

# 一次积层混合云降水实例的数值模拟分析

于 翡 姚展予

(中国气象科学研究院中国气象局云雾物理重点开放实验室,北京 100081)

**提 要:** 观测显示,积层混合云有自己独特的动力热力结构,降水过程也有自己的特点,但过去关于积层混合云的实例模拟工作较少。2007年9月28日在我国华北地区发生了一次积层混合云降水过程。利用 WRF-ARW 中尺度数值模式,对这一个例进行了实例模拟,并结合常规观测、卫星和雷达资料分析模拟结果,表明:此次积层混合云系是降水云系减弱,层状云发展形成的。在降水物理过程中,此次积层混合云不仅具有积云和层云形态混合的特征,还具有冷云过程和暖云过程共存的相态混合的特征;中层的大范围辐合和相应的较均匀上升气流场支撑着层状云,而在均匀上升气流场中的波动导致了对流云镶嵌其中;有迹象表明,条件对称不稳定是维持此次积层混合云发展的动力因子。

**关键词:** 积层混合云 WRF 数值模拟

## Numerical Study on the Complex of the Stratiform and Embedded Convective Cloud Precipitation: A Case Study

Yu Fei Yao Zhanyu

(Key Laboratory for Cloud Physics and Weather Modification of CMA,  
Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

**Abstract:** Observation shows that the complex of stratiform and embedded convective precipitation has its own unique thermal and dynamic structure, and the precipitation process has its own characteristics. However, the numerical study of real cases has been published much less so far. In this paper, a case on the 28 September 2007 complex of stratiform clouds and embedded convective clouds in North China is simulated by using the WRF-ARW model. It shows that, the clouds are weakened by the shear line, and formed by the development of

资助项目: 国家科技支撑计划课题“混合云人工增雨技术研究”(批准号:2006BAC12B02);科技部公益性行业(气象)科研专项项目“京津经济区及华北区域气溶胶对云的改变导致的降水变化及其在天气预报中的应用”(GYHY200706036)

收稿日期: 2009年4月30日; 修定稿日期: 2009年7月24日

stratiform clouds. It also reveals that the complex of stratiform clouds and embedded convective clouds is not only the complex of clouds with different shapes, but also the complex of different microphysical processes. And the large-scale convergence on the middle level and the corresponding uniform updraft make the stratiform clouds develop, while the dramatic fluctuations of updraft lead to embedded convective clouds, which may be initiated and supported by conditional symmetric instability.

**Key Words:** stratiform and embedden convective cloud WRF model numerical simulation

## 引 言

积层混合云是一种重要的降水云型,在冷锋、梅雨锋、地形云降水等多种天气过程中都会出现<sup>[1-5]</sup>。常观测到对流云与层状云共存,以及对流云与层状云之间的相互作用和相互转换的现象。积层混合云不仅对降水的发展过程有明显影响,而且其动力、热力场的结构比层云或积云都要复杂。

在积层混合云的数值模拟分析方面,国内外开展了很多研究。Fabry Frederi 等<sup>[6]</sup>利用数值模拟研究发现镶嵌在层状云中的对流云发展更旺盛,生命史更长,降水效率更高。黄美元等<sup>[7-9]</sup>利用二维时变积云降水模式讨论了积层混合云中层状云对对流云发展和降水的影响,也得出了类似的结论。许习华等<sup>[10]</sup>设计了一个包含对流云与层状云相互作用的积云参数化方案,发现对梅雨锋的积层混合云降水预报有明显改进。过去对积层混合云降水的研究多集中在梅雨锋、东北冷涡等暴雨天气过程,数值模拟研究也都大多为理想实验,为更深入研究积层混合云降水的物理机制,有必要使用观测和实例模拟资料,从动力、热力过程和微物理过程结合的角度进行分析<sup>[11-14]</sup>。

通过对 2007 年 9 月 28 日发生在我国华

北地区的积层混合云降水过程进行实例模拟,分析了积层混合云发展过程的大气环流条件、环境特征及其动力机制,并进一步利用云分辨模式研究了积层混合云降水系统的对流、层状降水的云宏微观结构,从而了解降水机制及其主要云物理过程,从热力学动力学与云物理过程的角度研究积层混合云发展的机制。

## 1 环流形势和天气实况

2007 年 9 月 28 日 20 时天气形势图(图 1)显示,500hPa 图上,河西走廊西端有一浅槽东移,相应的 700hPa 图上,河套地区西部有一低涡东移,低涡前部为一股强而宽的西南暖湿气流,北端一直延长到 40°N 附近。700hPa 图上,北京北部有一弱的高压,高压底部的东南气流自黄海一直延伸到太行山脉的东侧。低涡前部和高压后部共同影响造成此次切变线性降水过程,降水云系在高空西风气流的引导下向东移动。

从 FY-2C 红外云图(图 2,见彩页)上可以看出,降水云系 10 时移入山西境内,13 时移入河北境内,15 时前云系较强为对流云系,15 时减弱并离散为积层混合云系,直到次日东移出海。对照图 1,还可以发现,此次积层混合云主要是沿切变线分布的。

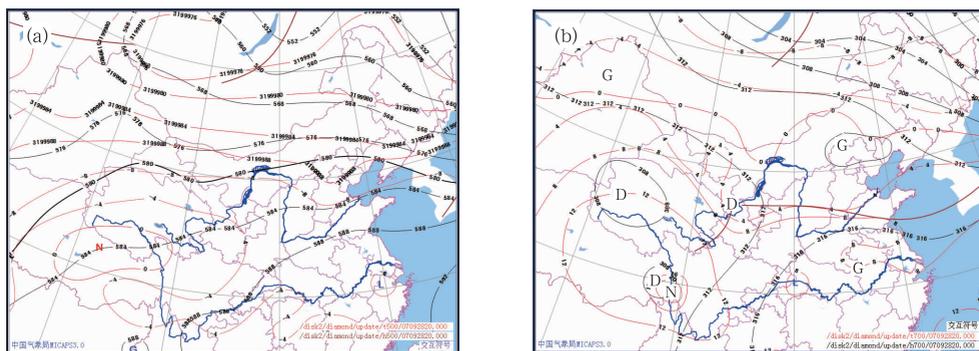


图 1 2007 年 9 月 28 日 20 时天气形势场

(a) 500hPa; (b) 700hPa

## 2 数值模拟方案介绍

利用新一代非静力平衡中尺度数值模式 WRF 的 3.0.1.1 版开展模拟。模式采用的可压缩滞弹性非静力欧拉方程组,由守恒变量构建通量形式的控制方程组,使用气压(地形)跟随坐标。

模式的区域设置采用三重嵌套,三重格距分别是:27km;9km;3km(图 3)。微物理过程采用 WRF 提供的最新加入的 Morrison 双参数方案,考虑六种水成物:水汽、云水、雨水、冰晶、雪花、霰。该方案是 WRF 中最为

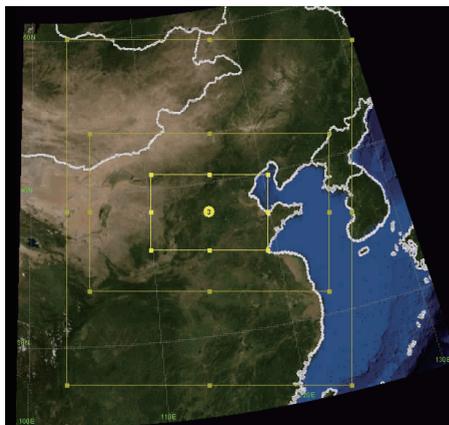


图 3 模拟区域设置

复杂的微物理方案,适合于研究云系的详细物理过程。对第一层(27km)及第二层(9km)网格采用 Kain-Fritsch,第三层网格(3km)不采用积云对流参数化方案,作为模式可分辨过程进行显式方案来进行积分。边界层参数化方案选择 MYJ 方案<sup>[15]</sup>。积分中采用时变边界条件。

采用每 6h 一次的 NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  全球再分析资料作为背景场,模拟 2007 年 9 月 28 日 00:00 到 29 日 00:00 发生在环北京地区的一次积层混合降水云系发展过程。粗网格每隔 20min 输出一次结果,次网格每隔 10min 输出一次结果,以此来研究积层混合云降水发展演变的过程,并分析其详细机理。

## 3 模拟结果验证及分析

### 3.1 地面降水特征

如图 4 所示,模拟的 24 小时地面降水量较好地反映出实况的降水级别和雨带分布,即主要雨带在  $37^{\circ}\text{N}$  附近,呈东西分布,基本与切变线方向一致,降水中心在山西境内,约为 50mm。

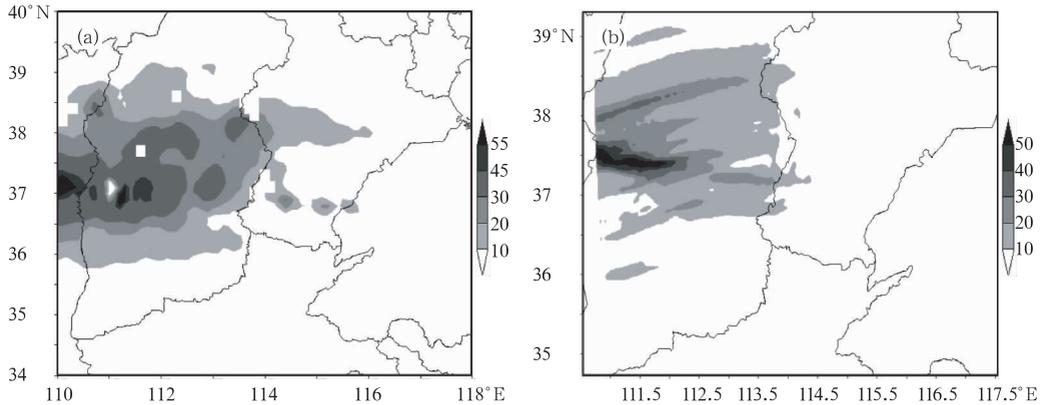


图 4 2007 年 9 月 29 日 00 时前 24 小时降水量(单位:mm)

(a)实测结果; (b)3km 格距模拟结果

### 3.2 雷达回波特征

雷达组合反射率图(图 5, 见彩页)上也显示,此次降水过程具有典型的混合云降水回波特征,在较均匀的回波层中镶嵌着柱状对流云回波。在 PPI 图上表现为,在较大范围内,回波边缘呈现支离破碎、没有明显的边界、强度小于 20dBz 的为层状云降水回波,层状云回波中镶嵌着团块状强回波;在 RHI 上表现为,在均匀的层状云高度上柱状回波高低起伏地镶嵌其中。此次积层混合云系发展过程中,对流云系减弱,并有层状云发展(积云层化),形成了范围较大,持续时间较长的积层混合云降水系统。在层化过程中,发现云(系)顶的高度增加,回波强度增强,云系范围扩大,且持续时间比单块对流云的持续时间明显延长。

模式较好地模拟出了东西向的云系特征及对流云降水回波的分布(见图 6, 彩页)。模拟的云系发展可以划分为 3 个阶段:(1)降水云系移入山西、河北境内。(2)降水云系减弱层化为积层混合云,其表现是在较大范围

内,回波边缘呈现支离破碎、没有明显的边界,层状云回波中镶嵌着团块状强回波。(3)积层混合云系维持发展,在其后方不断有对流云补充到云系中,维持云系的发展。该系统影响山西、河北广大地区,带来了大面积的降水。与图 4 对比可见,模拟的结果与实测结果比较接近,可以利用模拟的详细输出结果再来进行深入的分析。

## 4 模拟结果分析

### 4.1 水凝物的特征分析

图 7 给出模拟量的垂直剖面,可以看出此次积层混合云降水云系云水总体分布不均,存在多个含水量中心。雷达回波强度在 30dBz 以上的区域为对流云,雷达回波在 20dBz 以下的为层状云,层状云区域与对流云区域均有含水量约为 0.6g/kg 最大值区,云底高度基本在 3km 以上,液态云水的云顶高在 6km 以下,6km 以上含水量较小,过冷云水伸展到 6km,最大含水量在零度层之上,为 0.6g/kg,其中心与冰晶的中心对应,说明此处冰晶下落碰冻过冷水,在零度层上

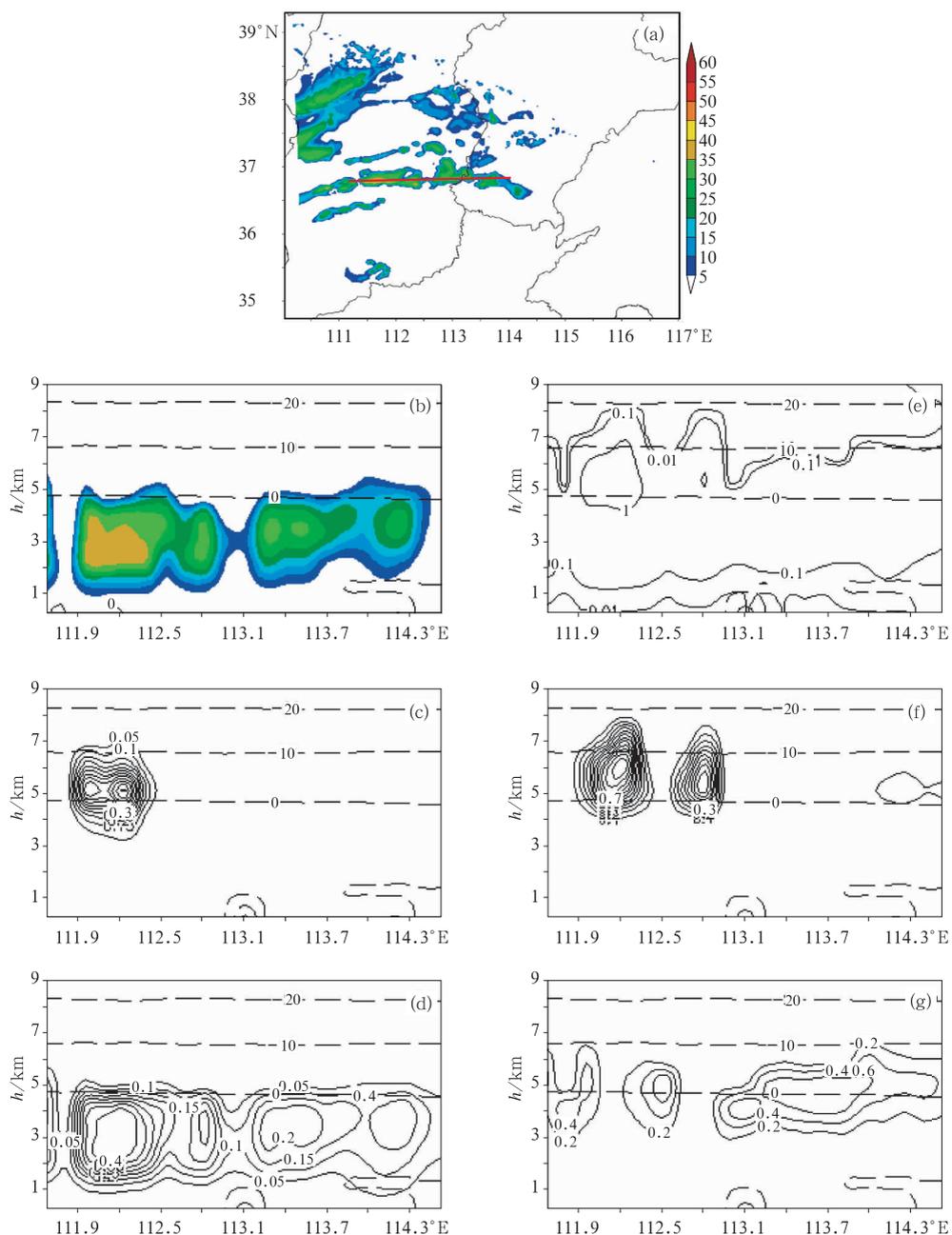


图 7 模拟的 2007 年 9 月 28 日 20 时的垂直剖面

(a) 雷达组合反射率(dBz),粗直线代表垂直剖面;(b)雷达组合反射率(dBz,阴影)

和温度场(°C,虚线);(c) 霰(g/kg,实线)和温度场(°C,虚线);(d) 雨水(g/kg,实线)和

温度场(°C,虚线);(e) 水凝物总量(g/kg,实线)和温度场(°C,虚线);

(f) 冰和雪的总量(g/kg,实线)和温度场(°C,虚线);(g) 云水的总量(g/kg,实线)和温度场(°C,虚线)

形成较多霰粒子,最大比含量为 0.35g/kg,零度以下区域仍有一些未融化的霰粒子存

在;霰粒子在 0°C 层之下融化转化成雨水,雨水在零度层之下,雨水的大值中心对应云水

的大值中心和霰的大值中心,可见云水和霰是此区域地面降水的主要来源。有少量冰晶存在于零度层附近,含水量最大值为  $0.06\text{g/kg}$ ,高层冰晶主要在  $8\text{km}$  高度附近,最大含水量值为  $0.04\text{g/kg}$ ;零度层上有过冷雨水存在,含水量为  $0.01\sim 0.18\text{g/kg}$ ,可见有云水向雨水的直接转换。可见,该降水云系中冷云降水机制与暖云降水机制共存,不仅有形态混合的特征也有相态混合的特征。

#### 4.2 动力场分析

从动力场分析,也可看出此次积层混合

云的含水量不均匀性不仅仅是由于微物理过程的起伏变化引起的。云(团)附近的中低层存在着辐合,而高层存在着辐散(图 8),这种配置有利于维持环境上升气流和供云(系)发展。其中对对流云区域的辐合较层状云区域要强,不论层状云区域还是对对流云区域  $700\text{hPa}$  的辐合几乎是最强的,随后有所减弱,并且强辐合场由西向东移动,云系的移动方向与之一致。中层的大范围辐合和相应的较均匀上升气流场支撑着层状云,而在均匀上升气流场中的波动导致了对流云镶嵌其中(图 9)。

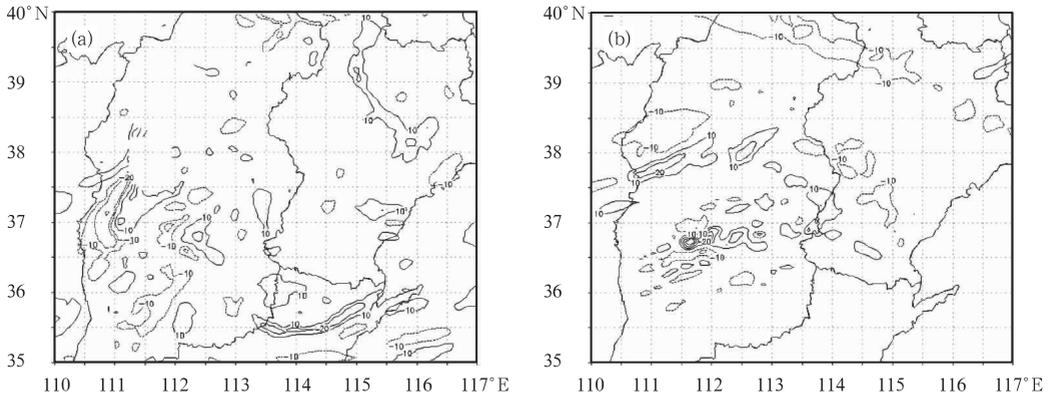


图 8 模拟的 2007 年 9 月 28 日 20 时的散度场(单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )  
(a)  $500\text{hPa}$ ; (b)  $700\text{hPa}$

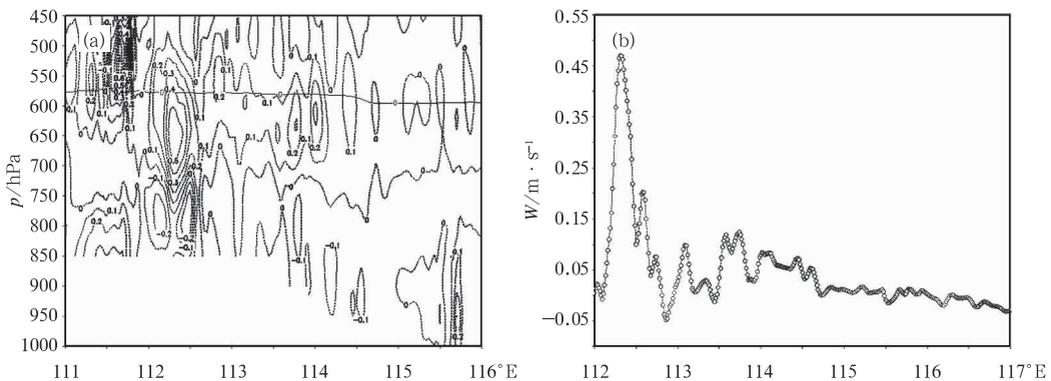


图 9 模拟的 2007 年 9 月 28 日 20 时的垂直速度(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )场  
(a) 沿  $37.9^\circ\text{N}$  剖面; (b)  $37.9^\circ\text{N}$   $700\text{hPa}$  垂直运动波形图

### 4.3 不稳定条件分析

图 10 给出的是对流理查森数, 表征 CAPE(对流有效位能)与垂直风切变间之关系, 此次过程的中层状云区域的对流理查森数远小于对流云区域的对流理查森数, 但对流云区域的对流理查森数也并不够大, 说明此次过程中热对流不是维持积层混合云系中对流云发生发展的主要因素。

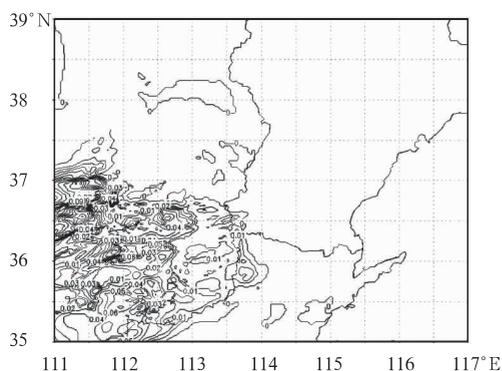


图 10 模拟的 2007 年 9 月 28 日 20 时的对流理查森数分布

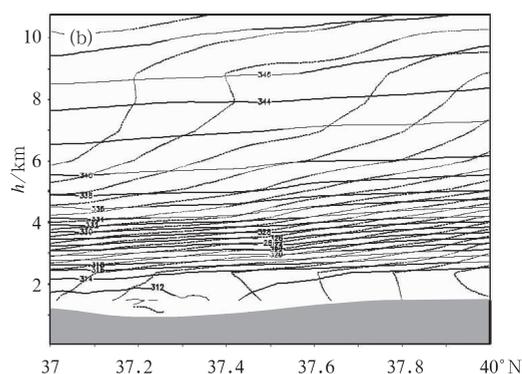
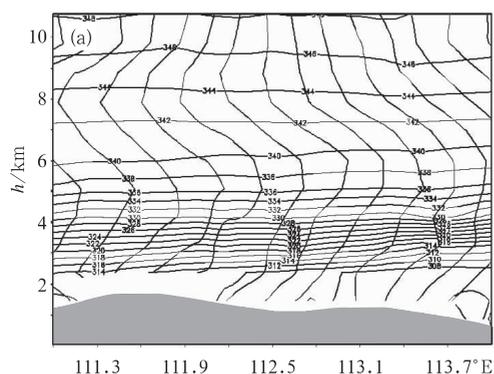


图 11 模拟的 2007 年 9 月 28 日 12 时的假相当位温(单位:K, 水平实线)和绝对角动量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 曲线)的垂直剖面图  
(a)37.9°N 纬向剖面图; (b)112°E 经向剖面图

当位温线与绝对角动量线近似平行; 这里与通常的图例有不同, 即两线平行不那么斜, 但

在实际天气资料进行不稳定图示判断时, 可看假相当位温面与  $M$ (绝对角动量) 面有否平行区, 气块在此区的上升是中性的, 上升运动可伸展到高层去. 当开始凝结后, 如果有这种结构, 则可认为有对称不稳定的条件<sup>[16]</sup>. 条件对称不稳定分析对于了解中尺度降水带的形成是很重要的. 根据过去许梓秀等对京津冀地区 33 次冷锋降水过程的研究, 有 31 次在冷锋前部暖区中有中尺度雨带活动, 其中平行类约占全部暖区雨带的 50%. 计算表明, 这类雨带形成和发展的一种可能机制就是条件对称不稳定. 因而条件对称不稳定是锋面附近暴雨和强对流发展的重要物理机制, 它解释了静力稳定大气中强对流天气和暴雨发生的可能原因。

从模拟的假相当位温和绝对角动量(图 11)可看出, 假相当位温由下到上平缓增大, 说明大气运动处于对流稳定状态; 绝对角动量由南到北增大, 说明大气运动惯性稳定. 但在 37.5°N, 112°E 附近的区域上空, 假相

可表示当气流沿假相当位温运行时不受  $M$ (绝对角动量) 的阻尼, 虽不典型但具有条件

对称不稳定因子;它利于空气向上向东北的斜上升运动,这一区域的空气的斜上升运动是此次降水云系表现为积层混合云的主要动力因子和水汽来源。

条件对称不稳定是大气稳定状态和条件不稳定状态之间的中间纽带,大气由稳定向不稳定或者由不稳定向稳定的演变均通过条件对称不稳定来实现;对流对称不稳定环流的形成与不稳定层的配置有关,当低层为条件不稳定而高层叠加深厚的条件对称不稳定时,对流对称不稳定环流低层出现垂直上升气流,高层出现范围较广的倾斜上升气流,对称不稳定能量释放产生中尺度云带。当低层和高层出现条件不稳定,中间呈条件对称不稳定或弱稳定度层结时,从低层到高层出现较深厚的垂直上升气流,湿重力不稳定能量的释放导致了云带的形成。

## 5 结论与讨论

(1) 观测结果表明,低涡前部和高压后部共同影响造成的中层辐合,形成此次切变线性降水过程,降水云系在高空西风气流的引导下向东移动并减弱层化为积层混合云系。

(2) 既定设计方案模拟得到的结果基本反映出降水的实况雨量及降水回波特征。这为利用模拟的详细输出结果再来进行细致的过程和机理分析提供了条件。

(3) 此次降水分布不均匀,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,降水物理过程中,此次积层混合云不仅具有积云和层云形态混合的特征,还具有冷雨过程和暖雨过程

共存的相态混合的特征,这些皆具有积层混合云的特征。

(4) 此次积层混合云含水量分布不均匀不仅是云微物理过程的不均匀性造成的,中层的大范围辐合和相对的较均匀上升气流场支撑着层状云,而在均匀上升气流场中的上下波动导致了镶嵌其中的对流云。

(5) 此次积层混合云降水过程中对流不稳定能量并不大,条件对称不稳定可能是积层混合云系形成和维持的一种机制。

## 参考文献

- [1] Emmanouil N. Anagnostou. A convective stratiform precipitation classification algorithm for volume scanning weather radar observations[J]. Meteorol Appl, 2004, 11, 291-300.
- [2] Fuhrer O, Schaer C. Embedded cellular convection in moist flow past topography[J]. J Atmos Sci, 2005, 62 (8):2810-2828.
- [3] 许梓秀,王鹏云.冷锋前部中尺度雨带特征及其机制分析[J].气象学报,1989,47(2):198-206.
- [4] 刘黎平,阮征,覃丹宇.长江流域梅雨锋暴雨过程的中尺度结构个例分析[J].中国科学(D辑),2004,34(12):1193-1201.
- [5] 宫福久,周德平,陈宝君,等.东北冷涡云物理及导变技术[M].北京:气象出版社,2005.
- [6] Fabry Frederic, Zawadzki Isztar, Cohn Stephen. The influence of stratiform precipitation on shallow convective rain: A case study[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121(12):3312-3325.
- [7] 黄美元,洪延超,徐华英,等.层状云对积云发展和降水的影响——一种云与云直接影响的数值模拟[J].气象学报,1987,45:72-77.
- [8] 洪延超.积层混合云数值模拟研究(1)—模式及其微物理过程参数化[J].气象学报,1996,54(5):544-557.
- [9] 洪延超.积层混合云数值模拟研究(2)—云相互作用及暴雨产生机制[J].气象学报,1996,54(6):661-

- 674.
- [10] 许习华,丁一汇.一种考虑云相互作用的积云对流参数化方案及其在降水预报中的应用[J].中国科学(B辑),1990,9:998-1008.
- [11] 廖菲,洪延超,郑国光.影响云和降水的动力、热力与微物理因素的研究概述[J].气象,2006,32:4-11.
- [12] 朱晶,寿绍文,何玉科.辽东半岛大暴雨的雷达回波及数值模拟分析[J].气象,2007,33(6):44-50.
- [13] 雷蕾,朱伟军,毕宝贵,等.河南一次强降水过程云和降水结构的中尺度数值模拟[J].气象,2007,33(4):15-22.
- [14] 迟竹萍,龚佃利.山东一次连续性降雪过程云微物理参数数值模拟研究[J].气象,2007,32(7):25-32.
- [15] 朱蓉,徐大海.中尺度数值模拟中的边界层多尺度湍流参数化方案[J].应用气象学报,2004,10:543-555.
- [16] 许焕斌,王思微.三维中- $\beta$ 尺度模式研究:一次气旋暖区锋生活动的中尺度结构的数值模拟试验[J].气象学报,1994,(5):167-171.

# 于翡等:一次积层混合云降水实例的数值模拟分析

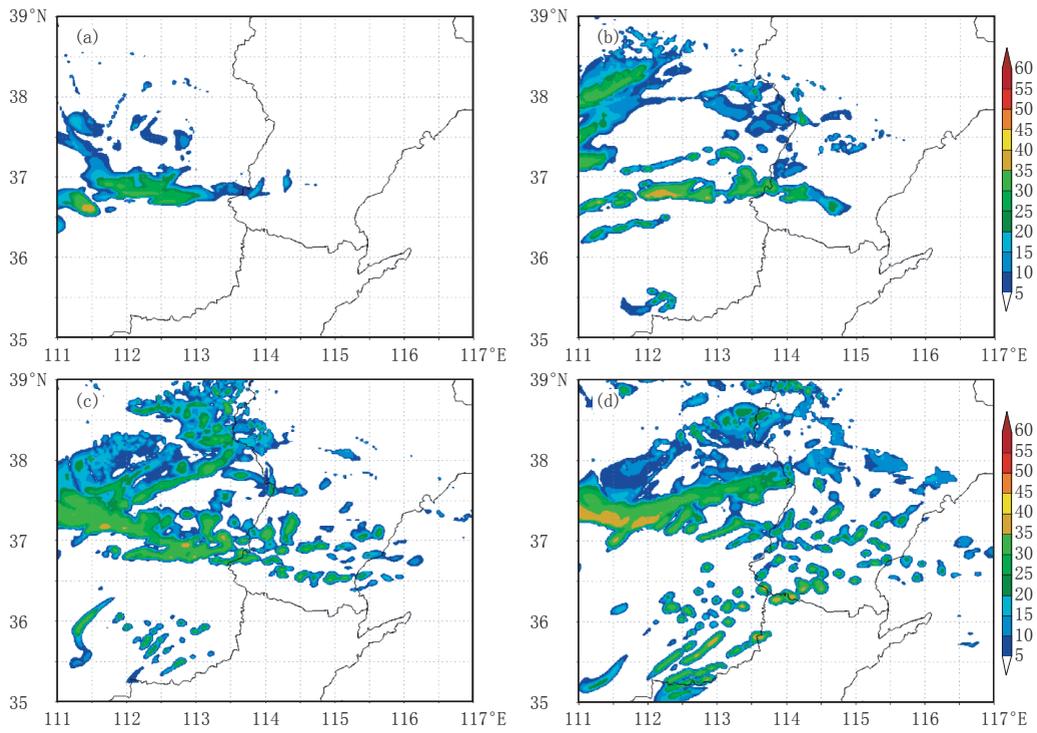


图 6 模拟的2007年9月28日的雷达组合反射率拼图(dBz)  
(a) 17时; (b) 20时; (c) 23时; (d) 次日01时

# 于翡等:一次积层混合云降水实例的数值模拟分析

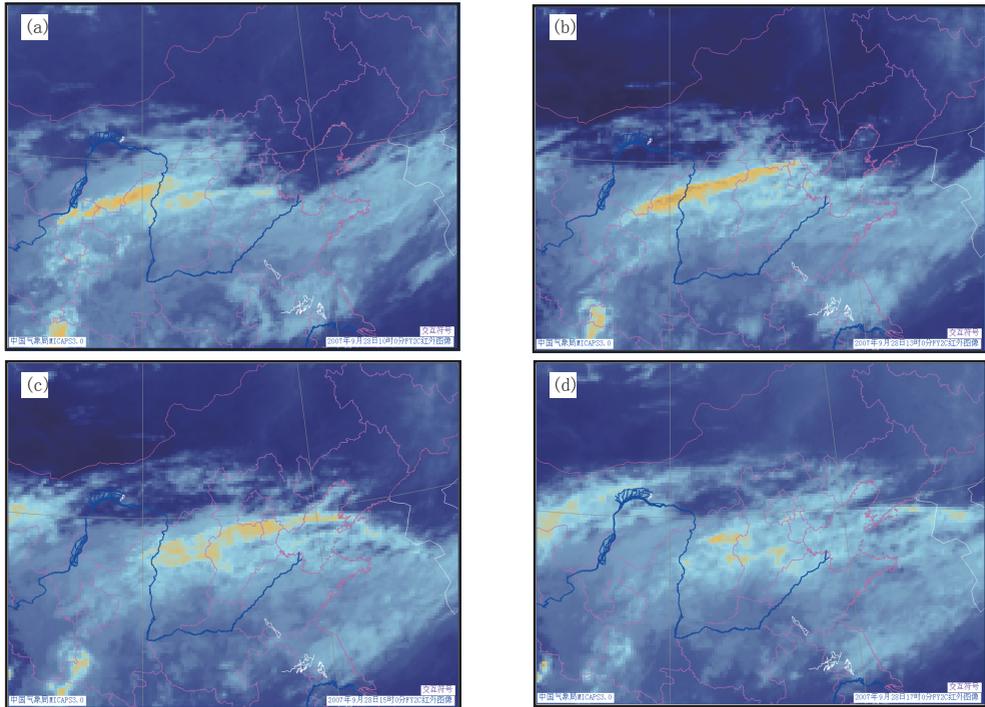


图 2 2007年9月28日FY-2C云项亮温红外云图  
(a) 10时; (b) 13时; (c) 15时; (d) 17时

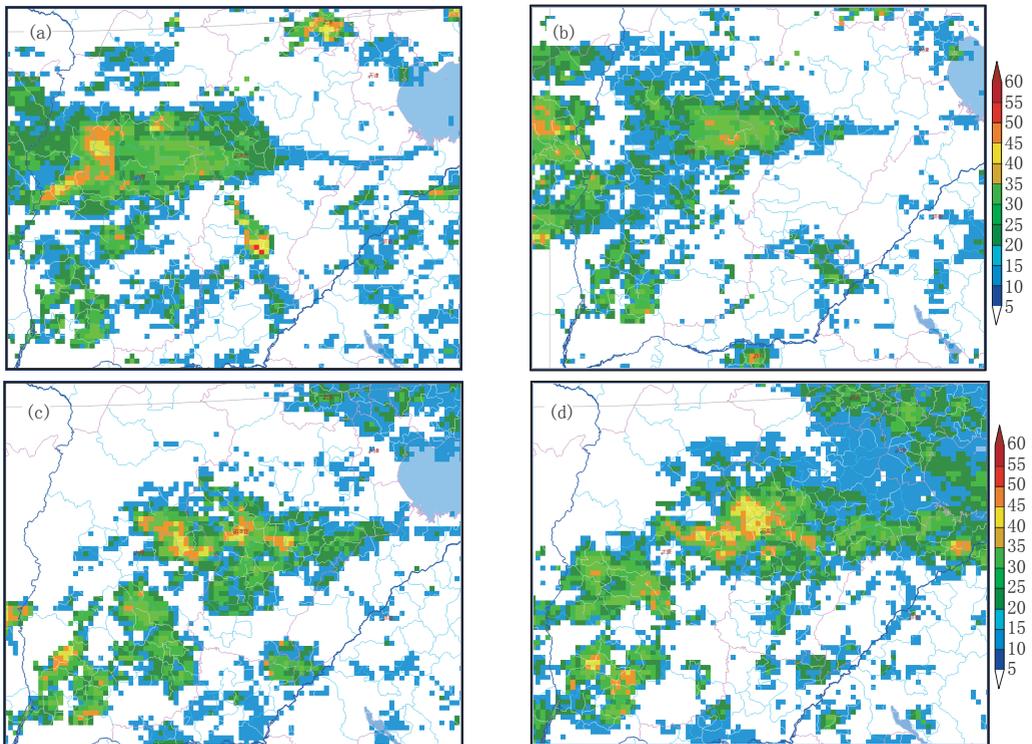


图 5 实测的2007年9月28日的雷达组合反射率拼图(dBz)  
(a) 17时; (b) 20时; (c) 23时; (d) 次日01时