

积-层混合云降水粒子的形成和地面产生降水的过程较一般的层云更为复杂，飞机探测通常只能沿着一定飞行轨迹进行，探测的只是某个区域或时段内云系的云微物理特征，对于揭示积-层混合云结构和降水机理具有一定的局限性。因此，需要结合数值模式做分析。由前文分析可以得到，探测云系在不同高度处冰相粒子的形态和形成机制各不相同，由于云系中液态水含量较低，高层云中冰相粒子主要通过凝华增长和碰并聚长大并下落，推测是地面降水产生的主要来源，针对观测资料分析得到的云系特征和降水机制，以下将运用数值模式进行验证分析。

4.1 数值模拟与结果验证

利用非静力中尺度数值模式 WRFv3.7 进行了数值模拟研究，积分时段为 2014 年 9 月 23 日 08 时至 24 日 08 时，模拟的水平方向采用三重(D1:27 km, 100×100; D2: 9 km, 148×148; D3: 3 km, 196×196) 双向嵌套网格，垂直方向采用 σ -z 地形追随坐标，

38 层，模式顶为 50 hPa；微物理过程采用 Morrison 方案；长波辐射采用 RRTM 方案，短波辐射采用 Dudhia 方案；边界层采用 YSU 方案；地表采用 Monin-Obukhov with Carlson-boland 方案；土壤采用 Noah 方案；积云对流参数化 D1 采用 Betts-Miller-Janjic 方案，D2、D3 不做积云参数化；模式的初始及侧边界条件采用欧洲中期预报中心 ERA-Interim 逐 6 h 再分析资料。

为验证数值模式模拟结果，图 7 给出的是第 2 层区域模式模拟的雷达回波演变，与图 3 的实况雷达回波对比可以看到，模式可以很好地给出反映实况云系的降水回波，其覆盖范围、回波强度及移动方向都与实况较为接近。图 8 是观测与模拟的 24 日 08 时 24 h 降水的对比，可以看到模拟的降水落区与实况非常接近，自西南向东北方向上的几个降水中心（晋蒙交界、晋冀交界、北京西部北部及其东北方向）模式都有所反映，只是降水强度比观测大，位置稍有偏移，这与所选参数和模式误差有一定关系。总体来看，WRFv3.7 对所选个例有较好的模拟能力，可以运用模拟结果进行深入分析。

图 9 是云中飞机探测与模拟的飞机路径上的液态水含量的对比。飞机探测数据来自热线含水量仪，模式中的液态水含量由云水(Q_c)和雨水(Q_r)的比质量之和与密度相除获得。从图 9 中可以看出，上、下午探测的云系中液态水含量呈不均匀分布。上午的对比时段里，飞机云中探测的液态水含量最大值约为 0.1 g/m^3 ，模式模拟的飞行路径上的最大值约为 0.06 g/m^3 ，模拟结果低于观测；而下午的对比时段里，飞机云中探测的液态水含量最大值

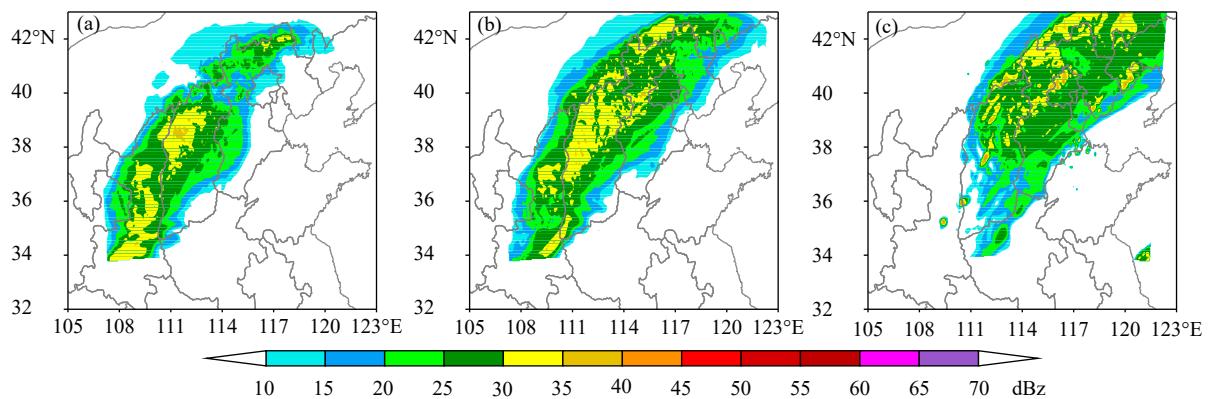


图 7 数值模拟的 2014 年 9 月 23 日组合雷达回波 (a. 09 时 30 分, b. 11 时, c. 15 时 30 分)

Fig. 7 Simulated radar reflectivity at 09:30 (a), 11:00 (b) and 15:30 (c) BT 23 September 2014

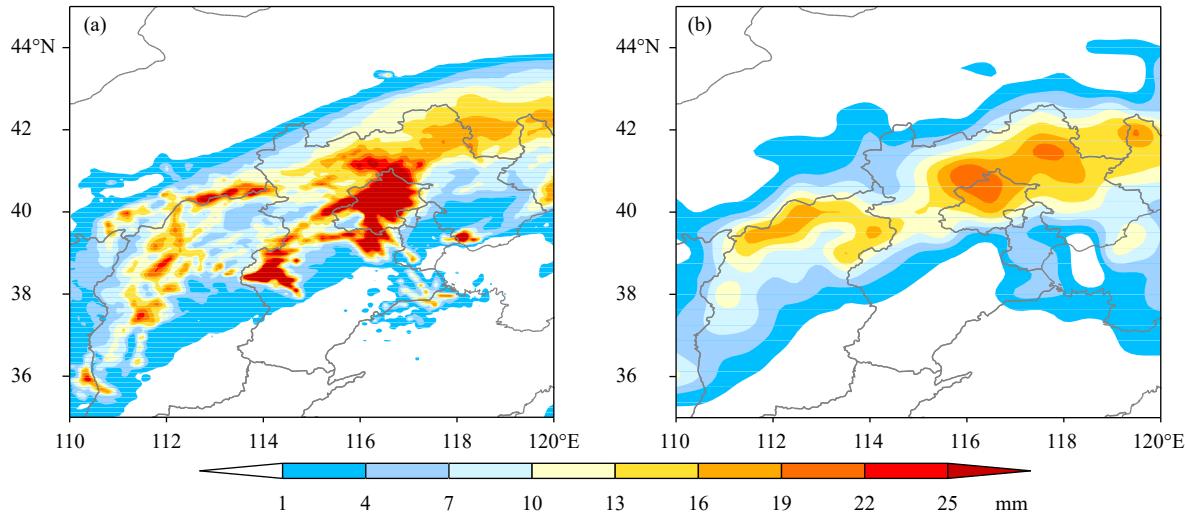


图 8 模拟(a)和观测(b)的2014年9月24日08时24 h降水量

Fig. 8 Simulated (a) and observed (b) 24 h accumulated precipitation at 08:00 BT 24 September 2014

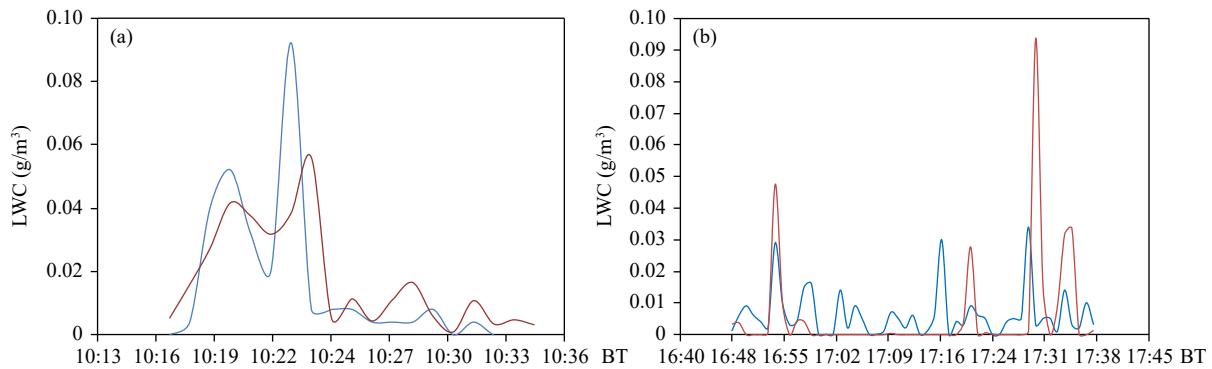


图 9 模拟(红线)与飞机(蓝线)探测路径上的液态水含量对比(a. 上午, b. 下午)

Fig. 9 Comparisons of LWC observed by aircraft (blue line) and model simulation (red line) in the morning (a) and afternoon (b)

约为 0.03 g/m^3 , 模式模拟的飞行路径上的液态水含量最大值约为 0.1 g/m^3 , 模拟结果高于观测值, 总体来看, 模拟与观测的液态水含量有一定差别, 但在量级上比较接近。造成模拟与探测有所差异的原因与朱士超等(2015)文中提到的类似, 即模式模拟的云体位置与实际探测还是存在一定的差异, 从模式结果中严格按照飞行轨迹提取液态水含量与观测值进行对比会存在一定误差。另外, 飞机在不同温度层探测时, 不同相态粒子碰到热线含水量仪的线圈上会造成一定的温度差异, 使得测量结果有所偏移。由于图中给出的只是飞行路径上部分时段的液态水含量对比, 可以看到液态水含量并不高, 而实际模拟中飞行路径上上、下午均模拟出液态水含量的较大值(超过 1 g/m^3), 说明模拟是能够再现

积-层混合云中积云所对应的高液态含水量值这一特征。

4.2 模拟云的垂直微观结构

在前文的基础上, 下面将运用数值模拟的结果分析积-层混合云不同高度上的微物理结构和降水机制。图 10 给出的是第 3 层模拟区域里(40.6°N , 116°E)点在模拟时段的冰晶、雪晶、霰和云水、雨水的比质量随时间的演变, 可以看到模拟冰晶主要位于 8 — 14 km 高度, 远高于前期的飞机探测结果; 雪晶分布于 2 — 10 km , 最大值位于 4 km 附近, 模拟的冰晶和雪晶的高值分界非常明显, 这在观测中未有体现; 雨滴主要位于 4 km 以下, 雨滴比质量的高中心与雪、霰和云水的高值中心对应, 表明雪、霰对雨滴的产生贡献很大。此外模拟结果显示, 6 km

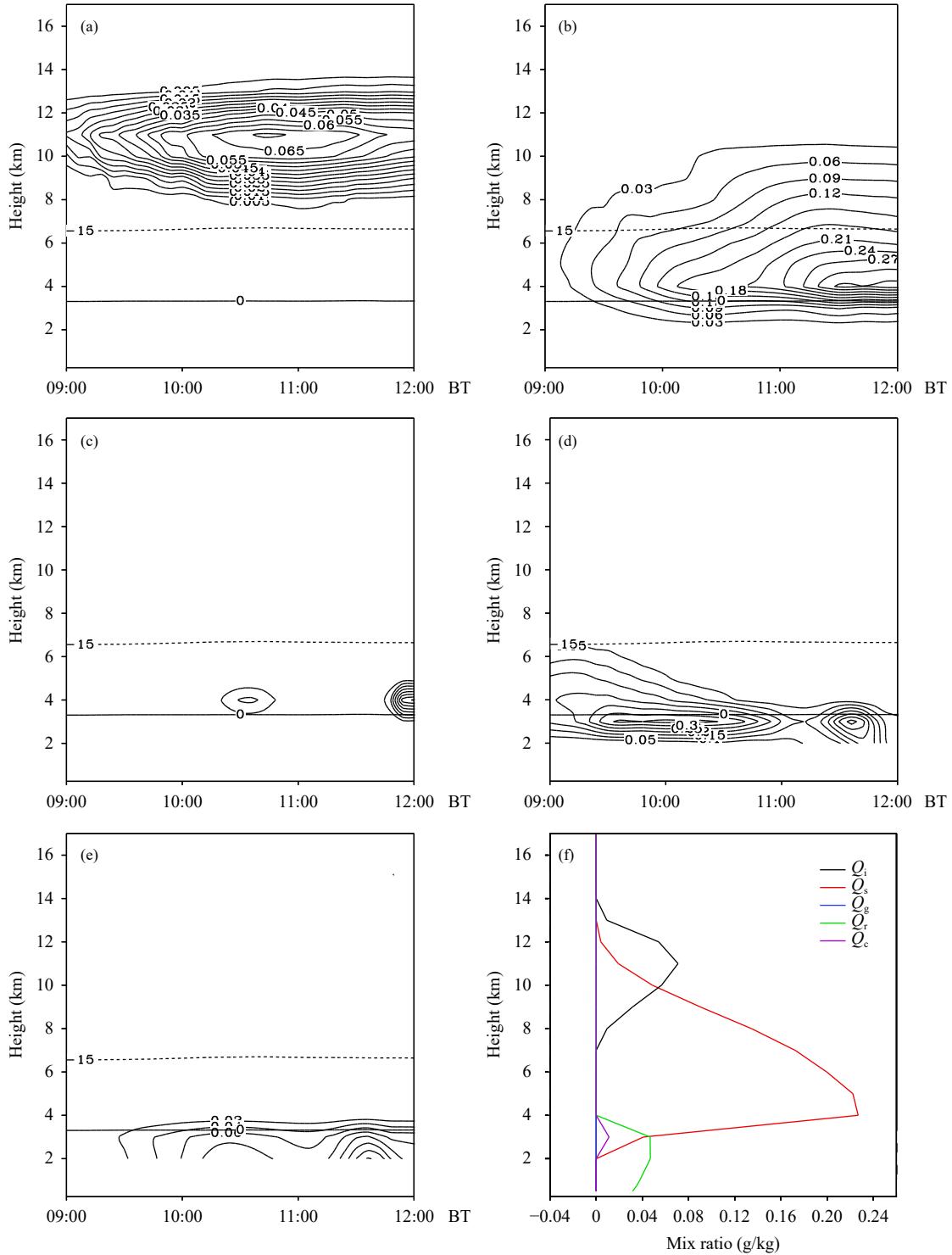


图 10 (40.6°N, 116°E) 处冰晶 (a, Q_i)、雪晶 (b, Q_s)、霰 (c, Q_g)、云水 (d, Q_c) 和雨水 (e, Q_r) 的比质量随时间的演变及 (f) 11 时 36 分水凝物的垂直分布

Fig. 10 Height-time cross sections of ice (a, Q_i), snow (b, Q_s), graupel (c, Q_g), cloud water (d, Q_c) and rain water (e, Q_r) mixing ratio concentrations and (f) vertical profiles of water content of hydrometeors at 11:36 BT

之上, 云中的过冷水含量几乎为 0, 这与前面分析飞机图像云中冰晶的凇附过程相对较少相对应。

图 10f 为 11 时 36 分该点垂直方向上的水凝物分布, 该时刻, 云系中低层雨水的增加主要对应雪晶

浓度的降低,表明在该时刻雨水主要来自雪晶的融化。为了详细分析各微物理过程对雨水贡献的大小,增加模式中各微物理过程量的输出,详细分析各水凝物的源汇项,进而分析降水机制。

4.3 模拟云系降水机制分析

下面对雨滴的源、汇项进行解析,为了直观显示,源、汇项图中显示的微物理过程量均用绝对值。**图 11** 给出与雨滴相关微物理过程量的垂直分布,在 Morrison 方案中,与雨滴相关的过程一共有 13 个,其中雨滴收集冰晶(P_{iacr})、雪晶和霰捕获雨水(P_{gracs} 、 P_{racg}),冰晶捕获霰和雨滴(Q_{multg} 、 Q_{multrg})以及雨滴的接触冻结(M_{nuccr})、霰的融化(P_{gmt})7 个过程的贡献均为 0 或转化率非常小,以上这些转化项在图中均被略去。从图中可以看到,在 0 °C 层附

近,雪晶的融化(P_{smlt})和雨滴捕获云滴的过程(P_{ra})占最主要的部分,其次未来得及融化的雪碰并雨滴的过程(P_{racs})也相对较多,云雨的自动转换(P_{rc})也占一部分,雨滴的蒸发(P_{re})主要发生在接近地面的高度。从量级上来看,雨滴捕获云滴和雪晶的融化是导致地面降雨产生的最主要部分。此外,还给出了冰晶、雪晶的源汇项分布,**图 12** 为与冰晶和雪晶相关的微物理过程,通常情况下,凝华、聚并和淞附是冰晶和雪晶产生的 3 个主要过程,从该处分析可以看到该区域在 8 km 以上,凝华(P_{rd} 、 P_{rds})是冰晶和雪晶增长的主要方式,聚并(P_{rci} 、 P_{rai})为次要过程,淞附过程的量级很小,可忽略,这与 3.4 节分析的飞机探测图像数据吻合,即凝华和聚并是云中粒子增长的两个最主要过程。低层(4 km 附近),由

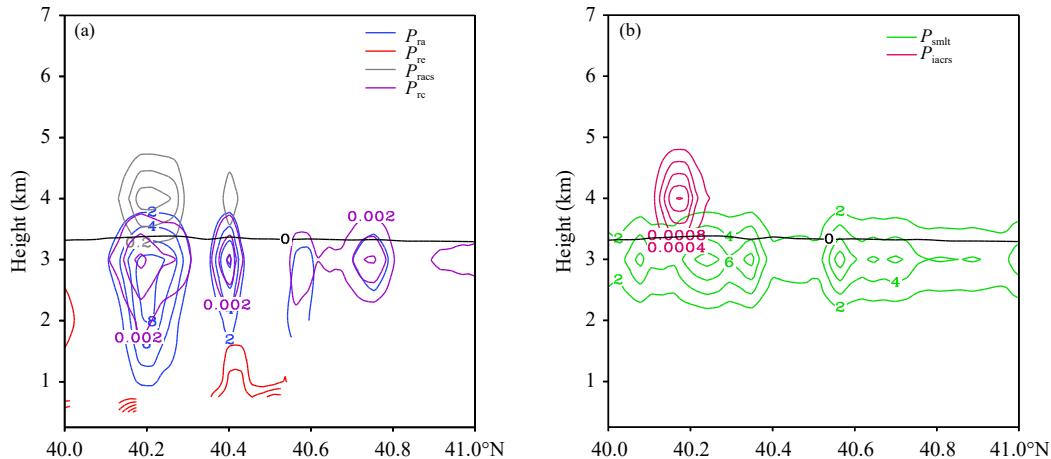


图 11 雨水的源汇项解析(单位: $10^{-7}\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{s})$)

Fig. 11 The source and sink of rain water (unit: $10^{-7}\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{s})$)

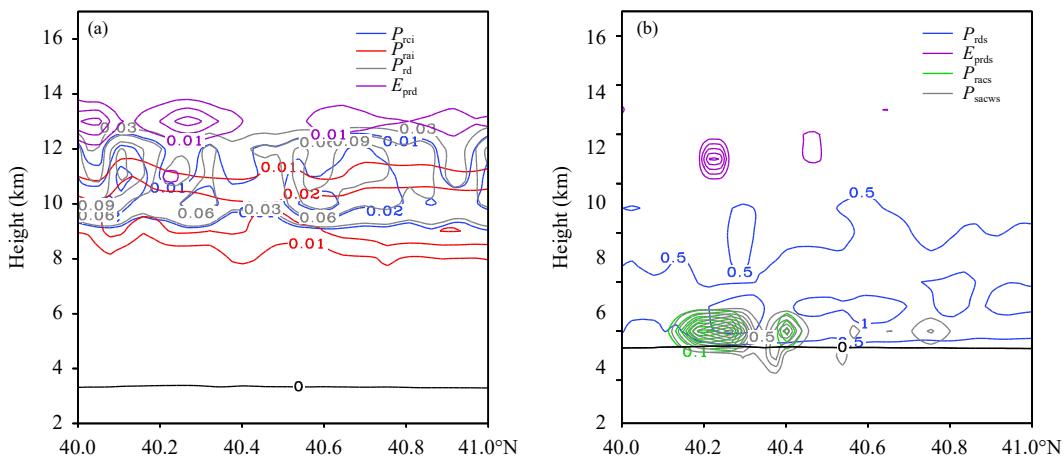


图 12 冰晶(a)和雪晶(b)的源汇项解析(单位: $10^{-7}\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{s})$)

Fig. 12 The source and sink of ice (a) and snow (b) (unit: $10^{-7}\text{kg}/(\text{kg}\cdot\text{s})$)

于有雪晶的融化和云雨的自动转化,出现一定程度的凇附过程(P_{racs} 和 P_{sacws})。此外,除了有凝华产生的很少量霰,其他微物理转换参与霰的源、汇项几乎没有(图略)。因此可以得到,高层由凝华产生的冰晶在过冷水含量很低的环境中主要通过聚并过程产生大的雪晶,雪晶下落至0℃层附近融化是产生地面降水的主要源项之一。此外,在融化层附近,雨滴碰并捕获云滴不断长大并下降至地面是地面降水的又一重要源项。

5 结论与讨论

利用飞机探测资料和数值模拟工具对2014年9月23日发生在北京地区的一次积-层混合云系的垂直结构和降水机制进行了分析,对其发生的天气背景、宏观特征、飞机探测特征及积-层混合云降水机理等方面进行了研究,主要得到以下结论:

(1) 中高纬度的冷空气东移南下与偏南暖湿气流交汇,高低空的切变迫使水汽辐合抬升,形成此次降水天气。雷达回波显示,云中未有对流性回波的爆发性增长,云系属于积-层水平混合性云系。

(2) 根据飞机探测资料分析和数值模拟研究得到:该次积-层混合云系中飞机探测位置的液态水含量不高(最大低于1 g/m³);在云系的不同高度处,云降水粒子的形态特征有差异,中下层存在大量圆形云滴和小雨滴,云系中部存在较多的过冷云滴和板状、针柱状以及单个不规则形状的小冰晶,高层由于过冷水含量相对较低,以聚合、辅枝状冰晶为主。冰相粒子的存在对中低层有播撒效应,在暖区融化为雨滴或大云滴,促进云水向雨水的转化。数值模拟结果验证了上述观测。对模拟云系垂直微物理结构和降水粒子的源、汇项分析得到,高层由凝华产生的冰晶和雪晶在过冷水含量很低的环境中不断聚并、长大并下落,云系中霰的含量很低,增大的冰晶和雪晶下落至0℃层附近融化是产生地面降水的主要机制。此外,在融化层附近,雨滴捕获云滴不断长大并下降至地面也是地面降水的另一重要源项。

致谢:感谢北京市人工影响天气办公室同事在飞机探测资料处理方面给予的帮助。

参考文献

常祎,郭学良. 2016. 青藏高原那曲地区夏季对流云结构及雨滴谱分布日变

- 化特征. *科学通报*, 61(15): 1706-1720. Chang Y, Guo X L. 2016. Characteristics of convective cloud and precipitation during summer time at Naqu over Tibetan Plateau. *Chinese Sci Bull*, 61(15): 1706-1720 (in Chinese)
- 陈宝君,李子华,刘吉成等. 1998. 三类降水云雨滴谱分布模式. *气象学报*, 56(4): 506-512. Chen B J, Li Z H, Liu J C, et al. 1998. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation. *Acta Meteor Sinica*, 56(4): 506-512 (in Chinese)
- 宫福久,刘吉成,李子华. 1997. 三类降水云雨滴谱特征研究. *大气科学*, 21(5): 607-614. Gong F J, Liu J C, Li Z H. 1997. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation. *Scientia Atmos Sinica*, 21(5): 607-614 (in Chinese)
- 何晖,高茜,刘香娥等. 2015. 积层混合云结构特征及降水机理的个例模拟研究. *大气科学*, 39(2): 315-328. He H, Gao Q, Liu X E, et al. 2015. Numerical simulation of the structural characteristics and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections. *Chinese J Atmos Sci*, 39(2): 315-328 (in Chinese)
- 洪延超,黄美元. 1983. 梅雨云系的回波结构、降水特征及层结状况分析//南方云物理和人工降水会议文集(2), 21. Hong Y C, Huang M Y. 1983. Analysis of echo structure, precipitation characteristics and stratification of Meiyu cloud system//Southern Cloud Physics and Cumulus Precipitation Conference, 21 (in Chinese)
- 洪延超,黄美元,王首平. 1984. 梅雨云系中亮带不均匀性的理论探讨. *大气科学*, 8(2): 197-204. Hong Y C, Huang M Y, Wang S P. 1984. A theoretical study on inhomogeneity of bright band in Mei-Yü frontal cloud system. *Scientia Atmos Sinica*, 8(2): 197-204 (in Chinese)
- 洪延超. 1996a. 积层混合云数值模拟研究(I): 模式及其微物理过程参数化. *气象学报*, 54(5): 544-557. Hong Y C. 1996a. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, part (I): The model and parameterization of microphysical processes. *Acta Meteor Sinica*, 54(5): 544-557 (in Chinese)
- 洪延超. 1996b. 积层混合云数值模拟研究(II): 云相互作用及暴雨产生机制. *气象学报*, 54(6): 661-674. Hong Y C. 1996b. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, part (II): Interaction of clouds and formative mechanism of the heavy rain. *Acta Meteor Sinica*, 54(6): 661-674 (in Chinese)
- 黄美元,洪延超,吴玉霞. 1986a. 梅雨云系的若干雷达回波特征//中国南方云物理和积云降水论文集. 北京: 气象出版社. Huang M Y, Hong Y C, Wu Y X. 1986a. Several characteristics of radar echoes in Meiyu clouds//Southern Cloud Physics and Cumulus Precipitation Conference. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 黄美元,徐华英,洪延超. 1986b. 混合云系中的层状云对对流云发展影响的数值模拟研究. *成都气象学院学报*, 1(1): 48-54. Huang M Y, Xu H Y, Hong Y C. 1986b. A numerical simulation study for effects of stratiform cloud in mixed cloud system on growth of convective cloud. *J Chengdu Meteor Inst*, 1(1): 48-54 (in Chinese)
- 黄美元,洪延超,吴玉霞等. 1987a. 梅雨锋云系和降水的若干研究. *大气科学*, 11(1): 23-30. Huang M Y, Hong Y C, Wu Y X, et al. 1987a. Some studies on Meiyu frontal cloud system and its precipitation. *Scientia Atmos Sinica*, 11(1): 23-30 (in Chinese)
- 黄美元,洪延超,徐华英等. 1987b. 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. *气象学报*, 45(1): 72-77. Huang M Y, Hong Y C, Xu H Y, et al. 1987b. The effects of the existence of stratiform cloud on the development of cumulus cloud and its

- precipitation. *Acta Meteor Sinica*, 45(1): 72-77 (in Chinese)
- 李艳伟, 牛生杰, 罗宁等. 2009. 积云并合扩展层化型积层混合云的数值模拟分析. *地球物理学报*, 52(5): 1165-1175. Li Y W, Niu S J, Luo N, et al. 2009. Numerical simulation about mixture of convective and stratiform clouds formed by convection merger. *Chinese J Geophys*, 52(5): 1165-1175 (in Chinese)
- 李艳伟, 牛生杰. 2012. 层状云系中两种特殊分布嵌入对流的形成过程和降水机理. *中国科学: 地球科学*, 42(2): 277-289. Li Y W, Niu S J. 2012. The formation and precipitation mechanism of two ordered patterns of embedded convection in stratiform cloud. *Sci China Earth Sci*, 55(1): 113-125
- 李子华, 夏晓青, 章晴等. 1986. 梅雨锋云系亮带的初步研究. *气象科学*, (1): 82-90. Li Z H, Xia X Q, Zhang Q, et al. 1986. A preliminary study of the bright band in the Meiyu frontal cloud system. *Scientia Meteor Sinica*, (1): 82-90 (in Chinese)
- 林长城, 汤达章. 1991. 华南前汛期福建古田地区0℃云层亮带特征的分析. *热带气象*, 7(2): 154-161. Lin C C, Tang D Z. 1991. Analysis of bright band's features of 0℃ cloud layer in Gutian, Fujian province during the first rainy season in South China. *J Trop Meteor*, 7(2): 154-161 (in Chinese)
- 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生等. 2004. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究. *大气科学*, 28(2): 278-284. Liu L P, Shao A M, Ge R S, et al. 2004. A study of mesoscale wind structures in heavy rainfall system of merging cloud with dual-Doppler radar. *Chinese J Atmos Sci*, 28(2): 278-284 (in Chinese)
- 刘黎平, 郑佳峰, 阮征等. 2015. 2014年青藏高原云和降水多种雷达综合观测试验及云特征初步分析结果. *气象学报*, 73(4): 635-647. Liu L P, Zheng J F, Ruan Z, et al. 2015. The preliminary analyses of the cloud properties over the Tibetan Plateau from the field experiments in clouds precipitation with the various radars. *Acta Meteor Sinica*, 73(4): 635-647 (in Chinese)
- 亓鹏, 郭学良, 卢广献等. 2019. 华北太行山东麓一次稳定性积层混合云飞机观测研究: 对流云/对流泡和融化层结构特征. *大气科学*, 43(6): 1365-1384. Qi P, Guo X L, Lu G X, et al. 2019. Aircraft measurement of a stable stratiform cloud with embedded convection in eastern Taihang mountain of North China: Characteristics of embedded convection and melting layer structure. *Chinese J Atmos Sci*, 43(6): 1365-1384 (in Chinese)
- 秦彦硕, 蔡森, 刘世玺等. 2017. 华北秋季一次低槽冷锋积层混合云宏物理特征与催化响应分析. *气象学报*, 75(5): 835-849. Qin Y S, Cai M, Liu S X, et al. 2017. A study on macro and micro physical structures of convective-stratiform mixed clouds associated with a cold front in autumn and their catalytic responses in North China. *Acta Meteor Sinica*, 75(5): 835-849 (in Chinese)
- 王维佳, 陶遐龄. 2006. 一维半地形积层混合云模式简介. *四川气象*, 26(1): 43-45. Wang W J, Tao X L. 2006. A brief introduction to a model of cumulus & stratus-mixed cloud with one and half dimension terrain. *J Sichuan Meteor*, 26(1): 43-45 (in Chinese)
- 王维佳, 陶遐龄. 2007. 地形积层混合云模式数值试验研究. *四川气象*, 27(1): 29-32. Wang W J, Tao X L. 2007. Analysis of the output from the land-type lamination-mixed cloud model. *J Sichuan Meteor*, 27(1): 29-32 (in Chinese)
- 于鹏, 姚展予. 2009. 一次积层混合云降水实例的数值模拟分析. *气象*, 35(12): 3-11. Yu F, Yao Z Y. 2009. Numerical study on the complex of the stratiform and embedded convective cloud precipitation: a case study. *Meteor Mon*, 35(12): 3-11 (in Chinese)
- 袁成, 樊玲, 李亚斌. 2001. 哈尔滨地区春夏季降水微结构特征. *南京气象学院学报*, 24(2): 250-257. Yuan C, Fan L, Li Y B. 2001. Microphysical features of precipitation in spring and summer in Harbin. *J Nanjing Inst Meteor*, 24(2): 250-257 (in Chinese)
- 赵清云. 1985. 梅雨锋暴雨区内中尺度雨带的分布及其演变. *南京气象学院学报*, (3): 316-322. Zhao Q Y. 1985. Distribution and development of Meso-scale Rainbands in heavy rainstorms associated with the Meiyu front. *J Nanjing Inst Meteor*, (3): 316-322 (in Chinese)
- 朱士超, 郭学良. 2014. 华北积层混合云冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究. *气象学报*, 72(2): 366-389. Zhu S C, Guo X L. 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 366-389 (in Chinese)
- 朱士超, 郭学良. 2015. 华北一次积层混合云微物理和降水特征的数值模拟与飞机观测对比研究. *大气科学*, 39(2): 370-384. Zhu S C, Guo X L. 2015. A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in northern China. *Chinese J Atmos Sci*, 39(2): 370-384 (in Chinese)
- Duyunkerke P G, Jonker P J, Chlond A, et al. 1999. Intercomparison of three- and one-dimensional model simulations and aircraft observations of stratocumulus. *Bound Layer Meteor*, 92(3): 453-487
- Fabry F, Zawadzki I, Cohn S. 1993. The influence of stratiform precipitation on shallow convective rain: A case study. *Mon Wea Rev*, 121(12): 3312-3325
- Fukuta N, Takahashi T. 1999. The growth of atmospheric ice crystals: A summary of findings in vertical supercooled cloud tunnel studies. *J Atmos Sci*, 56(12): 1963-1979
- Guo X L, Fu D H, Li X Y, et al. 2015. Advances in cloud physics and weather modification in China. *Adv Atmos Sci*, 32(2): 230-249
- Heymsfield A J, Schmitt C, Bansemer A, et al. 2010. Improved representation of ice particle masses based on observations in natural clouds. *J Atmos Sci*, 67(10): 3303-3318
- Hong Y C. 1997. A numerical model of mixed convective-stratiform cloud. *Acta Meteor Sinica*, 11(4): 489-502
- Hong Y C. 1998. Numerical simulation study of cloud interaction and formation mechanism of heavy rain in mixed convective-stratiform cloud. *Acta Meteor Sinica*, 12(1): 112-128
- Houze R A Jr, Rutledge S A, Biggerstaff M I, et al. 1989. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(6): 608-619
- Kusunoki K, Murakami M, Hoshimoto M, et al. 2004. The characteristics and evolution of orographic snow clouds under weak cold advection. *Mon Wea Rev*, 132(1): 174-191
- Yuter S E, Houze R A Jr, Smith E A, et al. 2005. Physical characterization of tropical oceanic convection observed in KWAJEX. *J Appl Meteor*, 44(4): 385-415
- Zhu S C, Guo X L, Lu G X, et al. 2015. Ice crystal habits and growth processes in stratiform clouds with embedded convection examined through aircraft observation in northern China. *J Atmos Sci*, 72(5): 2011-2032