

齐彦斌, 陶玥, 冉令坤, 等. 2012. 东北冷涡中尺度云系降水机制研究 II: 数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 797–808, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.17. Qi Yanbin, Tao Yue, Ran Lingkun, et al. 2012. Precipitation mechanism of mesoscale cloud system in a cold vortex over Northeast China. II: Numerical simulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 797–808.

东北冷涡中尺度云系降水机制研究 II: 数值模拟

齐彦斌¹ 陶玥² 冉令坤³ 洪延超³

¹ 吉林省人工影响天气办公室, 长春 130062

² 中国气象科学研究院人工影响天气中心, 北京 100081

³ 中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴实验室, 北京 100029

摘 要 在利用卫星、雷达和机载 PMS (粒子测量系统) 等观测资料对 2003 年 7 月 8 日东北冷涡积层混合云系的降水形成机制分析的基础上, 将观测分析与数值模拟研究相结合, 用中尺度数值模式对积层混合云系做数值模拟, 并结合观测资料进一步分析了积层混合云系的微物理结构、粒子形成过程和降水形成机制, 获得如下结果:

(1) 混合云中对流云具有分层的微物理结构。冰晶含水量最大值出现的高度最高, 其次由高到低的排序是雪、云水、霰和雨; 雨水主要出现在云的暖区; 各种粒子中以雨水含水量最高, 其次是霰。对流云体生命期较长, 微物理结构基本稳定。(2) 粒子形成增长过程有差异。冰晶通过凝华过程增长。雪主要来源于冰晶, 产生后主要通过撞冻、收集冰晶和凝华过程增长, 其中撞冻过冷云水增长对雪质量贡献最大, 其产生率极大值高度与过冷云水相当。丰富的过冷云水, 给雪的撞冻增长提供了有利条件。在高、中和低层雪的形成有着不同的机制, 高层雪收集冰晶长大后, 下落到低层又以雪撞冻过冷云水的结淞增长为主要过程。霰主要由雨滴冻结和雪的转化产生, 过冷雨滴与冰晶接触冻结成霰; 过冷雨滴收集雪, 雪随着雨滴的冻结而转化成霰。因此霰的产生与过冷雨滴关系极大。霰主要撞冻云水、收集雪和冰晶增长, 其中撞冻是霰的重要增长过程。雨水主要由霰的融化形成, 降水主要是由冷云过程产生的。在过冷层, 霰撞冻增长占优势。云上部的冰晶和雪对云的中部具有播撒作用, 过冷层中存在丰富的过冷水, 对冰相粒子的撞冻增长有利。对云水消耗的分析表明, 雨滴对云滴的收集、霰和雪对云水的撞冻增长是消耗云水的主要过程。(3) 从各种粒子的形成和增长过程可以看出, 大部分雨水由霰融化形成, 暖云过程贡献要小得多。可见, 降水主要是由冷云过程产生的, 这与观测分析的结果一致。

关键词 微物理结构 粒子增长 降水机制 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0797-12

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.17

Precipitation Mechanism of Mesoscale Cloud System in a Cold Vortex over Northeast China. II: Numerical Simulation

QI Yanbin¹, TAO Yue², RAN Lingkun³, and HONG Yanco³

¹ Jilin Weather Modification Office, Changchun 130062

² Weather Modification Center, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

³ Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storm, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

Abstract Precipitation resulting from a hybrid of cumulus and stratus in a cold vortex in Northeast China on July 8 2003 was studied. A hybrid cloud simulation using the ARPS (Advanced Regional Prediction System) model was conducted. On the basis of the observation and simulation, the hybrid cloud microphysical structure, hydrometeor

收稿日期 2012-10-25 收到, 2012-11-05 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40875002、41075098, 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 ZAP08101, 创新重要方向项目 KZCX2-YW-Q03-03

作者简介 齐彦斌, 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 主要从事云降水物理和人工影响天气研究。E-mail: qianbin88@126.com

formation process, and precipitation mechanism were investigated. The results are as follows: (1) The cumulus in the hybrid cloud featured multi-level microphysical structure. The ice content maximum was located at the highest level among five hydrometeors, followed by, from high to low, snow, cloud water, graupel, and rain water appeared in the warm cloud area. Rain water content is highest in all hydrometeors, graupel was the second most abundant type of content. With a longer lifetime, the cumulus exhibited essentially stable microphysical structure. (2) The hydrometeors had different microphysical growth processes. The ice mixing ratio increased via sublimation. The snow resulted mainly from ice crystals, growth through accretion, collection of ice, and sublimation. The accretion of supercooled cloud water contributed greatly to snow growth. Both of their production rates reached maxima at the same height. The rich supercooled cloud water was favorable to the accretion growth of snow. The high-, medium-, and low-level snows had different formation mechanisms. The upper-level snow grew by collecting ice crystals. Then, snow fell to the low level and grew through accretion of supercooled cloud water. Graupel was produced by raindrop freezing and auto conversion of snow. Thus, graupel production was associated with supercooled raindrops. The source of the graupel was cloud water accretion and collection of snow and ice crystals; accretion was the most important growth process. Rain water was produced by melting of graupel. At the supercooled level, the accretion growth of graupel was dominant. The upper-level ice and snow seeded the middle cloud. The rich supercooled water promoted the accretion growth of ice crystals. It was shown that the cloud water was mainly consumed by collection by raindrops, accretion by snow and graupel. (3) Regarding the precipitation mechanism, rain water came mainly from melting of graupel and had little to do with the warm cloud process. Therefore, precipitation was dominated by the cold cloud process, which was consistent with observations.

Keywords Microphysical structure, Growth of particles, Precipitation mechanism, Numerical simulation

1 引言

我们已利用卫星、雷达和机载 PMS (粒子测量系统) 等观测资料对 2003 年 7 月 8 日东北冷涡的降水形成机制作了分析 (齐彦斌等, 2012), 由于资料的连续性不足, 同时缺乏时空同步的配套观测资料, 对一些问题的分析不够深入。尤其是对东北冷涡中尺度云系中降水形成的主要环节、降水粒子的形成的微物理过程还不清楚。为了进一步分析研究中尺度积层混合云系的降水形成机制, 对中尺度积层混合云系再做中尺度数值模式的模拟研究, 并结合观测资料作进一步分析。

2 模拟方案和模拟结果

2.1 模拟方案

论文采用了美国 Oklahoma 大学风暴分析和预报中心 (CAPS) 研发的 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 数值模式, 它是可以模拟风暴尺度系统的高分辨率非地转、非静力平衡的三维区域预报模式。该模式既含有积云参数化方案又提供显式微物理参数化方案, 通过选择合适的微物理过程参数化方案, 可以再现降水云系的结构特征; 由于微物理过程考虑得全面和细致, 可以研究云系的微

物理过程和降水机制。显式微物理方案包括 6 种水物质, 即水汽、云水、雨、冰晶、雪、霰/雹, 考虑了 39 项微物理过程, 表示模式中各种水物质形成和增长的微物理过程的符号见表 1。

模拟采用了三重嵌套方案, 第一层模拟域以长春 (43.9°N, 125.3°E) 为中心, 水平格距 27 km, 水平格点数 77×77, 模拟域 (27°N~60°N, 96°E~154°E) 覆盖了东北冷涡天气系统。第二层模拟域仍以长春为中心, 水平格距 9 km, 水平格点数 127×127, 模拟域 (36°N~49°N, 115°E~132°E) 覆盖了此次降水过程的主要降水区。为研究积层混合云的结构特征和降水形成机制, 第三层模拟域 (40°N~46°N, 122°E~130°E) 水平格距 3 km, 水平格点数 217×217, 以积层混合云经过的地点磐石 (42.95°N, 126.05°E) 为中心, 便于跟踪中尺度降水云系, 此模拟域关闭了积云参数化方案, 仅采用 Lin-Tao 冰相微物理显式方案。

模式网格的垂直层数均为 43 层, 垂直格距 500 m。选择 NCEP 分析资料为第一猜值场, 并利用 Micaps 中常规地面、探空资料进行客观分析, 形成 ARPS 模式所需要的初始场和边界条件。嵌套区域采用上一层输出资料作为时变的侧边界条件。第一、二层模拟域结果每 1 h 输出一次, 第三层模拟结果 20 min 输出一次。为了便于研究降水机制, 论文对相关程序作了修改, 可以输出微物

理过程转化率、产生量和时间、空间累积量等。

表 1 ARPS 数值模式中微物理过程符号附表
Table 1 Micro-physical processes signs in ARPS (Advanced Regional Predication System) model

水物质	微物理过程符号	
	程符号	含义
冰晶	pihom	云水均质核化
	pidw	云冰凝华增长同时消耗云水
	pint	云冰初生
霰	praci	雨水收集云冰产生霰
	dgaci	霰碰并云冰干增长
	wgaci	霰碰并云冰湿增长
	dgacw	霰撞冻云滴
	piacr	冰晶撞冻雨水成霰
	dgacr	霰撞冻雨水干增长
	wgacr	霰撞冻雨水的湿增长（正值）
	psacr	雪撞冻云水成霰
	pgfr	雨水冻结为霰
	pgacs	霰收集雪增长
	dgacs	霰的干增长
	wgacs	霰的湿增长
	pgaut	雪自动转化为霰
	pracs	雨水撞冻雪成霰（温度 $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
云水	cnd/evo	cnd 水汽凝结 evo 云水蒸发
	pimlt	冰晶融化
雨水	qsacw	雪收集云水成雨水（ $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
	praut	云水自动转化为雨水
	pracw	雨水收集云水长大
	qgacw	霰收集云水成雨水（ $t > 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
	psmlt	雪融化
雪	pgmlt	霰融化
	psaut	云冰自动转化为雪
	psaci	雪收集云冰增长
	psacw	雪撞冻云水增长（ $t < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
	psfw	云水形成雪（贝吉龙凝华繁生）
	psfi	云冰形成雪（贝吉龙凝华繁生）
	praci	雨水收集云冰产生雪
	psdep	雪的凝华增长
	piacr	冰晶黏附雨水成雪
	psacr	雪收集雨水长大

2.2 模拟结果

2.2.1 气象要素场

模式较好地模拟出冷涡系统的位势高度场和温度场。从图 1 看，模式成功地模拟出 8 日 08:00（北京时间，下同）冷涡系统南北两个低压中心的位置，低压中心的强度值与实际接近，等压线的分布形式接近，再现了冷涡云系的气压场结构。内蒙古附近的低压圈、东北冷涡主体的走向，高压脊的位置也模拟得较好。模拟结果也再现了 700 hPa 高

度的温度场（图 1c、1d），0℃、4℃和 8℃等温线的分布形式大体相同，低温中心位置与低压中心基本一致。模式基本上模拟出东北冷涡系统的气压场和温度场。

与气压场合相配合，模式模拟出南北两个低压的气旋性环流（图 2），而且与客观分析的风场一致，环流中心与低压中心对应。

2.2.2 降水

图 3 给出 8 日 02:00、08:00、14:00 和 20:00 地面观测与模拟的 6 h 降水量。模拟域内主要有 3 个强降水区域，强降水中心位于山东、辽宁西北和吉林东南部，最大降水中心位于辽宁西北部。由图 3 可见，模拟的降水区位置和走向和实况基本一致，但模拟的降水区范围稍大些。

降水区的变化情况也较为一致，8 日 08:00（图 3c、3d）位于辽宁西北部强降水中心向东北方向移动，而位于吉林东南部的强降水中心向西北方向伸展，说明长白山地形对水汽的堆积有一定作用，使云层向西北方向伸展。到 8 日 14:00（图 3e、3f）和 20:00（图 3g、3h）位于辽宁西北和吉林东南的雨区，在辽宁和吉林东南部形成一个带状的降水区域，这也正是我们要研究的积层混合云降水所形成的雨带。

2.2.3 温度和含水量

飞机观测给出的是空间点、线上云的微观参量；而数值模拟输出的物理量场是格点可分辨平均量；两者所给出的自然过程和信息存在着差异。为了解决这个差异问题，采用了有设计的观测飞行，利用地面雷达所观测到的东北冷涡对流云带强回波区特征，指挥和引导飞机，在对流云带区域采用拉格朗日路径飞行探测方案飞行。飞机先在约 3100 m 高的引导气流层探测，根据探测的风向、风速确定下一次取样的水平位置，确保飞机探测在同一云团中。飞机的飞行速度约 70 m s^{-1} ，对飞机资料（温度和过冷水量）采用 15 s（水平距离约 1 km）的平均，基本可以确定对流云带内参量的起伏性变化。模式资料以 15 min 的间隔输出，根据飞机飞行的时间、经度、纬度和高度，把模式物理量场模拟结果资料线性插值到飞机飞行的轨迹上，形成虚拟的飞行轨迹，使模式的输出资料和飞机探测资料具有可比性。沿着飞机飞行轨迹利用模式分别计算了模式预报的虚拟路径上的温度，云水、雨水比水量，与飞机探测的温度、液态水含量进行了比较。图 4a

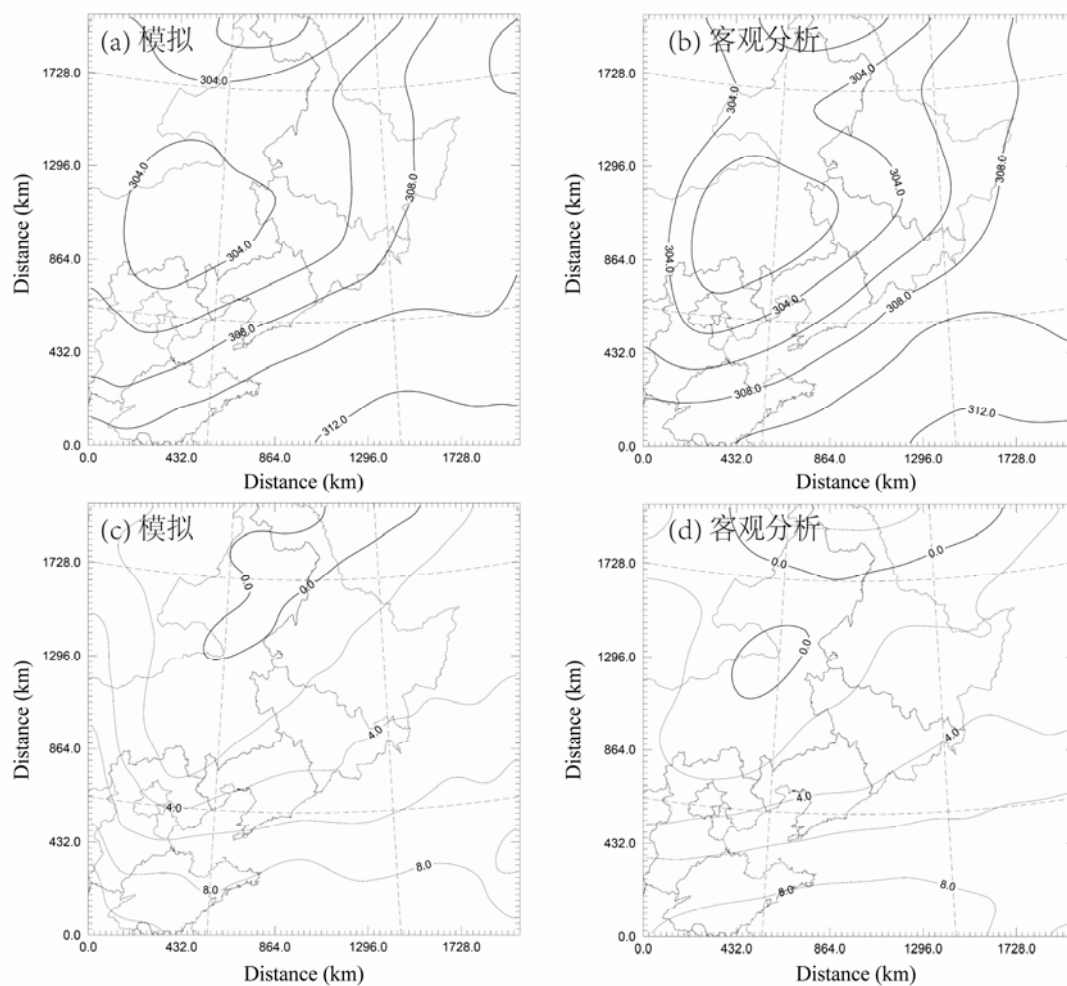


图1 2003年7月8日08:00 700 hPa (a、b) 位势高度场(单位: dagpm)、(c、d) 温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$): (a、c) 模拟; (b、d) 客观分析

Fig. 1 Fields of (a, b) geopotential height (dagpm) and (c, d) temperature ($^{\circ}\text{C}$) at 700 hPa at 0800 LST 8 Jul 2003: (a, c) Simulated; (b, d) objective analysis

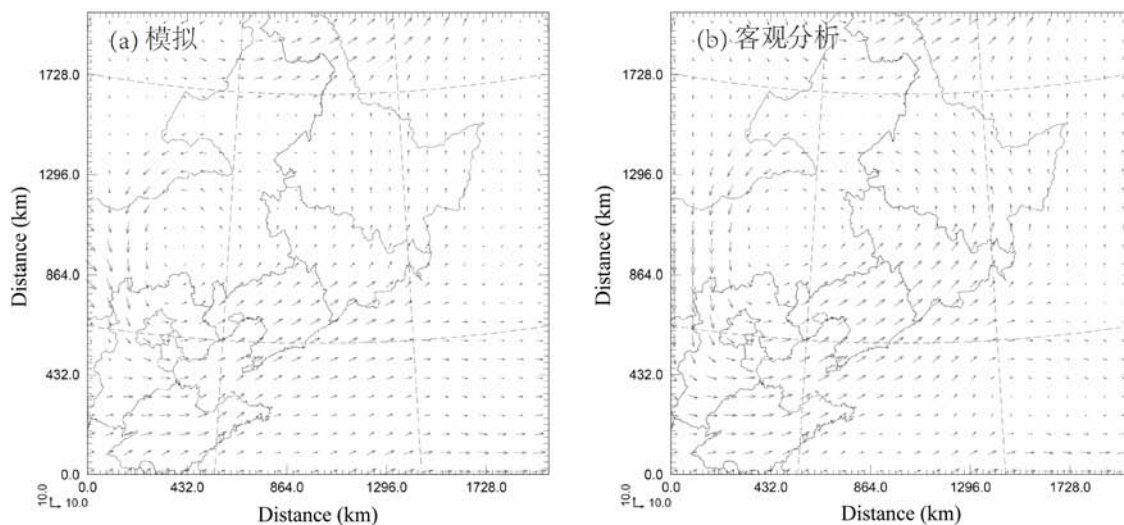


图2 2003年7月8日08:00 700 hPa 风场(单位: m s^{-1}): (a) 模拟; (b) 客观分析

Fig. 2 Fields of wind (m s^{-1}) at 700 hPa at 0800 LST 8 Jul 2003: (a) Simulated; (b) objective analysis

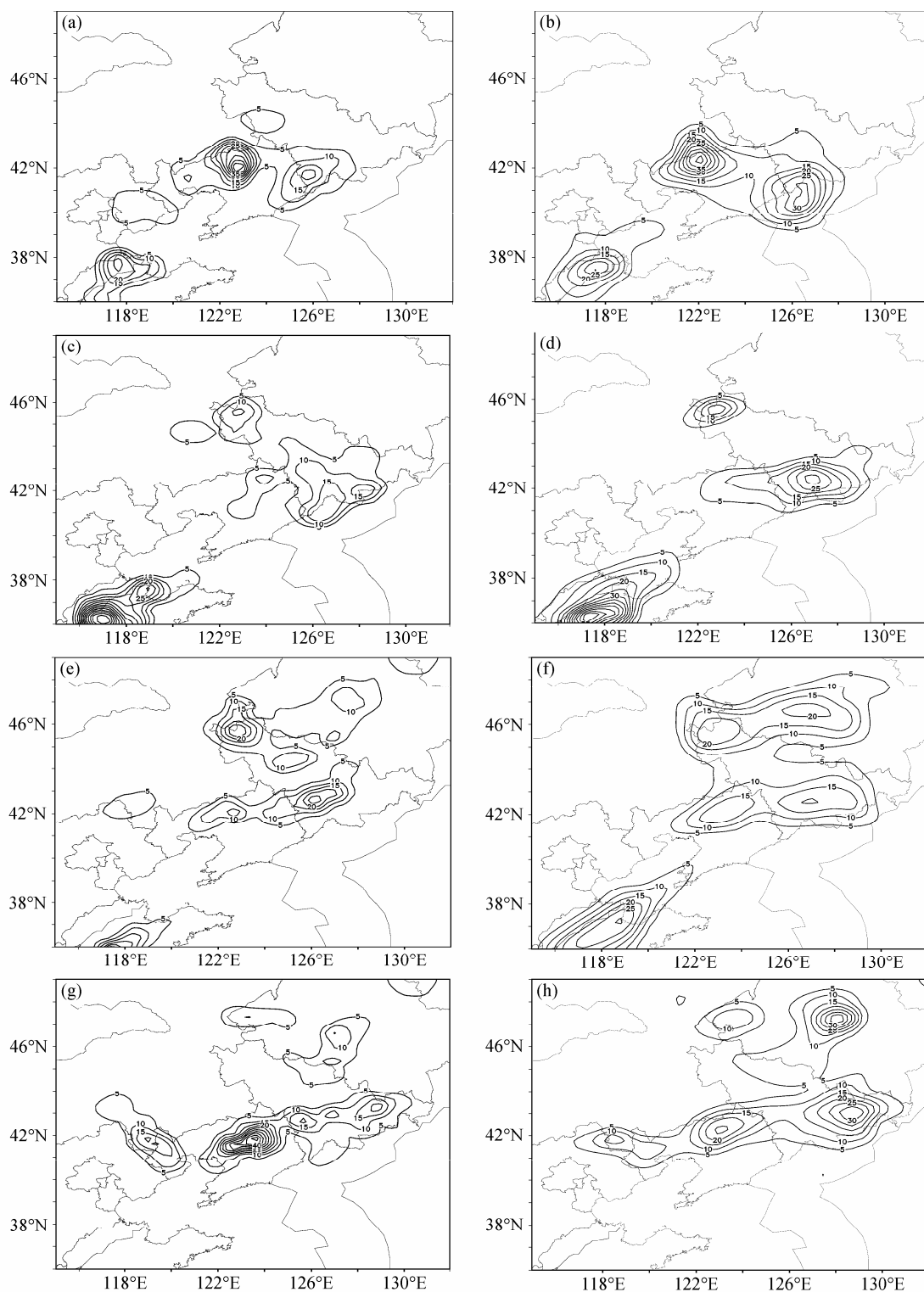


图3 2003年7月8日6h过程雨量(单位:mm)实况(左列)与模拟(右列):(a、b)02:00;(c、d)08:00;(e、f)14:00;(g、h)20:00

Fig. 3 Real (left column) and simulated (right column) rainfall amount (mm) in 6-hour interval on 8 Jul 2003: (a, b) 0200 LST; (c, d) 0800 LST; (e, f) 1400 LST; (g, h) 2000 LST

可见,探测的温度和模式模拟的温度比较一致。图4b给出了机载 king 热线含水量仪探测的液态水含量和模式计算的云水和雨水含水量,可见沿着飞行轨

迹,模式能够预报出对流云带中液态水含量的起伏变化,但模式的预报量级比实际观测的值小。

以上模拟结果和实况的对比分析说明,中尺度

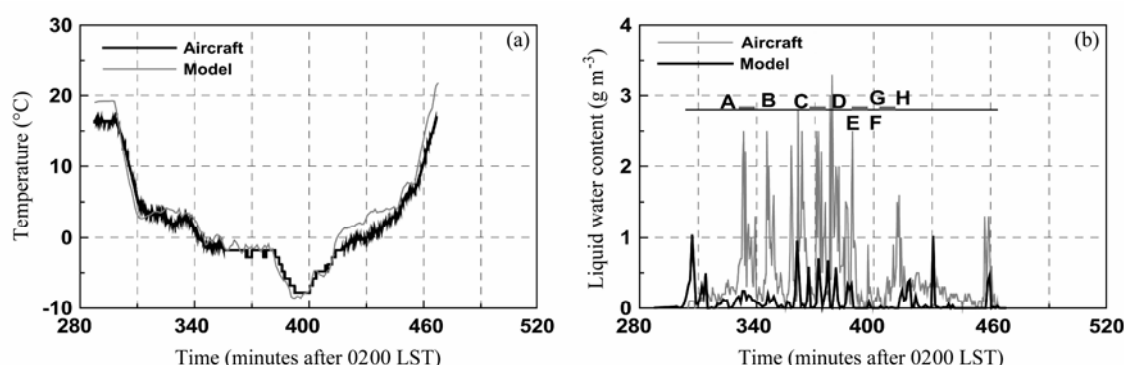


图4 2003年7月8日06:45至09:49 (a) 温度、(b) 云水和雨水含水量之和的飞机探测值与模拟值沿飞行轨迹随时间的变化。AB、CD、EF 和 GH 表示飞机水平穿云时段

Fig. 4 Aircraft sounding and modulated value of (a) temperature and (b) the sum of cloud and rain water content changing with time along flight track during fixed target experiment from 0645 LST to 0949 LST 8 Jul 2003. The AB, CD, EF, and GH are time intervals when plane broke the cloud

数值模式成功地模拟出了东北冷涡系统的位势高度场和温度场的强度和位置及分布形式以及位于内蒙古附近的低压中心,再现了位于长春附近产生较大降水的中尺度对流系统的宏观动力场结构、强西南气流及其辐合区;模式也模拟出了降水的分布特征,强降水区域的位置、形状及其移动方向,尤其是中尺度雨带的走向、形状、范围、降水中心位置与实况基本接近。此外,在飞机上升阶段到云带的顶部和飞机下降阶段到 -2°C 附近,探测的温度和模式模拟的温度比较一致。模式还模拟出了飞行轨迹上温度起伏变化和对流云带中液态水含量的起伏变化情况。

下面利用模拟云系的有关物理量结合观测资料进一步分析积层混合云系的降水机制。

3 降水机制

之前的研究利用机载PMS实测资料的分析表明(齐彦斌等,2012),对流云中上部存在针状冰晶,其下方的过冷层存在过冷水,出现冰雪晶聚集体或霰粒子。在紧靠 0°C 层之下,粒子为椭球形,再降低高度,粒子完全是球形,这里完全是雨滴。云中冰晶除了通过冰核化形成外,可能还存在冰晶的繁生过程。冰晶产生后通过聚并进一步长大,撞冻过冷水也是冰雪晶增长的方式之一。在云的暖区降水粒子主要是由冰相粒子(冰晶聚集体或霰粒子)融化形成。因此冷云过程在降水形成中发挥重要作用。这是从探测资料分析获得的中尺度积层混合云系降水形成的机制。下面在对中尺度云系正确模拟的基础上,利用模拟云系各种粒子微物理过程量进

一步分析混合云系的降水机制和不同降水粒子形成的物理过程。

3.1 微物理结构特征

云的微物理结构不但影响到降水形成的机制和各种粒子的产生和增长过程,还直接影响到云水向降水转化的效率。因此云的微物理结构研究直接关系到降水机制的研究,对人工影响降水也是非常必要的。在层状云中,微物理结构大体上分为3个层次:冰晶层、过冷水层和暖水层(顾震潮,1980)。当层状云顶部较高、温度较低,在层状云上部会生成冰晶,如果云底温度在 0°C 以上,那么冰晶在下降过程中要经过3个阶段。首先,在冰晶层,冰晶主要通过饱和环境下凝华增长和在降落过程中相互聚并增长;长大的冰晶落入过冷水滴层后,凝华增长迅速,并与过冷滴群碰冻增长。最后,冰晶落入温度高于 0°C 暖水层,很快融化成水滴,融化的水滴主要靠与云滴碰并而增长。随着对云探测技术和云降水的数值模拟技术的发展,这一层状云“三层模型”得到进一步发展(洪延超和周非非,2005;周非非,2005;胡朝霞等,2007;赵震和雷恒池,2008)。具有三层结构的层状云即为“催化—供给”云,“催化—供给”云高层是冰晶和雪组成的冰相层,接下来是霰(雪)和过冷云水组成冰水混合层,最下方是云中暖区的液水层。作为催化云层的冰相层对降水的贡献约25.5%,冰水混合层为31.3%,液水层为43.1%。云中冰晶通过凝华增长转化成雪,雪撞冻过冷云水、收集冰晶和凝华增长转化形成霰,霰靠撞冻过程、收集雪过程长大,从而形成可以降落到云的暖区融化形成雨滴,它对降水的贡献较大。凝华和撞冻增长过程是冰粒子增长的主要物理过

程,也是雨水产生的重要过程。和层状云相比,对流云中上升气流强,只有长得相当大的冰晶才能下降到过冷水区,而这些大冰晶在对水面饱和的环境中会继续凝华增长,但由于对流云中过冷含水量比层状云要大,撞冻过冷水滴的增长就比层状云中快得多,因此冰晶在过冷层中通过贝吉龙过程的凝华增长至少不是很有效的,而碰并过程起主要作用。积层混合云要复杂一些,首先其中的对流云是以层状云为发展环境,而层状云的情况多种多样,有的是整层都是层状云,有的是相对于对流云的中上层存在层状云,还有的是中下层或者下层存在层状云。就与混合云系中对流云相联系的动力场而言,主要是低层辐合场;但作为层状云的发展环境,层状云中的层结条件又有差异,有的稳定的,有的是条件不稳定,也有的是不稳定的。环境层状云及其动力场情况不同,混合云系中的对流云发展情况也

不同,因此降水机制也应该有差异。本文研究的积层混合云中中层状云主要在大气低层,宏观观测为层积云,没有产生降水。在与低压中心和低层辐合相联系的对流云带的附近有大片未产生降水的低云,这里云中没有冰相粒子存在,属于暖云,它是对流云的发展环境。在这样的对流云中降水机制值得进一步分析,首先分析它的微物理结构。

图 5 给出了模拟的混合云中对流云含水量中心在 120、180、240 和 300 min 时的云水、雨水、冰晶、雪和霰的比含水量的垂直廓线。可以看出在追踪云团的几个小时过程中,各种水凝物粒子的垂直分布特征非常相似,就含水量最大值出现的高度而言,冰晶最高、其次由高到低的排序是雪、云水、霰和雨;含水量最大值出现的高度基本稳定,冰晶在 10~12 km,雪在 9~11 km,云水在 5~6 km,霰约在 4.5 km,雨水 2 km;此外,从含水量的极大

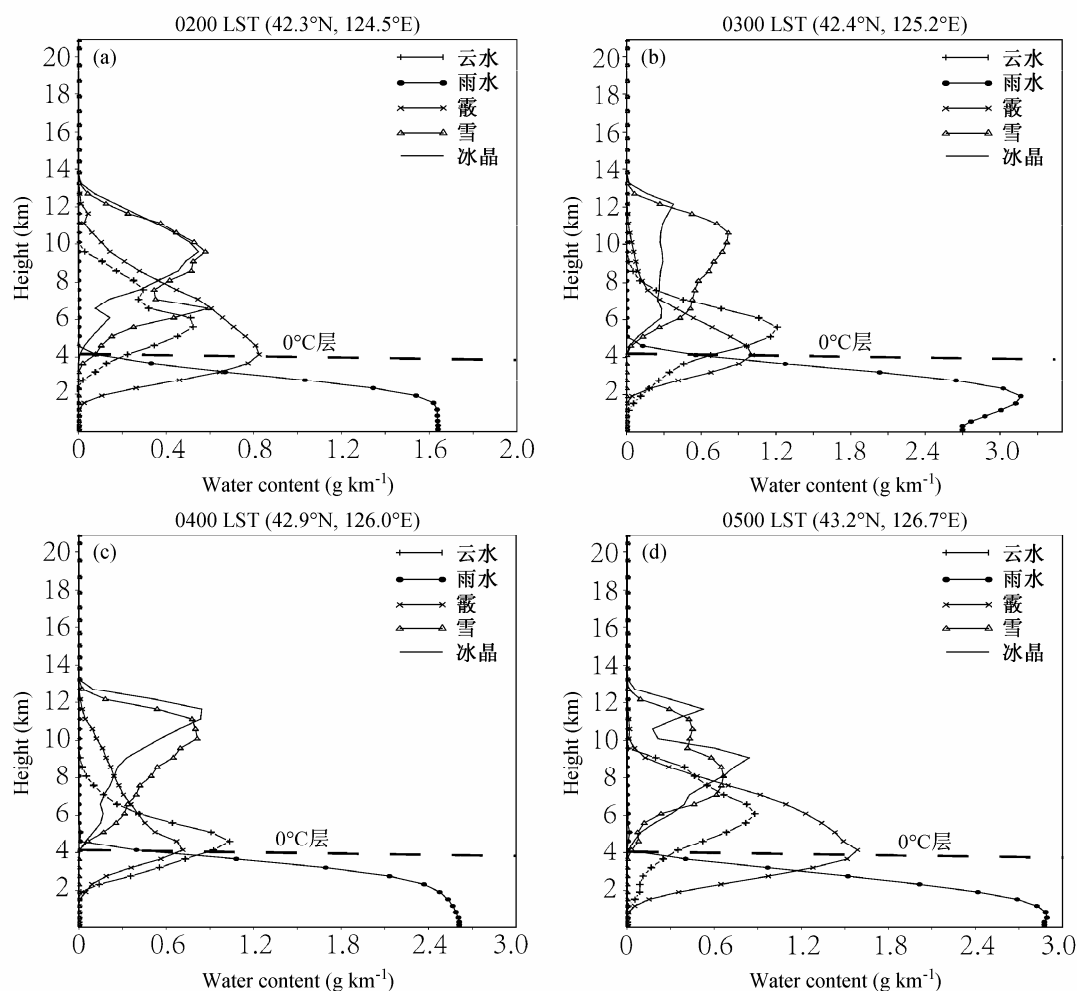


图 5 不同时刻通过对流云含水量中心的云水、雨水、霰、雪和冰晶的含水量随高度的分布: (a) 02:00; (b) 03:00; (c) 04:00; (d) 05:00

Fig. 5 The distribution of water content cross max convective moisture content with height, including cloud, rain, graupel, snow, and ice: (a) 0200 LST; (b) 0300 LST; (c) 0400 LST; (d) 0500 LST

值的变化看,冰晶含水量极大值在 $0.3 \sim 0.8 \text{ g kg}^{-1}$, 雪在 $0.5 \sim 0.8 \text{ g kg}^{-1}$, 云水在 $0.5 \sim 1.2 \text{ g kg}^{-1}$, 霰在 $0.8 \sim 1.6 \text{ g kg}^{-1}$, 而雨水在 $1.6 \sim 2.8 \text{ g kg}^{-1}$, 及地雨水含水量 $2.1 \sim 2.8 \text{ g kg}^{-1}$ 。从这些值的变化看,在混合云系中的对流云体发展演变的 4 h 中,相对于晴空对流云体,云的生命期较长。晴空对流云,即使是强烈冰雹云、甚至强烈风暴生命史也只有 2~3 h,一般的对流云只有 1~2 h; 结构基本是稳定的,地面降水也是变化不大的,而晴空对流云生消演变很快。 0°C 层高度(约 3.5 km)以下,存在较多的霰/雹,也存在一些云水,并随高度的降低而减少,在约 1 km 左右霰/雹完全融化,雨水的含水量出现大值,说明霰/雹的融化对降水贡献很大。这表明,东北冷涡中

积层混合云的降水,有可能主要以冷云过程为主。此外,从各种粒子含水量的垂直分布情况看,在 0°C 层以上过冷层,有冰相粒子存在,它们的含水量极大值都在过冷层,其中冰晶和雪含水量极大值高度较高,霰要低得多,位于云水极大值高度之下并仅靠云水极大值。云水含水量的极大值位于过冷层,即存在有较高过冷水含量的过冷层,霰的含水量也较高,而冰晶和雪的含水量较低。因此在过冷层,和其他冰相粒子比较,霰对过冷水的撞冻增长占优势。

如果计算域中模拟云系的各种粒子含水量作时间平均和纬向平均,可以获得含水量的经过平均的经向—高度剖面(图 6)。图中同样可以看到,在冰

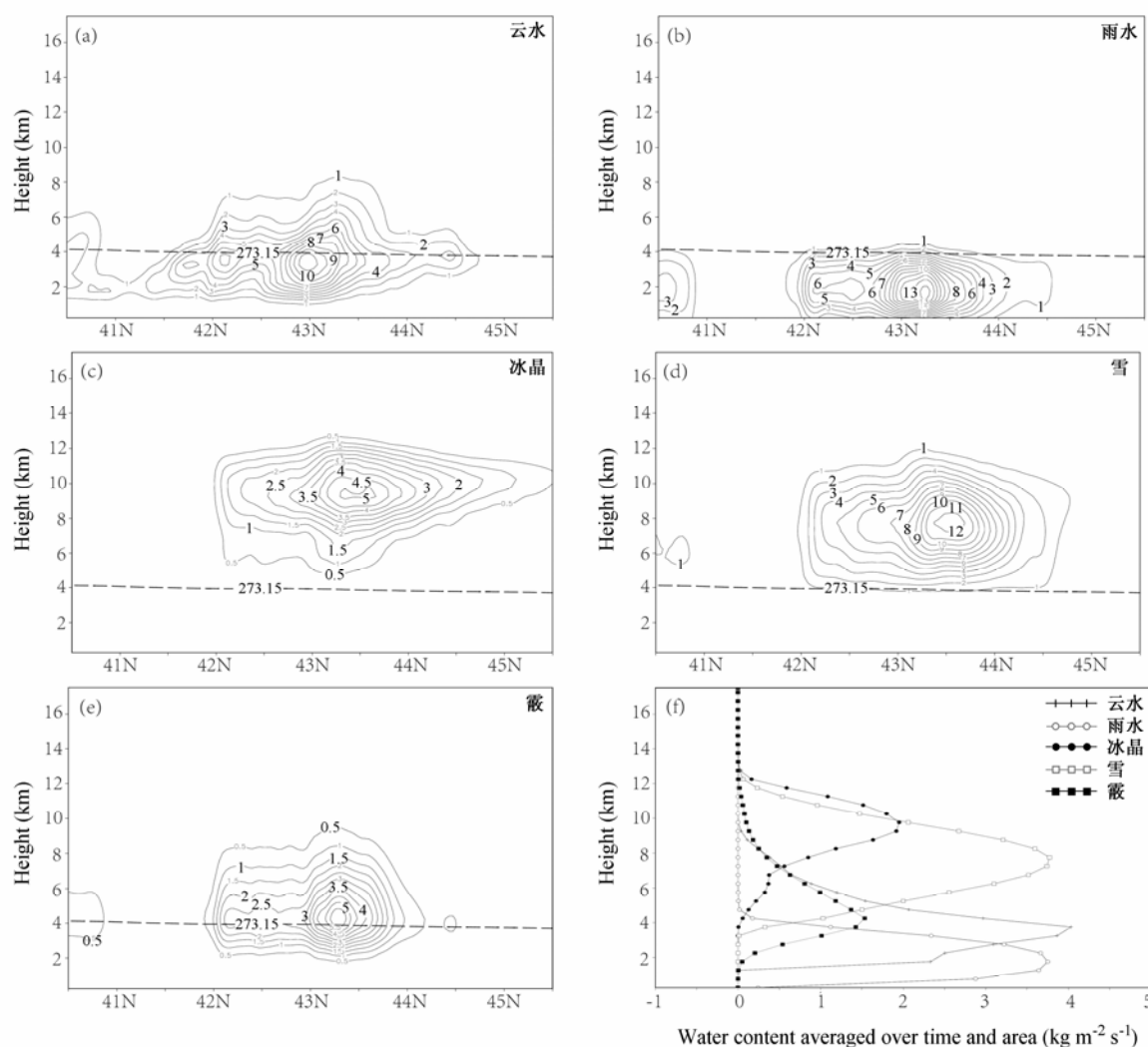


图 6 2003 年 7 月 8 日 08:00 至 14:00 混合云系中 (a) 云水、(b) 雨水、(c) 冰晶、(d) 雪、(e) 霰含水量(单位: g kg^{-1}) 的时间平均和纬向平均量的经向—高度分布(虚线代表 0°C 层)以及 (f) 各种水质含水量(云水、雨水、冰晶、雪、霰)的时间和面积平均的垂直分布(单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

Fig. 6 The meridional-vertical cross section of the hydrometeors content (g kg^{-1}) of (a) cloud, (b) rain, (c) ice, (d) snow, and (e) graupel in mixed cloud averaged by time and over latitude (the dashed lines indicate the 0°C level) and (f) the vertical distribution of various hydrometeors content of cloud, rain, ice, snow, and graupel averaged over time and area ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) from 0800 LST to 1400 LST 8 Jul 2003

相粒子中, 冰晶含水量中心位于最高层, 雪的含水量中心高度低些, 霰的含水量中心高度最低, 位于紧靠融化层之上高度。对云水来说, 其含水量极大值高度在紧靠融化层之下, 过冷区的含水量还是较高的。值得注意的是, 融化层之上几乎没有雨水。这种微结构在含水量的时间和面积平均值的高度分布图(图 6f)上也可以看出。此外, 雨水的含水量极大值在云的暖区的 $43^{\circ}\text{N}\sim 43.5^{\circ}\text{N}$ 之处, 和其配合最好的是霰的含水量极大值位置, 它正好在雨水极大值位置之上方。这说明云暖区雨水的形成与霰的融化密切相关。

3.2 各种降水粒子产生和增长过程

从图 7 看, 雪主要来源于冰晶, 冰晶通过贝吉龙过程凝华增长是产生雪的主要过程, 而雪产生后有几个主要增长过程, 即雪主要通过凝华、收集冰晶和撞冻云水过程增长, 其中以撞冻过冷云水增长过程的质量产生率最高, 因此对雪的质量贡献也最大; 其次就是雪收集冰晶增长过程, 而凝华过程对雪的质量贡献最小。其他产生和增长过程质量产生率都极小, 对雪的质量贡献可以不考虑。从微物理过程质量产生率的分布形式看, 雪撞冻过冷云水增长主要发生在 7 km 高度附近, 这里云水含水量接近 1.0 g kg^{-1} (图 5d), 给雪的撞冻增长提供了有利条件。此外, 微物理过程的质量产生率的垂直分布形式的演变表明, 有时候在高、中和低层雪的形成有着不同的机制, 例如在 04:00 (图略), 高层雪产生后主要靠收集冰晶增长, 而在低层雪主要通过撞冻过冷云水增长。这说明, 高层形成的雪, 收集冰晶长大后, 在下落到 8 km 以下, 主要在 5.5 km 附近, 又以雪撞冻过冷云水的结凇增长为主要过程。事实上, 对飞机观测资料分析表明, 高层的冰雪晶的撞冻过冷水的增长过程应该主要发生在 4km 以上 (齐彦斌等, 2012)。模拟分析与观测分析结果比较一致。

图 7b 是霰的源项微物理过程质量产生率随高度的分布, 在与霰有关的 14 个微物理过程中, 质量产生率较大的只有 5 个, 第一个是产生霰的微物理过程 piacr , 即霰是在过冷区雨滴冻结产生的, 这些雨滴是接触到冰晶后冻结的; 第 2 个过程是 pracs , 即雨水接触雪使其成霰, 这些雪与过冷雨水接触, 由于雨水冻结成霰, 被雨水收集的雪也就转化成霰。霰产生后, 主要通过撞冻云水增长和收集云冰和雪的干增长。但这些物理过程在对流云发展过程中,

产生率大小和出现极大值的高度, 即发挥作用的高度都有变化。

霰形成后, 碰冻过程是霰主要增长过程, 与飞机观测到的在 $-1.8\sim 0^{\circ}\text{C}$ 层之间存在结凇粒子较吻合。

在这次东北冷涡降水过程中没有产生地面的冰相降水, 降到地面的全部是雨水。与雨滴的形成和增长有关的微物理过程有 6 个: 云水的自动转化 (praut), 雪融化 (psmlt), 霰融化 (pgmlt), 在云暖区中雪碰撞云水转化为雨水 (qsacw) 和霰碰撞云水转化为雨水 (qgacw); 雨水碰并云水 (pracw) 增长。雨水的形成既有暖云过程也有冷云过程。对飞机观测资料分析结果表明, 在紧靠 0°C 层之下, 粒子为椭圆形, 还有一些未完全融化的冰晶, 再降低 200 m 高度, 粒子完全是球形, 这里完全是雨滴。在云的暖区降水粒子为雨滴, 冰相粒子的融化对雨滴的形成应该有一定贡献。虽然资料分析指出冷云过程参与了降水形成过程, 然而雨滴主要是由冰相粒子融化形成还是通过云水自动转化和碰并增长形成, 这一点只从资料分析还无法确定, 这是其一; 其二, 哪些过程在对雨滴形成和增长起主要作用也不清楚。这些都是与降水机制相关的重要问题。降水机制对人工增雨来说是一个十分关键的科学问题。目前我国北方的人工增雨采用冷云催化技术, 通过向云中撒播人工冰核改变云中降水形成的微物理过程达到增加降水的目的, 对那些冷云过程在降水形成过程中不起主要作用的云催化作业, 显然很难提高降水效率。因此, 具体地了解云的降水机制, 尤其是冷云过程在降水中的具体作用是非常重要的。

图 7c 给出雨水源项微物理过程质量产生率的垂直分布。雨水产生率 (qrpro) 的极大值高度在 0°C 层 (3480 m) 之下的暖区, 对雨水产生贡献较大的微物理过程霰/雹的融化过程, 它产生率最高, 极大值几乎接近雨水产生率。看来, 在云的过冷区, 雨水产生率有也极低, 雨水主要在云的暖区形成, 而且几乎完全由冷云过程产生, 霰的融化对雨水的贡献最大, 其次是雨水收集云水 (pracw)。降水主要是由冷云过程产生的, 这与观测分析的结果一致。

3.3 云水的消耗

云水主要是通过水汽凝结产生的, 冰晶融化产生的量较小。云滴是云中质量小的粒子, 除了蒸发而外, 消耗云水的微物理过程较多, 大粒子对它们

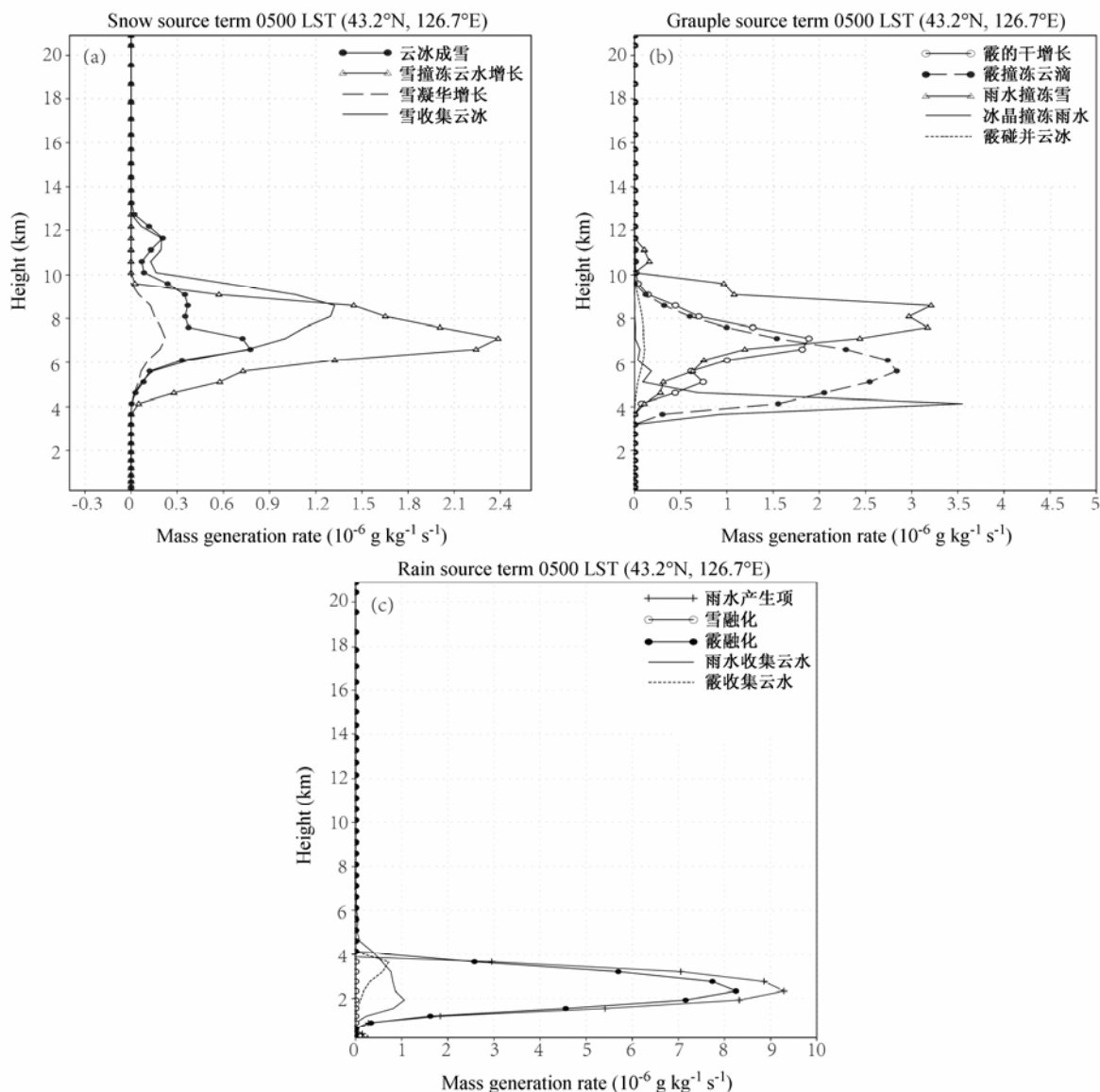


图7 300 min 时通过对流云含水量中心 (a) 雪、(b) 霰和 (c) 雨的源项微物理过程质量产生率随高度的分布

Fig. 7 The distribution of simulated 300-min's mass generation rate by microphysical process source term cross max convective moisture content with height: (a) Snow; (b) graupel; (c) rain

的碰并,如雨滴与云滴的碰并(pracw)、雪与云滴的碰冻增长(psacw)、霰与云滴的撞冻增长(dgacw)、云滴的均质核化(pihom)、云冰消耗云水的凝华增长(pidw)等等。从图8看,积云中雨滴对云滴的收集、霰/雹和雪对云水的撞冻增长是消耗云水的主要过程,雨滴收集云水发生在云的暖区,是消耗云中暖区云水的主要过程;而霰/雹和雪的撞冻增长是消耗云中过冷区云水的主要过程。

由于雪高含水量区所在高度高于霰,雪消耗云水的速率极大值的高度也高于霰,但两者都在云的过冷区,云中高层过冷云水对于霰/雹和雪的撞冻增长十分重要,冰相粒子的撞冻过程是快速增长的过

程,对冰相粒子的增长非常重要,因此,对冷云降水过程的启动至关重要。在暖区云水的消耗主要以雨水碰并云水过程为主,云水的蒸发也消耗掉一部分云水。

4 总结

本文在对东北冷涡积层混合云系降水机制的观测分析基础上,又进一步作了数值模拟研究。分析了对流云系微物理垂直结构、主要降水粒子形成的物理过程、降水发展过程和降水形成机制。从各种降水粒子形成和增长过程看,云中微物理过程之间

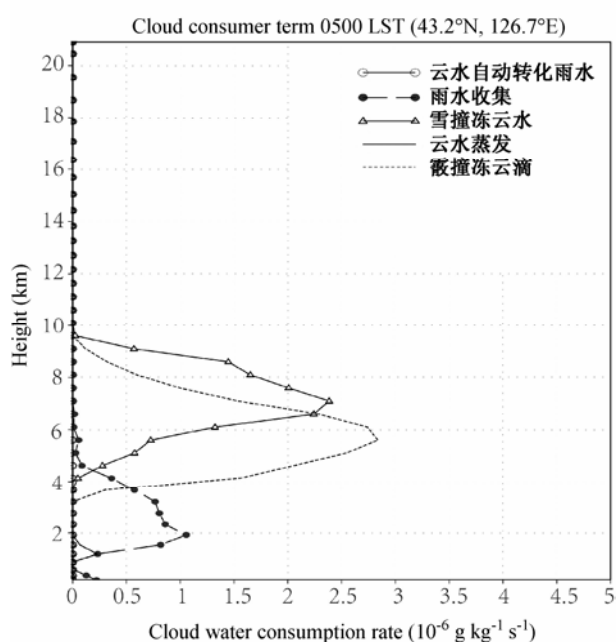


图 8 模拟云云水的消耗率随高度的分布

Fig. 8 The vertical cross section of simulated cloud water consumption rate

是相互作用的。雪主要来源于冰晶, 通过撞冻云水、收集冰晶和凝华过程增长; 霰主要来自雨滴和雪, 通过撞冻云水、收集冰晶、雪增长; 雨水又由霰融化和凝结—碰并过程形成, 雨滴碰并暖区云滴增长。水汽、云滴、冰晶、雪、霰和雨滴这几种水物质通过微物理过程相互影响, 尤其是降水粒子。例如, 在凝结—碰并过程表征的暖云过程中, 水汽通过凝结成为云滴, 云滴又可以继续凝结增长, 雨滴形成后又通过收集云滴增长, 降水的形成离不开水汽, 归根结底, 水汽是暖云致雨过程的源, 云滴的形成是水汽成雨过程中的重要环节; 当然云滴和雨滴蒸发又成为水汽。这是液态和气态的相互作用。在冷云过程中, 降水形成的各种微物理过程相互作用的情况要复杂得多。对于水汽、云滴、冰晶、雪、霰和雨滴几类水质中, 在降水形成过程中, 水汽、云滴和冰晶一般是被消耗的对象, 降水粒子的形成和增长要消耗它们, 冰相降水粒子的凝华增长要消耗水汽, 而撞冻增长要消耗过冷云滴, 还要收集冰晶增长。因此, 云滴和冰晶源源不断的产生是冰相降水粒子增长形成更大粒子的重要条件; 而云滴和冰晶的初生都来源于水汽。此外, 由上粒子形成和增长过程的分析可知, 在冰晶—雪—霰这一链环中, 冰晶主要通过凝华增长转化成雪, 冰晶还在过冷水区接触过冷雨滴使其冻结成霰, 这是霰形成的主要

过程, 雪也来源于冰晶, 看来在冷云降水形成过程中, 冰晶是发动冷云降水的主要粒子, 冰晶的多少与降水的强弱关系极大; 水汽和过冷云水是冰相粒子通过凝华和撞冻过程长大的“原料”。了解云中不同水质通过微物理过程的相互作用, 对深刻理解积层混合云中降水形成的本质和主要环节有重要意义。

本文研究得到如下结果:

(1) 微物理结构。冰晶含水量最大值出现的高度最高, 其次由高到低的排序是雪、云水、霰和雨; 雨水主要出现在云的暖区, 含水量最大值出现的高度基本稳定; 不同粒子所在气层有交叉。含水量的极大值是变化的, 霰含水量的极大值较高, 雨水最高。相对于晴空对流云体, 混合云系中的对流云体生命期较长, 结构基本是稳定。霰/雹的融化对降水贡献很大。在过冷层, 和其他冰相粒子比较, 霰对过冷水的撞冻增长占优势。云上部的冰晶和雪花对云的中部具有播撒作用, 云水的分布在冷层中占的比例较大, 对冰相粒子的撞冻增长有利。

(2) 粒子形成过程。雪主要来源于冰晶, 冰晶通过凝华过程增长, 雪产生后主要通过撞冻、收集冰晶和凝华过程增长, 其中以撞冻过冷云水增长的质量产生率最高, 其极大值所在高度与过冷云水相当, 高含水量的过冷云水, 给雪的撞冻增长提供了有利条件。在高、中和低层雪的形成有着不同的机制, 高层雪收集冰晶长大后, 下落到低层又以雪撞冻过冷云水的结淞增长为主要过程。

霰主要由雨滴冻结和雪的转化产生, 而过冷雨滴是因为与冰晶接触才冻结的; 雪并非自动转化, 而是被过冷区雨滴收集的雪随着雨滴的冻结而转化成霰。因此霰的产生与过冷雨滴关系极大。霰主要通过撞冻云水、收集雪和冰晶过程增长, 其中撞冻是霰的重要增长过程。

雨水主要由霰的融化形成, 暖云过程贡献要小得多, 降水主要是由冷云过程产生的。

对云水消耗的分析表明, 雨滴对云滴的收集、霰/雹和雪对云水的撞冻增长是消耗云水的主要过程, 雨滴收集云水发生在云的暖区, 是消耗云中暖区云水的主要过程; 而霰/雹和雪的撞冻增长是消耗云中过冷区云水的主要过程。

(3) 降水机制。从各种粒子的形成和增长过程可以看出, 大部分雨水由霰的融化形成; 雨水的碰并云水过程, 即暖云过程贡献要小得多。可见, 东

北冷涡的积层混合云的降水主要是降到暖区内冰相粒子(霰/雹)融化形成的,降水主要是由冷云过程产生的,这与观测分析的结果一致。

参考文献 (References)

- 顾震潮. 1980. 云雾降水物理基础 [M]. 北京: 科学出版社, 173–179. Gu Zhencao. 1980. Cloud and Precipitation Physics (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 173–179.
- 洪延超, 周非非. 2005. “催化—供给”云降水形成机理的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 29 (6): 885–896. Hong Yanchao, Zhou Feifei. 2005. A numerical simulation study of precipitation formation mechanism of “seeding-feeding” cloud system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 885–896.
- 胡朝霞, 雷恒池, 郭学良, 等. 2007. 降水性层状云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. Hu 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.
- 齐彦斌, 陶玥, 洪延超. 2012. 东北冷涡中尺度云系降水机制研究 I: 观测分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 683–692. Qi Yanbin, Tao yue, Hong Yanco. 2012. Precipitation mechanism of mesoscale cloud system in a cold vortex over Northeast China. I: Observational analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 683–692.
- 周非非. 2005. 层状云系人工增雨潜力的数值研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. Zhou Feifei. 2005. The numerical studies on potential of artificial rainfall for stratiform cloud [D]. Ph. D. Thesis (in Chinese), Graduate School of Chinese Academy of Sciences.
- 赵震, 雷恒池. 2008. 西北地区一次层状云降水云物理结构和云微物理过程的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 323–334. Zhao Zhen, Lei Hengchi. 2008. A numerical simulation of cloud physical structure and microphysical processes associated with striform precipitation in Northwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 323–334.