

# 1999年6月下旬长江中下游梅雨锋 低涡扰动的结构研究\*

高 坤 徐亚梅

(浙江大学地球科学系, 杭州 310028)

**摘 要** 1999年6月下旬在长江中下游发生长达10天之久的连续性暴雨, 作者对其进行了全程中尺度四维同化数值模拟, 利用时空高分辨的模式输出, 对梅雨锋上与强降雨密切相关的5个低涡的活动特点和四维结构进行了综合分析; 识别和追踪每个低涡的活动路径, 分析其主要特征的垂直结构、水平分布和时间演变, 并通过轨迹和气块物理属性个别变化的计算, 揭示构成低涡的三股气流, 分析低涡区水汽及冷空气来源和湿斜压锋区的形成。

**关键词:** 梅雨锋; 低涡; 中尺度数值模拟; 四维同化; 四维结构

## 1 引言

梅雨锋上反复发生的暴雨过程多与梅雨锋和中低层切变线上自西向东相继移经长江中下游的低层气旋性扰动有直接关联, 这些扰动明显不同于极锋气旋, 按其结构、性质和演变过程的差别, 可分为两类, 一类是与短波槽相联系的斜压性西南涡, 另一类是串行于梅雨切变线上的小型弱气旋性扰动<sup>[1]</sup>。过去的工作大多集中于前一类由上游青藏高原东侧自西向东传来的 $\alpha$ 中尺度西南涡, 可是在不少个例中, 四川盆地的低涡并没有东移, 而是在长江中下游地区有利地形处由于动力和热力原因局地新生的涡旋扰动<sup>[2]</sup>, 这类系统往往尺度较小, 移动较慢, 短期内相继发生, 演变复杂, 对暴雨的突发性和继发性起着相当重要的作用。

1999年6月22日开始在长江中下游地区发生长达10天之久的连续性暴雨, 强降水带自湘鄂交界处经大别山直指长江口, 江南东北部6月下旬总雨量达300~700 mm, 为常年同期3~4倍, 每日均出现日雨量大于100 mm的特大暴雨, 789 mm的过程降水中心位于浙皖边界的黄山地区(见图1a), 上海、安庆、苏州、杭州等地旬降水量均为1949年以来同期最高值, 杭嘉湖地区出现有记录以来最高水位, 苏南、皖南、浙北及沪、鄂、湘、赣等省局部地区出现严重外洪内涝, 工农业生产和人民生命财产遭受严重损失。这次过程长江中下游梅雨锋切变长时间稳定维持, 其上有多个低涡活动, 既有源自四川的西南涡东移, 也有长江中游地区局地形成的低涡, 与连续暴雨的形成和维持关系密切, 这为我们研究梅雨锋低涡扰动的活动和结构提供了一个很好的个例。

过去对梅雨锋低涡的分析主要是利用常规资料进行分析<sup>[3]</sup>, 但由于这类资料时空分

2000-08-07收到, 2000-11-06收到修改稿

\* 国家重点基础研究发展规划项目G1998040907和国家自然科学基金资助项目40075009共同资助

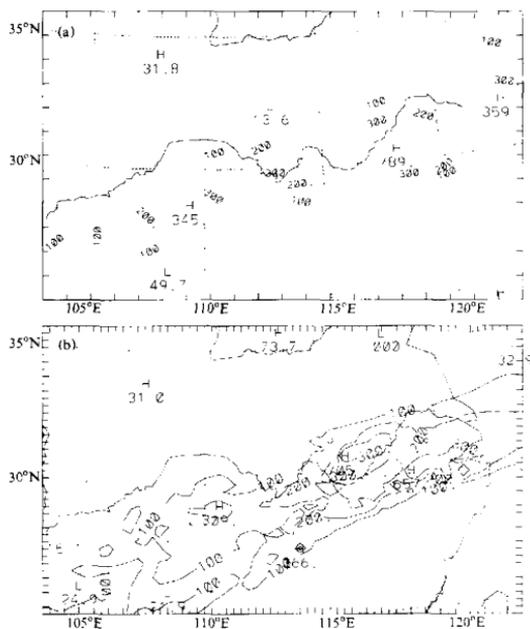


图1 1999年6月22日00时至30日12时的过程总雨量(单位:mm)

(a) 实况; (b) 同化模拟

分辨率低, 缺少中尺度信息, 难以对尺度较小、强度较弱的低涡扰动进行细致分析。近年来随着中尺度数值模式和计算能力的发展, 开始利用中尺度数值模式的时空高分辨输出对梅雨锋低涡进行分析<sup>[4]</sup>。但是对于连续多天的长过程, 单纯模拟难以得到逼真的结果。因此本文对于这次连续暴雨, 在模拟过程中进行全程四维同化, 利用同化产生的时空高分辨输出对梅雨锋上的多个涡旋扰动的活动特点和结构进行分析: 识别和追踪每个低涡的活动路径; 揭示其主要特征的垂直分布、水平配置、时间演变; 并通过轨迹和气块物理属性个别变化的计算, 揭示构成低涡的多股气流, 分析低涡区水汽及冷空气来源和湿斜压锋区的形成。

## 2 全程四维同化的模拟

采用 NCAR/PSU 联合研制的 MM5 中尺度模式<sup>[5]</sup>, 进行两重网格双向嵌套模拟, 水平格距分别为 90 km 和 30 km, 计算范围分别为 67×73 和 91×85 格点, 垂直

23 层。对于次网格尺度对流降水采用 Grell 方案, 假定了大尺度迫动引起的不稳定化与对流的稳定化之间的准平衡, 采用包含上升、下沉通量和环境补偿运动的简单云模式来确定加热增湿廓线; 对于非对流层状降水采用在云水、雨水预报方程的暖雨方案中加入简单冰相过程的 Dudhia 简单冰方案, 即计入瞬时冻结潜热和融化潜热的释放; 对行星边界层采用 Blackadar 的高分辨参数化方案。

在模式积分过程中, 采用由 12 小时间隔的高空观测和 3 小时间隔的地面观测资料进行客观分析所得的分析场进行四维同化, 即将模式预报值与分析值作比较, 根据两者的差值, 在预诊方程中加入一个分析弛驰逼近项, 用来对预报量作适当修正, 使之逐渐向实测值逼近<sup>[5]</sup>, 可产生既相当逼真又保持动力平衡的四维协调的时空高分辨分析结果。

以 1999 年 6 月 22 日 00 时 (世界时, 下同) 为初始场, 进行 204 小时连续四维同化模拟, 图 1 给出过程总降水的实况和模拟分布, 在长江中下游模拟出 200 mm 以上的强降雨带, 并在大别山和黄山地区分别模拟 705 mm 和 657 mm 的两个中心, 与实况相比, 显然对于强梅雨锋雨带的位置和主要暴雨中心的模拟是比较逼真的, 但强度略偏弱。降水的成功模拟使我们有可能进一步利用模拟结果对主要降水系统——梅雨锋上的低涡扰动进行深入分析。

### 3 低涡活动情况的模拟

图 2 给出模拟中 850 hPa 梅雨锋切变上出现的 5 个具有闭合环流的低涡系统活动动态, 符号○标出每隔 2 小时的模拟低涡位置, 符号★标出 00 时和 12 时实况分析场上的低涡位置, 显然在常规探空观测时刻模拟低涡与实况低涡位置是相当接近的。但借助时间高分辨的模式输出可以识别和详细追踪低涡活动的动态, 这是 12 小时间隔的常规观测分析所难以做到的。5 个低涡中涡 1 和涡 4 是生成于四川然后东移并在江苏东部出海的西南涡 (图 2a、b)。其余 2、3、5 三个低涡均是在长江中游大别山与幕阜山之间湘鄂赣交界处就地新生的中尺度梅雨锋涡旋, 与西南涡相比, 这类局地形成的低涡, 移动缓慢多打转, 有的尺度较小 (水平尺度 200~400 km) (图 2c、d、e)。图上叠置了低涡活动时段实测过程降水, 每次模拟低涡活动都与实况降水有密切的对应关系, 强降水区紧邻低涡路径的东南侧, 这也从降水的侧面证实了模拟低涡真实存在的可能性。

陶祖铨<sup>[6]</sup>曾分析 1995 年夏 MCSs 的活动, 发现有 3 个集中区, 其中之一就是位于太行山、秦岭及大巴山以东的黄河和长江中下游的平原地区, 作为大山脉东侧广阔的平原地区, 是对流系统容易发展到  $\alpha$  中尺度的区域, 这一观测事实与模拟中上述 3 个局地性低涡在长江中游有利地形处新生是一致的。即使是上述 2 个来自四川的西南涡的活动也反映出地形的影响, 图 3 给出低涡 1 移出四川前后 (6 月 22 日 10 时至 22 日 16 时) 每隔 2 小时的 850 hPa 流线和 2 小时模拟雨量 (实线) 图, 当其东移出四川时呈现上游消亡下游新生的跳跃式移动特点: 即当原有低涡在大巴山西南侧减弱和打转慢移较长时间后, 随着其东北侧的气旋性曲率倒槽伸向下游大巴山东侧, 在倒槽顶端突然有低层涡旋新生, 然后迅速加强东移, 并伴随长江中游降水的突发性加强, 表现出低涡的不连续性跳跃式东北移 (见图 2a 和 b 上低涡移过大巴山时的明显加速)。

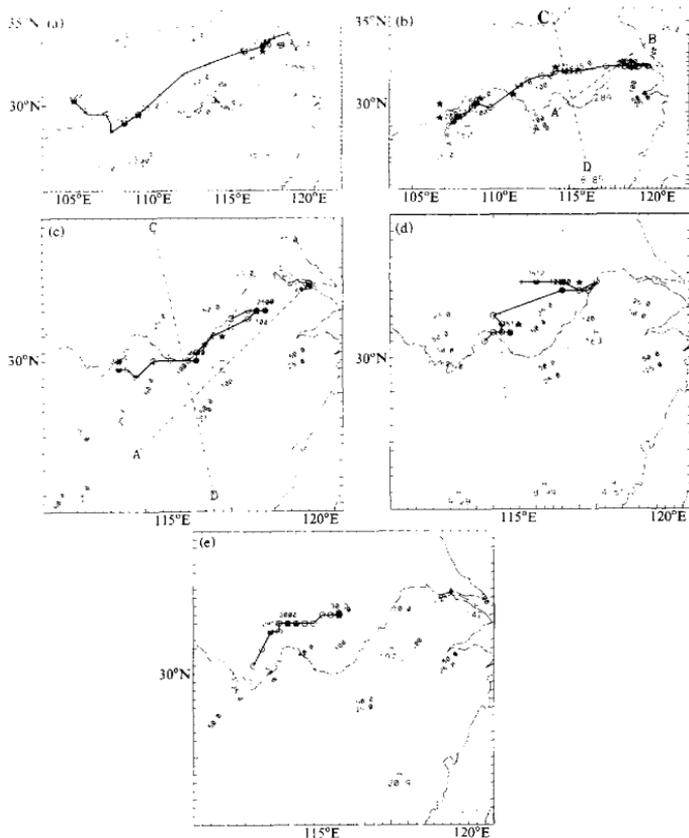


图 2 模拟中 5 个梅雨锋低涡的活动动态图

(a) 涡 1; (b) 涡 4; (c) 涡 2; (d) 涡 3; (e) 涡 5

符号○标出每隔 2 小时的模拟低涡位置, 其上并标出 00 时和 12 时的日与时, 粗实线为低涡移动路径;

符号★标出 00 时和 12 时实况分析场上的低涡位置, 细实线为低涡活动时段的实际总降水(单位: mm),

(b) 和 (c) 上的 AB 和 CD 虚线表示图 7 和图 8 的剖面位置

#### 4 低涡附近主要特征的垂直分布

为了了解低涡上空主要动力特征的垂直分布特点, 图 4 给出 5 个低涡区上空风分量

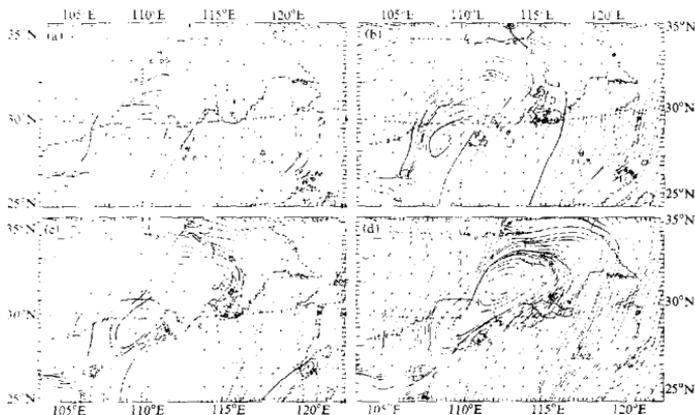


图3 6月22日低涡1移出四川前后每隔2小时的850 hPa流线和2小时模拟雨时(实线)图  
(a) 10时; (b) 12时; (c) 14时; (d) 16时

$u$ 、 $v$ 、相对涡度 $\zeta$ 、垂直运动 $W$ 的区域极大值和散度,水汽通量辐合区域极小值的时间平均垂直廓线。显然从时间平均看,5个低涡主要特征量的垂直分布型式非常一致,可以认为基本反映了梅雨锋低涡的共同结构特点:低涡上空300 hPa以下为正涡度区,强涡度中心位于900~850 hPa之间(图4d);在风廓线上,低涡上空中层偏南至西南风,高层300 hPa以上为西西北风。随高度顺转,风速出现两个极大:200~150 hPa之间的西西北大风区和900~700 hPa之间的次大西南风,后者与低涡附近的低空急流对应(图4a、b),但从风的两个分量看低空急流的垂直分布有明显不同,西风分量在800~400 hPa之间分布比较均匀,约在700 hPa附近有一次大区,急流特征不明显(图4a),而南风分量则在低层(900~800 hPa)有一明显的急流,其上空随高度南风迅速减弱,并在250 hPa以上出现北风(图4b);水汽输送有类似情况(图略),南北向水汽输送的极大值高度(900 hPa附近)明显低于东西向水汽输送(800 hPa附近);集中出现于900 hPa以下边界层内的辐合(图4c)、水汽通量辐合(图4e)和边界层顶附近的涡度极大(图4d)均与低层南风急流及其伴随的水平分布不均匀有密切关系;低涡附近的最强上升出现于400~550 hPa之间(图4f)。

## 5 低涡附近主要特征的水平位置分布

为了了解上述垂直廓线所揭示的主要特征相对于低涡中心的水平分布特点,将5个低涡分为西南涡和局地性低涡两类,分别统计两类低涡附近各时次850 hPa低空急流、正涡度中心和950 hPa强辐合中心等相对于850 hPa低涡中心的位置分布(图略)。结果表明,低涡与低空急流有密切关系,850 hPa低空急流中心均位于低涡的东南象限。

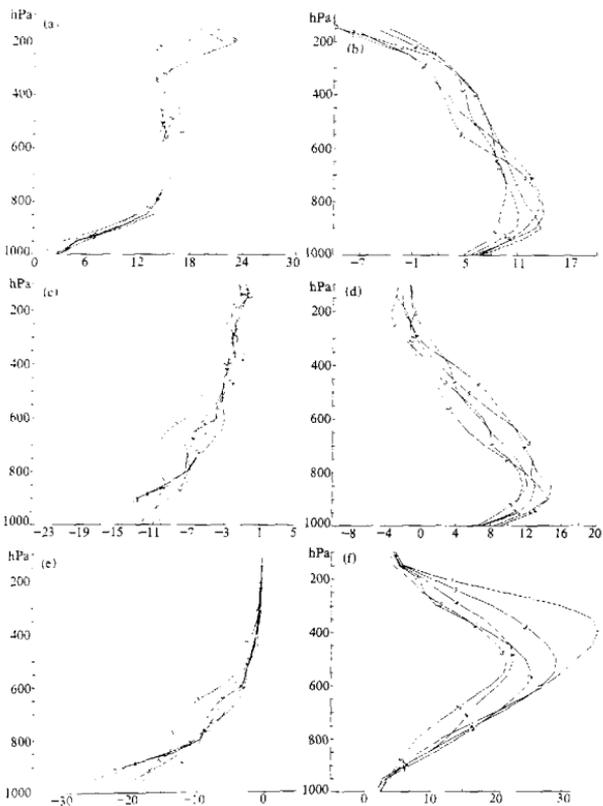


图 4 5 个低涡区上空区域极值的时间平均廓线

(a)、(b) 风分量  $u$ 、 $v$  (单位:  $\text{m s}^{-1}$ ); (c) 相对涡度  $\zeta$  (单位:  $10^{-5} \text{s}^{-2}$ ); (f) 垂直运动  $W$  (单位:  $\text{cm s}^{-1}$ ) 的区域极大值和 (c) 散度 (单位:  $10^{-5} \text{s}^{-2}$ ); (e) 水汽通量辐合 (单位:  $10^{-7} \text{s}^{-2}$ ) 的区域极小值。线上的标号表示低涡的序号, 横坐标为上述物理量值

平均距离约 300 km; 850 hPa 正涡度中心和 950 hPa 强辐合中心也位于 850 hPa 低涡的东至东南象限。但两类涡有一定区别: 西南涡的正涡度和强辐合中心相对低涡的位置比较分散, 远的位于低涡东东北侧相距约 600 km 处, 而局地低涡的正涡度和强辐合中心则集中位于东南象限, 平均距离约 150 km。

## 6 低涡特征的时间演变

选取涡 2 和涡 4 分别代表局地性低涡和西南涡, 分析两低涡区上空风分量  $u$ 、 $v$ 、相对湿度  $q$ 、垂直运动  $W$  的区域极大值和分别由西风 and 南风分量引起的水汽通量辐合的区域极小值的时高剖面图。低涡上空 300 hPa 以下基本上为正涡度区 (图 5a、b)。

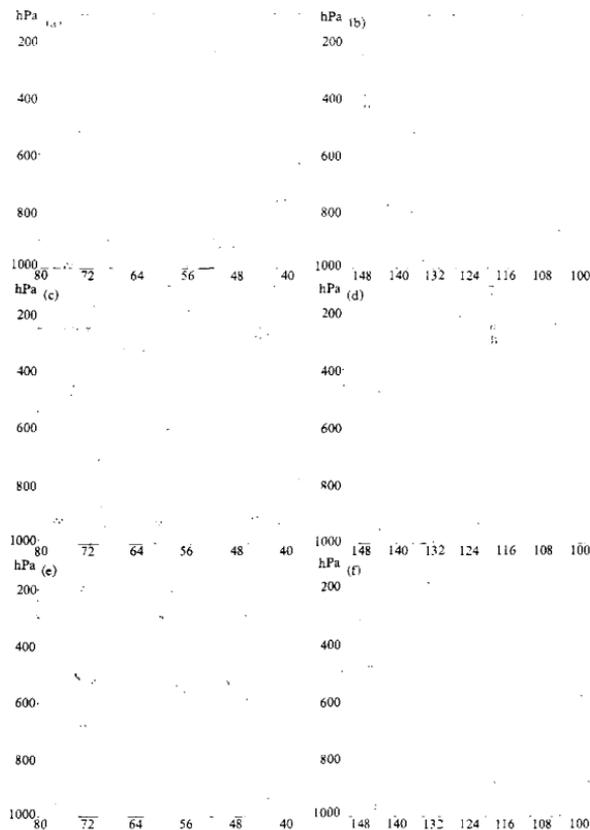


图 5 涡 2 (a、c、e) 和涡 4 (b、d、f) 低涡区上空区域极值的时高剖面图  
(a)、(b) 相对湿度 (单位:  $10^{-3} s^{-1}$ ); (c)、(d) 西风分量  $u$  (单位:  $m s^{-1}$ ); (e)、(f) 南风分量  $v$   
(单位:  $m s^{-1}$ ) 的区域极大值。横坐标自右向左为由模拟初始时刻起算的积分时间 (单位: h)

最大中心稳定位于 900~850 hPa。正涡度有两次明显加强和垂直伸展,局地性低涡正涡柱垂直伸展较小,稳定于 300 hPa 以下,而西南涡的第二次加强则伴随明显的向上伸展,正涡度区一直伸展至对流层顶。西风和南风分量的时高分布表现出明显的区别,西风分量  $u$  总是随高度增强,最大值位于对流层顶附近,在中层 800~400 hPa 有时出现次大(图 5c、d);而  $v$  分量的时高变化则在低层 900~800 hPa 始终维持一急流型高值带,其上有多个脉动,西南涡涡 4 尤为明显,出现 4 次强脉动(图 5e、f)。低空南风分量的增强略超前于低涡的加强,并伴随降水、低层辐合和中层上升的同时加强(图略);水汽通量辐合与低涡降水有密切对应关系。 $u$ 、 $v$  两分量对水汽通量辐合的贡献的对比表明,南北向  $v$  分量的贡献远大于东西向  $u$  分量,是水汽通量辐合的决定者(图略)。这也反映出低空偏南风低空急流的重要性。

图 6 给出涡 2、涡 4 通过低涡区的 900 hPa 位温  $\theta$ 、相当位温  $\theta_e$  和南北向水汽输送  $q$  的南北向时间剖面。显然低涡在演变过程中,始终位于低层位温的冷区中,其南北两侧分别为暖区。在低涡南侧存在很弱的位温梯度(图 6a、b),但在相当位温时间剖面上低涡附近则有明显的低层相当位温密集带——湿斜压锋区通过(图 6c、d),显然这一锋区主要由湿度对比所造成,其南侧为明显的暖湿区。在低涡东传时,暖湿区及其北侧的湿斜压锋区伴随低涡一起北移,低涡的发展往往伴随湿斜压锋区的加强,同时由于切变低涡南侧的偏南风低空急流的配合,导致低涡南侧存在强劲的来自偏南方向的低层水汽输送(图 6e、f),并在低涡南侧低层出现由南风分量引起的强水汽通量辐合。低涡发展过程中出现几次水汽输送的脉动式加强和北上,与低涡降水的加强(图 6a、b 中的斜线阴影区为 2 小时雨量大于 10 mm 区)有密切关系,其中移动性西南涡发展东移中,水汽输送脉动尤为明显,强度大(图 6f)。相比之下,尽管东西向水汽输送具有与南北向水汽输送相当的大小,但对低涡降水区的水汽通量辐合则贡献甚少。

## 7 低涡附近的垂直剖面结构

为了揭示成熟阶段低涡上空的垂直结构,根据低涡附近动力热力场的分布特征,选择了两个方向剖面位置(见图 2b 和 c 中的 AB 和 CD 剖面)进行分析,其中 AB 剖面是位于低涡东南侧,与低空急流平行并通过降水中心的西南-东北向剖面;CD 剖面为通过 850 hPa 低涡中心并与相当位温锋区垂直的西北-东南向剖面。对 5 个低涡的垂直剖面结构进行比较分析,找出其共同特征,下面以涡 2 和涡 4 为例进行讨论。

图 7 给出涡 2(6 月 24 日 08 时)和涡 4(6 月 27 日 12 时)的相对涡度和沿剖面垂直环流(图 7a、b)、沿剖面水平风分量和水汽通量辐合(图 7c、d)、相当位温和垂直速度(图 7e、f)的 AB 剖面,显然沿剖面有一支由上游中低层自西南方出发边向东北边上升的倾斜的西南暖湿气流,滑行于下游低层浅薄的东北风干冷楔之上,一直伸展到对流层高层,在这支西南气流中低空急流(位于 600 hPa 以下)与高空急流(200~300 hPa)并存;850 hPa 以下的西南气流与东北气流的界面处(图中粗虚线)对应浅薄的弱锋区,锋区东北侧的干冷楔前沿为一垂直涡柱,对应低层辐合和上升(图 7c、d 中的阴影区为水汽通量辐合强度超过  $-8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  区,图 7e、f 中的阴影区为上升速度大于  $8 \text{ cm s}^{-1}$  区),与强降水区相合(图 7 剖面下沿标志为降水中心所在);与该涡柱相连,

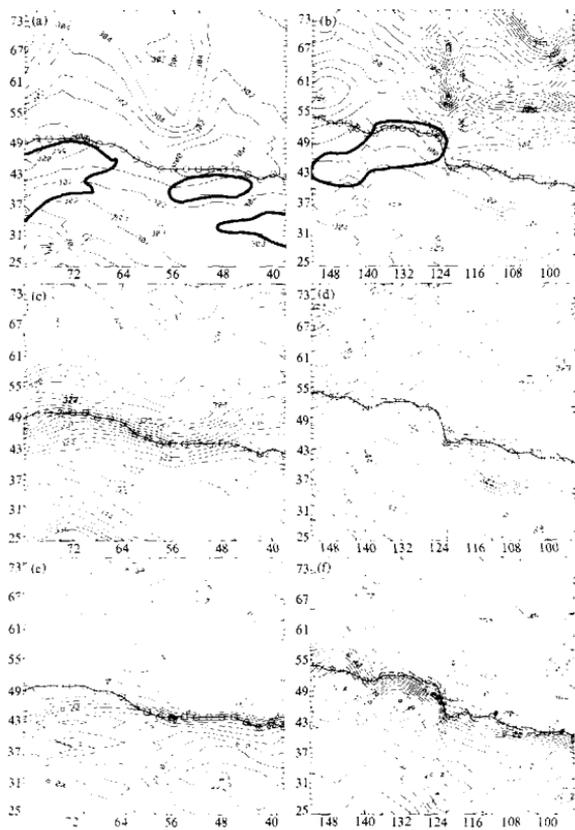


图6 通过涡2 (a, c, e)、涡4 (b, d, f) 低涡区的900 hPa位温 $\theta$  (a, b, 单位: K)、相当位温 $\theta_e$  (c, d, 单位: K) 和南北向水汽输送 (e, f, 单位:  $10^3 \text{ ms}^{-1} \text{ g g}^{-1}$ ) 的南北向时间剖面

符号○标出每隔2小时的模拟低涡位置, 粗实线为低涡位置连线, 粗实线包围区为2小时降水10 mm以上区, 横坐标自右向左为由模拟初始时刻起算的积分时间 (单位: h), 纵坐标自下往上模拟区域南北方向格点坐标

在其东北侧下游有正涡度和辐合区在锋上沿西南气流向东北方向向上倾斜伸展, 在倾斜向上的西南气流中存在多个上升运动中心, 倾斜向上。

图8给出与图7同一时间涡2和涡4的相对湿度和水平风 (图8a、b)、垂直速度

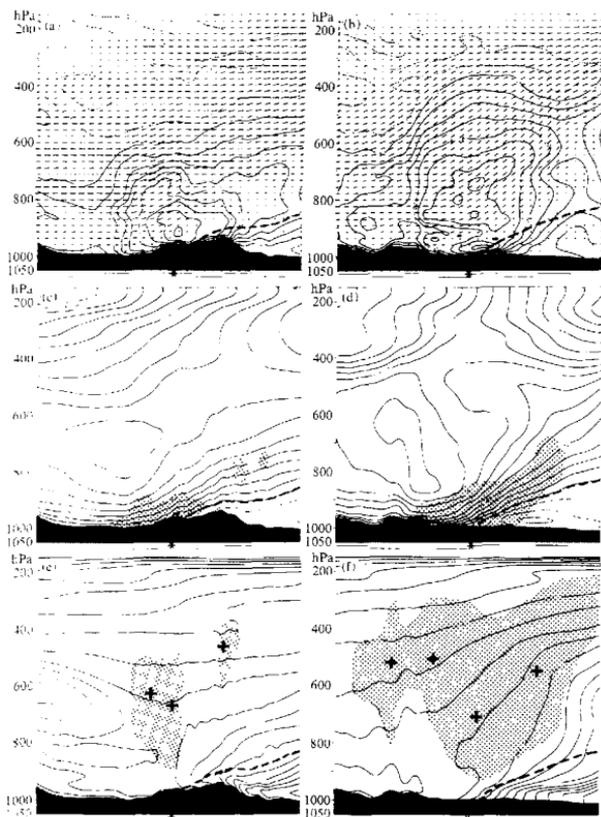


图 7 沿图 2c 和 b 中 AB 线的涡 2 (a, c, e, 6 月 24 日 08 时) 和涡 4 (b, d, f, 6 月 27 日 12 时) 的垂直剖面

(a), (b) 相对涡度和沿剖面垂直环流; (c), (d) 沿剖面水平风分量, 阴影区为水汽通量辐合超过  $-8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  区, 符号“-”为水汽通量辐合中心; (e), (f) 相当位温, 阴影区为垂直速度大于  $8 \text{ cm s}^{-1}$  区, 符号“+”为上升运动中心, 图下沿符号“\*”为降水中心所在, 短直线段表示水平距离 100 km, 图中粗虚线为西南风与东北风之间的分界

(图 8c, d), 位温扰动 (相对于剖面等压面平均的偏差, 图 8c, f) 和相当位温 (图 8g, h) 的 CD 剖面。由图 8a, b 可见在低涡西北象限存在西南风与东至东北风的切变 (图中粗虚线), 该切变随高度往上向西北方倾斜, 局地性低涡 2 的倾斜坡度小于移动

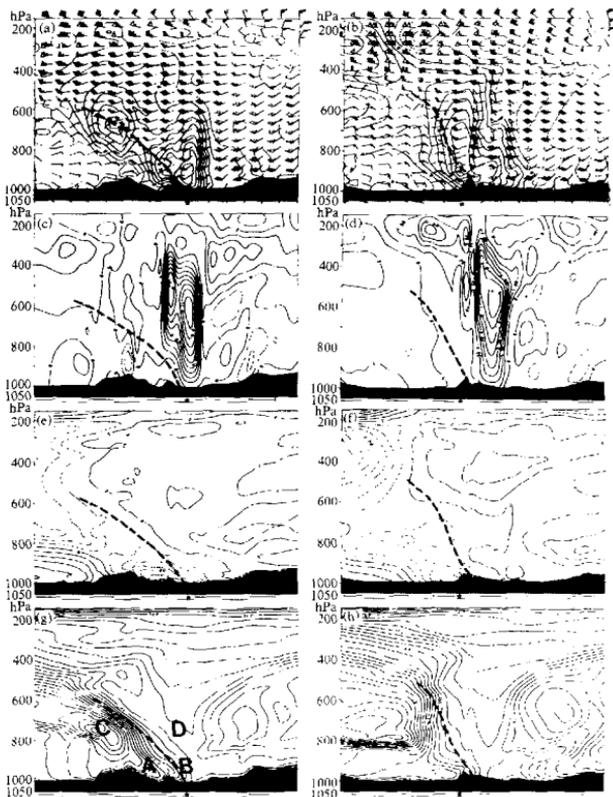


图8 沿图2c和b中CD线的涡2(a, c, e, g, 6月24日08时)和  
 涡4(b, d, f, h, 6月27日12时)的垂直剖面  
 (a), (b) 相对湿度和水平风; (c), (d) 垂直速度; (e), (f) 位温水平扰动; (g), (h) 相当位温  
 图下沿的符号“•”为850 hPa低涡中心所在, 短直线段表示水平距离100 km;  
 图中粗虚线为西南风与东北风之间的分界

性西南涡4, 在距地面切变约250~400 km处垂直伸展到600 hPa以上, 切变前缘存在一垂直涡柱, 正涡度中心位于900 hPa以下, 该涡柱伸展到600 hPa附近, 其位置与低层辐合和中层上升相合; 在该涡柱的西北侧有沿切变向上向西北方向倾斜的正涡区相连, 水平伸展300~400 km左右, 上界可达400 hPa以上, 并在地面切变后部100~

250 km 的 700 hPa 附近有另一正涡度中心。沿切变有明显的湿斜压锋区 (见图 8g、h), 由低层和中层两支锋区组成, 低层锋区后有明显位温和比湿的负值扰动对应 (见图 8e、f), 即切变后边界层内有较浅薄的干冷堆存在, 但显然比低涡东北侧的干冷堆厚。相当位温梯度达  $10 \sim 14^\circ\text{C} / 100 \text{ km}$ ; 低层锋后部在 850 至 500 hPa 之间存在中层锋区, 局地性低涡的中层锋区明显向西北倾斜, 而移动性西南涡的中层锋区则接近垂直。该锋区的相当位温梯度高达  $18 \sim 20^\circ\text{C} / 100 \text{ km}$ , 但没有明显的温度梯度对应 (见图 8e、f), 几乎完全由强湿度对比构成。低涡南侧上中游中层 600~700 hPa 有干区存在, 低层有暖湿空气, 构成对流不稳定。该低层暖湿空气伸至低涡暴雨区后向上伸展, 与高层高能空气垂直打通, 导致暴雨区上空近中性层结。

## 8 低涡气块的轨迹分析

为了揭示梅雨锋低涡的三维气流结构, 在低涡最强时刻, 由低涡中心周围 180 km 见方范围内 4 个象限 16 个格点在 8 个不同高度上 ( $\sigma = 0.9 \sim 0.2$ , 间距为 0.1), 总共  $16 \times 8$  个空气质点出发分别计算随时间倒退和前进的轨迹, 揭示低涡上空不同层次不同方位空气的来源和去向。5 个低涡的轨迹分析表明, 梅雨锋低涡内的三维气流主要可区分为三股主导气流, 下以涡 2 为例说明。图 9 给出涡 2 在 4 层 ( $\sigma = 0.9, 0.7, 0.4,$

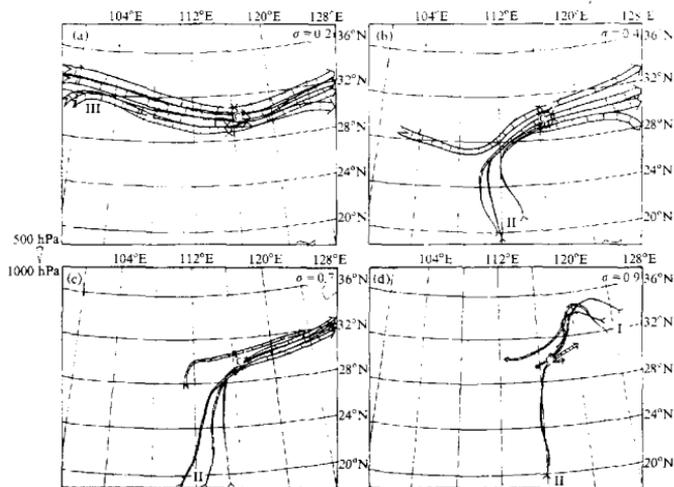


图 9 涡 2 在 4 个  $\sigma$  层上每层 4 个象限内各 1 个代表性气块的倒退和前进轨迹  
(a)  $\sigma = 0.2$ ; (b)  $\sigma = 0.4$ ; (c)  $\sigma = 0.7$ ; (d)  $\sigma = 0.9$

轨迹以箭矢表示, 箭矢宽度与气块的气压值成反比, 比例见 (a) 左下侧的图例。  
标志“C”为 850 hPa 低涡中心所在

0.2) 上每层 4 个象限内各 1 个代表性空气质点的倒退和前进轨迹, 轨迹以箭矢表示, 箭矢宽度与气块的气压值成反比, 比例见图 9a 左下侧的图例, 图 10 给出涡 2 在 8 层上 4 个象限 (a 为西北象限, b 为东北象限, c 为西南象限, d 为东南象限) 的每个象限内 4 个空气质点集成的倒退轨迹, 以揭示更明确的综合图像, 图中箭矢末端所标数字为轨迹起点的气压值, 括号内 H 之后的数字表示轨迹终点 (即进入低涡区) 的  $\sigma$  垂直坐标值乘以 100。

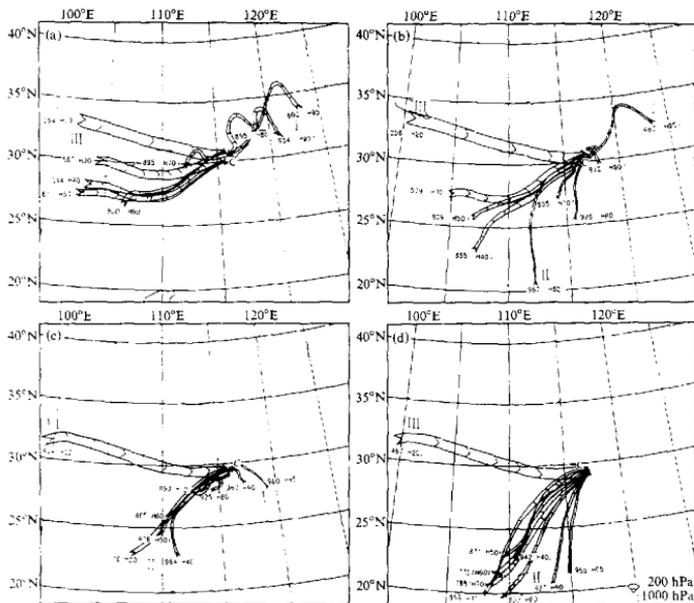


图 10 涡 2 在 8 层上 4 个象限的每个象限内 4 个空气质点集成的倒退轨迹

(a) 西北象限; (b) 东北象限; (c) 西南象限; (d) 东南象限

箭矢末端所标数字为轨迹起点的气压值, 括号内 H 之后的数字表示轨迹终点的  $\sigma$  垂直坐标值乘以 100。标志“C”为 850 hPa 低涡中心所在

在低涡西北半部 (除东南象限以外的 3 个象限), 低层 850 hPa 以下有一股来自偏东至东北方向的相对干冷空气 (图 9、10 中的气流 I)。这股气流以进入低涡西北象限的最深厚, 可达 800 hPa 附近 (图 10a), 而进入东北、西南象限的干冷空气则较浅薄, 限于边界层内 (见图 10b、c), 这与前述剖面分析结果是一致的, 即低涡区低层湿斜压锋区锋后的干冷楔以西北侧的较东北侧的深厚。低层这股气流进入低涡旋转后, 一

部分呈反气旋性曲率向西南方向流出(见图 9d)。

在低涡东南半部(除西北象限以外的 3 个象限), 中低层有一股来自南至西南方的南海和北部湾洋面低层的暖湿空气(见图 9、10 中的气流 II), 其中抵达低涡东南象限的气块水平移速最快, 这与偏南风低空急流的存在有关。在低涡上空自下往上, 气块的来向发生顺转, 由偏南至西南至偏西(见图 10b、d)。这股气流进入低涡后, 迅速上升, 至中高层后快速向偏东方向流出(见图 9b、c)。同时这股暖湿气流在低涡东南象限自地面向上伸展最为深厚(见图 10d)。在其他象限则叠加于第一股低层干冷气流之上。通常可伸展到 500 hPa 以上, 有的可达 400 hPa 以上。追踪这股气流的来源, 发现低涡东南象限上空 400 hPa 以下的上升空气质点大多都源自于 1~2 天前西南方上游的 900 hPa 以下的边界层内(见图 10b、c、d), 再一次证明低涡南侧南风低空急流的重要性。

低涡上空对流层高层(约 400 hPa 以上)为一股来自偏西至西西北方向的华西地区的高速气流(见图 9a、b 和图 10 中的气流 III)。进入低涡后呈辐散性向东流出, 北侧气流呈弱气旋性曲率向东北方向流出, 南侧气流则呈反气旋性曲率向东南方向流出。

低涡内除上述三股占主导的气流外, 中低层也有少部分空气质点来自涡旋区附近缓慢地气旋性旋转卷入低涡, 或自北侧缓慢进入低涡。

进一步分析了低涡湿斜压锋区两侧空气质点物理属性的个别变化和锋生的关系。表 1 给出涡 2 通过低涡中心并与相当位温锋区垂直的西北-东南向剖面上低层锋区(970 hPa 附近)两侧质点(图 8 中 A、B 质点)的位温、湿度和风向的时间变化。锋区冷侧的空气质点 A 来自东北方向的黄海洋面上空的边界层内, 在西南行的过程中伴随波动的弱下沉, 位温和相当位温基本守恒, 相对湿度略有减小但保持在 80% 以上锋前的空气质点 B 则来自南海中部洋面上空的边界层内, 其热力属性明显不同于锋后质点, 位温高 3~4℃, 比湿高 3~4 g kg<sup>-1</sup>, 相当位温则高出 10℃ 以上, 可见该锋区虽存在弱温度梯度, 但主要是由较强的湿度对比所构成, 显然低涡附近的低层湿斜压锋区是由分别来自相隔约 1500 km 的黄海和南海边界层内的具有不同温湿特性的两股气流(即前述的气流 I 和 II)在 1~2 天内迅速向低涡狭小区域汇合锋生而形成的。

表 1 涡 2 西北东南向剖面上低层锋区两侧气块(图 8 中气块 A、B)轨迹的物理属性演变表

时间 (UTC)	p/hPa		θ/K		θ <sub>e</sub> /K		R <sub>v</sub> /%		Q/g kg <sup>-1</sup>		u/(m s <sup>-1</sup> )		v/(m s <sup>-1</sup> )	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
2222	944	964	295	298	329	343	99	96	13	17	-7	-1	0	4
2302	916	958	297	300	330	343	99	85	13	16	-6	-1	-4	4
2306	913	949	297	301	330	343	98	80	13	16	-4	0	-7	4
2310	923	958	297	300	329	340	95	80	12	16	-1	0	-5	5
2314	939	952	296	300	329	340	89	84	12	16	-1	0	-5	4
2318	956	970	296	300	328	341	83	78	12	16	-3	0	-5	7
2322	962	982	296	298	329	341	82	85	13	17	-5	1	-5	5
2402	959	986	296	297	329	341	87	96	13	17	-6	0	-7	4
2406	972	961	295	298	330	340	91	98	13	17	-4	1	-4	1

表 2 给出同一剖面上的中层锋区两侧质点(见图 8 中的 C、D 质点)的位温、湿度

表 2 沿 2 西北东南向剖面中层锋面两侧气块 (图 8g 中气块 C、D) 轨迹的物理属性演变表

时间 (UTC)	$P/hPa$		$\theta/K$		$\theta_p/K$		$R_p/\%$		$Q_2/(g\ kg^{-1})$		$u/(m\ s^{-1})$		$v/(m\ s^{-1})$	
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D
2222	510	931	317	303	318	341	16	65	1	14	8	3	-8	7
2302	542	937	315	304	317	344	17	69	1	15	11	3	-7	10
2306	564	932	314	303	318	343	29	73	1	15	9	2	-8	9
2310	607	918	313	302	317	344	19	83	1	16	7	0	-7	10
2314	656	909	311	302	315	344	20	91	1	16	8	1	-10	11
2318	702	895	310	302	313	344	13	98	1	16	1	2	-10	13
2322	724	916	309	301	314	343	14	91	1	16	-2	5	-8	10
2402	745	905	308	301	313	344	16	98	1	16	-4	6	-6	8
2406	748	741	309	311	316	345	23	99	2	12	-4	10	-3	7

和风分量的时间变化, 锋后中层 750 hPa 附近的干冷空气, 来自偏北方向的 500 hPa 附近, 南行途中伴随明显下沉, 这是一股很干的空气, 相对湿度始终低于 30%; 同时锋前中层暖湿空气来自南海洋面上空的边界层内, 边北上边缓慢上升并趋饱和, 接近低涡时,  $u$  分量继续加大,  $v$  分量则在前期增大的基础上明显减小, 在短时间内急剧上升, 这股上升的暖湿气流与前述的北侧下沉干冷空气在中层相汇形成明显的湿度对比 (比湿梯度高达  $3.4\ g\ kg^{-1}\ (100\ km)^{-1}$ , 而温度梯度仅  $0.7^\circ C\ (100\ km)^{-1}$ ), 有利低涡中层干锋形成。

## 9 结论

利用 1999 年 6 月下旬连续性暴雨过程的中尺度四维同化模拟的时空高分辨输出, 对梅雨锋上的 5 个低涡扰动的活动和结构特点进行的综合分析表明:

(1) 与暴雨有密切关系的梅雨锋低涡除了 2 个生成于四川然后东移并在江苏东部出海的西南涡外, 另有 3 个低涡是在长江中游大别山与幕阜山之间湘鄂赣交界处就地新生的。与西南涡相比, 这类局地形成的低涡, 移动缓慢多打转, 有的尺度较小, 由于这类低涡无法追溯到上游, 其突然形成往往导致长江中下游地区突发性的暴雨; 即使由四川东移的西南涡, 通常也不是很规律地东移的, 前期往往长时间在四川地区稳定少动, 仅当其东北侧的气旋性曲率倒槽伸向下游大巴山东侧时, 在倒槽顶端会突然有低层涡旋新生和迅速加强, 表现出低涡的不连续性跳跃式东北移, 也导致长江中游降水的突发性加强。因此这两类低涡的形成和移动均与长江流域地形有密切关系, 并对长江中下游的突发性暴雨负有重要责任。

(2) 5 个低涡上空主要物理量的时间平均垂直廓线、水平分布及其时间演变的变化, 揭示了低涡东南象限的低空 (900~800 hPa) 南风急流的重要性: 集中出现于 900 hPa 以下边界层内的辐合和水汽通量辐合及边界层顶附近的涡度极大均与低层南风急流及其伴随的水平分布高度不均匀有密切关系; 从时间演变看, 偏南风急流以脉动形式出现, 其增强略超前于低涡的加强, 并伴随低层辐合、水汽通量辐合和中层上升的脉动式加强, 有利于低涡区的锋生, 导致降水的加强。

(3) 梅雨锋低涡区有湿斜压锋区通过: 低涡东北象限有边界层浅薄的弱锋区; 西北象限低层锋区锋后干冷楔较低涡东北侧的为厚, 其后部中层存在明显的由湿度对比引起的中层干锋, 与低层锋区具有显著不同的特征。

(4) 轨迹分析表明低涡区主要有三股气流: 低涡西北侧低层来自偏东或东北方向的弱干冷空气, 低涡东南侧中低层来自南至西南方向的暖湿上升气流和高层来自偏西方向的高速气流, 高层气流进入低涡后呈辐散性向东流出。三股气流中空气质点热力属性的个别变化可解释低涡西北象限的湿斜压锋区的存在: 低层锋区是由分别来自黄海和南海边界层内的具有不同干湿属性的两股气流在 1~2 天内迅速向低涡狭小区域汇合而形成的, 而中层锋区则是由来自北侧中高层的极干的下沉气流与来自南海边界层内的暖湿上升气流在中层相汇而形成的。

(5) 本文着重对移动性西南涡和局地性低涡两类低涡共同的结构特征进行了分析, 但也部分涉及到结构特征的一些不同点, 比如: 移动性低涡东南象限的正涡度和辐合中心的位置分布较为分散, 而局地性低涡则比较集中; 局地性低涡上空的正涡柱稳定于 300 hPa 以下, 而移动性低涡发展时, 正涡柱可向上伸展至对流层顶; 移动性低涡南侧南风分量的低空急流及其伴随的水汽输送存在的脉动现象较局地性低涡更为明显, 强度也大; 移动性低涡西北侧垂直剖面上风切变和中层锋区近于垂直, 而局地性低涡则明显向西北倾斜。至于两类低涡的生成过程, 也有异同。我们将在今后的工作中作进一步的研究对比。

梅雨锋低涡与长江中下游地区突发性、继发性暴雨的形成有密切关系, 本工作只是对一个长过程多个低涡的初步综合分析, 进一步的深入研究在方法上有必要更多地利用各种非常规和野外试验资料, 通过模式同化获得具有更多逼真中尺度特征的高分辨数据集, 作为分析的依据; 广度上有必要选取更多典型个例, 揭示长江中下游梅雨锋低涡源地、路径和活动变化的天气气候规律; 深度上拟对各类低涡进行深入对比分析, 揭示其形成演变的机制和四维结构。

## 参 考 文 献

- 1 胡伯威, 潘鄂芬, 梅雨期长江流域两类气旋性扰动和暴雨. 应用气象学报, 1996, 7, 138~144.
- 2 孙淑清, 杜长晷, 梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征. 应用气象学报, 1996, 7, 153~159.
- 3 韦统健, 薛建军, 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征. 高原气象, 1996, 15, 456~463.
- 4 程麟生, 彭新生, 马艳, "91.7"江淮暴雨低涡发展结构和演变的中尺度数值模拟. 高原气象, 1995, 14, 270~279.
- 5 Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauff, A Description of the Fifth-Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR TN-398+STR, NCAR Technical Note, 1994.
- 6 陶钰钰, 王洪庆等, 1995年中国的中- $\alpha$ 尺度对流系统. 气象学报, 1998, 56, 166~177.

## A Simulation Study of Structure of Mesovortexes along Meiyu Front during 22~30 June 1999

Gao Kun and Xu Yamei

(Department of Earth Science, Zhejiang University, Hangzhou 310028)

**Abstract** A simulation of the heavy rainfall process along Meiyu front during 22~30 June 1999 is conducted using the NCAR/PSU mesoscale model with a four-dimensional data assimilation. It reproduces reasonably well five mesovortexes along the Meiyu front responsible for intensive precipitation. The model output of high temporal and spatial resolution is used to analyze the evolution and four-dimensional structure of the vortexes. The movements of the vortexes are traced. The vertical structure, horizontal distribution and time variation of thermodynamic features of the vortexes are investigated. The airflow structure, the origin of moisture and cold air and the formation of moisture baroclinic front in the vortexes are examined by the analyses of trajectory and thermodynamic properties along trajectories.

**Key words:** vortex; Meiyu front; mesoscale simulation; four-dimensional data assimilation; four-dimensional structure

