

南海中层气旋的结构和演变 特征分析以及数值实验*

吴静波 李崇银

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 针对 1980~1996 年间发生在南海地区的两类中层气旋 (MTC) 典型个例分别进行合成分析, 研究了它们的结构特点。研究发现, 西风扰动类 MTC 在强度上要强于东风扰动类 MTC; 而东风扰动类在垂直三维结构上随高度向西南方向倾斜的程度远远大于西风扰动类, 但它们都是一种冷心结构并且随高度向西南方向倾斜的系统。两类中层气旋的涡度、风速都在中层有最大值, 对流层中层为辐合区, 300 hPa 以上为补偿辐散区, 垂直上升运动在 400 hPa 达到最大。分析各自的演变过程, 发现在 MTC 的发展过程中, 西风扰动类 MTC 基本处于准静止状态略有西移, 而东风扰动类 MTC 由于其发展过程的独特性, 往往向西北方向移动并且移速较大。东风扰动类 MTC 所在的位置较西风扰动类 MTC 偏高, 这是由于夏季南海地区处于西南季风控制下, 东风气流所在位置偏高所致。我们还发现西风扰动类 MTC 西边的西风气流与 MTC 发展过程相对应有一个风速加大、维持和减弱的过程; 东风扰动类 MTC 东面的东风气流也有类似过程。同时, 与两类 MTC 相对应的代表副高强度的东风气流随 MTC 发展的演变表明, 当有西风扰动类 MTC 时, 副高有减弱的征兆, 而有东风扰动类 MTC 时, 副高并未减弱, 反而东风有所加强。对 1998 年个例进行数值实验表明: MTC 系统的对流加热在 500 hPa 达到最大, 且对流加热对 MTC 的发展具有很重要的作用, 对流加热越弱, 系统发展越弱。

关键词: 中层气旋; 合成分析

1 引言

中层气旋 (Mid-Tropospheric Cyclones, MTC) 是发生在对流层中层 (700~500 hPa) 的天气系统, 它们往往在对流层中层存在气旋性闭合环流, 而在地面和对流层上层其环流都不明显^[1]。中层气旋的水平尺度一般为 600~1 000 km, 生命史为数日, 系统的移动比较缓慢。中层气旋也是夏季热带大气环流的一个重要组成部分, 尤其是亚洲夏季风区重要的天气系统之一, 也是影响中国华南降水的一个重要天气系统。

在 60~80 年代对中层气旋曾有过一些研究。这些研究提到的中层气旋主要集中在 3 个地方: 第 1 个是由 Simpson 最早发现的在东北太平洋地区活动, 被称为副热带气旋^[2]; 第 2 个位于阿拉伯海东北部、孟加拉湾西北部以及中南半岛北部, Krishnamurti 等^[3]在对这些地区中层气旋的研究中指出, 扰动最大强度出现在 500 hPa 上, 在中层气旋的上方是一个暖距平区, 下方是一个冷距平区^[4]; 第 3 个是中国学者发现的在中国南

海及其附近地区活动,它不仅发生在副热带地区,而且有相当一部分是形成于热带对流层中层^[5~7]。

南亚中层气旋和南海中层气旋虽然都是在亚洲季风区,但两者相比也存在一些差别,具体表现在:南海 MTC 比南亚 MTC 水平范围小,生命期短;从 MTC 的形成过程来看,南亚 MTC 一般生成于季风槽内,而南海 MTC 则生成于副高西南部。无论是南亚的 MTC 还是南海的 MTC 都与季风低压有明显差别, MTC 的强涡旋在对流层中层,而季风低压的强涡旋在对流层低层。

本文首先用最新 NECP 资料对南海 MTC 的结构特征作更详细的分析,并对 MTC 的演变过程进行一些讨论,然后用数值模式对发生在 1998 年夏季的中层气旋进行模拟研究。

2 南海中层气旋的结构特征

从 1980 年到 1996 年 17 年 5~9 月份的月平均各层环流图(图略)上,我们看到 5 月份在对流层中层孟加拉湾有一闭合环流,而本文所讨论的南海地区此时还处于副热带高压的控制之下。到 6~8 月份,副高中心已北跳,南海地区对流层表现为有利于中层气旋生成的槽区或气旋性闭合环流区。同时,我们看到在孟加拉湾北部的气旋性闭合环流区仍然很强大,其环流比南海地区的气旋性环流强。9 月份,南海地区就没有气旋性环流的存在,而孟加拉湾仍有气旋性环流的存在,一般存在于平均的气旋性(低压)环流区,也就是气旋经常生成和活动的地区。因此,从这些平均图上,我们可以看出南海地区中层气旋的多发季节是 6~8 月;它的发生频率没有孟加拉湾的高,强度也比孟加拉湾的弱。

过去,梁必骥的天气分析将南海中层气旋的形成分为 4 类,即热带辐合带类、切断低涡类、东风扰动类和季风扰动类^[8]。但经仔细分析发现,所谓辐合带类包含有两类不同情况,且有的与季风扰动类相似。因此,根据我们分析所看到的南海中层气旋的形成,可简单地分为西风扰动和东风扰动两类,而两类 MTC 的发生比例约为 5:3,西风扰动类 MTC 略为偏多。

为了进一步揭露南海中层气旋的结构特征,我们分别对西风扰动类和东风扰动类中层气旋进行合成分析。对于西风扰动类有 10 个例子,对于东风扰动类有 6 个例子。各要素合成是在以气旋中心点的 30 个经纬度见方区域。从总体上看,这两类 MTC 的结构特点基本相似,因为同为 MTC,但也仍有一些小差异。

2.1 合成流场

西风扰动类 MTC 闭合环流主要出现在对流层中层 700~400 hPa,东风扰动类 MTC 则出现在 600~500 hPa(图 1),由此看来,东风扰动类 MTC 在垂直尺度上要小于西风扰动类 MTC。另外,东风扰动类在 500 hPa 可以明显地看到东风气流的大量卷入,而西风扰动类完全包裹在西风气流里。两类 MTC 一致的地方是在低层 1000~850 hPa 是西南气流,并且有波动小槽的出现,这是中层 MTC 发展在对流层低层的反映。在 300 hPa 流场上表现为南亚高压及其东南部的偏东气流;在 100 hPa 上整个合成范围内的流场完全由东风气流控制(图略)。

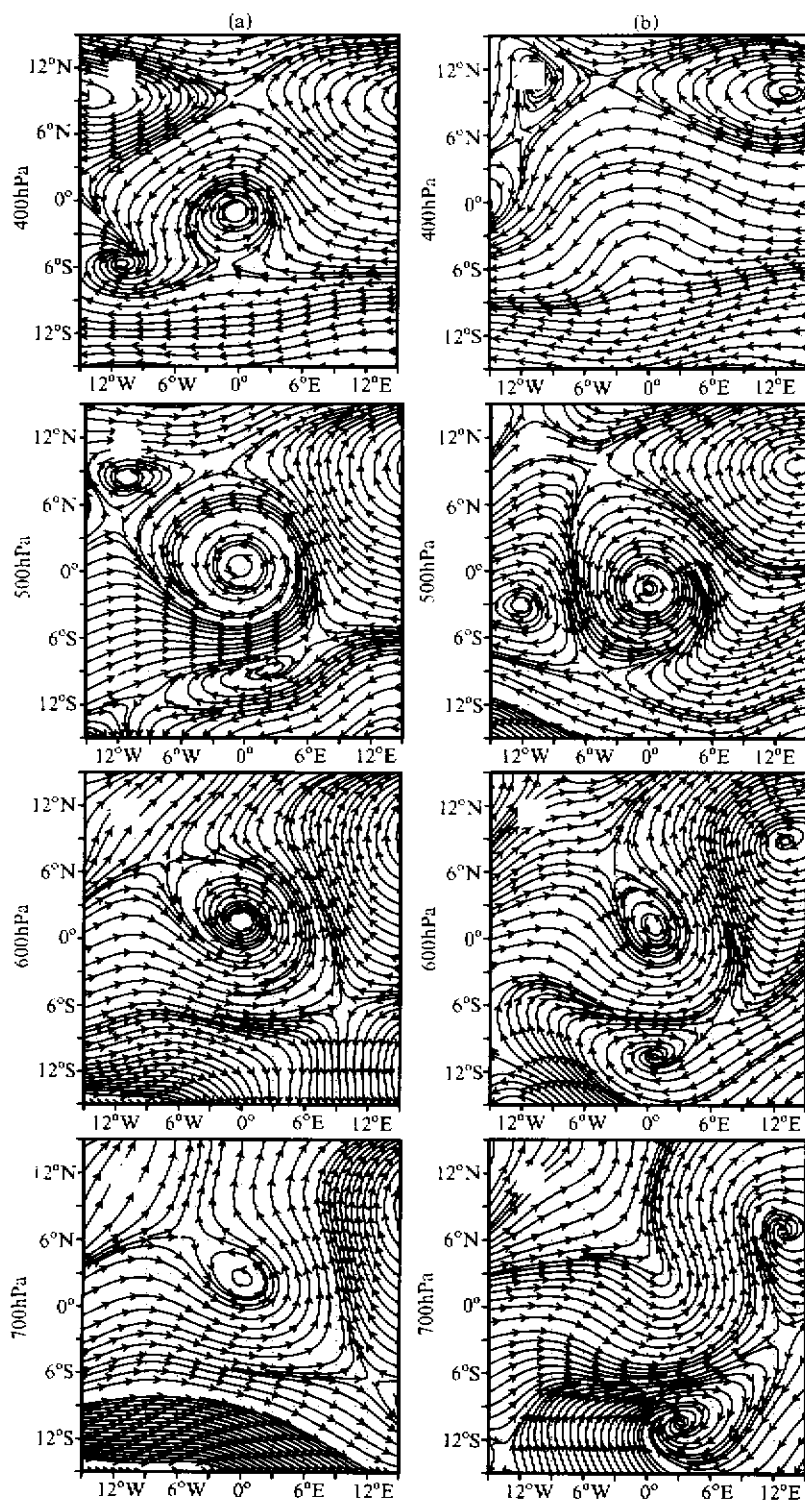


图1 西风扰动类(a)和东风扰动类(b)MTC流场图

2.2 合成涡度和散度场

从合成涡度场的纬向、经向剖面图上看到, 两类 MTC 随高度均向西南倾斜, 但是东风扰动类 MTC 的倾斜要比西风扰动类明显得多。不过, 它们的涡度都在 600~500 hPa 之间达到最大, 约为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 2a、b)。图 2c 是中层 (700、600 和 500 hPa) 的平均涡度分布, 与流场匹配的最大涡度中心值也为 $2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

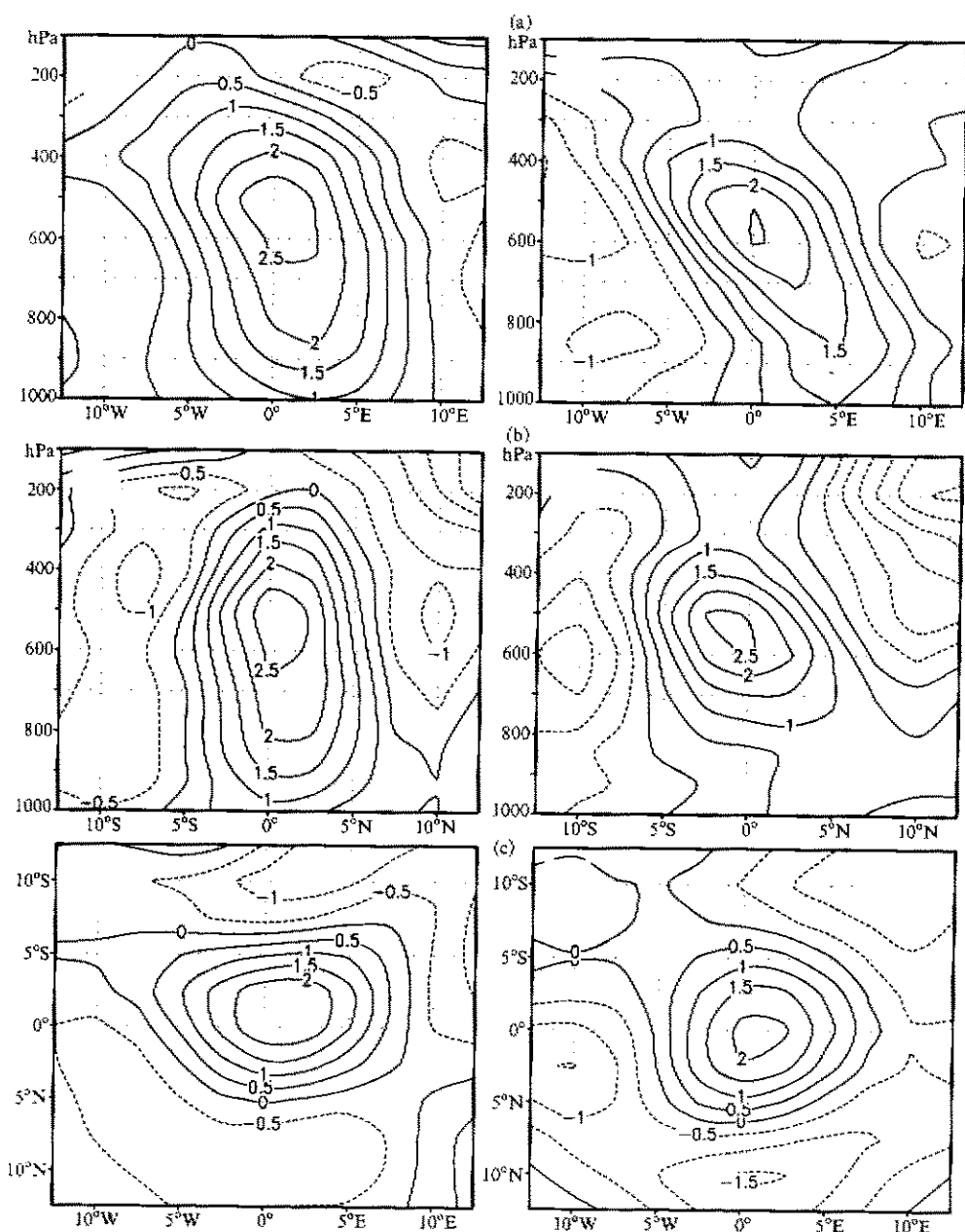


图2 西风扰动类(左)和东风扰动类(右)MTC的合成涡度($\times 10^{-5}$)纬向垂直剖面图(a);
合成涡度($\times 10^{-5}$)经向垂直剖面图(b)和中层平均涡度($\times 10^{-5}$)分布图(c)

散度的纬向剖面图表明, 300 hPa 以下是辐合区, 300 hPa 以上是补偿辐散区, 经向剖面图上则以 400 hPa 分界 (图略)。辐合、辐散都比较弱, 量级约为 10^{-6} s^{-1} 。

2.3 合成垂直速度场

合成的垂直运动场上, 对于东风扰动类, 在气旋中心的西侧是上升运动中心; 西风扰动类较东风扰动类有较强上升运动且距气旋中心较远 (图 3a); 在经向剖面图上 (图 3b), 西风扰动类的上升运动中心位于气旋中心, 而东风扰动类位于气旋中心的南侧。因此, 对于东风扰动类 MTC, 最大上升运动区在气旋中心的西南侧 400 hPa 层; 对于西风扰动类 MTC, 最大上升运动区在气旋中心的西侧 350 hPa 层。两类 MTC 在 850 hPa 以下的低层都为下沉运动区, 垂直上升运动在 500~300 hPa 的大值中心强度约 0.15 Pa/s 。

2.4 合成 u 风场和 v 风场

图 4 是风场的垂直剖面图。从图上我们可以看到系统在中层 800~500 hPa 的纬向风速是最大的, 约 $6\sim 8 \text{ m/s}$, 南风的最大值位于 600~500 hPa, 大约为 $4\sim 6 \text{ m/s}$ (图 4b); 西风扰动类强于东风扰动类 2 m/s 左右。西风分量所处位置对于两类 MTC 略有不同, 西风扰动类的西风分量最大值位置要偏低, 位于 900~700 hPa; 而东风扰动类位于 700~600 hPa (图 4a)。同时, 从图上我们还可以看到, 气旋轴是偏西偏南的, 东风扰动类的倾斜程度远远大于西风扰动类, 这与涡度剖面图是一致的, 也再一次说明南海地区的 MTC 随高度是向西南方向倾斜的, 尤其是东风扰动类。

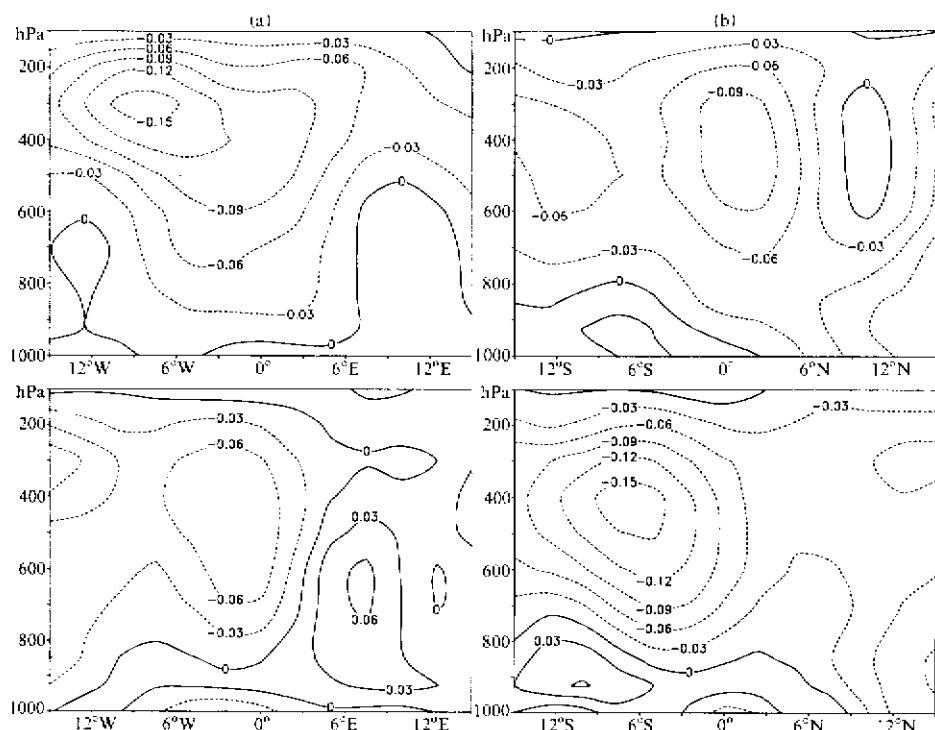


图 3 西风扰动类 (上) 和东风扰动类 (下) MTC 的合成垂直速度的纬向垂直剖面图 (a) 和经向垂直剖面图 (b)

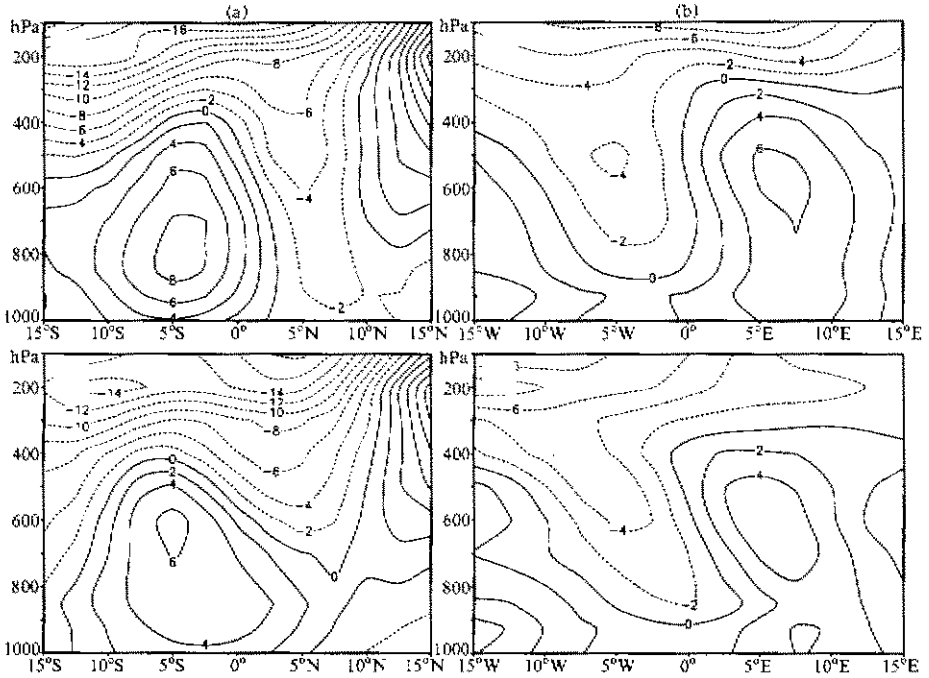


图4 西风扰动类(上)和东风扰动类(下)MTC的合成 u 风场的
经向垂直剖面图(a)和合成 v 风场的纬向垂直剖面图(b)

2.5 合成温度(偏差)

这里的温度偏差是指温度与各层以MTC中心为中心点纬向 ± 20 度范围的平均温度的偏差,其纬向剖面(图5a)表明,MTC是一种冷心结构,在600~500 hPa有一个冷中心,500 hPa以上转为暖心或暖区;在经向剖面(图5b)上也有同样的表现形式。温度偏差的最大值约为 0.6°C 。500 hPa以上暖区的存在,可能是由于潜热的释放。因为比较图3a与图5a发现暖区与垂直上升运动的最大区域相对应。由于南海地区MTC比较弱,因此它的温度偏差也远小于阿拉伯海及孟加拉湾MTC。个例分析表明,从时间演变上看,往往很难看出有明显冷、暖中心或冷、暖区的演变过程。由图5a、b的比较可以看到,两类MTC的温度场均有随高度西倾的特征;东风扰动类MTC在400 hPa层有更强的温度正偏差,表明有更强的潜热释放。

3 南海中层气旋的演变

上面我们已经讨论了南海中层气旋的结构特征。下面将分别从两类中层气旋中取两个例子来讨论各自的不同演变过程。它们的不同主要是流场在发展过程中的演变情况不一样,同时环流背景在MTC的发生发展过程中也有所不同。

3.1 一个西风扰动类MTC的演变

我们首先分析一下1980年6月15~21日的例子。这个MTC的发展、维持时间比较长,生命史7天。发展成熟时最大闭合环流直径达到15个经距。这个MTC生成于

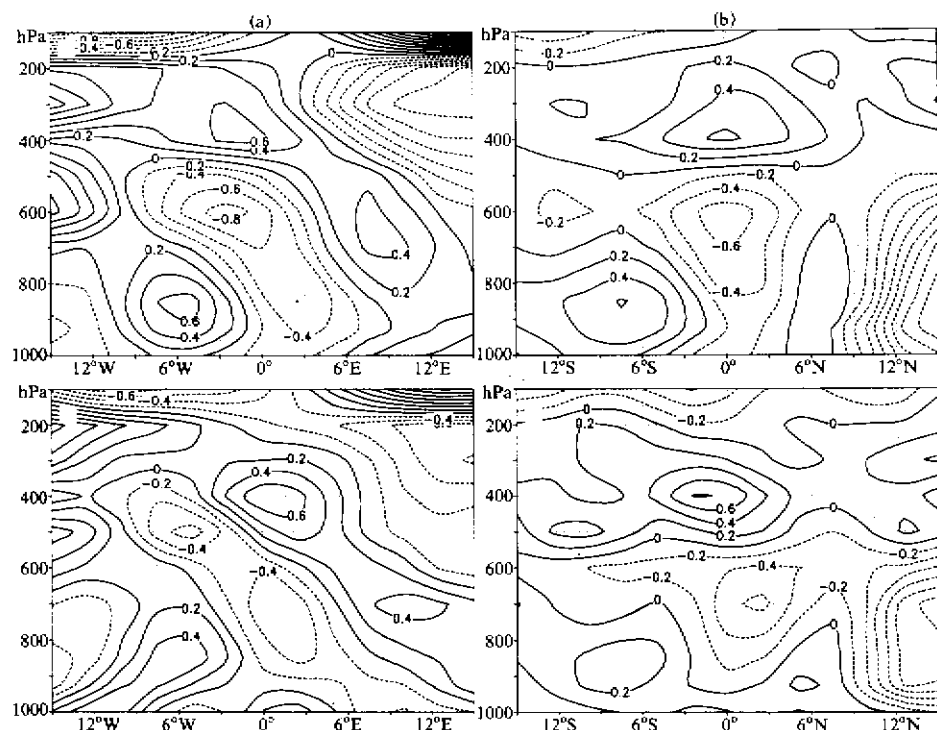


图5 西风扰动类(上)和东风扰动类(下)MTC的合成温度(偏差)的纬度-高度剖面图(a)和经度-高度剖面图(b)

中南半岛东南角上, 是小扰动叠置在西南季风气流上产生和发展起来的。

3.1.1 流场和风场的演变

6月14日, 在中印半岛北部500 hPa有明显的气流辐合, 但南部有气旋性小扰动存在。15日, 在700~500 hPa西风气流上存在一个小扰动, 主要表现在500 hPa流场图上有闭合环流出现。16日, 500 hPa闭合环流加强, 而且600 hPa也出现闭合环流, 700 hPa槽加深。17日, 系统继续发展, 环流继续加强, 范围扩大, 空间尺度由刚发展起来时的5~6个经距发展到15个经距, 700 hPa也出现闭合环流, 1000 hPa受中层系统影响, 也有小槽存在。18~19日, 系统强度和空间尺度都处于维持状态。到了20日, 系统在强度和尺度上明显减弱。21日, 此系统的弱环流东移到南海海面上, 22日彻底消失。在整个MTC的发展过程中, 除了20、21日系统减弱将要消失时略有东移之外, 系统基本处于准静止状态。

3.1.2 涡度的演变

从1980年6月14~21日500 hPa涡度水平分布图(图6)上, 我们看到这个西风扰动类MTC的涡度演变存在这样一些特点: 从14日开始发展到21日MTC减弱分裂, 500 hPa的涡度中心有一个明显西移、扩大加强和减弱的过程。14日在112.5°E附近有微弱正涡度存在, 到了19日涡度发展到了最强大的时候, 涡度中心挪到了100°E附近, 涡度最大中心区由只占一个经纬度达到占七八个经纬度, 涡度最大值由14日的1个单位加强为4个单位, 到21日涡度中心减弱西移至孟加拉湾东岸, 涡度中心处于

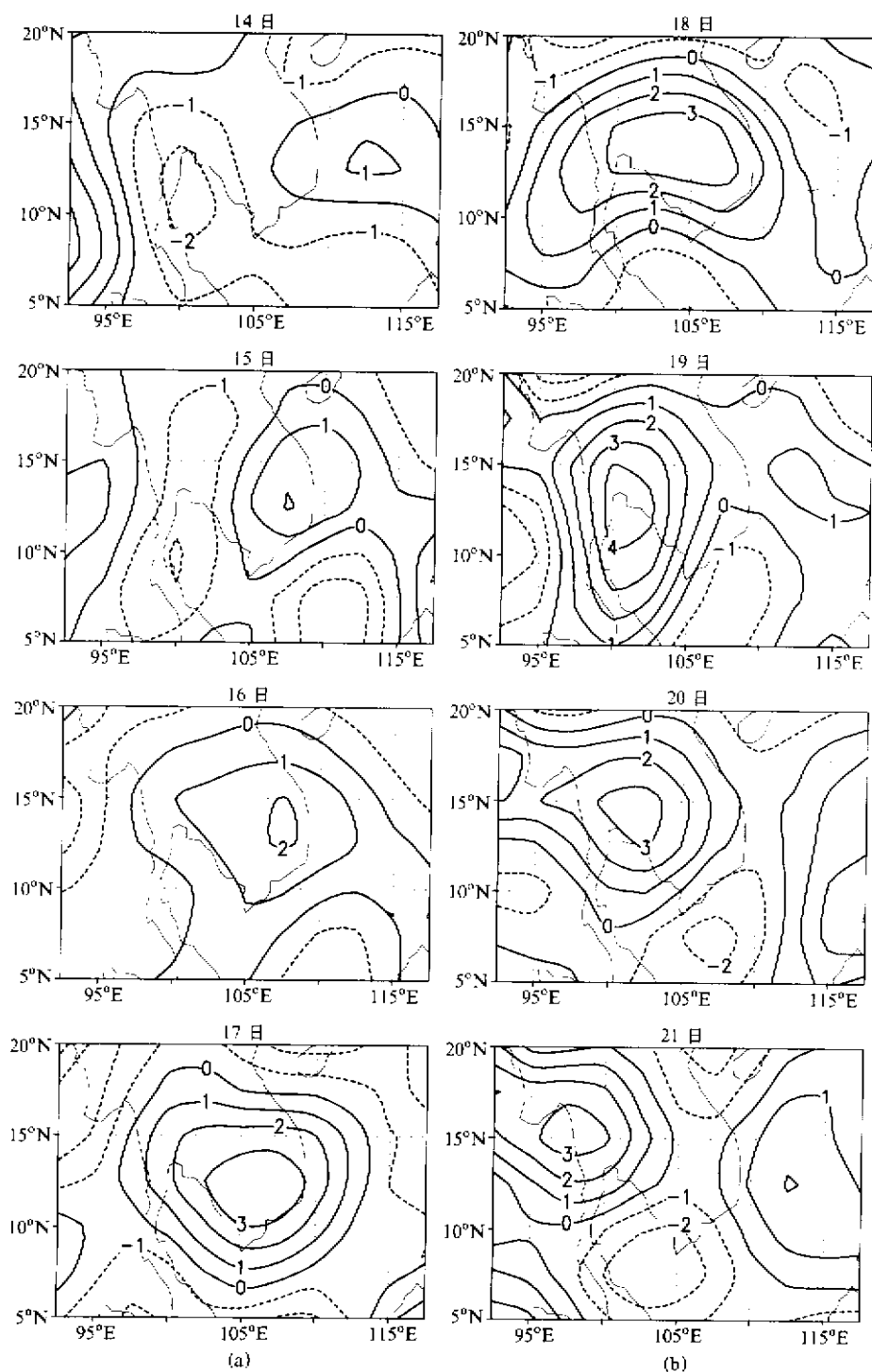


图 6 1980 年 6 月 14~21 日西风扰动类 MTC 个例 500 hPa 涡度 ($\times 10^{-5}$) 的演变

100°E 附近。在 500 hPa 涡度的演变与流场的演变 (图 7a) 是基本一致的。只是在 14 日流场图上尚未有闭合环流的存在而在涡度图上已显示有一正涡度区; 而在 21 日

MTC 的闭合环流已不存在, 我们可以认为 MTC 后来是消失了, 但同时也加强了孟加拉湾的气旋系统, 也可以认为它是与孟加拉湾的气旋系统合并了。比较 500 hPa 涡度与流场变化, 发现它们的演变有这样的特征: 刚开始时涡度中心相对于流场中心稍偏东、偏北, 发展到后来则偏西、偏北。从涡度的纬向垂直剖面图上, 我们看到自 15 日开始到 MTC 消失, 涡度最大中心也有一个西移、垂直扩展加强和减弱的过程, 在垂直方向, 涡度的演变与流场的演变也一致 (图略)。15 日在 500 hPa 有最大的涡度中心, 随着 MTC 的发展, 最大涡度中心也逐渐向上、向下扩展加强。同时, 从这个涡度剖面图上也可以看出涡度的垂直结构是随高度西倾的, 并且随着 MTC 的发展, 系统的西倾性逐渐变得明显了。19 日涡度发展到最强, 中心达到最大值 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 同时我们看到系统也强烈西倾, 发展到最为成熟时期, 于 21 日西移合并消失。从散度的高度-时间剖面图、时间-经度剖面图、涡度的高度-时间剖面图以及 MTC 所在位置的 TBB 分布图 (图 7b) 与 500 hPa 的流场演变图, 我们认为对流层低层的辐合引起对流活动 (14~15 日), 由此产生的非绝热加热使得在对流层中层出现闭合环流, 形成 MTC (15~16 日); 然后辐合运动的进一步加强和维持使得对流活动也进一步加强, MTC 处于发展成熟期 (17~19 日): 整层的辐合、对流层中层的强涡度中心、强大的气旋性闭合环流场。从散度随时间演变图上也看出, 系统有西传的过程。在对流层低层, 散度在整个 MTC 发展过程中一直是辐合场, 并且 18~19 日达到最大; 而在对流层中层, 散度的值在 MTC 发生和消亡的时候是辐散场, 在 MTC 发展成熟期是辐合场。比较 MTC 所在位置的 TBB 分布图 (图 7b) 与 500 hPa 的流场演变图, 我们认为, MTC 的生成发展与对流加热有着密切关系: 14 日中印半岛南端及海上有较强对流活动, 15 日的 TBB 分布说明流场的辐合引起强烈的对流活动并向北扩展, 由此产生的强对流加热作用使 15 日流场上出现闭合环流。

6 月 14~21 日 500 hPa 气旋中心附近平均的纬向风速 u 、 v 的绝对值的时间演变图 (图略) 表明, 与 MTC 的发生发展相对应, 它们都有一个明显的加强维持和减弱的过程, 从 15 日气旋生成开始, 风速便开始加强, 此后到 19 日, 风速一直处于加大、维持的趋势。到 21 日, 风速明显减小了。另外, 我们从 MTC 中心 10~15 个经距处的西风分量平均值的时间演变图 (图略) 上, 也看到一个西风明显加强维持过程, 15 日气旋刚生成时以及 18 日 MTC 发展旺盛时, 西风气流分别存在风速加大的过程, 到 21 日系统完全减弱时, 风速也随之减弱。另外, 值得一提的是, 在气旋东方 10~15 个经距处的 500 hPa 风速的演变情况, 由于它正处于副热带高压环流的西南边缘, 因此它的大小能体现副高的强弱, 这个值在 MTC 的发展、成熟、旺盛期正好是小的, 而在 MTC 减弱时风速又开始增大。这说明随着 MTC 的减弱, 西太平洋副高环流在加强和西伸。另外, 纬向风的经向垂直剖面表明 (图略), 从 14、15 日 MTC 刚发展起来时, 西风在中层就存在最大中心, 整个中下层 (400 hPa 以下) 都是西风控制区, 随着 MTC 的发展, 西风不断加强。随着西风的加强, 其极值中心逐渐降低, 15 日在 600 hPa, 20~21 日, 中心已到 800 hPa 附近。

3.1.3 垂直运动和温度偏差的演变

垂直运动在 MTC 发展各时期的分布情况跟前面合成分析时的垂直速度分布情况类似, 在 MTC 生成以及迅速发展的时候, 垂直上升运动在气旋的西侧 400~300 hPa 的

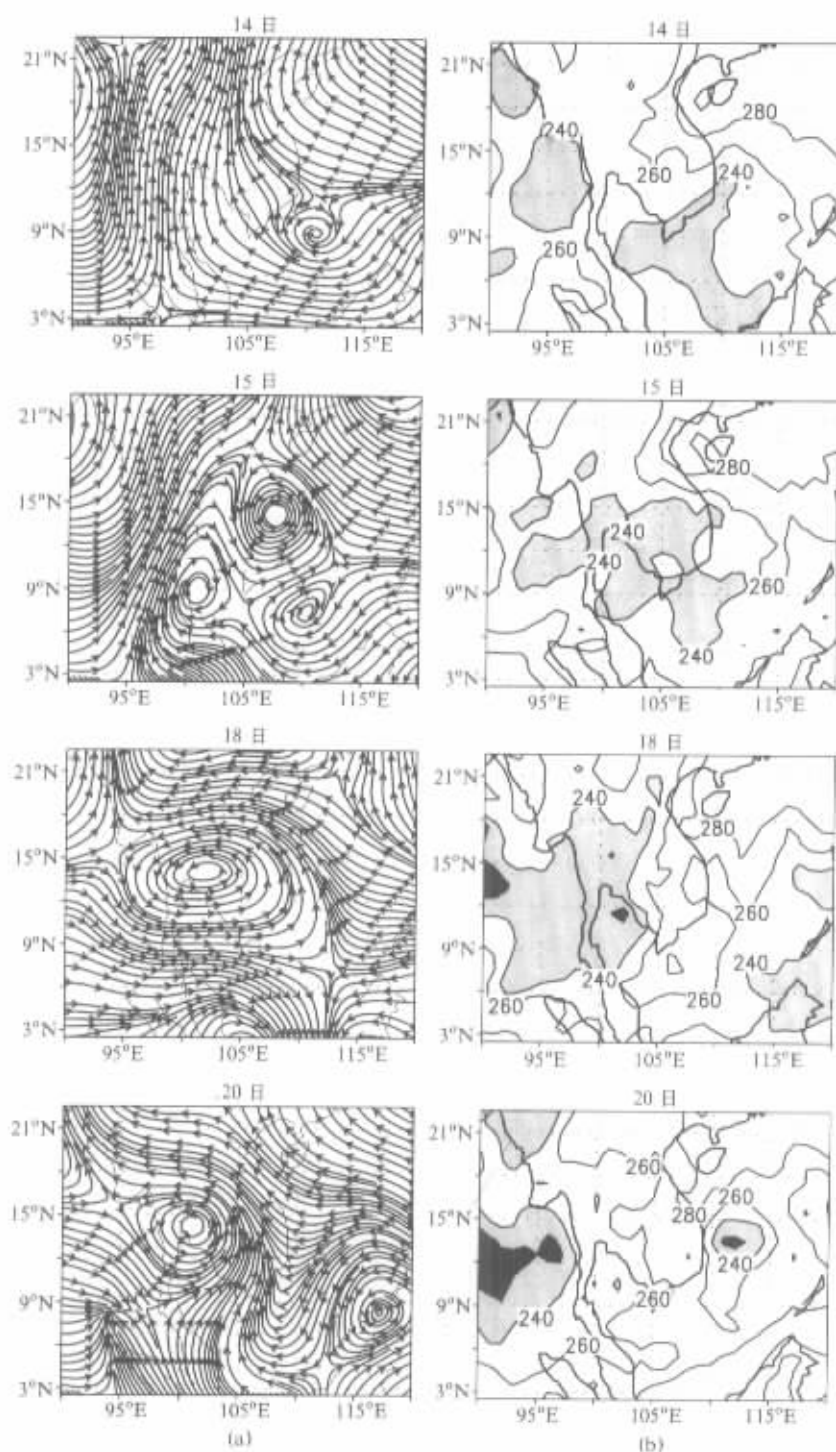


图7 1980年6月14~21日西风扰动类MTC个例500 hPa流场(a)和TBB(b)的演变

地方存在最大中心。刚发展时,在气旋西侧800 hPa以上基本上为上升运动区。随着MTC的发展,上升运动的范围有所扩大,整个对流层基本上为上升运动,只有气旋右

侧低层有微弱下沉。温度偏差并不是在整个发展过程中都是一种上冷下暖的结构, 而是有一个由中层冷心逐渐向下扩展, 然后整个中下层成为一片冷区, 同时由于对流加热, 中层的暖区也有向下扩展的过程。15~16 日 MTC 刚生成发展起来时, 在中层是一个明显的冷区, 而在低层却为明显的暖区。随着它的发展成熟, 从 17 日开始, 冷区向下扩展, 18 日, 中下层温度距平转为负值, 同时与垂直上升运动的速度增加和范围扩大过程相对应, 中层有暖区的产生和向下扩展。我们看到, 20、21 日 MTC 减弱消失时, 整个中下层已基本为暖区。500 hPa 以上转为暖区, 是因为随着气旋的发展, 上升运动引起潜热释放所致。无论是西风扰动类或是东风扰动类, 其热力结构都存在着这样一个转变过程: 开始是上冷下暖的层结不稳定结构, 由于对流加热的作用使得 MTC 生成和成熟发展起来, 但是另一方面又由于中层的强对流加热使得中层变为暖心, 热力结构转变为一种稳定层结(下冷上暖), 阻止 MTC 再进一步发展下去, 使系统逐渐消亡。对流加热在 MTC 的整个发生发展过程中, 由开始的一种正反馈转为后来的负反馈, 与 MTC 发展消亡整个过程有很好的对应关系, 这从一个侧面也说明在 MTC 的发生发展过程中, 对流加热的重要作用, 同时这也可能就是中层气旋不能发展很强的原因。

3.2 一个东风扰动类 MTC 的演变

3.2.1 流场和风的演变

这个系统是在一个热带低压西移减弱后, 由于东风气流扰动而在中层诱发生成的 MTC。从逐日流场演变图(图 8a)上, 我们能看到一个东风波动的西传过程。7 月 30 日~8 月 1 日有一个热带低压从菲律宾以东洋面移到南海海域减弱消失, 其后在 8 月 1 日南海上空有一东风波出现。8 月 2 日东风小槽发展加强, 到了 3 日小槽已西移至 105°E , 600~500 hPa 的槽强烈加深拉长, 在 600 hPa 上, 一直从 5°N 延伸到了近 25°N 。4 日, 600~500 hPa 在 (22.5°N , 100°E) 的附近形成闭合环流, 400 hPa 则仍为小槽。到了 5 日, 系统处于发展成熟阶段, 闭合环流上达 400 hPa, 又由于有西风气流的加入, 在 700 hPa 也形成了闭合环流。而在低层 1000~850 hPa 一直是西南风气流, 200 hPa 则为东风小槽。6~7 日, MTC 的中层闭合环流处于维持状态, 但是 200 hPa 东风小槽已经明显削弱, 8 日 MTC 减弱, 闭合环流仅存在于 500 hPa。到了 9 日, MTC 彻底消失。

500 hPa 扰动中心附近的东风分量平均值的演变与 MTC 的发展过程对应相当好, 在 5 日 MTC 发展到最成熟时, 东风风速也达到了最大。6~8 日随着 MTC 的减弱消失, 东风也逐渐减弱。扰动中心东面 10~15 个经距处的东风气流平均值的演变, 与西风扰动类中所讨论的一样, 它也代表了副热带高压边缘气流的大小, 也就是说代表了副高的强弱。从图上看到, 东风扰动类 MTC 与西风扰动类 MTC 不同: 8 月 3 日, 也就是槽强烈加深的那天, 东风气流值由 6.7 m/s 增加为 8.4 m/s , 而西风扰动类 MTC 个例的这个值是由 6 m/s 降到了 4 m/s 左右。这表明随着东风扰动类 MTC 的生成发展, 副高环流是加强的。

2~3 日 u 分量在中高层(700 hPa 以上)主要是东风气流, 4~5 日西风向上扩展, 5 日西风在低层强度变大与中层东风相当, 6 日西风范围进一步扩大, 到了 7 日整个中下层都被西风气流占据(图略)。从这个例子我们不难发现, 东风扰动类 MTC 由东风

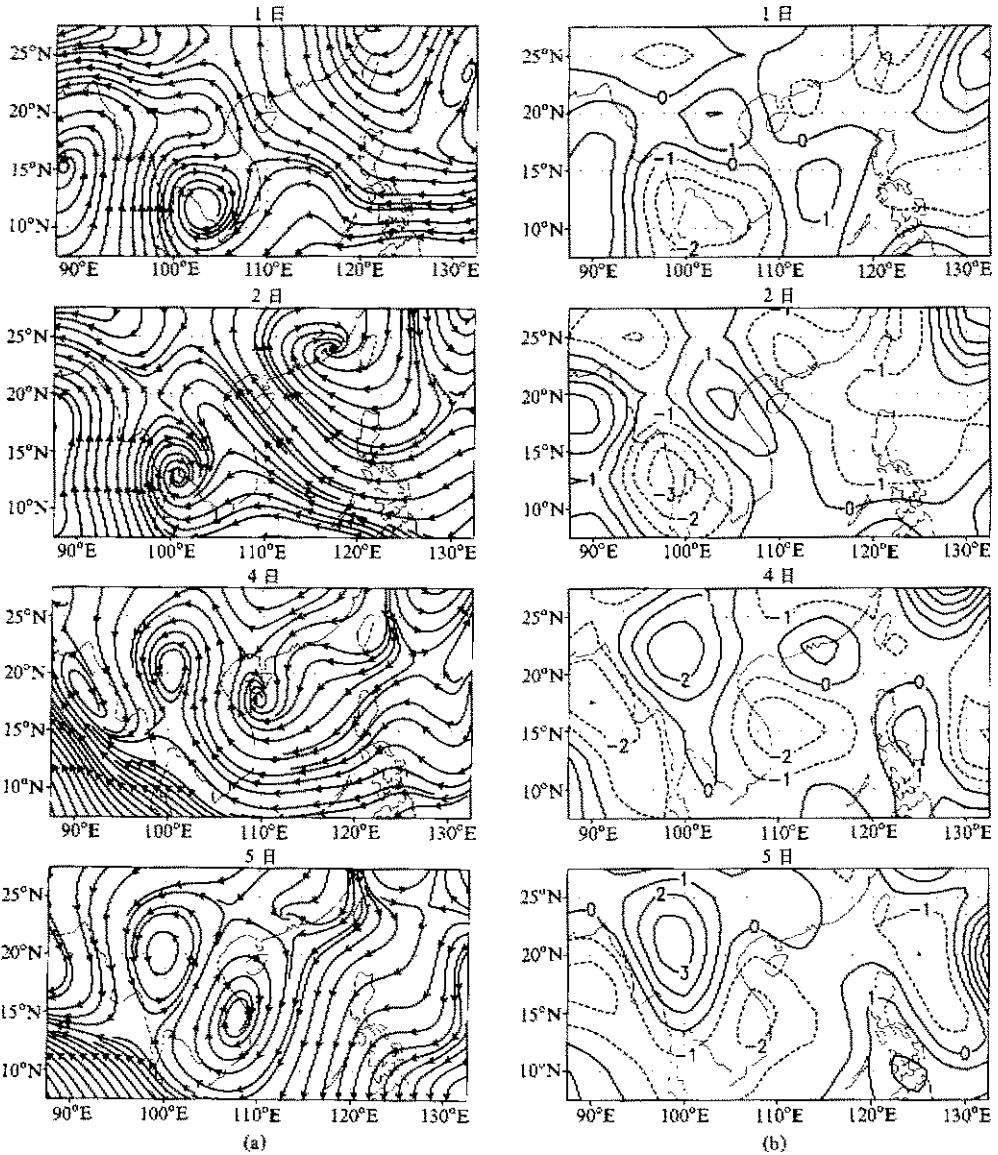


图8 1992年8月1~8日东风扰动类MTC个例500 hPa 流场 (a) 和涡度 ($\times 10^{-3}$) (b) 的演变

诱发生成中层扰动,但发展到最后往往各层都变成了西风气流扰动,图上气流的转变显示出了这个转变过程。而我们再与上一节中的西风扰动类MTC比较,不难发现它们的不同之处,西风扰动类MTC从一开始在中下层就受西风气流控制,西风的范围和强度是很大的。

3.2.2 涡度的演变

对于1992年8月1~8日这个东风扰动类MTC的例子,由500 hPa上的涡度中心区的演变(图8b),我们可以明显的看到一个MTC发生发展、加强、减弱的过程,并且还可以看到随着系统的发展,MTC是往西北方向移动的。这一点与西风扰动类有所

不同: 从上一节对西风扰动类 MTC 的个例分析, 我们知道西风扰动类 MTC 在发展过程中虽然也有西移, 但是移动幅度较少, 基本可看作处于准静止状态; 而东风扰动类 MTC 的移动有它固有的特点, 由于东风扰动类 MTC 起源于副高南缘东风气流里的小扰动, 随着系统的发展, 又往往与西南风气流相互作用, 最后发展出类似西风扰动类 MTC, 因此这类系统在整个发展过程中往往移动速度较大, 由副高南缘的东风气流移到副高西侧的西南风气流里。8 月 1 日, 在南海海域上空有一正涡度区, 然后这一涡度区逐渐扩大加强并且向西北方向移动。到了 8 月 5 日, 涡度最大值已由刚开始时的 1 个单位增加为 3 个单位, 可见这类 MTC 的发展强度要稍逊于西风扰动类。从 1~5 日 (3 日图略) 500 hPa 的涡度中心的演变与流场中心的演变, 我们清晰地看到了 MTC 的形成发展过程, 而且涡度中心与流场中心基本重合。从 500 hPa 涡度图上, 我们发现无论从强度还是范围上, 西风扰动类 MTC 都要比东风扰动类强大。从涡度纬向垂直剖面图上, 我们可以看出, 与西风扰动类相比, 东风扰动类 MTC 正涡度中心所处的位置要稍高一些。

3.2.3 温度偏差和垂直运动的演变

与西风扰动类 MTC 的演变相似, 8 月 3 日扰动刚发展起来时, 对流层中层 500 hPa 为微弱冷心, 而低层是一片暖区, 随着 MTC 的进一步发展, 4 日冷区扩大, 5 日已伸展到地面, 6~7 日冷区在下层扩展加强, 同时由于 3~5 日的垂直上升运动的加强扩大, 潜热释放也增加, 使得与 MTC 相对应位置的暖区也同时扩大下压。8 日冷区减弱, 暖区压到 600 hPa 以下。温度偏差的演变与垂直运动是相配合的, 3~4 日 MTC 刚发展起来时, 中心西面为上升区, 东面为下沉区, 5 日上升运动强度和范围都达到最大。6 日上升运动减弱转为下沉运动, 系统也在 6 日发展到最强, 7~8 日, 由于下沉运动, 系统减弱消失 (图略)。

3.2.4 散度场的演变

与垂直运动场相对应, 3~5 日在 MTC 所在区域中层 400 hPa 以下主要为辐合区以上为补偿辐散区。6~8 日随着上升运动转为下沉, 中层辐散区也转为辐合运动 (图略)。

4 数值实验

在南海季风试验期间, 1998 年 6 月 9~13 日在中印半岛东南海面上 (10°N , 110°E 附近) 有一个 MTC 发生发展的过程。我们对这一个例进行了数值模拟。模拟实验所用模式是广州热带气象研究所的有限区域模式^[9,10]。以 6 月 9 日 12 点 SCSMEX 资料为初始场进行 48 小时的预报到 11 日 12 点。图 9a、b 分别是实例分析 11 日 00 点的 500 hPa 流场形势和控制实验 36 小时的 500 hPa 预报的形势, 从图上我们看到所模拟的流场与 MTC 个例的 SCSMEX 资料分析基本符合, 只是模拟场中 MTC 的位置略偏西南。

在涡度的垂直剖面图 (图略) 上, 从预报 6 小时开始在对流层中下层都已是气旋性涡度区, 到预报 24 小时 500 hPa 涡度中心加强到 4 个单位, 30 小时时涡度中心区向下伸展到 800 hPa, 48 小时时涡度值也是 4 个单位, 并且范围仍然较大。因此从 24 小时

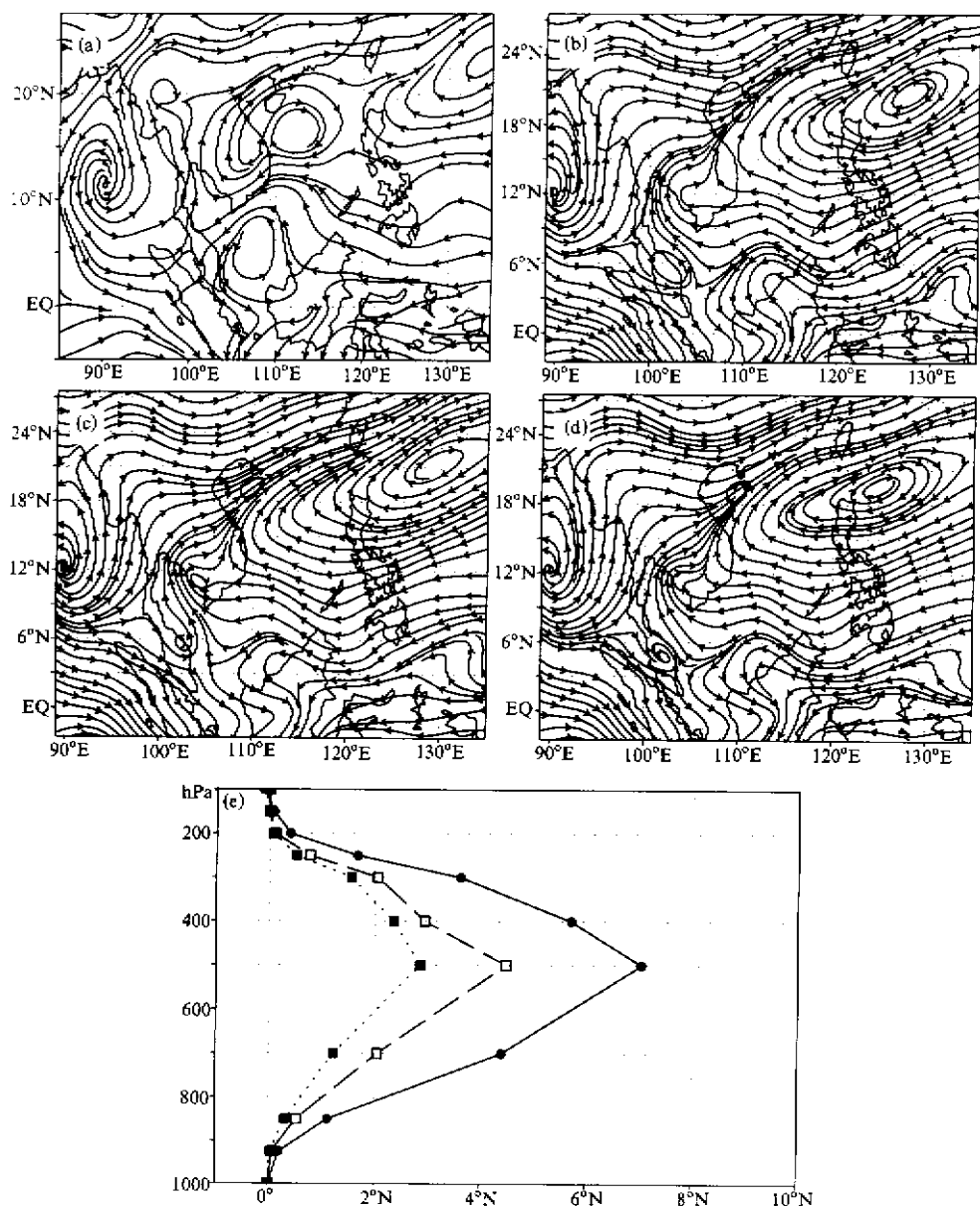


图9 对1998年6月9~13日中印半岛东南海面上(10°N, 110°E附近)MTC发生发展的过程的模拟
 (a)实例分析11日00点的500 hPa流场形势; (b)控制实验第36小时的500 hPa流场形势;
 (c)第1种加热率强度减弱情况第36小时的500 hPa流场形势; (d)第2种加热率强度减弱情况
 第36小时的500 hPa流场形势; (e) $t=30$ 小时的区域平均加热率垂直廓线

开始到48小时, MTC是处于发展时期。在500 hPa涡度分布图上, 也是从24小时开始气旋性涡度加强, 到48小时涡度中心区较强大。在前48小时, 系统基本处于静止状态。从对流加热率的演变情况, 这个MTC的气旋性涡度发展是由于对流加热的作用。24小时气旋性涡度的加强是由于24小时及之前剧烈的对流加热, 40小时之后的对流加热使得48小时MTC发展成熟。

从对流加热的纬向垂直剖面图(图略)看到加热最大中心在 500 hPa 上下。气旋发生地小范围的区域平均($100\sim 120^{\circ}\text{E}$, $0\sim 10^{\circ}\text{N}$)加热率的垂直剖面图(图 9e 实线, $t=30$ 小时), 我们看到最大加热率位于 500 hPa。由此, 我们看出 MTC 这种系统在 500 hPa 具有最大的对流加热率, 而且对流加热率由中层向低层和高层逐渐递减, 主要强度集中在 700~300 hPa。这与阎敬华、李崇银的结果基本一致^[11]。

与 MTC 的发展相对应的地方有一片降水区的存在, 48 小时的降水强度最强, 降水区也是最大的。

关于印度西岸 MTC 的动力学机制, Mak 最早进行了研究^[12]。他注意到东西向温度梯度的存在, 提出了 MTC 发生发展的斜压不稳定理论。后来 Carr 的研究认为 CISK 过程是 MTC 加强和维持的最主要机制。对南海地区 MTC 已有的诊断分析^[13]表明, 环境条件对于 MTC 生成有一定贡献, 而积云的加热作用以及对涡度的垂直输送对 MTC 的发展有重要作用。下面我们对这个实例进行一些数值模拟实验。

利用模式我们做了两个关于加热率强度对 MTC 发生发展影响的实验。两次减小模式计算中的加热率强度, 我们发现随着加热率强度的减弱, MTC 发生发展的空间尺度和时间尺度与控制实验相比, 存在不同程度的减小和缩短。对流加热强度越小, 越容易发生发展出 MTC。控制实验中 MTC 初生于 10 日 06 点也就是预报时 $t=18$ 时开始。图 9c 中长虚线和短虚线分别代表第 1 种加热率强度减弱情况和第 2 种(更弱)强度减弱情况下 $t=30$ 小时的区域平均加热率垂直廓线。在第 1 种减弱情况下, 闭合环流到了 10 日 12 点才出现(预报时 $t=36$), 而且只维持了半天的时间(图 9c), 不过在垂直方向上, 气旋性闭合环流从 850~500 hPa 都有表现。在第 2 种减弱情况下, 气旋性闭合环流也在 10 日 12 点出现在 500 hPa 上, 并且维持了半天, 但是在垂直方向上, 气旋性闭合环流只在 500 hPa 有微弱表现(图 9d)。这一实验说明对流加热对 MTC 系统的发展具有很重要的作用。随着对流加热强度的减弱, 气旋性闭合环流也随着减弱, 甚至使得 MTC 发展不起来。

5 结论

夏季 6~8 月南海地区存在着有利于 MTC 生成的气旋性闭合环流。但是在强度上没有孟加拉湾的闭合环流强。根据引起南海地区 MTC 发生发展的扰动来源不同, 我们把 MTC 分成西风扰动类和东风扰动类两类。西风扰动类 MTC 往往是在大尺度气候背景场为西南季风的气流中由小扰动发展起来的, 小扰动的发展主要包括西南季风槽直接切断、中纬度西风带小槽的加深切断、台风槽切断和热带辐合带上的扰动发展。而东风扰动类 MTC 则是副高环流南缘和西南缘的东风气流里的小扰动发展而成的。南海有一个 MTC 多发地带位于中南半岛与南海交界海岸, 这与该地区的特定的动力和热力条件有关。

从合成结构上看, 西风扰动类 MTC 与东风扰动类 MTC 的结构特点在发展成熟期基本相似, 仅存在一些细微差别。它们都是一种冷心结构并且随高度向西南方向倾斜。它们的涡度都在 500 hPa 达到最大, 风速也是在中层有最大值。对流层中层为辐合区, 300 hPa 以上补偿辐散区。垂直上升运动在 400 hPa 达到最大。西风扰动类 MTC 在强

度上要强于东风扰动类 MTC; 而东风扰动类在垂直三维结构上随高度向西南方向倾斜程度远远大于西风类; 同时, 在流场上我们看到东风类在中层有明显的东风卷入。但总的来说两类南海地区的 MTC 在空间尺度上比阿拉伯海地区 MTC 小, 在时间尺度上也比阿拉伯海地区 MTC 短, 而且其他气象要素的绝对值都来得比阿拉伯海地区 MTC 小。

对于西风扰动类 MTC, 在大尺度气候背景场为西南季风条件下有小扰动存在是它发生发展的必要条件; 而对于东风扰动类 MTC, 东风波是必要条件, 而在发展过程中东风气流与西南气流之间的风切变对 MTC 的持续发展起到了重要作用。另外, 东风扰动类 MTC 在刚开始时对流层中层被东风气流所控制, 但是又由于南海地区夏季的大环流背景场作用, 这类扰动往往在发展过程中在对流层中层由下而上逐渐被西风气流代替。

在 MTC 的发展过程中, 西风扰动类 MTC 基本处于准静止状态略有西移, 而东风扰动类 MTC 由于其发展过程的独特性, 往往向西北方向移动并且移幅较大。

涡度的垂直剖面图和各层流场图显示东风扰动类 MTC 所在的位置较西风扰动类偏高。这是由于夏季南海地区对流层中下层处于西南季风控制下, 东风气流所在位置偏高所致。

西风扰动类 MTC 西边的西风与 MTC 发展过程相对应有一个风速加大、维持和减弱的过程; 反之, 东风扰动类 MTC 东面的东风气流在 MTC 的发生发展过程中也有一个风速加大、维持和减弱过程。同时, 与两类 MTC 相对应的代表副高环流强度的东风气流随 MTC 发展的演变表明, 当有西风扰动类 MTC 时, 副高环流是减弱的, 而有东风扰动类 MTC 时, 副高环流并未减弱, 反而东风有所加强。

从西风扰动类个例来看, MTC 的发生发展过程与对流加热有密切关系。对流层低层的辐合引起强对流活动, 由此产生的非绝热加热使得在对流层中层出现闭合环流, 促使 MTC 的形成, 然后辐合运动的进一步加强和维持使得对流活动也进一步加强, MTC 成熟发展。模式诊断和数值实验表明, MTC 系统的最大对流加热率位于 500 hPa; MTC 的发生发展与 500 hPa 对流加热强度有着很密切的关系。随着 500 hPa 对流加热的减弱, 形成的气旋性闭合环流也随着减弱, 使得 MTC 很难发展起来。因此, 对流加热对 MTC 系统的发展具有相当重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Miller, F. R. and R. N. Kesharamurthy, Structure of an Arabian Sea summer monsoon system, *International Indian Ocean Expedition Meteorological Monographs*, No.1, Honolulu, East-West Center Press, 1968, 1~94.
- 2 Simpson, R. H., Evolution of the kona storm, a subtropical cyclone, *J. Meteor.*, 1952, 9, 24~25.
- 3 Krishnamurti, T. N. and R. S. Hawkins, Mid-Tropospheric cyclones of the southwest monsoon, *J. Appl. Meteor.*, 1970, 9, 442~457.
- 4 Carr, F. H., Mid-tropospheric cyclones of the summer monsoon, *Pure and Applied Geophysics*, 1997, 115, 1383~1412.
- 5 邹美恩、梁必骥, 南海中层气旋的合成结构, 全国热带夏季风学生会议文集(1982), 昆明: 云南人民出版社, 1983, 259~271.
- 6 梁必骥, 热带气象学, 广州: 中山大学出版社, 1990, 288~292.

- 7 邹美恩, 梁必骥, 南海地区中层气旋的生成, 热带气象, 1985, 1, 234~241.
- 8 梁必骥, 南海热带大气环流系统, 北京: 气象出版社, 1991.
- 9 Xue Jishan, Wang Kanglin, Wang Zhiming et al., Test of a tropical limited area numerical prediction model including effect of real topography, *Adv. Atmos. Sci.*, 1988, 5, 1~23.
- 10 薛纪善, 王康玲, 何要国, 热带有限区域数值模式的升级及在台风中的应用, 热带气象, 1996, 12, 97~104.
- 11 Yan Jinghua, Li Chongyin, 1994, Numerical simulation study of the occurrence and development of a mid-tropospheric cyclone over the South China Sea, *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 8, 150~160.
- 12 Man-Kin Mak, The monsoonal mid-tropospheric cyclogenesis, *J. Atmos. Sci.*, 1975, 32, 2246~2253.
- 13 邹美恩, 葛绍凤, 1985, 南海地区中层气旋生成的斜压不稳定与 CISK 机制, 热带气象, 1, 330~339.

On the Structure and Evolvement feature of Mid-Tropospheric Cyclones over South China Sea and Its Numerical Simulations

Wu Jingbo and Li Chongyin

(State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Through composite analyses of typical cases of MTC (Mid-Tropospheric Cyclones) occurred over South China Sea from 1980-1996, the structure features of MTC are studied. The results show that MTC of the westerly disturbance type are stronger than that of the easterly type in intensity. Both have the cold core and the maximum value in the mesosphere. But, the easterly type inclines much more south-westwards in vertical than that of the westerly one. Two types have the convergence in the mid-troposphere and the divergence above the 300 hPa pressure level. The up-rising velocity reaches maximum at 400 hPa. Analyzing their individual evolvement processes, the westerly type is mainly in the quasi-stationary situation and moves westwards slightly. But, the easterly type has its particular development process and often moves north-westwards quickly. The easterly type is in the higher location than that of the westerly type. This is because in summer South China Sea is controlled by south-west-erly monsoon and the easterly flow is in the higher location. We also find both types have the increasing, maintaining, decreasing three sub-processes. Simultaneously, the evolvement process of the easterly flow which stands for the intensity of the subtropical high shows that, when MTC are in westerly type state, the subtropical high inclines to decrease, and when MTC is in the easterly type state, the subtropical high does not abate. According to the numerical experiment of the cases in 1998, it is shown that convection heating reaches the maximum value at 500 hPa and plays an important role in the developing process of MTC. The weaker convection heating, the weaker MTC system.

Key words: mid-tropospheric cyclone; composite analysis