

林磊,姚展予. 华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究[J]. 气象,2011,37(12):1473-1480.

华北地区一次积层混合云降水的数值模拟研究^{*}

林 磊 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: 利用 WRF ARW 中尺度数值模式对 2009 年 4 月 18 日华北地区的一次积层混合云系降水进行模拟。首先,对实况的天气形势和雷达反射率及垂直剖面进行分析;并通过垂直剖面对其流场结构概念图进行分析;然后,通过对比,模拟的自然降水分布与实测结果基本一致,模拟的雷达组合反射率和雷达反射率的垂直剖面与实测结果也基本一致;通过分析云中各要素的分布,了解了积层混合云系的微物理特征和动力特征;最后对积层混合云降水机制进行探讨。结果表明:积层混合云水凝物含水量分布不均匀,对流云和层状云相互粘连跨接,水平方向充分混合,雨水的大值中心、云水的大值中心及冰晶的大值区相互对应,存在播撒-供给机制。从动力场来看,在低层对流云区域垂直上升速度较大,高层对流云区域的旁侧有较明显的下沉气流,云区低层存在辐合,高层存在辐散,此种配置有利于维持云系的发展。积层混合云不仅在层状云区有层状云的简单的“播撒-供给”机制,或在积状云区有粒子群的循环增长机制,而且可以发生层云—积云间的粒子群交换。

关键词: 积层混合云系, WRF 中尺度模式, 雷达反射率, 微物理特征

Numerical Study on the Complex of the Stratiform Clouds and Embedded Convective Clouds of North China

LIN Lei YAO Zhanyu

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

Abstract: A case on April 18, 2009 in North China with the complex of stratiform clouds and embedded convective clouds is simulated by using WRF-ARW model. First, we analyze synoptic chart, radar reflectivity image and vertical section of radar reflectivity. Second, by comparison, it shows that the simulation results of precipitation and radar reflectivity are nearly correspondent with observational data. The precipitation mechanism, cloud microphysical characteristics and dynamic characteristics are studied by analyzing elements of cloud. The results indicate that: liquid water content of the stratiform clouds and embedded convective clouds is inhomogeneous. The stratiform clouds and convective clouds connect each other, and mix horizontally. The locations of maxima of rain water, ice crystal and cloud water content are correspondent vertically. Seeder-feeder mechanism is obvious. Vertical velocity is accessional in the convective clouds. Downdraft is on the side of the convective clouds at high altitudes. Convergence can be found at low altitudes, while divergence can be found at high altitudes. This configuration is conducive to maintaining the development of cloud.

Key words: stratiform clouds with embedded convective clouds, WRF model, radar reflectivity, micro-physical characteristics

^{*} 国家科技支撑计划课题(2006BAC12B02)和国家 973 全球气候变化重大研究计划(2010CB950804)课题共同资助

2011 年 1 月 19 日收稿; 2011 年 6 月 29 日收修定稿

第一作者: 林磊,主要从事大气物理与大气环境研究. Email:linleisuper@126.com

通讯作者: 姚展予. Email:yaozy@cams.cma.gov.cn

引 言

我国是水资源缺乏的国家,人均水资源占有量不到世界平均水平的四分之一。其中华北、西北部分地区降水量偏少,分布很不均匀。为了更加合理地开发、利用水资源,我国需要大力开展人工增雨工作。积层混合云是一种重要的降水云型,在梅雨锋、冷锋、地形云降水等多种天气过程中都会出现^[1-6]。积层混合云降水在华北地区春夏季的降水中起着非常重要的作用,也是为缓解北方春季干旱开展人工增雨的主要作业对象。使用 WRF 对积层混合云降水进行数值模拟,可以得出各个要素的分布,进一步的分析天气形势,了解积层混合云系的降水机制和微物理特征,为外场试验提供参考依据。

在数值模拟分析方面,国内外进行了很多研究。Farley 等^[7]利用三维云模式对引晶催化进行数值模拟。Meyers 等^[8]用显式云模式对催化和未催化地形云进行数值模拟。黄美元等^[9]利用二维时变积云降水模式讨论了积层混合云中中层状云对对流云发展和降水的影响。许焕斌等^[10]设计了一个 β 中尺度数值模式,并用来试验模拟一次京津地区暖区锋生降水过程。其结果不仅给出了暖锋区锋面垂直环流,而且还给出了叠加在其上的次级中尺度环流结构。由于对流云的动力过程,降水量和云的分布将会被改变。Yuter 等^[11]利用卫星资料等多种资料结合数值模拟分析热带大洋上的积层混合云系中的层状云区与对流云区的热力、动力结构,结果表明,热带洋面上的积层混合云中,对流泡附近高层辐散、低层辐合。Orville 等^[12]利用数值模式模拟了稳定层状云中催化产生嵌入对流的可能性。Fuhrer 等^[13]在观测的基础上,用云数值模式模拟了从均匀的层云降水发展至嵌有对流单体的层云降水的转变过程,其结果表明,由于对流云的动力作用,雨强、降水量明显增加,在均匀上升气流的条件下,嵌入对流泡表现为多单体形式。洪廷超^[14-15]用积云对流速度场叠加辐合场的方法建立二维平面对称积层混合云模式。结果表明,层状云为积状云提供了良好的发展条件,层状云中饱和环境和辐合场使积状云具有长生命期,产生持续的降水。王维佳等^[16-17]也建立了一维半地形积层混合云模式用于对积层混合云降水过程的研究。于翡等^[18]、于丽娟等^[19]和辛乐等^[20]利用数值模式对积层混合云降水过程进行了研究。

过去对积层混合云的研究多集中在梅雨锋等暴雨天气过程中的云系,数值模拟研究也大多不是实例模拟,而且对华北地区的积层混合云系的微物理过程和降水机制的数值模拟研究相对较少。

本文通过对 2009 年 4 月 18 日发生在华北地区的一次积层混合云降水过程进行数值模拟,分析积层混合云系发展过程的环流形势和天气实况,并通过分析各个要素的分布,了解积层混合云系的降水机制、微物理特征和动力特征,为外场试验提供参考依据。

1 个例实况的分析

1.1 环流形势和天气实况

在 2009 年 4 月 18 日 08 时和 20 时 500 hPa 图(图略)上,贝加尔湖附近呈两槽一脊型,有弱的冷平流从新疆北部向华北输送,内蒙古到四川一带有高空槽发展并向东移动,华北地区处于槽前,四川盆地至山东处于西南暖湿气流输送带。

4 月 18 日 08 时 850 hPa 形势图(图略)上,贵州、湖南、湖北至安徽南部存在一条明显东北—西南向切变线,河南、河北和山东有西南急流输送水汽。高空形势的发展有利于华北地区降水。

在地面图(图略)上,内蒙古一带有低压发展并向东南方向移动,4 月 18 日 20 时,华北有不稳定低压环流,带着潮湿的水汽缓慢移动,从内蒙古到陕西有一条锋面,锋面的移动前方有对流出现。在这种有利的大尺度条件下,地面的中尺度低压及相伴的中尺度辐合区对降水有重要作用。

1.2 雷达组合反射率分析

雷达组合反射率可以很好地反映出系统的发展。图 1 给出了 4 月 18 日 17—18 时张家口雷达站的雷达组合反射率图。从 17—18 时的雷达回波看,山西北部、河北西北部、内蒙古的小部分地区出现东北—西南向的带状雷达回波。17—18 时,雨带向东南方向移动约 40 km。部分对流云区域回波有所减弱,范围有所缩小,对流云区域向东北方向移动。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,在较大范围内,回波边缘呈现支离破碎,强度小于 25 dBz 的为层状云降水回波,层状云回波中镶嵌着团块状强回波,回波最大值为 50 dBz。

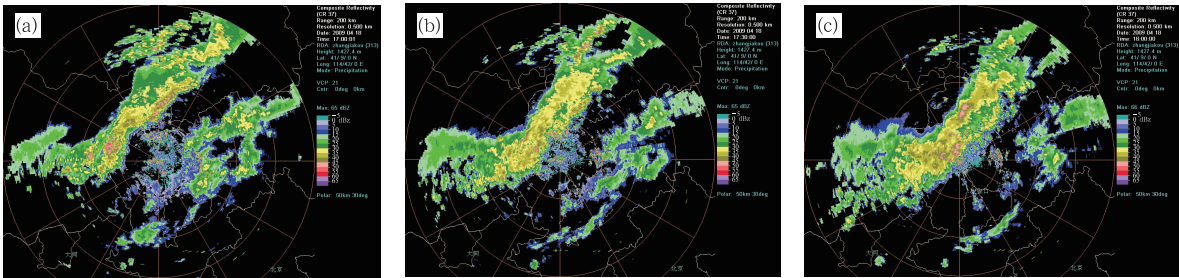


图 1 2009 年 4 月 18 日 17:00(a)、17:30(b)、18:00(c)张家口雷达站的雷达组合反射率(单位: dBz)

Radar equivalent reflectivity factor image of Zhangjiakou Station
at (a) 17:00 BT, (b) 17:30 BT, and (c) 18:00 BT 18 April 2009 (unit: dBz)

1.3 雷达反射率垂直剖面的分析

图 2 给出了 4 月 18 日 17:00、17:30 和 18:00

的张家口雷达站的雷达反射率垂直剖面。这三个垂直剖面是随着云带的移动移速确定的同一剖面，剖面位置是相应左图中的实直线，该剖面反映的是

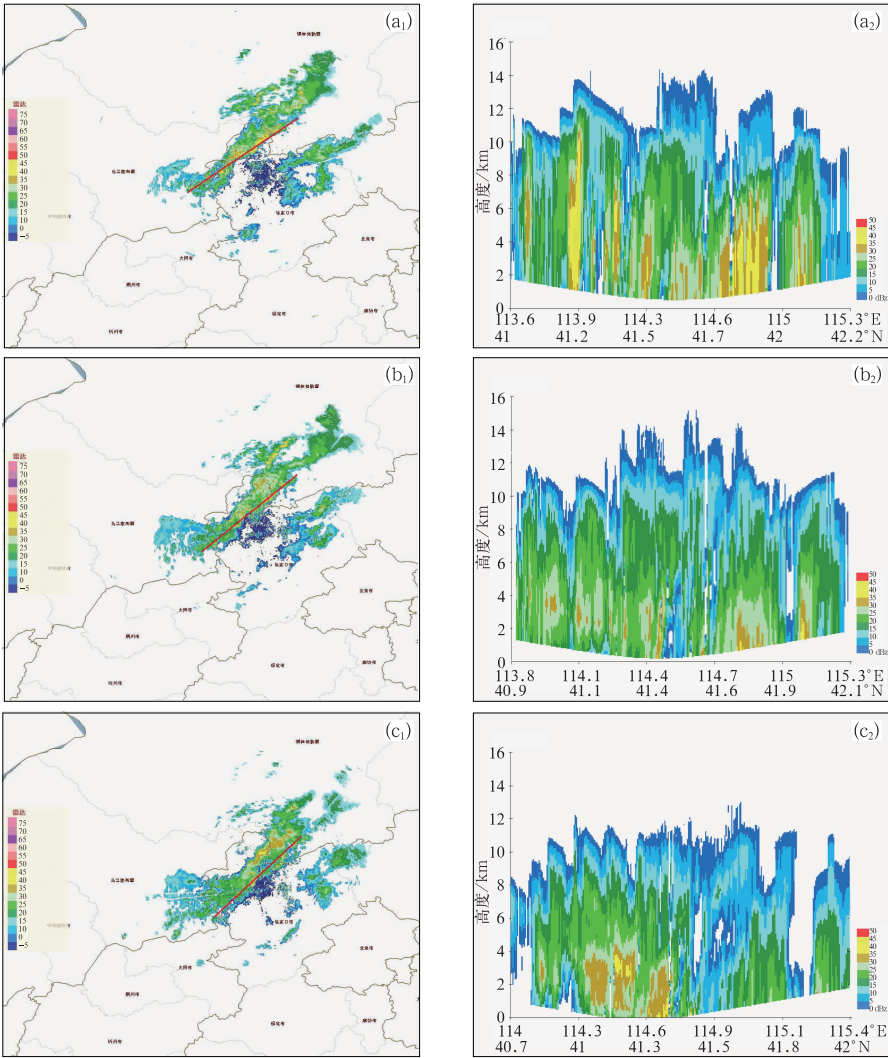


图 2 2009 年 4 月 18 日 17:00(a)、17:30(b)和 18:00(c)张家口雷达站的雷达反射率垂直剖面(单位: dBz)

Fig. 2 Vertical sections of radar equivalent reflectivity factor image at
(a) 17:00 BT, (b) 17:30 BT, and (c) 18:00 BT 18 April 2009 (unit: dBz)

积层混合云的某一剖面的垂直结构及随时间的变化。这一剖面能够很好地反映出积层混合云相互跨接粘连的结构,大片层状云区域中镶嵌了几个对流云区域。从云系结构的变化看,积层混合云是由对流云和层状云之间相互粘连跨接形成,然后水平方向各对流云之间相互并合并充分混合,而且,几个对流云回波中心相互并合形成一个较大的对流回波中心。从垂直剖面图可以看出,层状云区中镶嵌多个对流云的回波中心,中心最大值 45 dBz。这反映,云水总体分布不均,存在多个含水量中心。

1.4 物理特征垂直概念图

通过分析张家口雷达站的雷达反射率的垂直剖面结构,可以大致判断该云系的流场结构特征。如图 3 所示,该云系是积层连接式的积层混合云。积层连接型积层混合云的发展过程主要是先出现积云对流,然后经过跨接、并合、扩展层化而具有层状云特征,在低层水平混合的同时,垂直方向上的对流得到一定的发展,从而形成低层水平混合、垂直方向上的积下层形态的积层混合云。从图 3 可以看出,在对流云区域,也就是含水量的大值中心区存在上升气流。而在对流云中心的连接处,积云与层云跨接粘连的区域存在相对下沉气流。

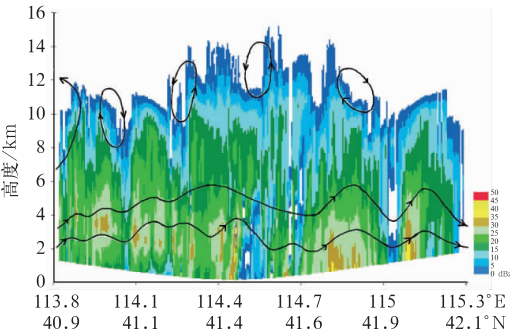


图 3 2009 年 4 月 18 日 17:30 云流场结构分布概念图(张家口站)

Fig. 3 Conceptual graph of flow field structure at 17:30 BT 18 April 2009 (Zhangjiakou Station)

2 数值模拟方案介绍

本文使用新一代非静力平衡中尺度数值模式 WRF 的最新版本 WRF V3.2 进行模拟。WRF 模式对各种天气和中小尺度系统都具有较强的模拟能力。

如图 4 显示,模式区域设置采用三重嵌套,三重嵌套区域的格距各为:27、9 和 3 km。积云对流参数化方案,对第一层区域及第二层区域采用 New Grell 方案,第三层区域不采用积云对流参数化方案。云微物理过程方案采用 Morrison 双参数方案,包含六种水成物:雨水、云水、冰晶、霰(雹)、水汽、雪花以及多种液态、固态和混合态过程。该方案是 WRF 中较为复杂的云微物理过程方案,可以很好地反映云雨过程。边界层参数化方案选择 MYJ 方案。

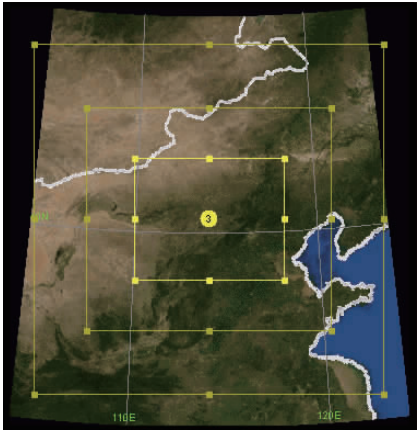


图 4 模式区域设置
Fig. 4 Simulation domains

本文所用的背景场资料为 NCEP 再分析资料。时间分辨率 6 小时,空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。模拟时间 2009 年 4 月 18 日 08:00 到 19 日 08:00。模拟区域如图 4 所示。模拟区域中心点设在 40.5°N 、 114°E 。模式每隔半小时输出一次结果,以此来研究积层混合云降水发生发展的过程及其结构。

3 模拟结果对比及分析

3.1 地面降水特征对比与分析

如图 5 所示,通过对比降水实况图与 24 h 模拟结果, WRF 比较成功地模拟了降水的级别以及雨带的分布,模式模拟的降水落区与实况比较接近,模拟的雨带是沿着西南—东北分布的,也与实况接近,降水中心强度的模拟也比较一致,实际降水中心位于河南南部地区,模拟区域与实际降水区域吻合,中心最大降水分别为实际 45 mm,模拟值为 40 mm 以上。目标区域山西北部 and 河北交界处降水 5 mm。

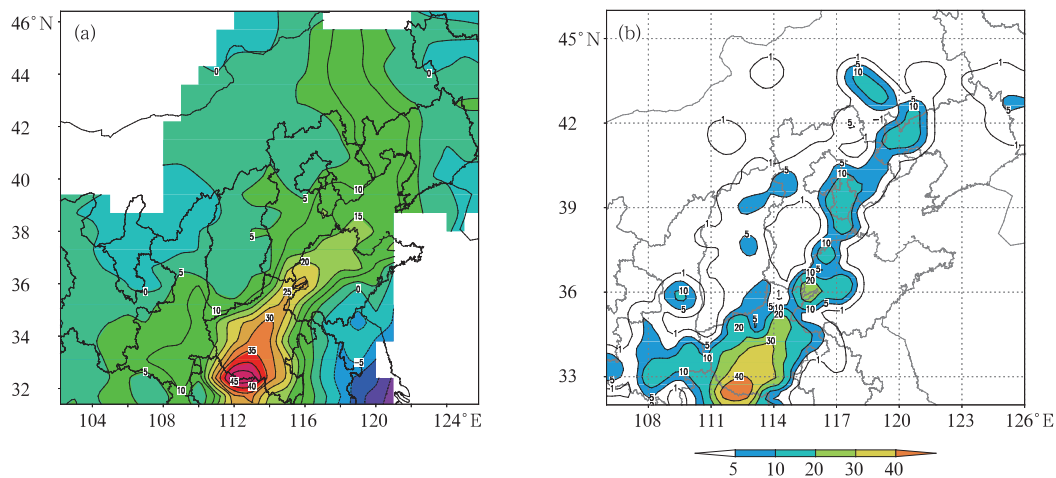


图 5 2009 年 4 月 19 日 08:00 24 小时降水量 (单位:mm)
(a)实测降水量,(b)第一层区域模拟降水量
Fig. 5 The observed (a) and simulated (b) 24 h precipitation at 08:00 BT 19 April 2009 (unit: mm)

3.2 雷达组合反射率及雷达反射率垂直剖面对比与分析

图 6 是模式模拟的 17 时和 17 时 30 分的雷达

组合反射率及雷达反射率垂直剖面,分别与图 2 实测的雷达反射率及垂直剖面相对应。模拟的雷达的组合反射率与实况对应较好,也是东北—西南方向的带状云系,反映了积层混合云降水回波特征。均

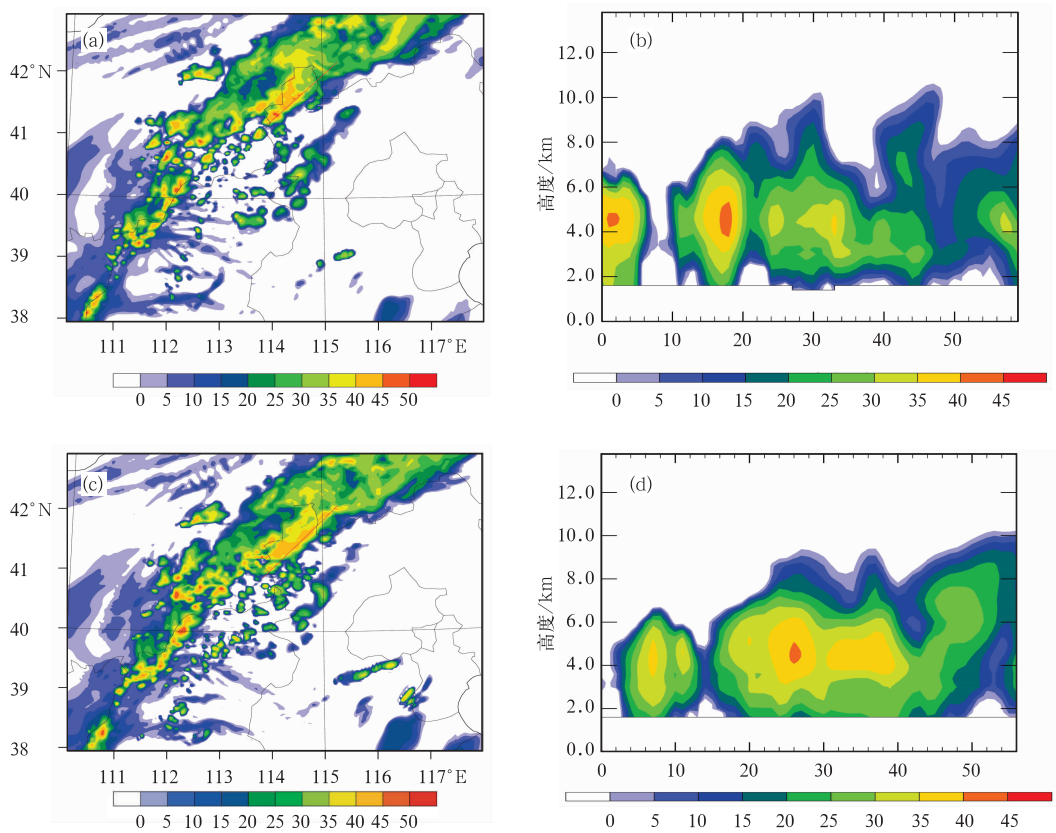


图 6 2009 年 4 月 18 日 17:00(a,b)和 17:30(c,d)模拟的雷达组合反射率(a,c)及
雷达反射率垂直剖面(b,d)(单位:dBz)
Fig. 6 Simulation results of radar reflectivity (a,c) and its vertical section (b,d)
at 17:00 BT 18 April (a,b) and 17:30 BT 18 April (c,d) 2009 (unit: dBz)

匀的回波层中镶嵌着柱状对流云回波,回波最大值为 45 dBz,与实况基本一致。垂直剖面图也与实测结果基本一致,很好地反映出积层混合云相互跨接粘连的结构。从云系结构变化来看,对流云和层状云之间相互粘连跨接形成,然后水平方向各对流云之间相互合并,而且,几个对流云回波中心有相互合并形成一个较大的对流回波中心的趋势。垂直剖面

的回波形状、中心值分布与实测的垂直剖面较一致。

3.3 微物理模拟结果分析

云的微物理场是没有观测资料的,但在模拟结果接近实况的前提下,模拟给出的云的微物理场是有参考价值的,为此对微物理模拟结果进行分析是可行的。

为了更好地了解此次积层混合云的结构,选取对流云和层状云结合较多的区域做一剖面。取 4 月 18 日 17 时的雷达组合反射率图(如图 7 所示),以

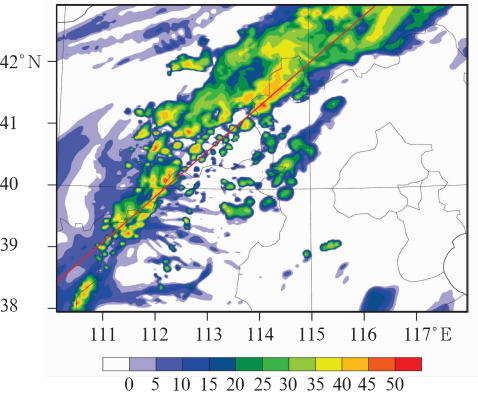


图 7 2009 年 4 月 18 日 17:00 雷达组合反射率所取的剖面位置

Fig. 7 Profile position of radar max reflectivity at 17:00 BT 18 April 2009

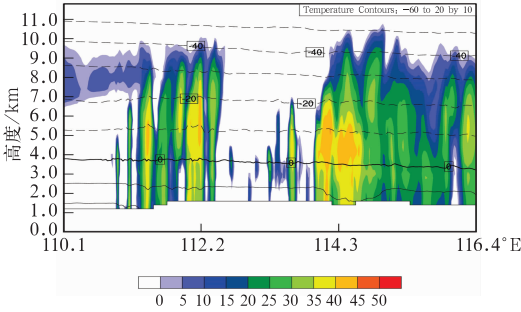


图 8 雷达反射率垂直剖面(单位: dBZ)

Fig. 8 Vertical section of radar reflectivity image (unit: dBZ)

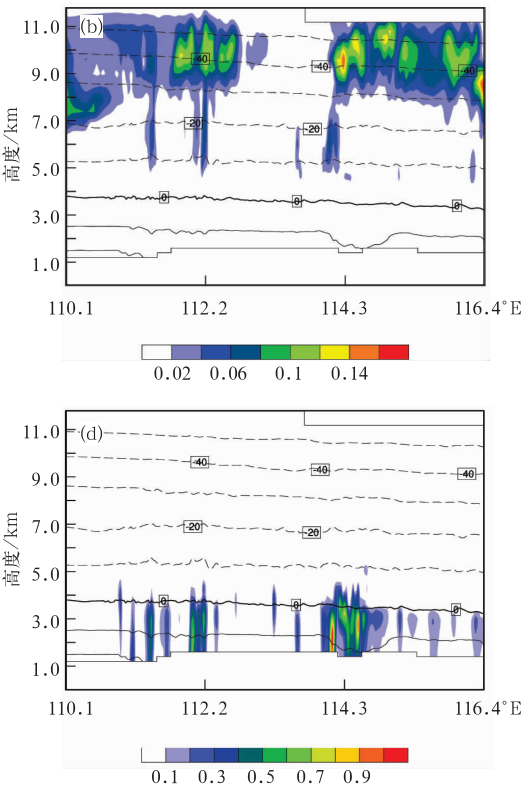
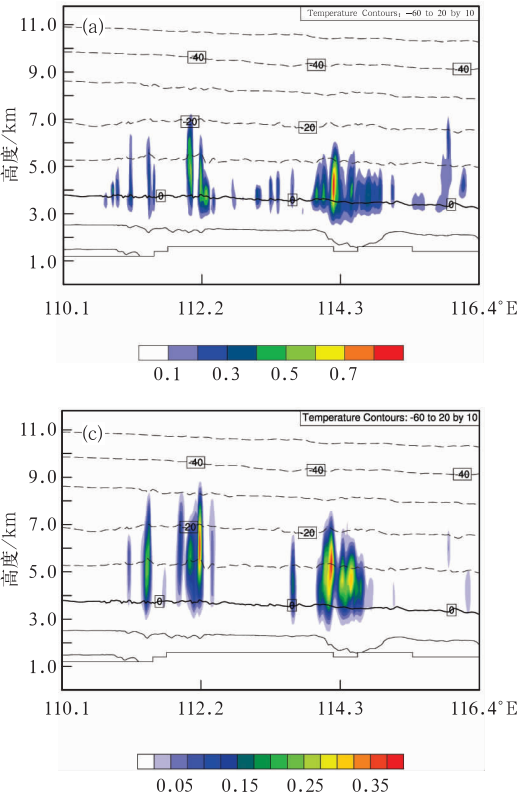


图 9 云水(a)、冰晶(b)、霰(c)和雨水(d)含水量的垂直剖面(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 9 Vertical sections of cloud water (a), ice (b), graupel (c), and rain water (d) content (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

41°N、113.7°E,与经线方向 48°夹角做直线,沿这条直线做垂直剖面分析此次积层混合云的详细结构。图 8 可以看出,此次积层混合云系云顶并不是很高,云顶在 11 km 左右,云顶的起伏并不是很大,云系内部分布有多个对流中心,各对流中心相互粘连、跨越,并与云系在水平方向上充分地混合。各对流中心区域的最大回波基本在 45 dBz 左右,发展最旺盛的对流中心最大回波在 50 dBz 左右。如图 9 所示,此次积层混合云降水云系水成物含量总体分布不均,存在多个含水量中心。大片层状云区域中镶嵌了多个对流云区域,云中液态云水最高至 7 km 的 -20℃层,其上含水量很小。云水的含水量高值区出现在 0~-10℃之间,约为 $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。-10℃层附近存在少量的冰晶,最大含水量值约为 $0.03\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,高层分布几个冰晶的大值区,在 9 km 左右,最大含水量约为 $0.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与下层的云水中心对应,存在播撒-供给机制。在各对流中心区域,在 0℃层到-5℃层之间存在霰含水量高值区,最大值达到 $1.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,说明该层存在较多的霰粒子。在 0℃层到 5℃层区域还存有尚未完全融化的霰粒子,霰粒子在 0℃层下融化转化为雨水。雨水主要在 0℃层以下,雨水的大值中心与云水、霰的大值中心相对应,为 $0.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,高层向中层掉落的冰晶和 0℃层到-5℃层的霰粒子,通过 Bergeron 过程,不断地消耗过冷云水,成为雨水的主要来源。可见,播撒-供给机制是该云系主要降水机制。0℃层以上,也有少量过冷雨水存在,存在云水向雨水的直接转换。可见,该降水云系中暖云降水机制共存也发挥了作用。

3.4 动力场特征模拟结果分析

图 10 是图 7 所取剖面的垂直速度分布情况,在低层对流云区域,垂直上升速度较大,约为 $0.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在 400 至 200 hPa 对流云区域的旁侧有较明显的下沉气流,约为 $0.15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。结合 500 和 700 hPa 散度场分析,云区低层存在辐合,高层存在辐散。此种配置有利于维持云系的发展。对流云区域辐合较强,700 hPa 辐合是最强的。

3.5 层积混合云的降水机制特点的探讨

在一般的层状云中,由于层状云范围宽广,垂直上升气流相对较小且较为均匀,云中下部过冷云水粒子上升的运行轨迹是简单的先上升再下降的曲

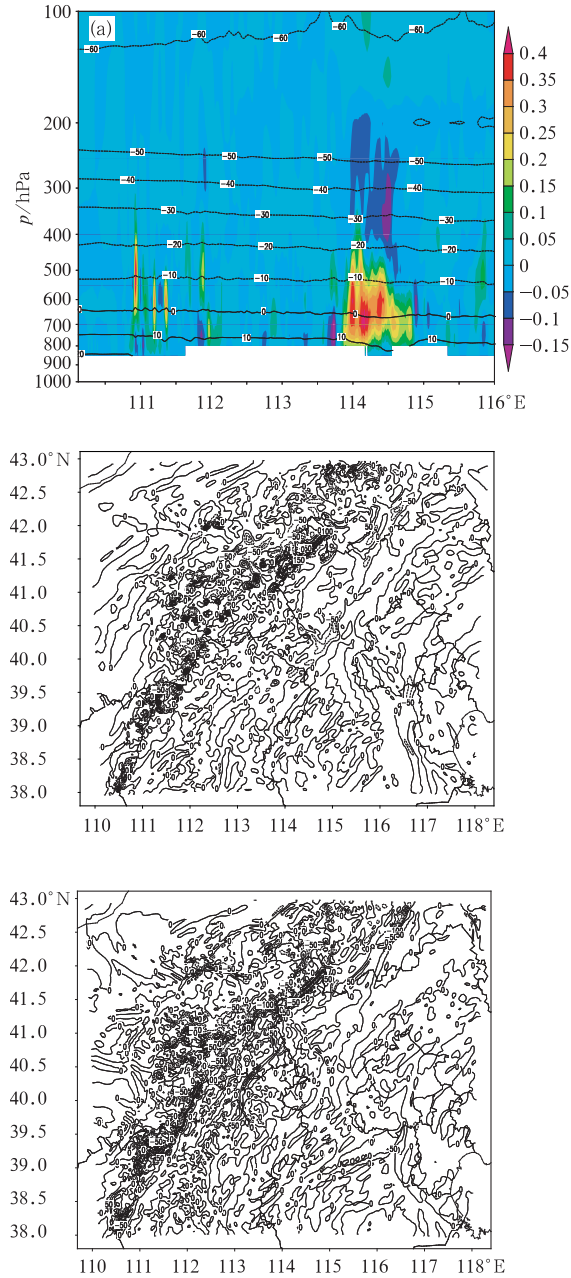


图 10 2009 年 4 月 18 日 17:00(a)(图 7 中剖面)的垂直速度剖面(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), (b)500 hPa 和(c)700 hPa 散度场(单位: 10^5 s^{-1})
Fig. 10 The vertical section of w (a, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 500 hPa (b) and 700 hPa(c) divergence fields at 17:00 BT 18 April 2009 (unit: 10^5 s^{-1})

线。在上升中,水粒子可凝结增长,在低于 0℃时,一些粒子可转化为冰晶,在高于冰面饱和的情况下凝华增长,在存在过冷水的云区,还可经过贝吉隆过程,迅速长大成大冰晶,还可发生淞附增长,长大的粒子向下落时,对下层云播撒,再通过冲并和凝结增长,继续长大,掉落出云形成降水。这样的“播撒-供

给”机制相对简单。在积层混合云系中,在对流云区的气流上升不均匀,且在对流泡旁也有下沉气流,降水粒子的增长运行轨迹不再是简单的上升,可以发生上下多次循环增长,“播撒-供给”机制可在云的上下层间双向进行,云中粒子群可以长得更大。层状云中的已有的水凝物粒子进入内嵌的积云对流泡中,能增长得更为充分。在本例中,根据高层冰晶大值区和低层云水大值区的对应情况,可以看出高层的一些冰晶掉入 0°C 层到 -10°C 层之间,并与该层丰富的霰粒子一起消耗过冷水,凝结增长形成降水。因此,积层混合云不仅在层状云区有层状云的简单的“播撒-供给”机制,或在积状云区有粒子群的循环增长机制,而且可以发生层云—积云间的粒子群交换。从而,积层混合云系充分发挥了层状云和对流云各自的优势,降水效率较高。

4 结论与讨论

(1) 观测结果表明,高层槽前,中层切变线,地面锋面,形成此次降水过程。降水云系呈西南—东北分布,均匀的回波层中镶嵌着柱状对流云回波,雨带向东南方向移动。

(2) WRF 模拟得到的结果基本反映出此次积层混合云降水的实况雨量及降水回波特征。

(3) 此次积层混合云的水凝物含水量分布不均匀,对流云和层状云相互粘连跨接,水平方向充分混合,雨水的大值中心、云水的大值中心及冰晶的大值区相互对应,存在播撒-供给机制。

(4) 从动力场来看,在低层对流云区域,垂直上升速度较大。高层对流云区域的旁侧有较明显的下沉气流。云区低层存在辐合,高层存在辐散。此种配置有利于维持云系的发展。

(5) 积层混合云不仅在层状云区有层状云的简单的“播撒-供给”机制,或在积状云区有粒子群的循环增长机制,而且可以发生层云—积云间的粒子群交换。

参考文献

- [1] Anagnostou E N. 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] Fabry F, Zawadzki I, Cohn S. The influence of stratiform precipitation on shallow convective rain: A case study[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(12):3312-3325.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 宫福久,周德平,陈宝君. 东北冷涡云物理及导变技术[M]. 北京:气象出版社, 2005.
- [7] Farley R D, Nguyen P, Orville H D. Numerical simulation of cloud seeding using a three-dimensional cloud model[J]. J Wea Modif, 1994, 26(1):113-124.
- [8] Meryers M P, DeMott P J, Cotton W R. Comparison of seeded and non-seeded orographic cloud simulations with an explicit cloud model[J]. J Appl Meteor, 1995, 34: 834-846.
- [9] 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.
- [10] 许焕斌,王思微. 三维中- β 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, 05: 167-171.
- [11] Yuter S E, Houze R A, Smith E A, et al. Physical characterization of tropical oceanic convection observed in KWAJEX[J]. J Applied Meteorology, 2005, 44(4):385-415.
- [12] Orville H D, Hirsch J H, Farley R D. Further results on numerical cloud seeding simulations of stratiform-type clouds[J]. J Wea Modif, 1987, 19(1): 57-61.
- [13] Fuhrer O, Schaer C. Effects of moist convection on flow past 2D-topography (2002-10MntMet) [C]. Proceedings of the 10th AMS Conference on Mountain Meteorology, 2002, 10.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 王维佳,陶退龄. 一维半地形积层混合云模式简介[J]. 四川气象, 2006, 1:43-45.
- [17] 王维佳,陶退龄. 地形积层混合云模式数值试验研究[J]. 四川气象, 2007, 10:9-32.
- [18] 于翡,姚展予. 一次积层混合云降水实例的数值模拟分析[J]. 气象, 2009, 35(12):3-11.
- [19] 于丽娟,姚展予. 一次层状云飞机播云试验的云微物理特征及响应分析[J]. 气象, 2009, 35(10):8-24.
- [20] 辛乐,姚展予. 一次积层混合云飞机播云对云微物理过程影响效应的分析[J]. 气象, 2011, 37(2):194-202.