

“98.7”暴雨 β 中尺度低涡生成发展结构 演变:双向四重嵌套网格模拟

程麟生 冯伍虎

(兰州大学大气科学系,兰州,730000)

摘 要

用非静力中尺度模式 MM5. V3 全物理湿过程和双向四重嵌套网格技术及四维资料同化分析张弛方法,对 1998 年 7 月 20~22 日(简称“98.7”)鄂东武汉沿江地区特大暴雨进行了 36 h 数值模拟,结果大大改进了原二重和三重嵌套网格的模拟,特别是水平分辨率为 2 km 的嵌套子域 D04 能更正确地模拟出暴雨的落区及雨强中心,进而揭示了强暴雨 β 中尺度系统发生和发展的结构及演变。其主要结果包括:(1) β 中尺度切变线在鄂东沿江低空强烈发展及辐合中心的出现与其 β 中尺度低涡的形成和发展直接关联。(2) β 中尺度切变线强烈发展的垂直结构:强辐合层和强辐散层复式迭置并与强上升运动耦合发展;强涡度层和强位涡度层与强辐合层互伴发展;低空湿位温中心与中空饱和水汽带共存。(3) β 中尺度低涡生成的垂直结构:散度和上升运动均呈双支柱状发展;涡度和位涡度均呈单支柱状发展;高湿能柱呈双支耦合发展,水汽通道呈阶梯斜升状。(4) β 中尺度低涡发展的垂直结构:V 字型散度柱和上升运动柱互耦发展;涡度和位涡度呈双支柱状;双支高湿能柱强烈发展,阶梯斜升水汽通道变宽增厚。至此低涡发展达最强,其结构具有典型性。模拟结果还指出,发展时空分辨率更高的多重嵌套网格模拟技术和应用四维资料同化方法,将有助于更细致的了解 β 中尺度强对流系统发生和发展的结构及其演变,并能进一步提高对暴雨落区及雨强的预报水平。

关键词:暴雨, β 中尺度低涡, 结构演变, 四维资料同化, 双向四重嵌套, 数值模拟。

1 引 言

1998 年 7 月 20~22 日(简称“98.7”)湖北省武汉周边和鄂东地区发生了特大暴雨过程^[1,2],而 7 月 21~22 日以武汉-黄石为轴线的鄂东沿江一带的特大暴雨尤为历史上所罕见。21 日武汉市降雨 268 mm,其中,21 日 06~07 时(北京时,下同)的 1 h 雨量达 88.4 mm,突破了历史最高记录;这样罕见的特大暴雨过程及其所造成的严重洪涝灾害,引起了国内外的极大关注。因此,对这次特大暴雨过程及其相伴的中尺度系统进行深入的分析和数值模拟研究十分必要。

近几年,中国强暴雨中尺度对流系统的观测分析和数值模拟研究已有不少工作^[3~6]。Chen 等^[7]和张庆红等^[8]分别对江淮流域和华南梅雨锋强暴雨个例的中尺度对流系统进行了数值模拟;Feng

等^[9]对“96.8”特大暴雨和中尺度系统发展结构进行了非静力数值模拟;程麟生等^[10]在对“98.7”突发大暴雨过程分析的同时,对其相伴的中尺度低涡结构进行了双向相互作用二重嵌套网格的数值模拟^[10],并进行了中尺度热量和水汽的数值诊断^[11],进而用 MM5. V3 进行了双向相互作用三重嵌套网格的数值模拟^[12],同时给出了中尺度暴雨低涡的三维结构和 72 h 的降水预报^[12]。徐亚梅等^[13]对该例 7 月 22 日发生在黄石附近的 β 中尺度低涡进行了数值模拟和分析。但至今,对该过程 7 月 21~22 日武汉周边沿江特大暴雨的落区和雨强及其相伴的 β 中尺度低涡的生成和发展结构及其演变的模拟仍不能令人满意。为此,文中利用 MM5. V3 和四维资料同化分析方法,对该过程武汉周边沿江特大暴雨相伴的 β 中尺度低涡的生成和发展结构及其演变,进行双向相互作用四重嵌套网格的更高分辨数值模拟

• 初稿时间:2002 年 12 月 20 日;修改稿时间:2003 年 4 月 26 日。

资助课题:国家重点基础研究项目(G1998040907)。

和分析研究。

2 鄂东强暴雨和 β 中尺度对流系统

“98.7”特大暴雨过程与 500 hPa 短波槽、700 hPa 低涡切变线以及沿切变线相继生成和强烈发展的 β 中尺度对流系统(β MCS)密切相关^[10]。本文更关注的是与鄂东沿江武汉周边强暴雨相伴的 β 中尺度对流系统(β MCS)生成和发展的结构及其演变。

在 7 月 21 日 04~15 时在鄂东沿江的武汉(30°38'N, 114°04'E)周边地区发生了一次特大暴雨过程, 武汉自 20 日 20 时~21 日 08 时的 12 h 累计降雨量是 161.1 mm(图 1), 但在 21 日 06~07 时的 1 h 武汉的降雨量就高达 88.4 mm。这种突发特大暴雨的持续是这次暴雨过程的一个显著特征。那么, 是什么原因造成这种突发而又持续的特大暴雨呢?

为此, 对该过程逐日逐时 GMS-4 红外云图和 GMS T_{BB} 等值线图进行了分析, 结果表明^[10], 自 21 日 04 时在武汉及其南部开始持续发展的 β 中尺度椭圆形云团 a(称 β MCS-a), 对流十分强盛, 在 21 日 06~14 时的 8 h 期间, 云顶最低亮温都低于 -70 °C(图略)。该期间正是武汉、汉川及其南部地区特大暴雨突发并持续的时段。图 2 仅给出 21 日 08 时的 GMS IR 云图。在图 2 的右侧还可看出另一个 β MCS(称 β MCS-b)的生成和持续强烈发展, 该云团不仅与武汉周边的强暴雨有关, 而且与其后黄石(图 1)为中心的特大暴雨相关。

由此可见, 该过程突发并持续的特大暴雨与沿切变线生成的低涡及其相继生成和强烈发展的 β MCS 直接关联。那么, 从预报和机理考虑, 能否模拟出武汉周边沿江的暴雨雨带和雨强? 能否模拟

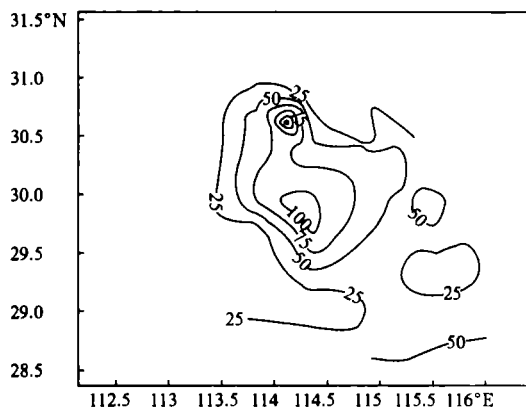


图 1 1998 年 7 月 20 日 20 时~21 日 08 时
鄂东 12 h 降雨量(mm)分布
(图中最大降雨中心(武汉)雨量是 161.1 mm)

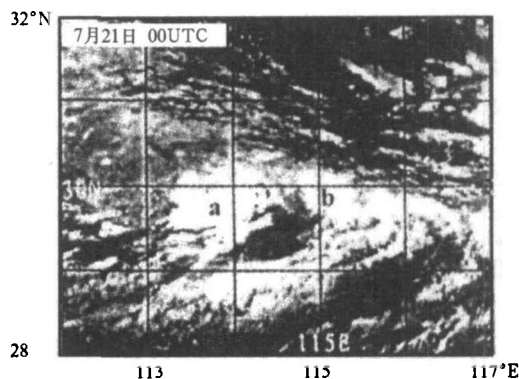


图 2 1998 年 7 月 21 日 08 时鄂东上空的
GMS IR 云图

(a 和 b 分别为 β MCS-a 和 β MCS-b, 经、纬度网格
为 1°间隔。最大降雨中心雨量是 161.1 mm)

出与该暴雨带密切关联的 β 中尺度切变线低涡的生成和发展结构及其演变?

3 模式模拟设计

这里的模拟包括 MM5. V3^[14] 的全物理湿过程, 采用双向四重(D01, D02, D03, D04)嵌套网格技术; 模式顶 $p_t = 100$ hPa 和垂直分层 $K_v = 26$; 地形和下垫面特征分类: 对不同模拟域采用不同分辨率地形资料(见表 1), 24 类地表特征分辨率与相应模拟域地形资料相应, 用复合双抛物线插值方案获得格点地形和下垫面特征资料; 初始条件: 用 6 h 高空和 3 h 地面的分析格点资料作分析张弛的四维资料同化(FDDA)产生初值, 资料由国家重点基础研究项目(G1998040900)提供; 侧边界条件: D01 采用张弛方案, 将模式预报场向 6 h 间隔分析场逼近, 而较粗网格又为较细网格提供时变的侧边界条件; 行星边界层物理过程: 采用 Blackadar 高分辨 PBL 参数化; 地面物理过程: 包括有非均一地表的热通量和动量通量; 地面温度: 由浅层模式和有云效应的能量收支预报获得; 云和降水物理过程: 可分辨尺度降水采用 Schultz^[14] 的微物理显式方案, 次网格尺度(D01, D02)降水采用 KF^[14] 积云参数化方案; 辐射过程采用 NCAR/CCM2 辐射方案^[14]; 土壤温度: 采用 5 层土壤模式^[14]; 模拟时间: 36 h, 即自 1998 年 7 月 20 日 20 时至 22 日 08 时。

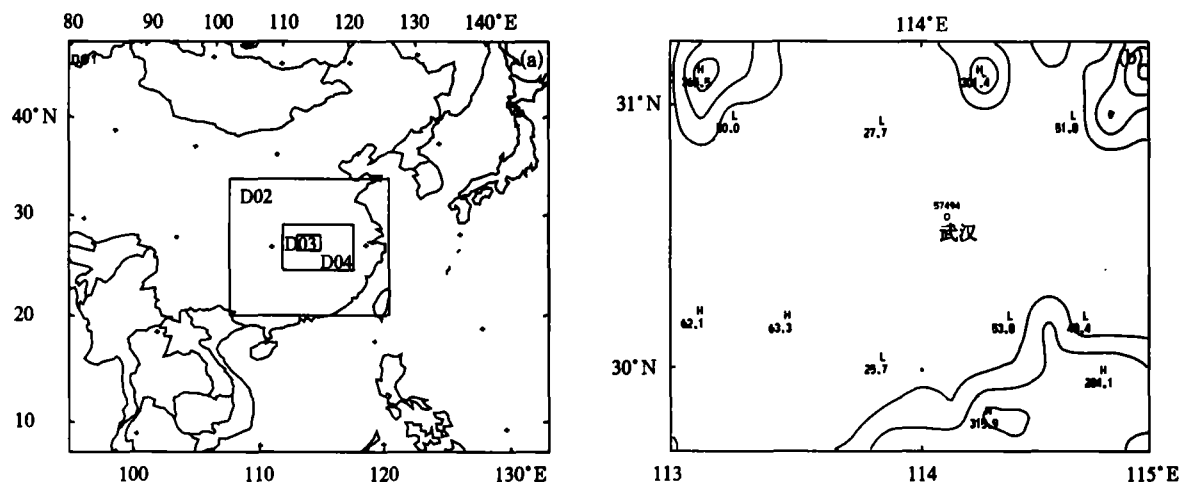
表 1 和图 3 给出了文中模拟所选定的四重嵌套模拟域, 母域 D01 和子域 D02 同一中心, 定位于 30°N, 114°E, 子域 D03 和 D04 因雨带而设定; 母域 D01 水平格距为 54 km, 从粗网格到细网格格距之比均

为 3:1;表 1 中格距为 2 km 的子域 D04 用于分辨 β 中尺度尺度暴雨系统的发生、发展和演变;在模拟过程中较细网格解在每一时步又反馈给较粗网格解,所以,这样就可完成粗、细网格之间的相互作用。模拟资料每小时输出一次。此外,需要特别指出的是,本文模拟初始条件是用 6 h 高空和 3 h 面的分析格点资料作分析张弛的四维资料同化(FDDA)产生初

值的,这样的同化资料经过 8 h 运行的动力热力调整后,再启动 D02 域,在 D02 和 D01 经过 2 h 的双向相互作用后,再同时启动 D03 和 D04 域,当这四重嵌套域双向相互作用 1 h 后所输出的逐时资料,才用于分析。从以下对 D04 域模拟的降雨和 β 中尺度尺度低涡的生成和发展结构看,该模拟设计基本上是合理的。

表 1 四重嵌套网格模拟域设计

模拟域	D01	D02	D03	D04
X, Y 向格点数	91×91	91×91	121×91	121×91
格距(km)	54	18	6	2
区域面积(km ²)	4860×4860	1620×1620	720×540	240×180
时间步长(s)	90	30	10	3.3
积分时间(h)	0~36	8~36	10~36	10~36
地形分辨率(′)	30′	10′	5′	5′



(图 5b),但其北侧只有气旋性曲率出现,而没有南北气流的辐合带;到 08 时,一个 β 中尺度低涡在武汉附近上空 700 hPa 生成(图 5c),在该低涡南侧的西南急流中心风速维持在 $17.4 \sim 16.3 \text{ m/s}$ 之间;与该 β 中尺度低涡相应,在 850 hPa 已有一明显的强辐合区出现(图 5d),该强辐合区正出现在西南急流中心风速为 15.5 m/s 的北侧。该低涡在 600 hPa 达最强(图略)。

由此可见,该 β 中尺度低涡的形成及其后的发展不仅与该 β 中尺度切变线的形成和强烈发展直接相关,而且也与低空一支深厚的西南急流的形成、发展和维持密切相关;此外,该低涡由低空向中空的发展过程也与 β 中尺度对流云团的发生和发展过程(图 2)大体一致。与图 5c 低涡相应的 700 hPa 位势场是一个水平尺度约 40 km 的 β 中尺度低涡(图略)。

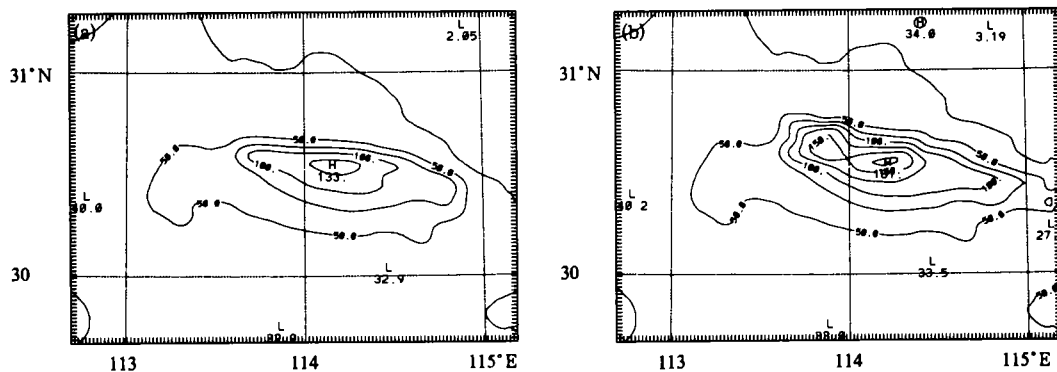


图 4 自 7 月 20 日 20 时模拟至 21 日 07 时(a)和 08 时(b)在 D04 域的累计降雨量(mm)分布

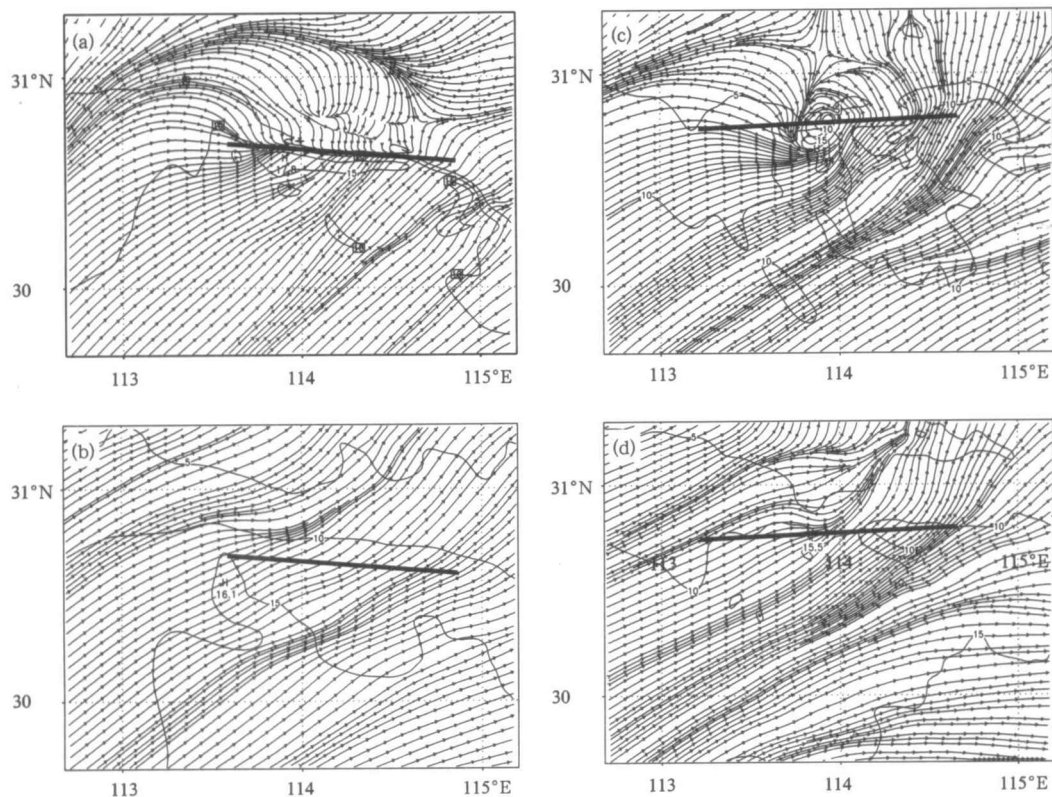


图 5 1998 年 7 月 21 日 07 时(a,b)和 08 时(c,d)在 D04 域的 700 hPa(a,c)和 850 hPa(b,d)流场与 β 中尺度低涡的生成
(图中横线是相应时次的剖面位置)

5 β 中尺度切变线强烈发展的垂直结构

5.1 强辐合辐散层复式迭置和强上升运动耦合发展

与7月21日07时 β 中尺度尺度切变线强烈发展(图5a)相应,在切变线垂直向呈现一种强辐合层和强辐散层迭置的复式结构(图6a)。由图6a可见,最强的辐合层在800~550 hPa之间,在650 hPa上下的两个强辐合中心分别达 $-320 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $-360 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,其上迭置的强辐散层在550~400 hPa之间,在450 hPa上下的一个强辐散中心强度达 $400 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$;沿550 hPa无辐散层上下因动力耦合驱动产生整层强烈上升运动(图6a),在其西半部最强辐合层和最强辐散层迭置的复式结构区,在500 hPa上下有两个并列的分别达8和7 m/s的强上升运动中心(图6b),

这两支强上升气流在强辐合强辐散层迭置区的进一步耦合发展,将驱使该迭置区沿垂直向分支发展,特别是强上升气流与 $-320 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 辐合中心相耦合的这一支将会发展得更剧烈。这种剧烈发展与其后 β 中尺度低涡的生成密切相关。值得注意的是,在该迭置结构的上方紧邻的是另一弱辐合层和强辐散层的迭置结构(图6a),但相伴的垂直运动很弱;而在最强辐合层的800 hPa以下是一支相对平直的西南气流(图5b,d),所以在该纬向剖面上的该层只能看到西风分量,而看不到明显的散度结构。但从垂直和水平向的整体空间结构可见,无论是 β 中尺度切变线还是 β 中尺度低涡的发生和发展结构都是复杂的。这在下一时次就可明显看出。

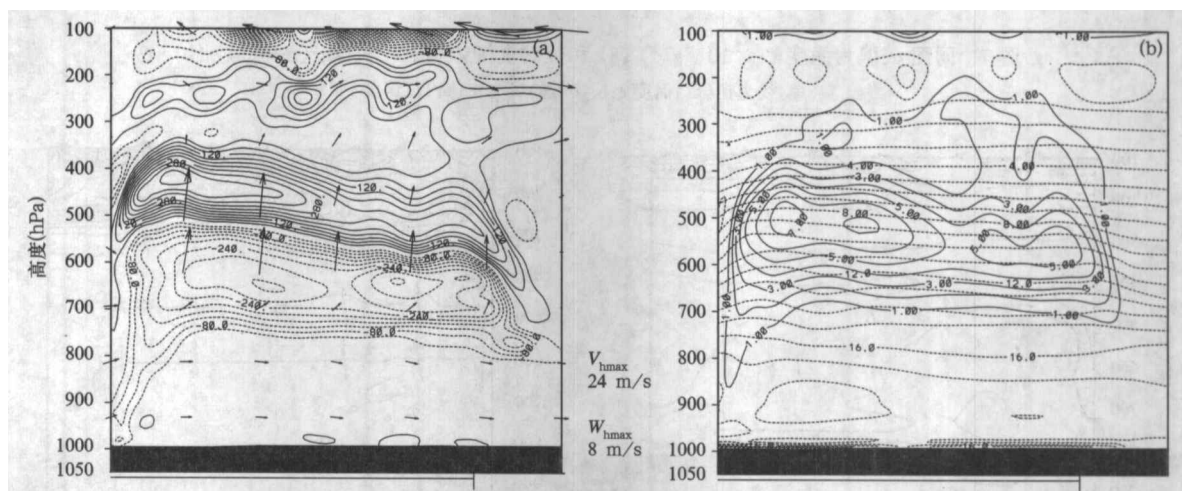


图6 1998年7月21日07时沿图5(a,b)剖线的散度 $D(\times 10^{-5} \text{ s}^{-1})$ (a)和垂直速度 $w(\text{m/s})$ (b)的垂直剖面结构

(a. 虚(实)线为辐合(散), 箭头为垂直环流; b. 实(虚)线为上升(下沉)速度, 还迭置有水汽混合比 $q(\text{g/kg})$ (虚线)。图下方黑带为地形)

5.2 强涡度和位涡度层与强辐合层互伴发展

在图6a最强辐合层,各有一强涡度 ζ 层(图7a)和强位涡度PV层(图7b)与其相伴,这种互伴具有一种动力学相关机制。在600 hPa上下,正的强 ζ 层和强PV层各有一近乎与强辐合带迭置的高值中心带,分别达 $280 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $28 \times 10^{-6} \text{ K/kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$,特别值得注意的是与左侧两支强上升气流相伴的高值中心区,这种相伴也将使该区的强涡度和强位涡度沿垂直向发展,这种发展与其后 β 中尺度尺度低涡的生成直接相关。在正的强 ζ 层和强PV层之上,各为一负的弱 ζ 层和弱PV层,尽管该正、负 ζ 层和PV层各自迭置的结构没有其下强辐合辐散层迭置的结构对

称,但其 ζ 层和PV层迭置的形态结构极其相似(图7)。而在800 hPa以下,同样由于是一支相对平直的西南气流(图5b,d),所以在图7中该层看不到明显的涡度和位涡度结构。但在整体空间上,无论是 β 中尺度切变线还是 β 中尺度低涡的发生和发展结构也仍然都是复杂的。这在下一时次就可明显看到。

5.3 低空湿位温中心与中空饱和水汽带共存

与700 hPa的 β 中尺度切变线和低空西南急流(图5a)相应,在800~500 hPa左半部有一相当位温 θ_e 的高值区出现(图8a),位于700 hPa的高值中心达360 K,该中心与西南急流的增强及其后 β 中尺度低涡在切变线上的生成(图5c)密切相关。与此同时,在

500 hPa 上下有一条相对湿度(RH)达 100% 的饱和水汽带,并在切变线上空与强上升运动带相伴(图 8b);在 800 hPa 以下,由于有西南急流的生成和发展(图

5b,d),因此有一相对的湿层存在(图 8a);与 β 中尺度切变线相伴的温湿场及其垂直运动场的带状结构和相应暴雨带(图 4a)是一致的。

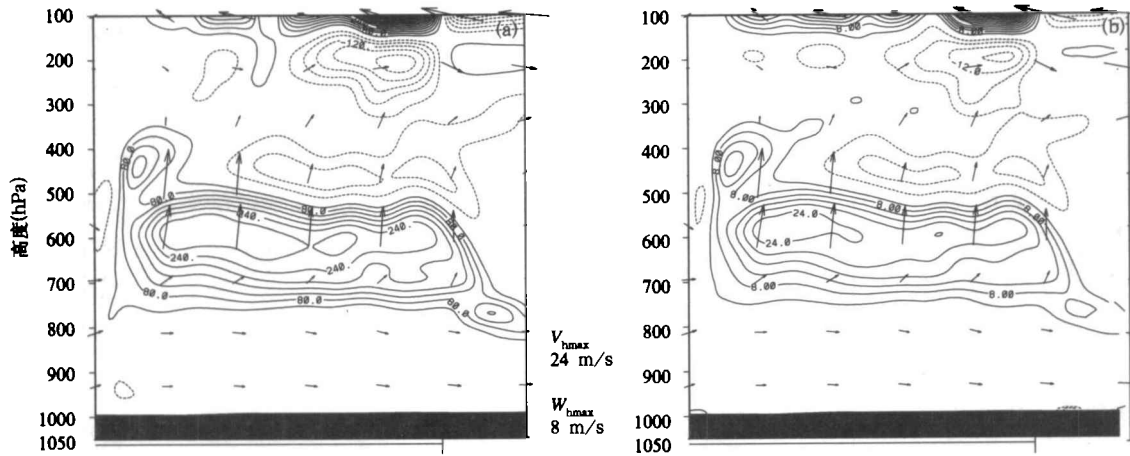


图 7 同图 6,但为涡度 ζ ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) (a) 和位涡度 PV ($\times 10^{-6} \text{K/kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$) (b)

(a. 实(虚)线为正(负)涡度 ζ ; b. 实(虚)线为正(负)位涡度 PV)

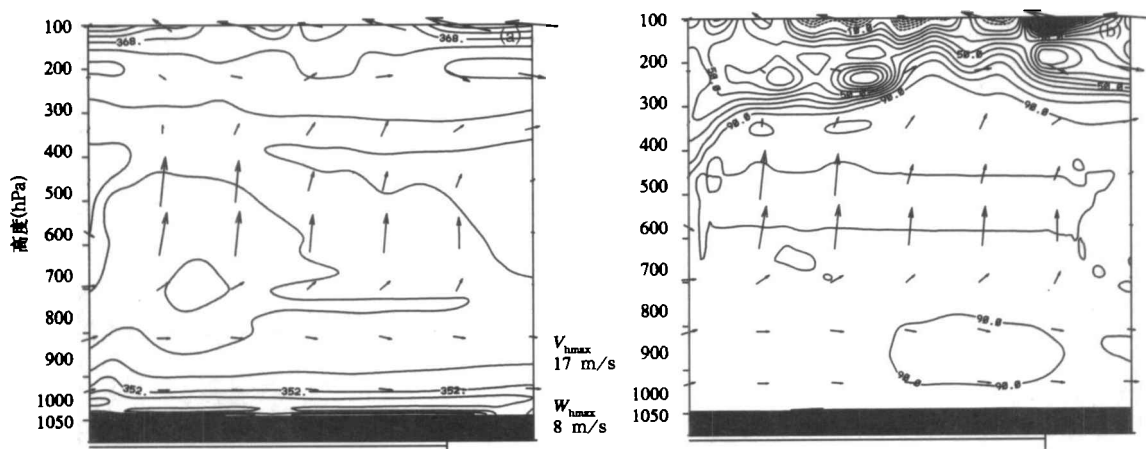


图 8 同图 6,但为相当位温 θ_e (K) (a) 和相对湿度 RH (%) (b)

(等 θ_e 线和等相对湿度线间隔分别为 4 和 10)

6 β 中尺度低涡生成的垂直结构

6.1 散度和上升运动的双支柱状发展:低涡与强辐合柱相伴

在前面讨论 21 日 07 时切变线的散度和垂直运动场发展结构(图 6)时曾指出,由于两支强上升气流在强辐合和强辐散层迭置区的进一步耦合发展,将驱使该迭置区沿垂直向分支发展,特别是强上升气流与强辐合中心相耦合的这一支发展得更剧烈。这在 21 日 08 时的图 9a 中可明显看出,原来呈层状迭置的强辐合和强辐散层而变为分支的柱状,其右侧的散度柱

明显强于左侧的,但左、右两支的高空强辐散和低空强辐合中心都分别达 $360 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $-280 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,由于两支的高空辐散均强于低空辐合,所以在质量连续原理约束下,低空辐合必然进一步加强,因而,与其相伴的 β 中尺度低涡(图 5c)也必将进一步发展。与分支的散度柱相应,在中空达 7 m/s 的两支强上升气流不仅与低(高)空两支辐合(辐散)(图 9a)互耦,而且与两支深厚湿舌(图 9b)相伴;这种结构与其后热力场和水汽场的最优互配是该暴雨(图 1)过程和暴雨雨团(图 2)发生与加强的重要机制;在两支分离的强上升气流之间的一支较弱下沉气流(图 9b)是该次级

垂直环流继续维持和发展的一种动力强迫响应。由于上述双支结构的维持和发展,因而在其后的涡度和位涡度柱也发展为双柱结构。

6.2 涡度和位涡度的柱状发展:低涡与涡柱相伴

与图 9a 分支的散度柱相应,其右侧的散度柱各有一支正的强涡度 ζ 柱和一支正的强位涡度 PV 柱相伴(图 10),正 ζ 和正 PV 柱由 850 hPa 伸展至 400 hPa,其中心在 600 hPa 分别高达 $480 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 40×10^{-6}

$\text{K/kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$, 该正 ζ 柱和正 PV 柱是该 β 中尺度低涡生成时在垂直向最清晰的物理结构特征。而与图 9a 左侧散度柱相伴的只有未连通的涡度和位涡度中心;随着散度柱和上升运动的进一步耦合发展,这些未连通的涡度和位涡度中心也将连通为另一支涡度柱和一个位涡度柱。该结果,沿强烈发展的 β 中尺度切变线在垂直向有单一正的强涡度(或位涡度)柱生成是 β 中尺度低涡生成的主要物理结构特征。

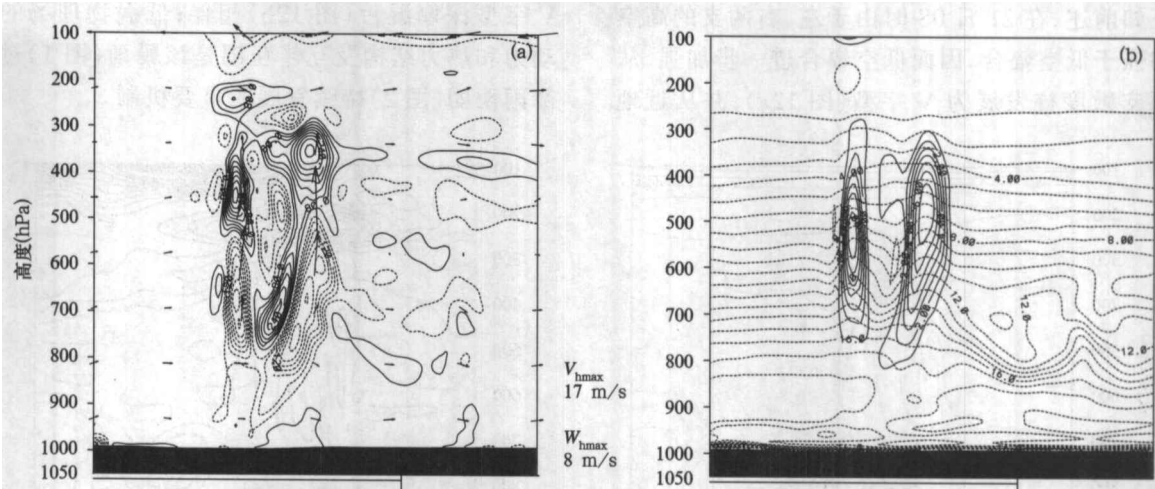


图 9 1998 年 7 月 21 日 08 时沿图 5(c,d)剖面($x_1 = 26, y_1 = 59; x_2 = 98, y_2 = 61$)的散度 $D(\times 10^{-5} \text{s}^{-1})$ (a) 和垂直速度 $w(\text{m/s})$ (b) 的垂直剖面结构(说明同图 6)

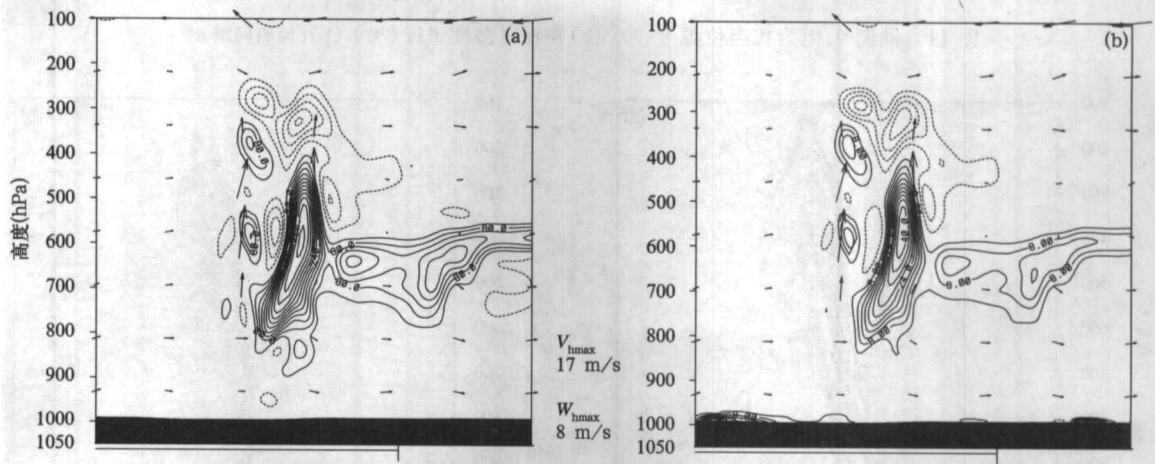


图 10 同图 9, 但为涡度 $\zeta(\times 10^{-5} \text{s}^{-1})$ (a) 和位涡度 $PV(\times 10^{-6} \text{K/kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1}))$ (b) 的垂直剖面(说明同图 7)

6.3 高湿能柱的双支耦合发展:阶梯斜升水汽通道

由于 21 日 07 时 β 中尺度切变线温湿场(图 8)与其相伴的两支强上升气流的互耦发展,在 21 日 08 时的相当位温 θ_e 垂直剖面图 11a 中,出现了与两支强上升气流互伴的高湿能柱,在两个湿能柱内均

为近似湿中性区,在两个湿能柱间的低能舌下半部是湿对流不稳定区;与相当位温 θ_e 近似平行的湿上升气流在低空是斜升的,在中空是垂直的,在高空是纬向的;由低空、经中空、向高空输送的水汽通道是阶梯式斜升的。与两支强上升气流相伴的两支深厚

的高湿水汽柱在相对湿度(图 11b)和混合比的垂直剖面(图 9b)中都可看到,但混合比的更为清楚。在这种动力和热力过程的相互作用下,已生成的 β 中尺度暴雨低涡和对流云团将进一步发展。

7 β 中尺度低涡发展的垂直结构

7.1 V 字型散度柱和上升运动柱互耦发展:低涡强烈发展

正如前述,在 21 日 08 时由于左、右两支的高空辐散均强于低空辐合,因而低空辐合进一步加强,从而使两支散度柱发展为 V 字型(图 12a),并从近地

层伸展至对流层顶附近,右支的高空(250 hPa)强辐散和低空(850 hPa)强辐合中心都分别达 $360 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $-360 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,与其相伴的 β 中尺度低涡(图 5c)持续发展(图略);左支的高空(300 hPa)强辐散和低空(700 hPa)强辐合中心分别达 $400 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $-320 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$;与 V 字型散度柱相应,在中空达 8 m/s 的两支强上升气流亦呈 V 字型(图 12b),它不仅与 V 字型散度柱(图 12a)互耦,而且与 V 字型深厚湿舌(图 12b)相伴;低涡物理场的这种动力和热力结构及互伴互耦是该暴雨(图 1)过程和暴雨雨团(图 2)持续发展的重要机制。

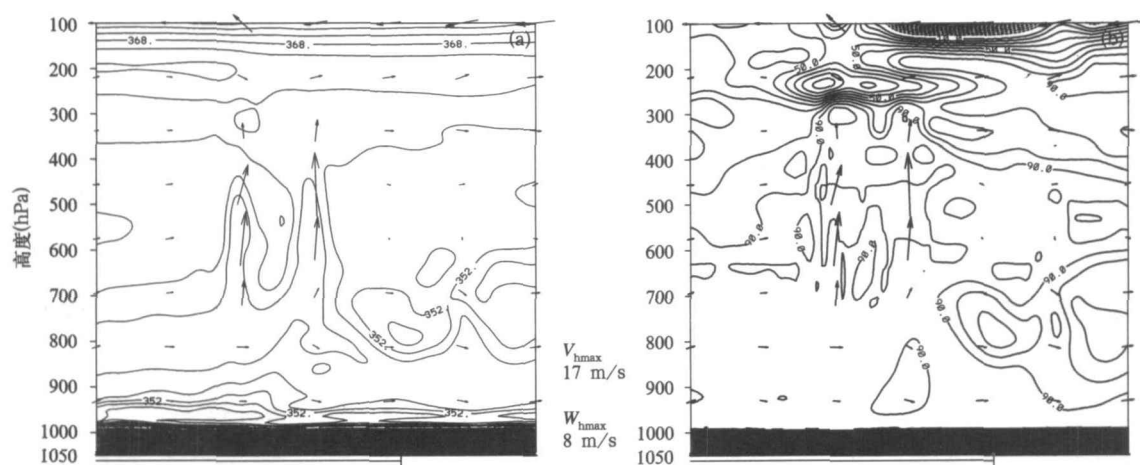


图 11 同图 9, 但为相当位温 θ_e (K) (a) 和相对湿度 RH (%) (b) (说明同图 8)

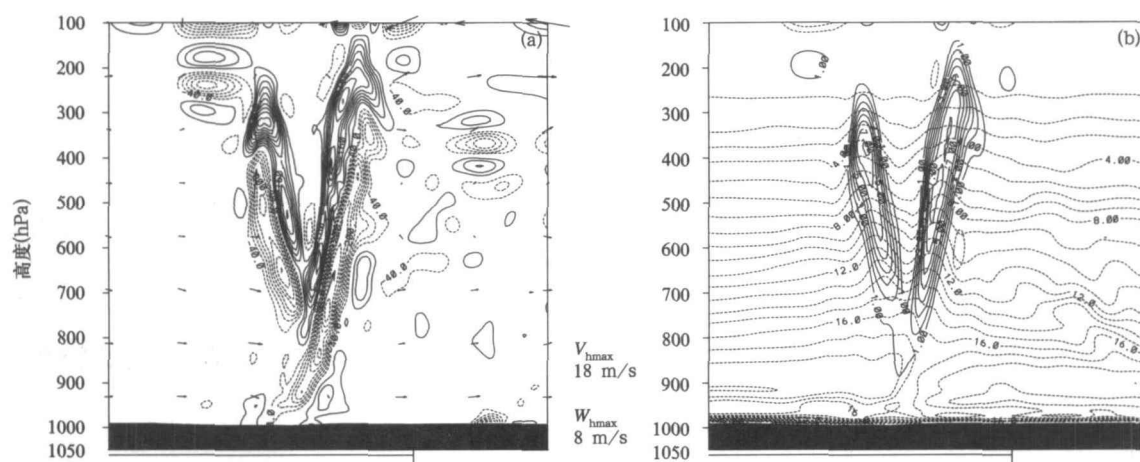


图 12 1998 年 7 月 21 日 09 时沿图 5(c,d)剖面(但 $y_1 = 60$)的散度 D ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) (a) 和垂直速度 w (m/s) (b) 的垂直剖面结构(说明同图 6)

7.2 涡度和位涡度的双柱状结构:低涡相伴强涡柱

前面已指出,在 21 日 08 时与图 9a 分支的散度柱相应,其右侧的散度柱各有一支正的强涡度 ζ 柱

和一支正的强位涡度 PV 柱相伴(图 10),而与其左侧散度柱相应的则是未连通的正涡度和位涡度中心;由于双支散度柱(图 9a)和上升运动的进一步耦

合发展,这些未连通的正涡度和位涡度中心(图 10)在 21 日 09 时已连通为另一支正涡度 ζ 柱和另一支正位涡度 PV 柱(图 13),但这两支并未构成 V 字型,而强烈发展的右支涡度柱和位涡度柱在 600~500 hPa 的强中心近分别达 $400 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $36 \times 10^{-6} \text{K/kg} \cdot (\text{m/s})$ (图 13),这是与其相伴的 β 中尺度低涡强烈发展的主要物理场垂直结构特征;而左支正涡度柱和正位涡度柱(图 13)较弱,位于 600~500 hPa 的强中心分别均为 $240 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 和 $28 \times 10^{-6} \text{K/kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

7.3 双支高湿能柱强烈发展:阶梯斜升水汽通道变宽增厚

在 21 日 08 时的 θ_e 垂直剖面(图 11a)中,与两支强上升气流互伴的两支高湿能柱,在 21 日 09 时强烈发展(图 14a),在两个均为近似湿中性区的右支湿能柱上端已贯通,在两个湿能柱间的低湿能舌区进一步伸展,其下半部的湿对流不稳定加强;右支湿上升气流在对流层整层与等 θ_e 线近乎平行;两支湿上升气流由低空、经中空、向高空输送的水汽通道维持阶梯式斜升,但变宽增厚。与两支强上升气流及高湿能柱相伴的两支高湿水汽柱发展的非常深厚,这在相对湿度的垂直剖面(图 14b)中显现的尤为清楚。在所述诸物理场的互伴互耦及相互作用下, β 中尺度暴雨低涡和对流云团已发展至最强。

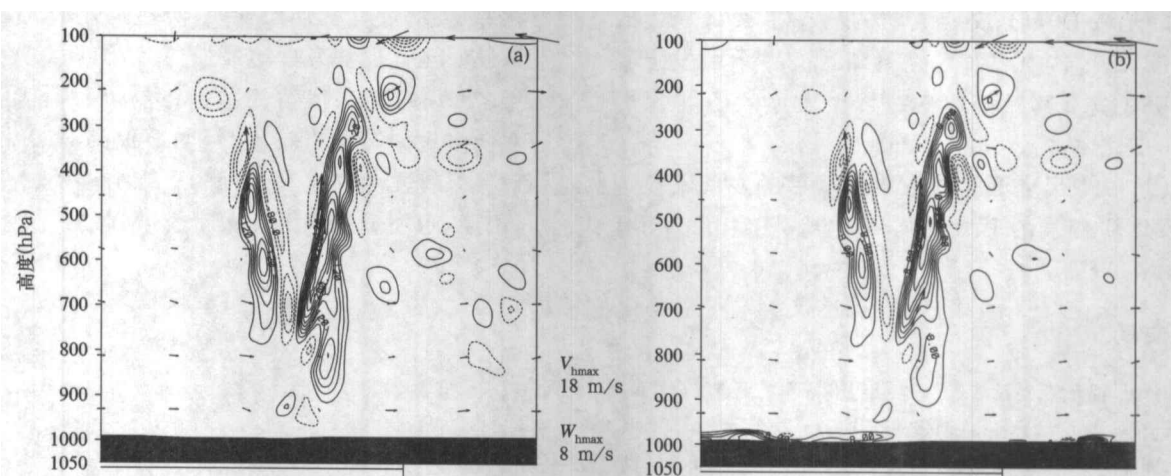


图 13 同图 12,但为涡度 $\zeta (\times 10^{-5} \text{s}^{-1})$ (a) 和位涡度 PV ($\times 10^{-6} \text{K/kg} \cdot (\text{m/s}^{-1})$) (b) 的垂直剖面(说明同图 7)

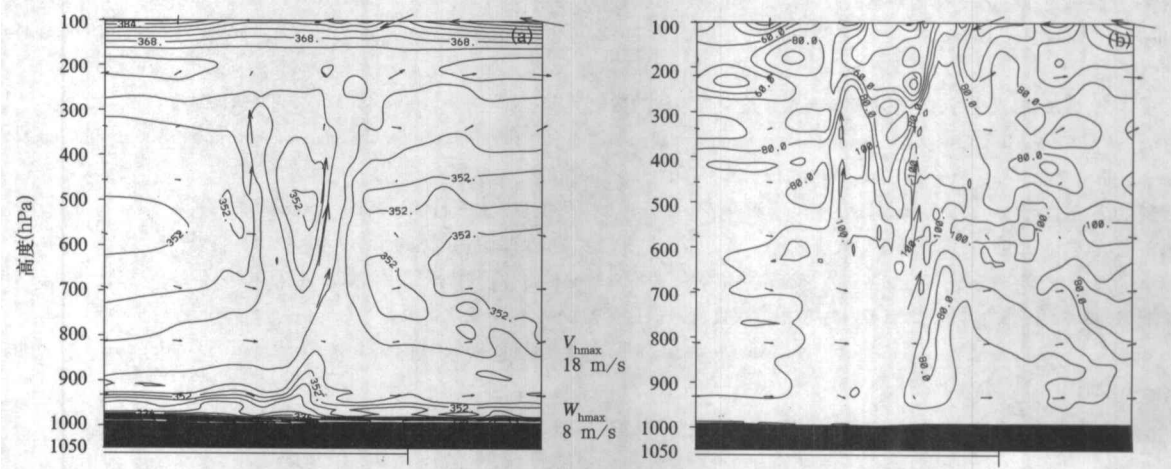


图 14 同图 12,但为相当位温 $\theta_e (\text{K})$ (a) 和相对湿度 RH (%) (b) (说明同图 8)

至此,沿切变线生成的 β 中尺度暴雨低涡已发展到最强,其结构亦最典型。而该 β 中尺度暴雨低涡在其后的结构演变简述如下:由于 V 字型散度柱右支的相对散度已趋于平衡,因此垂直环流和上升

速度减弱,而与其相伴的涡度柱、位涡度柱及其高湿能柱和饱和水汽柱也相继减弱;这些结果都与 β 中尺度暴雨低涡的减弱直接相关,也与其后暴雨团消弱及武汉周边特大暴雨减小相伴。随着武汉周边特

大暴雨过程的结束,另一次特大暴雨过程于 7 月 22 日发生在黄石附近,该过程已由徐亚梅等^[13]对其进行了数值模拟和分析。

8 结 论

综上所述,可得如下结论:

(1) 观测分析指出,1998 年 7 月 20~22 日,发生在鄂东武汉沿江的特大暴雨过程与沿切变线生成和强烈发展的 β 中尺度低涡直接关联。

(2) 用 MM5. V3 全物理湿过程和分析张弛的四维资料同化方法及双向四重嵌套网格技术,对该过程进行的 36 h 数值模拟结果指出,2 km 水平分辨率的子域 D04 不仅能成功的模拟出武汉周边的暴雨带及雨强中心,而且能更细致的揭示引发强暴雨的切变线及其沿该切变线发生发展的 β 中尺度低涡的三维结构及演变。

(3) β 中尺度低涡的形成及其后的发展不仅与 β 中尺度切变线的形成和强烈发展直接相关,而且

也与低空一支深厚的西南急流的形成、发展和维持密切相关。

(4) β 中尺度切变线强烈发展的垂直结构:强辐合层和强辐散层复式迭置并与强上升运动耦合发展;强涡度层和强位涡度层与强辐合层互伴发展;低空湿位温中心与中空饱和水汽带共存。

(5) β 中尺度低涡生成的垂直结构:散度和上升运动均呈双支柱状发展;涡度和位涡度均呈单支柱状发展;高湿能柱呈双支耦合发展,水汽通道呈阶梯斜升状。

(6) β 中尺度低涡发展的垂直结构:V 字型散度柱和上升运动柱互耦发展;涡度和位涡度呈双支柱状;双支高湿能柱强烈发展,阶梯斜升水汽通道变宽增厚。至此低涡发展达最强,其结构具有典型性。

(7) 模拟结果揭示,对资料进行四维同化和发展双向多重嵌套网格技术,可明显提高对 β 中尺度强对流系统发生和发展过程的三维结构及演变的模拟,因而,也明显提高了暴雨带及雨强的预报水平。

参考文献

- 1 陶诗言,倪允琪,赵思雄等. 1998 年中国暴雨的形成机理与预报研究. 北京:气象出版社,2001. 184pp
- 2 胡伯威,崔春光,房春花. 1998 年 7 月 21~22 日鄂东沿江连日大暴雨成因分析. 大气科学,2001,25(4): 479~491
- 3 王沛霖. 珠江三角洲局地强风暴发生的环境条件. 气象学报,1994,52(2):252~256
- 4 王鹏云,刘春涛. 1996 年第 8 号低压中尺度结构的数值研究. 气象学报,1998,56(3):296~311
- 5 段英,刘静波. 超级单体、单体和多单体雷云及其成雹特点的数值模拟研究. 气象学报,1998,56(5):529~539
- 6 王立琨,郑永光,陶祖钰. 华南暴雨试验过程的环境场和云团特征的初步分析. 气象学报,2001,59(2):115~119
- 7 Chen S J, Kuo Y H, Wang W, et al. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front. Mon Wea Rev, 1998, 126: 2330~2351
- 8 张庆红,刘启汉,王洪庆等. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟. 科学通报,2000,45(18):1988~1992
- 9 Feng, W, Cheng L, Cheng M. Nonhydrostatic numerical simulation for the "98.6" extraordinary rainstorm and the developing structure of mesoscale system. Acta Meteor Sinica,2002,16: 423~440
- 10 程麟生,冯伍虎. "98.7"突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟. 大气科学,2001,25(4):465~478
- 11 冯伍虎,程麟生. "98.7"特大暴雨中尺度系统发展的热量和水汽收支诊断. 应用气象学报, 2001,12(4):419~432
- 12 程麟生,Kuo Y H,冯伍虎等. 双向三重嵌套网格和"98.7"特大暴雨模拟. 高科技研究中的数值计算,2000,6: 346~351
- 13 徐亚梅,高坤. 1998 年 7 月 22 日长江中游中- β 尺度低涡的数值模拟及分析. 气象学报,2002,60(1):85~95
- 14 Dudhia J, Dave G, Guo Y R, et al. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 2. 1999,MMM, NCAR, 1999

STRUCTURAL EVOLUTION OF THE GENESIS AND DEVELOPMENT ON MESO- β VORTEX FOR THE “98.7” HEAVY RAINFALL: SIMULATION OF TWO WAYS WITH QUARTET NESTED GRID

Cheng Linsheng Feng Wuhu

(*Department of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000*)

Abstract

During 20—22 July 1998 (“98.7”), an abrupt extraordinary heavy rainfall occurred in the eastern and southwestern parts of Hubei Province, especially in Wuhan periphery, which is seldom in the Changjiang River basin. Observational analyses indicate this event was in close relationship with the short wave trough at 500 hPa and a low vortex with shear line at 700 hPa as well as successive generating and developing of β MCS along the shear line. This event has successfully simulated for 36 hours using the fifth-generation Pennsylvania State University-NCAR Mesoscale Model Version 3(MM5.V3). This MM5.V3 includes full moist physics and two ways with quartet nest grid as well as FDDA of analysis nudging. The results pronouncedly improved previous simulation of the two-and-triple nest grid, especially, the nest subdomain D04 with 2 km horizontal resolution was able to simulate correct heavy rainfall area and raininess, further revealed the structures and evolution of the genesis and development on meso- β systems producing intense heavy rainfall. The main results include: (1) The genesis and development on a meso- β low vortex not only were in directly relationship with intense development of a meso- β low-level shear line along the Changjiang River in the east Hubei and the occurrence of a convergence center, but also in close relationship with the formation, development and maintenance of a thick southwest low-level jet stream; (2) The structural vertically features of the intense development on the meso- β shear line showed that the intense convergence and divergence layers were reiteration and coupling development with intense ascending motion, while the intense vorticity and potential vorticity as well as convergence layers were interadjoin, the moist potential temperature center in low levels and the saturated vapor belt in middle levels were in coexistence; (3) The structural vertically features of the genesis on the meso- β low vortex indicated that the divergence and ascending motion displayed double-branch column development, the vorticity and potential vorticity displayed one branch column development, the high moist energy column displayed double branches coupling development, the moisture channel displayed step slantwise ascending; (4) The structural vertically features of the development on the meso- β low vortex showed that the letter V typical columns of the divergence and ascending motion merged intercoupling development, the vorticity and potential vorticity were double branch column, the double branch high moist energy column intensely developed, the step slantwise ascending moisture channel changed into wider and deeper. Up to this stage the development of the low vortex reached the most intensification, while this structure was possessed of the typicality. After this stage, the structural evolution of the low vortex showed the vertical circulation and ascending motion had been weakening, in the mean while, interadjoin the vorticity and potential vorticity double branch column as well as the double branch high moist energy column and the step slantwise ascending moisture channel was also weakened. The results are in directly relationship with the weakening meso- β low vortex. The simulative results also indicated that the development of a multiple nest technology with high temporal and spatial resolution and the application of FDDA method will be helpful to understand more the structure and evolution of the genesis and development on the meso- β severe convective systems, while it will further enhance predictive capability for heavy rainfall area and raininess.

Key words: Heavy rainfall, Meso- β vortex, Structural evolution, FDDA of analysis nudging, Two ways with quartet nest, Numerical simulation.