

低纬高原地区一次中尺度对流复合体 个例研究*

段 旭 李 英

(云南省气象台, 昆明 650034)

摘 要 利用地球静止气象卫星(GMS)资料和有限区域暴雨预报模式(HLAFS)分析场,对1999年6月6日低纬高原地区发生的一次中尺度对流复合体(MCC)进行了分析。研究表明,MCC发生在副热带高压与滇缅高压之间辐合区中;受两高之间辐合区及云贵高原地形的影响,MCC位于500 hPa一个明显的中尺度辐合线上,垂直速度中心强度比其他地区的MCC约大1倍,无辐散层位于400~500 hPa之间,北侧准静止锋锋区很强。

关键词: 低纬高原; 中尺度; 对流复合体

1 引言

1980年Maddox^[1]提出中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex,简称MCC)概念后,引起了我国气象学者的充分关注,特别是20世纪80年代末期以来,随着地球静止气象卫星(GMS)数字展宽资料和微机接收处理技术的迅速发展,MCC得到了较深入的研究。杨国祥等人在华东中尺度天气试验中^[2],分别从卫星云图上的演变、降水分布特点、中尺度扰动场以及热力动力结构等几个方面作了较详细的分析研究。最近,陶祖钰^[3]、项续康^[4]、李玉兰^[5]、丁一汇^[6]等对我国的 α 中尺度对流系统和南方地区的中尺度对流复合体也进行了深入的研究,认为MCC是中国夏季造成暴雨和洪涝灾害的天气系统之一。低纬高原地区(主要指云贵高原)夏季受热带天气系统和高原地形的影响,中小尺度对流系统比较频繁,大多为 β 中尺度对流系统,造成的灾害是局部性的。 α 中尺度对流系统或其中的MCC虽为数不多,但出现时常造成大范围的雷暴、大风、冰雹和暴雨,风雹、洪涝灾害明显。文献[5,6]虽对西南和华南地区的MCC进行了系统深入的研究,但研究范围只限于长江流域以南和四川盆地,没有涉及云贵高原地区。1999年6月6日低纬高原地区出现了一个典型的MCC云团,本文将详细研究此次个例,并探讨MCC在低纬高原地区的特征以及与其他地区的差异。

2 资料和计算方法

在Maddox关于MCC的定义中,要求 -32°C 冷云盖面积 $>10.0\times 10^4\text{ km}^2$, -52°C

2000-01-26收到,2000-11-03收到再改稿

* 云南省应用基础研究基金2000D0091M资助

冷云盖面积 $> 5.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, 持续时间 $> 6 \text{ h}$, 本文将采用这个标准。从 GMS-5 接收处理系统中的麦卡脱投影图上, 取出包括云南省在内的矩形区域 ($20.6 \sim 29.0^\circ \text{N}$, $97.0 \sim 107.0^\circ \text{E}$) 的红外 ($10.5 \sim 11.5 \mu\text{m}$) 通道数据资料, 采用双线性插值方法将资料转换为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格点数据。然后利用 GMS-5 接收处理系统中动态定标表找出一组一一对应的亮温值, 并利用一元非线性方程

$$Y = \sum_{i=0}^n a_i (X - \bar{X})^i, \quad (1)$$

对亮温值进行拟合, 当拟合误差小于 0.02 K 时, 得到红外黑体温度 (T_{BB}) 亮温反演值计算公式^[7]

$$T_{\text{BB}} = 244.26 - 0.71(x_i - 180.5) - 0.004(x_i - 180.5)^2 - 0.000066(x_i - 180.5)^3, \quad (2)$$

其中, x_i 为网格点数据。运用公式 (2) 计算冷云盖黑体温度 T_{BB} 值。

T_{BB} 资料取 6 月 6~7 日逐时次, 以追踪 MCC 的演变。降水量取云南省 125 个气象台站 6 月 6 日 20 时~6 月 7 日 02 时 6 h 累计值。其他气象资料取 6 月 6 日 20 时国家气象中心的有限区域暴雨预报模式 (HLAFS) 格点分析场。

3 MCC 的演变及与降水的关系

6 月 6 日的 MCC 于北京时 14 时形成, 21 时达到最强, 7 日 02 时以后消失, 整个过程分为 3 个阶段。

(1) 形成阶段: 在 6 日 11 时 (图略) 的 T_{BB} 图上, 云、贵、川出现了一 β 中尺度对流云团, 云顶 T_{BB} 值达 -64°C 。同时在其南部, 沿着副热带高压外围的东南暖湿气流中存在着许多分散的对流云块, 从中南半岛东北部至云南东南部有雷暴天气出现。

(2) 成熟阶段: 到 6 日 14 时 MCC 基本形成 (图 1a), -32°C 冷云盖面积超过了 $10.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, -52°C 冷云盖面积超过 $5.0 \times 10^4 \text{ km}^2$, T_{BB} 最大值达 -66°C 。MCC 此后继续加强发展 (图 1b、1c), 到 21 时, 已发展成充分成熟的一个独立的椭圆形的 MCC (图 1d)。此时, -32°C 冷云盖面积约为 $26.7 \times 10^4 \text{ km}^2$, -52°C 冷云盖面积约为 $17.8 \times 10^4 \text{ km}^2$, T_{BB} 最大值达 -73°C 。21 时以后, MCC 云团开始扩散 (图 1e), T_{BB} 最大值下降。到 7 日 02 时 (图 1f), -32°C 冷云盖面积比最大时减少 50%, -52°C 冷云盖面积减少 70%。

图 2 给出了云南省 6 月 6 日 20 时~6 月 7 日 02 时 6 h 雨量, 在 MCC 覆盖的区域内降雨量都超过了 10 mm, 其中 2/3 的区域降雨量超过了 25 mm, 滇西南的澜沧县降雨量达 84 mm。实际上, MCC 于 20 时已发展得相当成熟 (图 1c), 由于此前许多地区以大风冰雹天气为主, 雨量不大, 强降雨主要集中在 21~23 时时段内。

(3) 消亡阶段: 23 时 MCC 结构开始松散 (图 1e), 7 日 02 时云区迅速缩小 (图 1f), 02 时以后 MCC 已消散不成形 (图略), 残存的几小块对流云 T_{BB} 值上升到 -60°C 左右, 对应的降雨量明显减小, 02~08 时 6 h 雨量大部分地区小于 10 mm。结合 7 日 08 时的 500 hPa 天气图看, 滇缅高压减弱消失, 副高略有东退, 两高之间的辐合区明显减弱, 中断了 MCC 生存发展的条件。

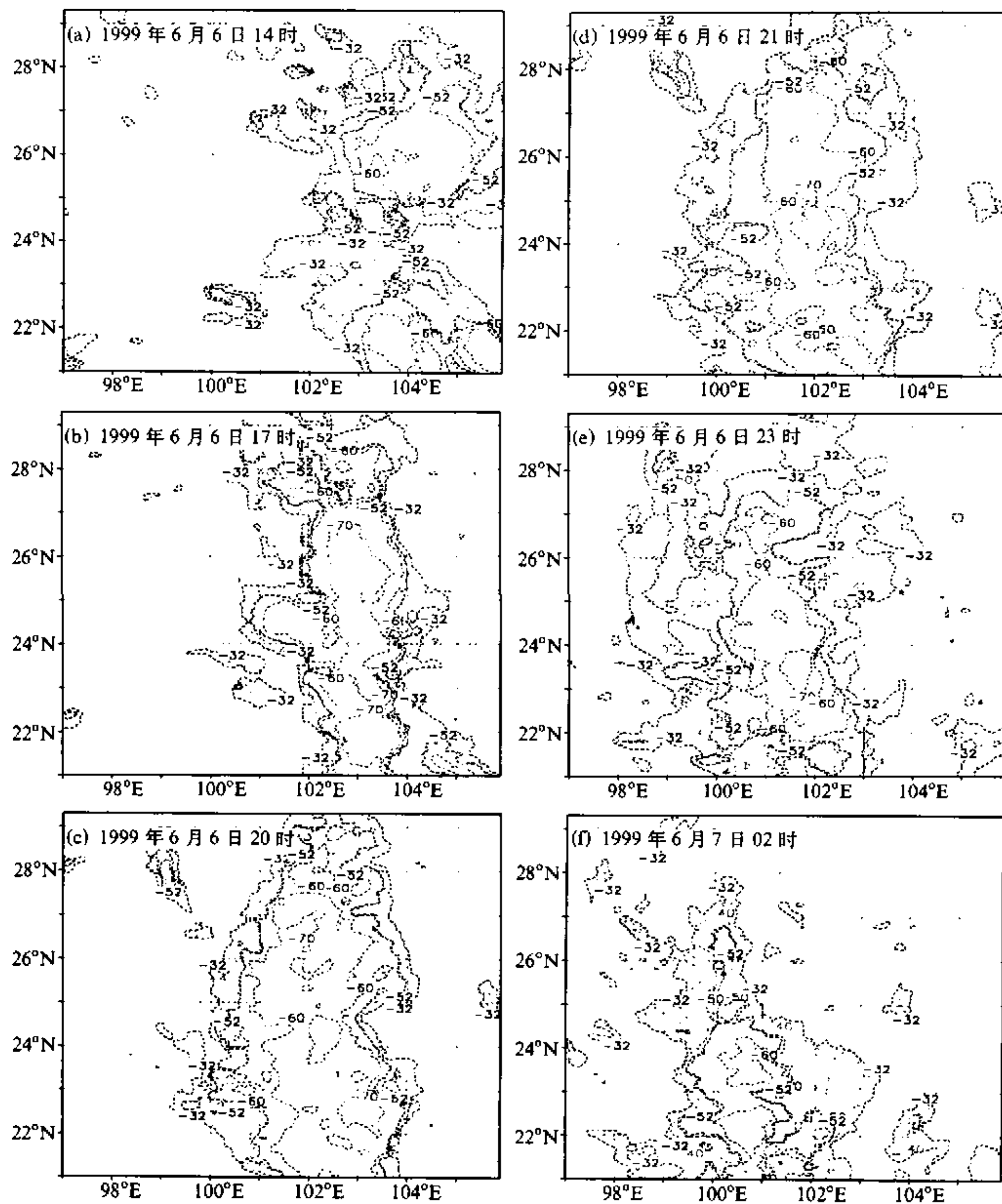


图1 1999年6月6日14时至6月7日02时 T_{BB} 值的分布
(a) 6月6日14时; (b) 6月6日17时; (c) 6月6日20时;
(d) 6月6日21时; (e) 6月6日23时; (f) 6月7日02时

4 中尺度水平结构

采用带通滤波方法^[8], 对6日20时的高空分析场进行滤波, 波长取 $\lambda=800$ km。在500 hPa流场分析图上(图3a), 滇缅高压的反气旋环流和副高边缘西南侧的气旋环流, 这些大尺度的系统都非常明显, 但MCC(22~28°N, 100~104°E)在大尺度背景

下很难找到。图 3b 为滤波后的 500 hPa 流场, 位于大尺度 500 hPa 滇缅高压的反气旋环流流场上分离出一个明显的中尺度辐合线, 这正是 MCC 出现的位置。从 700 hPa 高度场看 (图 4a), 北高南低明显, 即北部冷高压和南部热低压都较强, 但仍找不到 MCC 确切的位置。经滤波后, 位于大尺度 700 hPa 高低压之间扰动负值区 (图 4b) 被分离出来, 其中一个扰动负值中心位于 MCC 的中部, 另一个位于其西南部, 扰动负值中心分布走向与 MCC 移动方向基本一致 (从图 1 中可以看出, MCC 的强中心向西南方向移动)。

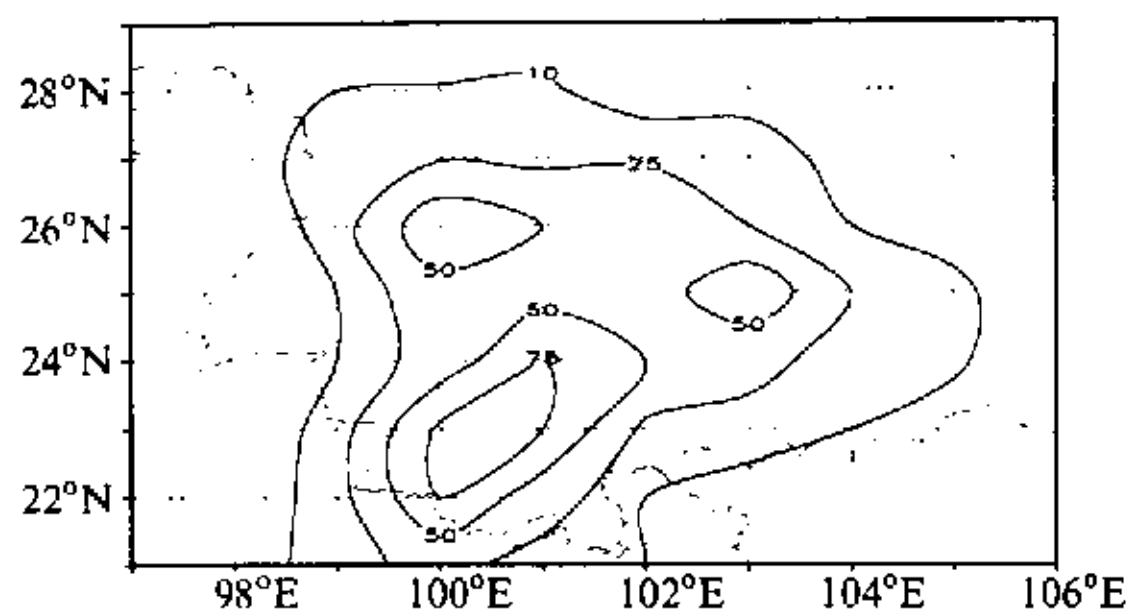


图 2 云南省 1999 年 6 月 6 日 20 时~6 月 7 日 02 时
6 h 雨量 (单位: mm)

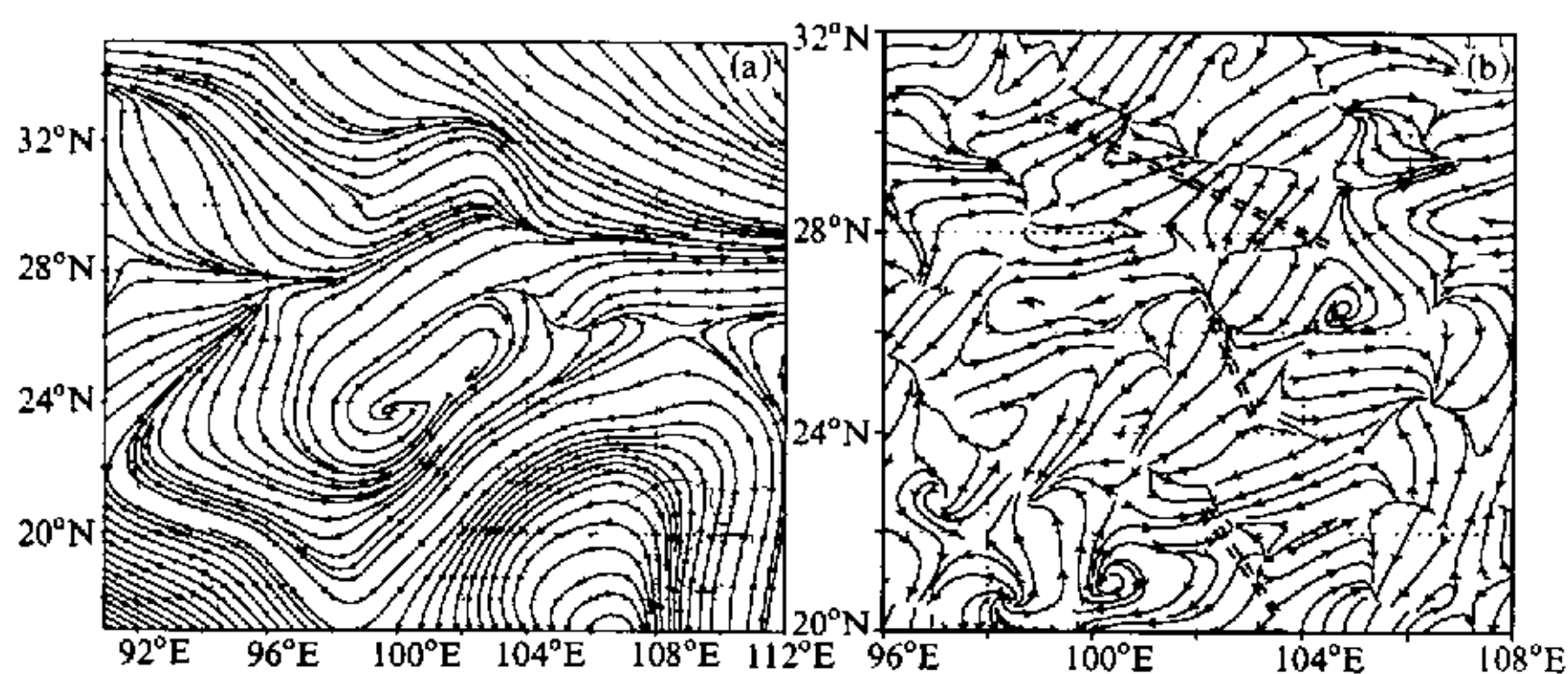


图 3 500 hPa 大尺度流场 (a) 和中尺度流场 (b) (双虚线为辐合线)

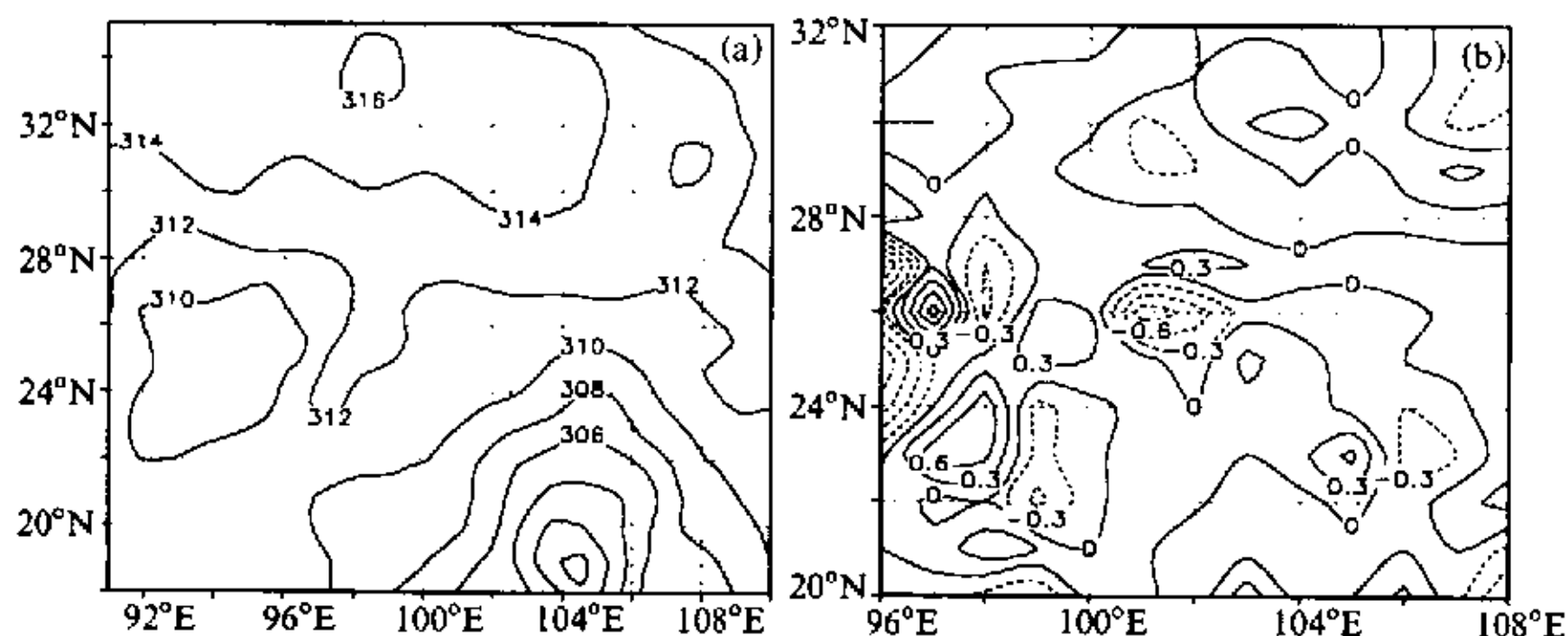


图 4 700 hPa 高度场 (a) 和高度扰动场 (b)

5 物理结构

利用 6 日 20 时国家气象中心 HLAFS 产品 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格点资料, 分析研究 MCC

发展成熟阶段时的结构。为直观表达其垂直结构,以下分析均取 MCC 长轴 102°E (图 1c) 经向剖面。

5.1 热力结构

6 日 20 时为 MCC 的发展成熟阶段,我们采用温度、露点偏差法即

$$T' = T - \bar{T}, \quad T'_d = T_d - \bar{T}_d, \quad (3)$$

这里 T 、 T_d 为网格点资料, $\bar{T}$ 、 $\bar{T}_d$ 为 HLAFS 在区域 $18^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 和 $92^{\circ}\sim 112^{\circ}\text{E}$ 内网格点资料的平均值。

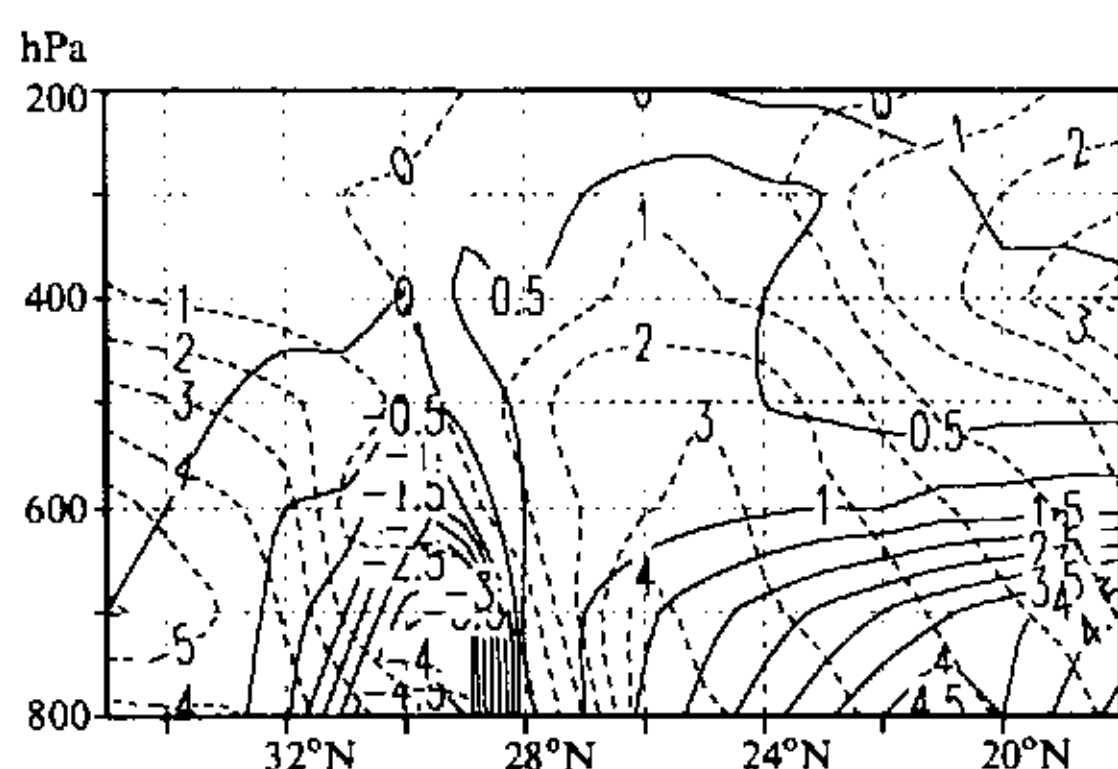


图 5 MCC ($22^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$) 内温度偏差 (实线) 和露点偏差值 (虚线)

从图 5 可以看到, MCC ($22^{\circ}\sim 28^{\circ}\text{N}$) 内温度偏差和露点偏差均为正值,表明了 MCC 所在的对流层内为暖湿大气。露点偏差正值比温度偏差正值在对流层中高层更为明显,这种热力结构的形成与垂直向上的水汽输送和对流凝结潜热释放密切相关。

在 MCC 北侧有一明显冷区,冷区位于低层,温度偏差最大值为 -4.7°C ,冷暖界面温度偏差等值线几乎垂直,这是典型的准静止锋结构。

准静止锋的存在增强了大气的斜压不稳定性,同时加强了锋面附近的风垂直切变,为包括 MCC 在内的强对流天气的发生发展提供了有利条件。准静止锋南侧的 MCC 北部边缘地区还存在陡立的湿度锋区,作者研究过这种结构^[9],认为湿度锋区的存在是强对流天气发生的一种触发机制,上升的暖湿气流和下沉的干冷气流形成垂直环流,诱发强对流天气出现。

MCC 内部与周围环境的温湿结构差异,主要表现在对流层中层的温度偏差 MCC 内部明显大于周围地区,这种情况在 MCC 内部及其南部地区差别很小。而在 MCC 内部几乎整个对流层内湿度 (露点) 偏差均明显地大于周围地区,300 hPa 以上这种差别才逐渐减小。

5.2 动力结构

图 6a 给出了 MCC (沿 102°E , 未经滤波) 经向的二维环流结构。处于发展成熟阶段的 MCC, 有一支上升的气流从 MCC 以南的低层向北流入, 这支上升的气流在 MCC 的南半部, 从 800 hPa 一直伸展到 200 hPa, 厚度很厚, 最强中心出现在 400 hPa 上, 垂直速度为 $-10.6 \times 10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ (图中虚线), 基本上与图 5 的暖湿中心吻合, 说明 MCC 内部中、高层的暖湿空气是由于垂直运动将低层的水汽向上输送造成。与其他类型的强对流暴雨垂直速度比较^[10,11], 这个 MCC 垂直速度的中心强度约大 1 倍, 主要原因可能是副高西侧的偏南气流受到云贵高原地形抬升的作用, 加强了气流的上升运动。

同时间的涡度和散度的经向剖面 (图 6b) 图上, MCC 内的 500 hPa 以下为正涡度 (实线), 最强中心位于 600 hPa 上, 达 $6.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 这是低层 700、600 hPa 上存在

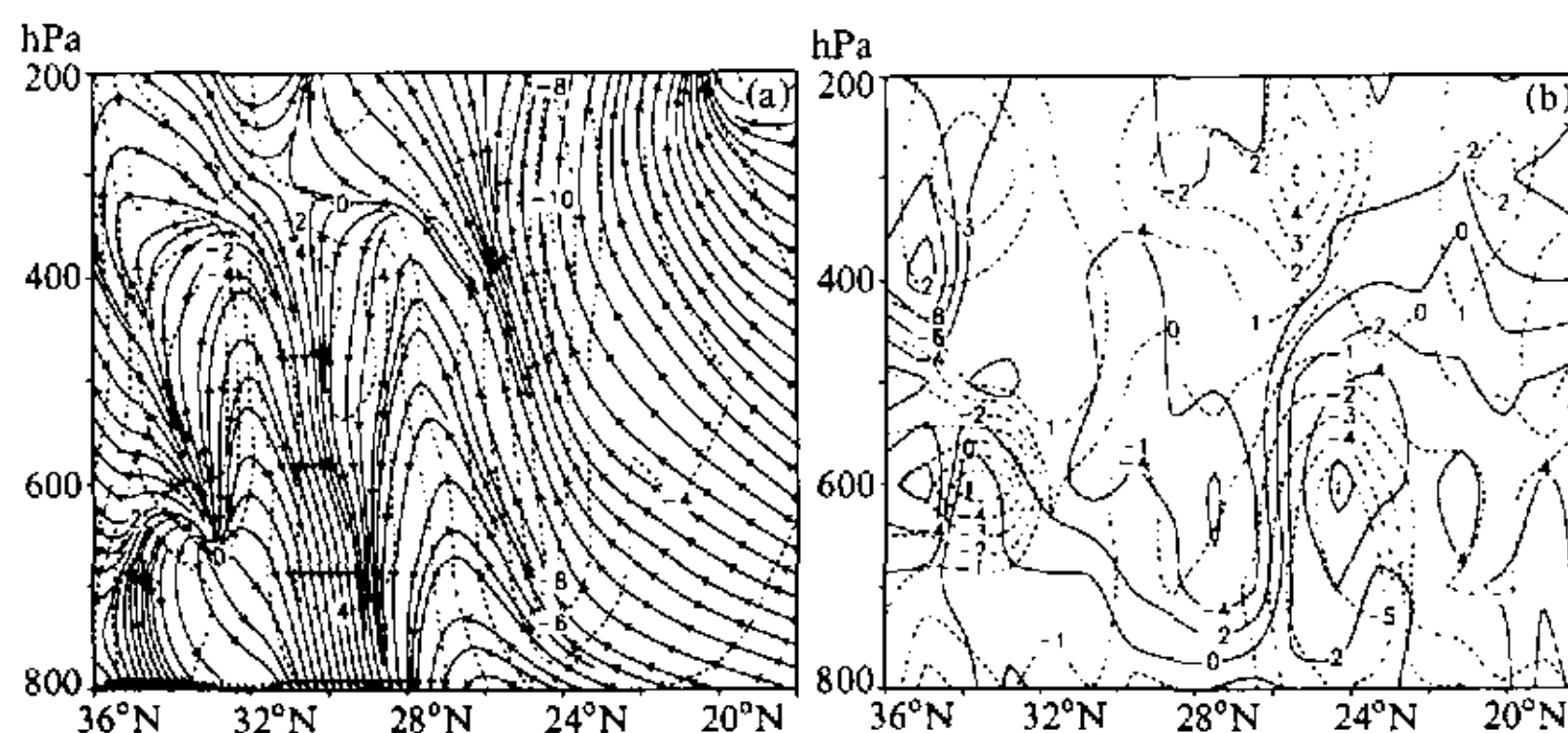


图6 MCC沿102°E经向剖面图

(a) 二维环流和垂直速度(虚线, 单位: $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$);(b) 涡度(实线, 单位: 10^{-5} s^{-1})和散度(虚线, 单位: 10^{-5} s^{-1})

的切变线的反映。400 hPa 以上则为负涡度, 最强中心位于 200 hPa 上, 达 $-4.3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 这是对高层为南亚高压控制的反映。在对流层低层 MCC 外部, 南面是弱的正涡度, 表明中南半岛热带低值系统比较活跃; 而北部是较强负涡度区, 这正是准静止锋后部下沉气流的反映。从散度分布看, 在 MCC 内部 500 hPa 以下为辐合层, 最大中心位于 650 hPa 上, 达 $-5.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上; 400 hPa 以上则为辐散层, 最强中心位于 300 hPa 上, 达 $4.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。这种高层辐散的加强, 与高层出现的暖性结构, 引起质量出流直接有关, 而高层辐合和低层辐散则有利于垂直运动的发展。

以上分析表明, MCC 南北两侧在热力结构和动力结构存在不对称性, 特别是动力结构上更为明显, 这是由于南北不同的天气尺度系统对 MCC 影响所引起的差异。

6 与其他地区的差异

上面分析讨论了 1999 年 6 月 6 日低纬高原地区出现的一个 MCC 系统, 其云团特征、水平流场结构和垂直剖面结构与文献[3~5]分析的 MCC 结构基本类似, 但也有一些不同, 主要差异有三点:

一是中低层水平流场。其他地区 MCC 大多处在水平流场辐合中心环境下, 低纬高原地区 MCC 的水平流场则表现为辐合线。这是因为不同天气系统造成的, 前者大多发生在高空槽和低空急流天气系统中, 而后者出现在副热带高压与滇缅高压之间的辐合区中, 水平风场在中低层形成辐合线。

二是垂直结构。由于北上的暖湿气流处在云贵高原(平均在 1500 m 以上)迎风坡, 地形抬升作用十分明显, 低纬高原地区 MCC 的垂直速度中心强度约比其他地区 MCC 大 1 倍。同时, 低纬高原地区 MCC 的无辐散层位于 400~500 hPa 之间, 其他地区 MCC 的无辐散层位于 500~600 hPa 之间, 约相差 100 hPa 左右。

三是锋区的强弱程度(也是地形的作用)。北方南下的弱冷空气遇云贵高原阻挡形成准静止锋, 在 MCC 北侧出现很强的锋区, 锋区厚度达到 700 hPa 等压面, 锋区水平温差高达 $4^\circ\text{C}/100 \text{ km}$ 以上, 而其他地区 MCC 北侧的锋区则很浅薄。

7 结语

本文虽然只分析了一个 MCC 个例,但在低纬高原地区还是很有代表性的。作者利用 1990~1999 年 10 年的 TBB 资料,按 Maddox 关于 MCC 的定义对低纬高原地区进行了普查,共找出 12 个 MCC,其中 7 月份有 7 个,8 月份有 4 个,9 月份有 1 个,历史天气图 500 hPa 上均为两高辐合,低层(700 hPa)流场上则有辐合线配合。限于资料原因,没有逐个进行诊断研究。

低纬高原地区 MCC 发生的环境与其他地区有明显的不同,一是处于副热带高压的西侧,二是云贵高原地形的作用。此外,还有青藏高原大地形、滇缅高压、孟加拉湾水汽输送等因素的影响,值得继续深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Maddox, R. A., Mesoscale convective complexes, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1980, **61**(11), 1374~1387.
- 2 杨国祥,华东对流性天气的分析预报,北京:气象出版社,1989,36~49.
- 3 陶祖钰、王洪庆、王旭等,中国的中- α 尺度对流系统,气象学报,1998, **56**(2), 166~177.
- 4 项续康、江吉喜,我国南方地区的中尺度对流复合体,应用气象学报,1995, **6**(1), 9~17.
- 5 李玉兰、王倩熔、郑新江等,中国西南—华南地区中尺度对流复合体(MCC)的研究,大气科学,1989, **13**(4), 417~422.
- 6 丁一汇,高等天气学,北京:气象出版社,1991,536~547.
- 7 段旭、雷茂生、李英, GMS 实时资料识别冰雹的初步研究,气象,1999, **25**(12), 21~23.
- 8 丁一汇,现代天气学中的诊断分析方法,北京:科学出版社,1989,189~202.
- 9 Duan Xu, Li Ying, Zhou Yi, Environment field characteristics of high-wind and hailfall over low latitude plateau, Seventh WMO Scientific Conference On Weather Modification, 17~22 February 1999, Chiang Mai, Thailand, 494~497.
- 10 段旭、孙绩华、汪中兴,暴雨与非暴雨过程涡散场能量收支特征,高原气象,1997, **16**(2), 204~209.
- 11 段旭、李英,滇中暴雨的湿位涡诊断分析,高原气象,2000, **19**(2), 253~259.

A Study of Mesoscale Convective Complexes over Low Latitude Plateau

Duan Xu and Li Ying

(Meteorological Observatory of Yunnan Province, Kunming 650034)

Abstract A mesoscale convective complexes (MCC) over the low latitude plateau on 6 June 1999 is analyzed using GMS and HLAFS data. The results show that it is initiated in the convergence area between subtropical high and the anticyclone over Yunnan and Myanmar (Burma). The MCC occurs near a mesoscale convergence line at 500 hPa due to the influence of the convergence area between two cyclones and the relief of the Yunnan and Guizhou Plateau. The maximal vertical velocity of the MCC is greater than the other MCCs, and its non-divergence level appears at 400~500 hPa. Moreover, it is found that the quasi-stationary front at the north side of the MCC is very strong.

Key words: low latitude plateau; mesoscale convective complex (MCC)