

低纬高原一次中尺度对流复合体 结构的数值模拟分析

赵刚¹ 吕达仁² 琚建华³

1 云南省气象局, 昆明 650034

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 云南大学资环学院大气科学系, 昆明 650091

摘要 采用非静力 MM5 模式对 2001 年 8 月 24 日发生在低纬高原的一次中尺度对流复合体 (MCC) 过程进行了数值模拟。分析表明, 模拟结果基本再现了发生 MCC 的大中尺度背景场, 嵌套细网格区域内模拟结果较好地反映了 MCC 的空间结构, 特别是清晰给出了 MCC 中的湿中性垂直运动特征。同时对相当位温 θ_e 鞍型场中心区的湿中性垂直运动进行了分析, 揭示了湿中性结构与低层辐合对垂直运动在 MCC 维持发展中的重要作用, 使我们进一步认识了 MCC 结构的动力-热力意义。而由这次 MCC 所造成的持续时间较长的大暴雨, 正是 θ_e 鞍型场中心区湿中性垂直运动、大量暖湿气流的稳定供应和大片低空扰动共同作用的结果。

关键词 θ_e 鞍型场 湿中性运动 中尺度对流复合体 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2005) 05-0056-07 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

Analyzing the Structure Characteristics of A Mesoscale Convective Complex by Using Mesoscale Model Simulation over Low Latitude Plateau

ZHAO Gang¹, LÜ Da-Ren², and JU Jian-Hua³

1 Meteorological Bureau of Yunnan Province, Kunming 650034

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Department of Atmospheric Sciences, Institute of Environment Science and Earth Science,
Yunnan University, Kunming 650091

Abstract A mesoscale convective complex (MCC) developing over low latitude plateau on 24 august 2001 is simulated using the fifth version of Penn State-NCAR nonhydrostatic numerical mesoscale model (MM5). The simulation results basically reproduce the environment of the large-mesos scale of developing by analyzing the results obtained, the simulation results of interactive nesting area preferably revealed the special structure, and the vertical motion of moist neutral characteristics obviously in particular. We analyze the vertical motion of moist neutral characteristics of the center-area of θ_e gross col field, and reveal the important effect of the moist neutral structure and convergence on the lower levels affect the vertical motion during MCC maintain and evolution. The analyzed results make us more understand the dynamical-thermal meaning of the MCC structure. the vertical motion of moist neutral of the center-area of θ_e gross col field, the continually abundant water vapor which is warm and wet and the disturbance of lower levels in more area make the MCC maintain and evolution, which cause continual spate.

Key words θ_e gross col field, motion of moist neutral, mesoscale convective complex, numerical simulation

收稿日期 2003-08-13 收到, 2005-02-06 收到修定稿

资助项目 科技部基础研究重大项目科学前期资助研究专项“我国区域性云系宏观特征研究及示警应用预先研究”(2001CCA02200) 和国家科学自然科学基金资助项目 40027002

作者简介 赵刚, 男, 1976 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事数值模拟方面的研究。E-mail: zgkofox-911@163.com

1 引言

低纬高原地区（主要是指云贵高原）夏季受热带天气系统和高原地形的影响，中小尺度对流系统频繁出现，大多为 β 中尺度对流系统。 α 中尺度对流系统或其中的中尺度对流复合体（MCC）虽较少发生，但出现时常造成突发性的大范围强雷暴和暴雨天气。特别是由 MCC 造成的突发性暴雨大多是在天气系统不明显的背景条件下产生的，且较多出现在晚上和凌晨。由于这种强降水具有突发性和高强度的特点，虽然历时短但造成的灾害是严重的。

2001 年 8 月 24~25 日在滇桂地区出现了一次中尺度对流复合体过程，文献 [1] 对这一过程的红外云图特征及其演变过程、大尺度环境背景场、低层水汽能量的聚集、对流不稳定和地面的辐合系统对 MCC 发展的作用进行了诊断分析。从 8 月 24 日 22 时（BST，下同）起，其红外云图的物理特性近似于 MCC^[2]，到 8 月 25 日 00 时，MCC 进入成熟期，25 日 04 时达到最强期，25 日 10 时，基本消散、解体。分析结果表明：本次过程的形成主要是低层气流的辐合造成水汽、能量的聚集；低层的增暖增湿，高层的干冷空气入侵，形成了强的对流不稳定区；在低空偏南气流的地面静止锋上发生的中尺度扰动，引起了 4 个中尺度对流云团的发展、合并、加强。

此次 MCC 过程造成 8 月 25 日凌晨在滇桂交界地区骤降大暴雨，强降水波及 19 个县。暴雨中心在云南的富宁县，强降水集中于 25 日 00:00~02:00 时，1 h 最大降水量达 63.1 mm，12 h 降水量达 105.3 mm。由于降水强度大，来势凶猛，并伴有剧烈的强雷暴天气，致使山洪爆发。富宁县遭受了巨大的经济损失，是云南近年来伤亡和损失较大的一次严重的洪涝灾害。为了进一步对 MCC 进行深入研究，加强对 MCC 动力学、热力学特点的认识，进一步完善 MCC 的物理结构，本文进行了这次数值模拟实验。

2 MM5 模式和数值模拟设计

2.1 MM5 模式和模拟系统

MM5V3^[3,4]是由美国国家大气科学研究中心

和宾夕法尼亚大学联合开发的中小尺度非静力动力气象模式。模式框架为非静力动力框架，模式方程是非静力可压缩原始方程组，数值计算采用时间分裂方案。在降水物理过程处理中，对隐式对流云参数化和可分辨尺度降水发展了多种方案。同时有多种可选用的行星边界层过程参数化和大气辐射方案，最新版的 MM5（V3.6）中行星边界层过程参数化有 7 种方案。陆面过程也发展了新的 3 种陆面模式，V3 版使用新的 NCAR 地形资料，地表特征资料扩张到 24 种。模拟系统包括：在全球可任意设置；灵活的多重可移动嵌套能力；可输入实时资料；通用连续的张弛逼近方法，实现四维资料同化（FDDA）。该模式被广泛应用于各方面的研究，并已成功模拟出北太平洋和北大西洋上爆发性气旋的生成，以及热带风暴、暴雨、沙尘暴和降雪过程等。^[5~8]

2.2 模式的模拟方案设计

（1）本文使用 MM5（V3.6）对该过程进行双向嵌套区域数值模拟：母域与子域定位于同一中心（23.5°N，105°E），粗细网格距分别为 30 km 和 10 km，水平格点数分别为 93×93 和 169×181（X×Y）（图 1）。

（2）模拟的初值采用 NCEP1°×1°的 GRIB 资料，模式顶为 100 hPa，垂直方向为 σ 坐标，共 23 层。母域采用 NCAR 的 10' 地形资料和 24 类地表特征资料，子域采用 NCAR 的 5' 地形资料和 24

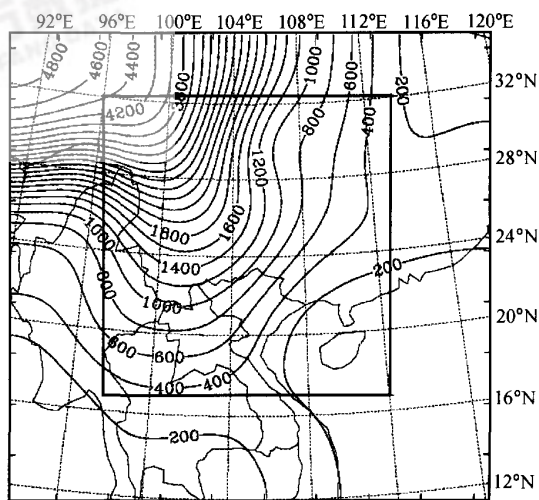


图 1 模拟区域及地形等高线（单位：m）

Fig. 1 Simulation filed and the contour of terrain (unit: m)

类地表特征资料,用复合双抛物线插值方案获得格点地形和下垫面特征资料。

(3) 侧边界条件采用张弛的流入、流出方案,行星边界层物理过程采用 MRF PBL 方案,地面温度由浅层模式和有云效应的能量收支预报获得,可分辨尺度降水采用 Graupel (reisner2) 方案,次网格尺度降水采用 Grell 积云参数化方案,在模拟过程中加入了浅对流作用,陆面过程采用 Five-Layer soil model 方案。模拟起始时间为 2001 年 8 月 24 日 08 时,积分 30 h 至 8 月 25 日 14 时止,覆盖了 MMC 的整个生命史。

3 模拟场和客观分析场的大尺度环流特征及中尺度系统分析

非静力数值模拟提供了大量可供分析的输出结果。首先对产生 MCC 的系统演变及其背景场结构的粗网格模拟区域结果进行分析。

3.1 大尺度背景场模拟分析

分析模拟 12 h (8 月 24 日 20 时) 500 hPa 位势场和风场,云南、越南、缅甸交界处为一强大的高压所控制,在此高压的前部,云南、贵州、广西盛行西北气流,同时刻的 200 hPa 上为南亚高压控制,这和相应客观分析场的结果一致。从 12 h 700 hPa 流场模拟 (图 2) 可以发现,云南境

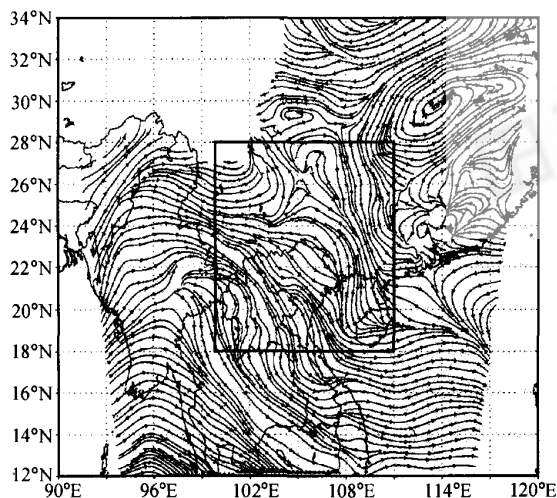


图 2 大尺度背景场的 12 h 700 hPa 流场 (相应 2001 年 8 月 24 日 20 时) 模拟

Fig. 2 The simulation of the environment of the large-mesoscale in 700 hPa at 12 h (corresponding at 20 on 24 August 2001, BST)

内盛行西北气流,长沙、南昌一线有一条弱的切变线,重庆、桂林一线也有一条弱切变线;而在客观分析场中是在西昌、芷江、长沙、南昌一线有弱切变线。在模拟场中出现的重庆、桂林一线弱切变线的位置恰好是形成 MCC 的其中一个对流云团的位置,由此可知模拟的形势好于客观分析的形式。分析模拟 12 h 850 hPa 流场可知,中南半岛有西南气流北上,为 MCC 的形成输送了充足的水气,这与相对应的客观分析场是相吻合的。从模拟 12 h 850 hPa 温度平流的分布可知,在四川盆地已形成一个冷中心,并且冷平流已向南移动达到 22°N 附近,这与客观分析的形势相符。就是在这种环流背景天气形势下爆发了一次 MCC 过程。

3.2 引发 MCC 的中尺度背景场 (细网格) 的模拟分析

由模拟域 12 h 700 hPa 位势场模拟 (图 3a) 与相应的 MICAPS 数据客观分析场 (图 3b)^[1] 的比较可以发现,模式基本模拟出了 MCC 发生区域内中尺度系统的形势,以及位于云南、越南边境的低压槽,以及云南、贵州、广西交界地区的低压带;在 (24~26°N, 104~109°E) 区域内有一个低压中心,与客观分析的 TBB (云顶亮温,图 3d) 值的分布^[1] 相比可以看出,该中心处于 MCC 发展阶段的北端,低压分布的形势与 TBB 的走向一致;相当位温 θ_e 场是湿度场和温度场的热力综合场,因此, θ_e 的模拟场可以代表温度场和湿度场的模拟结果。从模拟域 12 h 850 hPa 相当位温 θ_e 模拟 (图 3c) 可以看出: 360 K 的 θ_e 大值区控制了滇东南及桂西地区,在广西和越南的交界处,还有一个 364 K 的大值中心。同时,在四川盆地有 336 K 的低值区,在川滇之间形成较强的 θ_e 能量锋区。 θ_e 的这种分布特征表明在 MCC 发生的区域聚集了较强的湿斜压不稳定能量。24 日 20 时 MCC 发生区域的低层大气非常潮湿,模拟 12 h 850 hPa 滇桂交界地区的露点温度 T_d 维持在 19~20 °C,与 θ_e 的分布走势基本吻合。

以上是对该 MCC 发生的大中尺度背景进行的模拟结果和客观分析比较,通过比较可以看出,MM5 能基本模拟出大中尺度背景的演变。因此,该模式模拟的大量输出结果可以用于分析 MCC 系统的结构和演变。

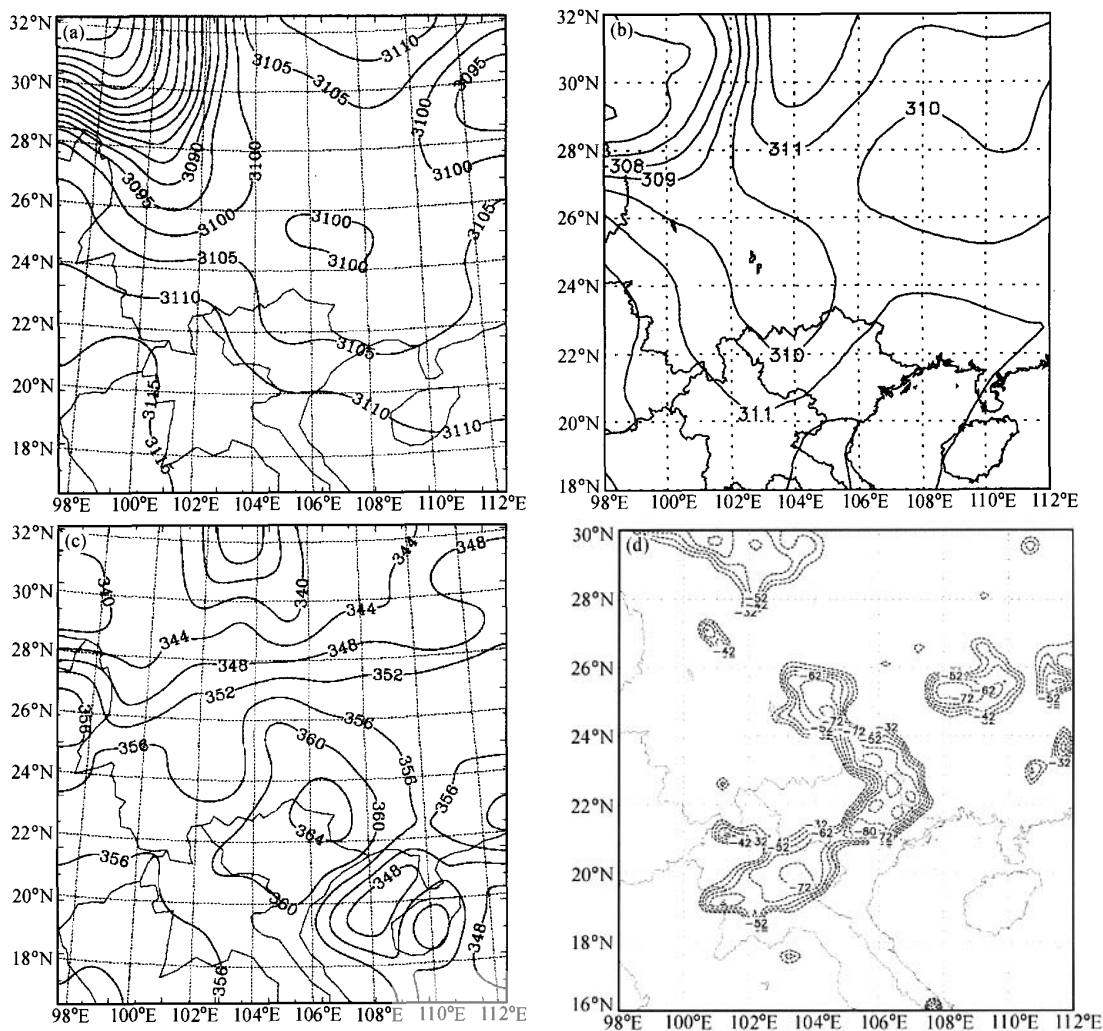


图 3 2001 年 8 月 24 日 20 时模拟域 12 h。(a) 700 hPa 位势场模拟；(b) 700 hPa MICAPS 数据客观分析场；(c) 850 hPa 相当位温 θ_e 模拟 (单位: K)；(d) 客观分析 TBB 值的分布

Fig. 3 The simulation filed at 12 h (corresponding at 20 on 24 August 2001, BST). (a) The simulation filed of potential in 700 hPa; (b) The MICAPS data of analysis filed in 700 hPa; (c) The simulation filed of potential equivalent temperature θ_e in 850 hPa (unit: K); (d) The distributing of the TBB of analysis filed

4 MCC 系统发展结构的细网格模拟分析

为了进一步了解造成富宁暴雨的 MCC 的发展结构及演变,下面着重分析嵌套细网格区域内 16 h 模拟结果(相应 8 月 25 日 00 时),此时 MCC 进入成熟期。为直观表达其垂直结构,以下分析均取过 105°E 的经向剖面。

4.1 MCC 的湿中型垂直运动结构

8 月 25 日 00 时 MCC 进入成熟期,由图 4a 可以看出,在 25°N 附近 700 hPa 到 200 hPa 为一强上升区,中心最大速度达到 $-60 \text{ dPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,而该上升区的空间水平尺度只有 1° 左右,从而形成一强上升气柱。分析图 4b,与强上升气柱对应的区域有一相当位温 θ_e 高值区,分布呈直立状,形成一个从 700 hPa 开始一直向上延伸到 250 hPa 的暖心, $\partial \theta_e / \partial p$ 值趋于零,呈中性状态^[9];在

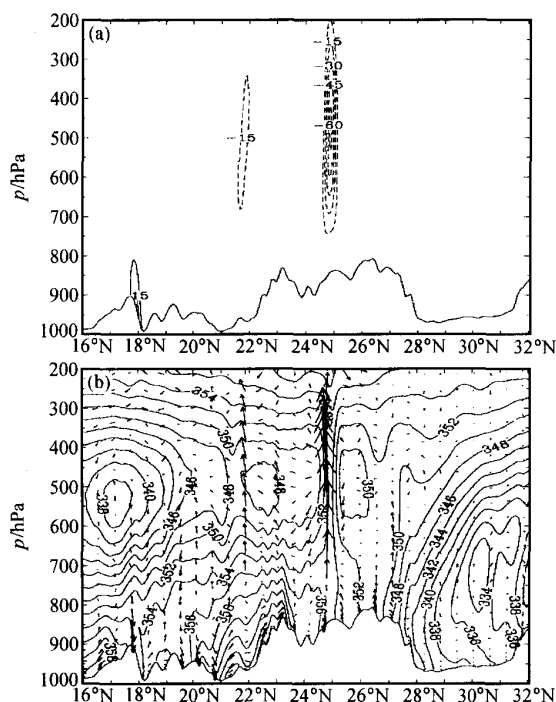


图4 模拟16 h (2001年8月25日00时)过105°E的南北剖面。(a) Ω (单位: $\text{dPa} \cdot \text{s}^{-1}$) 剖面; (b) θ_e (单位: K) 和二维环流剖面

Fig. 4 The simulation of N-S cross-section across 105°E at 16 h (corresponding at 00 on 25 August 2001, BST). (a) Ω section (unit: $\text{dPa} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) The section of potential equivalent temperature θ_e (unit: K) and the cross-section of planar circumfluence

700 hPa 以上强气柱的两侧为湿对流稳定气层, 即 $\partial \theta_e / \partial p < 0$, 在 700 hPa 以下的区域 $\partial \theta_e / \partial p > 0$, 气层是湿对流不稳定的。 θ_e 的这种垂直分布特征, 借喻流体力学概念, 其空间分布特征为鞍型。此鞍型场的空间分布在该区域内形成一个深厚的 θ_e 等值区, 这是一个湿垂直运动的中性运动区, 其运动是垂直运动的无阻力也无推力的状态^[10]。在鞍型场中心区, 即湿垂直运动的中性运动区, 700~250 hPa 是 θ_e 的深厚等值区, 而 700 hPa 以下为广大的湿对流不稳定区, 因而, 在低层一旦有扰动, 上升运动就会得到发展。由于其所在区域 $\partial \theta_e / \partial p > 0$ 的湿对流不稳定层比较浅薄, 所以形成的上升气流到达中心区中部时速度并不大, 也不会受到阻尼, 从而会形成较均匀的上升气流区并一直延伸到高层, 构成一个其上升气流速度受低层辐合量所制约, 且上下基本均匀的深厚垂

直气流框架, 支撑着一个深厚的 MCC 云区。另外, 由于上升气流形成中加速度不大, 可以较快与低层辐合输入供应量和高层辐散排除量相平衡。由前面分析可知, 在中心区的低层 700 hPa 上为一低压中心, 中南半岛的暖湿空气经西南气流水平输送到达后, 暖湿气流便会如履平地在这里转换成具有 α 中尺度的上升气流, 由于低层暖湿空气的供应来自中南半岛, 是远程的, 因而形成了较大范围准稳定的上升气流框架。而暖湿空气在上升过程中冷却, 把水汽凝结成水, 在深厚的云层中这些凝结水可以高效地转化成降水粒子, 构成极为有利于降水发展的宏观和微观物理条件, 从而使得 MCC 所在区域内产生大面降水。鞍中心区是暴雨发生的主要部位, 并且暴雨随着鞍中心区的移动而移动, 离开鞍中心区降水就会减弱, 03 时, 湿中性对流区移动到了 24°N, 暴雨区也随之移动。

4.2 强散度柱和强涡柱的耦合发展

图 5 是与鞍型场中湿中性运动区相对应的散度 D (图 5a) 和涡度 ζ (图 5b) 的垂直剖面。由图 5a 可见, 400~500 hPa 为无辐散层; 500 hPa 以下是辐合区, 最大中心在 650 hPa 上, 达 $-20 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$; 400 hPa 以上为辐散区, 其强中心位于 300 hPa, 达 $20 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。高空的辐散量与低空的辐合量基本平衡, 从而形成一个较为均匀的强散度柱, 而散度的这种空间分布, 正好反映了上升气流中性运动的特性。在相应的涡度场结构里 (图 5b), 850~500 hPa 为一强涡度柱, 750 hPa 为正涡度中心, 最大值达 $20 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$; 而负涡度的最大值位于 650 hPa, 为 $10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ 。在该涡柱的南面, 850 hPa 以下, 有大片的正涡度区, 表明该区域的低压系统比较活跃; 而在此强正涡度柱的北侧, 是一片较强负涡度区, 这是准静止锋后部下沉气流的反映。在 350 hPa 以上 MCC 发生的区域 (21~26°N) 为一大值负涡度区, 这是对高层为南亚高压控制的反映。在涡度方程的动力机制下, 该强涡度柱与同位置的强散度柱相互耦合, 这种散度与涡度的空间结构恰好反映出湿中性运动区的维持发展的动力机制。

4.3 相对湿度和负湿位涡结构

在 MCC 的成熟阶段, 分析图 6a 可知, 在 500 hPa 以下 16~28°N 出现了大片负湿位涡

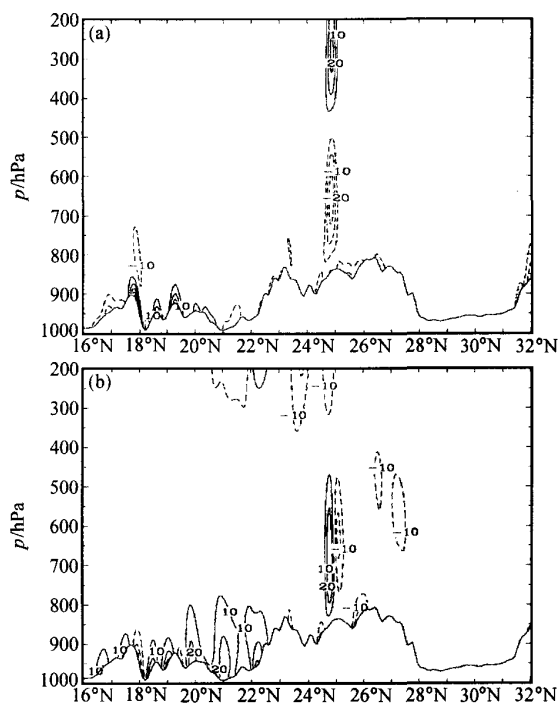


图5 模拟 16 h (2001 年 8 月 25 日 00 时) 过 105°E 的南-北剖面。(a) 散度 D (单位: 10^{-5}s^{-1}); (b) 涡度 ζ (单位: 10^{-5}s^{-1})

Fig. 5 The simulation of N-S cross-section across 105°E at 16 h (corresponding at 00 on 25 August 2001, BST). (a) The divergence D (unit: 10^{-5}s^{-1}); (b) The eddy ζ (unit: 10^{-5}s^{-1})

(MPV) 区, 即 $\text{MPV} < 0$, 在 25°N 度附近, 即湿中性对流区相对应的地区, 出现了一个强负湿位涡柱, 且越到高空负湿位涡值越大。正如 Emanuel^[11]所指, $\text{MPV} < 0$ 时, 中尺度对流系统为湿对称不稳定。这样, 湿对称不稳定与湿对流不稳定的共存在低空造成了大片的扰动区, 使得气流源源不断地涌向鞍中心区, 有利于垂直运动的发展, 因而 MCC 得以维持和发展。在鞍中心所对应的区域内, 从 850 hPa 到 200 hPa 为一深厚的湿舌 (图 6b), 这是由于湿中性运动将大量水汽带到高空, 水汽在上升时发生凝结释放潜热, 因而形成一个自下而上的暖心^[12], 为 MMC 的维持发展提供了足够的水汽和能量。

综上所述, 由于湿中性运动区的垂直运动处于无阻力也无推力的状态, 因而不论是低层辐合起动, 还是高层的辐散抽吸, 都很容易形成深厚的上升气流。该 MCC 不但在低层有辐合中心, 同

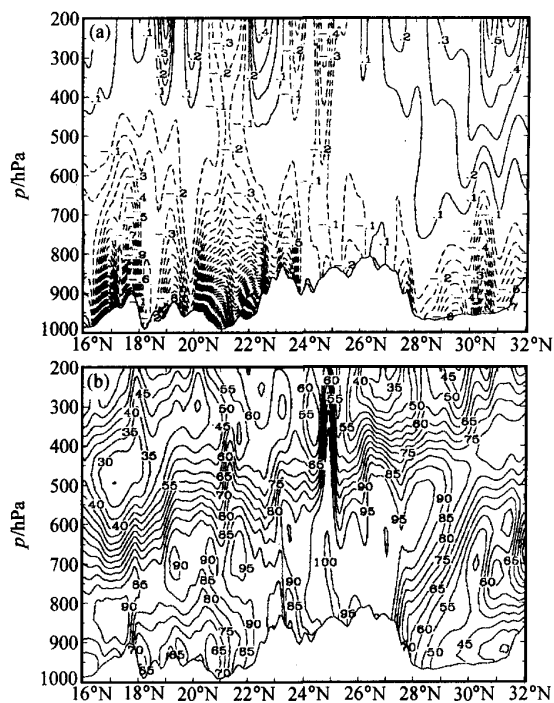


图6 模拟 16 h (2001 年 8 月 25 日 00 时) 过 105°E 的南-北剖面。(a) 湿位涡 (单位: $10^{-6} \text{km}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 相对湿度 (单位: %)

Fig. 6 The simulation of N-S cross-section across 105°E at 16 h (corresponding at 00 on 25 August 2001, BST). (a) The wet potential vorticity (unit: $10^{-6} \text{km}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) The relative humidity (unit: %)

时还存在大片的扰动区, 且在高层有强辐散区, 因而形成了一个深厚的拥有高速度的上升气流区; 再加上大量的暖湿气流的输送, 为 MCC 大范围、高强度的暴雨提供了优越的条件。

5 结论

(1) 模拟结果较好地反映了 MCC 的空间物理结构, 特别是清晰地给出了 MCC 中的湿中性垂直运动区的特征; 并对 θ_e 鞍型场中心区的湿中性垂直运动进行了分析, 揭示了湿中性结构与低层辐合对垂直运动在 MCC 维持发展中的重要作用, 这使我们进一步认识了 MCC 结构的动力-热力意义。而正是由于 θ_e 鞍型场中心区的湿中性垂直运动、中南半岛大量暖湿气流的稳定供应和大片低空扰动的作用, 使 MCC 得以维持发展, 在该区域内造

成了持续时间较长的大暴雨。

(2) 模拟位势场、流场和相当位温场与相应的客观分析场比较分析发现, MM5 对该过程的模拟能基本上再现发生 MCC 大中尺度的背景场, 在大尺度环境中, 模拟结果在低空比客观分析能更好地反映出 MCC 发生区域内的切变线特征。模拟结果同时也反映了低纬高原 MCC^[13] 的一些特点, 即中心垂直速度比其他地区的 MCC 大, 无辐散层位于 500~400 hPa, MCC 北侧出现很强的锋区, 形成准静止锋。

(3) 分析表明 θ_e 的鞍形场结构与低层切变的能量对 MCC 的发生发展十分重要, 因而应深入了解这种结构和能量形成的内外在因素和机制。

致 谢 感谢许焕斌研究员对本文的指导。

参考文献

- [1] 许美玲, 段旭, 施晓辉, 何华. 突发性暴雨的中尺度对流复合体环境条件的个例分析. 气象科学, 2003, **23** (1): 84~91
Xu Meiling, Duan Xu, Shi Xiaohui, He hua. An environmental condition analysis on mesoscale convective complex of spate. *Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **23**: 84~91
- [2] Maddox R A. Mesoscale convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1980, **61** (11): 1374~1387
- [3] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note, 1994, NCAR/TN-398+STR, 138pp
- [4] 贝耐芳 赵思雄. 初值及物理过程对“98·7”暴雨预报结果的影响. 气候与环境研究, 2002, **7** (4): 386~396
Bei Naifang, Zhao Sixiong. Effect of initial data and physical processes on the heavy rainfall prediction in July 1998. *Climatic and Environmental Reseach* (in Chinese), 2002, **7** (4): 386~396
- [5] 孙建华, 赵思雄. 华北地区“12·7”降雪过程的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2003, **8** (4): 387~401
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A numerical simulation of snowfall in North China on 7 December 2001. *Climatic and Environmental Reseach* (in Chinese), 2003, **8**: 387~401
- [6] 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (3): 279~294
Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Numerical simulation of dust emission in North China. *Climatic and Environmental Reseach* (in Chinese), 2002, **7** (3): 279~294
- [7] 孙建华, 赵思雄. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究. 大气科学, 2000, **24** (3): 381~392
Sun Jianhua, Zhao Sixiong. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (3): 381~392
- [8] 陈红, 孙建华, 赵思雄, 曾庆存. 青藏高原人工水汽通道对西北地区夏季降水及环流的影响 I: 对降水过程个例的模拟试验. 气候与环境研究, 2001, **6** (4): 371~379.
Chen Hong, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. Impact of artificial water vapor channel on the Tibetan Plateau on rainfall in Northwest China. Part I: Numerical simulation for some rainfall cases. *Climatic and Environmental Reseach* (in Chinese), 2001, **6** (4): 371~379
- [9] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980, 12~173
Tao Shiyan. *The Storm Rainfall in China*. Beijing: Science Press, 1980, 12~173
- [10] 许焕斌, 丁正平. 湿中性垂直运动条件和中- β 系统的形成. 气象学报, 1997, **55** (5): 600~610
Xu Huanbin, Ding Zhengping. The condition of the vertical motion of moist neutral and the form of meso- β system. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55** (5): 600~610
- [11] Emanuel K A. The Langrangian parcel dynamics of moist symmetric instability. *J. Atmos. Sci*, 1983, **40**: 2368~2376
- [12] 齐琳林, 赵思雄. 利用非常规观测资料对上海特大暴雨过程的模拟研究. 气候与环境研究, 2003, **8** (4): 417~435
Qi Linlin, Zhao Sixiong. A numerical simulation of the heavy rainfall in Shanghai using non-conventional observational data. *Climatic and Environmental Reseach* (in Chinese), 2003, **8**: 417~435
- [13] 段旭, 李英. 低纬高原地区一次中尺度对流复合体个例研究. 大气科学, 2001, **25** (5): 676~682
Duan Xu, Li Ying. A study of mesoscale convective complexes over low latitude plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (5): 676~682