

“04.6”湘西北特大致洪暴雨形成机理分析^①

刘志雄¹ 戴泽军² 叶成志¹ 李耨周² 陈 勇³

(1. 广州热带海洋气象研究所, 510080; 2. 湖南省气象台; 3. 湖南省怀化市气象局)

提 要

对湖南省西部和北部的一次特大致洪暴雨过程综合分析得出:此次特大暴雨过程的发生与对流层中低层西南急流和亚欧大陆上空维持阻塞形势密切相关。阻塞形势的维持,使得对流层中低层两个冷涡稳定少动,从而形成了东北向干冷气流,其与西南暖湿气流在湘西北地区上空形成一条东北西南向的切变线。切变线上生成的深厚的中尺度气旋的演变、发展,是特大暴雨产生的根本原因。对流层中层涡度、 Q 矢量散度及 345K 等熵面上位势涡度的由南向北发展与强降水区由南向北发展有较好的对应关系,可作为暴雨预报指标。超强散度柱、强涡度柱和陡立深厚 θ_e 耦合结构是垂直上升动力和暴雨产生和持续的重要动力机制。

关键词: 致洪暴雨 中尺度气旋 预报指标

引 言

近年来,随着计算机技术的高速发展和中尺度数值模式分辨率的不断提高,以及中小尺度二级基地资料增加,暴雨研究正在不

断深入。宇如聪、曾庆存等^[1]对雅安暴雨的数值研究表明,青藏高原陡峭地形、高原东坡边界层作用和中低纬系统的相互作用对于雅安暴雨的形成具有重要的影响。倪允琪等^[2]

^① 资助项目:科技部公益研究项目“我国南方致洪暴雨预测预警系统研究”

根据最新的梅雨锋暴雨研究成果揭示了中 β 尺度强对流系统的三维结构。齐艳军等^[3]采用双向嵌套的MM5模式对98.7特大暴雨过程进行模拟试验,在一定程度上揭示了中尺度天气系统发生发展的物理机制。赵玉春等^[4]通过对2002年7月长江中游一次暴雨中尺度天气系统分析,研究了切变线上并不深厚的中 β 尺度对流系统活动造成强降水的“造雨”机制。湘西北地区的暴雨往往是长江中下游强暴雨的先兆系统。因此,研究该地区暴雨的发生发展过程、分析研究它的形成机理,对提高相关地区暴雨的短期和临近预报水平,增强防灾、减灾的总体能力和国民经济的可持续发展都具有极为重要的意义。本文应用NCEP再分析资料和MM5中尺度数值模式输出的细网格资料对2004年6月23~25日发生在湘西北的一次特大致洪暴雨过程进行数值模拟和诊断分析,初步开展湘西北暴雨形成机理方面的研究,通过研究寻找可作为暴雨预报业务应用的预报指标,最终改进暴雨预报。

1 暴雨过程概况

受高空低槽引导的地面冷空气和中低层低涡切变的共同影响,6月22日20时~25日08时,湖南西部、北部出现了2004年入汛以来最强的一次降水过程。39个县市降暴雨,18个县市降大暴雨,2个县市降特大暴雨;湘西自治州吉首市23日08时~24日08时日最大降水量达230.2mm,该日9~10时,最大雨强高达 $91\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,其强度超历史极值。受强降水和上游来水的影响,沅水流域出现入汛以来首次超警戒水位。大范围的强降水导致暴雨中心区山洪爆发,并引发大面积群发性滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害。据统计全省共有60个县市受灾,山洪及地质灾害造成330万人受灾,因灾死亡27人,失踪27人,紧急转移安置12.1万人,直接经济损失18.34亿元。

— 62 —

2 大尺度环流特征及物理量场分析

应用NCEP资料对6月22~25日湘西北特大暴雨期间的大尺度环流形势和一些基本物理量进行分析。

2.1 阻塞形势和夏季风爆发

从22日08时~25日08时500hPa位势高度平均值(图1a)分析,在亚欧地区中高纬呈两槽两脊形势。乌拉尔山附近有阻塞高压维持并发展,巴尔克什湖以东为一宽广低槽区。我国内蒙古中部至华北有一较深的低压稳定存在,槽底南伸到 30°N 附近,青藏高原东侧多波动东传。西太平洋副高强度偏弱,脊线位于 20°N 以南,无588线出现。对流层中低层700hPa也呈现出一种类似于500hPa的环流形势。根据大范围的风矢量图和温压图分析,在我国东北部形成一稳定的温带气旋(冷涡),在(图1b)上为一正涡度中心,川东、贵州、云南、长江中下游地区为正涡度区,把干冷空气从我国东北地区上空携带到湘西北上空。

在赤道、 70°E 附近维持一稳定的反气旋,其西北部存在一风速较大的越赤道气流;另一越赤道气流位于 90°E 附近,这两股越赤道气流合并一股强的西南气流,穿越中印半岛上空,在我国形成一条西南急流带,与位于 43°N 、 112°E 稳定维持的温带气旋西南部的西北气流构成一条深厚的辐合带,有利于梅雨锋的建立并维持。此次特大暴雨就发生在

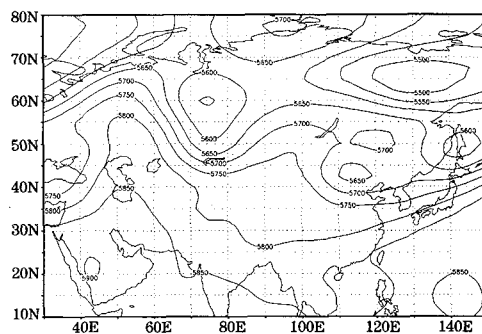


图1a 2004年6月22日08时~25日08时
500hPa位势高度平均值(单位:dagpm)

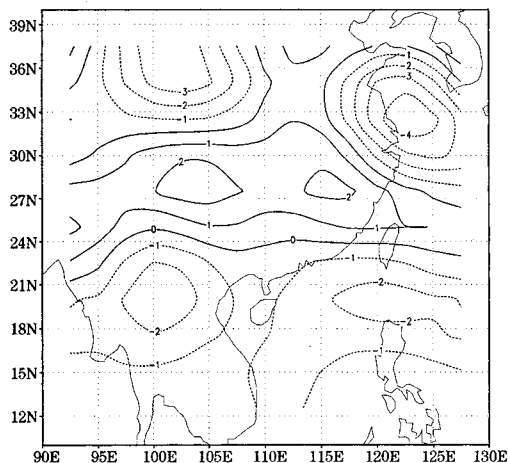


图 1b 2004年6月22日08时~25日08时
700hPa 涡度平均值(单位: $10^{-5} s^{-1}$)

两股性质不同的气流形成的辐合区中,西南暖湿气流向湘西北地区输送了充沛的水汽和不稳定能量,并不断与冷空气交绥,为湘西北暴雨的产生提供了充沛的动力和水汽条件。

2.2 水汽辐合和强上升运动

从22日08时~25日08时850 hPa的平均水汽辐合场(图1c)分析,在湘西北地区存在一条明显的水汽辐合带。结合中尺度雨团分析可知,强水汽辐合带位置的移动始终与强降雨区相伴。从水汽辐合的层次分布分析,湘西北上空的水汽辐合区从对流层低层

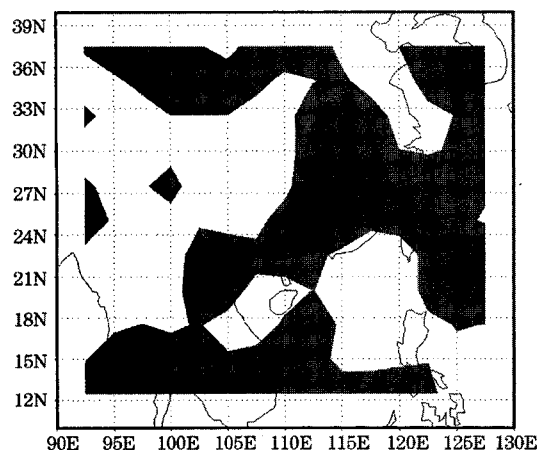


图 1c 2004年6月22日08时~25日08时850hPa
的水汽辐合散度(阴影为水汽辐合)

一直伸展到对流层顶,维持时间较长,表明深厚的强水汽辐合,为特大暴雨的产生提供了必要的水汽条件^[5]。

从(图1d)上分析,从22日08时~25日08时,湘西北地区存在强上升运动,上升气流越强,低层辐合越强,水汽辐合量增大,必然形成强暴雨中心。

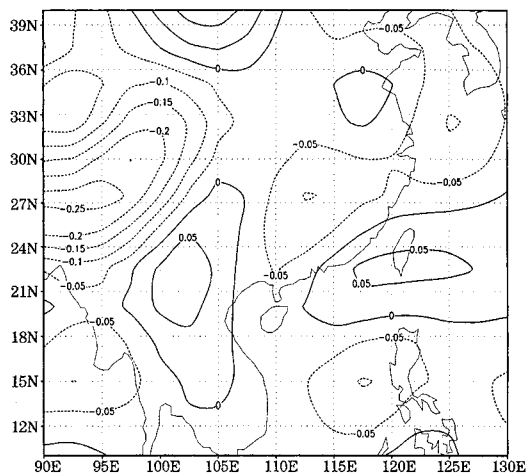


图 1d 2004年6月22日08时~25日08时
700hPa 垂直速度(单位: $Pa \cdot s^{-1}$)

3 中小尺度天气系统特征分析

中小尺度天气系统特征分析所用资料为MM5中尺度数值模式输出资料。

3.1 辐合线上的中小尺度气旋与暴雨演变的关系

由于西南低空急流加强,促使急流核由南向北移动,导致辐合线上中小尺度气旋的演变、发展,中 β 尺度涡旋为此次特大暴雨的直接影响系统。从对流层中低层风场(图2)分析:23日02时,对流层中低层西南气流加强,南风强度加大,在 $25^{\circ}N$ 、 $111^{\circ}E$ 附近出现了一个风速大于 $25.8m \cdot s^{-1}$ 的急流核,急流核的东北部出现了一条明显的风速辐合线,在辐合线上出现了两个60km左右的中 β 尺度气旋,分别位于 $25^{\circ}N$ 、 $109^{\circ}E$ 、 $26^{\circ}N$ 、 $111^{\circ}E$,中心涡度值达 $30 \times 10^{-5} s^{-1}$,具有较强的旋转性,广西东北部产生了较强降水;05

时,西南急流明显加强,大于 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流中心从 20°N 、 107°E 连续到 26°N 、 114°E 。在 108°E 、 26°N 附近,出现了 $34.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流核,在 109°E 、 26°N 产生一个中心涡度值达 $80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 强辐合中心;08 时,大于 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流核进一步向东北方向移动,其分裂出的急流核与西北气流大值中心产生的强切变,促进了中 β 气旋的产生和发展。在 28°N 、 109°E 附近,湘西出现一个涡度为 $80 \times$

10^{-5} s^{-1} 的中 β 尺度气旋;11 时, 29°N 、 110°E 附近,即湘北上空形成涡度值为 $70 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的强中心。

在条件不稳定的大环境背景下,低层存在的相对大风核区引起的强低层辐合导致低层暖湿空气抬升到凝结高度后在浮力的作用下,空气加速向上运动,引发强烈的上升运动,水汽在空中凝结,释放凝结潜热,产生对流降水。由此可见,水平风速的加强引起了

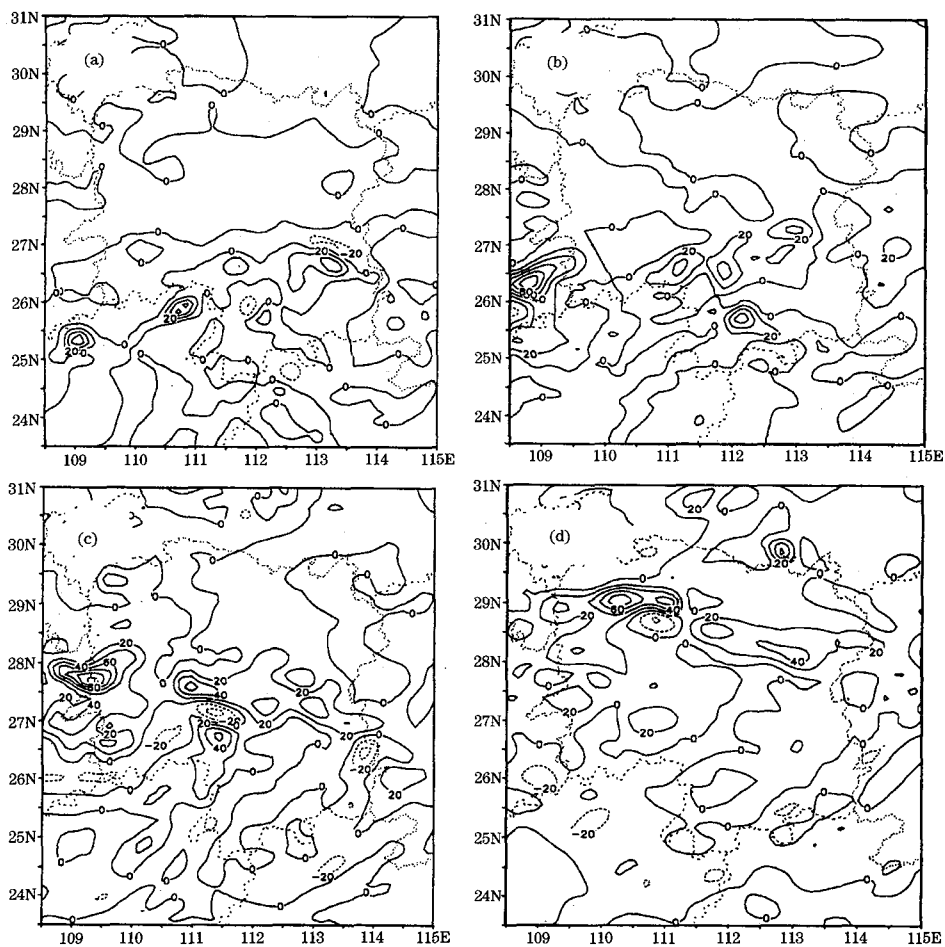


图2 850hPa等压面上6月23日02(a)、05(b)、08(c)、11时(d)的涡度分布(单位: 10^{-5} s^{-1})

中低层强辐合,中尺度气旋是中低层强辐合和潜热释放的产物,中尺度气旋持续演变、增强和发展,是大暴雨发生的根本原因^[6]。

3.2 Q 矢量散度与暴雨演变的关系

从 Q 矢量散度随时间变化分析可知(图略),强降水与 Q 矢量的空间分布有较好对应关系。在暴雨发生的区域,对应高空等压面上常常出现 Q 矢量散度正负大值中心,且

正中心与负中心相间出现,中心尺度小于100km, Q 矢量散度大值中心从对流层底层伸展到对流层顶。根据 Q 矢量与次级环流和上升运动的关系,特大暴雨产生的天气系统中存在着多个中小尺度的次级环流,垂直上升运动和下沉运动交替出现,有利于强降水区内上升运动的维持。

22日23时,850hPa等压面上 Q 矢量散度分布图上没有出现明显的中心结构;23日02时,在 25°N 、 108°E 附近850hPa等压面上出现了大片散度大值区,其分布特点为:正、负值区域为带状结构,正负中心相间出现。从不同等压面上 Q 矢量散度分布分析,正负 Q 矢量散度中心相间分布的特点一直延伸到对流层顶,此时对应着广西北部的强降水;08时 Q 矢量散度中心向北发展到 26°N 、 108°E 附近,但强度略有减弱, Q 矢量散度中心分布区域由几条带状分布转为圆形分布, Q 矢量散度中心沿圆形呈现出正负相间的特点,这可能是由于西南、西北气流加强产生扰动,切变线发生扭转,向中尺度气旋演变的结果,此时湘西北强降水开始;11时, Q 矢量散度中心再次向北发展到 27°N 、 110°E 附近,值得注意的是在 29°N 、 109°E 附近出现了两个 Q 矢量散度辐合中心,从同层次的风场分析,正是西北干冷气流与西南暖湿气流汇合形成中尺度气旋发展的区域,与湘西北最强降水时段相对应。

由上分析可知: Q 矢量散度中心有一个明显自南向北的发展过程,在其发展过程中,对应着相应区域的强降水过程。可见, Q 矢量散度中心的强弱和移动方向对暴雨的发展具有较好的预报指示意义。

3.3 等熵面上位势涡度与暴雨演变的关系

从345K等熵面位势涡度随时间演变(图略)分析:23日02时,位势涡度主要分布在 25°N 、 107°E ~ 26°N 、 117°E 之间,呈带状分布,涡度中心呈现出一正一负对偶结构,这

是中小尺度强气旋结构在等熵面上位势涡度的反映;05时,在 25°N 、 107.5°E 、 25°N 、 107.5°E 出现了正负位涡中心的耦合结构,中心开始向北面扩展,范围有明显增大;08时,在湘西(27°N 、 110.5°E)出现了正负位涡中心的耦合结构,此时,湘西强降水开始;11时,在湘西北(29°N 、 110.5°E)开始出现正负位涡中心的耦合结构,此时,湘西北强降水开始;由等熵面上位势涡度守恒原理及以上分析,等熵面上位势涡度存在一个由南向北的发展过程,对应着强降水自南向北的发展过程。可见,等熵面上位势涡度随时间演变对强降水落区亦具有较好的预报指示意义。

3.4 特大暴雨中尺度气旋的结构特点和动力机制

3.4.1 超强散度柱、强涡度柱耦合

分析对经过中尺度气旋中心与垂直速度相应的散度和涡度所做的经向剖面图(图3a、3b)可知,雨带中强烈发展的中 β 尺度气旋对应着一个狭窄的、从地面伸展到对流层顶的正负涡度柱耦合发展的复杂结构,这种结构有利于暴雨的维持和发展。

高空800hPa在 27.5°N ~ 28°N 附近存在强度为 $80 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的强涡度中心,强涡度柱伸展到对流层顶。在同纬度散度经向高度剖面图上,在对流层中低层(900~500hPa)存在 $-60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的负散度中心,在对流层顶200hPa存在 $90 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正散度中心。强涡度柱与强散度柱出现在同一纬度,伸展到同一高度,在湿中性条件下,垂直运动的发展与低层辐合高层辐散相平衡,形成较稳定的上升气流。

3.4.2 中尺度次级环流的形成和强上升运动

由穿过中 β 尺度气旋发生区所做的经向速度、垂直速度经向剖面图(图3c实线所示)分析: 26°N ~ 28°N 之间、 30°N ~ 28°N 之间存在两支中小尺度经向环流圈,南北两支

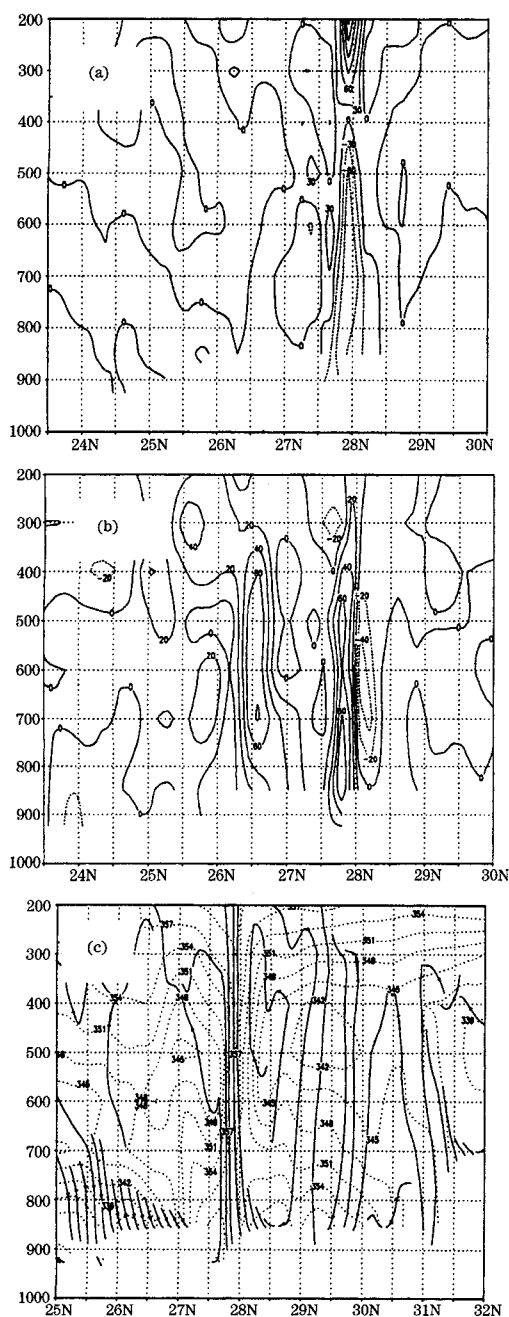


图3 2004年6月23日08时散度(a,单位: $10^{-5} s^{-1}$)、涡度(b,单位: $10^{-5} s^{-1}$)、 θ_e (c,点线,单位:K)经向垂直剖面

和径向环流(c,实线)经向垂直剖面。环流圈在 $28^{\circ}N$ 相遇,形成强上升运动。根据同时次的垂直运动速度图显示,垂直运动中心速度达到 $2m \cdot s^{-1}$ 。由于两支经向次级

环流的形成,两股上升气流在湘西北地区合并形成强烈的上升运动。

另外,分析 θ_e 的经向剖面图(图3c虚线所示)可知:23日08点,在 $28^{\circ}N$ 存在一个350K的暖中心,这种 θ_e 大值区尺度在110km左右,水平梯度很大。暴雨区 θ_e 是陡立的,鞍型分布更为狭窄,陡立区存在强的垂直运动,是涡旋发展的重要区域。由于等熵面出现倾斜,根据文献中关于倾斜涡度发展理论的探讨,当气块沿倾斜的等熵面运动时,利用全型垂直涡度方程,可知陡立区容易出现涡度的倾斜发展^[7]。同样,在暴雨发生的区域,等熵面出现明显的下凹,对流层中层,由于潜热释放,产生了大量的位势涡度,由于等熵面出现下凹,有利于对流层中层位涡下传,从而导致对流层低层涡度的维持和发展。暴雨过程的强盛期对应着垂直方向深厚的等 θ_e 区,这种 θ_e 垂直结构与气旋的发生发展密切相关^[8]。

4 结语

应用NCEP再分析资料和MM5中尺度数值模式输出的细网格资料对2004年6月23~25日发生在湖南省北部和西部的一次特大暴雨过程进行数值模拟和诊断分析,初步分析结果如下:

(1) 此次特大暴雨是在中高纬稳定的阻塞形势和越赤道气流加强导致夏季风进一步爆发条件下产生的。深厚的正涡度、强水汽辐合和强上升运动,为特大暴雨的产生创造极为有利的动力和水汽条件。

(2) 其主要影响系统是由西南急流上急流核加强导致辐合带上产生的中小尺度气旋演变、发展产生的。由于西南急流上急流核加强,中尺度辐合线上出现中小尺度气旋,在涡度上表现为强的涡度中心、等熵面位势涡度上表现出位涡正负中心耦合结构、在 Q 矢量散度场上表现出明显的辐合上升气流结构。对流层中层涡度、 Q 矢量散度、等熵面

位势涡度的发展、演变与强降水落区有较好的对应关系,可作为暴雨预报的指标。

(3) 涡度和散度有利的耦合形势,是中小尺度气旋发展的重要动力因素。南北两支经向环流的产生,是中小尺度气旋深厚发展的产物,另一方面它又促进气旋的发展,对暴雨的发生具有加强作用。超强散度柱、强涡度柱和陡立深厚 θ_{se} 耦合结构是垂直上升动力和暴雨产生和持续的重要动力机制。

(4) 强对流运动产生的潜热释放促成了 θ_{se} 等值面发生倾斜和对流层中低层位涡的急剧增加。同时,对流运动强烈发生区域等熵面具有明显的下凹特征,等熵面上的位涡下滑和倾斜涡度发展是导致中 β 尺度气旋涡度急剧发展的主要因素。

参考文献

- 1 宇如聪,曾庆存.一个 η 坐标有限区域数值预报模式对1993年中国汛期降水的实时预报试验.大气科学,1994,18(3):284~292.
- 2 倪允琪,周秀骥.我国长江中下游梅雨锋暴雨研究的进展.气象,2005,31(1):9~12.
- 3 齐艳军,程明虎,仪清菊.98.7湖北特大暴雨的天气分析与降水模拟.气象,2004,30(3):12~16.
- 4 赵玉春,王仁乔,郑启松等.长江中游一次暴雨中尺度天气系统的观测分析.气象,2003,29(11):14~19.
- 5 周雨华,黄培斌,刘兵等.2003年7月上旬张家界特大暴雨山洪分析.气象,2004,30(10):38~42.
- 6 赵玉春,王叶红.“7.22”长江中游暴雨中尺度天气系统的数值模拟与分析.气象,2005,31(1):13~18.
- 7 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁等.湿位涡和倾斜涡度的发展.气象学报,1995,53(4):378~405.
- 8 叶成志,刘志雄,陈江民等.一次中 β 尺度低涡引起的特大暴雨过程数值模拟与分析.天气预报论文集.北京:气象出版社,2004:33~38.

Mechanism Analysis of “04.6” Heavy Flooding Rainfall in North-West Region of Hunan Province

Liu Zhixiong¹ Dai Zejun² Ye Chengzhi¹ Li Nouzhou¹ Cheng Yong³

(1. Guangzhou Institute of Tropical & Marine Meteorology, CMA, 510080;

2. Hunan Meteorological Office, 3. Huaihua Meteorological Office, Hunan Province)

Abstract

The heavy rain in north-west region of Hunan province is analyzed. Result shows as follows. The heavy rain is related to the southwest jet at the low and middle troposphere and the block in the high latitude area of the Eurasia. The maintaining block keeps two cyclones motionless at the middle troposphere, so the northeast dry and cold air develops and meets the warm and wet air from southwest region, and the northeast and southwest shear line came into being. Evolution and development of the deep mesoscale cyclone on the shear line is the reason why the rain becomes so heavy. As the big vorticity and the big diver of Q -vector in the low troposphere and the potential vorticity on 345K isentropic surface move from south to north, the heavy rain begins from south to north, so this characteristic can be used as the sign of forecasting heavy rain. The coupling of the strong diver and vorticity cylinder and the steep θ_{se} structure are the fundamental dynamic mechanism of vertical motion and the heavy rain cause and persistence.

Key Words: heavy flooding rainfall mesoscale cyclone the sign of forecast