

引起“碧利斯”强降水的 MCS 数值模拟研究

钱传海¹ 路秀娟² 陈 涛¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国科学院大气物理研究所)

提 要: 利用多种观测资料和数值模拟,对 0604 号强热带风暴碧利斯登陆后在湖南、广东等地引发强降水的中尺度对流系统活动特征进行了分析。结果表明,在“碧利斯”登陆后西行减弱过程中,由于西南季风的持续维持,“碧利斯”减弱后的低压环流中仍保持有强降水所需的充足水汽供应,造成局地强降水的 MCS 十分活跃。ARPS 模式较好地模拟了 7 月 15 日发生在湖南南部的中尺度降雨过程,并揭示出“碧利斯”变性过程中,环境风场垂直切变结构强迫的次级环流决定了 MCS 活动特点,同时利用湿 Q 矢量诊断了低压次级环流的垂直运动特征。造成这次强降水过程的 MCS 在台风低压切变线以北的偏北潮湿气流中生成发展,低层偏北急流造成的动力辐合效应、对流不稳定性层结的建立是 MCS 在湖南南部迅速发展的重要原因。

关键词: 台风暴雨 中尺度对流系统 数值模拟 垂直切变

Numerical Simulation of Heavy Rainfall Associated with Severe Tropical Storm Bilis

Qian Chuanhai¹ Lu Xiujuan² Chen Tao¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The characteristics of meso-scale convection systems (MCS) associated with the remnant of the downgraded severe tropical storm Bilis are studied using various kinds of observation data and numerical simulation. During Bilis's going into inland of southern part of China, the MCS developed quickly and kept active due to the maintenance of southwest monsoon. A high resolution simulation by ARPS model gave almost the same rainfall patterns with the observation. Analysis was carried out using modeling data for studying the 3-dimension structure and evolution of the MCS. During the downgrading process of Bilis, obvious baroclinic structure generated, and the secondary circulation induced by vertical shear of environment flow determined the MCS activities. The moist Q vector was also applied for the research of vertical motion of Bilis. MCS in the southern Hunan Province almost developed

in north of horizontal wind shear line, which was under constrains of the low level convective instability conditions and northerly jet convergence.

Key Words: typhoon heavy rain MCS numerical simulation vertical shear

引 言

热带气旋登陆后,如果强度减弱缓慢、生命史长,经常会导致局地持续性暴雨,造成严重的灾害。以往的研究中,针对登陆热带气旋的变性结构特征以及能够长久维持的天气尺度环境条件研究较多^[1-3];但由于观测条件的限制,对台风中的中尺度对流系统发展演变的讨论相对较少,尤其对登陆变性后的台风中的中尺度对流系统(MCS)结构和发生发展的机制研究更加少见。随着观测技术的进步,卫星、雷达等现代观测工具能够较详细揭示台风的中尺度结构,先进的中尺度数值模式也成为分析 MCS 结构和演变的重要工具。如孙建华等^[4]分析表明,对流层低层的偏南风低空急流对 MCS 的发展具有重要作用。李江南^[5]指出,维持少动的台风倒槽和嵌入其中的中小尺度系统相互作用造成暴雨发生、发展,并认为非地转作用触发了暴雨中尺度系统上升运动,解释了用 Q 矢量散度场判断台风暴雨落区的动力学机制。

0604 号强热带风暴碧利斯是一个较为特殊的台风。相对来说“碧利斯”登陆时的强度并不是很强,但碧利斯减弱后的低压环流在江南和华南维持时间之长、降水强度之大、影响范围之广在历史上极为少见。“碧利斯”在我国南方造成的强降水引起了众多气象学者的关注,他们主要从大尺度环流背景、水汽输送、热力条件、地形影响等分析了这次特大暴雨的成因^[6-10]。叶成志等^[11]用数值模拟试验和诊断分析方法对这次致灾暴雨过程的天气气候背景、影响因子和形成机理进行了研究。余锦华等^[12]研究了“碧利斯”登陆过程

中降水分布的非对称结构,指出环境垂直风切变、地形和下垫面因子对其非对称降水结构影响的相对重要性。对直接造成台风暴雨的中尺度对流系统的空间结构、演变特征等研究所涉不多。因此本文利用非常规观测并结合中尺度数值模拟,研究造成“碧利斯”强降水的 MCS 活动特征,初步探讨变性台风中 MCS 的发展演变的物理机制,以期进一步提高对台风中尺度暴雨结构和机理认识。

1 降水、环流与 MCS 活动分析

2006 年 7 月 14 日 12 时(北京时,下同),0604 号强热带风暴碧利斯在福建省霞浦沿海登陆,登陆时中心附近最大风力 11 级,登陆后台风中心沿西北偏西方向行进,15 日下午在赣西南减弱为热带低压。受“碧利斯”及其减弱后的低压影响,7 月 14—18 日,我国南方大部地区出现了大暴雨和特大暴雨(图略),其中湖南永兴、广东博罗、福建长泰等地降水量达 450~600mm。强降水导致湖南南部和广东北部山区出现严重洪涝、泥石流、山体滑坡等地质灾害,并造成严重人员伤亡。

逐日雨量分析表明,此次降水过程最强降水出现在 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时(图 1),强降水主要分布在两个区域,一个位于湘粤交界处,其中湖南郴州、广东连县附近 24 小时降水量超过 200mm;另一区域位于粤东和闽南沿海地区,降雨区呈现带状分布。从 NCEP/NCAR 再分析资料 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时 500hPa 平均形势场和 850hPa 水汽通量场(图 2)上看,通过来自低纬度西南季风的水汽输送,“碧利斯”台风低

压环流整体仍保持着较充沛的水汽来源,这是产生局地强降水的一个必要条件。

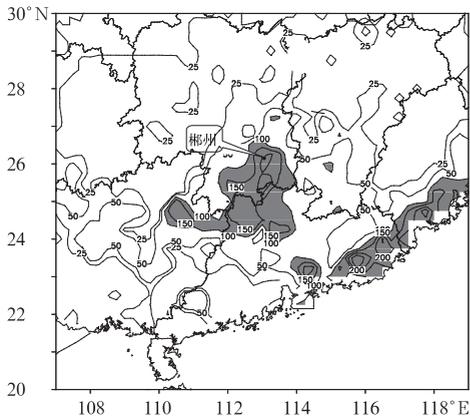


图 1 2006 年 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时降水量
单位:mm,阴影区降水量大于 100mm

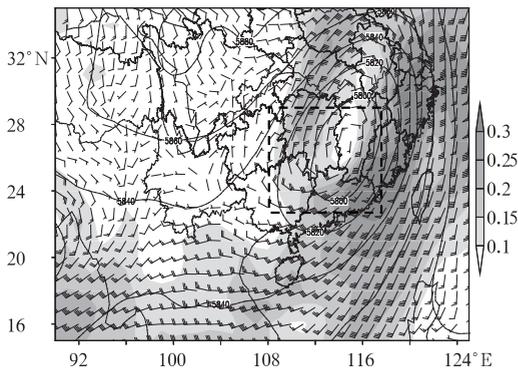


图 2 2008 年 7 月 15 日 500hPa 平均高度场(单位:gpm)以及 850hPa 平均风场,阴影区为 50hPa 水汽通量(单位: $10^2 \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
黑框为计算平均环流所取区域

从地面自动站的逐小时雨量分布看,在 15 日湖南南部不断有自北向南移动的中尺度雨团活动(图略)。从 15 日 08 时至 16 日 08 时暴雨中心郴州自动站的逐小时降水量(图 3a)演变看,第 1 次降水过程发生在 15 日 10—15 时,其中 13—14 时 1 小时降水量达到 44mm;第 2 次过程发生在 16 日 02—08 时,强度相对弱一些。由于 15 日中午的降水

过程较强,因此以此降水过程作为重点分析。图 3b 为 15 日 08—14 时 6 小时累积降水量分布,强降水区主要分布在台风环流的偏南象限,其中湖南南部和广东北部 6 小时降水量普遍在 50mm 以上,郴州站 6 小时降水量达到了 96mm,广东中部还出现了局地的强降水中心。

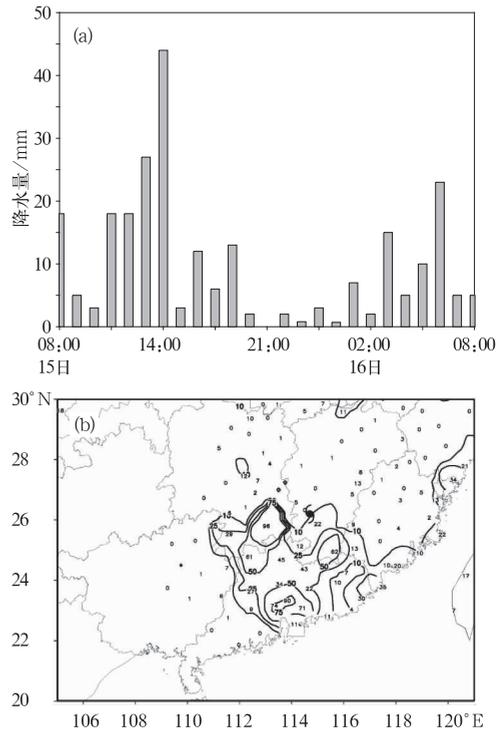


图 3 2008 年 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时郴州自动站逐小时降水量(a)及 15 日 08—14 时 6 小时累积降水量分布(b)
(单位:mm)

高分辨率的卫星图像是分析 MCS 活动特征的重要工具^[13]。从 FY-2C 静止卫星的 TBB 资料(分辨率 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$)分析表明(图 4),15 日对流活动旺盛的区域主要分布在台风低压的偏南部分,云顶温度低于 -32°C 的中- α 、中- β 尺度对流系统(α -MCS, β -MCS)十分活跃,台风低压环流 MCS 非对称分布的特征十分明显。

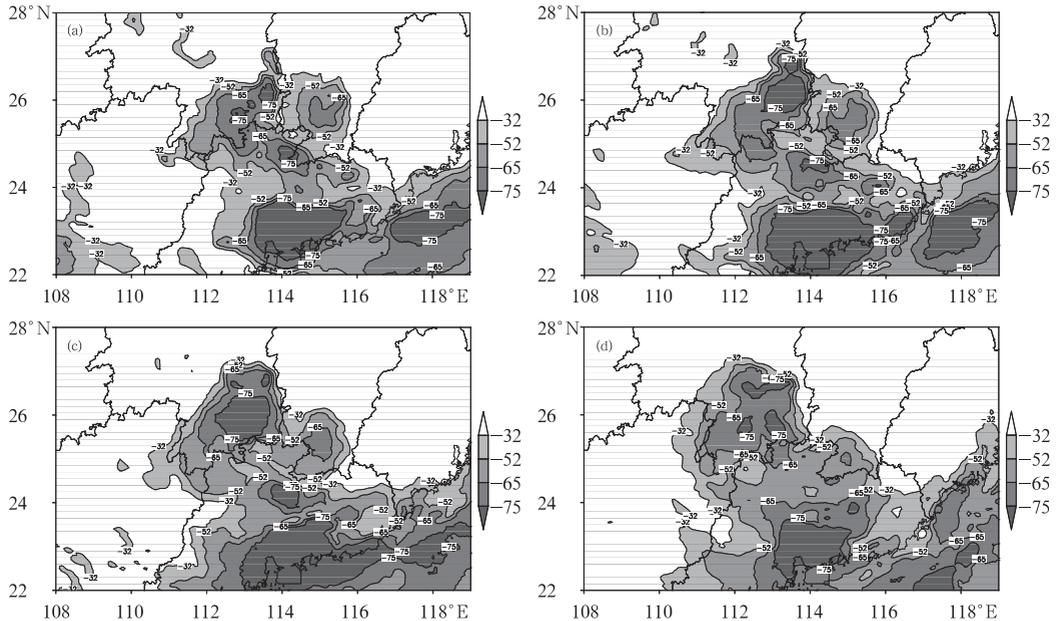


图 4 2008 年 7 月 15 日 FY-2C 云顶红外亮温

(a) 08 时; (b) 11 时; (c) 14 时; (d) 17 时; 阴影区, 单位: $^{\circ}\text{C}$

15 日 08 时, 湖南南部有一个云顶亮温低于 -52°C 的中- α 尺度的对流云团, 在云团内部存在一系列中- β 尺度、云顶亮温低于 -75°C 的对流云塔。到 15 日 11 时, 该云团迅速发展, 云顶亮温低于 -75°C 的面积不断扩大, 其几何中心位置略有南移, 在云团后方不断有新的中- β 尺度云团并入到这个 α -MCS 当中, 整个对流系统保持着动态稳定。到 14 时, 云顶亮温低于 -75°C 的面积又有进一步扩大, 在云团北侧仍有若干 β -MCS 逐步并入, MCS 发展到最旺盛的阶段; 此后 MCS 逐渐减弱, 到 15 日 17 时, 云顶亮温的低值中心分裂为 3 个, 整个云团西移消散。该 MCS 的生命史长达 10 个小时左右, 正是这个 MCS 的活动造成了郴州地区第 1 次较强的中尺度降水过程。

局地迅速发展、长生命史的 MCS 是直接造成“碧利斯”强降水的中尺度影响系统, MCS 的发生发展与变性台风环流的热力、动力特征密切相关。利用高分辨率的数值模拟

资料, 可进一步分析该 MCS 的结构及其发生发展的物理机制。

2 ARPS 模拟方案与模式降水分析

利用 ARPS 中尺度模式^[14]对 2008 年 7 月 15 日发生在湖南、广东的暴雨过程进行数值模拟。模式中心位于 25°N 、 113°E , 格点数 259×259 , 水平格距 6km, 积分时间步长 15s, 背景场选用 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 NCEP/NCAR 分析场, 积分时间从 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时, 利用 ADAS (ARPS Data Analysis System) 进行 12 小时一次的探空和 3 小时一次的地面常规和加密观测资料的同化分析, 生成模式初始场和边界条件。积云参数化方案采用 WRF new Kain-Fritsch 方案^[15], 云微物理方案使用 WSM6WR 方案^[16]。

ARPS 模式模拟的 7 月 15 日 24 小时降水量分布 (图 5a) 与实况较一致 (图 1), 100mm 以上的大暴雨区分别位于湘粤交界

处以及粤东、闽南沿海地区,其中湘粤交界处的降水中心超过 250mm,与观测较为接近。图 5b 为 ARPS 模拟的 15 日 08—14 时的 6 小时累积降水量,强降水区分布与图 3b 实况较为接近,在郴州附近,模式模拟的最大降水量在 100mm 以上,与实况基本一致。但对于广东北部的降水区,模式模拟偏强。

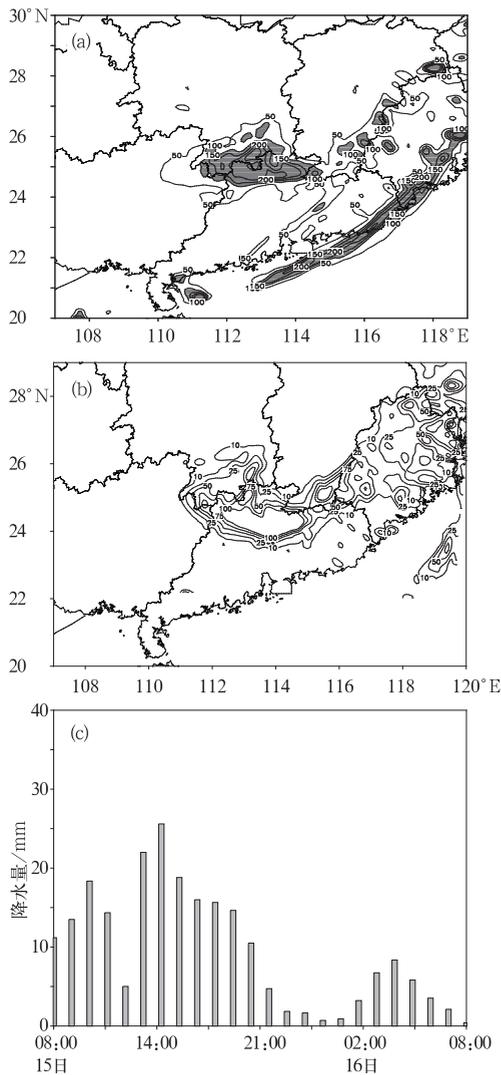


图 5 ARPS 模拟的降水量(单位:mm)

(a). 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时

(b). 7 月 15 日 08—14 时

(c). 7 月 15 日 08 时至 16 日 08 时对应郴州附近 5 点算术平均的降水量演变

图 5c 为 ARPS 模拟的郴州站附近 5 点平均的逐小时降水量。从积分开始后,模式降水量迅速增长,第 1 次降水峰值出现在 15 日 15 时前后,与实况最强降水出现的时间基本一致,但峰值降水量较实况偏小。此后模式降水开始减少,到 16 日 03 时后降水又开始增长,峰值出现在 16 日 05 时前后,但相对于第一次降水过程中的峰值要小很多。ARPS 模式模拟降水的时空分布与实况较为一致,基本上反映了 7 月 15 日湖南南部的降水过程。进一步比较模式风场与实况,模拟的台风低压位置演变与实况相当接近(图略),总体来说数值模拟结果较为可靠。利用高时空分辨率的模式资料,可深入分析台风低压中 MCS 的活动特征及其物理机制。

3 MCS 特征分析

3.1 MCS 的空间结构

图 6a 为模式模拟的 15 日 11 时 700hPa 风场,台风低压中心位于江西东部,在台风低压西南象限,偏北风与偏西南风构成一条较明显的风向切变线,切变线附近有多个中- α 、中- β 尺度对流系统,模拟雷达回波强度在 30dBz 以上。除此之外,在湖南南部的偏北气流中也有正在发展中的 MCS,其中存在着若干 40dBz 以上的强回波中心。1 小时后(图 6b),该 MCS 的几何中心向南有所移动,几个强回波中心合并在一起,其中最强的对流单元的回波强度增长到 45dBz 以上。到 13 时,MCS 发展到旺盛阶段,45dBz 以上的回波面积较上一小时有显著扩大,这个较强的 MCS 带来了模式中湖南南部较强的降水过程,与自动站观测的第 1 次较强的 MCS 发展带来的降水过程十分吻合。从 700hPa 风场的演变看,这个 MCS 是在切变线以北的偏北气流中发展增强的,虽然在风场上的风向辐合并不很清楚,但从图 6d 表明的

700hPa 风速上看,由于偏北急流的存在,黑色虚线圈内风速变化造成的辐合、气旋性切

变仍然为湖南南部地区 MCS 的发展提供了有利的动力条件。

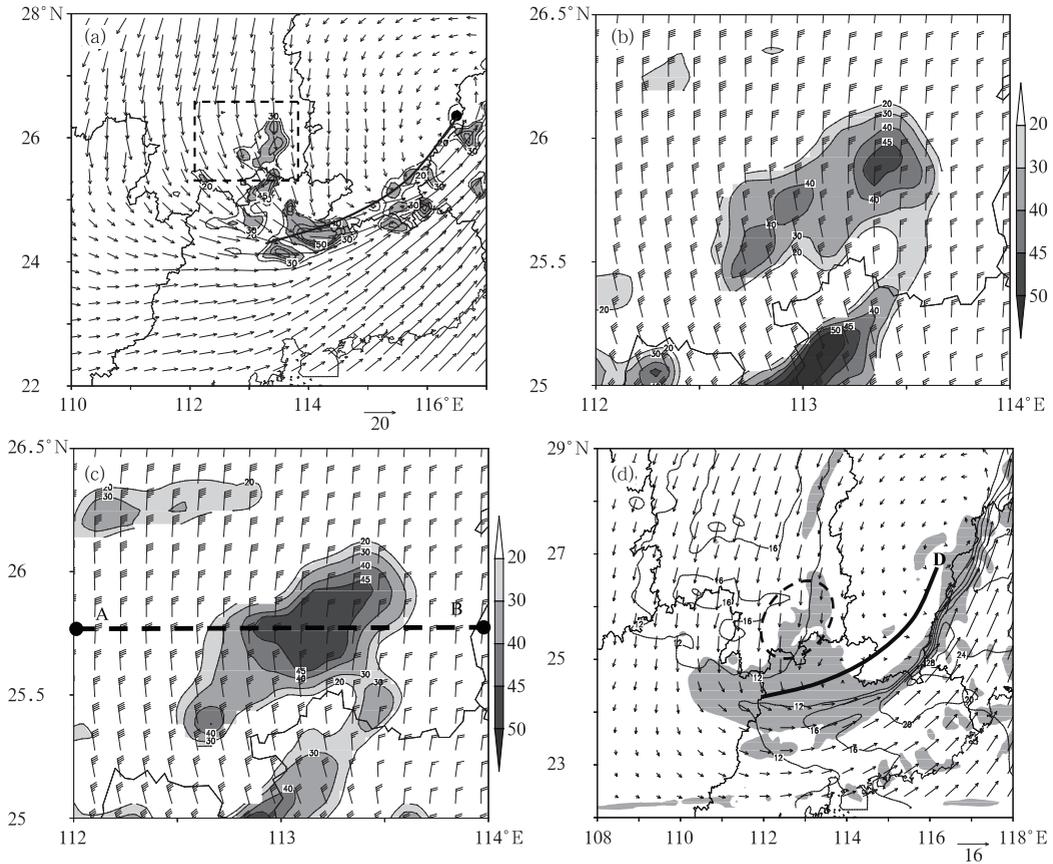


图 6 2008 年 7 月 15 日 700hPa 流场(风场)与回波分布

阴影区反射率因子 $> 30 \text{ dBz}$, 粗实线为 700hPa 切变线; 细实线为风速等值线,

(a). 11 时流场与模拟回波, (b). 13 时, (c). 12 时模拟风场与回波, (d). 13 时流场; 阴影区降水率 $> 15 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$

图 7a 为穿过图 6c 上 AB 线的垂直剖面, 在 113°E 附近存在一个较强的上升运动中心, 对流层中层的上升速度可达 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直上升运动可达到 8km 高度。 113°E 附近低层 2km 高度左右的经向风速在 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 形成一个偏北急流中心, 构成低层急流的偏西北风与弱偏东风在低层形成辐合。从水平散度的垂直剖面上看, 低层偏北急流产生的风速切变对 MCS 的低层辐合有重要贡献, 同时在对流层的中高层有比较明显的辐散, 这种低层辐合、高层辐散的散度结构对 MCS 的发展十分有

利^[17]。然而在台风低压环流内的中低层水平风场上, 气旋性切变导致的低层辐合是普遍存在的, 为何 MCS 始终在“碧利斯”低压环流的偏南一侧发展旺盛, 需要进一步分析。

3.2 MCS 发展过程中的动力条件和热力条件

“碧利斯”登陆后, 原本近似对称的正压环流结构向不对称的斜压结构转变, 台风低压的结构变得非常复杂。在 7 月 15 日的暴雨过程中, MCS 在台风低压的偏南象限区中较为活跃, 已有研究表明 MCS 的活动与环境风

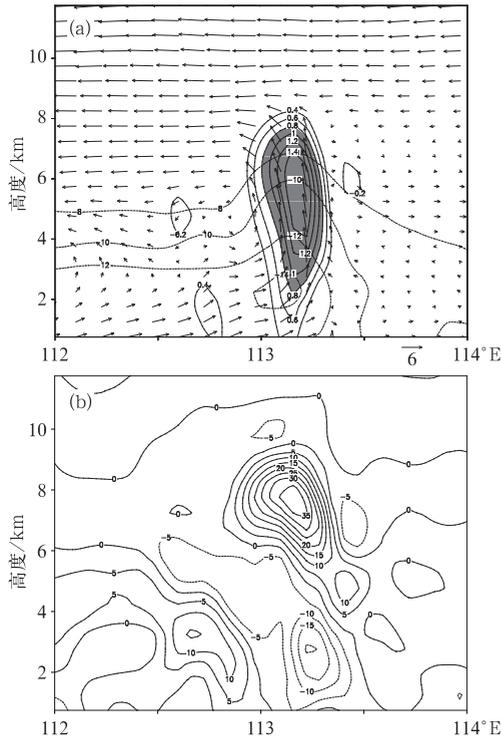


图 7 过图 6c 中 AB 线所截剖面上的垂直环流
 (a, 箭头为 $u-w$ 的合成, 其中 w 扩大
 10 倍, 阴影区上升速度 $> 0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和径向
 风速(a, 虚线)及散度场(b, 单位: 10^{-5} s^{-1})

场垂直切变有密切关系^[18], 因此首先分析“碧利斯”风场的垂直切变特征。

图 8 为 15 日 14 时利用模式资料以台风低压中心 ($26.5^\circ\text{N}, 114.5^\circ\text{E}$) 为中心, 正负 4 个经纬度范围内的 (范围如图 2 中虚线黑框所示) 区域平均风场垂直切变。图 8a 中 \vec{OA} 为模式 1000hPa 实际平均风矢量, \vec{OC} 为 100hPa 平均风矢量, \vec{AC} 即为 1000~100hPa 层之间的平均风垂直切变矢量, 平均风垂直切变指向台风低压的西南象限, 大小为 $11.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。 \vec{OB} 为模式 700hPa 的平均风矢量, 在 1000~700hPa 之间平均风场随高度顺转, 表明台风低压底层受暖平流控制, 700~100hPa 间平均风向逆时针旋转, 说明台风低压中已存在比较深厚的冷平流。图 8b 中虚

线连线点为同一区域的各个垂直层次的平均地转风, 其随高度的变化与实际风基本一致, 低层受暖平流控制, 中高层受冷平流控制, $\vec{G_1G_2}$ 矢量为 1000~100hPa 间的平均热成风, 大小为 $13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由于实际风的垂直切变小于地转风切变, 为取得地转平衡, 在顺着垂直切变方向的左侧必须产生上升冷却, 右侧有下沉增温, 从而加大垂直切变两侧的温度梯度, 并通过辐合辐散和质量守恒构成一个完整次级环流圈。受到中纬度斜压大气的影响, 登陆台风向斜压结构转变的过程中产生了热力、动力不平衡, 热成风偏差强迫是产生次级环流的重要原因。

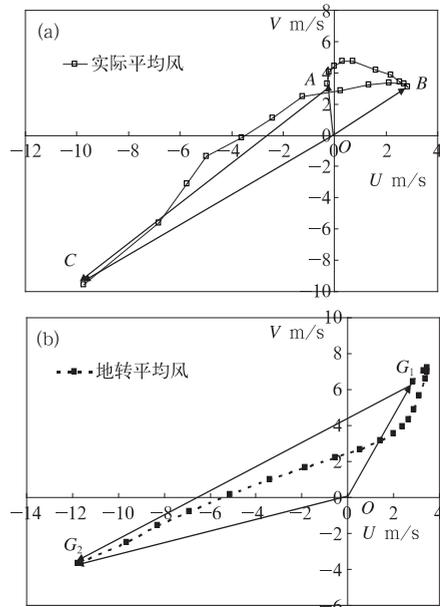


图 8 2008 年 15 日 14 时以台风低压中心 ($26.5^\circ\text{N}, 114.5^\circ\text{E}$) 为中心, 正负 4 个经纬度范围内区域平均风场垂直切变
 (a) 实际风; (b) 地转风

垂直切变强迫的次级环流一定程度上解释在台风低压环流偏南象限的 MCS 比较活跃的原因, 而湿 Q 矢量综合反映了风场的三维切变和热力结构^[19], 可直观地诊断台风次级环流导致的垂直运动分布。略去了加热项的湿 Q 矢量可写为:

$$Q_x = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial x} \cdot \nabla \theta_e \right]$$

$$Q_y = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial y} \cdot \nabla \theta_e \right]$$

其中, u, v 为实际风的两个分量, θ_e 为相当位温, $h = \frac{R}{p} \left(\frac{p}{1000} \right)^{R/c_p}$, 余为惯用符号。 ω 方程可写为:

$$\nabla_h^2 (\alpha \omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2 \nabla \cdot \mathbf{Q}$$

若 $\nabla \cdot \mathbf{Q} < 0$, 则有 $\omega < 0$, 即 \mathbf{Q} 矢量的辐合区对应上升运动。

图 9a 为 15 日 14 时模式资料计算的湿 \mathbf{Q} 矢量及其散度, 图中从台风中心出发的矢量箭头代表台风环流空间平均的垂直切变, 在矢量偏南侧有较强的 \mathbf{Q} 矢量辐合区, 尤其

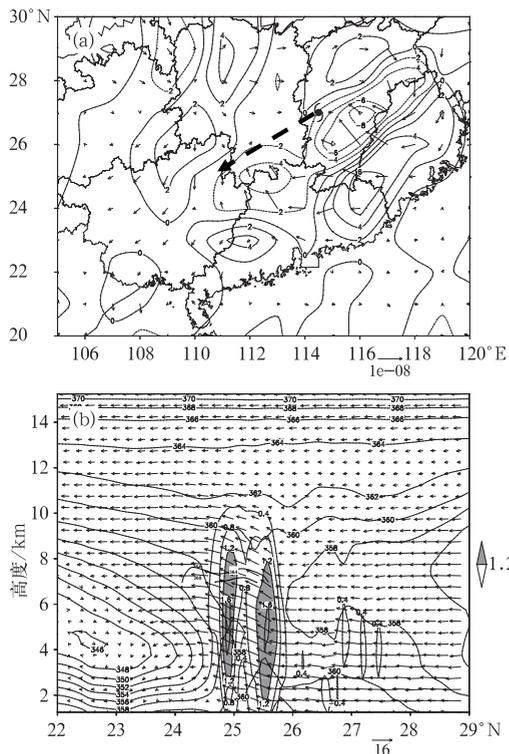


图 9 2008 年 7 月 15 日 14 时 700hPa \mathbf{Q} 矢量(a, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$)及其散度(a, 单位: $10^{-14} \text{s}^{-3} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 其中黑色粗断线矢量表示环境场垂直切变的方向)和沿 113.2°E 剖面上的风场、 θ_e (粗实线)和垂直速度(b, 阴影区垂直速度 $> 1.2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

是湘粤交界处的 \mathbf{Q} 矢量辐合区能够产生较强的上升运动, 与降水中心对应关系很好。在矢量以北的低压环流中多为弱 \mathbf{Q} 矢量辐散区, 对应着次级环流的下沉支, 因此降水很弱。

垂直切变强迫激发的上升运动可以触发 MCS 发展的初始上升运动, 但实际上 MCS 局地垂直运动的迅速增长与大气层结的不稳定性有更密切的关系, 相当位温 θ_e 垂直分布是衡量对流不稳定的重要物理量。在沿 113.2°E 的垂直剖面上(图 9b), 由于前期降水在高层释放了大量凝结潜热, 25~26°N 之间高层等 θ_e 线向下伸展呈漏斗状; 在对流中层 θ_e 近似直立, 表现为对流中性, 而对流层低层 23~28°E 之间 θ_e 高值区从地面向上拱起, 是对流不稳定最显著的区域, 最强的上升运动就发生在 25~26°N 之间, 两个上升运动中心构成了 β -MCS 的对流核心, 上升速度中心值在 $1.2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 高度达到 10km 左右。在 26~27°N 之间的对流层中低层, 偏北方向湿气流上的扰动也形成了若干上升运动中心, 但处在次级环流下沉支的环流背景下, 这些弱的对流并未发展起来; 但在 25~26°N 之间, 配合有利的背景上升运动, 初生对流才能够在对流不稳定的层结条件下得到迅速增强, 从而使 MCS 在湖南南部得到发展。

总体来说, “碧利斯”台风环流在湖南南部存在一定的低层辐合和气旋性切变, 同时水汽条件也十分良好, 是 MCS 得以发展的先决条件; 在变性台风环流垂直切变强迫的次级环流约束下, 湖南南部的 MCS 总是在湿不稳定条件下迅速发展, 并在向南移动的过程中增强, 导致了 25~26°N 之间湖南南部产生强降水。但湖南南部初始对流的触发机制则比较复杂, 可能与台风内的重力波活动以及下垫面的中尺度地形条件有密切关系, 这将在未来的工作中继续探讨。

4 结 论

(1) “碧利斯”台风特大暴雨的形成与大尺度的天气形势背景有密切的关系。西南季风的维持为登陆后台风低压暴雨提供了充分的水汽供应条件。

(2) 自动站降水观测资料分析表明,7月15日在湖南南部先后有2次中尺度降水过程。利用 TBB 红外云图资料分析表明,两次中尺度降水过程是由于台风低压环流中发展的 MCS 造成的。

(3) 利用 ARPS 数值模式模拟的降水过程与实况较为一致。诊断表明,“碧利斯”减弱后的低压环流在湖南南部造成了低层辐合、气旋性切变等有利于 MCS 发展的动力条件,在“碧利斯”变性低压环流垂直切变的强迫作用下,次级环流决定了 MCS 多在“碧利斯”西南象限活动的特点;用湿 Q 矢量诊断进一步表明了变性低压环流中垂直运动非对称分布的特征。诊断台风环流的三维热力结构表明,上升运动在对流不稳定性显著的区域发展最为旺盛,也是叠加在基本气流上的中尺度扰动迅速发展成为 MCS 的关键因素。

参考文献

- [1] 李英,陈联寿,王继志. 登陆热带气旋长久维持与迅速消亡的大尺度环流特征[J]. 气象学报,2004,62(2): 167-179.
- [2] 李英,陈联寿,徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学,2005,29(1): 91-98.
- [3] 李春虎,赵宇,龚佃利,等. “04·8”山东远距离台风暴雨成因的数值模拟[J]. 南京气象学院学报,2007,30(4):503-511.
- [4] 孙建华,齐琳琳,赵思雄. “9608”号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究[J]. 气象学报,2006,64(1):57-71.
- [5] 李江南,闫敬华,魏晓琳,等. 非地转强迫对 Fitow (0114)暴雨的影响[J]. 气象学报,2005,63(1): 69-76.
- [6] 张恒德,孔期. 0604 号强热带风暴碧利斯异常强降雨过程的诊断分析[J]. 气象,2007,33(5):42-48.
- [7] 刘爱鸣,林毅,刘铭,等. “碧利斯”和“格美”登陆后暴雨强度不同的天气学对比分析[J]. 气象,2007,33(5):36-41.
- [8] 潘志祥,叶成志,刘志雄,等. “圣帕”、“碧利斯”影响湖南的对比分析[J]. 气象,2008,34(7):41-50.
- [9] 王晓芳,胡伯威. 地形对 0604 号“碧利斯”登陆台风暴雨的影响[J]. 暴雨灾害,2007,26(2):97-102.
- [10] 姚蓉,黎祖贤,叶成志,等. 强热带风暴碧利斯特大暴雨山洪成因分析[J]. 气象,2007,33(8):40-46.
- [11] 叶成志,李昉英,潘志祥. “碧利斯”登陆后造成的湖南省东南部特大致洪暴雨数值模拟分析[R]. 第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集,2007,311-316.
- [12] 余锦华,谈哲敏,石顺吉. 强热带风暴 Bilis(2006)登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨[R]. 第十四届全国热带气旋科学讨论会论文摘要集,2007,317-321.
- [13] 牛晓蕾,李万彪,朱元竞. TRMM 资料分析热带气旋的降水与水汽、潜热的关系[J]. 热带气象学报,2006,22(2): 113-120.
- [14] Xue M, Droegemeier K K, and Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) - A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification[J]. Meteor. Atmos. Physics., 2000,75, 161-193.
- [15] Chen S H, and Sun W Y, A one-dimensional time dependent cloud model[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 2002, 80:99-118.
- [16] Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. Cumulus parameterization [J]. Meteor Monogr, 1993, 46: 165-170.
- [17] 陈久康,丁治英. 高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统[J]. 应用气象学报,2000,11(3): 271-281.
- [18] Zhang Da-Lin and Chanh Q. Kieu. Shear-forced vertical circulations in tropical cyclones[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(L13822):10. 1029/2005GL023146.
- [19] 张兴旺. 湿 Q 矢量表达式及其应用[J]. 气象,1998,24(8): 3-7.