

高茜, 郭学良, 何晖, 等. 2020. 基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 44(5): 899–912. GAQ Qian, GUO Xueliang, HE Hui, et al. 2020. Numerical Simulation Study on the Microphysical Characteristics of Stratiform Clouds with Embedded Convections in Northern China based on Aircraft Measurements [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 899–912. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1908.19114

基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究

高茜^{1,2,3,4,5} 郭学良¹ 何晖^{2,3,5} 刘香娥^{2,3,5} 黄梦宇^{2,3,5} 马新成^{2,3,5}

¹ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 中国气象局大气探测重点开放实验室, 北京 100089

³ 北京市人工影响天气办公室, 北京 100089

⁴ 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089

⁵ 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 基于 2009 年 5 月 1 日积层混合云降水 2 架飞机观测数据分析, 使用中尺度模式 WRFV3 对此次过程积云区和层云区的微物理特征和转化过程进行数值模拟比较研究。飞机观测数据分析表明, 此次积层混合云中的层云区和积云区冰粒子形状和形成过程有明显差别, 层云区的粒子形状组成比较复杂, 包含针状、柱状和辐枝状等, 而积云区主要以辐枝状粒子为主, 聚并、淞附过程明显。数值模式能较好地模拟出此次积层混合云降水过程的基本特征, 包括回波分布、飞行路径上降水粒子的数浓度和液态水含量等。数值模拟结果表明, 云水相对丰富、上升气流强的层云区淞附过程较强, 产生的雪在低层融化为雨水, 为后期高层形成的雪和霰提供丰富的液态水, 能发展成对流较强的积云区, 存在播种—供给机制。在积云区, 水成物的比例从大到小依次为雪 (51.9%)、霰 (31.0%) 和雨水 (16.0%); 雪的主要源项包括淞附增长 (56.8%) 和凝华增长 (40.1%), 霰的主要源项包括淞附增长 (46.6%)、雨水碰并雪成霰 (42.6%) 和凝华增长 (16.1%), 雨水的主要源项是霰 (77.6%) 和雪 (22.4%) 的融化。而相对云水较少、上升气流较弱的层云区将保持层云的状态, 层云区水成物的比例从大到小依次为雪 (90.4%)、雨水 (6.1%)、冰晶 (3.5%); 高层冰晶和雪通过凝华过程增长, 雪在零度层下融化为弱的降水。

关键词 积层混合云降水 飞机观测 数值模拟 微物理特征

文章编号 1006-9895(2020)05-0899-14

中图分类号 P458.3

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1908.19114

Numerical Simulation Study on the Microphysical Characteristics of Stratiform Clouds with Embedded Convections in Northern China based on Aircraft Measurements

GAQ Qian^{1,2,3,4,5}, GUO Xueliang¹, HE Hui^{2,3,5}, LIU Xiang^{2,3,5},
HUANG Mengyu^{2,3,5}, and MA Xincheng^{2,3,5}

收稿日期 2019-01-23; 网络预出版日期 2020-04-01

作者简介 高茜, 女, 1984 年出生, 高级工程师, 主要从事云降水物理研究。E-mail: gaoqianbjwm@163.com

通讯作者 郭学良, E-mail: guoxl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0601704, 国家自然科学基金项目 41805114、41675138, 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题 KLAS201708, 北京市自然科学基金项目 8164058、8182024

Funded by National Key Research and Development Project (Grant 2016YFA0601704), National Natural Science Foundation of China (Grants 41805114, 41675138), Open project of Key Laboratory of Atmospheric Sounding of China Meteorological Administration (Grant KLAS201708), Beijing Natural Science Foundation (Grants 8164058, 8182024)

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Beijing Weather Modification Office, Beijing 100089*

3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100089*

4 *Key Laboratory of Beijing for Cloud, Precipitation and Atmospheric Water Resources, Beijing 100089*

5 *Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*

Abstract To characterize the microphysical characteristics and transformation process of stratiform clouds with embedded convections, a study was performed using the WRFV3 model and based on two aircraft measurements taken on May 1, 2009. The aircraft observation results showed that significant differences in the shapes and formation process of ice particles existed between the regions of stratiform cloud and embedded convection. Compared with the embedded convection region, the stratiform cloud featured more complicated shapes of ice crystals, including needle column, capped column, and dendrite types. However, the dendrite-type ice crystals dominated in the embedded convection region, and their growth was controlled by aggregation and riming processes. Overall, the results indicated that the basic characteristics of this stratiform cloud with embedded convections simulated by the WRF model agreed well with the aircraft observations, including cloud distribution, LWC, and numerical concentration on the flight route. The simulation results showed that in the stratiform cloud, with higher cloud water content and larger W , embedded convection could be developed because of a strong riming process. The hydrometeors of snow, graupel, and rainwater in the clouds accounted for 51.9%, 31.0%, and 16.0%, respectively, while cloud ice and cloud water accounted for very little. In the higher level, snow and graupel grew through deposition process. In the lower level, they grew through the riming process and melted into rain. Stratiform clouds with lower cloud water content and smaller W would remain as stratiform cloud. The hydrometeors of snow, rainwater, and cloud ice accounted for 90.4%, 6.1%, and 3.5%, respectively. The ice and snow grew through deposition process and melted into rain in the lower level.

Keywords Stratiform clouds with embedded convections, Aircraft measurements, Numerical simulation, Microphysical characteristics

1 引言

在我国, 积层混合云降水是一种非常重要的降水系统, 是由层状云和嵌入其内的对流云组成的云系统, 其特点为外围大范围的较稳定云系具有层状云的特征, 而内嵌的对流泡又具有对流云的特征。且积层混合云生命期一般较长, 可以产生高强度的持续性降水和间歇性降水, 是云降水物理和人工影响天气的重要研究对象 (黄美元等, 1987; 洪延超, 1996a, 1996b)。

随着飞机、雷达、卫星、雨滴谱仪等观测手段发展, 国内外目前对积层混合云开展了很多相关研究。Herzogh and Hobbs (1980) 发现积层混合云中的嵌入对流区冰雪晶粒子的增长主要是通过淞附过程, 而在层云区以凝华、聚合增长为主。黄美元和洪延超 (1984) 分析了层状云中不均匀亮带和下挂强回波的特征, 认为层状云的不均匀结构是梅雨云系雷达回波特征之一, 层状云内隐藏着水平尺度小的对流云, 层状云暖区存在由于强核自上而下伸展形成的下挂强回波。袁成等 (2001) 等利用地面雨

滴谱仪, 研究了哈尔滨地区 27 次降水, 认为积层混合云降水的直径越大, 起伏越大, 雨滴谱较宽且呈现出多峰形状, 云系内结构很不均匀。Evans et al. (2005) 认为嵌入式对流单体中具有更高的液态水, 上升速度更强, 可以产生更多的冰晶。李艳伟和牛生杰 (2012) 对贵州 48 次积层混合云降水的研究指出, 积层混合云系有积云层化和层云积化两种生成途径。朱士超和郭学良 (2014) 分析环北京地区 3 架飞机联合云探测试验数据, 认为在积层混合云中的嵌入对流区含有更多的淞附状冰晶; 在融化层以上, 冰晶的增长过程主要包括凝华、淞附和聚合过程, 在垂直方向上, 随着高度降低云中过冷水增多, 冰晶的淞附增长也相应增强。黄勇等 (2012) 通过对卫星和雷达资料的综合分析, 认为对流云的合并, 会造成云体发展增强, 并为对流系统补充能量, 使系统生命史得到延长。

在数值模式方面, 黄美元等 (1986) 利用二维时变模式讨论层状云对对流云发展的影响, 认为层状云主要通过增加凝结影响对流云, 从而释放更多的潜热, 导致上升气流加强, 为对流云输送更多的

水汽, 促进云的发展, 使积云降水效率提高, 总降水量显著增大。邹倩等(2008)改进了三维非静力中尺度模式 ARPS 的云微物理方案, 利用改进后的模式模拟华北地区的积层混合云降水个例, 结果表明, 积层混合云降水分布不均匀, 雨区中存在多个强降水中心, 云系中微物理量在水平和垂直方向上分布都不均匀, 积云中的垂直液态水积分含量大大高于层云中含量, 此次降水冰相过程占主导地位, 霰的融化是最主要的雨生成项。李艳伟等(2009a, b)利用模式模拟发现, 云系形成以后, 云系附近会不断有对流云生成, 并在移动过程中并合进入云系, 补充云系发展维系所需的含水量和能量, 促使云系不断维持。在积层混合云系的内部, 对流云和层状云区不断地发生作用。对流云给周围的层状云不断输送含水量和能量, 支持着层状云的发展。于翡和姚展予(2009)发现大范围辐合和相应的较均匀上升气流场支撑着的层状云, 嵌入其中的对流云产生的原因是均匀上升气流场中的波动。黄天弋等(2013)利用 WRF 模式从热力和动力方面研究积层混合云的形成过程。研究发现对流有效位能在积云初始生成时较小, 假相当位温随着高度递减有利于对流发展; 在积云嵌入大片层状云的过程中, 水汽辐合辐散场的变化起着至关重要的作用, 热力作用为积层混合云过程提供了条件, 动力因素起主要作用。陶玥等(2015)利用中国气象科学研究院(CAMS)中尺度云分辨模式对 2007 年 10 月的一次积层混合云降水过程进行了数值模拟, 结果表明积层混合云的降水、微物理量水平和垂直分布都是不均匀的。冷云降水过程占主导地位, 雨水形成的最主要贡献来自雪的融化。在降水主要时段, 水成

物在水平方向上是净流入的。何晖等(2015)利用 WRF 模式结合三维粒子运行增长模式对北京地区一次积层混合云降水过程进行了模拟研究, 发现云内存在明显的“播种—供给”机制。层状云中“播种—供给”机制相对简单。而对流云区中的“播种—供给”机制在云的上下层之间进行, 这是因为降水粒子上下多次的进行循环, 云中粒子群可以增长到更大。低层层状云中生成的水成物粒子随气流输送到内嵌的积云中, 而在高层水成物粒子又从积云中流转到层云中。

朱士超和郭学良(2015)将 WRF 模式模拟的 2009 年 4 月 18 日积层混合云的微物理结构特征、降水过程与多种观测数据进行了比较和验证研究, 认为 WRF 模式能够较好的模拟出此次积层混合云过程的云系演变、雷达回波和降水分布特征。模拟的云中液态水浓度与飞机观测具有较好的一致性, 也能够模拟云中融化层的位置, 但模拟的粒子谱存在一定的偏差。为进一步揭示积层混合云的积云区与层云区水凝物的转化过程和降水形成机制, 本文在该论文的基础上, 进一步利用数值模式模拟结果, 定量分析了 2009 年 5 月 1 日一次积层混合云中积云区和层云区水凝物组成和转化过程, 以及积云区与层云区降水形成机制的差异和原因, 对进一步改进模式云物理方案具有重要参考价值。

2 个例与资料

2.1 个例基本特征

2009 年 4 月 30 日到 5 月 1 日, 华北地区出现了一次较深厚的锋面系统(图 1)。从 5 月 1 日上午 08:00(除特别注明, 本文所有时间均为北京时)

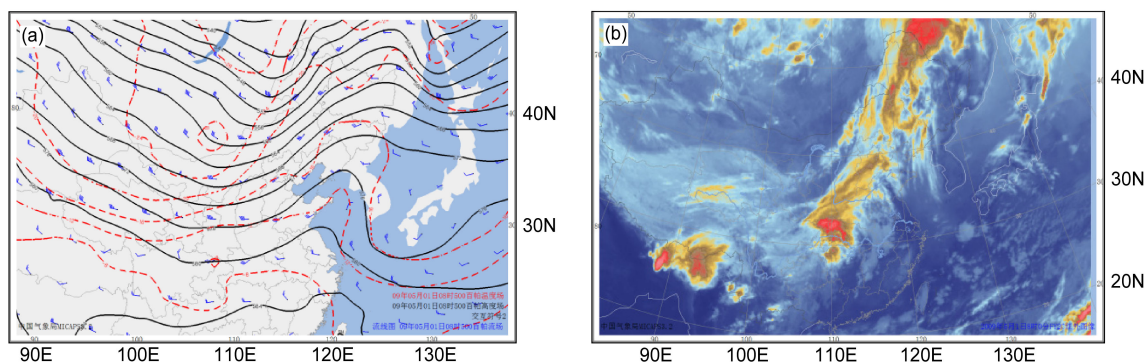


图 1 2009 年 5 月 1 日 08:00(北京时, 下同) 500 hPa (a) 高度场(黑色; 单位: gpm)、温度场(红色; 单位: $^{\circ}\text{C}$)、流场(蓝色风标)以及 (b) FY-2C 卫星红外图像

Fig. 1 (a) The geopotential height (black line, units: gpm), temperature (red line, units: $^{\circ}\text{C}$) and wind field (blue barb) at 500 hPa and (b) FY-2C satellite infrared images at 0800 BT 1 May, 2009

的 Micaps 数据 500 hPa 高度场、温度场、流场来看 (图 1a), 华北处于西风槽控制中。从 FY-2C 卫星红外图像看 (图 1b), 云系呈西南—东北走向, 主要分布在河北中西部区域。

如图 2 所示, 河北西北部区域 04:00 开始产生降水, 小时降水量基本小于 0.5 mm。随着降水中心向东移动, 河北北部地区降水增强, 08:00 小时降水量最大值达 0.8 mm。此时三架飞机起飞, 在河北北部降水高值区进行探测, 到 12:00, 降水高值区东移且河北大部分地区降水过程结束, 观测区域小时降水量基本小于 0.1 mm, 飞机降落。

2.2 飞机观测数据

2009 年 4~5 月, 在河北省张家口市及其附近区域, 开展了“环北京地区多架飞机云观测试验”, 试验利用北京、河北、山西的三架人影飞机进行不同高度同步观测, 取得了非常宝贵的数据。针对 2009 年 5 月 1 日过程, 北京、河北、山西人影办在环北京地区开展了联合观测试验, 其中编号 3625 的飞机由于 GPS 发生故障, 无法确定具体位置, 仅采用编号 3830 和 3817 飞机观测数据进行分析。飞行情况如表 1 所示。

机载仪器包括降水粒子图像探头 PIP, 云粒子图像仪器 CIP, 热线含水量仪 Hotwire-LWC, 机载云物理探测系统 AIMMS 常规气象探头和云凝结核计数器 CCN 等, 参数设置见表 2。

2.3 数据资料

本文所用观测数据如表 3 所示, 包括 2009 年 5 月 1 日北京、山西两架飞机探测数据, 北京、张

家口、石家庄三部雷达基数据, 区域加密雨量数据、加密探空数据、Micaps 数据, 其中北京和石家庄为 CINRAD/SA 雷达, 张家口为 CINRAD/CB 雷达。

图 3 为两架飞机的飞行轨迹和探测时段的北京、石家庄 SA 雷达、大同 CB 雷达的组合反射率。图 4 为两架飞机飞行轨迹上的雷达回波剖面。3830 号飞机在张家口起飞并在其上空区域盘旋, 飞行高度大部分时间在 3.5 km, 飞行路径上回波在 5~40 dBZ。08:50~09:16 飞行高度从 3.5 km 逐渐降至 2.4 km, 之后迅速爬升至 3.5 km, 并穿过强回波中心积云区。3817 号飞机自大同机场起飞, 抵达张家口附近后在云顶 4 km 进行探测, 期间穿过积云区和层云区。从图 4 可以看出, 3830、3817 两架飞机在探测过程中, 既穿过了回波相对均匀的层云区, 也穿过了回波较强的积云区。

3 模式参数设置和模拟结果验证

使用三维非静力平衡中尺度模式 WRFV3, 采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案 (Kain, 2004)、Morrison 2-moment 云微物理显式方案 (Morrison et al., 2009)、RRTM 长波辐射计算方案 (Mlawer et al., 1997)、Dudhia 短波辐射计算方案 (Dudhia, 1989)、Yonsei University (Hong et al., 2006) 边界层方案。模式采用三层嵌套 (如图 5), 格距分别是 18 km、6 km、2 km, 水平格点数分别为 101×101、103×103、151×151。模式在垂直方向上分 39 层。采用分辨率为 1°×1°, 时间间隔为 6 小时的 NCEP 再分析资料作为模式初始场和侧边界

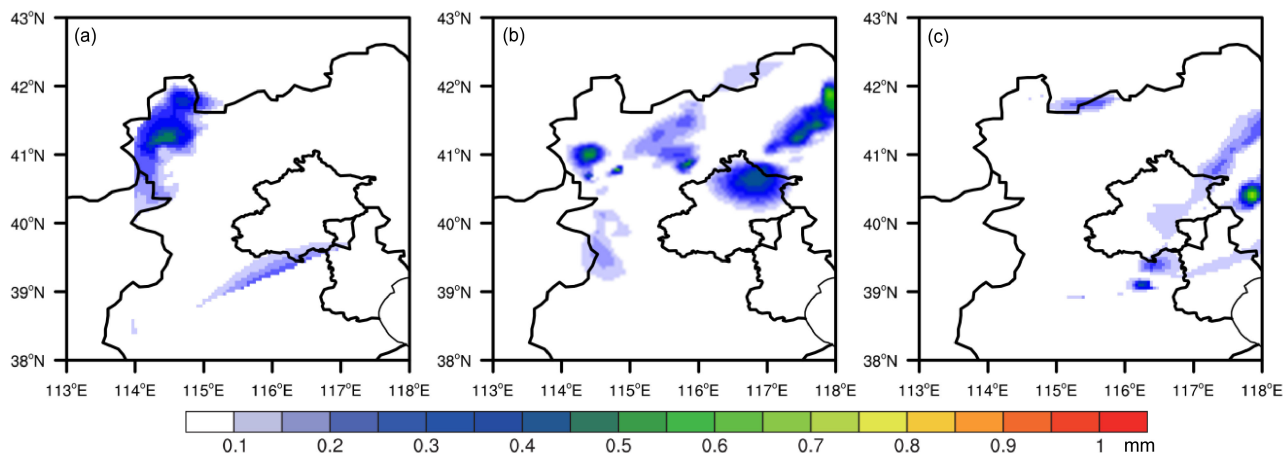


图 2 2009 年 5 月 1 日河北省加密气象观测站观测小时降水量 (单位: mm): (a) 04:00; (b) 08:00; (c) 12:00

Fig. 2 Hourly rainfall (units: mm) observed by dense meteorological observation stations of Hebei Province at (a) 0400 BT, (b) 0800 BT, and (c) 1200 BT 1 May, 2009

表 1 两架飞机情况

Table 1 The aircraft parameters and flight time

飞机编号	飞机所属单位	飞机型号	飞行时间
3830	北京人工影响天气办公室	运-12	2009年5月1日 08:30~11:34
3817	山西省人工影响天气办公室	运-12	2009年5月1日 08:46~11:10

表 2 机载仪器参数

Table 2 The aircraft instrumentation and parameters

仪器名称	观测对象	仪器参数
降水粒子图像探头	云粒子图像	62通道, 25~1550 μm
云粒子图像探头	降水粒子	62通道, 100~6200 μm
热线含水量仪	液水含量	0~5 g m ⁻³
机载云物理探测系统	温、压、湿、风等	-

表 3 2009 年 5 月 1 日资料列表

Table 3 The data list of 1st May 2009

资料类型	覆盖区域
飞机资料	北京、山西
常规雷达	北京、张家口、石家庄
区域加密雨量	北京、河北、天津
加密探空	北京、张家口、太原
MICAPS	全国

条件。模拟选用欧拉质量坐标和 Runge-Kutta 3rd 时间积分方案。模拟时间为 2009 年 4 月 30 日 20:00 至 5 月 1 日 14:00。

3.1 观测和模拟的雷达组合反射率对比

图 6 给出了探测时段（08:00、10:00、12:00）观测和模拟的雷达组合反射率对比，由图中可看出，模拟的回波的走向方向、强度与实际组合反射率分布相符，但是范围略大。组合反射率大部分地区在 10~20 dBZ，最大为 35 dBZ，系统呈西南—东北走向；08:00，回波中心在北京西北方向，河北与北京交界附近；10:00 移至河北北部，北京正北方向；12:00 移至北京境内。

3.2 观测和模拟的探空曲线对比

图 7 是观测和模拟的 2009 年 5 月 1 日 08:00 张家口探空曲线，分别为温度、风速、相对湿度。黑色线条代表张家口探空气球获得的温度、风速和相对湿度，红色线条代表同一位置数值模拟的结果。模式可以较准确的模拟出温度的变化，对于低层风速随高度先增后减的趋势未能准确模拟，但对 3 km 以上的风速及变化趋势模拟准确。相对湿度的模拟类似。

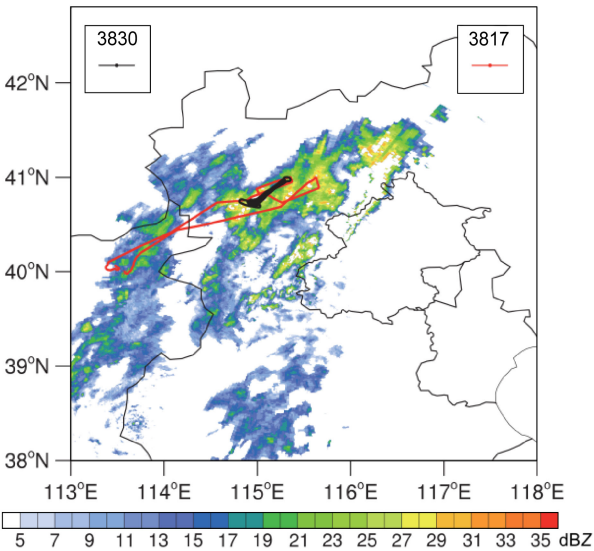


图 3 3830（黑线）、3817（红线）飞机探测时段雷达组合反射率（彩色阴影；单位：dBZ）拼图及两架飞机飞行轨迹

Fig. 3 The combined radar reflectivity (color-shaded; units: dBZ) on the flight route of 3830 (black line) and 3817 (red line) aircraft

3.3 观测和模拟的降水粒子数浓度

图 8 给出了 PIP 观测和模式模拟的粒子数浓度随高度分布。飞机观测到的降水粒子数浓度自 1 km 以上逐渐增大，到 3.4 km 达到极大值 0.04 个 cm⁻³，3.4~4 km 逐渐减少，4~4.15 km 增加，4.15~4.35 km 再减少，4.35~4.5 km 又增加达到极大值，随后 4.5~5 km 减少。模式模拟的趋势与观测较为一致。在 2.3 km 以下和 3.7 km 以上，模式模拟结果与观测结果接近；2.3~3.7 km 之间模拟的粒子数浓度小于观测的粒子数浓度。对观测区域的模式结果进行输出，发现 3.4 km 高度极大值为 0.04 个 cm⁻³，与飞机观测结果一致，但不在飞行轨迹上，说明模式可以模拟出极大值垂直分布的高度，但水平位置有偏差。结合图 4 飞机飞行路径上的雷达回波看，3.4 km 为强回波中心，2.3~3.7 km 之间为积云存在高度，说明此次个例模式对于强回波中心水平位置的模拟有偏差，对层云区粒子数浓度的模拟效果好于积云区。

3.4 观测和模拟的液态水含量

图 9 为两架飞机飞行路径上观测和模拟的液态水含量。09:30~09:40 两架飞机在同一块云的不同高度飞行，3830 飞行高度在 3.5 km 左右，3817 飞行高度在 4 km 左右。对比观测和模拟的液态水含量发现，模式对 3830 飞机飞行路径上（3.5 km）的液态水含量模拟效果较好，最高值与观测到的同

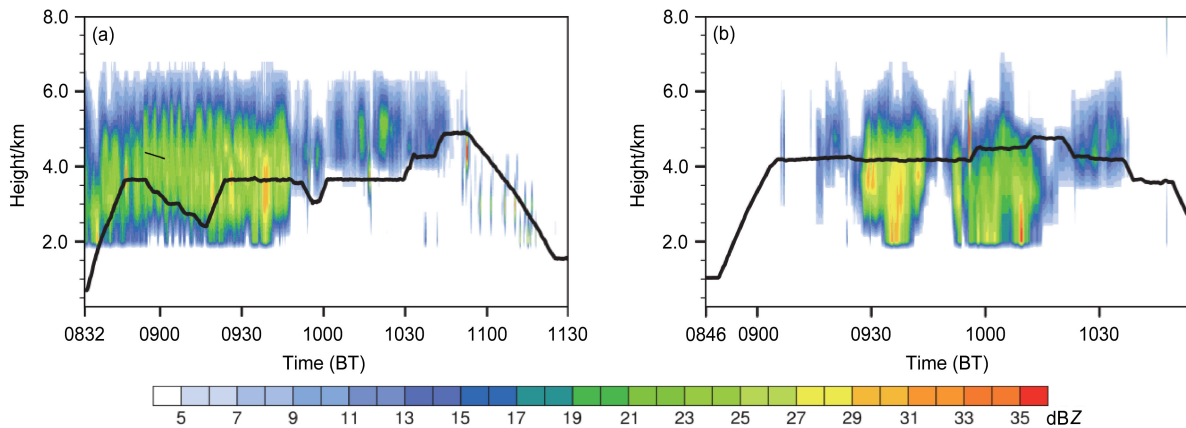


图4 (a) 3830、(b) 3817 号飞机飞行路径上的雷达回波 (单位: dBZ)

Fig. 4 The radar reflectivity (color-shaded) on (a) 3830 (black line), (b) 3817 (red line) flight route

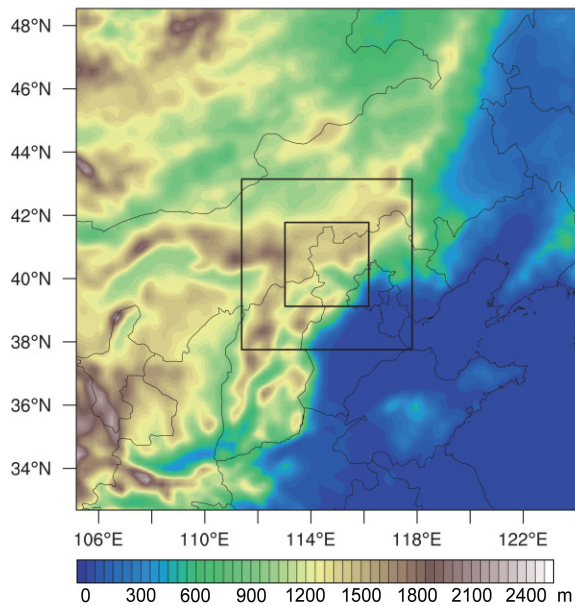


图5 三层嵌套模拟区域 (黑色方框) 和地形高度 (彩色阴影)

Fig. 5 Three-nested domains (black squares) and terrain height (color-shaded)

时刻的液态水高值接近且趋势一致。而对 3817 飞行路径 (4 km) 上的液态水含量, 模式可以模拟其后期的变化, 但前期模拟值偏低, 说明模式对 3.5 km 高度液态水的模拟效果好于 4 km。

总的来说, 从组合反射率看, 模式能够模拟出系统的水平分布和强度。从探空曲线看, 模式能够较准确的模拟出环境背景场。层云区粒子数浓度的模拟效果好于积云区, 3.5 km 高度液态水分布与飞机观测结果较为接近, 4 km 高度有一定偏差。综上所述, 模式能够较准确的模拟出这次积层混合云降水的空间 (水平、垂直)、时间分布和降水粒子

的垂直分布。在此基础上, 利用模拟结果, 进一步分析此次过程的形成和演变机制。

4 积层混合云降水粒子分布特征和降水机制

4.1 飞机观测的层云区与积云区降水粒子分布特征

3830 飞机起飞后主要在 2~4 km 高度飞行, 零度层高度约为 3 km, 飞行路径上液态水含量可达 1 g kg^{-1} , 图 10 是两架飞机飞行路径剖面上的雷达回波和粒子图像, 图中下部的粒子图像是经过回波较均匀的层云区观测到的, 上部的粒子图像是经过层云区嵌入的回波较旺盛的积云区观测到的。从观测到的粒子图像看, 层云区自上而下, 4.8 km、4.4 km 高度处有六角冰晶, 3 km 多为针状、柱状、帽状冰晶, 2.1 km 高度为雨滴。积云区多为辐枝状冰晶, 冰晶尺寸大于层云区, 聚并多、淞附明显, 并且回波发展越旺盛的区域, 聚并和淞附越强。3817 的飞行高度和 3830 相比, 较平稳, 主要在 4~5 km, 飞行路径上液态水含量最大为 0.2 g kg^{-1} 。观测结果与 3830 相似, 层云区高层有辐枝状六角冰晶, 低层多为针状、柱状、帽状不规则冰晶。积云区多为片状、辐枝状冰晶, 3817 主要在云中上层飞行, 离对流中心较 3830 飞行高度远, 观测到的积云区聚并和淞附现象不如 3830 明显。

总体来看, 该过程中两架飞机的层云区高层 (4~5 km) 有辐枝状六角冰晶, 3~4 km 多为针状、柱状、帽状不规则冰晶, 3 km 以下多为雨滴。积云区多为辐枝状冰晶, 具有粒子尺度大, 聚并多、

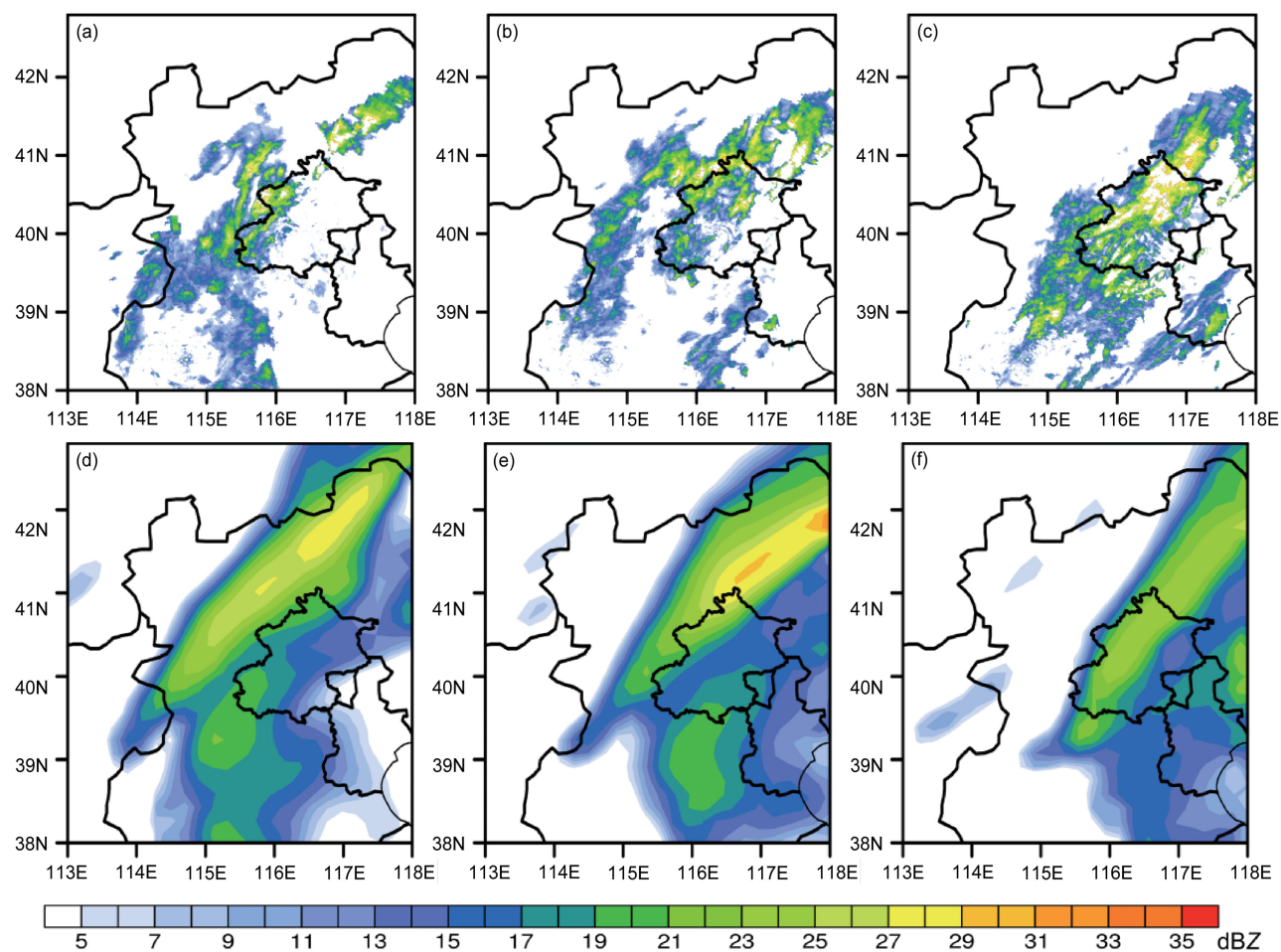


图6 2009年5月1日观测（第一行）和模式第一层模拟（第二行）的雷达组合反射率（单位：dBZ）对比分布：（a, d）08:00；（b, e）10:00；（c, f）12:00

Fig. 6 The combined reflectivity(units: dBZ) of observation and Domain 1 simulation at (a, d) 0800 BT, (b, e) 1000 BT, (c, f) 1200 BT, May 1, 2009

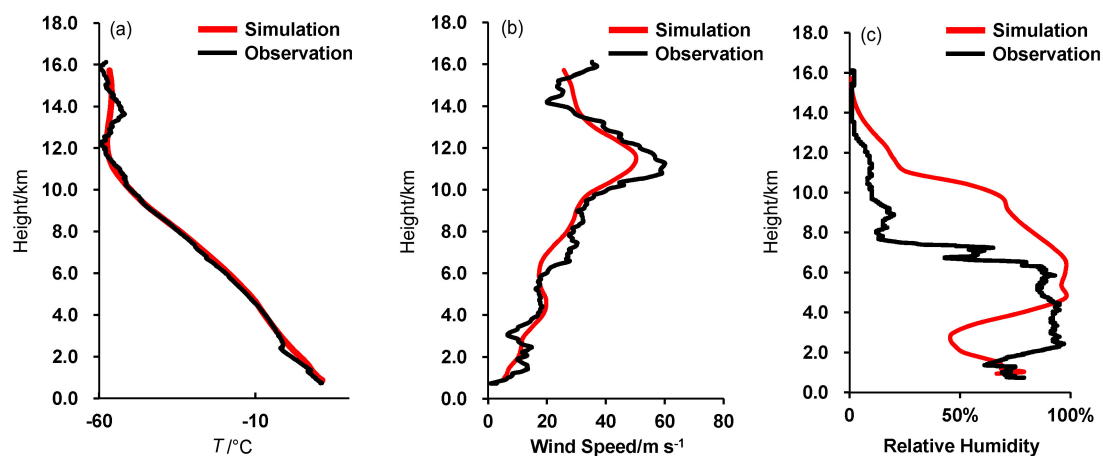


图7 2009年5月1日08:00观测和Domain3模拟的张家口探空气象要素曲线对比线：（a）温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；（b）风速（单位： m s^{-1} ）；（c）相对湿度

Fig. 7 (a) The temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), (b) wind speed (units: m s^{-1}), and (c) the relative humidity profiles of observation and Domain 3 simulation at 0800 BT 1 May, 2009

淞附明显。且越靠近回波中心区域，聚并和淞附越强。

4.2 模拟的积云区与层云区降水粒子分布和转化特征

图 11a、b 分别为模拟的 02:50 和 04:00 的组合反射率图。分别位于系统西南侧和东南侧的云区 I 和云区 II 在 02:50 时均为初始形成阶段，云系比较

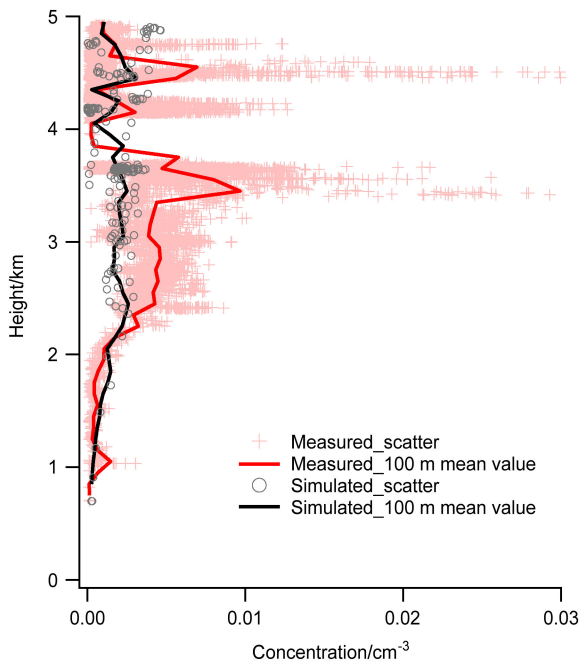


图 8 08:30~11:00 降水粒子图像探头 PIP 观测和 Domain3 模拟的粒子数浓度 (单位: cm^{-3}) 随高度分布, 散点代表原始观测数据, 线条代表 100 m 平均值

Fig. 8 The number concentration on flight route of PIP observation and Domain 3 simulation (units: cm^{-3}) from 0830 BT to 1100 BT; scatter points represent original observed data, and line represent 100 m mean value

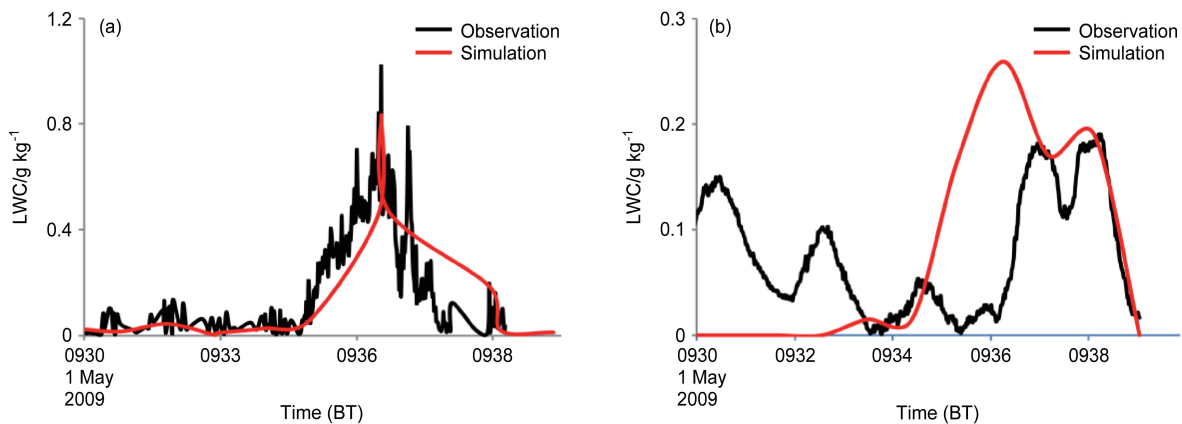


图 9 (a) 3830、(b) 3817 两架飞机飞行路径上观测和 Domain3 模拟的液态水含量 (单位: g kg^{-1})

Fig. 9 The liquid water content (units: g kg^{-1}) on the flight route of (a) 3830 and (b) 3817 aircraft

弱属于层云区, 随着系统的东移与发展, 到 04:00, 云区 I 的最强回波强度达到 40 dBZ, 已发展为典型的积云区, 这块回波就是此次联飞机探测的回波, 后期将不断东移至河北境内。而云区 II 的最强回波强度仅为 22 dBZ 左右, 仍然属于偏弱的层云。由于这两块云区的形成时间与所处演变阶段接近并处于同一个系统的影响下, 所以可通过拉格朗日分析方法, 分别对 02:50 云区 I 的 A 点和对应的云区 II 的 B 点以及在 04:00 分别由 A 点移动而来的云区 I 的 C 点和由 B 点移动而来的云区 II 的 D 点的云特征和机制进行比较分析, 进而得出积云与层云的特征与演变机制的差异。

图 12 为 02:50 点 A 和点 B 上空水成物及垂直速度的分布廓线、雪源汇垂直分布廓线及雨水源汇垂直分布廓线。本次过程中, 雪的源汇项主要为凝华增长 (PRDS)、淞附增长 (PSACWS)、雪晶融化为雨滴 (PSMLT) 以及升华 (EPRDS)。图 12a 可以看出, A 点上空存在明显的三层结构, 在最上层的 9.5~11 km 和 4~6.5 km, 存在少量的冰晶, 冰晶含量最大值为 0.01 g kg^{-1} ; 在中间的 3~6 km 主要分布云水和雪, 云水和雪晶的最大值均出现在 4 km 高度, 分别为 0.26 g kg^{-1} 和 0.28 g kg^{-1} ; 并且云水和雪最大值出现高度与垂直速度 w 最大值 0.54 m s^{-1} 出现高度相一致, 雨水主要出现在 3 km 以下。A 点主要是因为较强的上升气流导致水汽输送增强, 从而水汽凝结成的云滴增多, 充沛的水汽和较多的云滴导致雪的凝华增长 (PRDS) 以及雪的淞附过程 (PSACWS) 的加强 (图 12c), 致使雪晶增多。增多的雪降落到暖区后融化成雨滴 (PSMLT; 图 12e)。

B 点上空主要体现两层结构, 在 $7\sim 10.5$ km 分布着冰晶, 冰晶最大值为 0.08 g kg^{-1} ; 雪主要在 $3.5\sim 10$ km 高度, 最大值 0.36 g kg^{-1} , 出现在 $5\sim 6$ km 高度; 雨水很少, 基本上没有云水和霰; 雪最大值出现高度与上升气流速度最大值出现高度基本接近 (图 12b)。与 A 点上空相比, 可以发现, B 点上空上升气流速度明显较 A 点偏弱。因为上升气流偏弱, 水汽凝结过程很弱, 从而 B 点上空缺乏云滴, 导致雪只能通过凝华增长 (PRDS) 而没有淞附增长过程, 另外可以看出, 由于水汽的缺乏, 云的中下层出现欠饱和区域, 导致雪出现了升华 (EPRDS; 图 12d), 雨滴出现蒸发 (图 12f) 等过程, 进而使雨水含量更低。升华最大值的高度与

上升气流极小值的出现高度接近, 在 4.3 km。

图 13 为 04:00 C 点和 D 点上空水成物及垂直速度的分布廓线、雪源汇垂直分布廓线及雨水源汇垂直分布廓线。04:00 C 点的云系处于对流中心区附近, 点 C 附近的云系由 02:50 A 点附近的云系发展移动而来。相较于 A 点, 雪和雨明显增多, 并且出现大量的霰, 而云水含量很少。结合雪 (图 13c) 和霰的源汇项 (图 14) 分析表明, 在对流发展过程中, 雪与霰一方面通过消耗水汽凝华增长: 在高层凝华过程是雪长大的重要源项, 最大值 $12\times 10^{-7}\text{ kg kg}^{-1}\text{ s}^{-1}$; 霰在高层也主要来自凝华增长, 最大值 $5\times 10^{-7}\text{ kg kg}^{-1}\text{ s}^{-1}$; 水汽的消耗将导致凝结云水的减弱。另一方面雪和霰在下降过程中

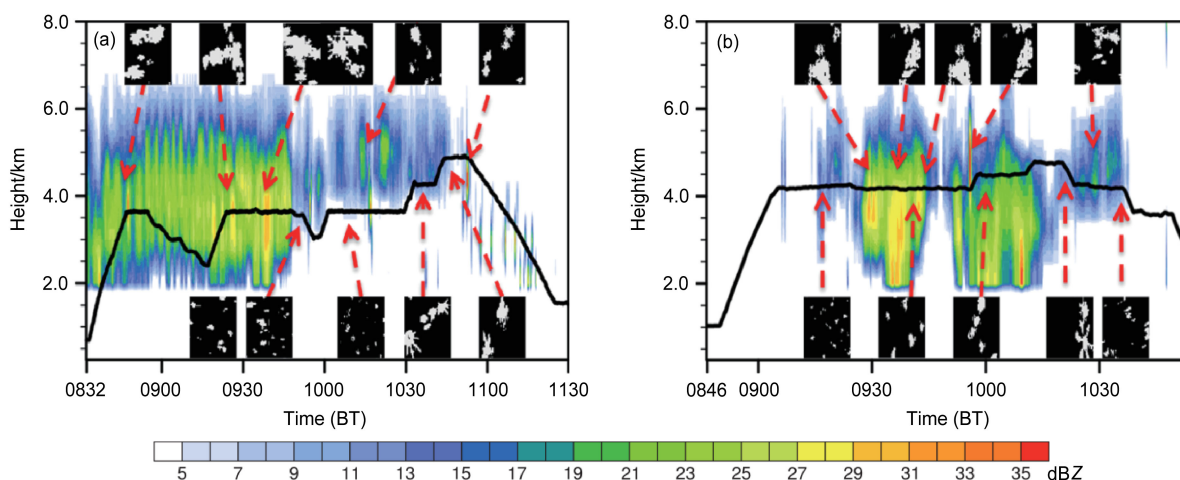


图 10 (a) 3830、(b) 3817 飞机机载 PIP 观测降水粒子图像

Fig. 10 The image of precipitation particles observed by PIP of (a) 3830 and (b) 3817 aircraft

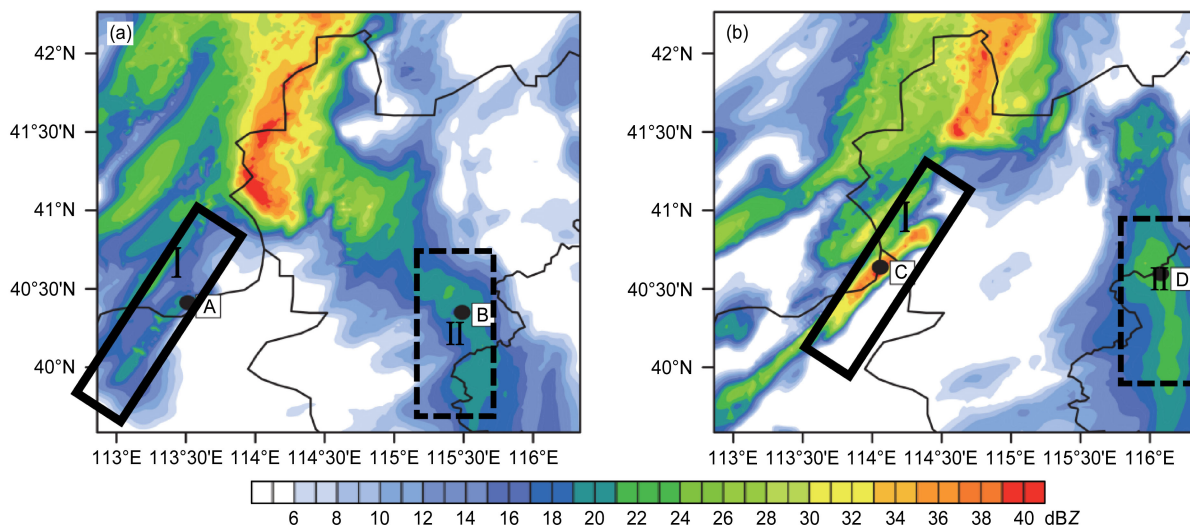


图 11 2009 年 5 月 1 日 (a) 02:50 和 (b) 04:00 模式 Domain3 模拟的组合反射率 (单位: dBZ) 和 4 个点位置 (黑点)

Fig. 11 The combined reflectivity (units: dBZ) of simulations and positions of four points at (a) 0250 BT and (b) 0400 BT 1 May, 2009

通过液水充沛区域时将通过淞附过程而大量增长，云中存在明显的播种—供给机制。增长后的雪和霰下降到暖区后融化成雨滴。因为雪和霰的增多，融化而成的雨滴也相应增多。

04:00 D 点附近的云系仍处于层云区，雪比质量最大值由 0.36 g kg^{-1} 增大到 0.42 g kg^{-1} ，分布区域由 $3.5 \sim 10 \text{ km}$ 缩小为 $3 \sim 7.5 \text{ km}$ ；低层雨水略有增加。 D 点上空的雪主要通过凝华过程增长，最大值 $1.1 \times 10^{-7} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，远小于 C 点。 D 点的上升

气流速度也远小于 C 点。因为 D 上空雪含量较弱，云水与雨水含量也非常弱，冰雪晶与云滴或雨滴发生淞附过程形成霰时云滴的含量需要在 0.5 g kg^{-1} 以上，而雨滴的含量需要在 0.1 g kg^{-1} 以上。从图 13 可以看出 D 点区域上空均不符合这个要求，所以 D 点上空没有霰。 D 点区域的雨水主要来自于雪的融化，最大值 $4 \times 10^{-7} \text{ kg kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，远小于 C 点。

图 11b 中 C 点和 D 点分别处于积层混合云系中的积云区和层云区，为了更清楚的对比积云区与

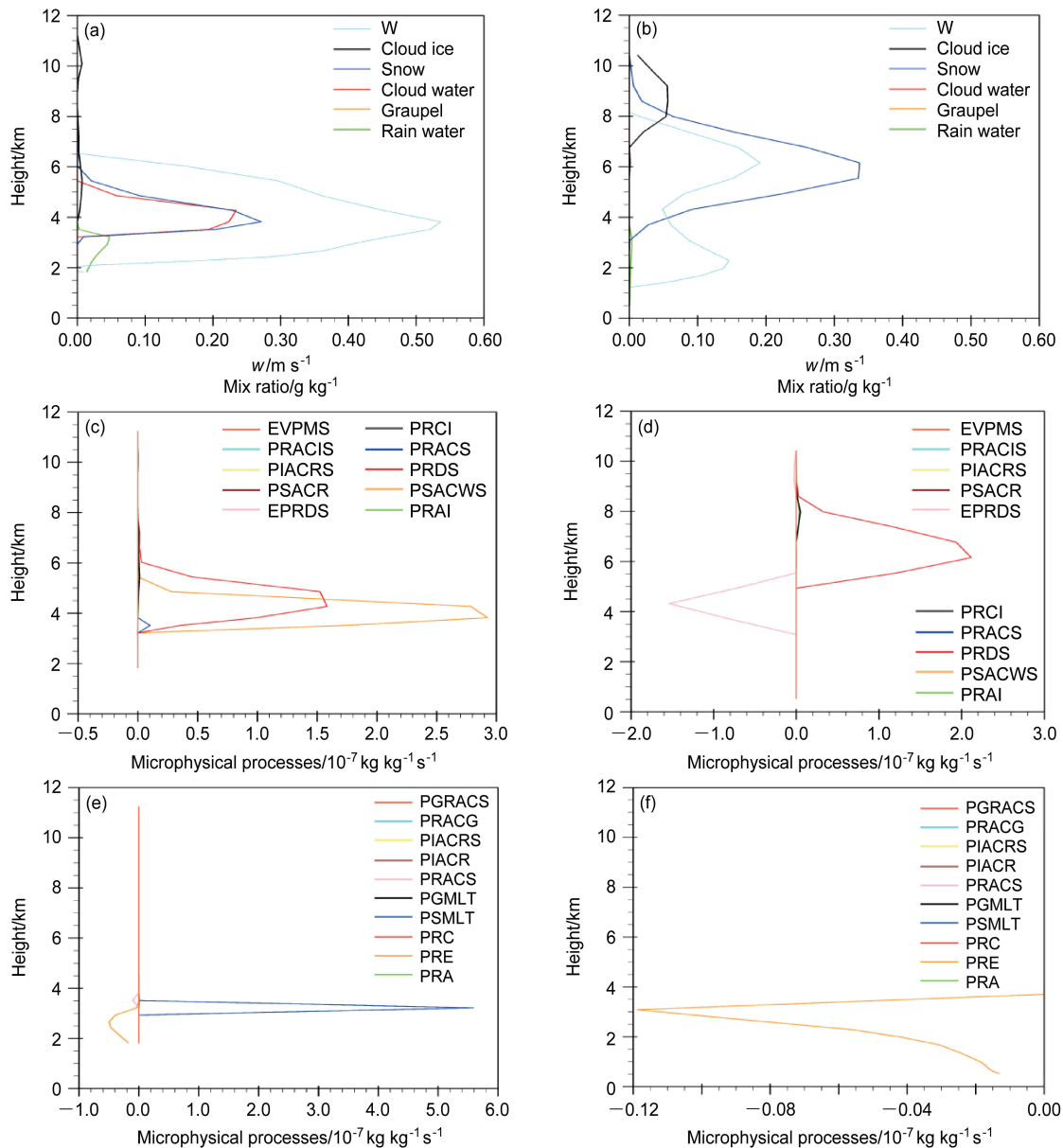


图 12 2009 年 5 月 1 日 02:50 模式 Domain3 模拟的 A 点（左列）和 B 点（右列）上空水成物及（a、b）垂直速度、（c、d）雪源汇及（e、f）雨水源汇的垂直分布廓线

Fig. 12 The vertical distribution of (a, b) aqueous product in the air, vertical velocity, (c, d) snow source, and (e, f) rain source of simulations at 0250 BT 1 May, 2009: Point A (left column), Point B (right column)

层云区降水的区别,对 C 点和 D 点对应格点上空的 5 种水成物(冰晶、雪、云水、雨水、霰)及水汽进行质量求和,得到两个点上空水成物的总质量,并计算各水成物粒子在总水成物所占比例,如图 15 彩色方框中所示;同时计算各种水成物粒子源汇项中不同转化过程所占比例,如图 15 彩色箭头上所示。为使结果更清晰,图中仅列出 10% 以上比例的转化过程。

图 15a 是 20:00 C 点上空水成物及其源汇项示意图,通过图 12、图 13 的分析,我们得知位于积云区的 C 点上空的云水在前期已经被淞附过程消

耗,而冰晶相对其他水成物较少,通过计算得到结果:空中主要是雪(51.9%)、霰(31.0%)和雨水(16.0%)。雪主要来自雪碰并雨水淞附增长(56.8%)和凝华增长(40.1%);霰主要来自霰碰并雨水淞附增长(46.6%)、雨水碰并雪成霰(42.6%)和凝华增长(16.1%);雨水主要来自霰融化(77.6%)和雪融化(22.4%)。

位于层云区的点 D 上空水成物构成及源汇项转化较简单,以雪为主(90.4%),其次是雨水(6.1%)、冰晶(3.5%),霰和云水几乎没有。冰晶和雪主要来自凝华增长;雨水主要来自雪的融

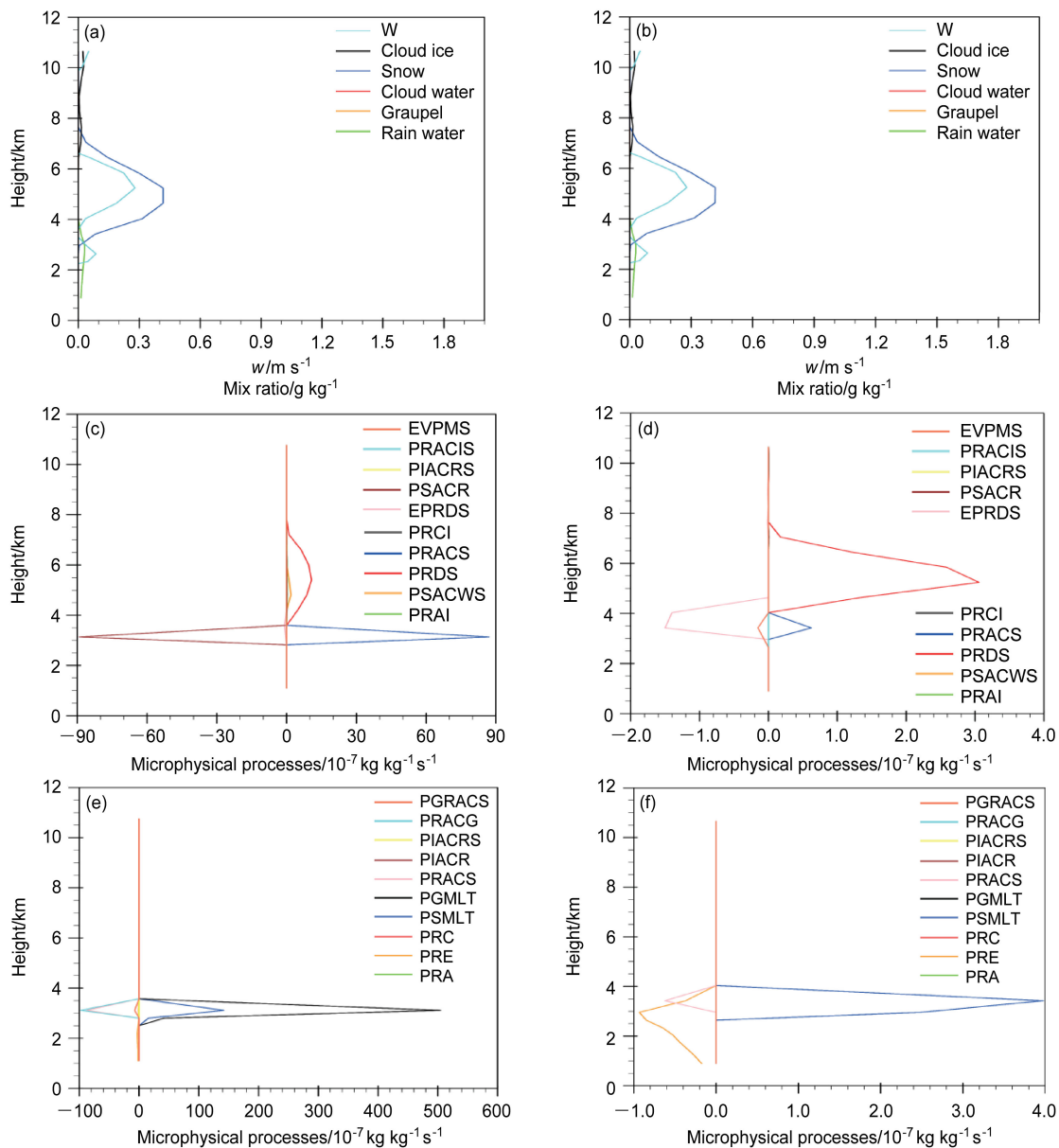


图 13 同图 12, 但为 C 点(左列)和 D 点(右列)

Fig. 13 Same as Fig. 12, but for Point C (left column) and Point D (right column)

化。层云区雪和雨水的比质量较积云区（*C*点）小 1 个量级，凝华和淞附过程与点 *C* 相比也小 1~2 个量级。

从 02:50 水成物和垂直速度的廓线（图 12a、b）看，初期 *A* 点与 *B* 点相比，云水丰富，垂直速度较 *B* 点强 2 倍。这一特点使得 *A* 点云水相对丰富，从而使淞附增长过程更旺盛，产生更多的雪，雪在低层融化成雨水。到了后期（*C*点），由于上升气流导致水汽供应充沛，在高层雪和霰通过凝华过程增长，在下落过程中碰并雨水进一步增长；在低层融化成雨水。这是一个弱的层状云发展为对流云的

过程。*D* 点由于上升气流一直较弱，缺乏云水，雪的淞附过程弱，也一直没有霰的生成。降水主要是高层通过凝华增长形成的雪，在低层融化而成。对比 *A* 点（层云）→*C* 点（积云）和 *B* 点（层云）→*D* 点（层云）的发展过程可以看出，初期层云中是否存在云水以及垂直速度的强度，对后期能否增强为积云起到关键作用。初期存在过冷水的层云中，播种—供给机制发挥作用，雪通过淞附过程消耗过冷水进一步增长，降落到零度层以下融化为雨水，促进对流的发展，带来更强的降水。

5 结论和讨论

2009 年 4 月 30 日到 5 月 1 日，华北地区出现的西南—东北走向降水系统为一次深厚的锋面系统，降水云系具有明显的积层混合云特征。利用三维非静力平衡中尺度模式 WRFV3 可以较好地模拟出此次积层混合云云系降水过程系统的水平分布和强度，对于环境背景场的模拟也较准确。模拟的粒子数浓度与飞机观测到的极大值分布高度和数值一致，3.6 km 高度液态水分布与飞机观测结果较为接近。

飞机观测结果显示，层云区在高层（4~5 km）有辐枝状六角冰晶，低层融化层（3 km）以上多为针状、柱状、帽状不规则冰晶，融化层以下多为融化的滴。积云区多为辐枝状冰晶，粒子尺度大，聚并、淞附明显。且越靠近回波中心区域，聚并和淞附越强。模式模拟能较准确的反映出零度层的位置和固态、液态粒子的分界。垂直结构与飞机观测结

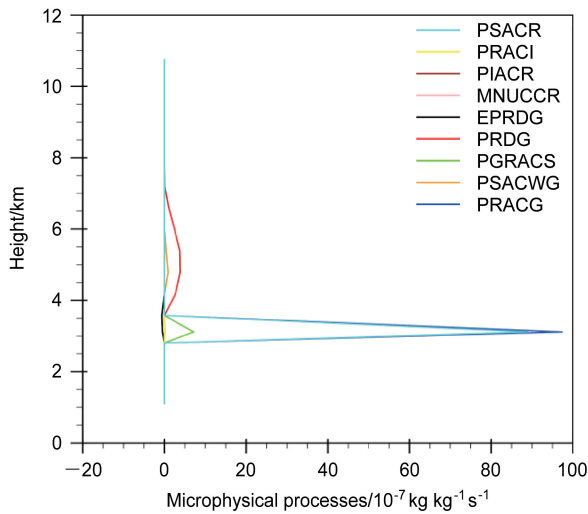


图 14 2009 年 5 月 1 日 04:00 *C* 点上空霰源汇垂直分布廓线
Fig. 14 The vertical distribution of graupel source at 0400 BT (Point C) 1 May, 2009

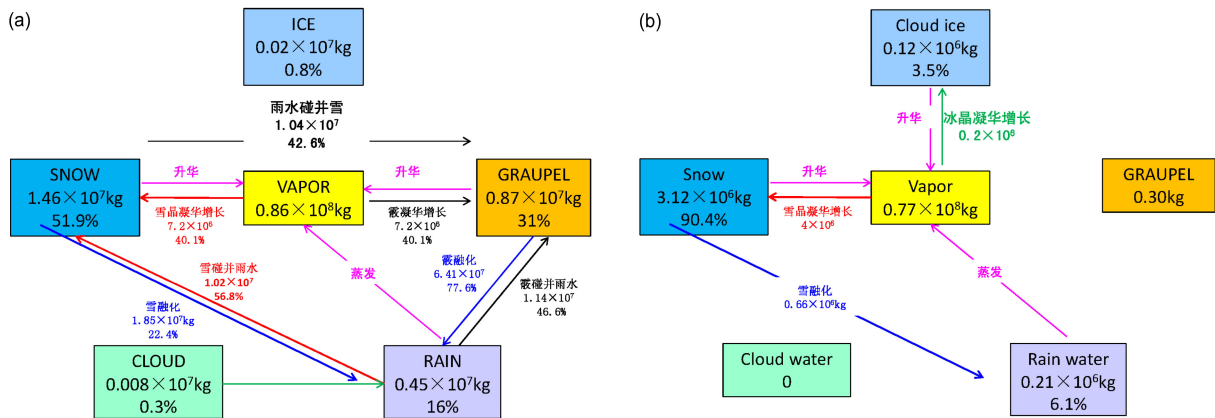


图 15 2009 年 5 月 1 日 04:00 *C* 点和 *D* 点上空水成物质量（单位：kg）、该水成物在总水成物中所占比例、各水成物源汇项转化（单位：10⁻⁷ kg kg⁻¹ s⁻¹）及该源汇项在总源汇项中所占比例
Fig. 15 The aqueous product quality, the proportion of each aqueous product quality in the total aqueous product quality, source-sink transformation of each aqueous product and the proportion of each source-sink transformation in the total source-sink transformation on 0400 BT 1 May, 2009 at (a) Point C and (b) Point D

果一致。模拟的降水粒子数浓度和液态水含量与飞机观测结果比较一致。

数值模拟结果显示, 积云区以雪 (51.9%)、霰 (31.0%) 和雨水 (16.0%) 为主。雪主要来自雪碰并雨水增长 (56.8%) 和凝华增长 (40.1%); 霰主要来自霰碰并雨水增长 (46.6%)、雨水碰并雪成霰 (42.6%) 和凝华增长 (16.1%); 雨水主要来自霰融化 (77.6%) 和雪融化 (22.4%)。层云区以雪为主 (90.4%), 其次是雨水 (6.1%)、冰晶 (3.5%), 霰和云水几乎没有。冰晶和雪主要来自凝华增长; 雨水主要来自雪的融化。

积云区是由前期云水相对丰富、上升气流较强的层云发展而来, 这一区域淞附过程旺盛, 产生大量雪, 雪经过零度层融化后, 雨水也相应丰富起来; 后期高层通过凝华增长形成的雪和霰, 经过丰富的雨水区时, 通过碰并过程进一步增长, 在低层融化为雨水。积云区降水的产生存在播种—供给机制。云水较少、上升气流较小的层云区则会一直稳定在层云的状态, 云中冰晶和雪在高层通过凝华增长过程形成, 雪在低层融化成雨水。

参考文献 (References)

- Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 3077–3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2
- Evans A G, Locatelli J D, Stoelinga M T, et al. 2005. The IMPROVE-1 storm of 1-2 February 2001. Part II: Cloud structures and the growth of precipitation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62(10): 3456–3473. doi:10.1175/JAS3547.1
- 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 [J]. *大气科学*, 39(2): 315–328. He Hui, Gao Qian, Liu Xiang'e, et al. 2015. Numerical simulation of the structural characteristics and precipitation mechanism of stratiform clouds with embedded convections [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(2): 315–328. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14102
- Herzegg P H, Hobbs P V. 1980. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones. II: Warm-Frontal clouds [J]. *J. Atmos. Sci.*, 37(3): 597–611. doi:10.1175/1520-0469(1980)037<0597:TMAMSA>2.0.CO;2
- 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 [J]. *气象学报*, 54(5): 544–557. Hong Yanchao. 1996a. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed clouds, Part (I) —The model and parameterization of microphysical processes [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 54(5): 544–557. doi:10.11676/qxb1996.057
- 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 [J]. *气象学报*, 54(6): 661–674. Hong Yanchao. 1996b. The numerical simulation study of convective-stratiform mixed cloud, part (II)—interaction of clouds and formative mechanism of the heavy rain [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 54(6): 661–674. doi:10.11676/qxb1996.069
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134: 2318–2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- 黄美元, 洪延超. 1984. 在梅雨锋云系内层状云回波结构及其降水的不均匀性 [J]. *气象学报*, 42(1): 81–87. Huang Meiyuan, Hong Yanchao. 1984. The inhomogeneous features of the precipitation and the echo structure of stratiform cloud in Mei-Yu frontal cloud system [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 42(1): 81–87. doi:10.11676/qxb1984.008
- 黄美元, 徐华英, 洪延超. 1986. 混合云系中的层状云对对流云发展影响的数值模拟研究 [J]. *成都气象学院学报*, 1(1): 48–54. Huang Meiyuan, Xu Huaying, Hong Yanchao. 1986. A numerical simulation study for effects of stratiform cloud in mixed cloud system on growth of convective cloud [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 1(1): 48–54.
- 黄美元, 洪延超, 徐华英, 等. 1987. 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*, 45(1): 72–77. Huang Meiyuan, Hong Yanchao, Xu Huaying, et al. 1987. The effects of the existence of stratiform cloud on the development of cumulus cloud and its precipitation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 45(1): 72–77. doi:10.11676/qxb1987.009
- 黄天戈, 李艳伟, 王吉宏. 2013. 东北地区一次积层混合云过程的数值模拟 [J]. *气象与环境学报*, 29(3): 1–7. Huang Tiange, Li Yanwei, Wang Jihong. 2013. Numerical simulation on a convective stratiform mixed cloud process in Northeastern China [J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 29(3): 1–7. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.03.001
- Kain J S. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43: 170–181. doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0170:TKCPAU>2.0.CO;2
- 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 [J]. *中国科学: 地球科学*, 55(1): 113–125. Li Yanwei, Niu Shengjie. 2012. The formation and precipitation mechanism of two ordered patterns of embedded convection in stratiform cloud [J]. *Science China Earth Sciences*, 55(1): 113–125. doi:10.1007/s11430-011-4278-y
- 李艳伟, 牛生杰, 罗宁, 等. 2009a. 积云并合扩展层化型积层混合云的数值模拟分析 [J]. *地球物理学报*, 52(5): 1165–1175. Li Yanwei, Niu Shengjie, Luo Ning, et al. 2009a. Numerical simulation about mixture of convective and stratiform clouds formed by convection merger [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 52(5): 1165–1175. doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.005
- 李艳伟, 牛生杰, 姚展予, 等. 2009b. 云并合的初始位置探讨 [J]. *大气科学*, 33(5): 1015–1026. Li Yanwei, Niu Shengjie, Yao Zhanyu, et al. 2009b. Initial part discussion of cloud merger [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(5): 1015–1026. doi:10.3878/

- j.issn.1006-9895.2009.05.12
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 16663–16682. doi:10.1029/97JD00237
- Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 991–1007. doi:10.1175/2008MWR2556.1
- 陶玥, 李军霞, 党娟, 等. 2015. 北京一次积层混合云系结构和水分收支的数值模拟分析 [J]. *大气科学*, 39(3): 445–460. Tao Yue, Li Junxia, Dang Juan, et al. 2015. A numerical study on precipitation process and moisture budget of stratiform and embedded convective cloud over Beijing area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(3): 445–460. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1412.13209
- 于翡, 姚展予. 2009. 一次积层混合云降水实例的数值模拟分析 [J]. *气象*, 35(12): 3–11. Yu Fei, Yao Zhanyu. 2009. Numerical study on the complex of the stratiform and embedded convective cloud precipitation: A case study [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 35(12): 3–11. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.12.001
- 袁成, 樊玲, 李亚斌. 2001. 哈尔滨地区春夏季降水微结构特征 [J]. *南京气象学院学报*, 24(2): 250–257. Yuan Cheng, Fan Ling, Li Yabin. 2001. Microphysical features of precipitation in spring and summer in Harbin [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 24(2): 250–257. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2001.02.015
- 朱士超, 郭学良. 2014. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究 [J]. *气象学报*, 72(2): 366–389. Zhu Shichao, Guo Xueliang. 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: Aircraft measurements [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(2): 366–389. doi:10.11676/qxxb2014.013
- 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 [J]. *大气科学*, 39(2): 370–385. Zhu Shichao, Guo Xueliang. 2015. A case study comparing WRF-model-simulated cloud microphysics and precipitation with aircraft measurements in stratiform clouds with embedded convection in northern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 39(2): 370–385. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14117
- 邹倩, 刘琦俊, 刘卫国. 2008. 积层混合云结构和云微物理的数值模拟 [J]. *干旱气象*, 26(2): 74–83. Zou Qian, Liu Qijun, Liu Weiguo. 2008. Numerical simulation of stratocumulus cloud structure and cloud microphysical processes [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 26(2): 74–83. doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2008.02.014