第 65 卷第 2 期
2 0 0 7 年 4 月

气 象 学 报
ACTA METEOROLOGICA SINICA

Vol. 65, No. 2
April 2007

“05.6”东北暴雨中尺度对流系统研究 II：MCS 动力结构特征的雷达卫星资料分析*

寿亦萱[1,2]　许健民[2]

1 南京信息工程大学大气科学系，江苏省气象灾害重点实验室，南京，210044
2 国家卫星气象中心，北京，100081

摘　要

应用多普勒雷达和卫星资料对 2005 年 6 月 10 日发生在黑龙江省沙兰河上游的暴雨 MCS 动力结构的演变特征作了进一步研究，以加深对东北暴雨中尺度对流系统动力学结构的认识。研究结果表明，导致 2005 年 6 月 10 日黑龙江省沙兰河上游暴雨的中尺度对流系统是一个具有多单体风暴结构特征的孤立对流系统，对流系统中个别对流单体的强烈发展导致了沙兰河上游的雷暴等剧烈天气过程。此外，研究还发现，对流系统在初生—发展—成熟 3 个阶段中，雷达反演的低空风场上显示出明显的规律性，随着降水加大，降水区附近的流场上反气旋性旋转疏散的特征显著增强。对整个对流系统来说，以对流云团移向方向(东北方)为前方，低空暖湿气流从云团左后方(西南方)入流，而在云团的右前方(偏东方)出流，即系统内的气流具有后方入流前方出流的特点。从对流系统的移动规律来看，云团左侧低空入流高空出流，右侧低空出流高空入流，即在云层平均风方向的左侧低空辐合高空辐散，右侧低空辐散高空辐合。这种有利于对流单体从系统的左后方新生，在右前方消亡的配置可能是导致沙兰河上游暴雨的雷暴云具有左移风暴特点的重要动力机制。

关键词：东北暴雨，MCS，多普勒雷达，雷达反演风场，孤立对流系统，左移风暴。

1　引　言

中尺度对流系统(MCS)发生发展的机理研究是目前暴雨灾害性天气研究的重点之一[1]，这其中所包含的科学问题较多，包括 MCS 发生发展的大尺度环境场、物理过程、动力模型等。

暴雨中尺度对流系统的动力结构是 MCS 发生发展机理研究中的一个广受关注的问题，Cotton 等[2]通过研究发现，MCS 中存在各种形式不同的对流，对应的结构也有较大差异，因此研究中尺度对流系统的结构对深入了解系统发生发展机理具有重要意义。对于这个问题的研究在国外开展得较早，对某些类型的中尺度系统结构已经有了相当全面的认识[3-10]。近年来，国内也开展了这方面的研究，例如陈力强等[11]用中尺度模式(MM5)作了东北冷涡诱发的暴雨 MCS 三维动力结构演变的研究。

多普勒雷达和卫星是可以获得具有高时空分辨率资料的两种主要观测工具，由其获得的资料对研究中尺度系统具有很大帮助。我们利用卫星资料和常规资料相结合的办法，对 2005 年 6 月 10 日午后发生在黑龙江省中东部的一次暴雨过程 MCSs 发生发展的大尺度环境场、下垫面条件及地面中尺度切变线与 MCS 活动的关系作了研究，并利用常规资料对沙兰河上游暴雨 MCS 的层结特征进行了诊断分析[12]。在此基础上，本文进一步利用雷达和卫星资料对沙兰河上游的中尺度对流系统的三维动力结构特征的演变过程展开深入研究，以提高对东北暴雨 MCS 的认识。

* 初稿时间：2006 年 3 月 9 日；修改稿时间：2006 年 6 月 20 日。
资助课题：国家自然科学基金项目(40405009、4057022)；国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418301)；江苏省气象灾害重点实验室项目(KLME050201)；江苏省自然科学基金项目(BK2005141)。
作者简介：寿亦萱，主要从事卫星气象学、中尺度气象学和大气遥感科学技术研究。E-mail：yixuan_S@nsmc.cma.gov.cn；liljas_shou@yahoo.com.cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 资料说明及处理

2.1 资料说明

多普勒雷达资料为牡丹江 3830 型 C 波段天气雷达在立体扫描(VCP 21)工作方式下获得的平均约 6 min 一次的雷达资料。雷达站的地理位置为:44°35′28″N、129°35′59″E;天线海拔高度为:324 m。雷达的径向最大不模糊距离为 150 km。雷达资料的时间范围为:2005 年 6 月 10 日 11:17—14:30(北京时,下同)。内容包括反射率强度(Z)、径向速度(V)及谱宽(W),由雷达在 9 个仰角(0.5°、1.5°、2.4°、3.4°、4.3°、6°、9.89°、14.6°、19.5°)观测的数据按仰角由低到高的顺序排列组成。每个等仰角面上的数据以极坐标形式存储。

卫星资料为 2005 年 6 月 10 日 00:00—09:00UTC 1 h 一次的 FY-2C 静止卫星云图数据(05:00—06:00UTC为 0.5 h 间隔)。

DEM(Digital Elevation Model)数字高程数据的水平范围:90°S—90°N、20°—180°E,空间分辨率:0.00833°×0.00833°。

2.2 雷达资料处理

本文将极坐标系下、等仰角面上的雷达反射率强度(Z)转换到笛卡尔坐标系下的等高平面上显示,并用椭球 Cressman 插值函数[13]将坐标转换后的数据插值到等经纬度网格上。水平插值范围为 44.1°—44.75°N、128.45°—129.25°E,格距为 0.01°×0.01°。垂直范围取在 1.5—12.5 km,格距为 0.5 km。并规定坐标以向东、向北和垂直向上为正方向。插值函数的水平和垂直影响半径分别取为 2.5 和 1.5 km。

风场反演方法选用的是 UW 风场反演技术[14]。根据 UW 方法的假设条件,取低仰角层上的雷达径向风速进行风场反演,并将获得的水平风速用椭球 Cressman 插值函数插值到相同范围的等经纬度网格点上,水平格距取为 0.01°×0.01°。由于中低层风场与 MCS 发生发展关系十分密切,因此本文重点研究 1.5—5.5 km(垂直格距为 0.5 km)的风场分布。

由 UW 风场反演公式(1)—(3)可知,反演的水平风矢量(u, v)是雷达径向风(V_r)和切向风(V_t)的矢量合成结果。

$$u = V_r\sin\theta + V_t\cos\theta \quad (1)$$

$$v = V_r\cos\theta - V_t\sin\theta \quad (2)$$

$$V_t = \frac{\partial V_r}{\partial\theta} \quad (3)$$

在对反演方法进行误差分析时发现,切向风(V_r)对径向角 $\Delta\theta$ 的选取十分敏感。当 $\Delta\theta$ 选取过小,如 $\Delta\theta \leq 3°$ 时,±1 m/s 的径向风速变化率会相应引起约 ±20 m/s 的切向风变化,对反演结果产生很大的干扰。本文通过试验,选择 $\Delta\theta = 6°$。另外,由于实测多普勒速度资料中可能包含很多小尺度的大气运动信息,如湍流,这可能造成反演出来的风场脉动非常明显,因此本文对反演出的水平风场又进行了二维区域平滑滤波处理,滤除小尺度的风场信息。资料中的缺测点不参与风场平滑处理。

3 沙兰河上游暴雨过程的雷达卫星资料研究

从 2005 年 6 月 10 日 11 - 16 时局部卫星云图的连续演变来看(图 1),图 1a 和 1b 中偏南的对流云团 A 及图 1c—1f 中由南北两个云团(图 1a 和 1b 中的 A,B 云团)合并形成的对流云团的尾部在移动过程中经过沙兰河上游雨区。由图 1a 和 1b 可见,在对流云团形成后 1 h 内(11—12 时),由西南向东北方向移动,移速较快。从 12 时开始,对流云团移向不变但移速减慢,12—15 时云团的尾部停留在沙兰河上游雨区上空,云砧范围不断扩大(图 1b—1e)。16 时左右(图 1f)云团移速又开始加快,其尾部移动到沙兰河上游雨带的东北方。

从雷达反演的沙兰河附近对流云风暴总积累降水量(STP)随时间变化的曲线(图 2)看,2005 年 6 月 10 日 11:22—14:30 降水出现 3 个阶段的变化:即 11:22—12:13、12:13—13:17 以及 13:17—14:30。在这 3 个阶段中降水量是呈不断递增的趋势。结合前面所述的云团移动特征,本文将造成沙兰河上游暴雨 MCS 的演变过程大致划分为 4 个阶段,即 11—12 时为初生阶段,12—13 时为发展阶段,13—15 时为成熟阶段,15 时以后为减弱阶段。文章下面将从云团的形态、TBB 特征、中低层的三维风场等方面,重点研究这个 MCS 在前 3 个阶段的变化情况,以深入揭示东北暴雨 MCS 的发展演变特征。

3.1 初生阶段

11 时在沙兰河上游雨区以北地区上空出现 2 个对流云团(图 1a、1b),其中图 1a 和 1b 中南侧的云团 A 靠近沙兰河上游雨区。从 TBB 图上看,11 时云团 A 的最低云顶亮温约为 262 K(图略)。至 12 时

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

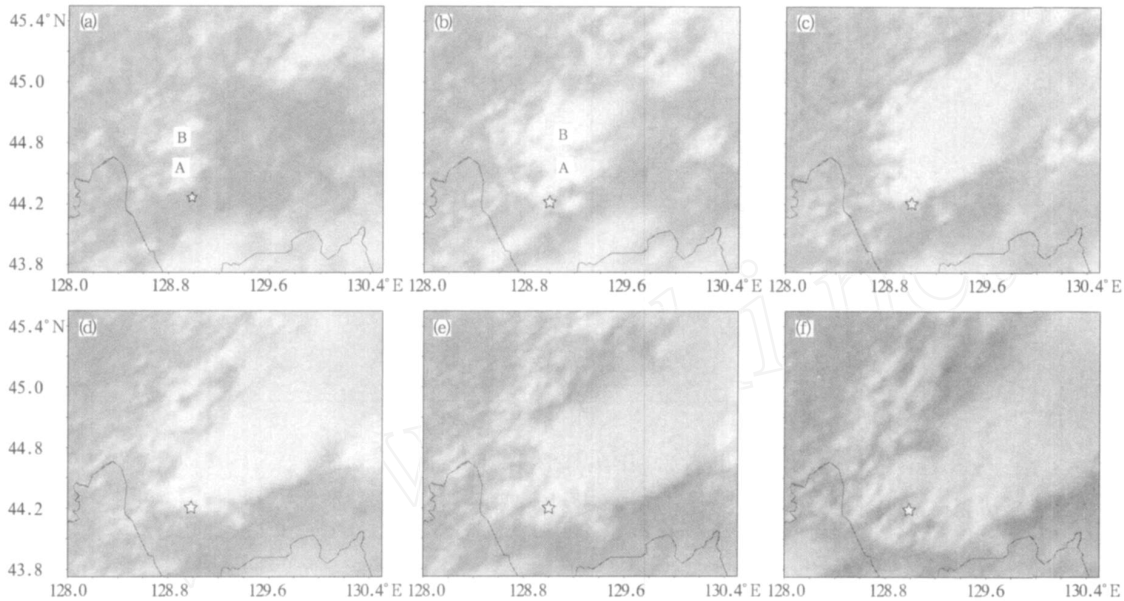

图 1　2005 年 6 月 10 日 11 —16 时 FY-2C 卫星可见光云图

(a. 11 时, b. 12 时, c. 13 时, d. 14 时, e. 15 时, f. 16 时;星号表示发生泥石流的沙兰河上游雨区位置;A、B 分别表示南、北侧的对流云团)

Fig. 1　Hourly FY-2C satellite visible cloud images on 10 June 2005

(a. 11:00BST, b. 12:00BST, c. 13:00BST, d. 14:00BST, e. 15:00BST, f. 16:00BST; Star denotes the location of Shalan town; A and B represent the south and north convective cloud clusters, respectively)

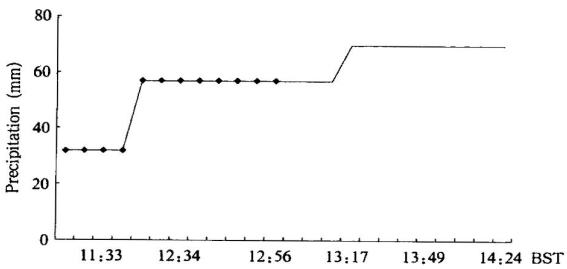

图 2　根据 WSR-88D 雷达定量降水估计算法反演的风暴总累积降水量(STP)

Fig. 2 Storm Total Precipitation (STP) retrieved by the WSR-88D radar quantitative precipitation estimation method

云团 A 的最低云顶亮温降至 240 K 左右,与北侧的云团 B 相比,云团 A 的云顶高度较低,冷云顶的范围较小。从云砧范围的演变来看,对流云团 A 的云砧范围在 11 —12 时出现明显的扩张(彩图 3)。根据流体水平散度[15]的定义计算的云团单位面积膨胀速度显示,云团 A 单位面积膨胀速度约为 $6.3 \times 10^{-4} s^{-1}$,达到中尺度散度的量级。根据云盖面积膨胀、云顶亮温与垂直运动这三者的关系分析,这个阶段云团 A 内部开始形成有序的上升运动。另外在可见光云图上发现,此时云团的尾部出现了一些小的上冲云顶(图 4),但是由于这些风暴云顶的尺度很小,因此在红外云图上看不到。

从这个阶段雷达回波的时序演变来看,与云团 B 相比,云团 A 发展速度较慢。其回波强度明显弱于云团 B,其中 40 dBz 以上的强回波主要集中在云团西南端。但是,对流云团 A 移动速度较快。在它由西南向东北移动的过程中,其两端还出现了卷曲现象。11:48(彩图 5a)整个云团呈北侧开口的半包围回波结构。此时,在雷达反演的 1.5 km 高度上水平风场和 35 dBz 回波叠合图上(彩图 5b),云团 A 西侧边缘的强回波区附近有明显的速度辐合,对应流场上(彩图 5c),这里的流线也较密集。此外,由图 5c 还可以看到在该辐合区的偏东方气流呈扇形疏散结构,它们在强回波区附近构成了一个水平尺度约为 10 km 向北凸起的反气旋性环流。沿图 5a 中实线方向作剖面图(彩图 5d)可见,垂直方向上,气流从偏西方向上升,在偏东方向下沉,上升气流旺盛的地区对应雷达回波上的强回波区。这与上面分

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

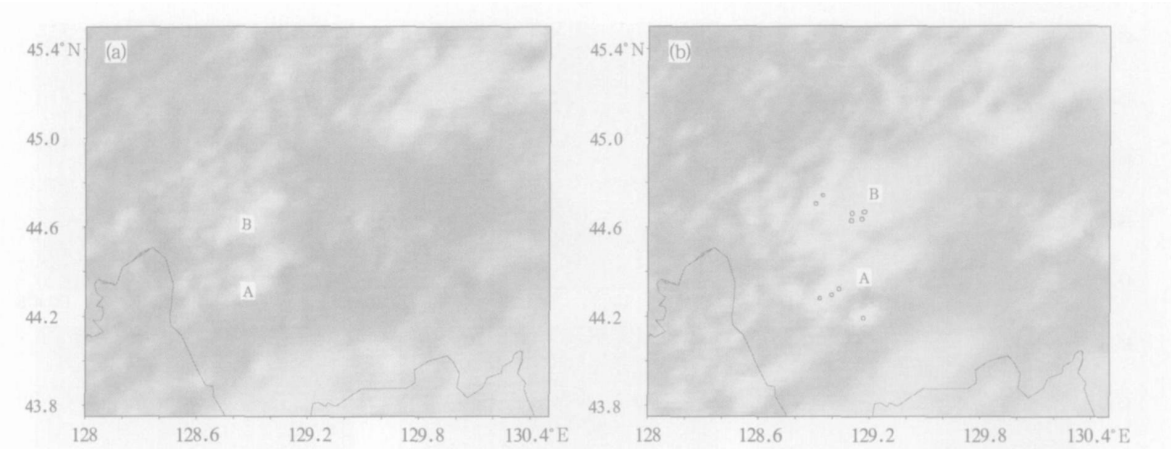

图 4 2005 年 6 月 10 日 11 —12 时上冲云顶分布

(a. 11 时, b. 12 时;图中 A 表示南侧的对流云团,B 表示北侧的对流云团)

Fig. 4 Overshooting cloud tops at 11:00BST (a) and 12:00BST (b) 10 June 2005

(A and B represent the south and north convective cloud clusters, respectively)

析的低空气流辐合辐散的位置是互相配合的。另外,从垂直剖面图还可以看到,尽管云体内部已经开始形成有序的上升下沉运动,但是与下沉气流相比,上升气流较弱,从云底垂直上升到达强回波柱顶部(4.5 km)附近就转为下沉运动。

3.2 发展阶段

12 —13 时,云团 A 和其北侧的对流云团 B 的云砧继续快速扩展,并向东北方向移动,至 13 时,两个云团的云砧完全相连。从云砧廓线图(图略)上看,合并后的对流云团水平尺度达到数百千米。从云团云盖单位面积膨胀速度大小看,12 —13 时云团 A 约为 $4.81 \times 10^{-4}\ s^{-1}$,与前一阶段的膨胀速度基本相当。13 时的 TBB 分布图(图略)上,冷云顶的范围明显扩大,最低亮温达到 228 K 以下。此时,对流云团中上冲云顶数量开始增多,与可见光云图(图 1c)对比发现,TBB 图(图略)中云团上亮温梯度较大的地方上冲云顶的数量也较多,其中云团西端亮温梯度最大处的上冲云顶最集中。

由雷达回波的时序图看,云团 A 两端的卷曲现象基本消失,与前一阶段相比,整个云团虽然继续向东北方向移动,但移速明显减慢。雷达回波图上在云团 A 西端出现了两个 40 dBz 以上的强回波区,它们由西向东排列,东侧的 40 dBz 以上的强回波区范围扩大得较快,位于该回波区上 50 dBz 以上的强回波区增多,它们呈准东西向分布在云团的南部边缘上,沙兰河上游雨带就位于这条强回波带上。

12:55,云团 A 中 50 dBz 以上的强回波区的前部移动到沙兰河上游雨带上的西沟村(图中标号 1)与和盛屯(图中标号 2)两地(彩图 6a)。沿云团中最强回波区作西南 —东北向(a —b)的垂直剖面(彩图 6b)可以看到,此时对流云团 A 中层出现了 60 dBz 以上的强回波,50 dBz 的强回波顶接近 8 km。从 1.5 km高度上水平风场和强回波区(大于 40 dBz)的叠合图(彩图 6c, 6d)上看,与前一阶段相比,这个阶段低空辐合区位置变化不大,辐合区仍在云团 A 的西侧边缘。此时辐合区附近除了有西南风和偏西风,还出现了偏东风,3 个方向的气流汇合使该处气流辐合强度增强。此外,图 6c 中在位于辐合区偏东方向的风场上,气流反气旋性旋转疏散的特征与前一阶段相比更为显著。但随高度增高,该处风场上的这种反气旋性旋转疏散的特征就变得越来越不明显。如图 6e 所示,在 2.5 km 的高度上,图 6c 中反气旋性环流所在处气流呈由西南向东北和东南方向散开的特征。沿图 6a 中准东西走向(a^* —b^*)的实线方向所作的垂直剖面(彩图 6f)上看,由西向东方向上,上升区和下沉区呈相间分布。从上升气流的强弱来看,西侧的上升气流较弱而东侧的上升气流较强。上升气流弱的地区回波强度也较弱,反之,则较强,如在图 6f 中最强回波区的上升气流最强。在这个强回波区东侧为一片下沉气流区,这个下沉区的位置正好与图 6c 中低空反气旋性环流相对应。由于降水产生后,降水物在下落过程中蒸发冷却会

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

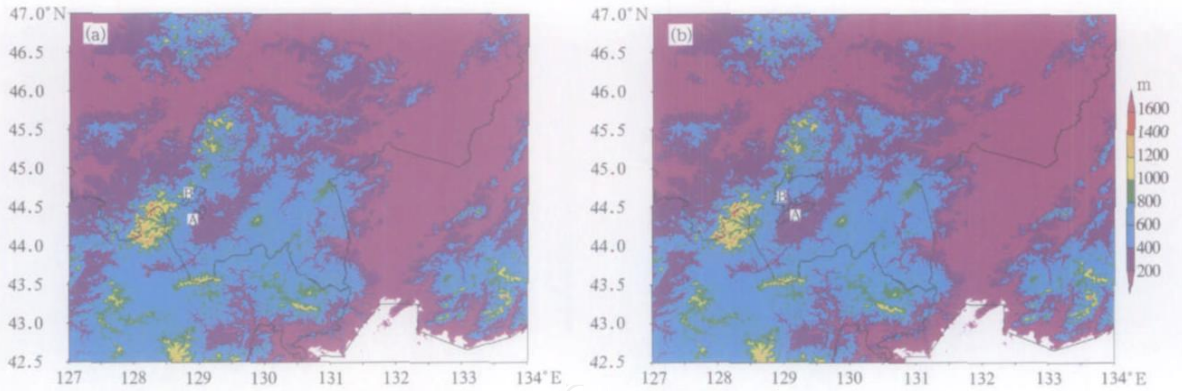

图3　2005年6月10日沙兰河上游地区对流云团云盖廓线与地形叠加

(a. 11时，b. 12时；图中A表示南侧的对流云团，B表示北侧的对流云团；图中的地形是根据数字高程数据绘制)

Fig.3　Topography around Shalan town in the upper basin of Shalan River overlaid with the profiles of the two convtive cloud clusters at 11:000BST (a) and 12:00BST 10 June 2005

(A and B represent the south and north convective cloud clusters, respectively; the topography is drawn based on the Digital Elevation Model data)

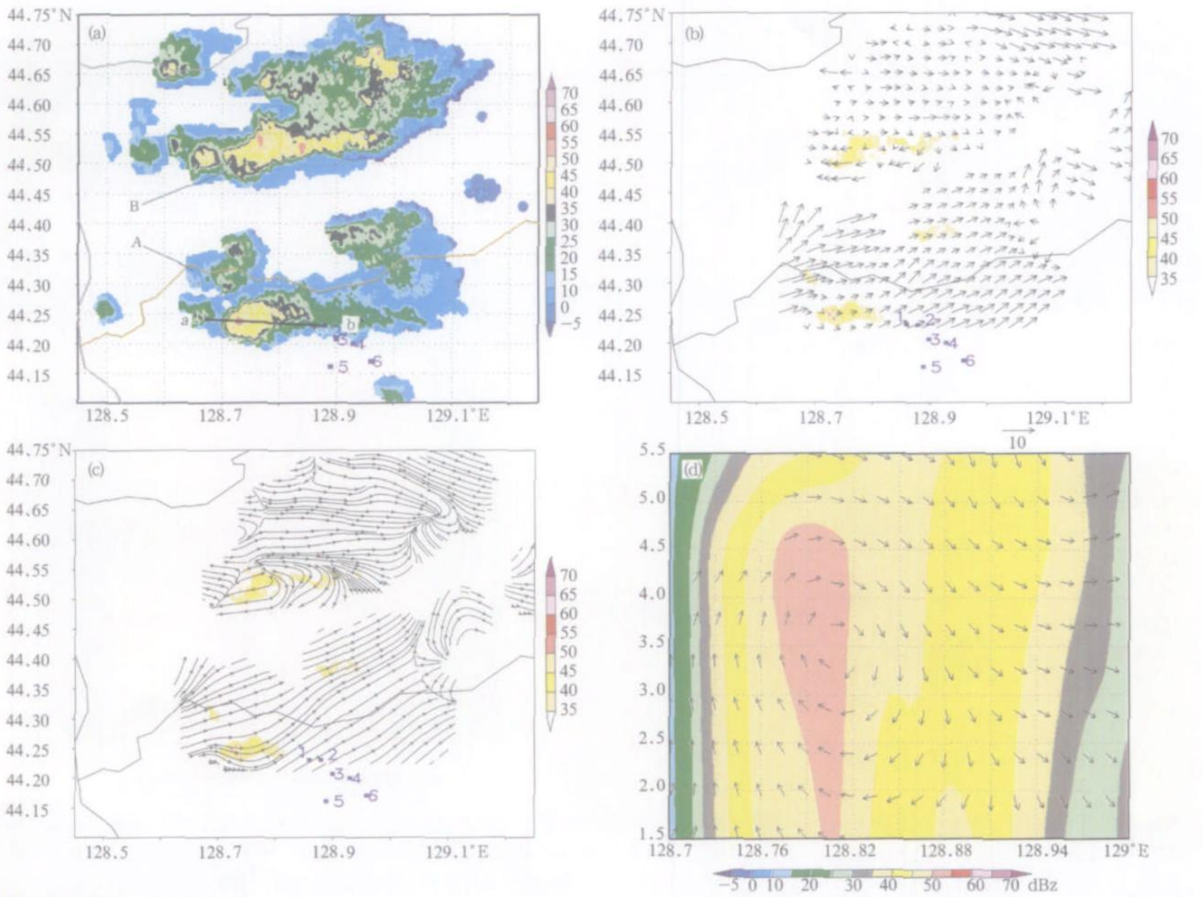

图5　2005年6月10日11:48的雷达回波和风场反演 (a. 3 km高度上雷达回波(单位：dBz)，A表示南侧的对流云团，B表示北侧的对流云团；b. 1.5 km高度上风场 (单位：m/s)；c. 1.5 km高度上流场；d. 雷达回波和*u-w*风场东－西方向垂直剖面，剖面方向为图(a)中的实线方向；'1'表示西沟村，'2'表示和盛屯，'3'表示鸡蛋石沟，'4'表示王家屯，'5'表示桦树，'6'表示沙兰镇)

Fig.5　Radar echoes and wind fields retrieved at 11:48 BST 10 June 2005 (a. echo (dBz) at 3 km; b. wind field (m/s) at 1.5 km; c. stream field at 1.5 km; d. vertical cross section of radar echo overlaid with *u-w* wind field along the E-W direction line ab in (a); A and B represent the south and north convective cloud clusters, respectively; numbers 1-6 indicate locations of Xigou village, Hesheng village, Jidanshigou, Wangjia village, Huashu, and Shalan town, orderly)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

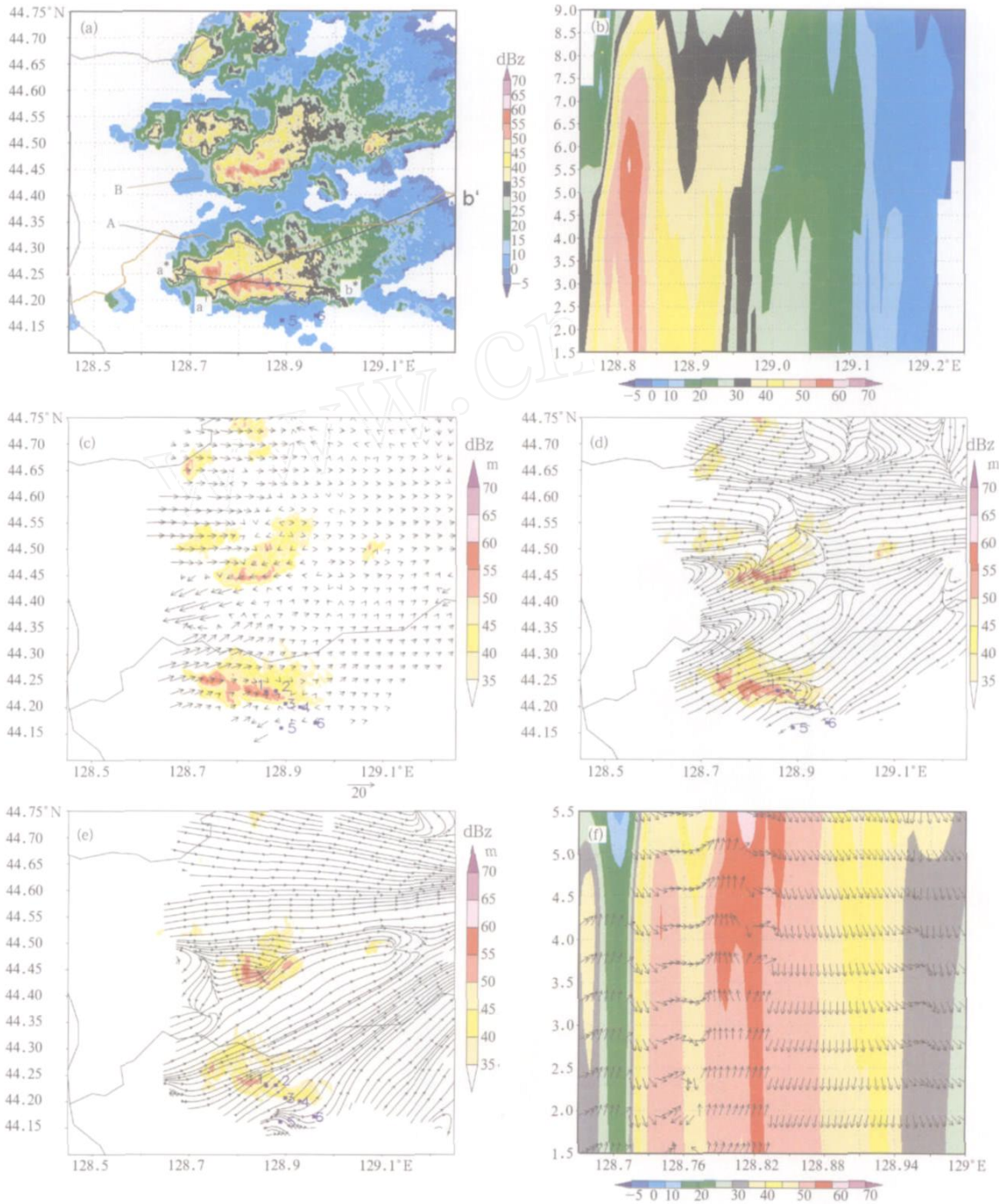

图6 2005年6月10日12:55的雷达回波和风场反演 (a. 3 km高度上雷达回波(单位：dBz)，A表示南侧的对流云团，B表示北侧的对流云团；b. 雷达回波西南－东北方向垂直剖面(单位：dBz)，剖面方向为图(a)中西南－东北走向的实线方向；c. 1.5 km高度上的水平风场(单位：m/s)；d. 1.5 km高度上的水平流场；e. 2.5 km高度上的水平流场；f.雷达回波和*u-w*风场东－西方向剖面图，剖面方向为图(a)中东－西走向的实线方向；'1'表示西沟村，'2'表示和盛屯，'3'表示鸡蛋石沟，'4'表示王家屯，'5'表示桦树，'6'表示沙兰镇)

Fig.6 Radar echoes and wind fields retrieved at 12:55 BST 10 June 2005 (a. echo (dBz) at 3 km; b. vertical cross section of radar echo (dBz) along the SW-NE solid line in Fig.(a); c. wind field (m/s) at 1.5 km; d. stream field at 1.5 km; e. stream field at 2.5 km; f. vertical cross section of radar echo (dBz) overlaid with *u-w* wind field along the E-W direction solid line in Fig.(a); A and B represent the south and north convective cloud clusters, respectively; numbers 1-6 indicate locations of Xigou village, Hesheng village, Jidanshigou, Wangjia village, Huashu, and shalan town, orderly)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

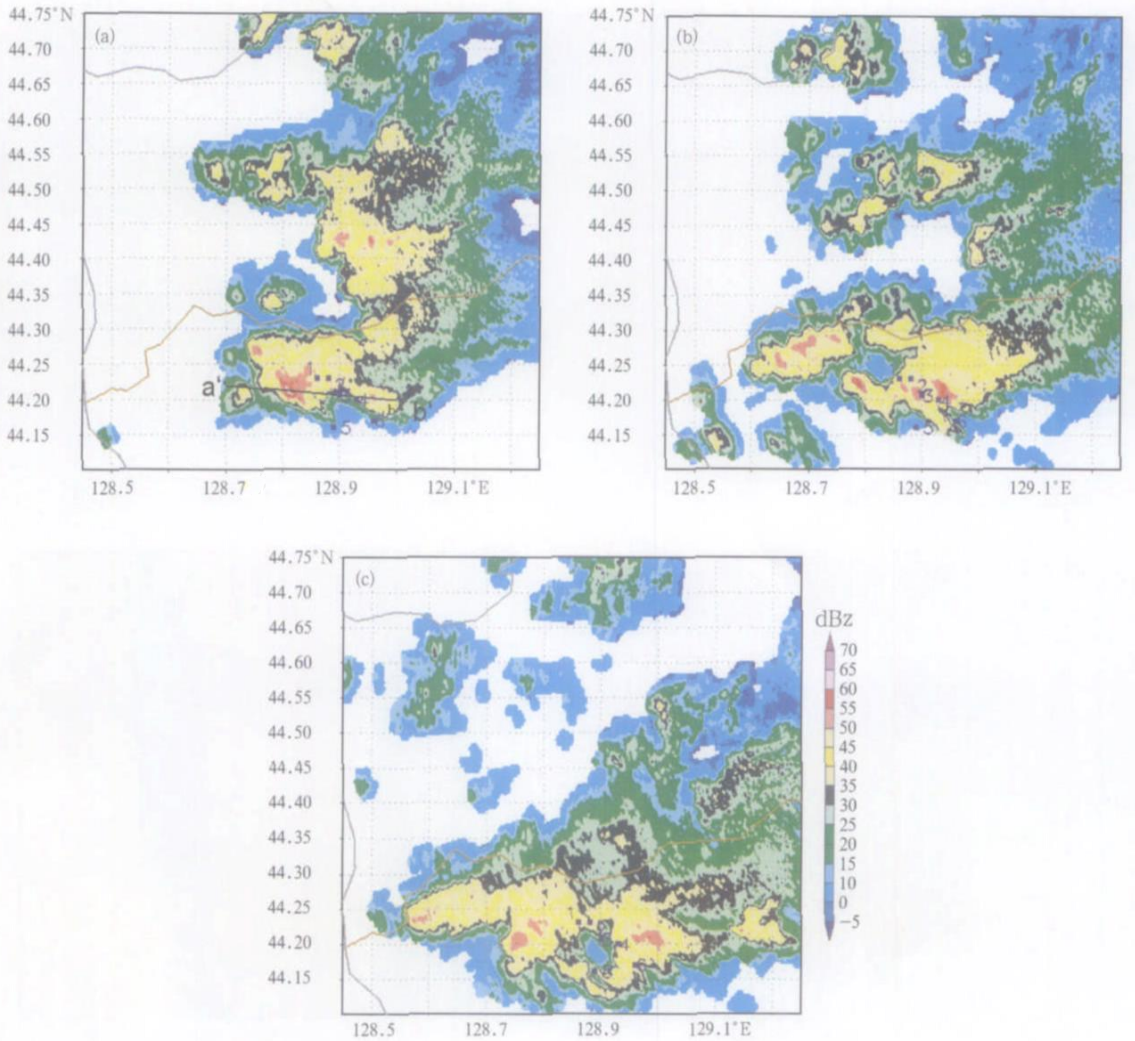

图7　2005年6月10日5 km 高度上的雷达回波(单位：dBz)
(a. 13:27, b. 13:58, c. 14:30；'1'表示西沟村，'2'表示和盛屯，'3'表示鸡蛋石沟，'4'表示王家屯，'5'表示桦树，'6'表示沙兰镇)
Fig.7　Echoes (dBz) at 5 km at 13:27 BST (a), 13:58 BST (b) and 14:30 BST (c) 10 June 2005
(Numbers 1-6 represent locations of Xigou village, Hesheng village, Jidanshigou, Wangjia village, Huashu, and Shalan town, orderly)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

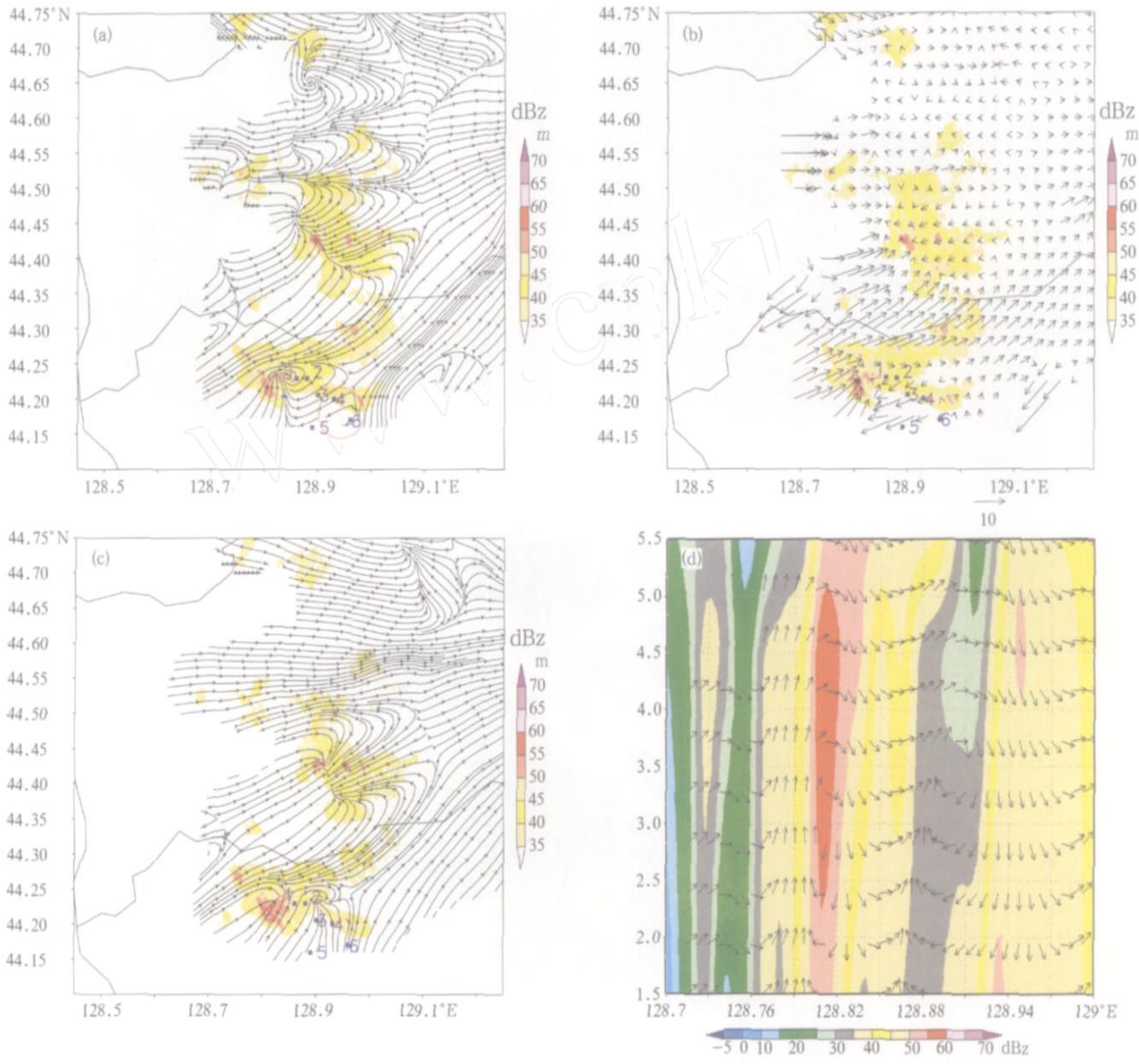

图8 2005年6月10日13:27的雷达回波和风场反演

(a. 1.5 km 高度上流场，b. 1.5 km高度上风场(单位：m/s)，c. 3 km高度上流场，d. 雷达回波和*u*-*w*风场东－西方向剖面图；红圈为低空气旋性环流所在的位置；图d的剖面为图7a中东—西走向的实线方向；‘1’表示西沟村，‘2’表示和盛屯，‘3’表示鸡蛋石沟，‘4’表示王家屯，‘5’表示桦树，‘6’表示沙兰镇)

Fig.8 Radar echoes (dBz) and wind fields (m/s) retrieved at 13:27 BST 10 June 2005

(a. stream field at 1.5 km, b. wind field at 1.5 km, c. stream field at 3 km, d. vertical cross section of radar echo (dBz) overlaid with *u*-*w* wind field along the E-W direction solid line in Fig.7a; The red circle denotes the cyclonic circulation; numbers 1-6 indicate locations of Xigou village, Hesheng village, Jidanshigou, Wangjia village, Huashu, and Shalan town, orderly)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

形成下沉气流,因此降水越大下沉气流也就会越强。当云内的下沉气流冲到地面附近时,气流会向四周散开,下沉气流加强时降水区下方低空气流就会呈反气旋式旋转。

3.3　成熟阶段

13 时以后南北两个对流云团 A、B 合并。合并后整个对流云团仍然呈不断膨胀并缓慢向东北方向移动的趋势(图略),计算的云团单位面积膨胀速度在 13:30 为 $2.55\times10^{-4}\ s^{-1}$,14 时为 $5.70\times10^{-5}\ s^{-1}$。但从云图(图 1c—1e)上看,这个阶段的对流云团北部(即原来云团 B)的部分是呈逐步消亡减弱的趋势,因此,云团此时的膨胀主要是由云团南部(即原来云团 A)引起的。从 TBB 分布图(图略)上看,云顶亮温比前一个阶段又有所降低,14 时最低值为 224 K,15 时最低值达到 220 K。

雷达回波上,云团南部(即合并前云团 A)的西南端上 40 dBz 强回波区范围进一步加强。13:27(彩图 7a),云团西南部上的几个 40 dBz 强回波区依然呈准东西走向排列,以西南角上的回波区强度最弱范围最小,而与它紧邻的那个 40 dBz 回波区发展最强范围最大,该回波区上出现了 60 dBz 以上的强回波区。13:58(彩图 7b),位于西端上的 40 dBz 回波区范围也开始扩大,并出现 50 dBz 以上的强回波。14:30(彩图 7c),云团南部出现了 4 个 40 dBz 以上的回波区,它们由西向东方向排列在云团南部边缘上,回波强度则是呈东、西两头弱,中间强的分布特征。而云团北部(即合并前云团 B)50 dBz 以上的强回波区的数量不断减少,大于 40 dBz 的回波区范围也在不断缩小。到 13:27(彩图 7a),这个区域上只剩下几个 50 dBz 以上的强回波点。14:30(彩图 7c)的雷达回波图上云团北部的 40 dBz 以上的强回波区基本消失。

从雷达反演的风场分布(彩图 8)来看,这个阶段的低空风场主要特征是降水区附近的反气旋和气旋环流的水平尺度加大,且受低层风场扰动加强的影响,高层风场上扰动也明显增强。如 13:27 的 1.5 km高度水平流场(彩图 8a)所示,在云团西南端的强回波区上形成了一个闭合的反气旋性环流,与前一阶段相比,此时这个反气旋性环流的范围明显扩大,而且从 1.5 km 向上至 3 km 高度上的水平流场(图 8c)上,位于图 8a 中低空反气旋性环流的地方都出现了明显的反气旋性环流。此外,此时除了云团西侧的气流辐合区(图 8b)以外,反气旋性环流前方(偏东方)还出现了一个气旋性环流(图 8a 中红圈标出的位置)。从沿图 8a 中东—西走向的实线方向所作的剖面来看,这个气旋性环流是由下沉气流加速到达地面附近产生出的低空辐散气流引起的,辐散气流与入流气流辐合产生上升运动。

4　讨论和结论

综合此次暴雨 MCS 的 3 个阶段特征来看,导致 2005 年 6 月 10 日黑龙江省沙兰河上游暴雨的 MCS 是一个具有多单体风暴结构特征的孤立对流系统,由对流系统中个别对流单体的强烈发展导致了沙兰河上游的雷暴等剧烈天气过程。此外,通过研究发现,这次过程中还具有以下 3 个显著特征。

(1) 3 个阶段的低空风场显示出明显的规律性。在初生阶段,位于强降水区附近的低空流场上气流开始出现反气旋性疏散特征;在发展阶段,低空流场上气流反气旋性旋转疏散特征显著加强,反气旋性环流逐渐接近闭合;在成熟阶段,降水达到最大,低空流场上出现了一个闭合的反气旋性环流,水平尺度达数十千米,且在 3 km 高度上气流也出现了明显的反气旋性旋转疏散特征。

(2) 对整个对流云来说,以对流云团移向方向(东北方)为前方,从低空呈西南—东北走向的湿舌上平流过来的暖湿空气从云团左后方(西南方)入流产生上升运动,而在云团的右前方(偏东方)出流。从目前的研究结果看,江淮梅雨锋暴雨和华南暴雨 MCS 中低空气流一般都是从对流云团的前方入流上升,后方下沉的[13,16-18]。这与本文所分析的东北暴雨 MCS 的特征是相反的。

(3) 从雷达回波和卫星云图上看,对流云团整体是朝向东北方向移动的,相对于系统的移动方向,云团中的对流单体则是不断在云团的左后方新生并在右前方消亡。一般来说,对流系统的运动方向是对流系统中单体的平移速度和由单体新生消亡所产生的风暴传播速度的矢量和。根据观测,对流单体平移的方向与云层平均风矢量方向一致,当平均风较强时,对流系统的移向和平均风方向基本一致;而当平均风较弱时,对流系统整体常常会向云层平均风矢量方向的左边或右边移动[19]。对于本例中的 MCS 来说(图略),系统中的单体由偏西向偏东方向平移,即平均风的风向为西南偏西风,从雷达回波图

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上看,在强降水过程中,即 2005 年 6 月 10 日 12—15 时期间,这些对流单体的移速较慢。在弱平均风的环境中,新生的雷暴单体不断在系统左侧翼上产生,并在右前方消亡,即在系统内部风暴传播方向为准东—西,从单体平移和传播方向的合成结果看,系统总体移向具有偏向平均风左侧移动的特征。根据风暴移向的定义[19],这种偏向平均风左侧传播的风暴称为左移风暴。在实际大气中右移风暴较常发生而左移风暴相对罕见,目前研究较多的江淮梅雨锋暴雨和华南暴雨 MCS 都属于右移风暴[20-22]。

风暴移向受到多方面因素控制,一些学者研究认为[23],风暴左移是由于风暴体内部受到指向西风左侧的 Magnus 力的作用;还有一些观点则认为[19],较少的低空水汽供应使得风暴直径变小,进而导致低空相对风变小,是导致风暴出现左偏的主要原因。综合本文前面的分析结果来看,就本例而言,风场的垂直分布是导致风暴左移的一个重要影响因素。在我们给出的该对流云团附近风场的垂直分布特征[12]可以看到(见文献[12]的图 14c,d,降水发生期间,从 850 hPa 至 300 hPa 的高空风场上有风向明显随高度逆转的特点,这表明雷暴云处于冷平流区里。这种风向的垂直切变往往会使对流风暴内外气流产生相对运动[24]。以 14 时(MCS 进入成熟阶段)为例,取 1000—500 hPa 高度上加权平均后的风场来代表云层平均风,以平均风与 850 hPa 上风的矢量差表示低层空气相对云体的运动,而以平均风与 300 hPa 上风的矢量差表示高层空气相对云体的运动。14 时计算获得的云层平均风方向为西南偏西风(图 9a),这与雷达回波图上观察到的云团中单个对流单体的移动方向是一致的。由系统低层空气相对云体的运动方向(图 9b)可见,对流云团北侧低层空气相对云体运动方向为偏西风方向,而南侧低层空气相对云体运动方向为偏北风,即云团下方左侧有相对入流,右侧有相对出流。而图 9c 中云团高层空气相对云体运动方向为偏南风方向,即高层空气在云团的左侧产生相对出流,右侧产生相对

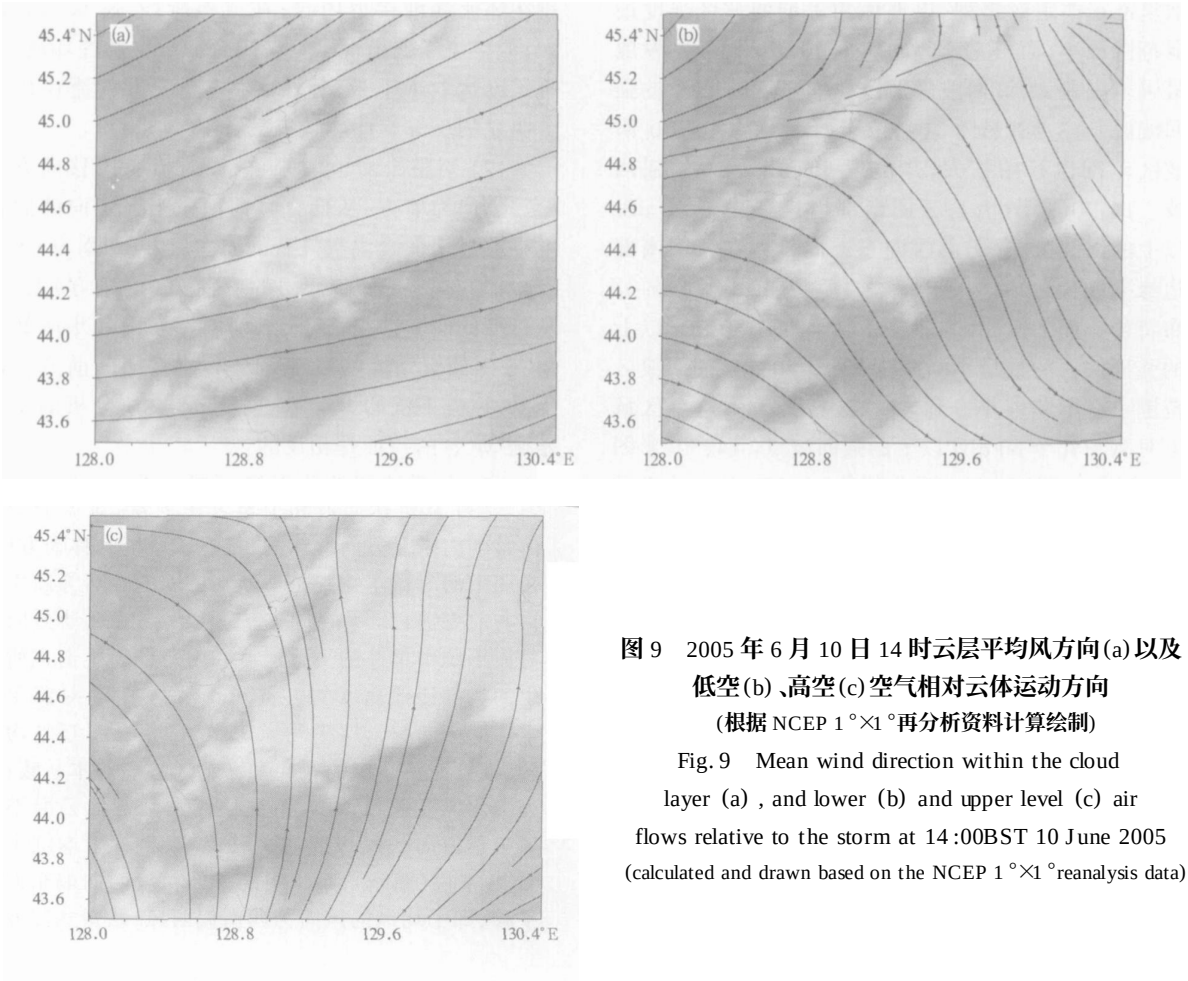

图 9 2005 年 6 月 10 日 14 时云层平均风方向(a)以及低空(b)、高空(c)空气相对云体运动方向
(根据 NCEP 1°×1°再分析资料计算绘制)

Fig. 9 Mean wind direction within the cloud layer (a), and lower (b) and upper level (c) air flows relative to the storm at 14:00BST 10 June 2005
(calculated and drawn based on the NCEP 1°×1° reanalysis data)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

入流,这恰好与图 9b 中低层相对运动分布相反。从高低空的配置示意图(图 10)上看,云团左侧低空入流高空出流,右侧低空出流高空入流,即在云层平均风方向的左侧低空辐合高空辐散,右侧低空辐散高空辐合。这种配置有利于对流单体从系统的左后方新生,在右前方消亡,总的效果是使对流云团整体看上去不断向原来运动方向的左侧偏移。

综合以上分析来看,东北暴雨MCS的结构不

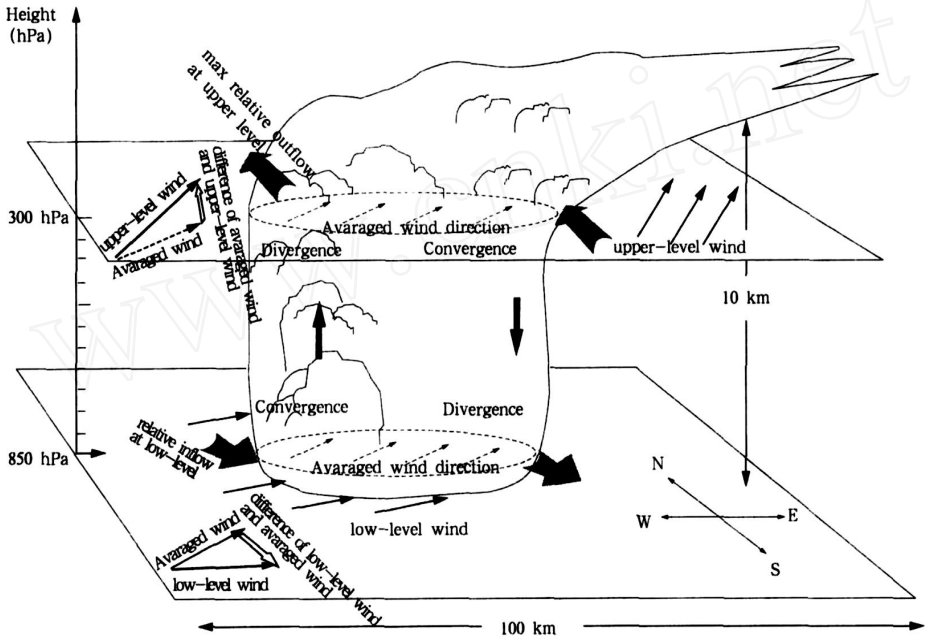

图 10　左移风暴结构示意图

Fig. 10　Schematic for the left moving storm

仅有与其他暴雨 MCS 的共同点,还具有它独特之处,例如气流从左后方入流右前方出流以及呈左移风暴的特征都是与目前广受关注的江淮梅雨锋暴雨和华南暴雨 MCS 所不同的。但是导致东北暴雨 MCS 的这种独特结构的根本原因仍然不是十分清楚,因此继续对东北暴雨 MCS 进行深入细致的研究是十分必要而有意义的。

致谢: 感谢中国气象局气象科学研究院张沛源研究员以及周海光博士对本项研究提供了宝贵的意见和建议。感谢中国气象局预测减灾司提供雷达资料。

参考文献

[1] 陶诗言,赵思雄,周晓平等. 天气学和天气预报的研究进展. 大气科学,2003,27(4):451-467

[2] Cotton W R, Anthes R A. 风暴和云动力学. 北京:气象出版社,1993:709-731

[3] Maddox R A. Mesoscale convective complex. Bull Amer Meteor Soc. 1980,61(11):1374-1387.

[4] Leary C A, Houze Jr R A. The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster. J Atmos Sci,1979,36:437-457

[5] Carbon R. A severe winter squall line. Part I: Stormwide hydrodynamic structure. J Atmos Sci,1982,39:258-279

[6] Wetzel P J, Cotton W R, McAnelly R L. A long-lived mesoscale convective complex. Part II: Evolution and structure of the mature complex. Mon Wea Rev,1983,111:1919-1937

[7] Chong M, Amayenc P, Scialom G, et al. A tropical squall line observed during the COPT 81 experiment in West Africa. Part I: Kinematic structure inferred from dual-Doppler. Mon Wea Rev, 1987, 115:670-694

[8] Parsons D B, Mohr C G, Gal-Chen T. A severe frontal rainband. Part III: Derived thermodynamic structure. J Atmos Sci,1987,44:1615-1631

[9] Zhang Qinghong, Lau Kai-Hon, Wang Hongqing, et al. Numerical simulation on mesoscale convective system along Mei-yu front in Southern China. Chinese Sci Bull, 2000, 45: 2093-2096

[10] Zhang Qinghong, Lau Kai-Hon, Kuo Ying-Hwa, et al. A numerical study of a mesoscale convective system over the Taiwan strait. Mon Wea Rev, 2003, 131: 1150-1170

[11] 陈力强,陈受钧,周小珊等. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

征数值模拟. 气象学报,2005,63(2):173-183
[12] 寿亦萱,许健民."05.6"东北暴雨中尺度对流系统研究 I: MCS 的常规资料和卫星资料分析. 气象学报,2007,65(2):160-170
[13] 周海光,张沛源. 笛卡尔坐标系的双多普勒天气雷达三维风场反演技术. 气象学报,2002,60(5):585-593
[14] 王峰云,王燕雄,陶祖钰. 多普勒天气雷达的中尺度风场探测技术研究. 热带气象学报,2003,19(3):291-298
[15] 余志豪等. 流体力学. 北京:气象出版社,1994: 25-26
[16] 江晓燕,倪允琪. 一次梅雨锋暴雨过程的β中尺度对流系统发展机理的数值研究. 气象学报,2005,63(1):77-92
[17] 孙建华,赵思雄. 华南"946"特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I: 引发暴雨的中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学,2002,26(4):541-557
[18] 孙建华,赵思雄. 华南"946"特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II:物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用. 大气科学,2002,26(5):633-646
[19] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度气象学. 北京:气象出版社,2003:285-291
[20] 郑媛媛,俞小鼎,方▒等. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. 气象学报,2004,62(3): 317-328
[21] 舒防国,吴涛,蓝天飞等. 十堰一次强对流天气雷达回波特征. 气象,2005,31(12): 47-52
[22] 漆梁波,陈永林. 一次长江三角洲飑线的综合分析. 应用气象学报, 2004,2(3): 35-46
[23] Schmid W, Schiesser H-H, Houze Jr R A, et al. Severe left-moving hailstorms in central Switzerland. Preprints, 16th Conference on Severe Local Storms, Kananaskis Provincial Park, Alberta, American Meteorological Society, 1990: 467-472
[24] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文等. 天气学原理与方法(第三版). 北京:气象出版社,2000:434-436

THE RAINSTORM AND MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEMS OVER NORTHEAST CHINA IN JUNE 2005 II: A SYNTHETIC ANALYSIS OF MCS's DYNAMICAL STRUCTURE BY RADAR AND SATELLITE OBSERVATIONS

Shou Yixuan[1] Xu Jianmin[2]

1 *Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, School of Atmospheric Science, Nanjing University of Information and Technology, Nanjing* 210044

2 *National Satellite Meteorological Center, Beijing* 100081

Abstract

To further understand the dynamic mechanism of the MCS (Meso-scale Convective System) which was responsible for the rainstorm in the upper basin of Shalan River, Heilongjiang province on 10 June 2005, on the basis of the analysis in part I this part focuses on the dynamical structure and evolution of the MCS by using Doppler radar and satellite observations. The analysis results indicate that (1) the mesoscle convective system resulting in the rainsotrm was an isolated MCS with a multi-cell structure; (2) some rapid growing convection individuals embedded in the MCS seems played as direct triggers to the severe local storm at the upper basin of Shalan River. Furthermore, the retrieval wind fields reveal that the low-level ambient wind fields of the MCS displayed evident regularity during the system's nascent, development and mature stages. With increase in the rainfall intensity, the anti-cyclonic and divergent winds at the lower troposphere within the precipitation area were intensified prominently. Relative to the whole convective system, the low level warm and moist air flowed into the convective cloud cluster from the left rear (southwest direction), while downdrafts flowed out from the right front (northeast direction). The system is characterized of a rear inflow and front outflow structure. Viewed from the moving direction of the MCS, on the left side, the inflow / outflow was at the lower/ upper level, while on the left side the inflow/ outflow was at the upper/ lower level, respectively. This configuration of upper and lower level air flows is favorable for convective cells spawning at the left rear and decaying at the right front of the MCS, which might act as a key dynamic mechanism for the left-moving rainstorm.

Key words: Northeast rainstorm, MCS, Doppler radar, Radar retrieval wind, Isolated convective system, Left-moving storm.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net