

2007年6月粤东持续性暴雨的成因分析

黄忠 吴乃庚 冯业荣 蔡安安

(广州中心气象台, 510080)

提 要: 为了探讨2007年6月7—10日广东东部和珠江三角洲地区持续性暴雨的成因,使用常规气象观测资料、自动站资料以及NCEP的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的分析资料对这次过程环流特征和影响系统进行分析,同时使用局地经向环流线性诊断模式对这次过程进行模拟诊断。结果表明:这次粤东暴雨过程是在我国中高纬度稳定的两槽一脊的环流形势下,先后受东槽引导从华东沿海南下冷空气和受从西南地区不断东南移短波槽和低涡引导南下的冷空气影响,在华南北部形成稳定的锋面低槽和低空切变线,有利于水汽的辐合和雨带维持;孟加拉湾的西南急流和副高西侧南海西南气流是两支主要水汽输送带;此次暴雨与暴雨区上空中低层正(负)、高层负(正)的垂直螺旋度(散度)变化密切相关。中高纬度和低纬度系统共同影响以及暴雨区高层和低层动力热力条件配合,使得局地经向环流异常,造成了此次持续性强降水。定量诊断结果表明,在各个动力和热力因子中,潜热加热作用对这次暴雨过程贡献最大,此外反映西风急流和斜压槽活动的西风动量平流以及反映北方弱冷空气作用的水平温度平流也有一定的作用。

关键词: 持续暴雨 西南急流 垂直螺旋度 局地经向环流

Causality Analysis of the Continuous Heavy Rain in Eastern Guangdong in June 2007

Huang Zhong Wu Naigeng Feng Yerong Cai Anan

(Guangzhou Central Meteorological Observatory, 510080)

Abstract: Abnormal circulation characteristics and causes of the continuously heavy rain in Eastern Guangdong in June 2007 are studied by using observational data, NCEP Global Data Assimilation System data and a linear diagnostic model. The results show that this continuously heavy rain process is associated with the circulation pattern, i. e., two troughs respectively located over Urals Mts and East Asia and a ridge located over northern China. The lower level shear line over northern

part of South China contributed to the moisture convergence and rainbelt maintenance in eastern Guangdong. The low-level southwest flow from the Bay of Bengal interacted with that from the South China Sea constituted the major moisture channel. Low-level positive (negative) vertical helicity (divergence) and highlevel negative (positive) vertical helicity (divergence) over eastern Guangdong provided favorable dynamic conditions for development of the convective systems. The numerical diagnostic study results show that the contributions to the ascending motion in eastern Guangdong are mainly from the forcing processes associated with the latent heating, which played the positive and simultaneous feedback role in heavy rain. Moreover, the horizontal transports of westerly momentum and horizontal temperature advection also made some positive contributions to this heavy rain process.

Key Words: continuous heavy rain southwesterly jet vertical helicity local-meridional circulation

引 言

2007 年 6 月 7—10 日,粤北、粤东和珠江三角洲出现了一次持续的大暴雨过程。过程总雨量大于 150mm 的降水主要出现在广东的东部地区(图 1)。其中,粤东沿海的陆丰市甲东镇过程总雨量达 508.5mm,7 日 20 时至 8 日 20 时日雨量 302mm,8 日 10—11 时 1 小时雨量 109mm,处在莲花山脉的丰顺县潘田镇日雨量也达 278mm。博罗县连续 5 天出现暴雨,梅州所辖 7 站之中,有 5 站连续 3 天出现暴雨,其中 4 站连续暴雨天数创了 1950 年代以来历史同期连续暴雨天数的纪录,五华站日雨量达 30 年一遇,大埔站 48 小时雨量达 100 年一遇。连日暴雨致使山洪爆

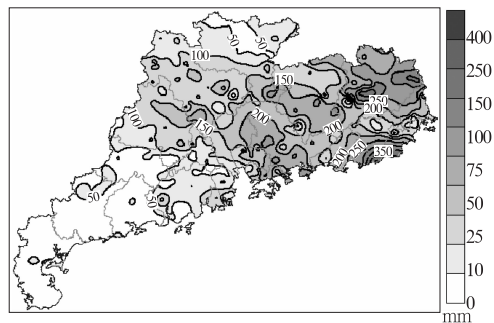


图 1 2007 年 6 月 7 日 08 时至
11 日 08 时广东省总雨量图

发、河水暴涨、山体滑坡、村镇田园被淹,造成了重大的经济损失和人员伤亡。据统计,这次过程共造成 171.9 万人先后受灾,倒塌房屋 8016 间,死亡 18 人,直接经济损失 8.7 亿元。

广东省东北部地区由于位于粤东莲花山脉的西北侧,属于广东较少出现暴雨的地区^[1]。这次在这一地区罕见地连续出现暴雨,造成巨大的灾情,其成因十分值得进行深入探讨。丁一汇指出,持续性暴雨出现在长波系统稳定时期,在这种情况下,天气尺度和中尺度系统可以在同一地区重复出现或沿同一路径移动,以致造成很大的累积雨量^[2]。过去对江淮梅雨期的连续性暴雨的研究,也比较强调阻塞高压的作用,特别是乌拉尔山阻塞高压和新西伯利亚到鄂霍茨克海阻塞高压的作用^[3-4]。对华南前汛期连续性暴雨的研究同样认为连续性暴雨一般出现在两脊一槽的稳定的阻塞形势或乌拉尔山阻高稳定下游平直的形势下^[1-5],前者是在位于新西伯利亚和巴尔喀什湖以西的东西两阻塞高压稳定的情况下,中纬度的低槽也相对稳定,并不断分裂出短波槽和冷空气东移影响华南,造成持续性暴雨,后者是在乌拉尔山阻高下游的平直环流下不断产生小波动东移南下影响而连续出现暴雨。而与以往不同的是这次粤东

的持续暴雨过程出现在两槽一脊的形势下。

为了分析这次持续性暴雨的成因,本文使用常规气象观测资料以及NCEP的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的分析资料对这次持续性暴雨过程的环流特征和影响系统进行分析,同时使用局地经向环流模式^[6-8]对这次过程进行模拟诊断,以探讨这次降水的成因。

1 环流形势和天气尺度系统

1.1 环流形势

这次持续性暴雨过程发生时,500hPa副热带高压呈带状从太平洋伸到南海西部,脊线在 15°N 以南。而亚洲中纬两槽一脊的天气形势下,东北低压在鄂霍茨克海高压脊的阻挡下,接连几天在东北到日本海一带徘徊,蒙古国到华北地区有一个闭合的高压,形成阻塞形势,从低涡中心经江淮地区到河西走廊有一条横槽,巴尔喀什湖附近是另一支西风槽。受到我国北方阻高的阻挡,青藏高原和西南地区不断有短波槽和低涡从河西走廊一带向东南移向江南地区(图1)。与文献[1]和文献[5]所提到的两脊一槽型环流不同的是,这次阻塞高压出现在华北地区,东槽引导的东路冷空气南下和西槽不断分裂的小波动和冷空气从阻高南部穿脊东移,造成持续性暴雨,但二者有“异曲同工”的效果。

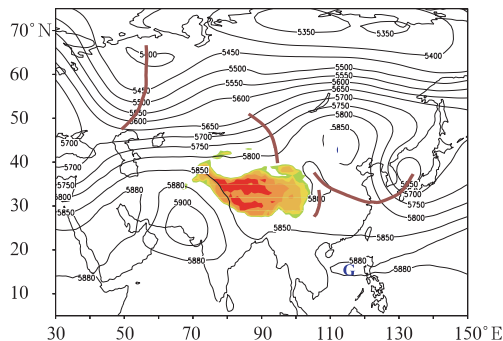


图2 2007年6月8—9日平均500hPa位势高度场

2.2 天气尺度系统

广东前汛期的暴雨集中期,南亚高压一般位于中南半岛北部或其邻近地区^[1]。这次过程高空急流北上到江淮地区,南亚高压北上到印度半岛到中南半岛北部一带,广西南部 and 北部湾附近还出现一个次中心,这次过程的暴雨区在南亚高压东部的偏西北辐散气流下。

在500hPa,6月7—10日,一共有3次短波小槽在横槽南侧东移影响广东,分别出现在7日20时到8日08时、8日20时到9日08时和9日08时到10日20时,均造成广东东部出现降水高峰(图略)。特别是第三次短波槽从贵州、广西逐渐东移到粤东和闽南地区,伴随着850hPa切变线南移,先后在广东中北部丘陵地区、珠江三角洲和粤东出现大范围的暴雨和大暴雨。

在边界层,华南地区上空从6月7日08时开始出现西南低空急流,轴线在广西和广东两省区的中部到南部沿海一带摆动。在850hPa上,切变线维持在南岭及其以北地区,但在925hPa上,切变线在广东北部到江南南部来回摆动。6月9日20时起切变线逐步南压到广东东部沿海(图略)。在切变线上,还出现了两次低涡活动,第一次在7日8时,中心在桂林附近,第二次在6月9日08时至11日20时,低涡中心从黔桂交界处逐步向偏东方向江西中南部地区移动,最后消失在武夷山附近,其生命史较长,路径与刘国忠等研究的东南偏东类致洪低涡相似^[6]。暴雨区出现在850hPa切变线南侧到低空急流轴线附近以及低涡的东南方。

在这种环流形势下,日本海低压后部的偏北气流引导冷空气从华东和东海一带南下,地面上东海到华东始终维持一个东西向的高压带,在闽西南到赣南维持一条静止锋。同时,从西槽底部分裂出的小波动或低涡也

引导小股冷空气从高原东部南下,弱冷锋9日夜间逼近广东西部地区。广东位于从黄海伸向东南沿海的高压脊和从四川伸向广西的高压脊之间的倒槽内(图3)。过去对华南前汛期暴雨的研究认为,锋面暖区内有时低层辐合上升很强烈,中尺度系统最活跃^[7]。中尺度观测正好证明了这一点,从9日20时前后开始,在广东西北部地区出现中尺度切变线和 $>20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的雨带,逐渐向南一些珠江三角洲地区(图略)。

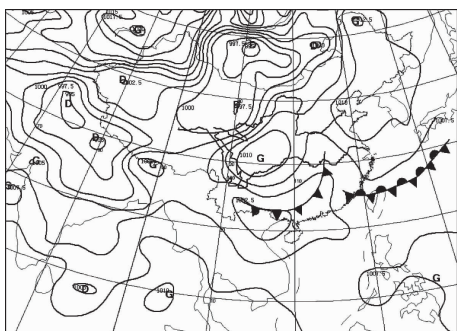


图3 2007年6月9日14时地面气压场(单位:hPa)

2 物理量诊断

2.1 水汽条件分析

水汽的供应对暴雨的形成和持续发展尤为重要,通过对低纬地区的流场和水汽分析发现,热带低空急流为这次暴雨过程提供了充足的水汽。图4给出了6月8—10日平均水汽通量及散度分布。由图5可见,这次过程水汽通道主要有两个,一个是来自孟加拉湾经中南半岛的西南风水汽通道,另一个是来自南海的水汽输送带。孟加拉湾过来的西南急流和副高西侧南海西南气流在粤东地区辐合,出现强西南低空急流,广东东部和福建南部对应为水汽通量辐合的高值区。主要暴雨区出现在两支水汽通道的汇合处、水汽辐合中心附近及其邻近的上游地区。

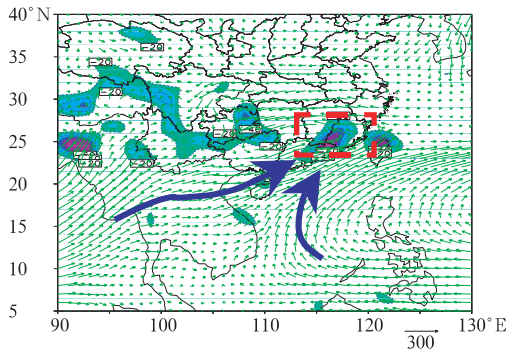


图4 2007年6月8—10日平均850hPa水汽通量($\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)和水汽通量散度($10^{-7}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) (阴影区为水汽通量散度负值中心)

2.2 动力条件分析

除了源源不断的水汽输送外,动力抬升机制是造成持续性暴雨的另一重要条件。由广东主要暴雨区($23^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $114^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)上空散度的高度-时间演变(图5)可见,从6月7日开始暴雨区上空中低层受低压槽控制负散度区逐日加强,在10日在800~900hPa高度上达到 $\leq -4\times 10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$ 的最大强度,而同时高层受南亚高压东部的辐散影响正散度明显加强,10日高层的散度 $\geq 5\times 10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,整个过程中暴雨区上空都维持为中低层负散度(辐合),高层正散度(辐散)。该地区处在两条水汽通道的汇合处,在3天平均水汽辐合中心的西南部边缘。这种低层辐合、高层辐散,对低纬地区输送的水汽在粤东地区辐合抬升和雨带维持十分有利。11日随

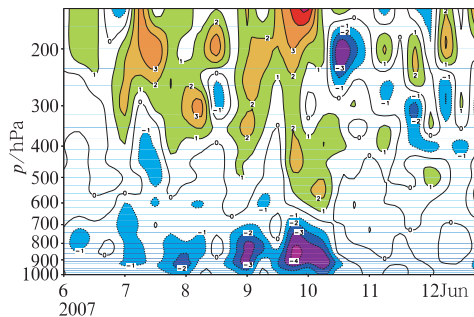


图5 2007年6月6—12日(UTC)粤东暴雨区($23^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $114^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$)散度的高度-时间分布
单位: $10^{-6}\cdot\text{s}^{-1}$

着低层辐合减弱消失,高层200hPa附近从辐散逐渐转为辐合,暴雨过程也随之减弱结束。

另外,螺旋度是一个描述环境风场气流沿运动方向的旋转程度和运动强弱的物理参数,它反映了大气的运动场特征,能够很好地描述大气运动的性质和特点^[8]。为了进一步分析此次暴雨过程的动力抬升条件,利用NCEP资料的水平风场和垂直速度计算了暴雨过程的垂直螺旋度。垂直方向上的螺旋度(H_p)计算方法为:

$$H_p = -\xi \times \omega$$

其中 ξ 为相对涡度, ω 为垂直速度。

图6给出了粤东暴雨区(23~26°N、114~117°E)的垂直螺旋度高度-时间分布,可以看到,6—10日暴雨区上空中层一直为正螺旋度,高层则为负螺旋度区,从6日08时至7日20时,低层螺旋度是逐步增大的。垂直螺旋度存在着3个明显的正值中心,中心数值分别为 $40 \times 10^{-8} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 、 $40 \times 10^{-8} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 和 $50 \times 10^{-8} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$,这与前文提到的3次暴雨时段无论从时间还是强度都对应十分一致。当10日最大螺旋度中心(该时段降水最为明显)减弱后,整个粤东降水也明显减弱。结合相对涡度和垂直速度的高度-时间剖面图(图略)可知,这种垂直螺旋度的中低层正、高层负的配置对应的是中低层强烈辐合上升高层辐散,而螺旋度低层正值区

高度反映的是辐合上升气柱的上升高度。从此次过程来看,粤东上空辐合上升运动均十分明显,基本上都达到400hPa,其中第三阶段降水期间,垂直螺旋度正值区甚至到达300hPa以上。尤红等在分析广东“05.6”连续性暴雨时发现,广东特大暴雨范围、强度与该地区上空中低层正、高层负垂直螺旋度中心迅速增大、减小密切相关,并和中心增大、减小区域也有很好的对应关系^[9]。其结果与这次过程类似。

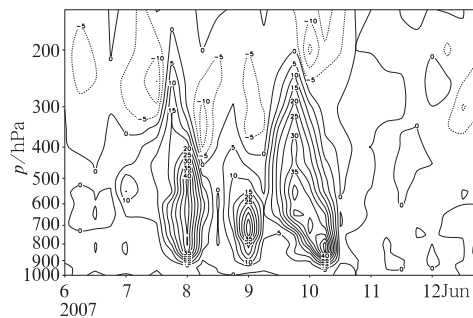


图6 2007年6月6—12日(UTC)粤东暴雨区(23~26°N、114~117°E)垂直螺旋度的高度-时间分布
(单位: $10^{-8} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$)

2.3 稳定度条件分析

利用位于暴雨区中的河源(59293)和暴雨区西南部边缘的香港的探空资料,分别计算了 K 指数、 $\Delta\theta_{se}(\theta_{850}-\theta_{500})$ 和沙氏指数 SI (表1),结果发现, K 指数一直维持在较大的

表1 河源和香港稳定度指数和降水量(mm)变化

时间	河源				香港			
	K	$\Delta\theta_{se}$	SI	河源雨量	K	$\Delta\theta_{se}$	SI	深圳雨量
0608	37	-0.1	-0.5	20.1	33	-0.4	0.5	04.9
0620	39	7.2	-2.5	57.7	37	9.1	-2.5	55.6
0708	40	4.8	-2.3	106.4	38	8.3	-1.7	41.3
0720	39	3.7	-2.3	115.2	37	9.5	-2.2	23.7
0808	38	2.3	-1.5	80.9	36	9.5	-3.5	23.8
0820	40	3.7	-2.3	48.8	37	4.8	-2.3	35.8
0908	39	6.1	-3.3	53.9	34	4.4	-1.8	131.1
0920	40	3.7	-2.3	45.5	39	12.3	-2.3	138.4
1008	38	1.0	-1.0	6.3	缺测	缺测	缺测	42.9
1020	38	2.3	-1.5	0.4	36	3.1	-1.0	7.6

状态。在过程开始前,6 日 20 时两站的 $\Delta\theta_{sc}$ 出现突增,表明对流不稳定条件明显加强,从 SI 指数反映,大气层结也变得不稳定,在 9 日 08 时和 20 时又分别出现 $\Delta\theta_{sc}$ 增大现象。这两次 $\Delta\theta_{sc}$ 增大,未来 24 小时内测站附近和下游地区雨量均对应增大,特别是香港 9 日 20 时突增之后,深圳 10 日 2—3 时出现了 $68.1\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨强。10 日 08 时不稳定性减弱,此后降水强度也明显减小。

综上所述,这次过程主要暴雨区位于来自孟加拉湾和南海的两条水汽通道汇合处,暴雨过程在暴雨区上空高层辐散、下层辐合、中低层正螺旋度和高层负螺旋度以及不稳定条件加强时开始,上升条件减弱时结束。

3 数值诊断

前面分别从影响此次粤东持续暴雨过程的天气形势和暴雨区的热力动力条件进行分析诊断,而从以上分析可知,此次持续暴雨受中高纬系统和低空急流等热带系统共同影响,同时与暴雨区上空中低层正(负)、高层负(正)的垂直螺旋度(散度)变化密切相关,而这种形势特征引起的局地经向环流异常对降水产生直接的影响^[10-11]。为了全面而客观地查找此次持续暴雨过程的主要成因,利用局地经向环流线性诊断模式^[12]对此次过程进行模拟诊断。

该模式共有 19 层,第一层为 950hPa,第 19 层为 50hPa。为了将尽可能多的物理过程包含在模式中,数学模型除了将经向运动方程简化为梯度风平衡关系外,其余方程均为球 p 坐标系的原始方程组的方程,所以包含了各种重要的热力和动力过程(因无各层资料,目前仍无法诊断云物理过程和辐射过程)。通过运用消元法和代入法,将连续方程、运动方程的 3 个分量式——热力学方程、水汽守恒方程和状态方程有机结合起来,得到本研究所用的

诊断华南局地纬向平均($108 \sim 118^\circ\text{E}$)的经向环流流函数的椭圆型线性方程为^[12]:

$$\left[\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\bar{A} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + \bar{B} \frac{\partial}{\partial p} \right) + \frac{\partial}{\partial p} \left(\bar{B} \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + \bar{C} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right] \bar{\Psi} = F \quad (1)$$

其中, $\bar{\Psi}$ 为华南地区局地纬向平均, ϕ 为纬度,系数 $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 分别与静力稳定度、斜压稳定度、惯性稳定度有关。 Ψ 为经向环流流函数,它与风的经向分量 v 和垂直分量 ω 的无辐散有旋成分: $v_\Psi (=v - v_\chi)$ 和 $\omega_\Psi (= \omega - \omega_\chi)$ 的关系为:

$$\begin{cases} v_\Psi = -\frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial \Psi}{\partial p}, \\ \omega_\Psi = \frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \Psi}{\partial \phi} \end{cases} \quad (2)$$

诊断方程(1)右边的总强迫项 F 包括各动力和热力强迫因子^[10-12]。

使用定量诊断前,首先检验模式在此次过程的模拟性能。图 7 给出了 6 月 7—10 日平均的局地经向环流。从图 7 中可见,由所有内力驱动的模拟经向环流场(图 7a)与“实际”的经向环流场(图 7b)的上升中心、中心所在位置及强度的量级均吻合很好,尤其是模式能较好的模拟出 25°N 附近地区的强上升运动(模拟的不足之处是垂直运动强度稍弱,前期相关工作表明这些差异并不影响各物理因子贡献大小的排序^[10-11])。以上对实际二字加引号是因为按场论中环流的定义,环流场即有旋场,有旋则无辐散,故“实际”经向环流的垂直运动仅为 ω 的无辐散成分 ω_Ψ ($\omega_\Psi = \omega - \omega_\chi$, ω_χ 可用高度场和纬向风场算出)、“实际”经向环流的水平运动 v_Ψ 近似为经向风的非地转成分 v_{ag} (可由高度场和经向风场算出)。

由图 7 可见,此次过程低纬 $5 \sim 20^\circ\text{N}$ 为反映副热带高压控制下的下沉区,中高纬度 $35 \sim 50^\circ\text{N}$ 为我国北方阻高控制下冷空气影响的下沉区。低纬下沉区的暖湿水汽随副高

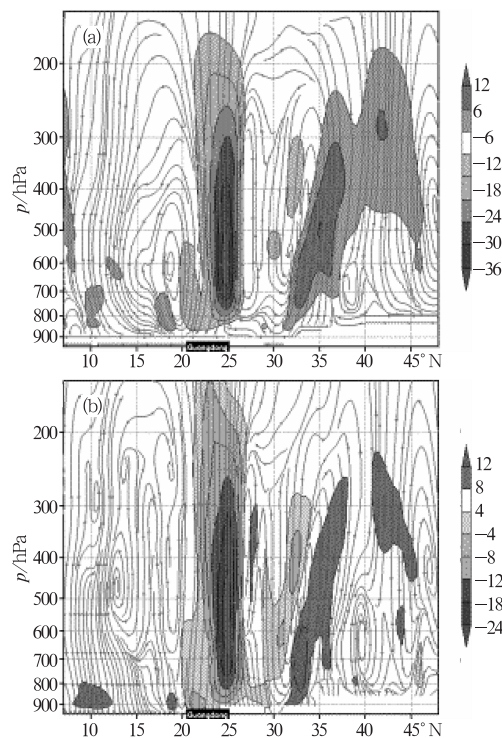


图7 2007年6月7—10日平均局地经向环流(单位: $10^{-2} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)“实际” (b)“模拟” 阴影区为垂直运动中心,负值代表上升运动

西侧的东南气流及西南季风北上,与北方冷空气南下汇合,使得总经向环流上升支持持续位于 $23 \sim 27^\circ\text{N}$ 上空,为粤东地区发生的持续性降水提供了有利的抬升条件。利用数值诊断模式分析了驱动该经向环流的各个物理因子的单独贡献后,发现与降水过程相联系的潜热加热激发的经向环流(图 8a)上升支也位于 25°N 附近,且垂直运动的量级和环流型与总经向环流(图 7b)也比较一致。另外图 8a 显示的上升运动区低空有来自南侧的暖湿水汽辐合(反映低纬地区往北的水汽输送),在水汽辐合上升、冷却凝结过程中释放的潜热将进一步加强上升运动。由此可见,在此次粤东持续暴雨过程中,潜热加热不但是激发华南地区局地经向环流异常的主要

物理因子,也是重要的正反馈因子。

此外,反映西风急流和西风带斜压槽活动的西风动量平流激发的环流,其下沉支位于 $35 \sim 45^\circ\text{N}$,位于 25°N 附近的上升支对总的经向环流中高层的持续上升运动也有一定贡献(图 8b);而反映北方弱冷空气活动的温度平流激发的环流,也对 25°N 附近地区的上升运动有一定的触发作用(图 8c)。这些

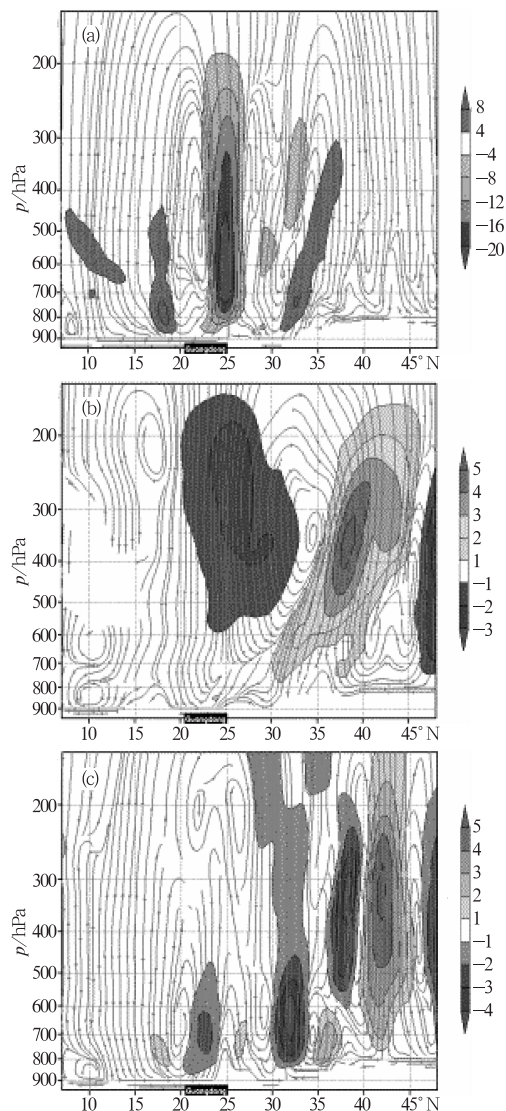


图8 2007年6月7—10日主要贡献因子单独激发的局地经向环流(单位: $10^{-2} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)潜热加热 (b)西风动量平流 (c)水平温度平流阴影区为垂直运动中心,负值代表上升运动

数值诊断结果与前文分析是一致的。低纬地区的西南季风以及副热带高压西侧的东南气流将孟加拉湾和南海地区的水汽源源不断往北输送,在粤东地区辐合上升,同时在我国北方稳定的阻高形势下,西风带上分裂的短波槽南下以及低层的弱冷空气补充触发,使得局地经向环流产生异常(低纬 $5\sim 20^{\circ}\text{N}$ 下沉区往北输送,中高纬 $35\sim 50^{\circ}\text{N}$ 附近下沉区往南输送,南北两支气流在 25°N 附近粤东地区辐合上升),造成了此次粤东地区罕见的持续暴雨过程。

4 结 论

(1) 2007 年 6 月上旬后期粤东的连续性暴雨过程是在中纬亚洲两槽一脊、华北出现阻塞高压的环流形势下,从日本海切断低压后部南下的冷空气和从高原东移的 3 次短波槽受阻塞高压的阻挡沿阻高南侧东移影响江南和华南地区而造成的。

(2) 华南上空的强西南低空急流,先在南岭附近摆动后南移到广东南部的切变线,以及沿切变线移动的低涡为连续性暴雨过程提供了水汽条件和动力条件,特别是东海到华东的高压脊南侧的偏东气流以及低纬的西南气流在江南南部到华南北部形成东西向的切变线,有利于水汽在粤东地区辐合和雨带维持。

(3) 在 3 个暴雨高峰期间,暴雨区上空对应低空辐合、高空辐散和中低层强的正螺旋度和高层负螺旋度,在暴雨出现前,低空辐合、高空辐散和低层正螺旋度日趋明显,暴雨结束时这些物理量迅速减弱。

(4) 对流不稳定的加强对降水的加强有一定的指示意义。

(5) 运用局地经向环流模式成功地模拟了这次粤东暴雨过程的环流演变,垂直运动中心位置和时间演变均与降水实况一致。定量诊断结果表明,在各个动力和热力因子中,潜热加热作用对这次暴雨过程贡献最大,此外反映西风急流和斜压槽活动的西风动量平流以及反映北方弱冷空气作用的水平温度平流也有一定的作用。

参考文献

- [1] 林良勋,冯业荣,黄忠,等. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社,2006:86-93.
- [2] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994,52(3):274-284.
- [3] 汤英英,王黎娟,刘毅,等. 长江流域持续性暴雨研究进展. 四川气象,2007,27(3):3-5.
- [4] 尹洁,陈双溪,刘献耀. 江西汛期连续暴雨形势特征与中期预报模型. 气象,2004,30(5):16-20.
- [5] 谢炯光,纪忠萍,谷德军,等. 广东省前汛期连续暴雨的气候背景及中期环流特征. 应用气象学报,17(3):254-262.
- [6] 刘国忠,丁治英,贾显锋,等. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究. 气象,2007,33(1):45-50.
- [7] 《华南前汛期暴雨》编写组. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社,1986:146-150.
- [8] 吕克利,徐银梓,谈哲敏. 动力气象学[M]. 南京:南京大学出版社,1997:94-97.
- [9] 尤红,姜丽萍,彭端,等. 2005 年 6 月广东特大暴雨垂直螺旋度分析. 气象,2007,33(4):71-76.
- [10] 陈桂兴,黎伟标,袁卓建,等. 1998 年长江流域洪水期大气季节内振荡特征及机理研究[J]. 中国科学(D 辑),2004,34(6):562-572.
- [11] 温之平,吴乃庚,冯业荣,等. 定量诊断华南春旱的形成机理[J]. 大气科学,2007,31(6):1223-1236.
- [12] 袁卓建,王同美. 局地经向环流的诊断方程. 见:中国科学院大气物理研究所编. 东亚季风和中国暴雨. 北京:气象出版社,1998:496-505.