第45卷 第4期　　气 象 学 报　　Vol. 45, No. 4
1987年11月　　ACTA METEOROLOGICA SINICA　　Nov., 1987

一次梅雨暴雨过程的数值模拟

黄安丽　高坤　李毓芳

（杭州大学地理系）

提　要

利用中尺度10层湿模式对一次梅雨暴雨过程作了数值模拟，较好地模拟了次天气或中间尺度系统的演变。由模拟结果分析表明：

1．形成暴雨的次天气或中间尺度系统的演变，雨带、暴雨中心位置和强度变化在低层涡度场上反映最清晰。与暴雨中心直接关联的是低层正涡度中心。这次过程中，两次正涡度中心的东移形成了前、后两次降水。

2．当低层正涡度中心移近或叠置在高层负涡度中心之下时，其强度增强，中层上升运动与暴雨也加强。它们是流场上高、低空急流之间动力耦合作用的结果。

3．雨区上空，边界层顶附近存在着一个主要表现为湿度逆增的湿暖盖——θ_{se}高值中心。它与强风暴中的暖盖不同。此湿暖盖的形成和维持与西南急流输送暖湿气流有关。它的存在不仅有利于暴雨区水汽和能量的辐合，还有利于积云尺度对流的不断诱发，而且它的存在更构成了中层为不稳定，低层为稳定这一对流层的层结结构特点，从而使不稳定的对流降水叠加在稳定性降水之上，构成了梅雨锋大暴雨。

一、引　　言

随着近年来探测技术和计算能力的提高，人们对暴雨的研究已逐渐转向导致暴雨至关重要的次天气或中间尺度过程方面。使用具有较高时，空分辨率的中尺度模式对暴雨过程进行模拟，为探讨次天气或中间尺度系统的演变提供了有效的工具。

用数值预报方法预报梅雨至今少见，而较多的是对梅雨系统作一些模拟研究。郭英华[1]对亚洲东南部一次梅雨系统的模拟指出梅雨锋东、西段的不同性质，并认为把梅雨锋定义为气旋涡度极大值连线更为合适的观点。李毓芳[2]在对美国中西部一次暴雨过程的模拟研究中指出了非热成风的变化、高低空急流的演变与降水的关系。而对暴雨过程中，次天气或中间尺度系统的演变模拟作得较少。本试验使用一个中尺度10层湿模式对1982年6月发生在长江中、下游的暴雨过程作了模拟，目的是在检验模式性能及预报能力的基础上，探讨次天气或中间尺度系统演变的规律和特征，以增加对梅雨系统与梅雨暴雨机制的了解。

* 本文于1985年2月15日收到，1986年4月18日收到修改稿。

二、模 式 简 介

本试验所用模式是在引进 Anthes-Warner 模式基础上改进而成的。其基本公式参见文献[3]。计算区域在 18°N—42°N,102°E—128°E 之间。中心位于 30°N,115°E。水平格距为 90 km,共有 31×31 个格点。垂直方向采用 σ 坐标,共分 10 层,其中为加强对流层低层的研究,将 745 hPa 以下大气分为 5 层。σ 的定义为:

$$\sigma=\frac{p-p_t}{p_s-p_t}$$

式中 p 为气压;p_t 为模式顶气压,本文中 $p_t=150$ hPa;p_s 为地面气压。模式采用一个一维积云参数化方案和一个粗边界层方案。垂直加热廓线系用武汉的探空资料计算而得。有关模式中各物理过程的假设和参数的选用详见文献[4]。

模式的初始化是以手工分析资料作第一猜值场，再用标准层及探空测风资料作多次连续扫描,先在标准等压面上进行客观分析,然后将分析值内插或外延到各 σ 面上。采用整层平均无辐散的风场作为初值。地形资料取自美国 NWC 的 1×1 经纬度地形资料。

三、数值模拟结果

本次试验对 1982 年 6 月 19 日—20 日长江中下游的暴雨过程作了数值模拟。这期间湖北省东部和南部以及安徽省西部下了大暴雨。过程最大雨量中心在武汉附近，次大在安徽黄山、休宁附近。降水可分为 19 日 08 时—20 日 01 时和 20 日 02 时—16 时两个时段,其中第二时段雨量大、范围广,是形成暴雨的主要时段。过程最大降水为 271 mm，主要集中在 20 日 05 时— 08 时。

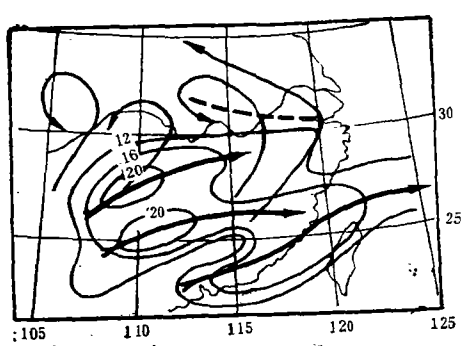

图 1a　1982 年 6 月 20 日 08 时 850 hPa 流场实况

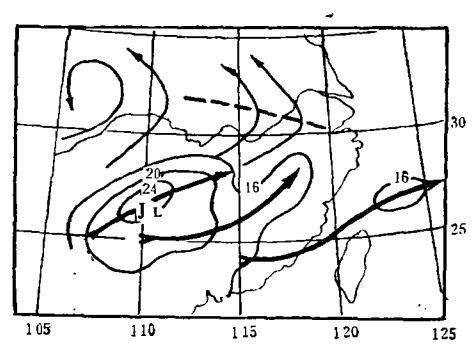

图 1b　模式第 12 小时预报的 850 hPa流场

(粗箭矢：急流,细箭矢：流线,粗虚线：切变线)

有关这次个例的天气过程已有详细分析[5,6],这里不再赘述。本文以 1982 年 6 月 19 日 20 时的天气图为初始场,作了 24 h 预报,着重就模拟结果探讨了梅雨暴雨系统的演变及其特征。

1. 预报结果概述

图 1a,1b 分别为 20 日 08 时 850 hPa流场实况与预报。总的说来,西南低空急流与切变线的位置报得不错,急流强度的增强,轴向的偏转,切变线的北抬,切变线附近气流的气旋性曲率加强等基本特点均已报出,虽然急流中心的强度偏强了一些,但与实况相比还是较好的。

图 2a,2b 分别为 24 h 与最强 6 h降水实况与预报。由图 2 可见,预报的降水亦呈带状,雨带与暴雨中心的位置与实况很接近,东部江浙一带的雨区也有所反映,预报的海上雨区与云图上的云带一致。计算各时段降水落区预报准确率的 T_s[1)]评分[7]均可与美国国家气象中心 1961—1978 年发布的 0 — 24 h 落区预报的评分相比。降水中心 3 h 雨量变化曲线(图略)也出现两个峰值,且以后期为大,趋势与实况一致,但峰值出现时间较实况落后(出现在第 15—18 小时),雨量偏小。这可能与模式的物理考虑与初始资料处理有关。尽管如此,上述预报结果与实况的比较仍表明了该模式具有较强的预报能力,不仅在定性上与实况相当一致,定量上也可与其他模式相比,因而模拟结果是可信的,可用此结果来分析这次暴雨过程和探讨次天气或中间尺度系统的演变规律与特征,以弥补当前中小尺度观测试验资料的不足。

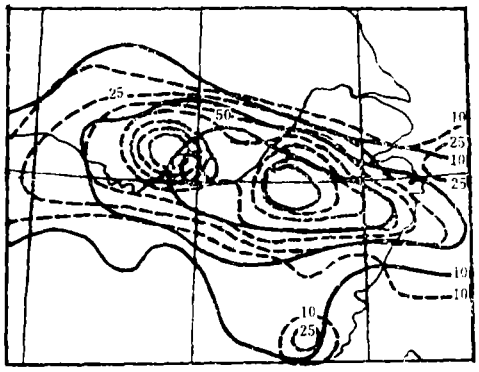

图 2a 1982 年 6 月 19 日 20 时—6 月 20 日 20 时 24 h 降水实况与预报

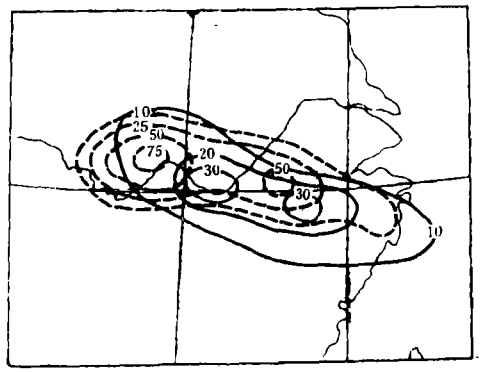

图 2b 1982 年 6 月 20 日 08 时—6 月 20 日 14 时 6 h 降水实况与预报

(实线:预报,虚线:实况,50 mm 以上等值线的间隔为 50 (单位:mm))

2. 梅雨暴雨过程中两个中间尺度系统

1) 低层正涡度中心

由图 3 可见,第 12 小时之前,影响降水的主要系统是低层的暖切变,对应地面有一条弱的静止锋。降水呈带状,分布在切变线南侧;第 12 小时之后,一支西南急流迅速向雨区移动,切变线位置北抬,雨量明显增大,雨区南北范围扩大呈块状,位置偏移在这支急流轴的左前方。可见,低空急流对后期降水起了重要作用。上述演变过程与实况基本一致。

涡度场的分析表明,不论影响的系统如何,在整个降水过程中,雨带的位置和移动都与相对涡度场有很好的对应关系,梅雨雨带总是位于一个正涡度带的南面。第 12 小时之

1) T_s = 报对面积/(预报面积 + 实况面积 − 报对面积)

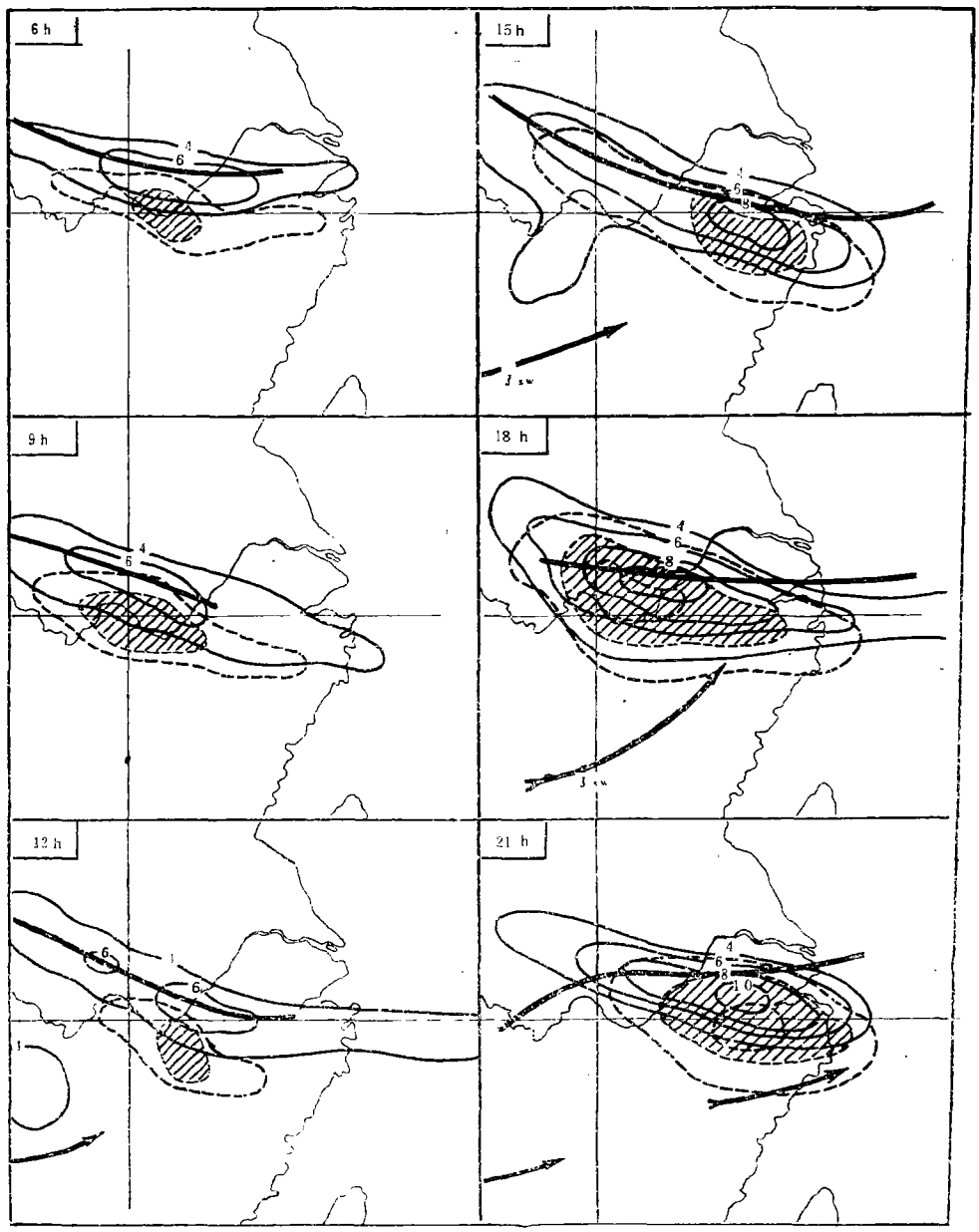

图 3　850 hPa 等压面上切变线、急流、涡度场与 3 h的降水预报(粗箭矢：急流，粗实线：切变线，细实线：等涡度线，虚线：雨带，阴影区：大于 10 mm 雨区)

前，切变线位置与正涡度极大值连线位置吻合；第 12 小时之后，此正涡度极大值连线偏到了切变线以南，强度增加，而位于其南缘的雨带随正涡度带也发生了相应的变化。值得注意的是：上述涡度带上可以分析出中间尺度的涡度中心，暴雨中心(3 h 降水大于 10 mm)就位于此正涡度中心的南缘。

(1) 正涡中心与上升运动、暴雨中心关系

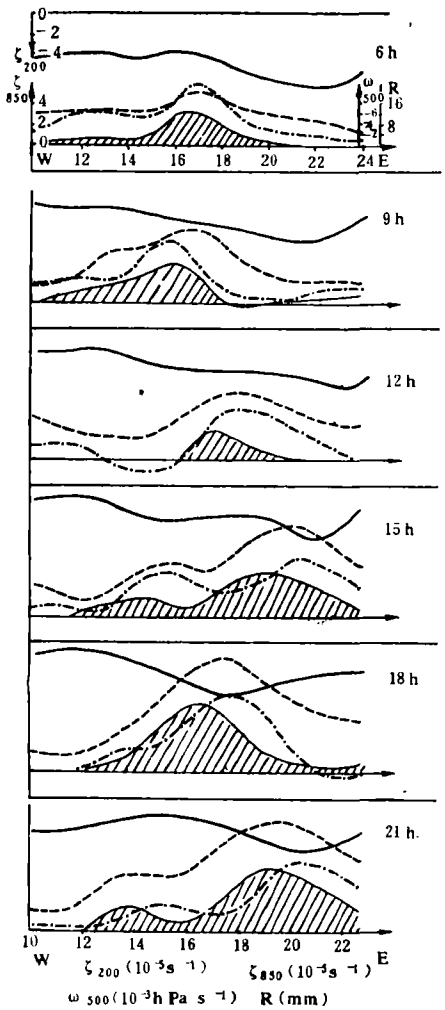

图 4 a 暴雨中心上空 850 hPa涡度(虚线)，200 hPa涡度(实线)，500 hPa上升速度(点划线)与前 3 h 的降水(阴影区)纬向分布的 3 h 变化

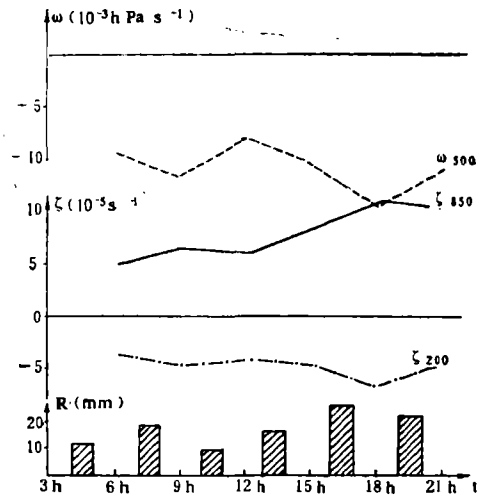

图 4 b 暴雨中心位置 850 hPa 涡度(虚线) 500 hPa 上升速度(实线) 200 hPa 涡度(点划线)与雨量的时间变化

由图 4 a 可见，在低层正涡度中心东传的同时，其上对流层中层总有一个上升运动中心(ω 负值)相伴随，因而暴雨中心，上升运动中心和低层正涡度中心有一一对应的关系，只不过前 3 h 雨量中心位置偏上游。第 15 小时，纬向上有两个正涡度中心，后期降水与上游正涡度中心东移有关。因此，这次过程是两次正涡中心的东传形成了两段降水。作各时刻暴雨中心区域的低层正涡度、中层上升速度、高层负涡度与雨量的变化曲线(图4 b)，上述各量强度变化也是相当一致的。

这个中间尺度正涡度中心是和大暴雨的发生直接关联的。由图(3)可见，第 12 小时之前，它在流场上对应的系统是暖切变上气流的涡旋中心(地面对应有辐合中心)；第 12 小时之后，由于西南急流的东移，在急流轴出口区的左前方，出现了主要由急流轴北侧气流切变形成的正涡度区(这与一般诊断结果相同)，它随急流的移动而移动，第 15 小时与切变线的正涡度带相连，第 18 小时已与正涡度带合并，此时正涡度中心偏到了切变线以南，因而后期的正涡中心在流场上主要与这支低空急流有关。由散度场分析(图略)可知，低层正涡度中心均对应流场辐合。正是通过低层正涡度中心流场的辐合，迫使上空产生上升运动，而以这支上升气流为主体的垂直环流的发展是导致暴雨发生的主要动力因素。

(2) 正涡中心的发展与高低空急流的耦合

涡度场垂直结构分析(图 5)表明，降水过程中，雨带上空与雨带东面低层是正涡度而高层为负涡度。第 12 小时之前，低层正涡中心在 800 hPa 高度，东移缓慢；而第 12 小

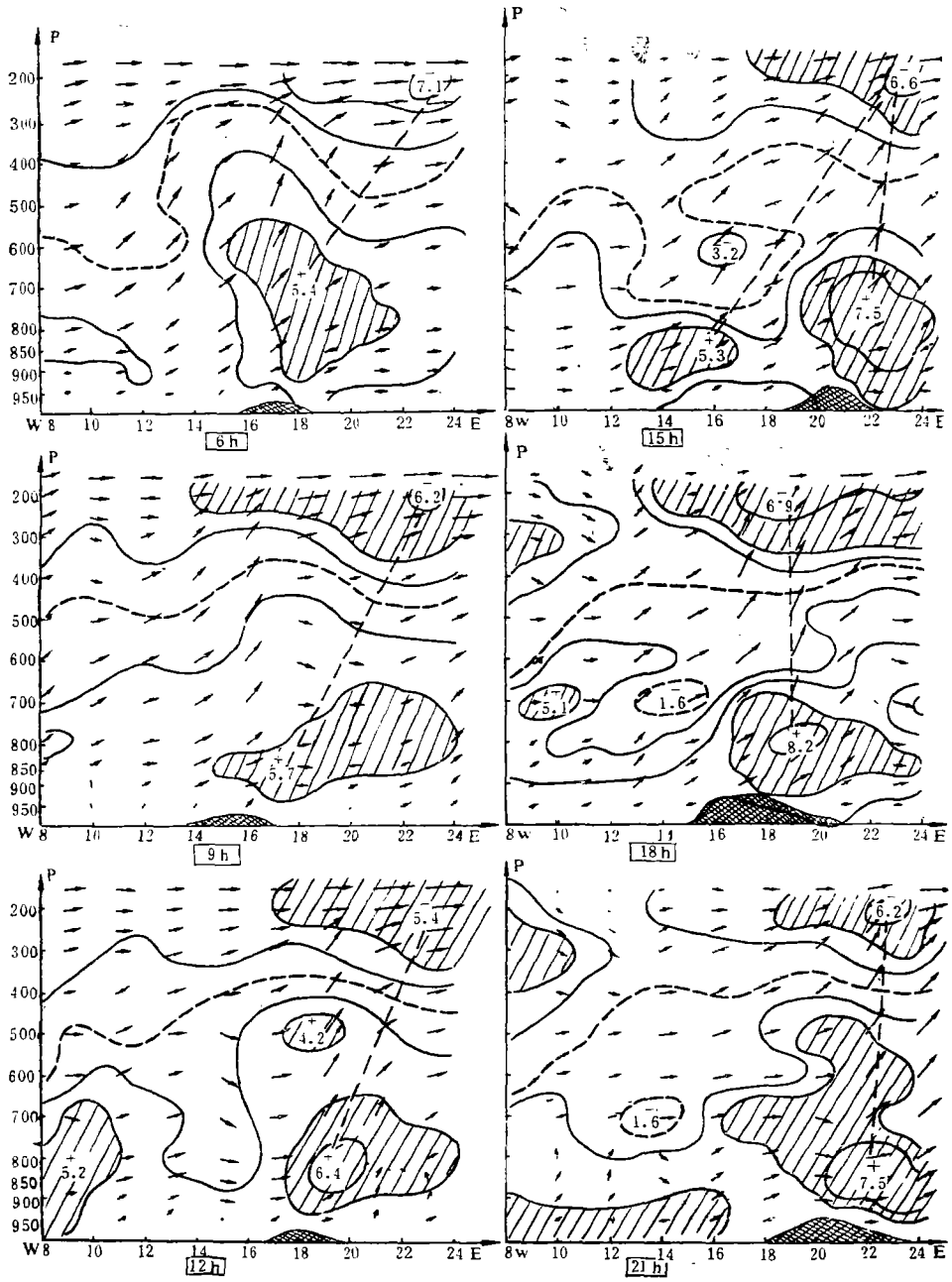

图 5　第 6,9,12,15,18,21 小时暴雨中心上空纬向剖面上涡度的分布与沿剖面的环流(风矢表示)、对应的暴雨区

(涡度单位：$10^{-5}s^{-1}$，阴影区为涡度大于 $4.0\times10^{-5}s^{-1}$ 中心)

时开始上游新出现的正涡中心东移迅速。高层负涡度区稳定少变。图(5)中垂直方向虚线表示了上、下层负、正涡度中心的连线。值得注意的是当低层正涡度中心移近或叠置在高层负涡中心之下时，出现低层正涡度中心增强、上升运动与雨量亦增大。第 15,18,21

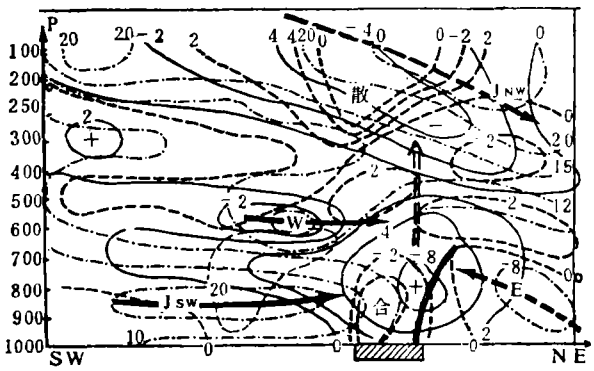

图 6a 第 18 小时沿低空急流轴剖面
(细实线：涡度线(单位 $10^{-5}s^{-1}$)，虚线：散度线(单位：$10^{-5}s^{-1}$)，点划线：等风速(单位 ms^{-1})，粗箭矢：急流，粗虚箭矢：穿过剖面急流，粗实线：切变线，双虚线箭矢：上升运动最强区，阴影区：雨区)

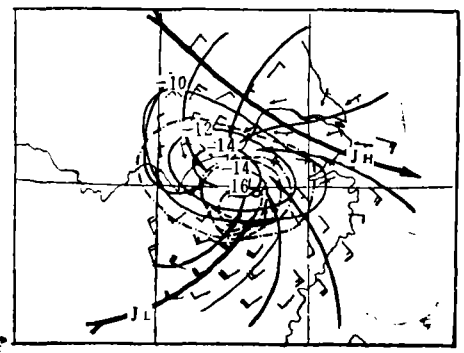

图 6b 第 18 小时高、低空急流位置(粗箭矢)、$\hat{D}$(点划线)、$\hat{\zeta}$(实线)、ω_{500}(虚线)与非地转风流线(细箭矢)分布

小时均属此情况。表示各量纬向分布的图(4a)也反映了这一相应关系。

为了揭示这一关系的实质，分析了高、低空流场结构。作了第 18 小时沿低空急流轴的垂直剖面图（图 6 a)。低层在切变线南侧有一支西南急流与北侧的偏东气流辐合，高空有一支变化缓慢的大尺度西北急流位于雨带北侧。高空急流轴南侧气流的切变与急流中心附近平流惯性项产生的非地转风造成了质量的横向输送，形成了入口区右侧大尺度的负涡度、辐散区，它迫使中层产生大尺度的上升运动。第 12 小时后，低空急流迅速东移，第 18 小时时，低空急流轴已与高空急流轴轴向斜交，使高空急流中心入口区右方正好叠置在低空急流轴出口区左方之上(图 6 b)。本文计算了与高低空流场有关的一些物理量，表明该叠置区是相对散度($\hat{D}=D_{200}-D_{850}$)、流场非热成风涡度($\hat{\zeta}=\zeta_{200}-\zeta_{850}$)与上升速度绝对值最大区。更引人注目的是该时刻该区域 850 hPa 出现了明显的非地转风($\boldsymbol{V}-\boldsymbol{V}_g$，强度最大达 8 ms^{-1}）与非地转风向此区域的辐合。这些特点反映了高、低空流场间的关系：两急流轴向的斜交，使高层负涡度、辐散区正好重叠在低层正涡度、辐合区之上，低空急流轴左前方次天气尺度上升中心与高空急流轴右侧辐散迫使产生的大尺度上升中心辐合，表现为总的上升运动增强(强度达 14.5×10^{-3} hPa/s)；另一方面中层上升，高层辐散使低层产生负变压和指向负变压中心的变压风，此变压风的辐合又使低层原来的正涡度中心加强，同时上升运动加强，从而导致暴雨峰值的出现。陈秋士[7]曾用重力惯性波的不稳定解释了高、低空急流间的耦合过程，上述模拟结果支持了这一观点。显然，非地转风的产生是高、低空热成风平衡破坏的结果，而低层正涡度与中层上升运动的加强是重力惯性波不稳定的产物。

2) 边界层顶 θ_{se} 高值中心

本次模拟结果中，θ_{se} 的分布是十分有意思的。图 7 给出了暴雨中心上空经向剖面上 θ_{se} 分布的时间变化。降水初期，对流层低层，有一个 θ_{se} 舌自南向北插入到 850 hPa 高度，在第 12 小时后，形成了一个闭合的高值中心，其范围和强度不断扩大和增强，一直到

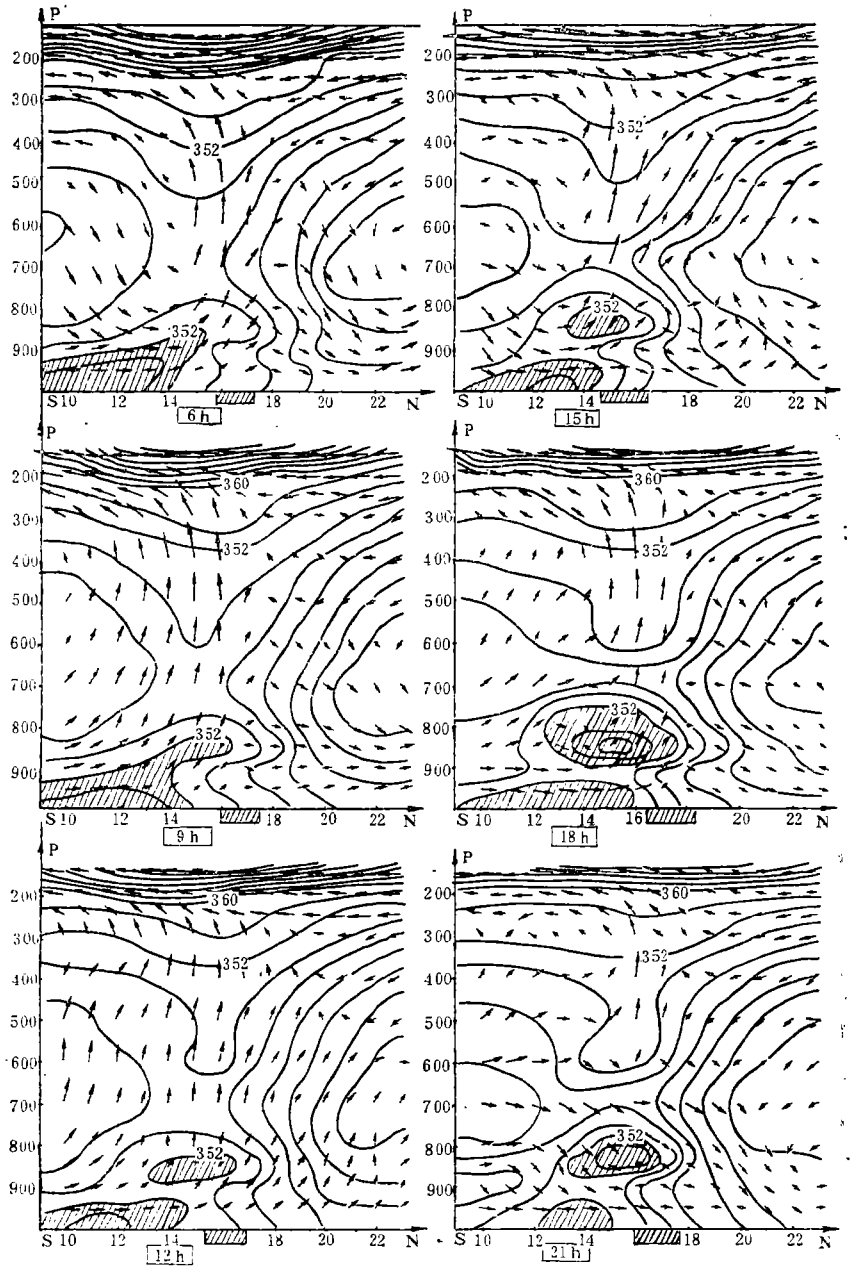

图 7　第 6,9,12,15,18,21 小时沿暴雨中心的径向剖面上假相当位温(θ_{se}，单位 K)与沿剖面上的环流(风矢表示)

暴雨峰值过后才逐渐减弱。暴雨中心就位于此 θ_{se} 中心北缘的下方。本文称此高值中心为湿暖盖。由于此中心的存在，雨区上空出现了边界层顶 900—850 hPa 高度为位势稳定，而对流层中层 850—700 hPa 高度为不稳定的层结结构(图略)。实况 20 日 08 时汉口站探空资料 θ_{se} 分析证实了 870 hPa 附近 θ_{se} 大值(353K)的存在。

(1) 湿暖盖的性质

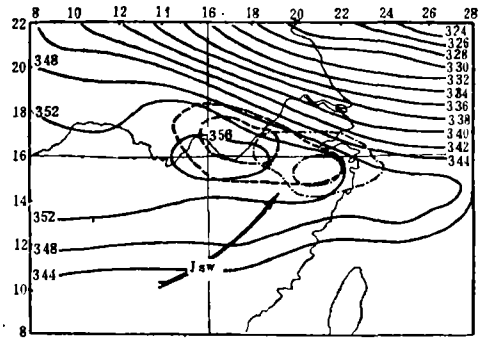

图 8a 第 18 小时 850 hPa 等压面上急流(粗箭矢)、等 θ_{se} 线(实线)、前 3 小时雨区(虚线)和后 3 小时雨区(点划线)

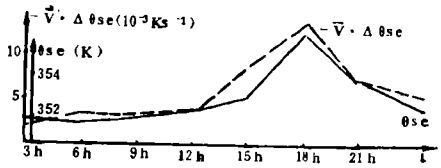

图 8b 暴雨区 $-\boldsymbol{V}\cdot\nabla\theta_{se}$(虚线，单位 10^{-3} K/s)与 θ_{se}(实线，单位 K)的时间变化

此湿暖盖与强风暴中暖盖性质不同。后者一般是上干、下湿两股气流相互作用形成的，位置偏高，暖盖中心上空为强下沉区，温度的逆温比较明显，一般强风暴一旦发生，此暖盖便被冲破而消失。而本过程经由温度与比湿垂直廓线(图略)比较，900—850 hPa 高度 θ_{se} 的增大主要是比湿 q 的逆增(第 18 小时，$q_{850}-q_{900}=2.7$ g/kg)所致，温度的逆温并不明显($T_{850}-T_{900}=-1$℃)，其上空为强上升区。湿暖盖并不随暴雨的发生而消失。显然也不是对流潜热释放所造成。

(2) 湿暖盖的形成和作用

由图 8a 可知，雨区位于急流中心出口区的左前方、θ_{se} 舌的偏强梯度一侧。模拟结果表明，第 18 小时之前，θ_{se} 中心是不断增强的。由于本模式只考虑了水汽凝结的非绝热加热作用，因而有：

$$\frac{d\theta_{se}}{dt}=0$$

展开得

$$\frac{\partial\theta_{se}}{\partial t}=-\boldsymbol{V}\cdot\nabla\theta_{se}-\omega\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p} \tag{1}$$

因 850 hPa 高度 θ_{se} 最大，故 $\frac{\partial\theta_{se}}{\partial p}=0$，所以 θ_{se} 的局地变化主要决定于 θ_{se} 的平流。分析中计算了暴雨区内 850 hPa 面上 $-\boldsymbol{V}\cdot\nabla\theta_{se}$ 的平均值，它与 θ_{se} 值的关系见图 8b，证实 θ_{se} 高值中心随 θ_{se} 平流的增强而增强。

将方程(1)对 p 取偏微商，并取平均得：

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(-\frac{\partial\overline{\theta}_{se}}{\partial p}\right)=\frac{\partial}{\partial p}\left(\overline{\boldsymbol{V}}\cdot\nabla\overline{\theta}_{se}+\overline{\omega}\frac{\partial\overline{\theta}_{se}}{\partial p}\right)+\frac{\partial}{\partial p}(\overline{\boldsymbol{V}'\nabla\theta'_{se}})+\frac{\partial}{\partial p}\left(\frac{\partial}{\partial p}\overline{\omega'\theta'_{se}}\right) \tag{2}$$

这里横杠“—”和撇“′”，分别表示了中间尺度与对流尺度的量，$-\frac{\partial}{\partial p}\overline{\omega'\theta'_{se}}$ 是显热的源或汇。

方程(2)左端表示稳定度的局地变化；右端第一次为 θ_{se} 三维平流随高度变化，以水平平流为主。由于急流的高度在 850 hPa 附近，850 hPa 面上 θ_{se} 平流最大，因而对 700—850 气层来说，此项为负值，使层结不稳定化；同样，第二项为对流尺度 θ_{se} 平流随高度变化，也为负值；第三项表示显热加热随高度的变化，由于雨区对流降水潜热释放，高层是热源，低层是热汇，此项一般为正值，使层结稳定化。预报结果在第 18 小时之前，对流层中层不稳定度不断加大，表明了前两项作用大于后项，而第 18 小时后，不稳定度减弱则与急流的减弱与降水潜热释放有关。图 7 中 500—200 hPa 间的暖心可能是对流加热之故。

综上所述，湿暖盖的形成和维持主要与西南急流输送暖湿气流有关。它是一个中间

尺度的中心。它的存在对暴雨的维持和增强有重要的意义；它有利于暴雨区内水汽和能量的辐合；有利于对流层中层位势不稳定的增大，上升运动的发展；它也有利于积云尺度对流的不断诱发。

四、小　　结

A-W 模式所作数值模拟结果及分析说明该模式可以模拟出与实况分析基本一致的次天气或中间尺度系统及其演变，且由模式揭示出来的演变过程表明：

1．系统的演变与雨带、暴雨中心的位置和强度变化在低层涡度场上反映最清晰。支持了郭英华提出的用涡度极大值连线表示梅雨锋位置较合适的观点，但认为当西南急流影响明显时，涡度带会偏南，且低层中间尺度正涡度中心与暴雨中心直接关联。是两正涡度中心的东移形成了本过程前、后两段降水。

2．低层正涡度中心移近或叠置在高层负涡度中心之下，会产生低层正涡中心的加强，中层上升运动与暴雨亦增加。它是流场上高、低空急流之间动力耦合作用的结果，实质上是重力惯性波的不稳定发展。

3．雨区上空，边界层顶附近存在一个主要表现为湿度逆增的湿暖盖——θ_{se} 高值中心。它与强风暴的干暖盖不同。它的形成与维持主要与西南急流输送暖湿气流有关。它的存在有利于暴雨的维持和增强。

参 考 文 献

[1] Kuo, Y.H., and R. A. Anthes, Papers in meterological research, 5,15—36, 1982。

[2] 李毓芳，一次暴雨过程与环境流场关系的数值模拟，大气科学，9，2，1985。

[3] Anthes, R. A., and T. T. Warner, Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other mesometeorological studies, *Mov. Wea. Rev.* 106,1045—1078,1978.

[4] 李毓芳、Preliminary numerical simulation of a SESAME case, 杭大学报,9,219—235,1982。

[5] 胡伯威，1982 年 6 月 19 日—20 日江汉平原特大暴雨，湖北气象，1983,第 4 期 17—19。

[5] 林杏奇，1982年 6 月20日特大暴雨的成因分析，湖北气象,1983,第 4 期，23—28。

[7] 李毓芳、高坤、黄安丽，中尺度模式在梅雨暴雨预报中的初步试验，浙江科技通报,1985年第 3 期。

[8] 陈秋士，The instability of gravity-inertia waves and its relation to the low-level jet and heavy rainfall, *J. Met. Soc. Jap.*, 60,1041—1057,1982.

A PRELIMINARY SIMULATION OF A HEAVY RAIN PROCESS DURING MEIYU SEASON

Huang Anli　Gao Kun　Li Yufang

(Department of Geography, Hangzhou University)

Abstract

A 10-layer moist mesoscale model has been employed to simulate a heavy rain case over the Yangtse valley during Meiyu season. The structures and evolutions of subsynoptic or medium scale systems are well simulated. The

results are as follows:

1. The low-level vorticity, the evolution of subsynoptic or medium scale systems are closely associated with heavy rain. Peaks of 3-h precipitation developed and moved along with the vorticity maximum center.

2. The vorticity maximum at lower level intensified while it moved near or under the center of negative vorticity at the upper level, concurrently, the upward motion and the amount of precipitation was amplified.

3. A warm moist lid existed by the top of PBL over rainfall area, the inversion of moisture was main feature of the lid, characterized by a maximun of θ_{se}. The formation and mentainance of the lid were related to the transformation of warm and moist flow by south-west LLJ.

国际大地测量和地球物理学联合会(IUGG)第十九届大会简介

1987年8月7日至23日,在加拿大温哥华召开了第十九届IUGG大会。作为IUGG中国委员会代表团的组成部分,国家气象局、中国科学院大气物理研究所、北京大学地球物理系及南京大学大气科学系的约十余名气象学家出席了这届大会。IUGG是在国际科学界具有重要地位的学术组织,每四年召开一次大会,交流近四年来各成员国在大地测量和地球物理学领域内所取得的学术成就和进展。出席本届大会的来自世界各地的科学家约三千余人,会议的学术交流内容是非常广泛的。其中与大气科学的发展关系密切的学术交流会是:

一、跨学科学术交流会

本届大会由IUGG的一些专业协会联合组织了20个跨学科的学术交流会。其中有IAMAP(国际气象学和大气物理学协会)参与组织的交流会有:1. 关于学科发展方向的讨论会;2. 全球定位系统对地球物理学的影响讨论会;3. 地球转动的变化讨论会;4. 中层大气的研究重点的讨论会;5. 污染动力学和监测讨论会;6. 地球物理科学对气候变化研究的贡献讨论会;7. 边缘冰区过程讨论会;8. 低纬度海气相互作用讨论会;9. 海洋气候的长期变化讨论会。

二、IAMAP学术交流会

在本届IUGG大会期间,IAMAP除参与组织了许多跨学科的讨论会外,就本学科的许多重要课题组织了14个专题讨论会:1. 地面能量通量、模式和观测讨论会;2. 气溶胶和气候讨论会;3. 中层大气动力学讨论会;4. 中纬度气旋讨论会;5. 中尺度分析和预报;6. 对流在中尺度发展中的作用讨论会;7. 年际时间尺度的气候系统中的变化的预报讨论会;8. 地形气流动力学讨论会;9. 微波遥感讨论会;10. 关于人工影响天气的科学现状讨论会;11. 对流层化学的某些近期成就讨论会;12. 高纬度对流层和边界层过程讨论会;13. 北级和南级中层大气的差别讨论会;14. 全球天气试验讨论会。

此外,在国际水文学协会(IAHS)和国际海洋物理学协会(IAPSO)所组织的学术交流会中,有些也与大气科学的发展有关。

在本届IUGG大会期间,我国代表团向大会提交了关于我国大地测量和地球物理学各领域的四年进展的国家报告,其中包括我国大气科学委员会的《气象学和大气物理学国家报告》。同时,我国气象学家向大会提交了10余篇论文,其中有许多受到好评,例如叶笃正等的《水文对气候的敏感性试验》,李崇银的《东亚地区的气候变化与厄尼诺现象的出现》及《感热和垂直风切变对温带CISK扰动的影响》,孙照渤、章基嘉等的《SST和中国东部降水的关系及GCM对中国南海弱SST的响应》,赵柏林的《微波

(下转第450页)