

梅雨锋结构特征及与锋上涡旋扰动关系的诊断分析

陈丽芳¹ 高坤²

¹ 杭州市气象局, 杭州 310008

² 浙江大学地球科学系, 杭州 310027

摘 要 利用 1999 年 6 月下旬持续性梅雨锋降水过程的模拟结果以及野外实验的加密资料, 对这次梅雨锋过程进行诊断分析, 发现梅雨锋主; 要表现为中层锋面, 强度比边界层锋强, 低涡沿中层锋面南缘移动。中层锋强的演变对两类低涡(西南涡和局地涡)发展的影响程度不同。对于东移明显的西南涡, 梅雨锋强度的加强比低涡提早 6 小时以上。而对于长江中游的局地涡, 锋面最强与低涡最强出现的时间却比较接近。梅雨锋中层锋面发展最强的位置与低涡发展最强的位置在东西方向上基本重合, 基本在同一经度上。因此, 低涡暴雨扰动加强发展区的北侧正是前期持续锋生所在, 并且锋生的位置在东西方向上基本不随时间发生位移。当低涡移经该地时, 低涡强度最强, 随后低涡东移并且强度减弱, 锋面大值带也减弱并随低涡向东传播。

关键词 梅雨锋 低涡 数值模拟 诊断分析

文章编号 1006-9895(2007)05-0863-13

中图分类号 P441

文献标识码 A

The Structure of Meiyu Front and the Relationship between the Front and the Vortex Disturbance along It

CHEN Li-Fang¹ and GAO Kun²

¹ Hangzhou Meteorological Office, Hangzhou 310008

² Department of Earth Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Abstract In early summer, with the seasonal adjustment of atmosphere general circulation, especially with the north jumping of the western Pacific subtropical high and East Asian monsoon, the rainy season is coming in the middle-lower reaches of the Yangtze River. This was called Meiyu season. Meiyu front is a macro-scale system, and it is not uniform. It results in sustained rainfall. The nonuniformity of Meiyu front is closely related to macro-scale system and mesoscale convective system. Meiyu front and vortex along front influence each other. In order to improve the forecast accuracy, Mesoscale model MM5, intensive observation data, TBB (the cloud top black body temperature) data are used in studying the relationship between the nonuniformity of Meiyu front structure and vortex disturbance during the last ten days of June 1999. There were five vortexes during 0000 UTC 22 June 1999 to 0000 UTC 1 July 1999, and two of them were south west vortexes, and the others were local vortexes. The main results of diagnostic analysis are as follows.

Middle level front is the main form of Meiyu front, and it is stronger than boundary front. Middle level front is higher than the vorticity center of vortex. Low vortex moves along the south edge of middle level front.

There is a good relationship between the middle level front and the vortexes along it. The evolvement of middle level front has different effects on the southwest vortex and the local vortex. As for the southwest vortex, the development of vortex and Meiyu front is not at the same time. The frontogenesis appears about 6 hours or more earlier than the development of vortex. As for the local vortex, the development of vortex and Meiyu front is almost at the

same time. The middle level front can foreshow the evolution of vortex, especially the south west vortex. So studying the development of middle level front would have a good implication for the two types of vortexes forecast.

The location where the middle level front is the strongest is near to the north of that where the low vortex is the strongest. The two places are almost at the same longitude. So the front develops most just to the north of location where the low vortex develops later. Before the low vortex develops most, middle level front goes on developing at the same place with almost no displacement, and the vortex will be the strongest in the same place in the future. When the low vortex passes, the middle level front propagates eastward and weakens. This character has a good implication for forecasting the development of vortex. When middle level front goes on developing in a place, and there is a vortex in the west of this place, then the vortex will be the strongest when it moves to this place. The vortex will become weak after it passes.

Key words Mei-yu front, vortex, numerical simulation, diagnostic analysis

1 引言

初夏季节,随着大气环流形势的季节调节,特别是西太平洋副高的季节性北跳,东亚季风的加强北上,长江中下游地区进入雨季,即梅雨季节。由于梅雨持续时间的长短和降雨量的多寡与这些地区的旱涝灾害密切相关,长期以来梅雨的研究与预报受到了特别关注。许多气象工作者^[1~6]通过大量的实验研究发现,梅雨期的降水系统主要是梅雨锋及沿梅雨锋东移的中尺度低涡。这些降水系统在梅雨锋上的分布具有不均匀性^[7,8]。

观测和分析均表明^[9~14],发展成熟的梅雨锋一定伴有强的中尺度对流系统,锋上存在明显的涡旋扰动,直接导致梅雨锋带内降水分布的高度不均匀。梅雨锋上的中尺度对流系统是以梅雨锋为依托而发展形成的,梅雨锋是低涡赖以生存的天气系统,低涡又是影响梅雨锋结构不均匀变化的重要因素,两者之间是相互作用、相互影响的^[15~17]。为了弄清梅雨暴雨发生的机理,改进梅雨降水的预报能力,有必要加强对于梅雨锋沿锋面方向结构不均匀性及其与涡旋扰动变化关系的研究。

本文试图利用 1999 年 6 月下旬一次持续性梅雨锋降水过程的 MM5 全程四维同化模拟产生的较高时空分辨的结果,深入分析梅雨锋发展演变的特征以及梅雨锋与低涡的密切关系。

2 试验设计和资料简介

利用多种资料,通过诊断与数值模拟结合的方法来研究梅雨锋沿锋面方向演变特征及其与涡旋扰动变化关系。利用 PSU/NCAR 中尺度非静力数值预报模式 MM5 的连续同化模拟资料,采用全程同

化,有利于对长过程的连续模拟;利用 1999 年淮河野外试验加密观测的探空资料以及 1 小时 TBB 和 1 小时降水资料进行诊断,并以此检验模拟的分析结果。

1999 年 6 月 22 日开始在长江中下游地区发生持续近十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,113°E 以东的长江中下游地区 6 月下旬总雨量达 300~700 mm,为常年同期 3~4 倍。过程降水中心位于浙皖边界的黄山地区,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的外洪内涝,工农业生产和人民生命财产遭受严重损失。这次过程中长江中下游梅雨锋自始至终稳定维持,6 月 22 日~7 月 1 日有较明显的 5 次低涡扰动活动过程,梅雨锋带和低涡分别与稳定的雨带和强降水中心对应,与连续暴雨的形成和维持关系十分密切。该过程的稳定性和连续性为梅雨锋结构演变特征及其与涡旋扰动联系的研究提供了一个很好的机会。

以 1999 年 6 月 22 日 00 时(国际协调时,下同)为初始场,采用 MM5 中尺度模式,进行长达 9 天(216 小时)的两重网格双向嵌套同化模拟。水平格距分别为 90、30 km,格点数分别为 67×73、91×85。对于次网格尺度对流降水采用 Grell 方案,通过包含上升、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简单冰方案,对行星边界层采用 Blackadar 的高分辨参数化方案。为了获得长时间较为逼真的连续模拟结果,在模式积分过程中进行全程四维同化,利用 12 小时间隔的高空观测、3 小时间隔的地

面观测对 2 重网格分别进行分析场同化和测站同化。

该试验产生了相当逼真的动力协调的时空高分辨模拟结果，过程总降水的模拟和实况分布的对照（如图 1）表明，在 6 月 22 日 00 时~26 日 00 时和 6 月 26 日 00 时~7 月 1 日 00 时两个时段内，长江中下游模拟出 50 mm 以上的强降雨带。与实况相比，对于梅雨锋雨带的位置和主要暴雨中心的模拟是比较逼真的。降水的成功模拟使得有可能进一步利用模拟结果对主要降水系统——梅雨锋及其上涡旋扰动进行深入分析。

由于常规资料时空分辨率低，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。图 2 给出了 30 km 格距的同化模拟 12 小

时(6 月 22 日 12 时)和 120 小时（6 月 27 日 00 时）的客观分析和模拟的 850 hPa 流场，从图上可以看到，客观分析和模拟结果不但大尺度环流形势基本一致，而且小尺度的涡旋扰动也能被较好地反映出来，这为梅雨锋上低涡的研究提供了条件。

3 低涡活动演变与梅雨锋关系的个例诊断分析

3.1 个例选取

图 3 给出了 5 次低涡过程（所取的时间段如表 1 中所示）中 850 hPa 上的低涡中心移动路径和 750 hPa 高度层的相当位温平均场的叠加图。从图 3 可以看到，低涡沿 750 hPa 相当位温密集带的南

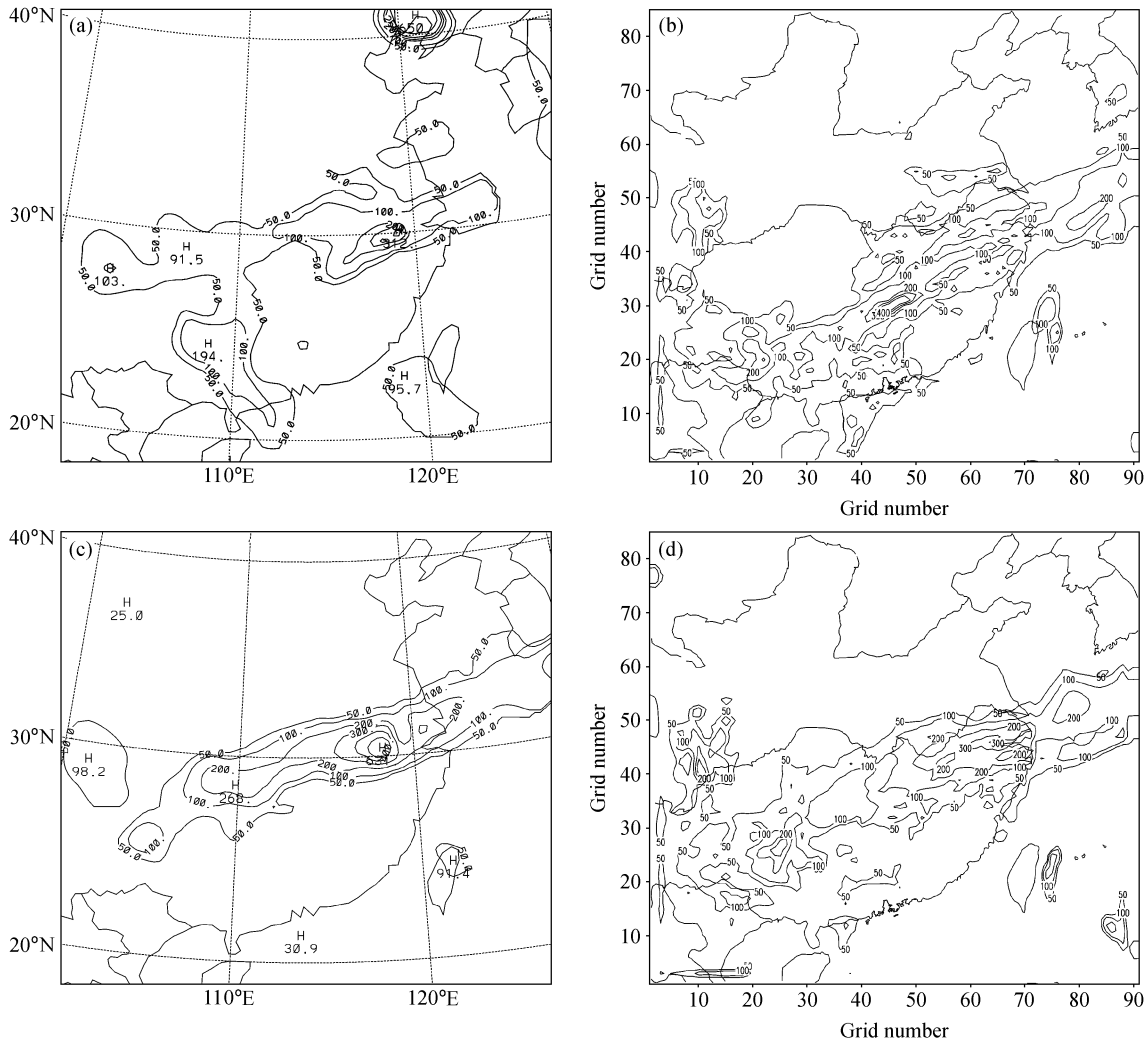


图 1 1999 年 6 月实况 (a, c) 和模拟 (b, d) 的降水分布 (单位: mm): (a, b) 22 日 00 时~26 日 00 时; (c, d) 26 日 00 时~7 月 1 日 00 时

Fig. 1 The distribution of precipitation (mm) by observation (a, c) and simulation (b, d): (a, b) From 0000 UTC 22 Jun to 0000 UTC 26 Jun; (c, d) from 0000 UTC 26 Jun to 0000 UTC 1 Jul

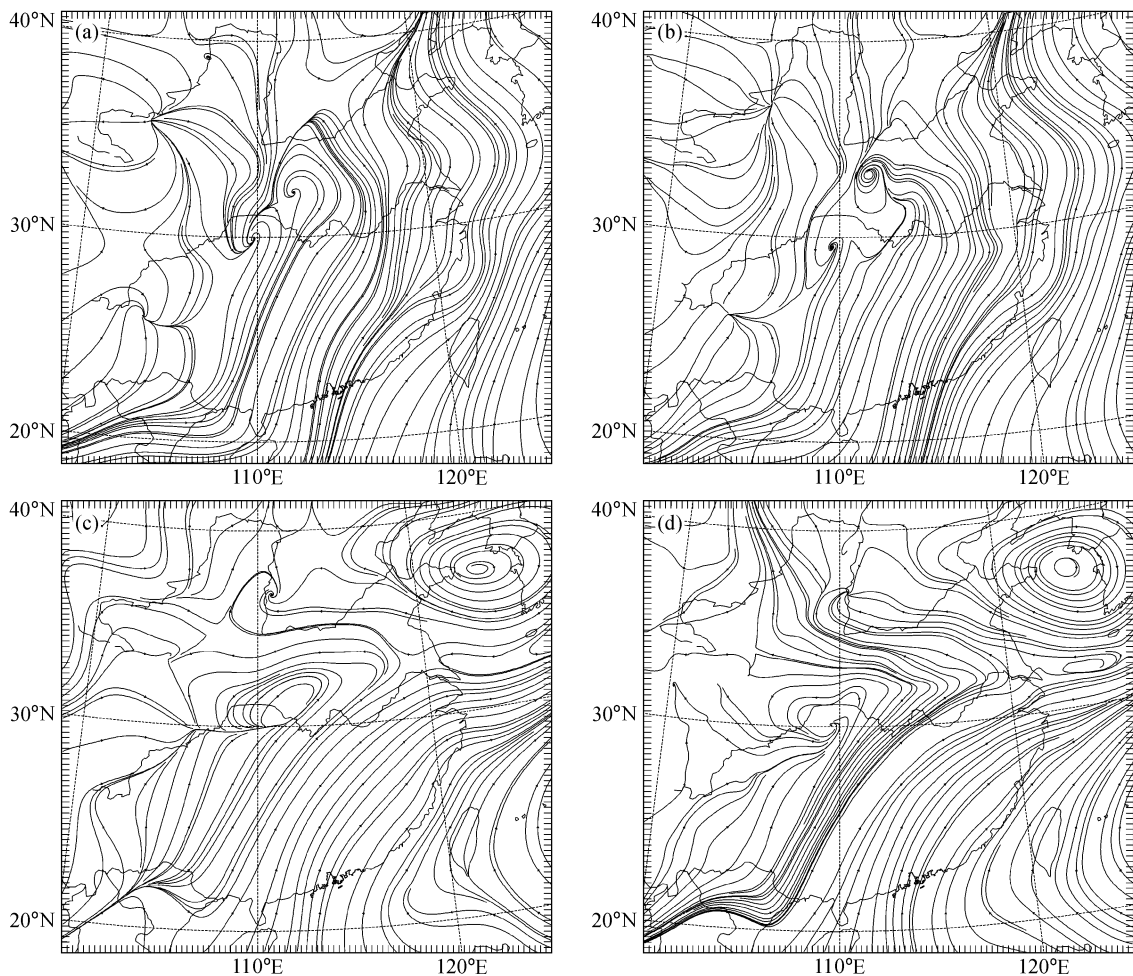


图2 850 hPa 流场的客观分析 (a、c) 和模拟 (b、d); (a、b) 1999 年 6 月 22 日 12 时; (c、d) 1999 年 6 月 27 日 00 时

Fig. 2 Streamline filed of objective analysis (a, c) and simulation (b, d) at 850 hPa; (a, b) 1200 UTC 22 Jun 1999; (c, d) 0000 UTC 27 Jun 1999

缘移动, 低涡移动路径和锋面平均位置很接近, 低涡不穿越锋面, 根据锋面的位置能大致判断出低涡的移动路径。图上标的字符 (A、B、C) 表示低涡最强时低涡中心所处的位置。这 5 个个例中低涡最强位置附近对应的 θ_e 等值线较密, 梯度较大, 低涡最强和锋面最强出现的位置在东西方向上是基本一致的。低涡移动路径的南侧都有高能舌与之相伴, 随低涡向东伸展, 高能舌对低涡发展起支持作用。

通过对这 5 个低涡的源地、移速、生命史等性质的分析, 可以分成西南涡和局地涡两类: 西南涡的特点是在四川盆地内生成, 发展东移, 最后入海, 它位移较大, 移动较快, 涡度值较大, 且发展过程中保持一个涡度中心; 局地涡在长江中游局地生成, 生命史较短, 在长江下游消亡, 位移小, 移速缓慢, 涡度值较小, 且发展过程中多次生消, 有

多个涡度中心。以上 5 个个例中, 22vor1、26vor1 是西南涡, 22vor2、22vor3、26vor2 是局地涡。通过具体分析这 5 次低涡个例来揭示梅雨锋区属性以及梅雨锋与其上涡旋扰动的联系。

3.2 锋强与涡强的时高分布特征及其配置

将 5 个低涡分成两类: 西南涡和局地涡, 进行分类讨论。

3.2.1 西南涡

低涡 26vor1 和 22vor1 是西南涡, 以下研究西南涡生消发展过程中低涡强度和锋面强度的时间高度分布特征及其配置。图 4 给出了这两个低涡的涡度场和相当位温梯度场的时间高度剖面, 其中图 4a、c 反映低涡强度的时间-高度分布特征, 是以低涡中心为移动坐标的涡度最大值的时间-高度剖面; 图 4b、d 是锋区最大强度的时间-高度剖面图。

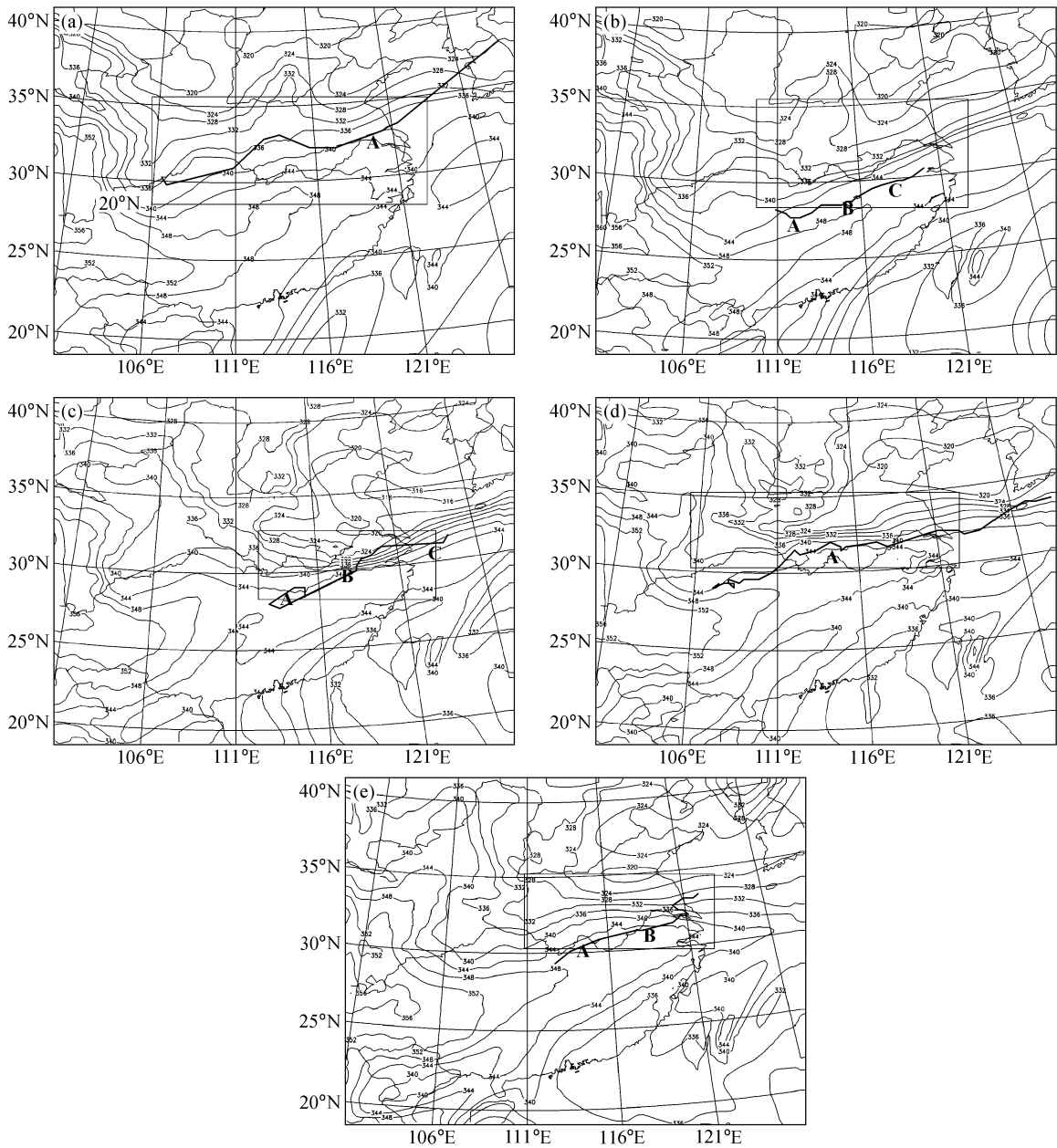


图 3 1999 年 6 月 22 日~7 月 1 日的 5 个低涡过程 750 hPa 相当位温 (单位: K) 的时间平均场: (a) 22vor1; (b) 22vor2; (c) 22vor3; (d) 26vor1; (e) 26vor2。粗实线表示 850 hPa 低涡中心移动路径; A、B、C 表示低涡移动过程中几个最强涡度中心出现的位置 (下同); 方框表示 θ_e 时间-高度剖面所取的区域

Fig. 3 The average field of potential equivalent temperature (K) at 750 hPa during 22 Jun to 1 Jul for five vortices: (a) 22vor1; (b) 22vor2; (c) 22vor3; (d) 26vor1; (e) 26vor2. Heavy solid line; the track of vortex center. A, B, C refer the places that the intensity of vortices is the strongest (the same below). The block; the area taken for θ_e section in the following

26vor1 是个典型的西南涡, 低涡发展的强度很强, 产生的过程降水量也很大。由图 4a 可见, 该低涡的涡度在 27 日 06 时开始迅速增强, 到 27 日 16 时涡度达到最强, 此后逐渐减弱。涡度大值中心的高度在 850 hPa、 $24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的等值线一直向上延

升到 300 hPa。由图 4b 可见, 在低涡发展的这个时段内, 锋面的强度发生变化。锋面在 26 日 16 时~27 日 06 时最强, 之后锋面强度逐渐减弱。锋面大值中心在 750 hPa 附近的中层, 比涡度中心的位置高。比较图 4a 和 b 不难看出, 梅雨锋强度增强 (锋

表 1 1999 年 6 月 22 日 00 时~7 月 1 日 00 时所选 5 次个例模拟的基本情况

Table 1 The basic describing about the five simulated vortexes during 0000 UTC 22 Jun to 0000 UTC 1 Jul 1999

标识符	起止时间	生命史/h	移速/ $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	源地	涡旋最大强度/ 10^5 s^{-1}	过程降水量/mm	类型
22vor1	6 月 22 日 00 时~ 23 日 14 时	38	58.3	四川盆地内	63	175	西南涡
22vor2	6 月 22 日 20 时~ 24 日 14 时	42	24.2	武陵山东南侧	57.5	215	局地涡
22vor3	6 月 24 日 18 时~26 日 06 时	38	30.4	幕阜山西南侧	40.4	190	局地涡
26vor1	6 月 26 日 00 时~28 日 22 时	70	41.2	四川盆地内	72.5	235	西南涡
26vor2	6 月 28 日 14 时~7 月 1 日 00 时	58	16.9	武陵山东南侧	51	215	局地涡

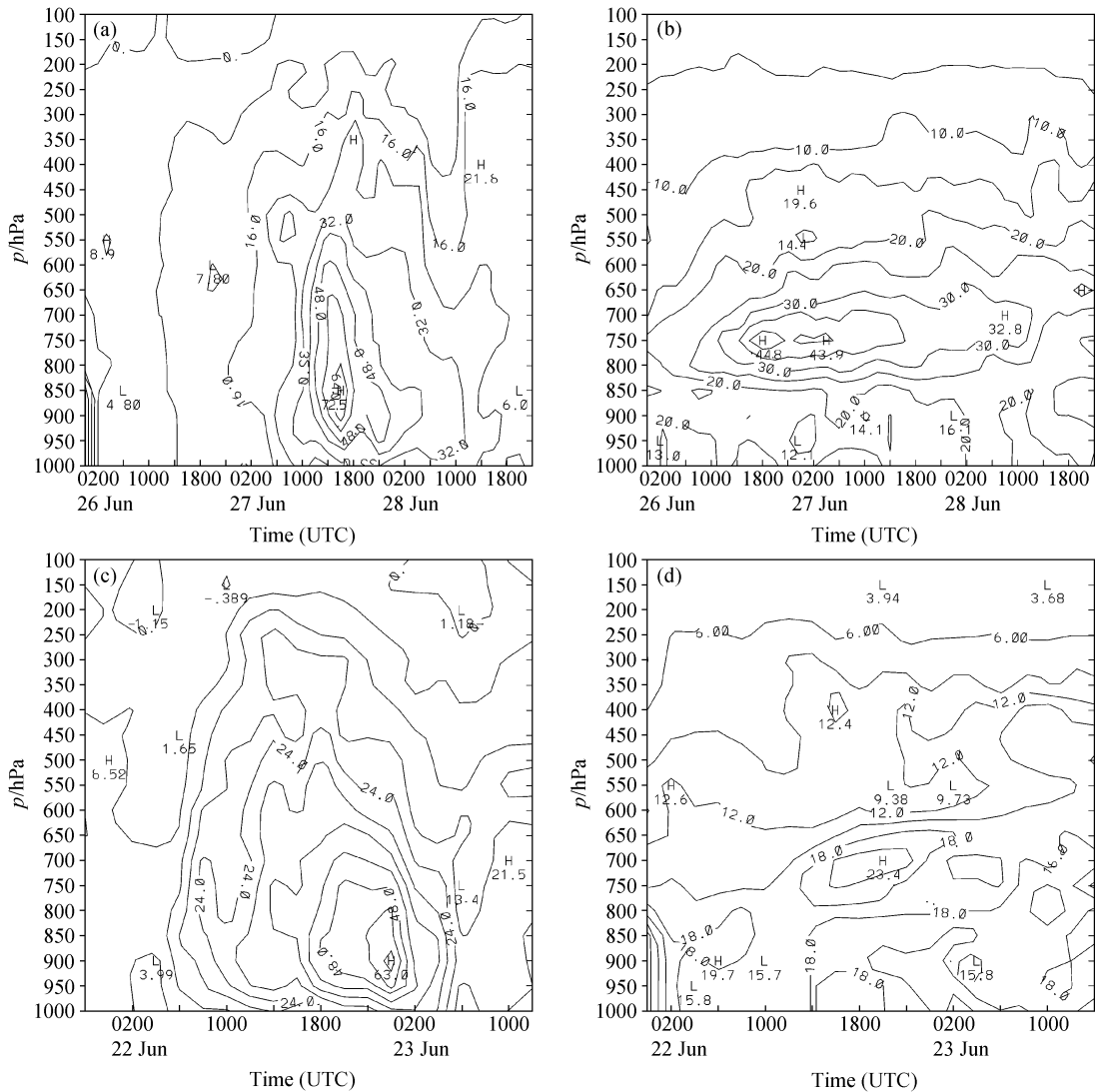


图 4 低涡 26vor1 (a、b) 和 22vor1 (c、d) 涡度场和相当位温梯度场的时间-高度剖面: (a、c) 低涡上空区域最大涡度 (单位: 10^{-5} s^{-1}) 的剖面; (b、d) 梅雨锋所在区域内 (图 3 中方框所示) 相当位温梯度的剖面 (单位: K/km)

Fig. 4 Time-height cross-section about the vorticity and the gradient of potential equivalent temperature of vortexes 26vor1 (a, b) and 22vor1 (c, d): (a, c) Cross-section of the maximum vorticity (10^{-5} s^{-1}) of vortexes; (b, d) cross-section of the gradient of potential equivalent temperature (K/km) along Meiyu front (the pane in Fig. 3)

生) 时, 低涡并无强烈发展。锋面强度达到顶峰后, 开始减弱时, 低涡才强烈发展。低涡的涡度和梅雨锋强度达到峰值并不是同时的, 梅雨锋锋生明显比涡度增强提早 6 小时以上。

同样由图 4c 可见, 低涡 22vor1 的涡度在 23 日 02 时达到最大, 低涡强度较强。涡度大值中心的高度在 900 hPa 附近, 涡度大值带向上伸展到 450 hPa 附近。从图 4d 上看, 梅雨锋主要出现在中层, 并且锋面最强中心有随时间向中层发展的趋势, 700 hPa 上出现锋强的最大值中心。22 日 14 时~22 日 22 时锋面加强发展, 其中 22 日 20 时锋面最强。比较图 4c 和 d, 发现锋面发展到最强比低涡提早 6 小时左右, 锋面主要位于中层, 中层锋区最强的位置比低涡中心高。

3.2.2 局地涡

低涡 22vor2、22vor3、26vor2 是局地涡。同样分析局地涡发展时锋面强度和低涡强度的分布特征及配置。图 5 给出了这三个低涡的涡度场和相当位温梯度场的时间高度剖面图。图 5a、c、e 反映低涡强度的时间-高度分布特征; 图 5b、d、f 则反映锋区强度的时间-高度演变特征。

22vor2 是个局地涡, 从图 5a 上看到, 低涡自生成以来强度逐渐加强, 到 24 日 04 时左右最强, 随后逐渐减弱。涡度中心大值带在 850~900 hPa, 涡度值为 $24 (10^{-5} \text{ s}^{-1})$ 的等值线向上伸展到 550 hPa 左右的高度。由图 5b 可见, 锋面从 23 日 00 时起逐渐增大, 最大强度开始出现于 850 hPa, 其后锋强中心随时间抬升到中层, 到 24 日 06 时出现最大值, 大值中心位于 750~700 hPa。随着低涡的发展, 锋强中心由低层逐渐抬升到中层。该局地涡个例中, 锋强大值中心出现的时间与低涡最强出现的时间比较接近, 超前现象不如西南涡明显。

低涡 22vor3 也是局地涡。由图 5c 可见, 该低涡在整个生命史中出现三次较明显的生消过程, 涡度的三次发展分别在 25 日 02 时、25 日 10 时、26 日 02 时, 涡度极大值在 900~850 hPa, 该低涡的强度比其他个例要弱。从图 5d 上看, 在 25 日 02 时、25 日 12 时、26 日 00 时分别有梅雨锋强度的大值中心, θ_e 梯度大值带在 750 hPa 附近, 比涡度极大值的位置高。比较图 5c 和 d, 可见 3 个锋强中心与低涡强度中心都吻合较好, 超前现象不明显。

低涡 26vor2 由图 5e 可见, 低涡 26vor2 在 29 日 20~22 时发展到最盛, 在此之前有断断续续的涡度中心发展。涡度最大值的高度出现在 800 hPa 左右, 大值带向上延伸到 500 hPa, 发展的高度较低, 低涡强度较弱。由图 5f 可见, 梅雨锋面主要在

600~850 hPa 的中层, 生消明显。锋面在 29 日 02 时起出现锋生, 一直持续到 29 日 20 时。与图 5e 相比较可见: 锋面强度中心出现在 29 日 06 时、29 日 16 时、29 日 22 时; 而涡度中心出现在 29 日 12 时、29 日 20 时, 锋面强中心出现比低涡强中心出现略早, 但提前的时间是在 6 小时以内。

3.3 沿锋面锋强的时间变化与涡强演变移动的关系

为了研究梅雨锋中层锋面随时间的演变与低涡强度演变和低涡移动之间的关系, 以低涡中心为移动坐标, 选取梅雨锋发展最旺盛的高度, 绘制锋区强度的东西向时间剖面, 如图 6a~e 分别是 5 次个例的情况。在 26vor1 中, 由前述分析可知, 梅雨锋在 750 hPa 附近发展最旺盛。由图 6a 可见, 在梅雨锋锋面发展最强位置的南侧也是低涡发展最强的位置, 两者在东西方向上的位置基本重合, 都在格点 50 的附近。由该图也可见, 锋面的加强明显比低涡的加强早, 中层锋面强度先加强, 10 小时左右以后, 在当初锋面最强位置的正南侧 (低涡沿锋面南源移动), 低涡发展到最强。 θ_e 梯度的大值带轴线在低涡发展到最强前, 东西方向上基本不发生位移, 当低涡移经该地时梯度加强, 而后大值带的轴线发生大幅转折 (如图上粗实线所示), 折向东, 与低涡移动路径接近, 并且锋面强度随之减弱。由此可见, 低涡发展前期, 在未来低涡发展最强的地区附近, 中层梅雨锋持续加强, 并且这条锋面加强带在东西方向上基本不发生位移; 当低涡移经该地时, 低涡强度会发展到最强, 随后低涡东移强度减弱, 锋面大值带也减弱并随低涡向东传播。

26vor2、22vor1、22vor2、22vor3 这四个低涡个例发展过程 (图 6b~e) 中, 无论是西南涡还是局地涡, 锋强和低涡的发展之间都有这一特征。如图 6 的粗实线所示, θ_e 梯度的大值带轴线在低涡发展前期, 东西方向基本无位移, 低涡移经该地时强烈发展, 之后减弱, θ_e 大值带也东折并减弱。

这个特性对预报低涡发展有指示作用: 当中层锋面强度在某地持续加强, 它的西侧又有低涡发展东移, 则该地就是未来低涡强度发展到最强的位置, 低涡移经该地后强度减弱。

4 加密实况资料检验诊断结果

以上分析是建立在高分辨的同化模拟资料的基

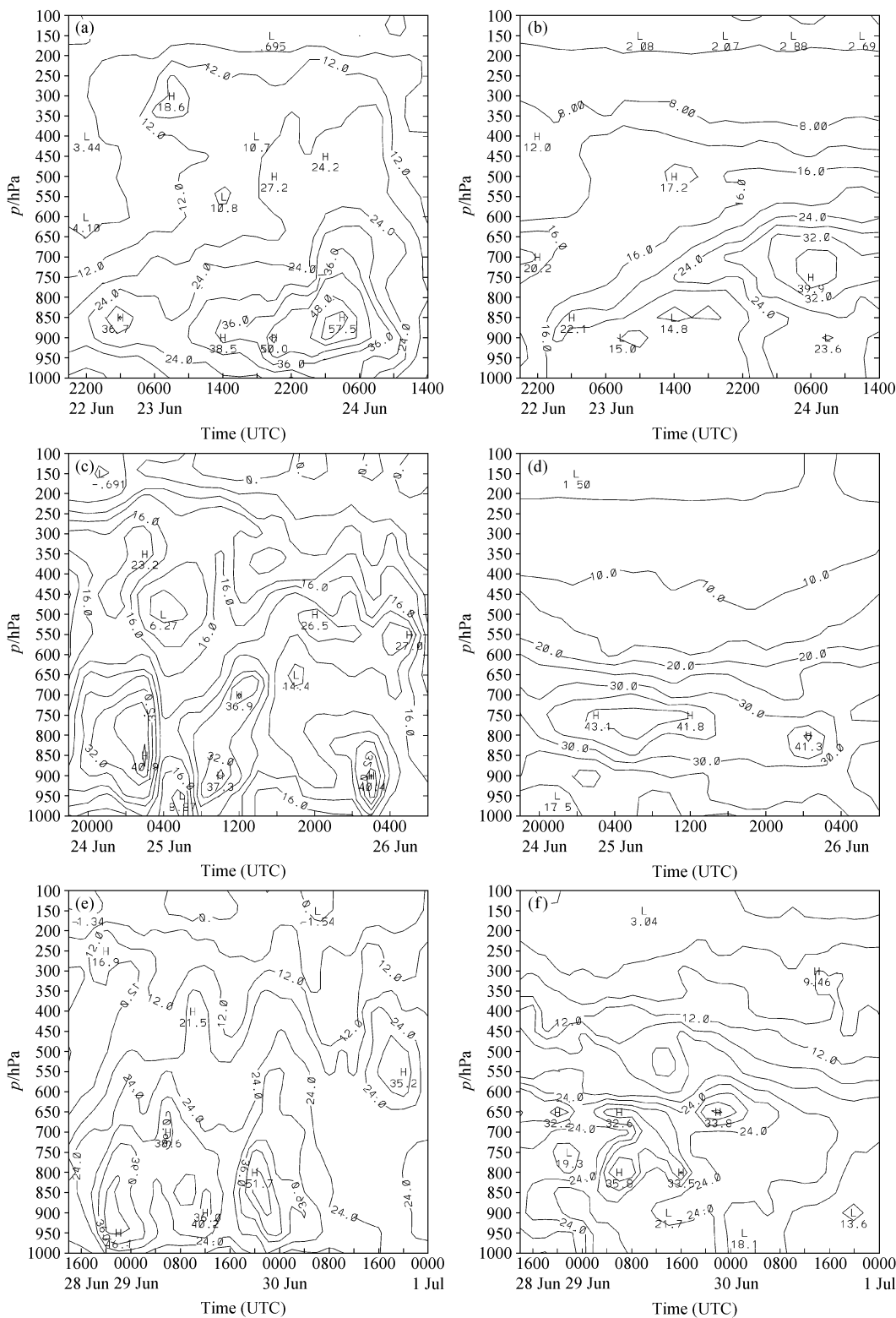


图5 低涡22vor2 (a、b)、22vor3 (c、d)、26vor2 (e、f) 涡度场和相当位温梯度场的时间剖面: (a、c、e) 最大涡度的时间-高度剖面图; (b、d、f) 图3中方框范围内各相当位温梯度的时间-高度剖面图。其他同图4

Fig. 5 Time-height cross-section about vorticity and grads of potential equivalent temperature of vortices 22vor2 (a, b), 22vor3 (c, d), 26vor2 (e, f): (a, c, e) Cross-section about the maximum vorticity of vortices; (b, d, f) cross-section about grads of potential equivalent temperature along Meiyu front. The others are the same as Fig. 4

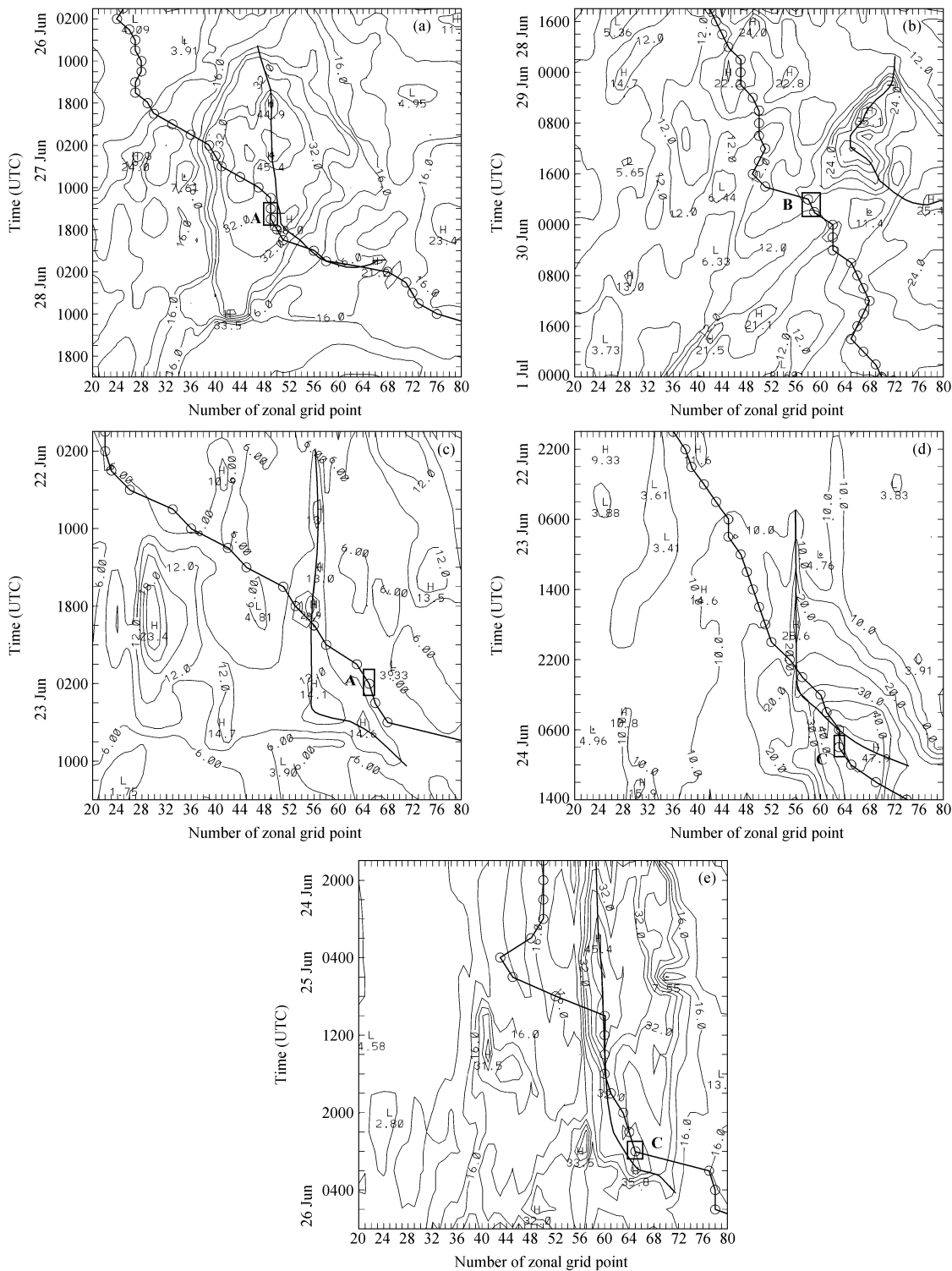


图 6 以低涡路径为移动坐标的沿各低涡过程中梅雨锋发展最高高度的相当位温梯度(单位: K/km)的东西向时间剖面图: (a) 26vor1; (b) 26vor2; (c) 22vor1; (d) 22vor2; (e) 22vor3。圆点连线表示低涡路径, 粗实线表示 θ_e 梯度大值带轴线, 小方框表示涡度最强时刻。A、B、C 表示图 2 的低涡中心

Fig. 6 In the moving coordinates of vortex paths, the west - east time cross-section of the maximum gradient of potential equivalent temperature (K/km) at the height that Meiyu front develops into a strongest one. Line with loops; path of vortex; heavy solid line; the maximum axes of θ_e gradient; pane; the time when the vorticity is maximum. A, B, C correspond to the vorticity centers in Fig. 2

基础上, 锋面和低涡间的实际变化情况是否真如上述分析的那样? 利用 TBB 云图、1 h 降水资料, 南海季风实验和淮河流域水循环试验得到的加密观测的 6 小时探空资料等实测资料来验证。图 7 是所关注的区域内 15 个加密观测探空站的测站位置和站号。首先综合 1 h 实况降水、TBB 云图资料 (图略) 确定低涡实际发展到最强的时刻和位置, 过该点作垂直于 750 hPa θ_e 密集带的连线, 然后在图 7 中找出最接近连线的测站, 且这两个测站分别位于 θ_e 密集带的南北两侧, 连接这两个站点 (得到如图 7 中 1~5 的实线), 绘制沿该剖面的两站间 θ_e 差值的时间演变曲线。以下对 2 个西南涡 (26vor1、22vor1)

和 3 个局地涡 (22vor2、22vor3、26vor2) 分别进行分析。

个例一 (26vor1): 根据以上选取站点的方法, 在 26vor1 (起止时间 26 日 00 时~28 日 22 时, 见表 1) 个例中选择 57083 (郑州) 和 57494 (武汉) 两个站点 (图 7 线条 1 连接的两个站点), 绘制 26 日 00 时~29 日 00 时两站点上空的 θ_e 差值的时间演变曲线, 得到图 8b。做这两个站点位置的模拟资料 θ_e 差值的时间演变曲线, 得到图 8a。比较模拟和实况图, 我们可以看到, 实况和模拟反映的锋区变化趋势基本一致, 这也更验证了模拟的逼真性, 证实该模拟试验的结果是可信的。从图 8b 上看, 实况 θ_e 差值的最大值发生的时刻 (27 日 12 时) 与实况低涡发展到最强的时刻 (根据 1 小时降水和 TBB 资料确定, 发生在 27 日 17~18 时) 比较可见: 在低涡发展到最盛以前, 锋区已经达到最强, 而低涡发展到最强时, 锋区强度又已趋于减弱, 实况锋区发展的确比低涡加强要早。实况资料反映的中层锋区强度最大值出现在 700~650 hPa, 与模拟的高度也基本一致。

个例二 (22vor1): 用与个例一相同的方法, 综合 1 小时间隔的 TBB 资料、降水资料, 确定该低涡在 22 日 20 时~23 日 00 时发展到最盛。选取连线 (图 7 线条 2), 所选站点为 58027 (徐州) 和 58424 (安庆) 两个站, 绘制实况 22 日 00 时~23 日 12 时 θ_e 差值的时间演变曲线图 (如图 9a)。在该个例中,

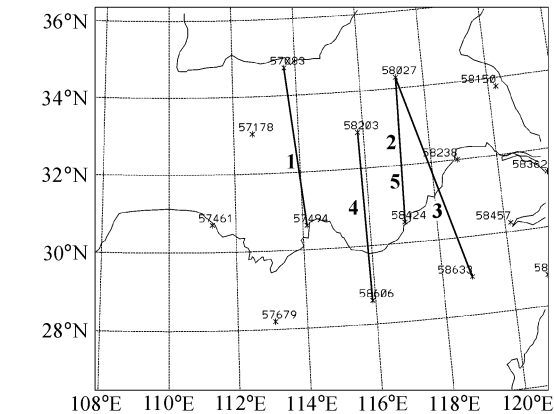


图 7 加密观测的站点位置。实线 1~5 分别表示个例 1~5 中进行检验的两个站点的连线

Fig. 7 The locations of intensive observation stations. Lines 1~5 refer the section locations of five cases.

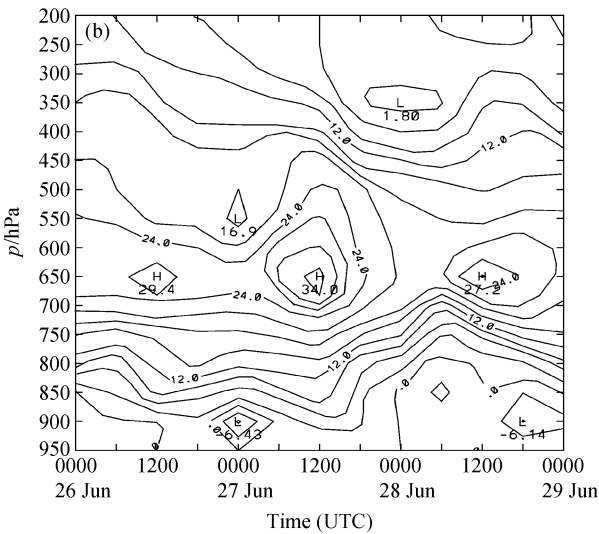
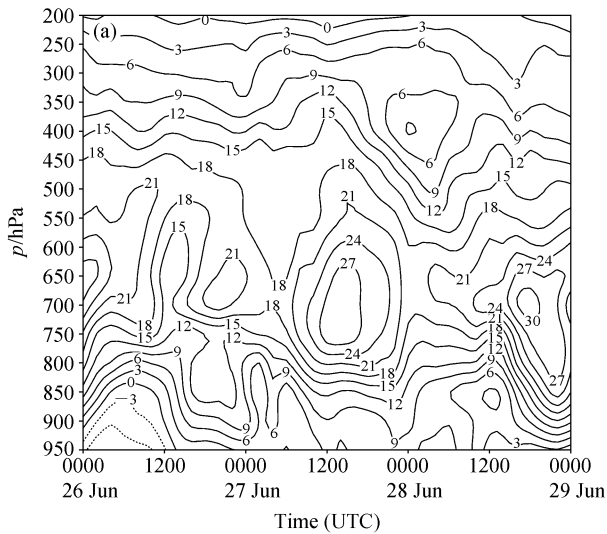


图 8 武汉站和郑州站上空相当位温差值 (单位: K) 的时间演变图: (a) 模拟; (b) 实况

Fig. 8 Time-height cross section of the difference of potential equivalent temperature (K) between Wuhan and Zhengzhou: (a) Simulation; (b) observation

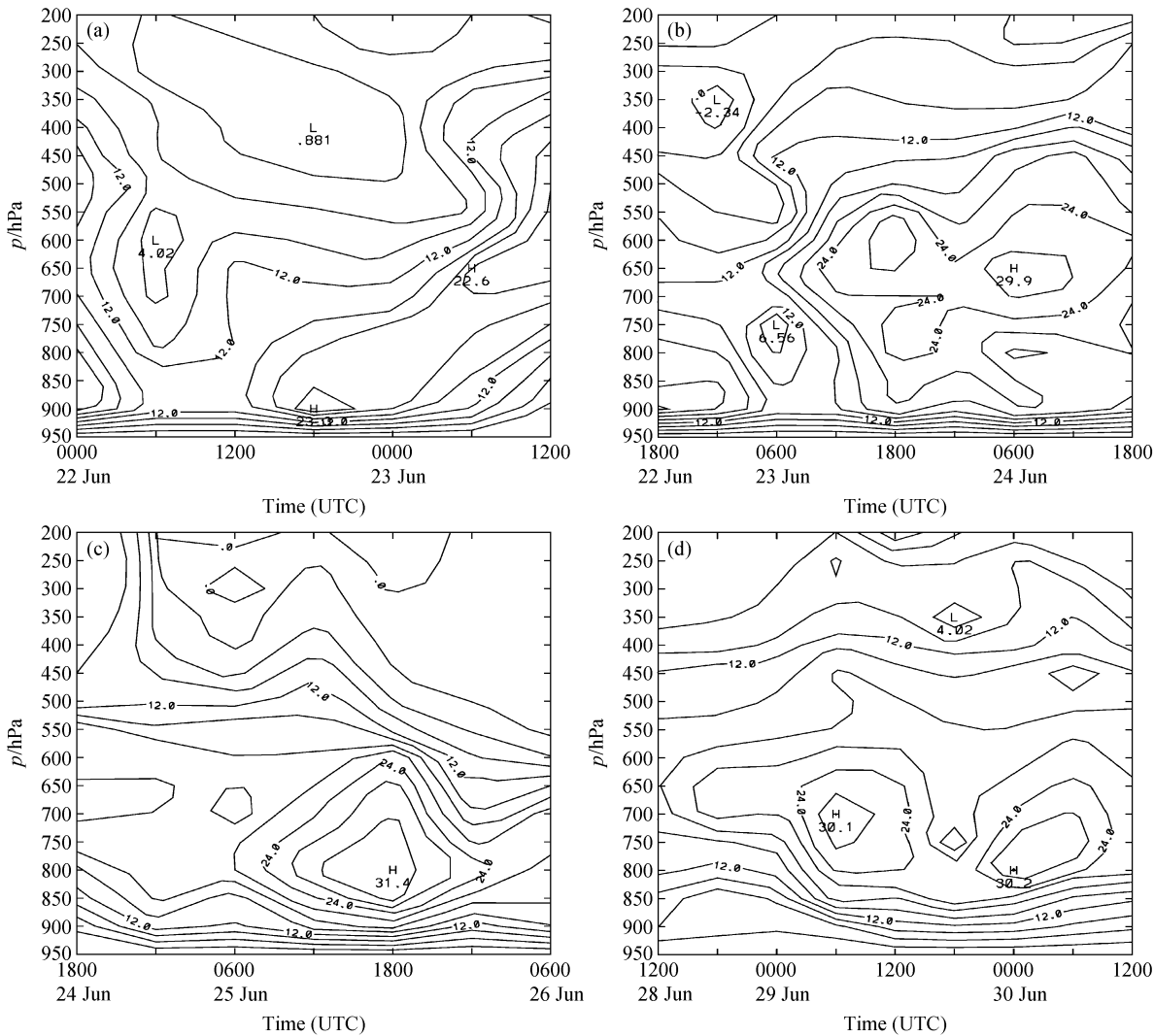
对应的锋区呈东北-西南走向，由于站点较稀疏，在锋区两侧选取站点有难度，故所取的 58027 站位偏南，落在锋区内，使得锋区整体强度比实际的弱，但还是能大致反映锋区两侧 θ_e 差值的实际变化趋势。由图 9a 可见， θ_e 梯度极大值出现在 22 日 18 时，是在低涡发展到最强的 6 小时之前，锋区强度的峰值明显比低涡强度峰值出现早。

以上两个是西南涡的情况，下述三个个例为局地涡。

个例三 (22vor2)：综合实况资料表明该低涡在 24 日 06 时~24 日 08 时发展到最强。选取连线 (如图 7 线条 3)，所选站点为 58027 (徐州) 和 58633 (金华)，绘制 22 日 18 时~24 日 18 时 θ_e 差

值的时间演变曲线 (图 9b)。由图 9b 可见实况锋区最强出现在 24 日 06 时，与实际低涡发展到最强 (24 日 06 时~24 日 08 时) 的时刻是基本一致的，超前现象不明显。

个例四 (22vor3)：由于该低涡在模拟过程中出现 3 次加强，其中第 3 次低涡强度最强，因此着重研究第 3 次加强过程。综合实况资料表明该低涡的第三次加强发生在 25 日 21 时~26 日 00 时。选取连线 (图 7 线条 4)，所选站点为 58606 (南昌) 和 58203 (阜阳)，绘制 24 日 18 时~26 日 06 时 θ_e 差值的时间演变图 (如图 9c)。由图 9c 可见，实况 θ_e 大值中心出现在 25 日 18 时，锋区最强比低涡最强略早，超前 3 小时左右。



个例五 (26vor2): 实况该低涡在 29 日 13 时~29 日 14 时 (49 mm/h) 和 29 日 20 时~30 日 00 时 (92 mm/h) 有强烈发展。选取连线 (图 7 线条 5), 站点为 58027 (徐州) 和 58424 (安庆), 绘制 28 日 12 时~30 日 12 时 θ_e 差值的时间演变曲线 (图 9d)。由 9d 图可见, 实况两站间 θ_e 差值有两个极值, 在 29 日 06 时和 30 日 00 时均出现大值中心。前一次低涡加强时, 锋强极值的出现略有超前; 后一次低涡加强时, 锋强极值与涡强极值基本同时出现。

5 小结和讨论

利用中尺度模式 MM5 对 1999 年 6 月下旬持续性梅雨锋降水过程的模拟, 对梅雨锋沿锋面方向结构特征及其与涡旋扰动变化联系进行研究, 发现梅雨锋作为中低层的湿斜压锋, 伴随中低层涡旋扰动的发展, 锋生与低涡扰动关系密切。这些特征在模拟中有很好的反映, 并且与加密的实况观测资料的诊断分析结果一致。通过研究, 得到以下一些认识:

(1) 梅雨锋主要表现为中层锋面, 以湿度对比为主, 强度比边界层锋强。中层锋面的位置比低涡的涡度中心高, 低涡沿中层锋面南缘移动, 不穿越锋面。

(2) 中层锋强的演变对两类低涡 (西南涡和局地涡) 发展的影响程度不同。对于发展过程中东移明显的西南涡, 低涡和梅雨锋强度的加强并不是同时的, 锋强的加强比低涡提早 6 小时以上。对于长江中游局地生成发展的局地涡, 锋面最强与低涡最强出现的时间比较接近, 锋面最强出现略有超前。因此, 研究梅雨锋中层锋生对预报锋上两类低涡暴雨的发展有指示作用。

(3) 中层锋面发展最强的位置与低涡发展最强的位置在经度上比较接近, 两者在东西方向上基本重合。因此, 低涡暴雨扰动加强发展区的北侧正是前期持续锋生所在, 即低涡发展前期, 在其东侧未来低涡发展最强地区的北侧, 中层梅雨锋持续加强, 并且这条锋面加强带在东西方向上基本不发生位移; 当低涡移经该地时, 低涡强度最强, 随后低涡东移并且强度减弱, 锋面大值带也减弱并随低涡向东传播。此特征对预测低涡发展有指示作用: 当中层锋强在某地持续维持大值, 它的西侧又有低涡发展东移, 则该地就是未来低涡强度发展到最强的

位置, 低涡移经该地后强度减弱。

由于数值模拟本身的局限性和不完善性, 尽管模拟结果可以部分弥补现有观测的不足, 并给我们一些有意义的启示, 但对模拟结果仍需慎重对待, 有待今后新观测事实的进一步检验验证。

参考文献 (References)

- [1] 胡伯威, 彭广. 暖切变型江淮梅雨锋结构及其形成和维持机制. 大气科学, 1996, **20** (4): 463~472
Hu Bowei, Peng Guang. The structure of the warm shear-line type Jianghuai Meiyu front and the mechanism of its formation and maintenance. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20** (4): 463~472
- [2] 陆汉城, 吕梅. 梅雨锋及锋上气旋发展的副热带特征. 暴雨·灾害, 1997, **26** (10): 42~49
Lu Hancheng, Lü Mei. Subtropical character of Meiyu front and evolution of cyclone in it. *Storm and Damage* (in Chinese), 1997, **26** (10): 42~49
- [3] 高坤, 徐亚梅. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究. 大气科学, 2001, **25** (6): 740~756
Gao Kun, Xu Yamei. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22 - 30 June 1999. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (6): 740~756
- [4] 柳俊杰, 丁一汇, 何金海. 一次典型梅雨锋锋面结构分析. 气象学报, 2003, **61** (3): 291~303
Liu Junjie, Ding Yihui, He Jinhai. The structure analysis of a typical Meiyu front. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (3): 291~303
- [5] 陈丽芳, 高坤. 梅雨锋结构的数值模拟. 气象学报, 2006, **64** (2): 164~179
Chen Lifang, Gao Kun. The simulation of the uneven characteristics of front structure. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (2): 164~179
- [6] 孙建华, 周海光, 赵思雄. 2003 年 7 月 4~5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析. 大气科学, 2006, **30** (6): 1104~1118
Sun Jianhua, Zhou Haiguang, Zhao Sixiong. An observational study of mesoscale convective systems producing severe heavy rainfall in the Huaihe River basin during 3 - 4 July 2003. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1104~1118
- [7] 李子芳, 葛良玉. 梅雨锋空间结构及其雨成锋的演变. 南京气象学院学报, 1995, **18** (4): 588~592
Li Zifang, Ge Liangyu. Spatial structure of Meiyu front and evolution of related precipitation-caused front. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1995, **18**

- (4): 588~592
- [8] 孙淑清, 杜长萱. 梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征. 应用气象学报, 1996, **7** (2): 153~159
Sun Shuqing, Du Changxuan. The maintenance of Mei-yu front and development associated disturbance. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, **7** (2): 153~159
- [9] 胡伯威, 潘鄂芬, 顾中华. 梅雨锋上暴雨云团的个例分析. 应用气象学报, 1992, **3** (3): 42~50
Hu Bowei, Pan Efen, Gu Zhonghua. Analysis of heavy storm cloud cluster along Meiyu front. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1992, **3** (3): 42~50
- [10] 叶惠明, 方宗义, 朱小祥, 等. 1991 年江淮流域持续暴雨的大范围平均云量特征. 应用气象学报, 1994, **5** (3): 380~384
Ye Huiming, Fang Zongyi, Zhu Xiaoxiang, et al. The characteristics of the large scale mean cloudiness of continuous heavy rain over Changjiang and Huaihe River basin in 1991. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **5** (3): 380~384
- [11] Lau K-M, Wu H-T, Yang S. Hydrologic processes associated with the first transition of the Asian summer monsoon: A pilot satellite study. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79** (9): 1871~1882
- [12] 吕梅, 周毅. 梅雨锋上气旋发展的反演诊断. 暴雨. 灾害, 2000, **20** (10): 35~47
Lü Mei, Zhou Yi. Invertibility diagnostic about cyclogenesis evolution in Meiyu front. *Storm and Damage* (in Chinese), 2000, **20** (10): 35~47
- [13] 陈丽芳, 高坤, 徐亚梅. 梅雨锋演变与低涡发展的联系. 浙江大学学报(理学版), 2004, **31** (1): 103~109
Chen Lifang, Gao Kun, Xu Yamei. Relationship between the evolvement of Meiyu front and the vortex along it. *Journal of Zhejiang University* (Science edition) (in Chinese), 2004, **31** (1): 103~109
- [14] 陈丽芳, 邬惠峰. 长江中下游中- β 尺度云雨团活动规律和环境条件分析. 浙江大学学报(理学版), 2004, **31** (9): 589~600
Chen Lifang, Wu Huifeng. Analysis of act rule and environmental condition about the meso- β cloud-rain clusters at the middle reaches of Yangtze River. *Journal of Zhejiang University* (Science edition) (in Chinese), 2004, **31** (9): 589~600
- [15] 斯公望. 东亚梅雨锋暴雨研究进展. 地球科学进展, 1994, **9** (2): 11~17
Si Gongwang. Advances in studies of the heavy rainfall associated with the Mei-yu front over East Asia. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 1994, **9** (2): 11~17
- [16] 励申申, 寿绍文, 潘宁. 1991 年梅雨锋暴雨与锋生环流的诊断分析. 南京气象学院学报, 1996, **19** (3): 364~369
Li Shenshen, Shou Shaowen, Pan Ning. Diagnosis of rain-storm and frontogenesis circulation near Meiyu front for July 1991. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 1996, **19** (3): 364~369
- [17] 程麟生, 冯伍虎. “987” 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
Cheng Linsheng, Feng Wuhu. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (4): 465~478