积云并合在强对流系统形成中的作用

付丹红[1,2] 郭学良[1]

1 中国科学院大气物理研究所云降水与强风暴实验室，北京 100029
2 中国科学院研究生院，北京 100049

摘 要 利用中尺度非静力平衡模式（MM5V3），模拟研究了积云并合过程在北京 2001 年 8 月 23 日一次产生强降水和冰雹对流天气形成中的作用。研究结果表明，积云并合在此次强中尺度对流系统（MCS）形成中有非常重要作用。整个形成过程经历了从单体并合、积云团并合和强中心并合的多尺度并合过程。首先，相邻孤立对流单体之间通过在中层形成云桥并合成为积云团，接着相邻积云团之间也通过中层云桥并合形成具有多个强中心的中尺度对流系统，最后，中尺度对流系统内强中心实现并合。而强中心并合过程伴随着强降水、大风等剧烈天气的产生。积云下沉气流对于积云并合有着重要作用，由强辐散出流形成的上升气流及与环境风相互作用有利于并合的形成和发展。并合过程导致云内上升-下沉气流增强，对流运动发展加强，有利于水汽转化，形成大量过冷云水和冰相粒子。大量冰晶和霰的形成有利于强降水的产生。

关键词 MM5 中尺度对流系统（MCS） 积云并合 强降水
文章编号 1006－9895（2007）04－0635－10 **中图分类号** P426.5 **文献标识码** A

The Role of Cumulus Merger in a Severe Mesoscale Convective System

FU Dan-Hong[1,2] and GUO Xue-Liang[1]

1 *Laboratory of Cloud and Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029
2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049

Abstract The role of cumulus merger process has been widely concerned in investigations of development and enhancement of the cloud echo area, mixed-phase microphysics, rainfall and cloud-ground lighting activities. Some early studies have shown that the average merged convective system is able to produce approximately 30 times more rainfall and mixed-phase ice mass than the mean single-cell system. These studies, however, generally adopted idealized methods to initiate convection, which could not objectively reflect the natural cloud merging processes. In addition, the previous studies were primarily conducted in tropical region or in maritime continent, and those focusing on cumulus merger process in continent monsoon climatic region with complex terrain condition were relatively very few. This study will focus on the formation of mesoscale convective system (MCS) due to cloud merger process by a mesoscale cloud-resolving model MM5 to understand how a MCS is formed from single cells by cloud merger.

Numerical experiments are performed using the 5th generation of the Pennsylvania State University－National Center for Atmospheric Research Mesoscale Model (MM5v3). The initial and boundary conditions data are constructed from the Global analyses of the National Center for Environmental Prediction (NCEP) with 1°×1°resolution. Tri-nested grid domains are used in the current simulation, and domain is centered at (40° N, 116° W). Domain 1 has a resolution of 18 km with 85×85 grid points; domain 2 has a grid resolution of 6 km with grid points of

收稿日期 2006－02－06 收到，2006－05－08 收到修改稿
资助项目 国家自然科学基金资助项目 40575003、40333033，国家科技支撑计划重点项目 2006BAC12B03
作者简介 付丹红，女，1977 年出生，博士研究生，研究实习员，主要从事云降水物理方向的研究。E-mail：fudanhong@mail.iap.ac.cn

85×85; domain 3 has 2 km grid size and 127×127 grid points. All domains have 23 vertical layers, with sigma level. The Grell scheme of convective parameterization is used for domain 1 and resolved-scale moist processes follow the Schultz scheme for cloud microphysics. Domain 2 only chooses the Schultz microphysics. The Goddard microphysics is used for domain 3. The parameterization chosen to represent the planetary boundary layer is the Blackadar scheme and RRTM long-wave scheme is used. The 25-category US Geological Survey global land-use distribution in MM5 is used with 5 min resolution in domain 1 and 2 min in domain 2 and 30 s in domain 3. The lateral boundary conditions are relaxation/inflow-outflow. The simulation was performed from 0800 to 2300 LST 23 August 2001. The used time steps are 54, 18 and 6 s.

The preliminary results suggest that the merger processes occurring among isolated convective cells forming in high mountain region during southerly moving process play a critical role in forming the MCS and severe precipitating weather events, like hailfall, heavy rain, downburst in the region. The formation of the MCS experiences multi-scale merging processes from single-cell scale merging to cloud cluster-scale merging, and high core merging. The merger process can apparently alter cloud dynamical and microphysical properties through enhancing both low- and middle-level forcing. The explosive convective development can be found during merging process.

Key words MM5, MCS, cloud merger, precipitation

1 引言

积云并合过程是指相邻对流单体之间实现合并形成一个更庞大、复杂的单体或复合系统。自然界的积云在其生命史中有些一直保持着独立单体形式，而另一些在发展中单体之间发生合并，形成较大的对流复合系统。积云并合是一个很复杂的非线性过程。积云并合在积云发展和云复合系统形成中的作用之所以在国际上引起广泛的兴趣和研究[1~15]，主要原因有两个方面，一个是单体并合使云体尺度和强度发生变化，可引起地面降水显著增加。此方面的一个重要应用是通过人工播撒促使单体发生并合以增加地面降水[16~24]，另一方面是对风暴单体发生并合的潜在环境条件及并合可能引起的大风、强降水、闪电等灾害天气的预报问题[15]。

积云并合的早期研究主要集中在从普通常规雷达回波的结构和回波估计的降水变化揭示并合过程[6]，这些研究表明，积云单体并合后可立刻发生降水增加现象。尽管个别研究采用了飞机探测云内上升气流，但受观测技术的限制，没有完全与云的动力学特征结合起来，因此无法得到积云并合发生的动力学原因。20 世纪 70 年代中期，多普勒雷达的问世使积云动力学特征的观测成为可能，这样就出现了从云动力学和微物理学结合来研究云并合机理，发现积云单体产生的下沉气流相互作用可导致单体并合发生。数值模式是了解云相互作用、并合过程产生机理的重要研究手段，一些数值模拟研究[8~12, 14]发现，云并合的主要机制是单体间气压梯度力和相邻两云的下沉气流引起的辐合抬升作用。因计算机资源的限制，这些研究基本是利用云模式，从积云尺度研究并合问题，而且普遍采用人为的对流启动方式，无法客观地再现整个自然积云并合过程，没有从中尺度强对流系统形成的角度研究并合过程所起的作用。另外，一些有关并合发生前的潜在自然环境条件等问题也没有完全澄清，而这些问题对灾害天气的预报是至关重要的。

中尺度对流系统是北京地区春夏季产生局地大风、强降水和闪电的重要天气系统[25, 26]。基于此，本研究采用可分辨云的中尺度非静力模式（MM5）通过模拟北京 2001 年 8 月 23 日的一次强中尺度对流系统产生和发展的整个过程，探讨积云并合过程的作用、产生并合的机理。中尺度对流系统是产生暴雨、冰雹和大风等强天气现象的重要系统，因此，研究其形成机理对提高预报水平具有重要意义。

2 积云并合的观测结果

2001 年 8 月 23 日受蒙古地区附近形成的强涡旋系统的影响，在南下冷空气与北京西北部地形性加热及来自南面的地面强暖湿气流共同作用下，14:57（北京时，下同）（图 1a），北京气象台多普勒雷达探测到在西北山区形成多个零散的孤立对流单体群，最大回波强度在 45 dBZ 左右，单体特征较为明显，单体群的水平尺度范围约 10～20 km。这是孤立对流单体的基本水平尺度。在 15:58（图

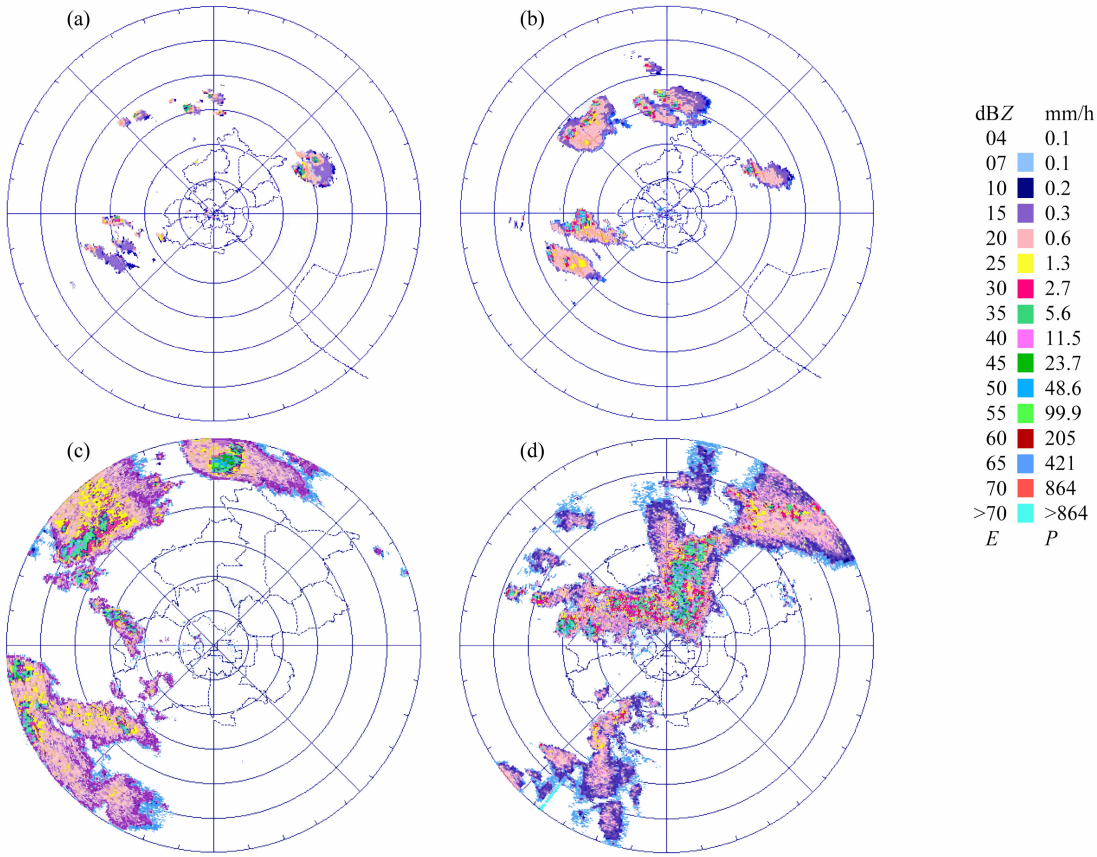

图 1　2001 年 8 月 23 日北京气象台雷达观测的对流云回波（E）及降水强度（P）分布随时间的演变：(a) 14：57；(b) 15：58；(c) 17:28；(d) 19:27。雷达仰角 2.5°；(a、b) 的量程为 300 km，(c、d) 的量程为 150 km

Fig. 1　The horizontal distributions of observational radar reflectivity (E) and precipitation intensity (P) at an elevation of 2.5°: (a) 1457 LST; (b) 1558 LST; (c) 1728 LST; (d) 1927 LST. The detection range in (a) and (b) is 300 km, and that in (c) and (d) is 150 km

1b）时，四个单体发生单体并合，形成两个水平尺度达到 50 km 以上的积云团，对流得到明显的加强和发展，最大回波强度达 50 dBZ 左右，但面积很小。积云团进一步发展，到 17:28（图 1c），积云团的水平尺度已经超过 100 km，与其前部水平范围约 50 km 的积云团发生并合形成对流系统。之后，系统继续加强，主要表现在系统内部的强中心发生并合，形成 50 dBZ 强回波带，最大回波强度达到 55 dBZ（图 1d）。由此可见，强对流系统的形成具有多尺度并合过程发生，首先是尺度小的单体并合形成较大尺度的单体群，然后单体群发生并合形成更大尺度、多强中心的对流系统，最后系统内的强中心并合形成具有强中心带的强对流系统。

3　模拟研究和模式设计

研究采用 PSU/NCAR 中尺度非静力平衡模式（MM5V36）全物理过程方案进行模拟分析，初始场为 NCEP（the National Centers for Environmental Prediction）1°×1°GRIB 资料。模拟采用双向三重嵌套网格，网格中心位置为（40°N，116°E），格距分别为 18 km、6 km 和 2 km，水平格点数分别为（85，85）、（85，85）和（127，127），垂直方向为 σ 坐标，共 23 层。模式顶为 100 hPa。采用 LAMBERT 地形投影；地形和下垫面分别为 NCAR 5 min、2 min 和 30 s 地形资料以及 24 类地表特征数据；并且均采用高分辨率的 Blackadar 行星边界层模式以及 RRTM 长波大气辐射方案；侧边界为时变松弛边界条件。模拟时间为 08 时至 23 时，积分 15 小时（900 min）。降水物理过程第一层采用 Grell 积云参数化方案和 Schultz 微物理显式方案，第二层网格采用 Schultz 微物理显式方案，第三层网格采用 Goddard 微物理显式方案。

4 模拟结果分析

4.1 模拟的积云并合过程

为了再现观测到的积云并合过程，图2给出了500 hPa等压面上回波及风矢量分布的时间演变。根据雷达观测和模拟结果比较分析认为，积云并合过程分为单体并合、积云团并合和对流系统内部强中心并合三个阶段。14:00时（图2a），对流单体位于北京以北的山地地区，最大回波达到25 dBZ以上，在高空西风气流影响下，逐渐向东移动。14:15时（图2b），对流单体发展加强出现并合现象，最大回波达到45 dBZ以上。14:30时（图2c），对流单体完全并合，形成具有多个强中心的积云团。在高空风的影响下，积云团向东南方向移动逐渐加强，到16:15时（图2d），北部一些对流单体出现并合现象，具有多个强中心的积云团云体范围约100 km。16:30时（图2e），积云团开始逐渐并合。16:45时（图2f），积云团基本完全并合，云体水平范围增大。这个过程与雷达观测的情况很相似。

为了更详细地显示积云并合过程，图2h、g分别给出了第三层网格的回波分布。17:15时（图2h），积云团水平范围超过100 km，具有多个强中心，前后两个积云团发生并合，形成具有多个强中心的对流系统（图2g）。17:45时（图2i），对流系统具有多个大于45 dBZ的强中心。随着对流系统的移动发展，强中心逐渐并合，形成范围较大的中心（图2j），最终形成两个大于45 dBZ的强中心（图2k）。由于并合过程中，出现强降水、大风天气现象，大于45 dBZ的强回波范围逐渐减小，中尺度对流系统进入消散阶段（图2l）。

4.2 积云并合机制的分析

从以上分析可以看到，此次强对流系统的形成具有多尺度并合过程发生。首先是尺度小的单体并合形成较大尺度的单体群，然后单体群发生并合形成更大尺度、多强中心的对流系统，最后系统内的强中心并合形成具有强中心带的强对流系统。

为分析发生并合现象的原因和机理，图3分别给出了沿图2直线AB、CD和EF的回波及风矢量分布随时间变化的垂直剖面。14:00时（图3a），单体C_A、C_B和C_C位于山地地区。单体C_A处于初始阶段，最大回波位于－20℃层以上，高层含有大量雪和霰粒子。单体C_B处于发展阶段，最大回波区分别位于－20℃层上下，0℃层以上为上升气流区。单体C_C处于发展成熟阶段，云内有强上升气流，最大回波位于0℃层上下，表明云中含有大量冰相粒子和雨水。14:15时（图3b），单体C_A和C_B及单体C_B和C_C之间分别发生并合。在C_A和C_B两个相邻单体之间，由于粒子拖曳和融化作用，单体C_A前部的下沉气流发展加强[24, 25]，下沉冷空气在地面形成强辐散，迫使其前部暖湿空气抬升，在0℃层以上形成云桥。在0℃层附近，单体C_A前部略向下倾斜的环境风与上升气流相互作用形成一个水平风速较大的区域，较大的水平风导致上升运动不能更好地向高层发展，在0℃层附近导致更多的水汽转化，有利于云桥的发展加强。在C_B和C_C两相邻单体之间，单体C_B前部0℃层以下为弱下沉气流区，下沉冷空气与单体C_C后部强上升气流相互作用在0℃层附近形成云桥。通过相对涡度计算发现，在0℃层附近存在较大的风切变（约2.5×10^{-4} s^{-1}），有利于云桥的形成和发展。14:30（图3c），单体间的云桥发展加强，单体基本并合，并逐渐发展成为具有多个强中心的积云团，云体范围较大。16:15（图3d），C_D的最大回波位于－20℃层以上，云内为上升气流，在0℃层以上C_D前部环境风略向下倾斜，这主要是由于单体内部下沉气流的影响造成的。积云团C_E通过单体并合形成，其上部已经完全并合，而低层处于分离状态并具有两个强中心，云体内部存在上升－下沉气流。16:30时（图3e），由于降水粒子的作用，C_D前部为下沉气流，强辐散出流抬升暖湿空气在0℃层附近形成云桥，云体内部下沉气流与环境风相互作用在0℃层附近形成的水平风分量有利于云桥的发展加强，C_D和C_E出现并合现象。16:45时（图3f），C_D和C_E之间云桥得到进一步加强，中高层完全并合。为了更好地了解积云团并合过程中的垂直结构，对应图2g～l、图3g～l为第三层网格的垂直结构。17:15时（图3g），C_F和积云团C_G之间在0℃层附近出现云桥，干冷空气从C_F后不断进入云体，在降水粒子的作用下，0℃层以下形成强下沉气流，下沉冷空气的抬升作用，在C_F和积云团C_G之间出现上升气流，0℃层附近形成云桥。上升气流随高度发展加强，在0℃层附近最大，与C_F前部略向下倾斜的环境风相互作用促进云桥发展。另外，由于高层强风的影响，C_F和积云团C_G在300 hPa以上也形成云桥。

对流系统下坡过程中，云桥得到进一步加强，导致单体进一步并合，并合体存在多个大于 45 dBZ 的强中心（图 3h）。

到 17：45 时（图 3i），积云团发生完全并合，形成具有多强中心的对流系统，对流云系中有比较规则的上升-下沉气流分布，对应着大于 45 dBZ 的

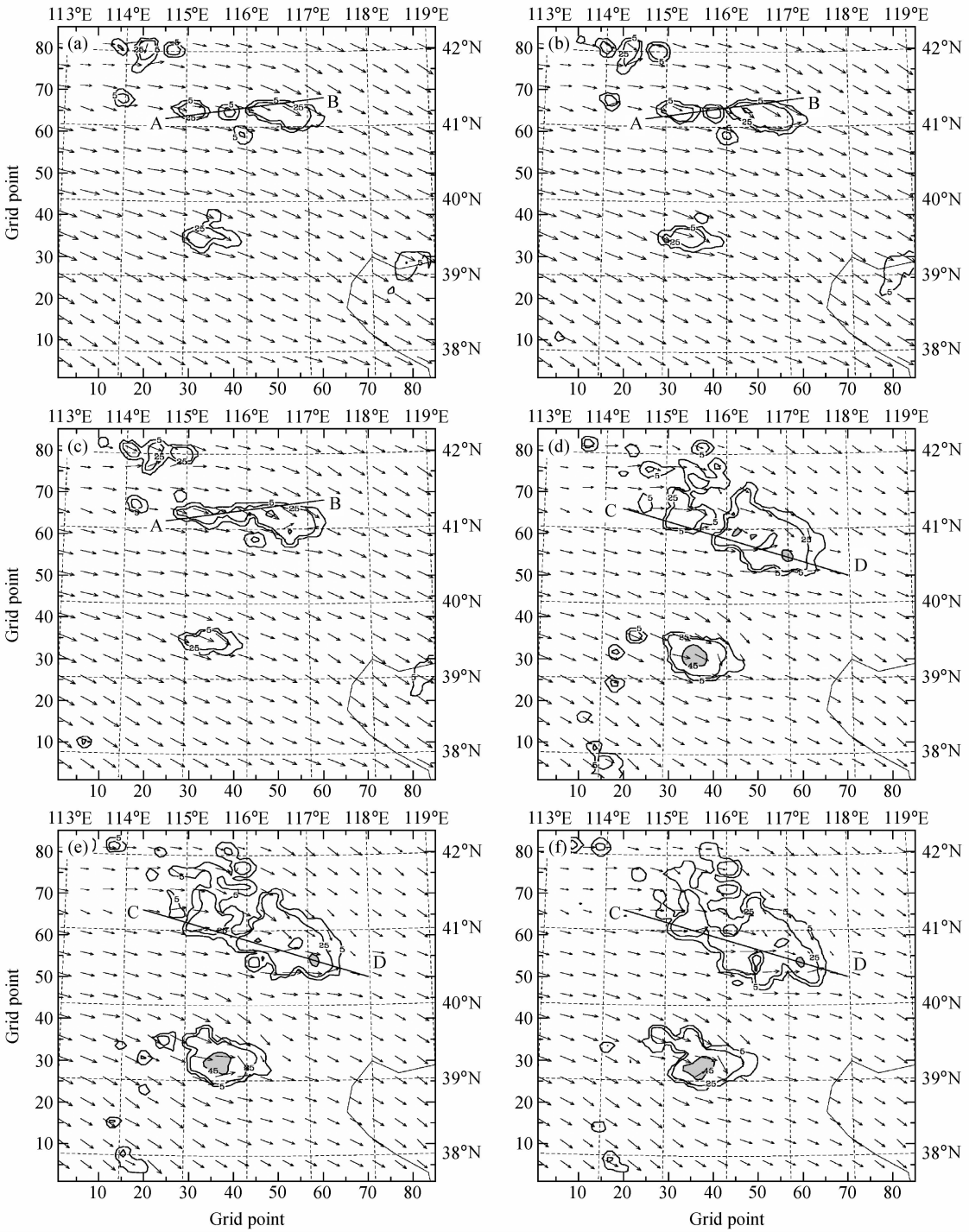

图 2　500 hPa 等压面上第二层网格（a～f）和第三层网格（g～l）回波（单位：dBZ）及风矢量分布随时间演变：(a) 14：00；(b) 14：15；(c) 14：30；(d) 16：15；(e) 16：30；(f) 16：45；(g) 17：15；(h) 17：30；(i) 17：45；(j) 18：00；(k) 18：15；(l) 18：30

Fig. 2　Time sequences of the simulated radar echo (dBZ) and wind vectors at 500 hPa in domain 2 (a－f) and domain 3 (g－f)：(a) 1400 LST；(b) 1415 LST；(c) 1430 LST；(d) 1615 LST；(e) 1630 LST；(f) 1645 LST；(g) 1715 LST；(h) 1730 LST；(i) 1745 LST；(j) 1800 LST；(k) 1815 LST；(l) 1830 LST

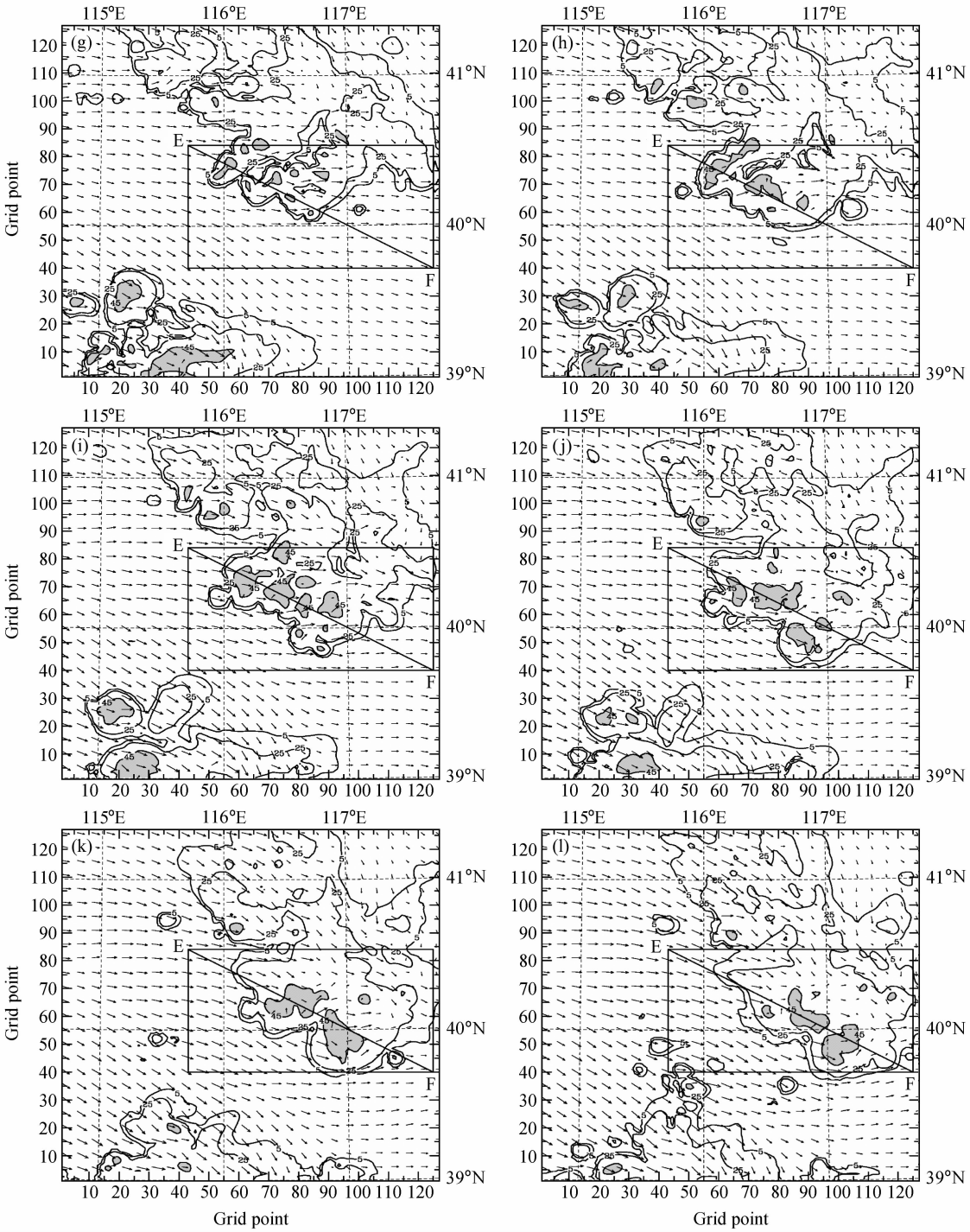

图 2 （续）

Fig. 2 （Continued）

C_1、C_2和 C_3三个强回波中心。C_1 和 C_3主要由下沉气流控制，C_2为上升气流区。C_1 的强下沉气流造成的向前下坡出流与 C_3向后的辐散出流相互作用形成辐合上升使得 C_2进一步发展加强。同时，C_3的强下沉气流形成的向前辐散出流，迫使中尺度对流云团前部的暖湿空气得到抬升，形成上升气流区，大量水汽进入云系，生成新的强中心 C_4。到 18:00 时（图 3j），C_2和 C_3出现并合现象，C_1 的下沉气流与 C_2的下沉气流相互作用，在 0℃层附近形成强上升区，三个强中心并合。此时，C_4得到展进一步

加强。

18:15 时（图 3f），C_1 下坡后与 C_2+C_3 完全并合，0℃层以上为上升气流区，最大回波为 50 dBZ，0℃层以下为下沉气流区，最大回波为 51.1 dBZ，$C_1+C_2+C_3$ 的下沉气流与 C_4 下部的下沉气流（辐散出流）相互作用在 0℃层附近形成辐合上升区。

18:30 时（图 3g），强中心 $C_1+C_2+C_3$ 与 C_4 在 550 hPa 层以下发生并合，此时强中心完全并合成为一个强回波中心。并合后回波顶高位于－20℃层附近，最大回波位于 0℃层上下，分别为 50.7 dBZ 和 51.2 dBZ。干冷空气从中尺度对流云团的中后部进入云体，地面出现强降水和大风天气过程。

从分析发现，单一流型（单体之间全部是上升气流）的合并只发生在两个小的非降水性单体之

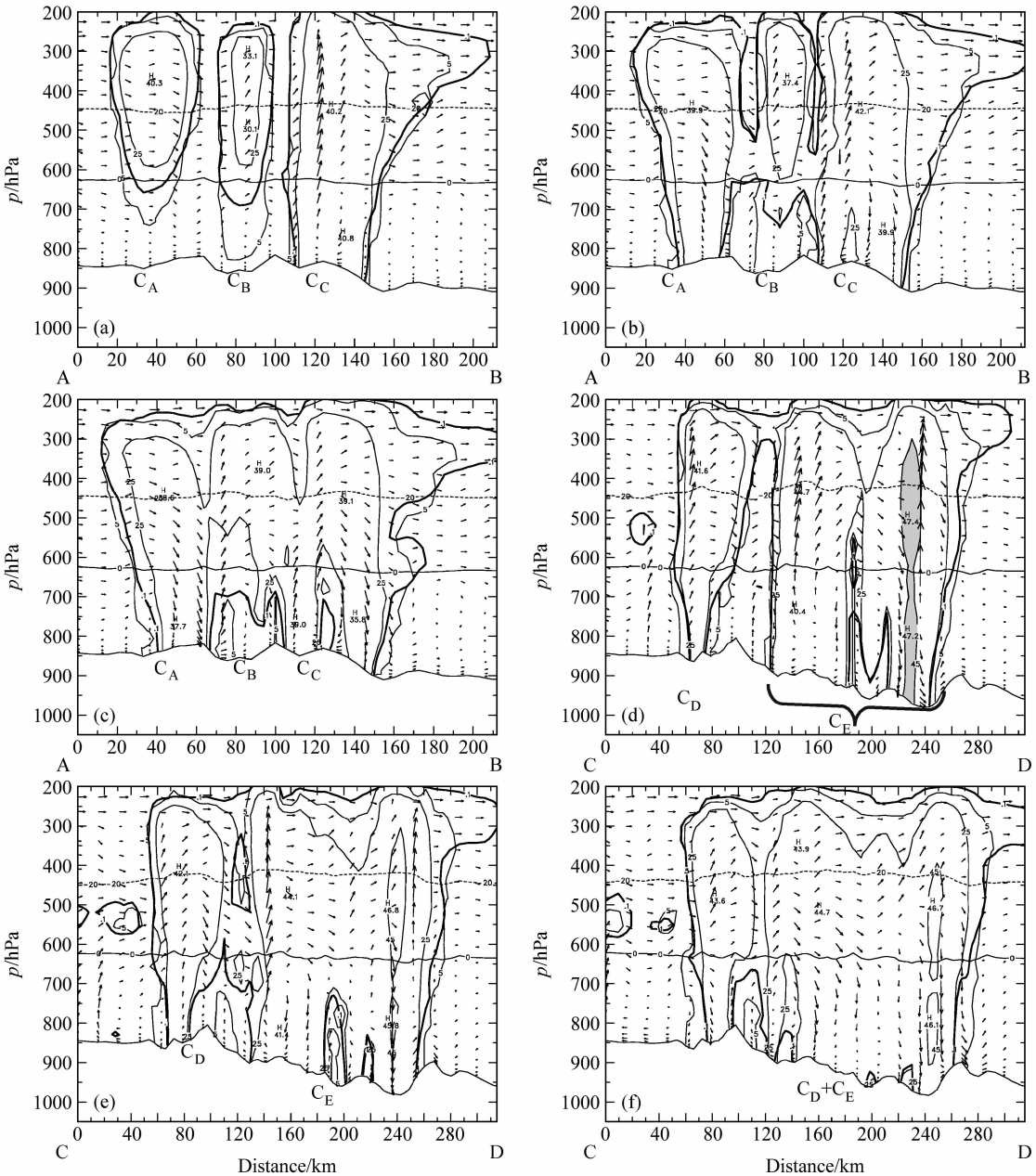

图 3　同图 2，但为回波（细实线）及风矢量沿直线 AB、CD 和 EF 的垂直剖面。粗实线表示云体轮廓（0.1 g/kg 的含水量等值线），水平横线表示 0℃、－20℃温度层

Fig. 3　Same as in Fig. 2, but for the vertical cross sections of the simulated radar echo (light solid lines) and wind vectors along the line AB, CD and EF in Fig. 2. The heavy solid lines indicate the cloud outlines with total hydrometeor mixing ratio of 0.1 g/kg, and the horizontal lines denote 0℃ and －20℃ isotherm

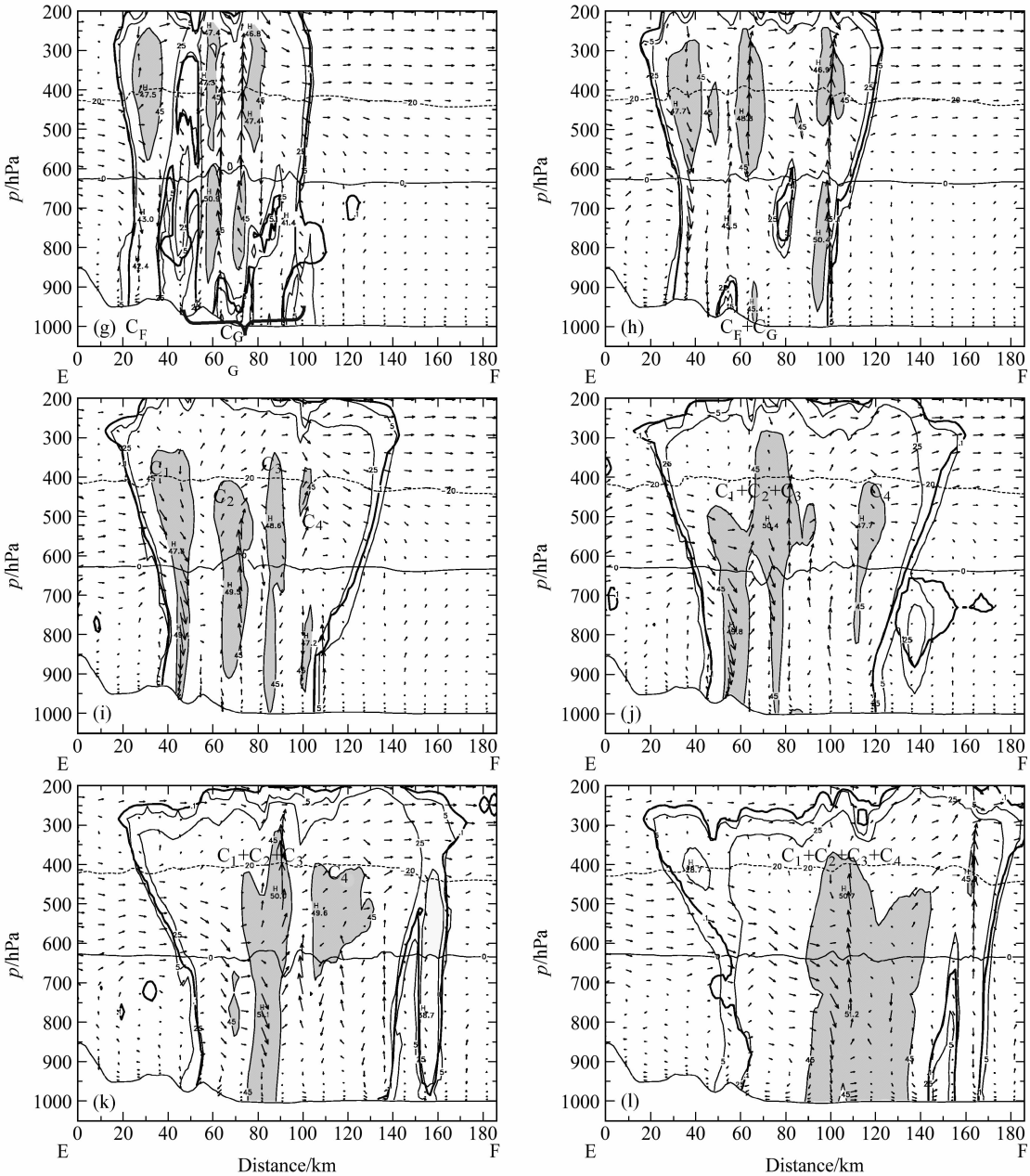

图 3 （续）

Fig. 3 （Continued）

间。对于降水性的强单体的并合可分为两种情况，一种情况是，一个单体降水形成的强下沉气流加强了另一个单体的上升气流的同时，在单体间还因地面辐合产生上升气流，产生了云桥，实现并合，并合后的云体回波明显扩大了。另一种情况，是由于云体的扩大导致与另一云体的连接，最后实现流体动力场并合。积云并合过程的完成是一个从回波体的连接到整个流体动力场完全融为一体的过程。

4.3 积云并合对于云动力和微物理结构的影响

由以上分析可以看到，积云并合主要由于相邻对流体的下沉气流及下沉气流与环境风的相互作用产生的。积云并合使得云体得到发展和加强。图 4 给出了图 2 方框所表示的研究区域内最大上升气流和下沉气流随时间的变化。可以看到，云中的气流与并合过程有密切的关系，在 555 min 时，积云体并合导致区域内云系的最大上升气流达到 34 m/s，

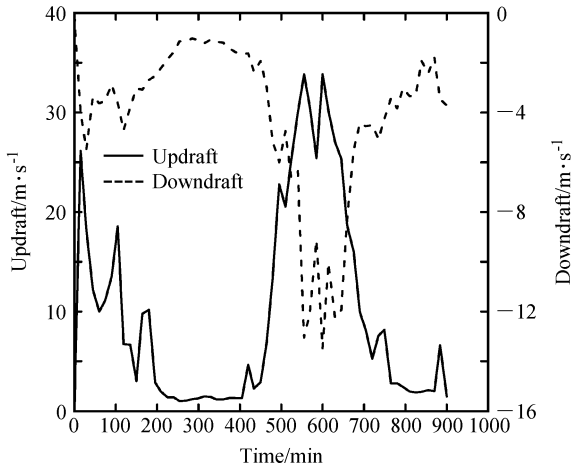

图 4　研究区域 EF 中最大上升气流和最大下沉气流随时间的变化

Fig. 4　Time evolutions of the maximum updraft and downdraft in the studied region marked with rectangle in Fig. 2

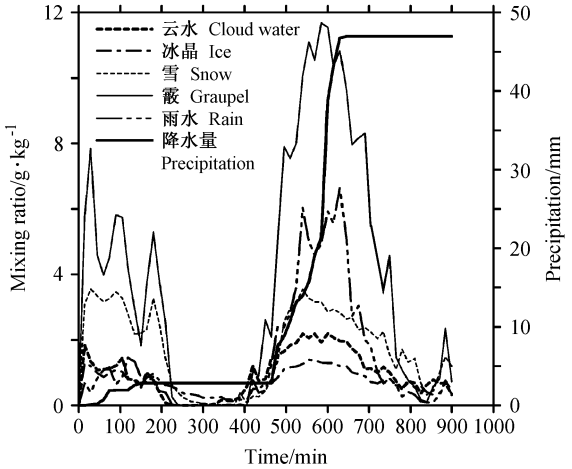

图 5　研究区域 EF 中各水成物最大含量和最大降水量随时间的变化

Fig. 5　Time evolutions of the maximum precipitation and the maximum mixing ratio of cloud hydrometeors in the studied region marked with rectangle in Fig. 2

最大下沉气流为 −13 m/s，随后由于并合过程产生降水，导致上升－下沉气流略有减弱。但在 585 min 时发生的强中心并合过程又使得云中气流增大，到 600 min 时，最大上升气流又恢复至 34 m/s，最大下沉气流增强为 −13.5 m/s，可见强中心并合产生的降水更大。615 min 时，最大上升、下沉气流分别为 30 m/s、−10 m/s。到 630 min 时，强中心完成并合。由并合导致的强降水使最大上升气流减弱为 27 m/s，而最大下沉气流增加到 −12.3 m/s，中尺度对流系统进入消散阶段。

图 5 为研究区域内各类水凝物最大比水含量和最大降水量及随时间变化。积云团的并合过程使云内云水含量增加，570 min (17:30) 时，最大云水含量为 2.18 g/kg，到 585 min (17:45) 时，最大霰含量达到 11.68 g/kg，雨水含量增加。积云团完全并合后发生的强中心并合过程，使得雨水含量显著增加。到 630 min (18:30) 时，最大雨水含量为6.6 g/kg。

并合过程有利于大量水汽的转化，其中积云团的并合过程导致区域内云水含量达到最大，强中心的并合过程，导致云水迅速转化成为冰晶和霰，霰的融化过程产生大量的雨水。从整个研究区域最大降水量来看，积云团的并合过程导致最大降水量增加到 21 mm，而强中心并合过程使得区域内最大降水量迅速增加，达到 47 mm。由此可见，云的并合过程导致区域降水增加，但强中心的并合过程可以显著提高降水。

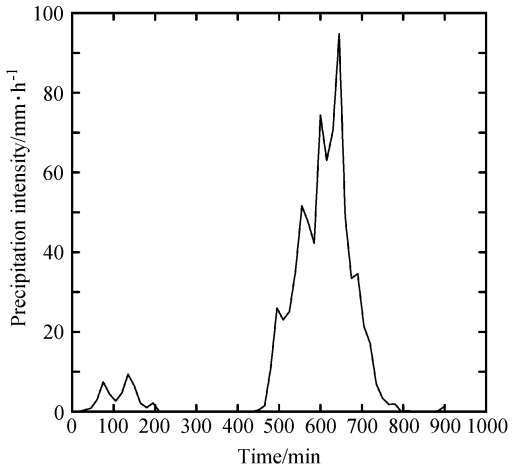

图 6　研究区域 EF 中最大降水强度随时间的变化

Fig. 6　Time evolution of the simulated maximum precipitation intensity in the studied region marked with rectangle in Fig. 2

图 6 为研究区域最大降水强度随时间的变化。540 min 时，最大降水强度为 30 mm/h，到 555 min 时，积云团并合导致最大降水强度增加到 50 mm/h。600 min 时，完全并合的积云团产生 75 mm/h 的降水。645 min 时，强中心完全并合，最大降水强度可达 95 mm/h。

5　结论

利用中尺度模式对北京 2001 年 8 月 23 日一次中尺度强对流云系中的积云并合过程的研究发现，积云并合对中尺度对流系统（MCS）的形成有着重

要作用。并合过程可分为单体并合、积云团并合和强中心并合，是一个多尺度并合过程。首先，相邻孤立对流单体之间在中层形成云桥并合为积云团，然后相邻积云团也通过中层云桥发生并合，形成具有多个强中心的中尺度对流系统。最后系统内的强中心实现并合。积云下沉气流对于积云并合有着重要作用，由强辐散出流形成的上升气流与环境风相互作用有利于并合的形成。

积云并合过程导致云内上升-下沉气流增强，对流运动发展加强，有利于水汽转化，形成大量过冷云水和冰相粒子。大量冰晶和霰的形成有利于强降水和大风天气的产生。

参考文献（References）

[1] Byers H R. Braham R R. The Thunderstorm Project. U. S. Weather Bureau, 1949. 287pp

[2] Malkus J S. Some results of a trade-cumulus cloud investigation. *J. Meteor.*, 1954, **1**: 220～237

[3] Simpson J, Woodley W L, Miller A H, et al. Precipitation results of two randomized pyrotechnic cumulus seeding experiments. *J. Appl. Meteor.*, 1971, **10**: 526～544

[4] Changnon S A Jr. Effects of urban areas and echo merging on radar echo behavior. *J. Appl. Meteor.*, 1976, **15**: 561～570

[5] Orville H D, Kopp F J. Numerical simulation of the life history of a hailstorm. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34**: 1596～1681

[6] López R E. Internal structure and development processes of C-scale aggregates of cumulus clouds. *Mon. Wea. Rev.*, 1978, **106**: 1488～1494

[7] Orville H D, Kuo Y-H, Farley R D, et al. Numerical simulation of cloud interactions. *J. Rech. Atmos.*, 1980, **14**: 499～516

[8] Wiggert V, Lockett G J, Ostlund S S. Radar rainshower growth histories and variations with wind speed, echo motion, location and merger status. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 1467～1494

[9] Turpeinen O. Cloud interactions and merging on day 261 of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 1238～1254

[10] Westcott N. A historical perspective on cloud mergers. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1984, **65**: 219～226

[11] Tao W-K, Simpson J. Cloud interactions and merging: Numerical simulations. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 2901～2917

[12] 黄美元，徐华英，吉武胜. 积云并合及相互影响的数值模拟研究. 中国科学 (B)，1987，**17** (2)：214～224
Huang Meiyuan, Xu Huaying, Ji Wusheng. A study on numerical simulation of cloud mergers and interactions. *Science in China* (in Chinese), 1987 (B), **17** (2): 214～224

[13] Tao W-K, Simpson J. A further study of cumulus interactions and mergers: Three-dimensional simulations with trajectory analyses. *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**: 2974～3004

[14] Westcott N E. Merging of convective clouds: Cloud initiation, bridging, and subsequent growth. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122**: 780～790

[15] Kogan Y L, Shapiro A. The simulation of a convective cloud in a 3D model with explicit microphysics. Part II: Dynamical and microphysical aspects of cloud merger. *J. Atmos. Sci.*, 1996, **53**: 2525～2545

[16] Simpson J. Downdrafts as linkages in dynamic cumulus seeding effects. *J. Appl. Meteor.*, 1980, **19**: 477～487

[17] Simpson J, Westcott N E, Clerman R J, et al. On cumulus mergers. *Arch. Meteor. Geophys. Bioklimatol.*, 1980, **29**: 1～40

[18] Levy G, Cotton W R. A numerical investigation of mechanisms linking glaciation of the ice-phase to the boundary layer. *J. Appl. Meteor.*, 1984, **23**: 1505～1519

[19] Rosenfeld D, Woodley W L. Effects of cloud seeding in West Texas. *J. Appl. Meteor.*, 1989, **28**: 1050～1080

[20] Rosenfeld D, Woodley W L. Effects of cloud seeding in West Texas: Additional results and new insights. *J. Appl. Meteor.*, 1993, **32**: 1848～1866

[21] Changnon S A, Gabriel K R, Westcott N E, et al. Exploratory ananlysis of seeding effects on rainfall: Illinois 1989. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1215～1224

[22] Czys R R, Changnon S A, Westcott N E, et al. Responses of warm-based, midwest cumulus congestus to dynamic seeding trials. *J. Appl. Meteor.*, 1995, **34**: 1194～1214

[23] Stalker J R, Knupp K R. Cell merger potential in multicell thunderstorms of weakly sheared environments: Cell separation distance versus planetary boundary layer depth. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 1678～1695

[24] 余兴，戴进. 层状云中飞机人工增雨作业间距的研究. 大气科学，2005，**29**：465～474
Yu Xing, Dai Jin. Investigation of cloud seeding interval for precipitation enhancement by aircraft within stratiform clouds. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2005, **29**: 465～474

[25] 付丹红，郭学良，肖稳安，等. 北京一次大风和强降水天气过程形成机理的数值模拟. 南京气象学院学报，2003，**26** (2)：190～200
Fu Danhong, Guo Xueliang, Xiao Wen'an, et al. Numerical study on the formation a severe storm accompanied with gale and heavy rain in Beijing. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 2003, **26** (2): 190～200

[26] 郭学良，付丹红. 北京一次典型灾害性雹暴、大风的形成过程与云物理特征. 科学通报，2003，**48** (增刊)：65～69
Guo Xueliang, Fu Danhong. The formation process and cloud physical characteristics for a typical downburst-producing thunderstorm in Beijing. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48** (Suppl. II): 77～82