

# “987”突发大暴雨及中尺度低涡结构的 分析和数值模拟\*

程麟生 冯伍虎

(兰州大学大气科学系, 兰州 730000)

**摘要** 1998年7月20~23日(简称“987”),发生在鄂东和鄂西南地区的突发性特大暴雨过程在长江流域是罕见的。该过程与500 hPa短波槽和700 hPa低涡切变线以及沿切变线相继生成和强烈发展的 $\beta$ 中尺度对流系统密切相关。对该过程采用非静力MM5的二重网格双向嵌套进行了全物理过程的数值模拟,其中,可分辨尺度降水采用Reisner混合相微物理显式方案,次网格尺度降水采用Grell积云参数化方案。双向嵌套的细网格模拟结果揭示,武汉周边地区的特大暴雨与700 hPa上一个 $\beta$ 中尺度低涡的生成和强烈发展直接关联。该低涡具有明显的动力-热力结构特征:特强上升运动与饱和气柱互耦,超强散度柱与强涡柱耦合发展,湿静力不稳定与湿对称不稳定共存,深对流湿气柱内云团发展的微物理场结构比较典型。细网格域内前36 h的降水分布和雨强与观测的大体相应,扩展域细网格的降水模拟明显改进了原细网格的模拟,特别是雨带。这一结果还表明,对持续时间较长的大暴雨,大尺度过程对中尺度系统的影响是重要的。

**关键词:** 特大暴雨; 低涡切变线;  $\beta$ 中尺度低涡结构; 非静力模式; 数值模拟

## 1 引言

1998年夏季长江流域发生了1954年以来最大的流域性洪水。严重的洪涝灾害和8次洪峰<sup>[1]</sup>主要发生在降水过程集中和强度大的3个阶段,即6月12~27日的第一阶段(梅雨),7月16~27日的第二阶段(二度梅),8月份的第三阶段。其中,二度梅的7月20~23日(简称“987”),发生在武汉周边地区、鄂西南、江汉平原、鄂东南的特大暴雨过程<sup>[2]</sup>尤为罕见,在20日20时至22日20时的48 h降水量就有10个县(市)超过300 mm,黄石最大超过500 mm,21日武汉市降了268 mm的特大暴雨,是有降水记录以来7月份出现的最大暴雨。21日06~07 BST的1 h最大雨量达88.4 mm,突破了历史最高记录,武汉市一片汪洋。据统计<sup>[2]</sup>,这次过程仅武汉城区就有1 183户工业企业停产,郊区县农作物2/3(面积)被淹,155.5万 $\text{hm}^2$ 以上农田受灾,水毁公路48条,桥梁16座376 m。这样罕见的突发性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,对这种与低涡切变线和梅雨锋扰动有关的突发性特大暴雨过程及其相伴的中尺度系统,进行深入的分析和中尺度数值模拟研究十分必要。

1999-10-25收到,2000-01-24收到修改稿

\* 国家重点基础研究发展规划项目G1998040907资助

对东亚梅雨期暴雨的研究已有不少工作,陶诗言<sup>[3]</sup>和张丙臣<sup>[4]</sup>曾对中国暴雨和长江中下游梅雨期暴雨作过系统的天气分析研究;余志豪等<sup>[5]</sup>利用观测资料诊断了梅雨锋 $\alpha$ 中尺度雨带与湿位涡变化的关系;Chen和Yu<sup>[6]</sup>对梅雨期台湾北部大暴雨与低空急流的关系作了多例统计和天气分析;Akayama<sup>[7]</sup>曾对日本梅雨锋的云量特征和锋面扰动的时空尺度与结构作了一系列观测分析;Niñomiya等<sup>[8]</sup>分析了日本梅雨锋区内 $\alpha$ 中尺度对流系统的演变和细结构;胡伯威等<sup>[9]</sup>对暖切变型梅雨锋进行了天气动力学研究;Nagata等<sup>[10]</sup>对梅雨季节日本暴雨和低空急流之间的相互作用进行了个例数值模拟研究;Chen等<sup>[11]</sup>对沿台湾梅雨锋发展的中尺度对流系统的数值模拟结果发现,低空急流的发展对对流过程是敏感的;Chen等<sup>[12]</sup>对1991年6月中旬江淮流域一次沿梅雨锋的中尺度暴雨系统的演变进行了数值模拟,在对模拟结果分析之后,还提出了一个概念模式;赵思雄等<sup>[13]</sup>对1998年7月特大洪水期暴雨特征进行了分析研究。但至今,对长江流域梅雨期与低涡切变线有关的突发性而持续的特大暴雨过程及其相伴的中尺度系统发生发展及结构演变的数值模拟研究还不多。为此,本文将在对该过程降水特征和大、中尺度天气分析的基础上,利用高时空分辨的非静力中尺度数值模式MMS,对该突发性大暴雨过程及其中尺度系统的发生发展和结构演变进行数值模拟研究。

## 2 降水特征

### 2.1 过程降水特征

图1是7月20日08 BST至22日20 BST湖北省的24 h、48 h和60 h的累积降水量分布。由图可见,过程降水量逐日增加,雨区明显扩大,主要集中在长江中游两岸108~117°E之间。在22日20 BST(图1c),鄂东的两个最大降水中心已分别达到457 mm(武汉)和515 mm(黄石),鄂西南有个306 mm的降水中心(来凤)。这些大降水中心在23日08 BST(72 h)的变化不大,武汉仍为457 mm,而黄石和来凤分别增加到539 mm和315 mm(图略)。应该说还有其他强降水中心,但这有待湖北邻域各省的降水资料来增补。

### 2.2 中尺度降水的时变特征

图2是该过程特大降水时段(7月20日20 BST至22日20 BST)几个代表站逐时降水量的时变直方图,每个站1 h最大降水量都超过50 mm。由图可见,降水的一个显著特征是:突发特大暴雨的间歇性持续。武汉、黄石、汉川和蕲春都有两个时段的强降水:武汉1 h最大是88.4 mm(21日06~07时);而最具突发性特大暴雨的是石首(区站号57571)(图略),该站在21日17~18时突然发生91.1 mm/h的特大暴雨,而18~20时又骤然减小到4.1 mm/h,随之结束。这些站突发性而又持续的特大暴雨正是形成上述暴雨雨带两个最大降水中心及其他强降水中心的原因,下面讨论这个问题,首先简要分析该过程的大、中尺度环流特征的一些观测事实。

## 3 大尺度环流特征和中尺度系统分析

“987”突发性特大暴雨过程是在有利的大尺度环流形势下,由相继发生发展的中尺

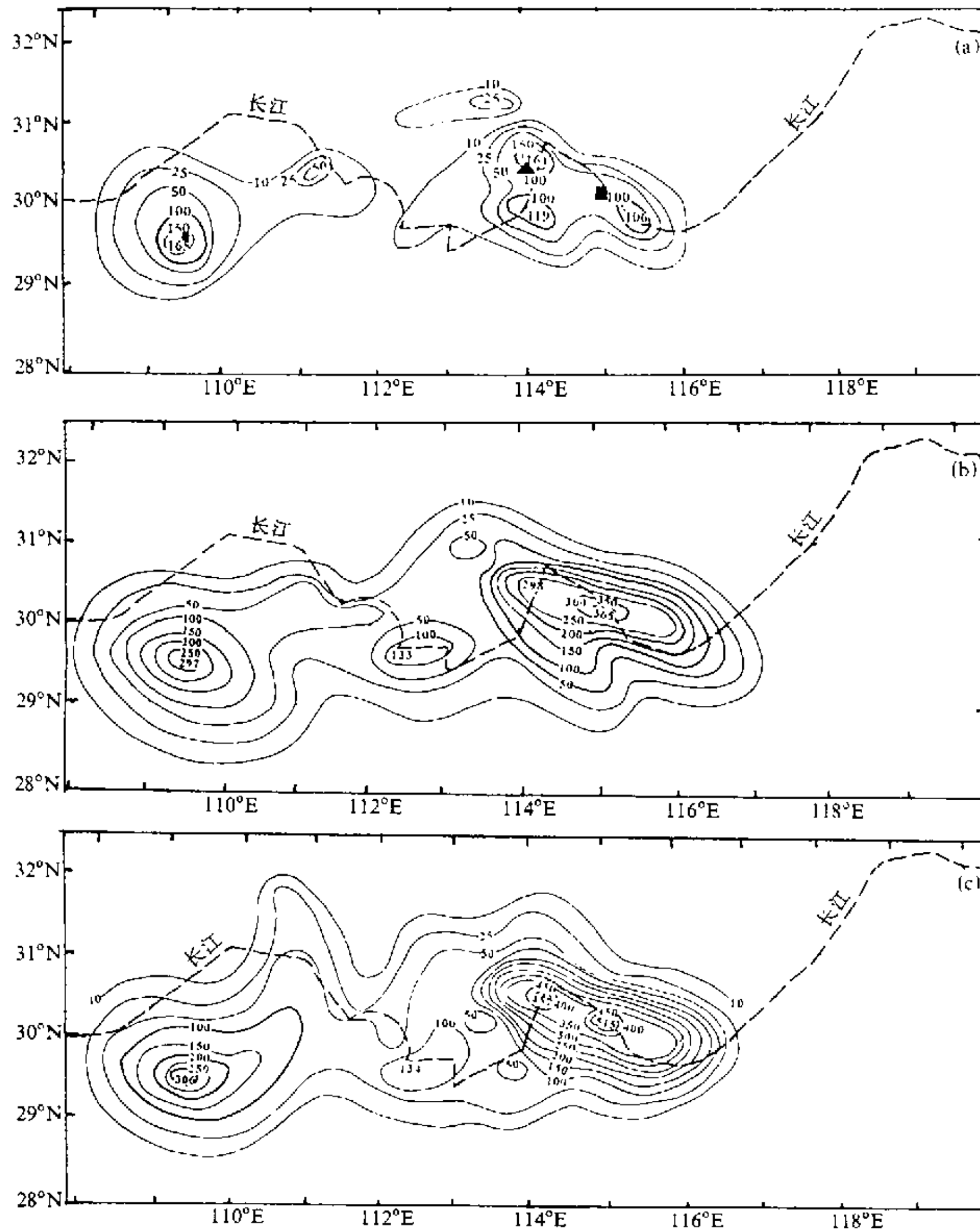


图1 1998年7月20日08 BST至22日20 BST湖北省24 h(a)、48 h(b)和60 h(c)的累积降水量(mm)分布  
粗虚线是长江, ■、▲和●分别代表黄石、武汉和来凤

度暴雨系统引发的。

### 3.1 大尺度环流特征

该过程 500 hPa 环流形势的基本特征是: 在 40°N 以北维持两脊一槽型, 在其宽阔槽区有两个准稳定的深低压, 其中心分别位于贝加尔湖的东南和西南 (图略); 西太平洋副高和西亚高压于 22 日 08 时分别在我国南海减弱收缩为一副高单体和收缩到 50°E 以西的弱西亚高压; 在副高单体和弱西亚高压之间为一低压带; 这种环流形势使其中纬宽阔槽区底部的西风扰动, 有利于在长江流域上空生成短波小槽 (图 3a); 而地面

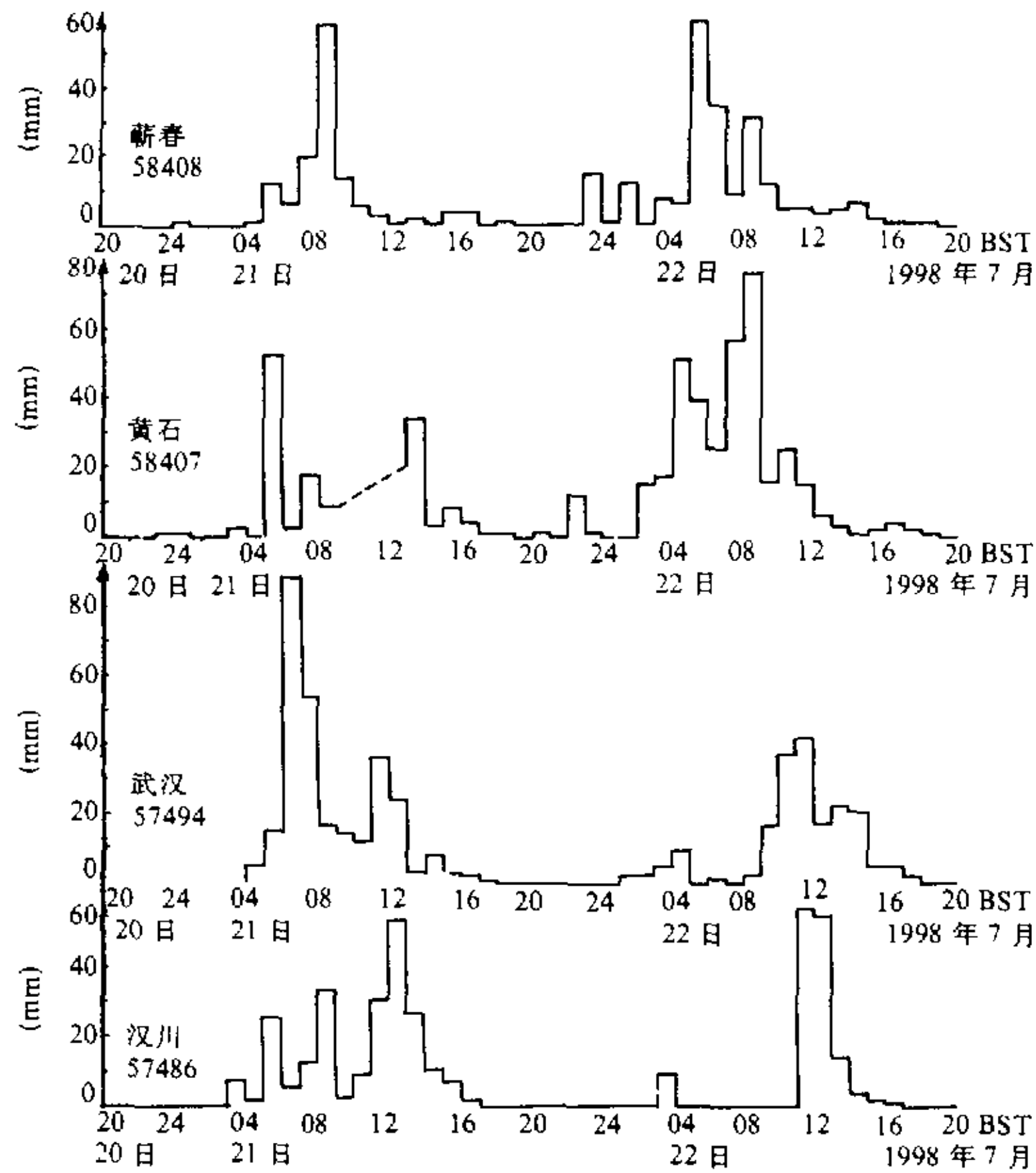


图2 “987”过程特大暴雨时段(7月20日20 BST至22日20 BST)四个代表站(蕪春、黄石、武汉、汉川)的逐时降水量时变直方图  
纵坐标处各地名下的数字为区站号

有梅雨锋低压和梅雨锋系生成和发展(图3b); 与该短波横槽的生成、转向和发展相应, 在低空有中尺度低涡切变线发生发展(图4)。这些环流系统的演变与该暴雨过程密切关联。

### 3.2 $\alpha$ 中尺度低涡切变线

在850 hPa和700 hPa上, 与该持续大暴雨过程直接相关的 $\alpha$ 中尺度系统是: 稳定维持在 $30^{\circ}\text{N}$ 和 $105^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 间的西南涡(图4a)及其相伴的切变线(图4b), 该切变线在流场上呈现为一条强辐合线。该低涡切变线的维持和发展, 与沿切变线相继生成和发展的强对流云团(图5)及特大暴雨直接关联。

### 3.3 $\beta$ 中尺度对流系统

把水平尺度在100~250 km之间、生命史 $\geq 3$  h、云顶亮度(云顶等效黑体温度) $T_{\text{BB}} \leq -30^{\circ}\text{C}$ 的中尺度对流云团定义为 $\beta$ 中尺度对流系统。依次对该过程逐日逐时GMS-4红外云图和GMS TBB等值线图进行的分析指出, 7月20日20 UTC(21日04 BST)至21日07 UTC(21日15 BST), 和21日16 UTC(22日00 BST)至22日

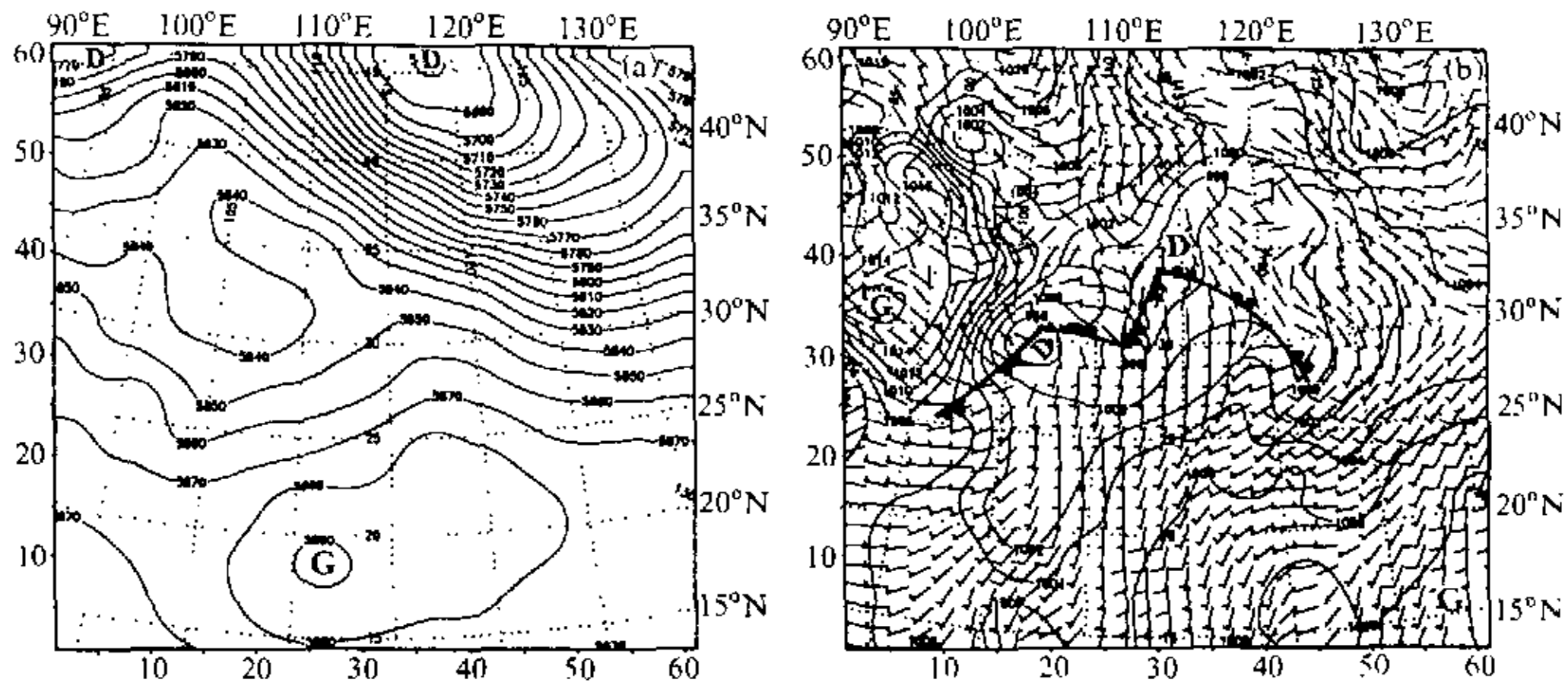


图3 1998年7月21日08 BST东亚(模拟母域)500 hPa环流形势(a)和相应区域地面梅雨锋(b) 图的左方和下方坐标为格点号,下同

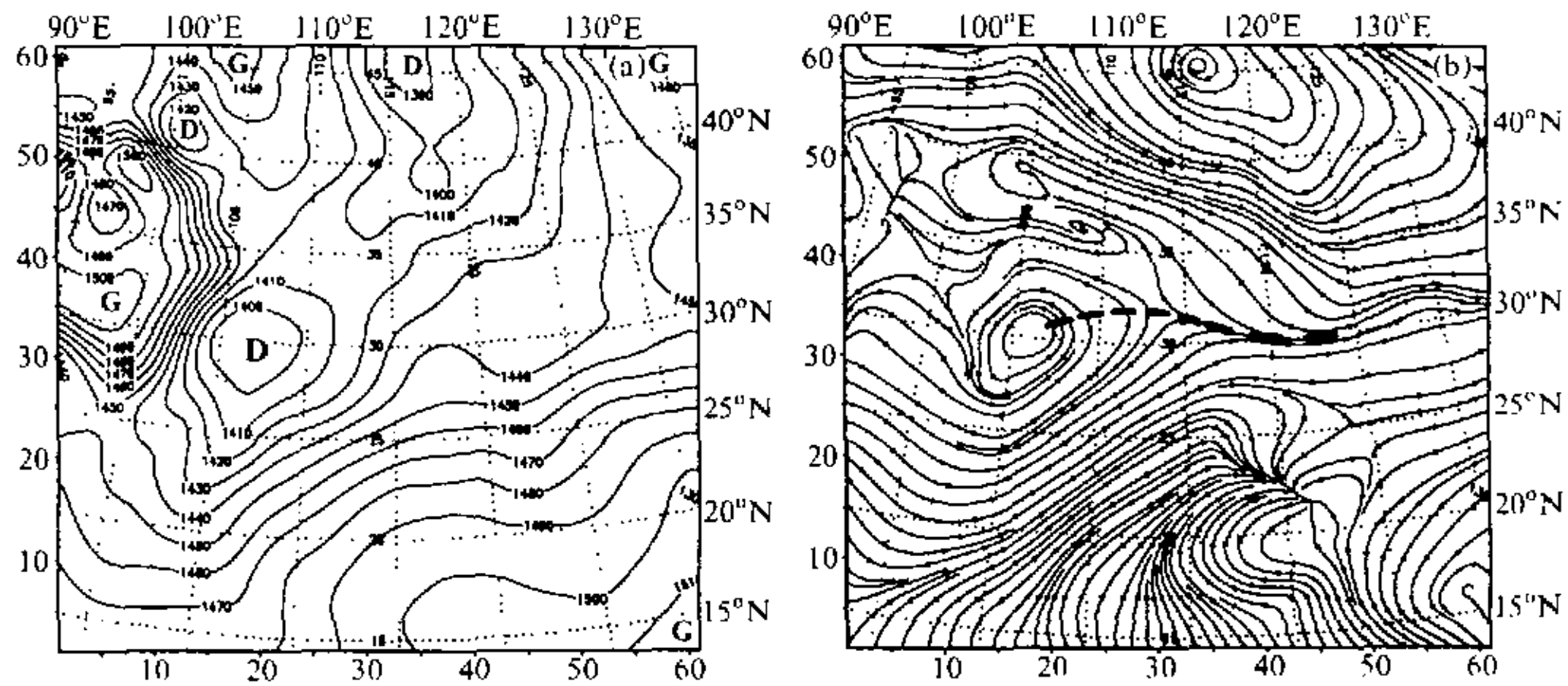


图4 1998年7月21日08 BST 850 hPa高度场(a)和700 hPa流场(b)(其中粗虚线是切变线)

08 UTC (22日16 BST) 的两次特大暴雨过程, 分别发生在武汉周边和鄂东及鄂西南地区(图1)。由图可见, 自20日20 UTC (21日04 BST) 在武汉及其南部开始持续发展的 $\beta$ 中尺度椭圆形云团a, 对流十分强盛, 在20日22 UTC (21日06 BST) ~21日06 UTC (21日14 BST) 的8 h期间, 云顶最低亮温都低于 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (图略)。该期间正是武汉、汉川(图2)及其南部地区特大暴雨突发并持续的时段。图5仅给出20日20 UTC (21日04 BST) 至21日00 UTC (21日08 BST) 间隔2 h的GMS IR云图。在图5的右侧还可看出另一个 $\beta$ 中尺度对流系统的生成和持续强烈发展, 该 $\beta$ 中尺度云团b, 对流同样十分强盛, 该云团的持续发展, 正是以黄石(图2)为中心的鄂东地区特大暴雨突发并持续的时段。比较图5和图4可见,  $\beta$ 中尺度云团a和b都是沿 $\beta$ 中尺度切变线发生和发展的。由此可见, 该过程突发并持续的特大暴雨与沿低涡切变线相继生成和强烈发展的 $\alpha$ 中尺度对流系统与 $\beta$ 中尺度对流系统直接关联。

由上述分析讨论可知, “987”特大暴雨过程与500 hPa短波槽、700 hPa低涡切变线

心, 定位于 ( $30^{\circ}\text{N}$ ,  $114^{\circ}\text{E}$ ), 粗、细网格距分别为 60 km 和 20 km, 格点数均为  $61 \times 61$  (对扩展域为  $91 \times 91$ ); 模式顶  $p_t$  和垂直分层  $K_{\sigma}$ :  $p_t = 10 \text{ hPa}$ ,  $\sigma$  位面垂直分层  $K_{\sigma} = 26$  (0.0, 0.02, 0.04, 0.09, 0.14, 0.19, 0.24, 0.29, 0.34, 0.39, 0.44, 0.49, 0.54, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85, 0.90, 0.92, 0.95, 0.97, 0.99, 1.0); 地形和下垫面特征分类: 对 NCAR 的  $30'$  地形资料和 13 类地表特征资料, 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: 使用资料由国家重点基础发展规划研究项目 (G1998040900) 提供, 包括全球 T106 格点场 (每日 4 次, 垂直 17 层) 和东亚地区常规地面资料 (4 次/d) 及探空资料 (2 次/d), 每日相应两次探空的分析格点场作为初猜值, 通过 Cressman 客观分析方法进行再分析, 最后的客观分析场产生初值; 侧边界条件: 采用张弛逼近方案, 将模式预报场向 12 h 间隔的客观分析场逼近; 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 Reisner<sup>[15]</sup> 的混合相微物理显式方案, 次网格尺度降水采用 Grell<sup>[14]</sup> 积云参数化方案; 辐射过程采用 NCAR/CCM2 辐射方案; 模拟时间: 72 h, 即自 1998 年 7 月 20 日 08 时至 23 日 08 时 (BST)。

## 5 $\alpha$ 中尺度系统演变的全域模拟分析

双向作用套网格和全物理过程的非静力数值模拟, 给我们提供了大量可供分析的输出结果。这里先对  $\alpha$  中尺度系统演变及其场结构的全域粗网格模拟结果进行分析。

### 5.1 准稳定的 $\alpha$ 中尺度低涡切变线

$\alpha$  中尺度低涡切变线主要发生发展于低空。图 6 是模拟域 24 h 的 850 hPa 位势场和 700 hPa 流场模拟结果。图 6 与图 4 相应分析场比较可见, 模拟基本再现了大尺度系统和  $\alpha$  中尺度低涡切变线。准稳定的  $\alpha$  中尺度低涡切变线和观测分析的基本一致, 但在流场上是以  $\alpha$  中尺度涡旋和辐合线显现的 (图 6b); 该低涡和辐合线也与相应强降雨带及

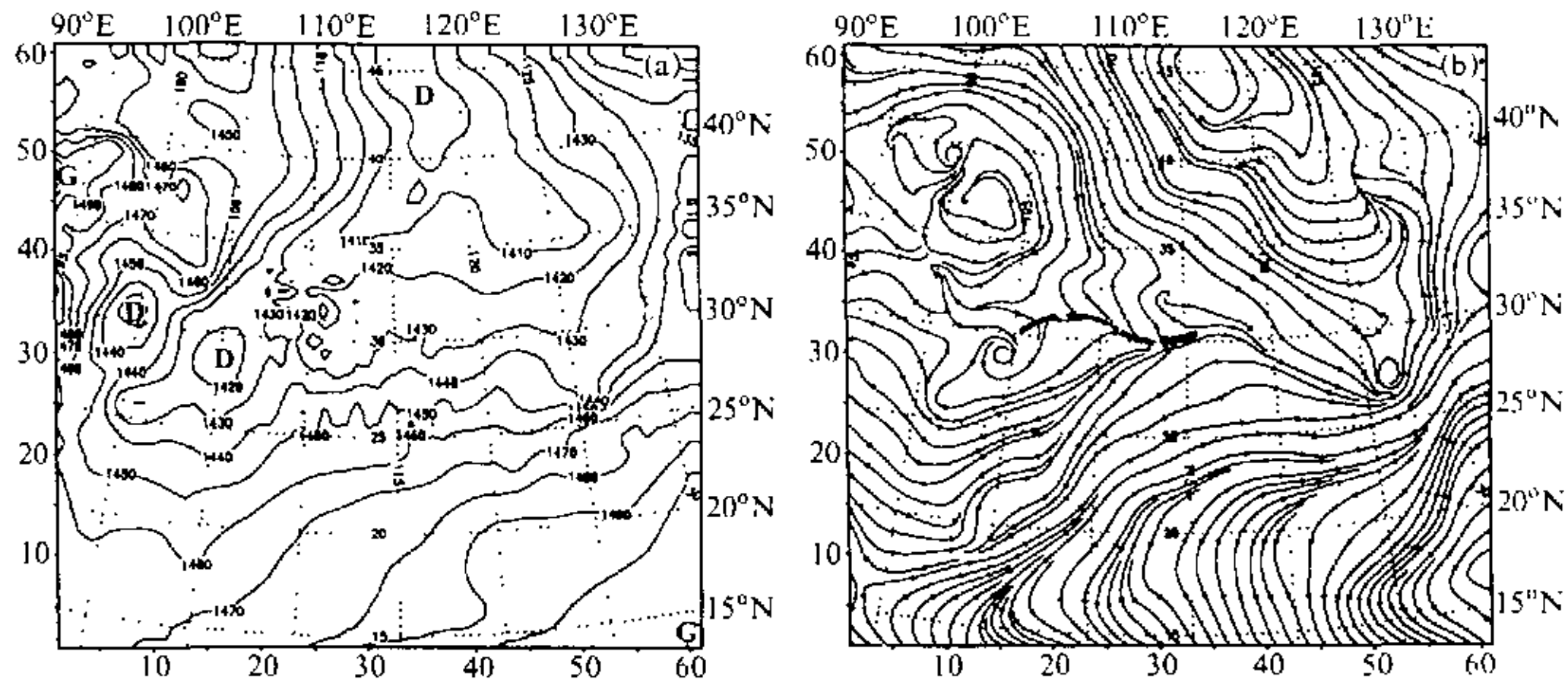


图 6  $\alpha$  中尺度低涡切变线演变的 24 h (相应 7 月 21 日 08 BST) 模拟  
(a) 24 h 的 850 hPa 位势场 (gpm); (b) 24 h 的 700 hPa 流场和切变线 (粗虚线)

其中心(图1)一致。在图6中特别值得注意的是24h模拟(21日08BST)低涡前方辐合线上的强辐合区(图6b),该强辐合区的维持和发展与当日早晨在武汉周边地区突发的特大暴雨密切相关,其细结构将在细网格模拟结果分析中讨论。

### 5.2 扰动低压和梅雨锋

图7是与图6相应的1000hPa扰动气压场、气压场及其相伴的风场与梅雨锋。由图7可见,扰动气压场和气压场的演变基本相似,但扰动气压场对 $\alpha$ 中尺度低涡的准稳定维持表征的更清楚,而气压场及其相伴的风场则易于确定梅雨锋的位置。图7b与观测分析(图3b)的基本一致。

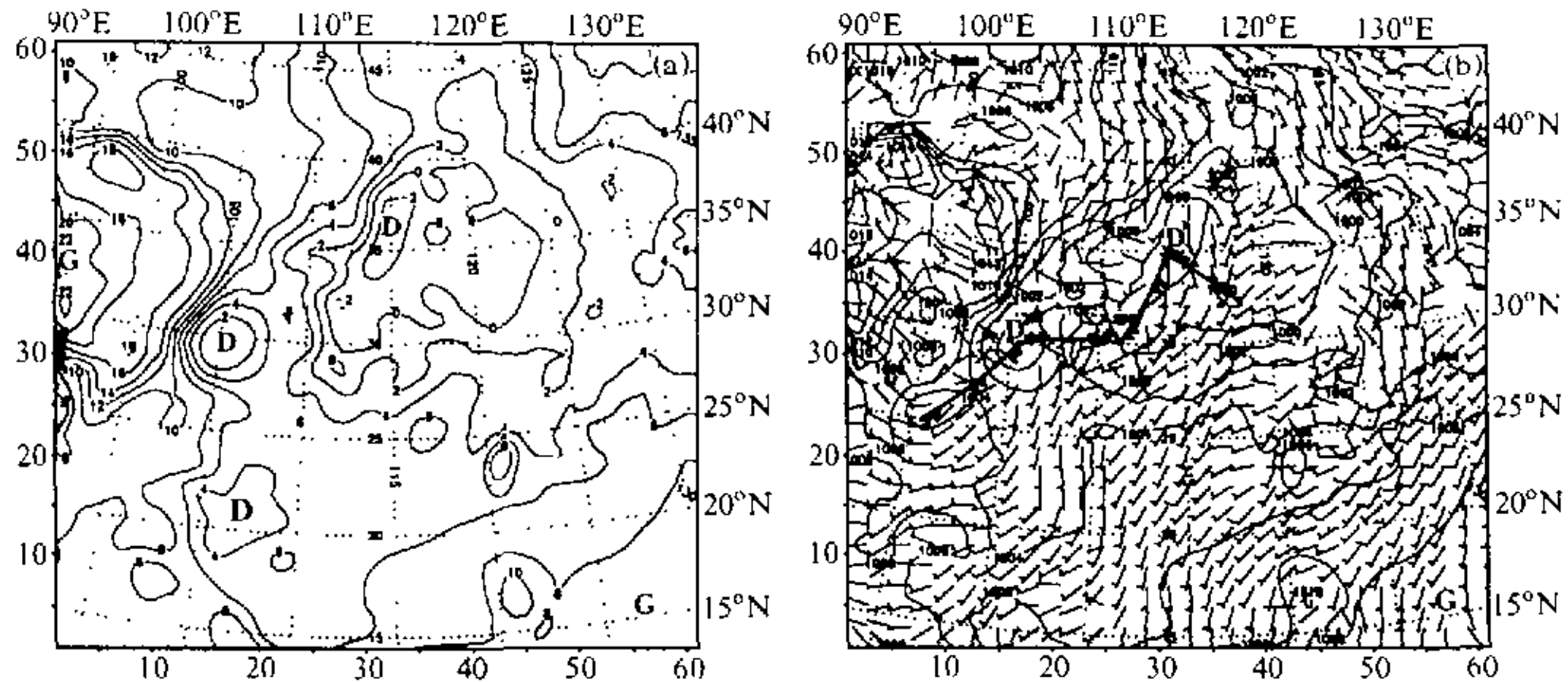


图7 同图6, 但为1000hPa扰动气压场(a)和风场(每长横杆为10m/s)、气压场与梅雨锋(b)

由以上对 $\alpha$ 中尺度低涡切变线及其相伴场的模拟结果分析表明,该模式基本能模拟出大尺度系统和 $\alpha$ 中尺度低涡切变线的演变;但 $\alpha$ 中尺度低涡切变线及其相伴场粗网格模拟结果,仍难于揭示产生突发性特大暴雨的 $\alpha$ 中尺度系统的场结构。为此,需要进一步分析细网格的模拟结果。

## 6 $\beta$ 中尺度系统发展结构的细网格模拟分析

为了进一步了解与该暴雨期武汉周边地区突发大暴雨(7月21日早晨)直接相关的 $\beta$ 中尺度系统( $\beta$ 中尺度云团a)的发展结构,这里着重分析相互作用嵌套细网格区域内的24h模拟结果(相应7月21日08BST)。除非说明,以下图幅均为嵌套域。

### 6.1 特强上升运动与饱和气柱的互耦结构

在 $\alpha$ 中尺度低涡切变线发生发展的模拟分析中已指出,24h模拟(相应21日08BST)低涡前方辐合线上的强辐合区(图6b),与武汉周边地区突发大暴雨(7月21日早晨)直接相关。该强辐合区和相应低涡在细网格域模拟中显现的更为清楚。图8是细网格域的24h模拟。由700hPa图8a可见,域中心该 $\beta$ 中尺度低涡的水平尺度约一个纬距( $\sim 100$ km),在相应流场(图8b)上则表现为一个很强的南、北气流的辐合区,其强偏南低空急流的风速在850hPa高达18m/s(图略);在过该低涡中心

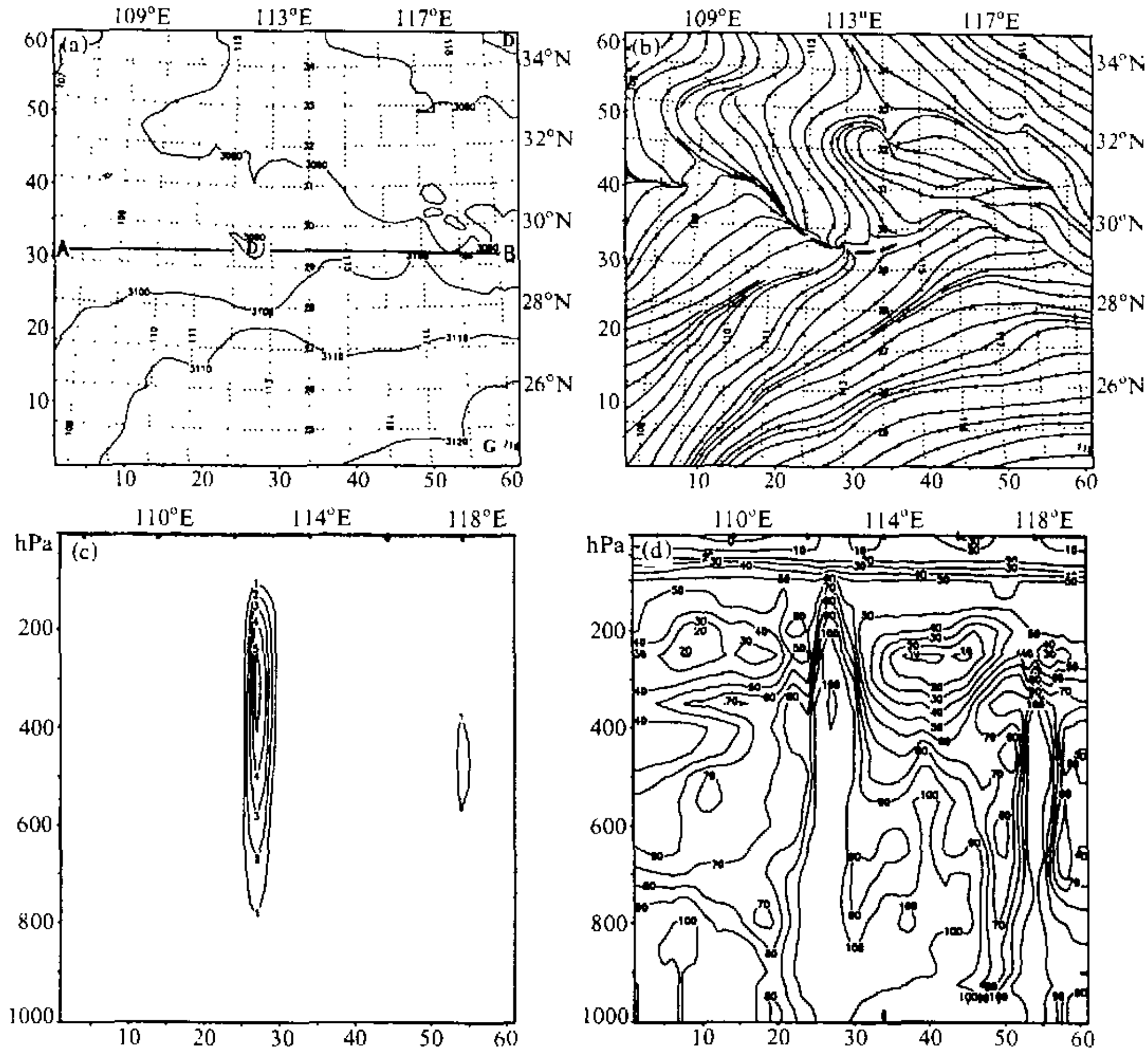


图8 24h (相应7月21日08 BST) 模拟和过 $\beta$ 中尺度低涡( $y=31$ 的AB线)的W-E垂直剖面  
 (a) 700 hPa 位势场; (b) 700 hPa 流场和切变线(粗虚线);  
 (c) 垂直速度(m/s)剖面; (d) 相对湿度(%)剖面

( $y=31$ 的AB线)的东西垂直剖面上可发现,强上升速度在300~400 hPa高达5 m/s (图8c),其上升气柱的相对湿度达到100%饱和(图8d)。正因为伴有很强低空急流的该低涡,以如此强的上升运动与深厚饱和气柱互耦,才造成武汉周边地区突发而罕见的特大暴雨。

## 6.2 超强散度柱与强涡柱的耦合发展

图9是与垂直速度 $w$ (图8c)相应的散度 $D$ (图9a)和涡度 $\zeta$ (图9b)的垂直剖面。由图9可见,在高空150 hPa和低空700 hPa,分别强达 $140 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的超强散度柱(图9a),与上述特强垂直上升运动(5m/s)互伴;在涡度方程的动力约束下,该超强散度柱与强涡柱(图9b)互耦。这种耦合发展结构是特强垂直上升运动和特大暴雨产生和持续的重要动力机制。



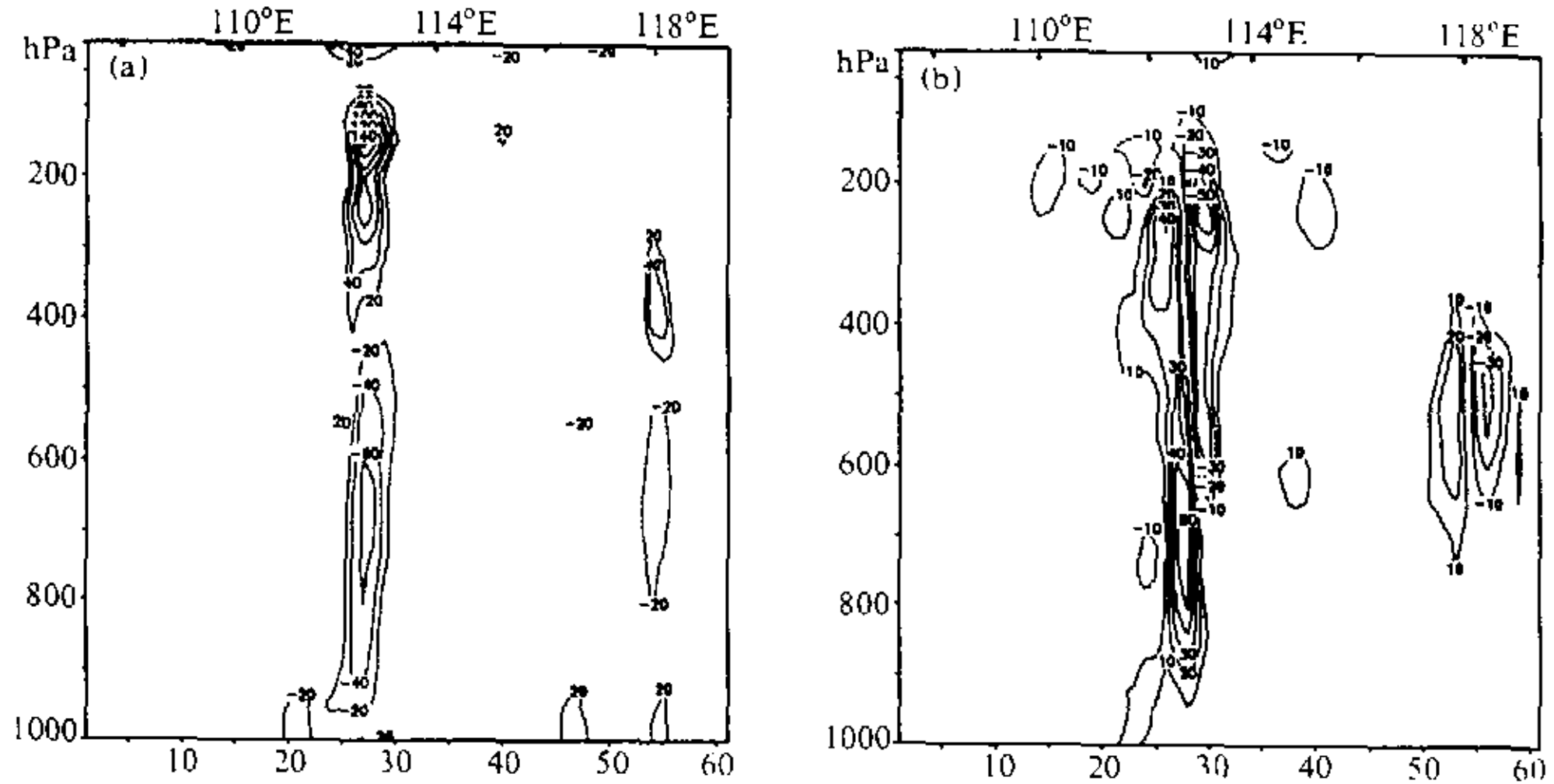


图9 同图8c, 但 (a) 为散度  $D(\times 10^{-5} \text{ s}^{-1})$ , (b) 为涡度  $\zeta(\times 10^{-5} \text{ s}^{-1})$

### 6.3 湿静力不稳定和负湿位涡结构

在整个暴雨期间, 与  $\beta$  中尺度低涡相伴的涡柱 (图 9b) 最下部为一湿静力不稳定气层 (图 10a), 即  $(\partial\theta_e / \partial p) > 0$ ; 在 850 hPa 以上呈现为近似湿中性; 与其相应的湿位涡 MPV 是明显的负结构 (图 10b), 即  $MPV < 0$ , 这正如 Emanuel<sup>[16]</sup>所指出, 对  $MPV < 0$  的中尺度对流系统, 满足湿对称不稳定判据; 这表明, 湿静力不稳定与湿对称不稳定共存的这种热力-动力结构, 可能是暴雨湿对流运动强烈发展的一种重要特征。

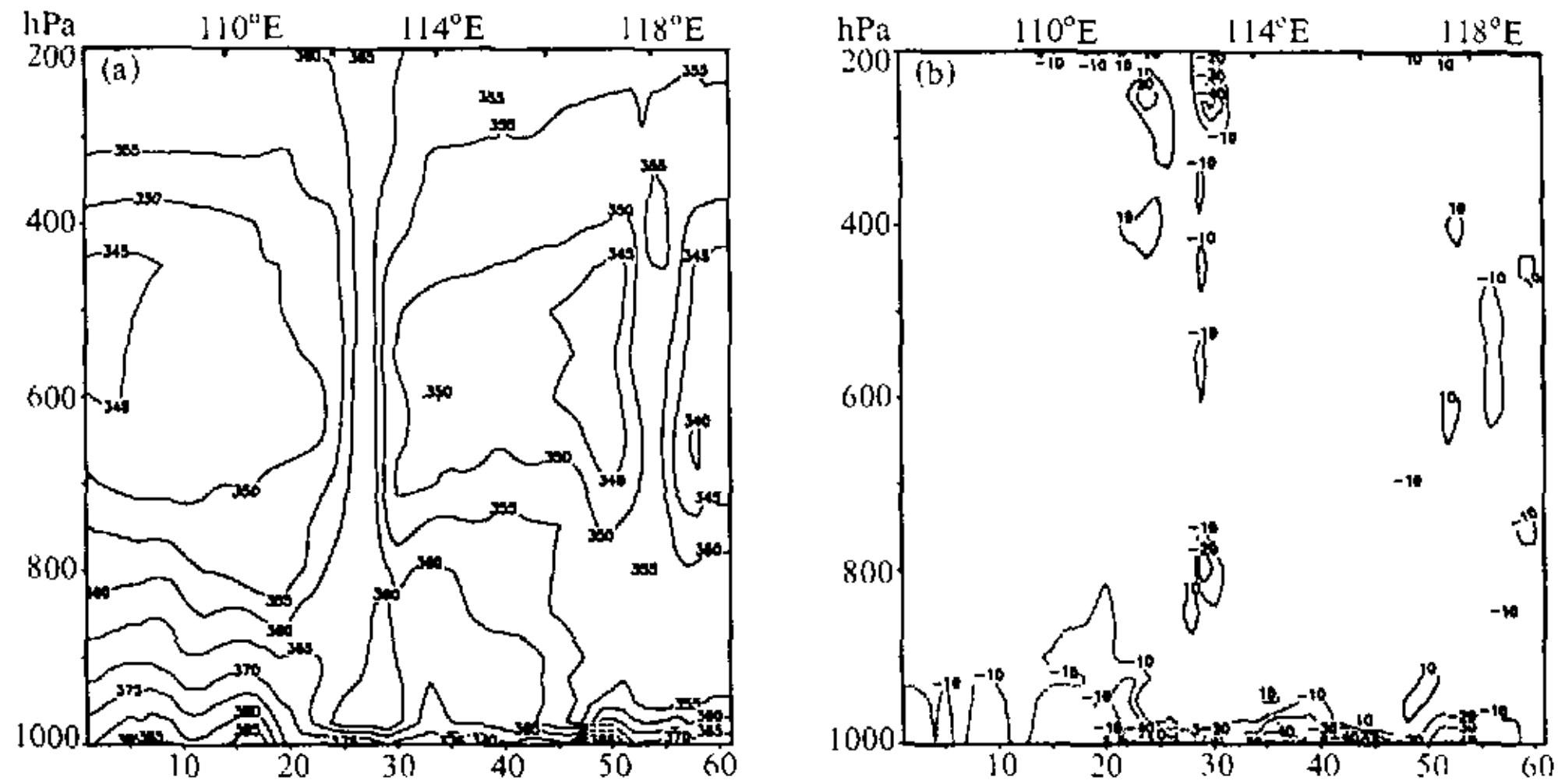


图10 同图9b, 但 (a) 为  $\theta_e$  (K), (b) 为湿位涡  $MPV(\times 10^{-6} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1})$

### 6.4 深对流湿气柱内云团发展的微结构

图 11 是与图 8c、d 相应的云团微物理结构。由图 11a、b 可见, 沿低涡一线主要有 3 个不同大小的云团, 但此时只有图 11a 中左边最强的云水柱与  $\beta$  中尺度低涡伴生

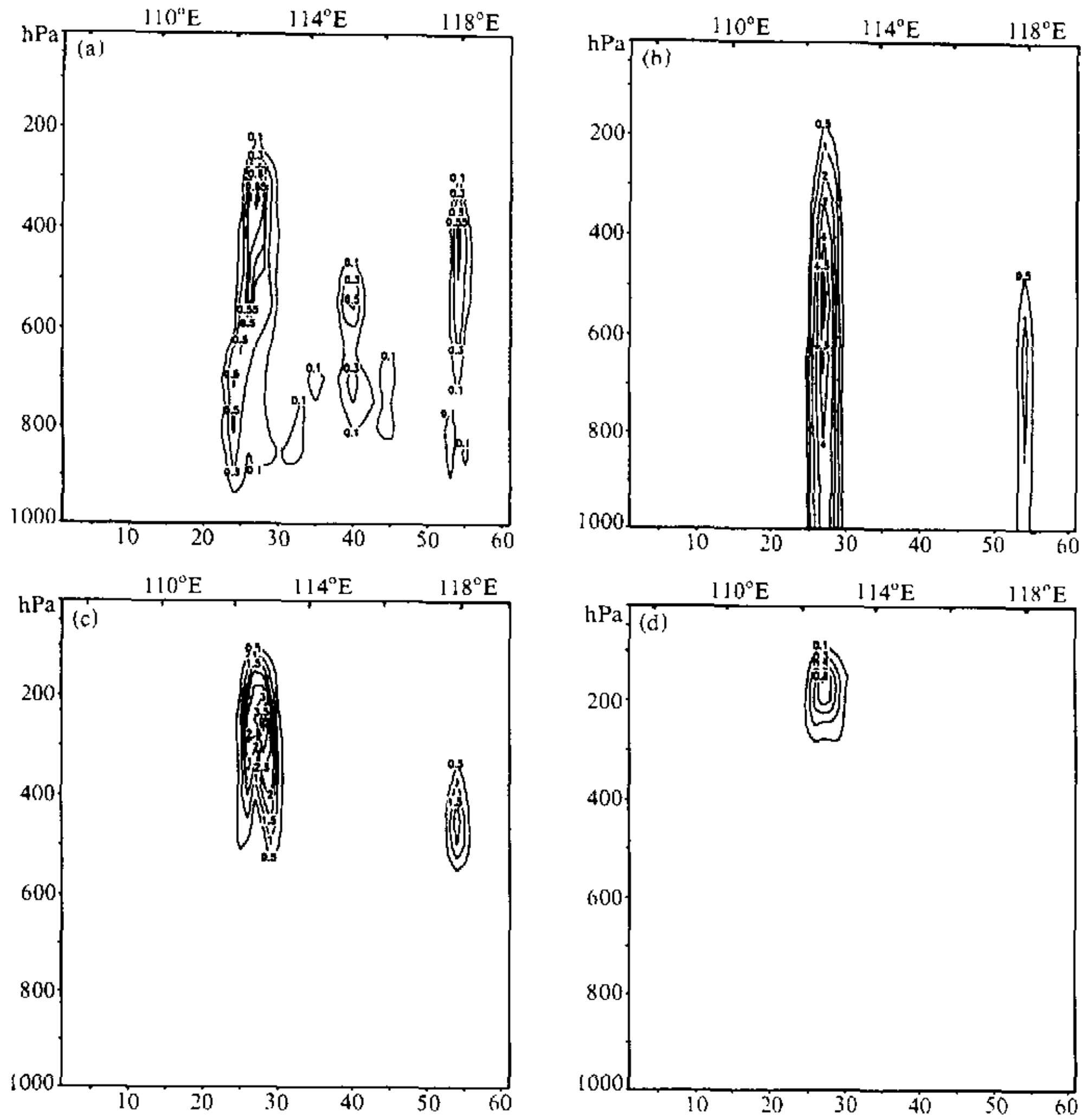


图 11 同图 8c、d, 但为与低涡相伴云团的微物理结构  
 (a)、(b)、(c) 和 (d) 分别为云水、雨水、雪和冰的混合比 (g/kg)

的  $\beta$  中尺度云团 a (图 5) 相应; 图 11 揭示该云团微物理结构的特征是: 云水混合比在 300 hPa 达 0.65 g/kg (图 11a), 雨水混合比在 800~500 hPa 气层均高达 4.5 g/kg (图 11b); 云水和雨水柱与强上升运动的饱和气柱 (图 8c、d) 近乎重合; 该云团在 500 hPa 以上是含有雪 (图 11c) 和冰 (图 11d) 的混合相云体, 但冰相只出现在 300 hPa 以上; 这表明, 即使盛夏的强对流云团也不是只含云水和雨水的暖云云体。

由上述讨论可知, 该暴雨期武汉周边地区的特大暴雨, 与 700 hPa 上一个水平尺度约 100 km 的  $\beta$  中尺度低涡的生成和强烈发展直接相关。该低涡具有明显的动力-热力结构特征: 特强上升运动与饱和气柱互耦, 超强散度柱与强涡柱耦合发展, 湿静力不稳定与湿对称不稳定共存, 深对流湿气柱内云团发展的微物理场结构比较典型。

## 7 降水模拟结果分析

由于观测降水量资料以位于细网格域内长江流域湖北省的最好, 所以, 这里主要讨论细网格域内的降水模拟结果, 以及扩展域细网格域内降水模拟的部分结果。

图 12a 是细网格模拟 24 h (相应 21 日 08 BST) 的降水量分布。由该图可见, 沿长江流域  $30^{\circ}\text{N}$  两侧的  $107^{\circ}\text{E}$  至  $119^{\circ}\text{E}$  之间主要有 3 个强暴雨区, 其中, 在  $(30^{\circ}\text{N}, 113^{\circ}\text{E})$  附近  $120\text{ mm}/24\text{ h}$  的大暴雨中心, 与武汉周边地区 21 日 08 BST 观测的 (图 1a)  $161\text{ mm}$  和  $119\text{ mm}$  的大暴雨中心大体对应, 但落区偏向西南; 在  $(31^{\circ}\text{N}, 109^{\circ}\text{E})$  附近  $140\text{ mm}/24\text{ h}$  的大暴雨中心, 雨强大体对应鄂西南地区观测的 21 日 08 BST (图 1a)  $165\text{ mm}$  的大暴雨中心, 但落区明显偏北; 其余因无详细的降水资料而不便比较。48 h 以后的降水模拟, 均未能达到观测的两个 (武汉和黄石) 最大累积降水量雨强。因此, 我们再进行扩展域 ( $91 \times 91$  个格点) 的模拟。结果, 扩展域细网格的降水模拟明显改进了原细网格的模拟, 特别是雨带。图 12b 是扩展域细网格 48 h 的降水模拟。由该图可见, 在  $(31^{\circ}\text{N}, 115^{\circ}\text{E})$  附近  $300\text{ mm}/48\text{ h}$  的大暴雨中心, 雨强与观测的 22 日 08 BST (图 1b)  $365\text{ mm}$  相当一致, 尽管其他的大暴雨中心, 雨强与观测的 (图 1b) 有偏差。这些结果还表明, 对持续的大暴雨, 大尺度过程对中尺度系统的影响是重要的。

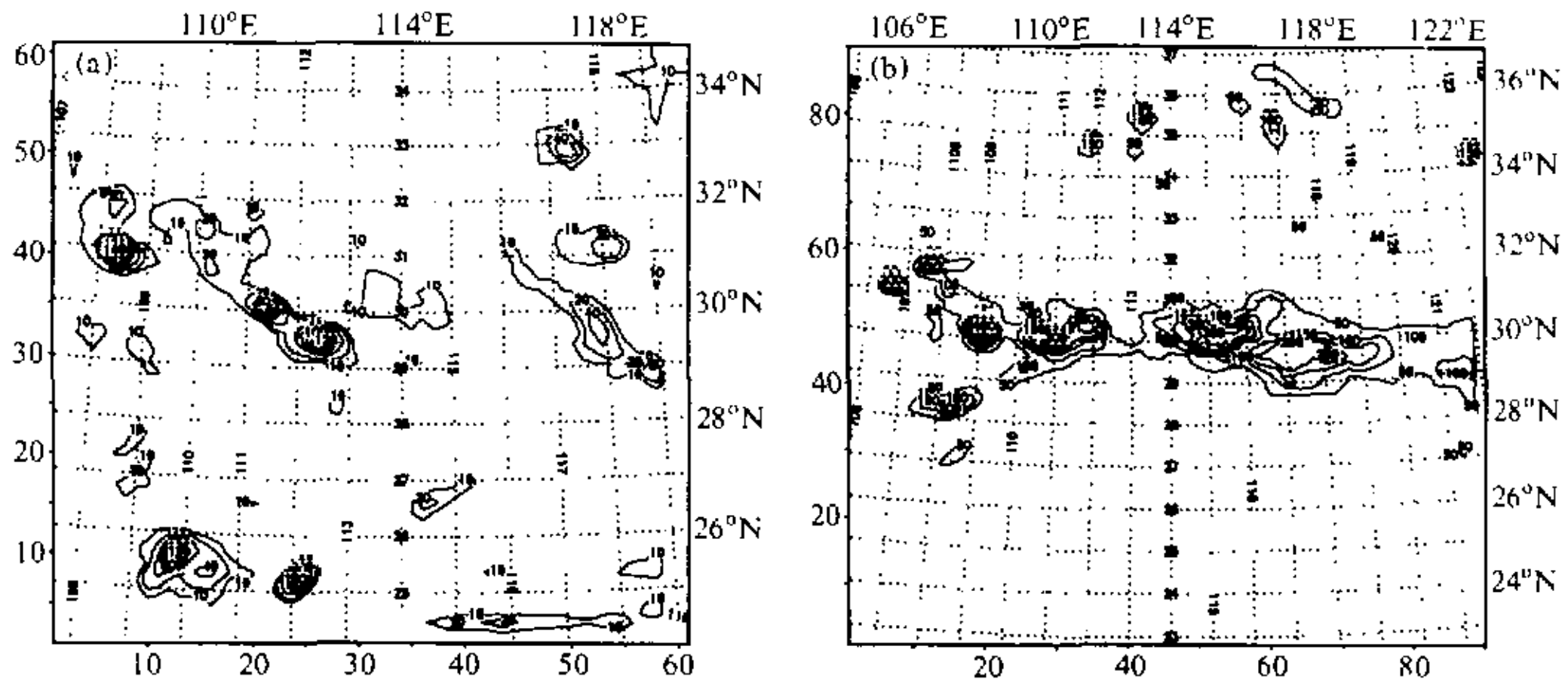


图 12 嵌套域细网格 24 h (a) 和嵌套扩展域细网格 48 h (b) 的模拟降水量 (mm) 分别相应 21 日 08 BST (a) 和 22 日 08 BST (b)

## 8 结论

综上所述, 可得如下结论:

(1) 1998 年 7 月 20~23 日 (简称“987”), 发生在武汉周边和鄂东及鄂西南地区的突发性特大暴雨过程, 在长江流域是罕见的。在纬向雨带中有两个分别高达  $457\text{ mm}$

(武汉)和 539 mm (黄石) 的最大降水中心。

(2) 天气和云图分析指出,“987”特大暴雨过程与 500 hPa 短波槽和 700 hPa 低涡切变线,以及沿切变线相继生成和强烈发展的  $\beta$  中尺度对流系统密切相关。

(3) 对该过程采用非静力中尺度模式 MM5 的二重网格双向嵌套技术,进行了全物理过程的数值模拟,其中,可分辨尺度降水采用 Reisner 混合相微物理显式方案,次网格尺度降水采用 Grell 积云参数化方案。全域模拟结果分析发现,该模式基本上可模拟出大尺度系统和  $\alpha$  中尺度低涡切变线的发生、发展及演变。

(4) 双向嵌套的细网格模拟结果揭示,7月21日早晨武汉周边地区的特大暴雨与 700 hPa 上一个  $\beta$  中尺度低涡的生成和强烈发展直接相关。该低涡具有明显的动力-热力结构特征:特强上升运动与饱和气柱互耦,超强散度柱和强涡柱耦合发展,湿静力不稳定与湿对称不稳定共存,深对流湿气柱内云团发展的微物理场结构比较典型。

(5) 降水模拟结果分析指出,细网格域内前 36 h 的降水分布和雨强与观测的大体对应,但落区有明显偏差;扩展域细网格的降水模拟明显改进了原细网格的模拟,特别是雨带,即使到 72 h 都相当接近观测的;这些结果还表明,对持续时间较长的大暴雨,大尺度过程对中尺度系统的影响是重要的。

### 参 考 文 献

- 1 杨义文、魏则安、艾秀, 1998年与1994年长江流域洪水的对比和思考, 气象科技, 1999, 1, 16~19.
- 2 周月华、刘敏、陈淑明, 湖北省1998年气候影响评价, 湖北气象, 1999, 1, 45~48.
- 3 陶诗言, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1986.
- 4 张丙臣, 长江中下游梅雨锋暴雨研究, 北京: 气象出版社, 1990.
- 5 余志豪、陆汉城, 梅雨锋暴雨的中尺度雨带和雨峰团, 中国科学 (B辑), 1988, 9, 1002~1010.
- 6 Chen, G. T. J. and C. C. Yu, Study of low-level jet and extremely heavy rainfall over northern Taiwan in the Mei-Yu season, *Mon. Wea. Rev.*, 1988, 116, 884~891.
- 7 Akiyama, T., Large, synoptic and meso scale variations of the Baiu front, during July 1982. Part III: Space-time scale and structure of frontal disturbances, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1990, 68, 705~727.
- 8 Ninomiya, K., T. Akiyama and M. Ikawa, Evolution and fine structure of a long-lived meso- $\alpha$  scale convective system in Baiu frontal zone, Part I: Evolution and meso- $\beta$  scale characteristics, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1988, 66, 331~350.
- 9 胡伯威, 暖切变型梅雨锋的天气动力学研究及其预报问题, 暴雨·灾害, 1997, 1, 37~43.
- 10 Nagata, M. and Y. Ogura, A modeling case study of interaction between heavy precipitation and a low-level jet over Japan in the Baiu season, *Mon. Wea. Rev.*, 1991, 119, 1309~1336.
- 11 Chen, C., W. K. Tao, P. L. Lin, et al., The intensification of the low-level jet during the development of mesoscale convective system on a Mei-Yu front, *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126, 349~371.
- 12 Chen, S. J., Y. H. Kuo, W. Wang, et al., A modeling case study of heavy rainstorms along the MeiYu front, *Mon. Wea. Rev.*, 1998, 126, 2330~2351.
- 13 赵思雄、孙建华、陈红等, 1998年7月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究, 海峡两岸灾害天气学术研讨会论文摘要总编, 1998, 48~71.
- 14 Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer, A description of the fifth-generation Penn. State / NCAR mesoscale model (MM5), NCAR Technical Note, 1994, NCAR / TN-398+STR, 138pp.
- 15 Reisner, J., R. T. Bruintjes and R. J. Rasmussen, Explicit forecasting of supercooled water in winter storms using MM5 mesoscale model, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1998, 124B, 1071~1107.
- 16 Emanuel, K. A., The Lagrangian parcel dynamics of moist symmetric instability, *J. Atmos. Sci.*, 1983, 40, 2368~2376.

## Analyses and Numerical Simulation on an Abrupt Heavy Rainfall and Structure of a Mesoscale Vortex during July 1998

Cheng Linsheng and Feng Wuhu

(Department of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract** During 20~23 July 1998, an abrupt extraordinarily heavy rainfall event occurred in the eastern and southwestern parts of Hubei Province, which is seldom in the Changjiang River basin. Analyses indicate this event was in close relationship with the short wave trough at 500 hPa and low vortex with shear line at 700 hPa as well as with successive generating and intensive developing of  $M\beta$ CS along the shear line. This event was simulated by numerical simulation of full physics using nonhydrostatic version MM5 (V2.12) with two-way interactive and double nested grid, in which Reisner's mixed-phase explicit scheme was used to resolvable scale precipitation microphysics, and Grell's cumulus parameterization scheme was adopted by subgrid scale precipitation physics. The simulated results using two-way interactive fine grid reveal that the extraordinarily heavy rainfall in the Wuhan periphery was in direct relationship with the genesis and intensive development of a meso- $\beta$  scale low vortex at 700 hPa; this low vortex had obvious dynamic-thermodynamic structural feature: the extremely intensive ascendant motion was intercoupled with saturated air column; the surpassing intensive divergence column and intensive vorticity column were coupling developed; the moist static instability and the moist symmetric instability was coexist; the structure of the microphysic fields of the cluster developing in the deep convective moist air column is typical. The rainfall distribution and intensity before 36 h in the fine domain were roughly correspondent with observations; the simulated precipitation as mentioned above is obviously improved by the simulation of the extended fine domain, especially rainfall belt. The result also shows that the influence of the large scale process on the mesoscale systems is important to the persistently heavy rainfall.

**Key words:** extraordinarily heavy rainfall; low vortex with shear line; meso- $\beta$  scale low vortex structure; nonhydrostatic model; numerical simulation

## Analyses and Numerical Simulation on an Abrupt Heavy Rainfall and Structure of a Mesoscale Vortex during July 1998

Cheng Linsheng and Feng Wuhu

(Department of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**Abstract** During 20~23 July 1998, an abrupt extraordinarily heavy rainfall event occurred in the eastern and southwestern parts of Hubei Province, which is seldom in the Changjiang River basin. Analyses indicate this event was in close relationship with the short wave trough at 500 hPa and low vortex with shear line at 700 hPa as well as with successive generating and intensive developing of  $M\beta$ CS along the shear line. This event was simulated by numerical simulation of full physics using nonhydrostatic version MM5 (V2.12) with two-way interactive and double nested grid, in which Reisner's mixed-phase explicit scheme was used to resolvable scale precipitation microphysics, and Grell's cumulus parameterization scheme was adopted by subgrid scale precipitation physics. The simulated results using two-way interactive fine grid reveal that the extraordinarily heavy rainfall in the Wuhan periphery was in direct relationship with the genesis and intensive development of a meso- $\beta$  scale low vortex at 700 hPa; this low vortex had obvious dynamic-thermodynamic structural feature: the extremely intensive ascendant motion was intercoupled with saturated air column; the surpassing intensive divergence column and intensive vorticity column were coupling developed; the moist static instability and the moist symmetric instability was coexist; the structure of the microphysic fields of the cluster developing in the deep convective moist air column is typical. The rainfall distribution and intensity before 36 h in the fine domain were roughly correspondent with observations; the simulated precipitation as mentioned above is obviously improved by the simulation of the extended fine domain, especially rainfall belt. The result also shows that the influence of the large scale process on the mesoscale systems is important to the persistently heavy rainfall.

**Key words:** extraordinarily heavy rainfall; low vortex with shear line; meso- $\beta$  scale low vortex structure; nonhydrostatic model; numerical simulation