

曹芳,李昀英.一次特大暴雨过程的中尺度低压特征及发展因子分析[J].暴雨灾害,2011,30(1):28-35

一次特大暴雨过程的中尺度低压特征及发展因子分析

曹芳¹,李昀英^{2,3}

(1.中国人民解放军95871部队,衡阳421001;2.解放军理工大学气象学院,南京211101;
3.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京100081)

摘要:以2008年6月12日广西特大暴雨为例,使用2008年华南野外暴雨试验获取的地面降水资料和LAPS 0.045°×0.045°再分析资料,采用带通滤波方法提取暴雨过程中的中尺度系统,对中尺度低压进行分类:第一类中尺度低压先于降水产生,第二类则后于降水产生。各选取1例,分别分析两类中尺度低压发展演变及其垂直结构,根据大、中尺度相互作用诊断方程,诊断两类中尺度低压发展的主要因子。结果表明,第一类中尺度低压在降水过程中由冷性变为暖性,其发展能量主要来源于大尺度环境;第二类中尺度低压自始至终都是暖性的,其发展过程中中尺度扰动能量本身起重要作用。

关键词:中尺度低压;雨团;垂直结构;发展因子

中图分类号:P458.1²1.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-9045(2011)01-0028-08

Features and Development Factors of Two Types of Meso-scale Low in an Excessive Heavy Rain Event

CAO Fang¹, LI Yunying^{2,3}

(1. Unit 95871, PLA, Hengyang 421001; 2. Meteorology Institute, PLAUST, Nanjing 211101; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Taking an excessive heavy rain event which occurred in Guangxi on 12 June 2008 for example, based on the surface precipitation data and the LAPS 0.045°×0.045° data collected in the SChEX, the meso-scale disturbances in the event were separated by using Barnes band-pass filter, and the meso-scale low were classified into two types. One generated earlier than the precipitation, the other generated later. Then the dynamics and thermodynamics structures of the two types of meso-scale low were analyzed, and development factors were diagnosed according to the large scale and meso-scale interaction diagnosis equation. The results show that there are different characteristics between the two types of low. The first type which occurred earlier than the precipitation is inclined to change from cold core to warm one during its rainfall, while the second type which occurred later than the precipitation keeps warm during the whole period. Furthermore, the first type developed depending basically on the large scale and meso-scale interaction, while the second type developed mainly due to meso-scale disturbances.

Key words: Meso-scale low; Rain mass; Evolution; Vertical structure; Development factors

1 引言

华南前汛期是我国雨带季节性北移的一个阶段^[1]。这一阶段暴雨频繁,其出现次数占全年暴雨次数的50%以上,其暴雨量约占同期总降水量的40%^[1-2]。因此,大气科学界对华南前汛期暴雨一直极为关注。已有的研究揭示了华南前汛期暴雨的环流形势与影响系统^[1,3-4]、低空急流的作用^[5-7],特别是其所具有的暖区

暴雨特征^[1,8];还有的研究探讨了华南暴雨的中尺度对流系统^[9-11]、地形作用^[12-14]等。然而,受到探测技术和资料密度的限制,对直接产生暴雨的 β 中尺度系统的研究还主要集中在云团^[15]、环境条件分析^[16]及数值模拟^[17-18]方面,对其系统结构、发展演变规律的认识还有待深入,特别是对与暴雨雨团关系最为密切的中尺度低压的研究仍不够深入。是中尺度低压引发降水还是降水导致了低压产生?这是一个探讨已久的问题。利用高

收稿日期:2011-02-10;修订日期:2011-03-04

资助项目:国家重点基础研究专项(2010CB951904),国家自然科学基金(41075034),财政部/科技部公益类行业专项(GYHY200906010),中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2009LASM-A04)

第一作者:曹芳,女,1982年生,硕士,主要从事中尺度气象学研究。E-mail: tn_cf@sina.com

时空分辨率观测资料,分析 2008 年 6 月 12 日广西特大暴雨过程(以下简称“08.6”广西特大暴雨)表明,上述两种情况在这一过程中并存。因此,针对此例,本文分别就这两种情况各选取一个中尺度低压分析其发展演变特征和动力热力垂直结构,并通过诊断探讨两类中尺度低压的发展因子。

2 大尺度环流背景与降水实况

“08.6”广西特大暴雨是在高原南支槽发展、西南涡进入广西、高低空急流耦合的大尺度背景下产生的。在中高纬较为稳定的两槽一脊大尺度环流背景

下,与雨带关系非常密切的天气尺度系统、中尺度系统变化较大。由于受大尺度槽后西北气流影响,青藏高原东部多小槽活动。11 日 08 时(北京时,下同)开始,南支短波小扰动在华南发展并东移;12 日 08 时,小槽与高原东部低值区相连,广西位于扰动短波槽前,槽后偏北风引导冷空气南下,同时槽前偏南风将南海地区大量暖湿空气向广西输送,广西进入此次过程降水最强阶段;在降水后期,我国东北部上空高压脊东撤,其后部低涡内的冷空气迅速南下,12 日 20 时(图 1a),高原东侧低值区与南支波动相连发展成为一深槽,此后该槽逐渐形成低涡东移入海。

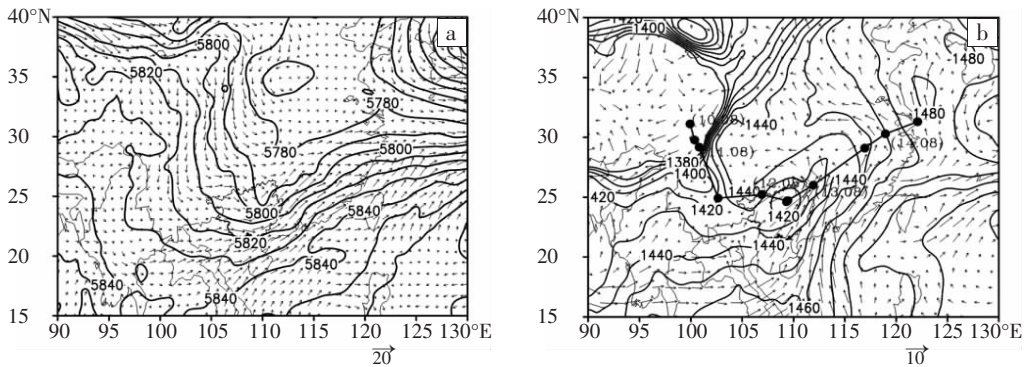


图 1 2008 年 6 月 12 日 20 时 500 hPa 位势高度场(实线,单位: gpm)与风场(矢量)叠加图(a),6 月 11 日 20 时 850 hPa 位势高度场(实线,单位: gpm)与风场(矢量)及西南涡(●)移动路径图(b)

图 1b 中显示此次过程低涡活动路径。由于西南气流绕流云贵高原,在四川盆地西南部产生弱的气旋性环流,α 中尺度低涡 10 日 20 时产生;其形成后向东南移,11 日 20 时左右,低涡移到桂西北并有所发展,且转向东移;12 日 20 时,850 hPa 低涡中心达到最低值(1420 gpm),位置与广西特大暴雨中心几乎重合。由于其移动速度非常缓慢,低涡在广西北部活动时间自 12 日 00 时至 13 日 06 时,达 30 h 左右,这也是广西北部降水持续时间较长的重要原因;低涡 12 日 20 时后在高空槽前气流引导下向东北方向移动,且逐渐演变成较强的、呈东北-西南向的低空低涡型切变线。

此次特大暴雨过程伴随着强的高空急流和中尺度低空急流(图 2)。高空急流轴位置基本稳定在 40°N

左右,但其中心风速逐渐加大。随高空急流中心风速加大,抵达广西的西北风在暴雨期间也出现风速增大过程,有利于北方冷空气南下。在低层(850 hPa),11 日 20 时,中尺度低空急流首次出现于广西西南方向(图 2a)。其后低空急流逐渐移入广西,风速随之增大(图 2b)。与此同时,中尺度低空急流与副热带高压边缘大尺度低空急流带连接,使广西处于西北风高空急流轴南侧、西南风低空急流轴北侧,高低空急流相交于广西东北方。这种高低空急流耦合,一方面使广西上空垂直风切变增大,同时低空急流左侧风速辐合使低涡切变线区辐合增强,从而低层大气动力抬升作用增强,低空急流本身的次级环流利于中尺度对流系统发生发展;另一方面,高空急流为广西上空带来干冷空气

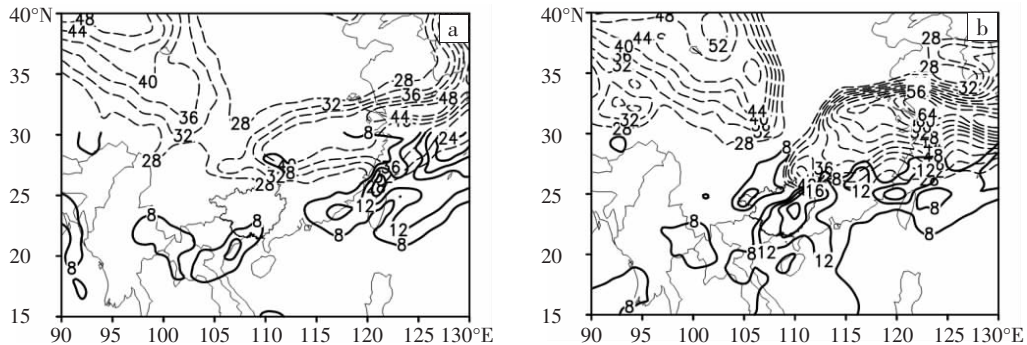


图 2 2008 年 6 月 11 日 20 时(a)、12 日 20 时(b)高空急流和中尺度低空急流配置图
虚线、实线分别表示 200 hPa、850 hPa 风速,单位: $m \cdot s^{-1}$

气,而低空急流、超低空急流则在低层从孟加拉湾输送暖湿空气,形成上冷下暖、上干下湿结构,使广西地区一直维持较高不稳定能量,强降水得以持续。

在以上极其有利的天气背景下,地面实况统计资料表明,自 6 月 11 日 08 时至 13 日 08 时,广西累计降水量超过 250.0 mm 的乡镇有 62 个,累计降水量最大值出现在永福县城区,达 413.3 mm;累计降水量在 100.0~249.9 mm 之间的乡镇有 346 个,50.0~99.9 mm 之间的有 380 个。12 日,东兰、环江、灵川日雨量突破当地建站以来历史记录,桂林、柳城日雨量突破当地 6 月历史记录。因此,“08.6”广西特大暴雨备受关注,对其进行相关研究具有重要科学意义和社会经济意义。

3 资料与方法

在国家 973 项目“我国南方致洪暴雨监测和预测的理论和方法研究”的支持下,2008 年 5—8 月份华南地区野外加密观测试验(SChEX)[19]顺利实施。本文

所用资料均来源于 SChEX,包括地面加密观测资料以及使用 LAPS[20]融合了卫星资料、华南地区 48 部业务雷达、63 个探空观测站、60 个 GPS 水汽观测站、6 000 个地面观测站和无人自动观测站的观测信息而形成的水平分辨率 5 km、垂直 22 层、时间间隔 3 h 的中尺度分析场资料。

LAPS 资料中同时包含了大尺度和中尺度信息。为便于研究,采用 Barnes 带通滤波方法[21],分离大尺度和中尺度系统。图 3 给出滤波响应函数曲线以及 6 月 12 日 08 时 850 hPa 低通滤波和带通滤波位势高度场。在图 3a 中, R_1 表示低通滤波 F_a 的响应函数, R_2 表示低通滤波 F_b 的响应函数, R_R 表示带通滤波 F_a-F_b 的响应函数。从中可见,此带通滤波器能完整保留 50~300 km 左右的波动,其它尺度的波动被滤除或极大地衰减。由图 3b 可看到低通滤波的效果,只保留了天气尺度和大尺度信息场。图 3c 中,分离出的 β 中尺度左右的扰动在带通场中得到了更好的展示。

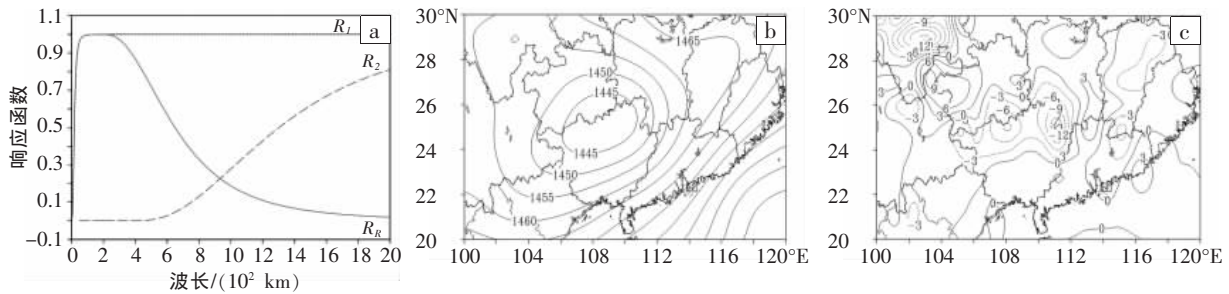


图 3 滤波响应函数曲线(a)及 2008 年 6 月 12 日 08 时 850 hPa 低通滤波(b)和带通滤波(c)位势高度场
图 a 中, R_1 、 R_2 表示两个低通滤波, R_R 表示带通滤波;图 b、c 中,位势高度单位: gpm

本文将每小时降水量不小于 5 mm、直径 50 km 以上的连续降水区定义为雨团。使用上述滤波处理后的资料对比分析“08.6”广西特大暴雨过程中尺度高度场和流场及降水雨团的相对位置发现,中尺度低压与雨团关系非常密切。统计结果表明,11 日 08 时至 13 日 08 时,104°—116°E、20°—28°N 范围内共出现 14 个主要的中尺度低压中心,其周边有数量相当的中尺度高压伴随,这可能是中尺度对流系统上升中心周围存在补偿下沉气流所致。这 14 个低压存在期间,有 9 个的附近出现一个或多个雨团,出现雨团的中尺度低压占其总数的 64%以上。

上述分析中有 5 个中尺度低压位置没有出现相应的雨团,但统计自 11 日 08 时至 13 日 08 时广西境内出现的 11 个雨团表明,其中仅有一个对应位置为中尺度高压,其余 10 个均对应中尺度低压,达到 90%以上。进一步分析可知,有雨团伴随的低压多出现在本身利于降水的天气系统上,如西南涡、切变线上,而远离这些有利的天气系统的中尺度低压扰动虽强烈,但很少发现对应雨团。文中提到的 14 个中尺度

低压中,5 个没有伴随雨团的中尺度低压基本都远离了雨带。

本文重点研究伴随雨团的中尺度低压。对照中尺度低压和相应雨团出现时间发现,8 个中尺度低压先于雨团产生,仅 1 个滞后于雨团产生。以中尺度低压与雨团产生时间先后为依据,可将中尺度低压划分为两类: 1) 降水前出现的中尺度低压; 2) 在原本已存在的雨带中产生和发展起来的中尺度低压,即降水后出现的中尺度低压。

4 两类中尺度低压特征分析

通过分析两类低压的演变特征和动力热力结构发现,二者差异较大。本文分别选取一例分析两类中尺度系统的演变过程和结构特征。

4.1 两类中尺度低压的演变特征

第一类中尺度低压在雨团生成前就已存在,其出现后数小时才生成雨团。雨团强度随中尺度低压强度变化,位置也随之移动。图 4 给出一个产生降水的中尺度低压,从中可见从低压生成初期至消亡过程中

850 hPa 带通位势高度场和雨团分布。此中尺度低压生命史 12 h,6 月 11 日 11 时产生,23 时后迅速消亡。雨团出现时间是 11 日 16 时,产生位置在低压前部(即东部),并随中尺度低压移动发展和北移增强。11 日 23

时是该低压由发展至消亡的转折点,此时低压中心位势高度最低,相应的雨团降水量最大值猛增至 25 mm·h⁻¹。此后,低压减弱,降水随之迅速减弱。12 日 00 时,雨团消失,02 时原低压位置被高压替代。

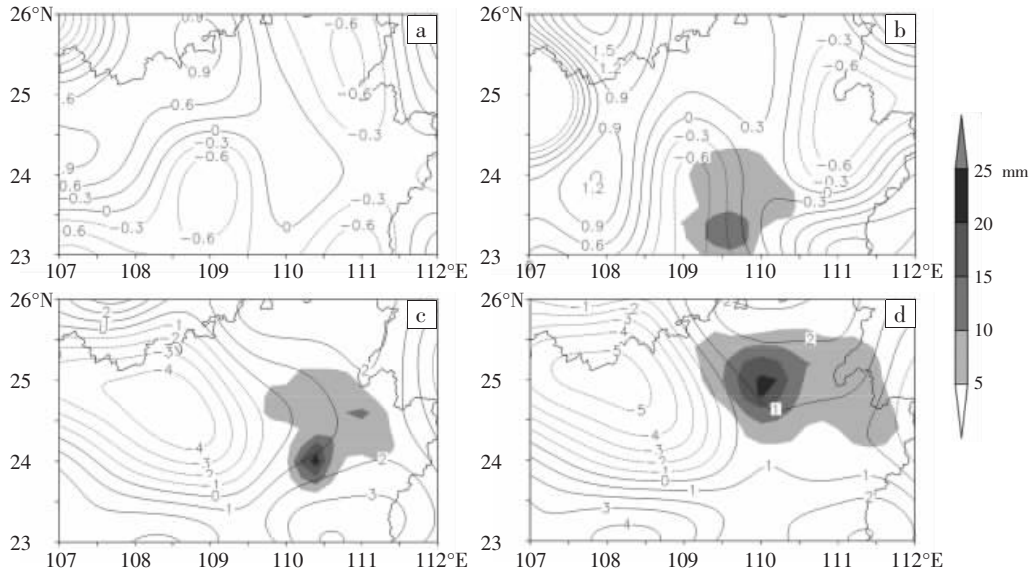


图 4 2008 年 6 月 11 日 14:00 (a)、17:00 (b)、20:00 (c)、23:00 (d) 的 850 hPa 带通滤波位势高度场

等值线为位势高度,单位: gpm;阴影区所示为降水量分布,单位: mm

相应的流场上(图略),产生雨团之前,低压中心对应有偏东风和偏西风的辐合切变线。11 日 20 时,低压发展超过 β 中尺度,原对应的切变线转为横向,成为南、北风的辐合切变,其位置在低压南部。低压中心的东、西侧均变为辐散,但东部边缘雨团中心附近始终对应流场辐合。之后,当辐合变为辐散,低压迅速减弱。

中尺度低压生命史仅 9 h,其产生之前,已由 108°—109°E 处第一类低压引发较强降水带。12 日 11 时,在 850 hPa 上雨带中部(即 110°E、25°N 附近)首次出现第二类中尺度低压闭合中心,其强度较弱、范围较小。其后,该中尺度低压迅速发展、不断东移。低压产生于雨带前部,当降水的拖曳作用越来越强时,雨团发展到最强,而低压逐渐减弱并远离雨带位置。12 日 20 时,低压扰动中心移至 112°E 以东,强度减为 -2 gpm。当日 23 时,该位置被中尺度高压中心取代。

除上述降水前出现的中尺度低压外,另一类中尺度低压在降水后产生。图 5 给出一个第二类中尺度低压 850 hPa 带通位势高度和观测小时降水量分布。该

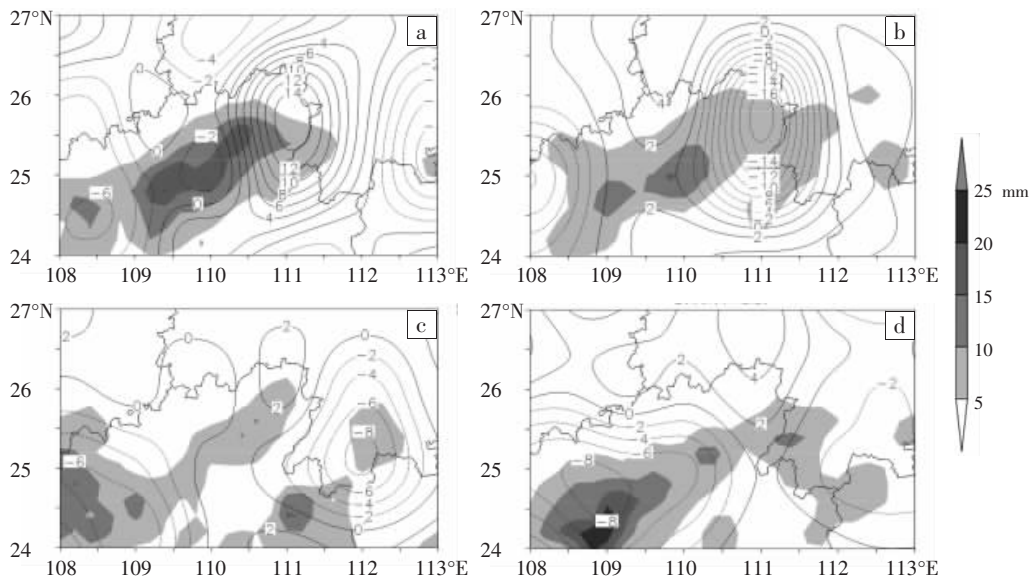


图 5 2008 年 6 月 12 日 11:00 (a)、14:00 (b)、17:00 (c)、20:00 (d) 的 850 hPa 带通滤波位势高度场

等值线为位势高度,单位: gpm;阴影区所示为降水量分布,单位: mm

第二类中尺度低压的流场(图略)与高度场对应较好。12日03时,高度场上虽表现为高压,但已出现长度100 km左右的東西向辐合线;到当日11时,低压在雨带中生成时,位势高度场上虽表现仍较弱,但辐合线已发展为强辐合涡旋中心,涡旋中心的存在对应低压维持;当日20时,低压对应位置流场演变为辐散,低压迅速消亡,这说明该中尺度低压的生成是由气压场向风场适应的结果。

4.2 两类中尺度低压的动力热力结构特征

图6给出6月11日不同时段带通滤波位势高度

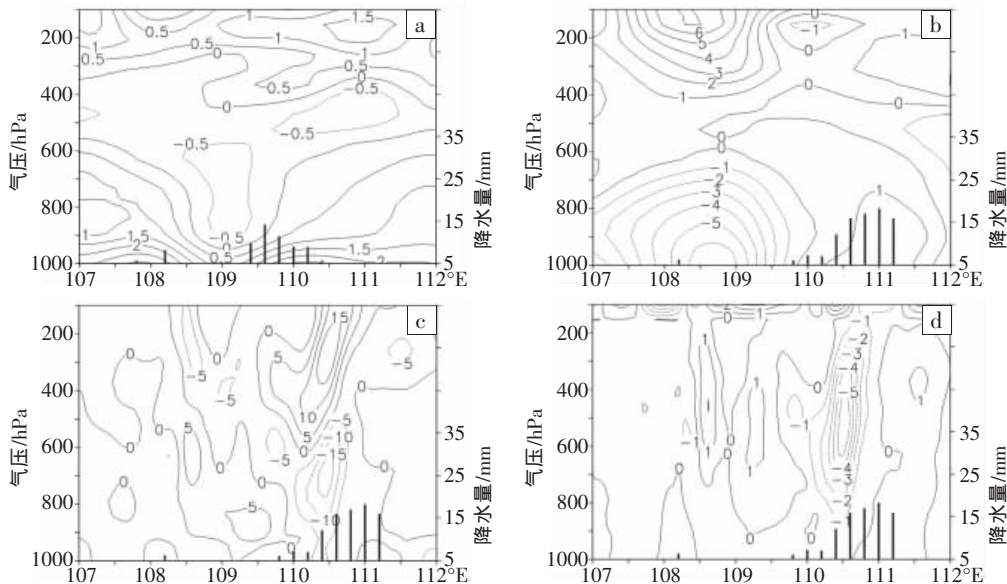


图6 2008年6月11日17时沿23.5°N (a),20时沿24.5°N (b)的带通滤波位势高度场(单位: gpm),20时沿24.5°N 的扰动散度场(c,单位: $10^{-5} s^{-1}$)与扰动垂直速度垂直剖面图(d,单位: $Pa \cdot s^{-1}$)。黑竖线表示对应经度上地面降水量

第一类中尺度低压在产生降水之前,属于冷性低压(图7a),其中心处于冷暖中心之间偏冷一侧等温线密集区,雨团产生于中尺度低压东部相对较暖区,这

场以及扰动散度场和扰动垂直速度垂直剖面图。在垂直方向上,第一类中尺度低压中心较低,在高层一般对应有高压,是较典型的斜压系统(图6a、b),该中尺度低压在20时发展最强盛时其高度也在400 hPa以下,其上对应高压。这种配置结构是低层辐合、高层辐散效应导致的(图6c)。为了解中尺度垂直运动,根据带通风场重新使用运动学方法进行计算,得到对应带通风场垂直速度(图6d),从中看出,上升区位于低压前部,最大上升中心位于中层400 hPa。可见,降水的位置与辐合以及上升中心对应非常好。

也正是最大辐合和上升运动中心位置。当降水产生后,中尺度低压逐渐变为暖性(图7b)。这种变性促使低压趋于成熟并消亡。

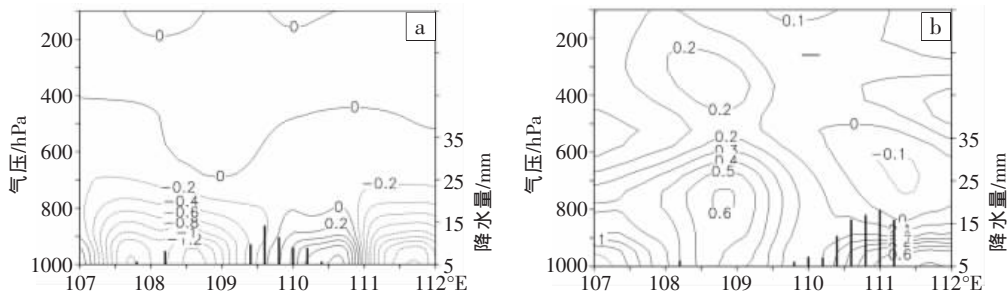


图7 2008年6月11日17时沿23.5°N (a),20时沿24.5°N (b)的带通滤波温度(单位: K)垂直剖面图。黑竖线表示对应经度上地面降水量

与第一类中尺度低压中心一直较低不同的是,第二类中尺度低压发展过程中其低压中心不断上移(图8a、b)。在其产生和发展阶段,辐合主要集中在700 hPa以下(图8c),低压中心对应强上升运动中心(图8d),最大上升中心也较第一类低,最强上升运动量值为-5

$Pa \cdot s^{-1}$ 。11日17时,低压范围内上升运动强度急剧减至 $-0.5 Pa \cdot s^{-1}$,但因惯性低压仍在维持。到23时,对应低压位置变为下沉运动,低压迅速消亡。这种低压中心、辐合中心、上升中心的差异,与其热力结构差异密切相关。

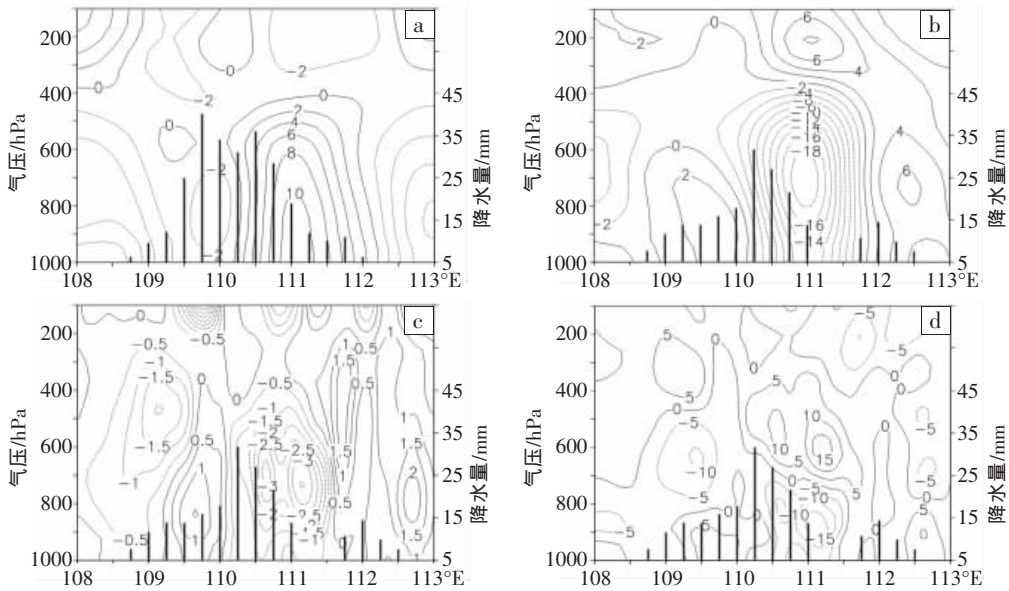


图 8 2008 年 6 月 12 日 11 时沿 25.0°N (a)、14 时沿 25.8°N (b)的带滤波位势高度场(单位: gpm), 12 日 14 时沿 25.8°N 的带滤波散度场(c, 单位: $10^{-5} s^{-1}$)和扰动垂直速度垂直剖面图(d, 单位: $Pa \cdot s^{-1}$)。黑竖线表示对应经度上地面降水量

在热力结构上,第二类中尺度低压产生之初,700 hPa 左右因降水凝结潜热释放而存在较暖层(图 9a)。随暖空气势力增大和雨带中低层上升运动加强,暖中

心上移(图 9b),中尺度低压迅速发展且其中心也逐渐上移。当暖空气被抬升至中高层时而形成上暖下冷,不利于垂直运动维持,低压迅速消亡。

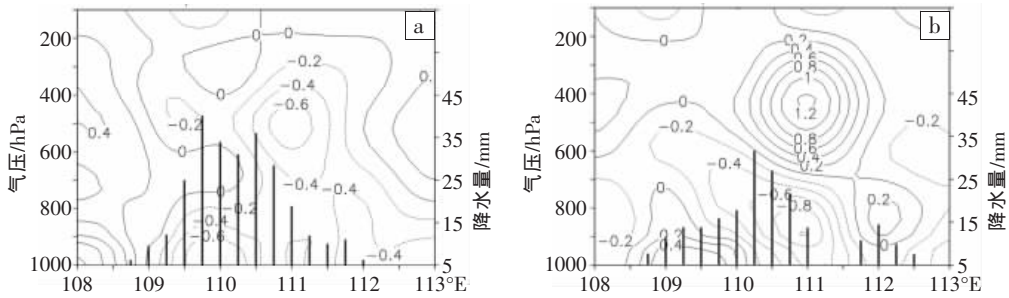


图 9 2008 年 6 月 12 日 11 时沿 25.0°N (a)、14 时沿 25.8°N (b)的带滤波温度垂直剖面图(单位: K)。黑竖线表示对应经度上地面降水量

4.3 两类低压特征的异同

由上述对两个不同类型中尺度低压的分析可知,其发展演变和结构特征有较大差异。第一类低压是在降水发生之前出现的,在位势场上表现为先有低压和流场辐合,降水是低压前部暖空气辐合上升凝结产生的,相应的雨团强度和范围均受低压强度和范围限制,降水产生使低压变性,导致其趋向成熟和消亡。第二类中尺度低压出现在降水之后,由于雨带中心降水凝结潜热释放,低层空气受热上升,致使低压产生并发展;当低压发展之后,随引导气流方向移动,一旦脱离雨区,中尺度低压减弱并逐渐远离雨区而消亡。

5 中尺度系统的发展因子分析

两类中尺度低压演变和结构特征的差异是由其发生发展因子决定的。为了探明二者的发展因子和能

量来源有何不同,本文使用大中尺度相互作用机制诊断方程^[22]分析中尺度系统的发展因子和机制。其方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \xi_D}{\partial t} + \frac{\partial \xi_Z}{\partial t} = & -V_D \cdot \nabla \xi_D - V_Z \cdot \nabla \xi_Z - V_D \cdot \nabla \xi_Z - V_Z \cdot \nabla \xi_D \\ & -\omega_D \frac{\partial \xi_D}{\partial p} - \omega_Z \frac{\partial \xi_Z}{\partial p} - \omega_D \frac{\partial \xi_Z}{\partial p} - \omega_Z \frac{\partial \xi_D}{\partial p} \\ & -(\xi_D + f) \nabla \cdot V_D - (\xi_Z + f) \nabla \cdot V_Z - \xi_D \nabla \cdot V_Z \\ & - \xi_Z \nabla \cdot V_D - v_D \beta - v_Z \beta \\ & + \left[\frac{\partial \omega_D}{\partial y} \frac{\partial u_D}{\partial p} - \frac{\partial \omega_D}{\partial x} \frac{\partial v_D}{\partial p} \right] + \left[\frac{\partial \omega_Z}{\partial y} \frac{\partial u_Z}{\partial p} - \frac{\partial \omega_Z}{\partial x} \frac{\partial v_Z}{\partial p} \right] \\ & + \left[\frac{\partial \omega_Z}{\partial y} \frac{\partial u_D}{\partial p} - \frac{\partial \omega_Z}{\partial x} \frac{\partial v_D}{\partial p} \right] + \left[\frac{\partial \omega_D}{\partial y} \frac{\partial u_Z}{\partial p} - \frac{\partial \omega_D}{\partial x} \frac{\partial v_Z}{\partial p} \right] \end{aligned}$$

其中,下标为 D 表示低通量或其计算量,即大尺度平均场;下标为 Z 表示带通量或其计算量,即中尺度扰动场。因大尺度涡度是缓慢演变的,中尺度涡度

是快速变化的，故可略去方程左端第一项大尺度变化。方程右端依次标为 1—18 项，左端一项标为第 19 项，依次用 S1、S2、…、S18 和 S19 表示。其中，S1—S4 项是涡度平流项；S2—S8 是涡度垂直输送项；S9—S12 项为散度项；S13、S14 是 β 项；S15—S18 是涡管扭曲项；S19 是中尺度涡度变化项，可代表局地涡度变化。对各项进行计算分析，可得出影响中尺度涡度变化从而影响整个区域涡度变化的主要因子。

计算结果表明，第 S2、S3、S6、S16 量级与涡度局地变化(S19)量级相当，而大尺度项(S1、5、9、15)和 β 项(S13、14)较涡度变化项(S19)小 1~2 个量级，这与尺度分析结果一致。其它各项经计算也较 S19 小数倍至 1 个量级。故以下分别以数值较大的 S2、S3、S6、S16 及 S19 来进行重点分析。

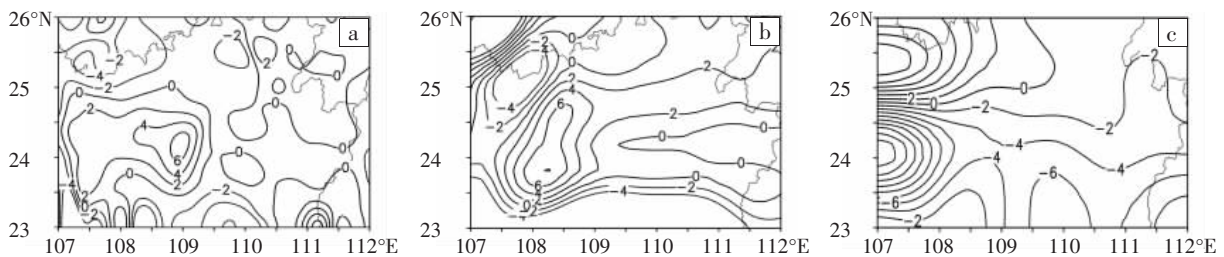


图 10 2008 年 6 月 11 日 17 时 S19 项(a)、S3 项(b)与 20 时 S3 项(c)的 700 hPa 涡度局地变化图(单位: $10^{-8} s^{-2}$)

5.2 第二类中尺度低压的发展消亡因子

图 11 给出第二类中尺度低压发展阶段 (12 日 11 时)S19、S2、S3、S6、S16 各项 700 hPa 涡度局地变化。从中可见，S19 正值中心强度为 $15 \times 10^{-8} s^{-2}$ ，对应中尺度低压出现并剧烈发展的位置(图 11a)。但与前类低压不同的是，除 S3 贡献较大外(图 11c)，低压发展还同时受到 S2($-V_z \cdot \nabla \xi_z$)(图 11b)和 S16[($\partial \omega_z / \partial y$)($\partial u_z / \partial p$) - ($\partial \omega_z / \partial x$)($\partial v_z / \partial p$)](图 11e)的促进作用以及 S6[$-\omega_z (\partial \xi_z / \partial p)$](图 11d)的抑制作用，上述各项对应涡度变化的中心值依次为 $12 \times 10^{-8} s^{-2}$ 、 $6 \times 10^{-8} s^{-2}$ 、 $-7 \times 10^{-8} s^{-2}$ 、 $5 \times 10^{-8} s^{-2}$ 。

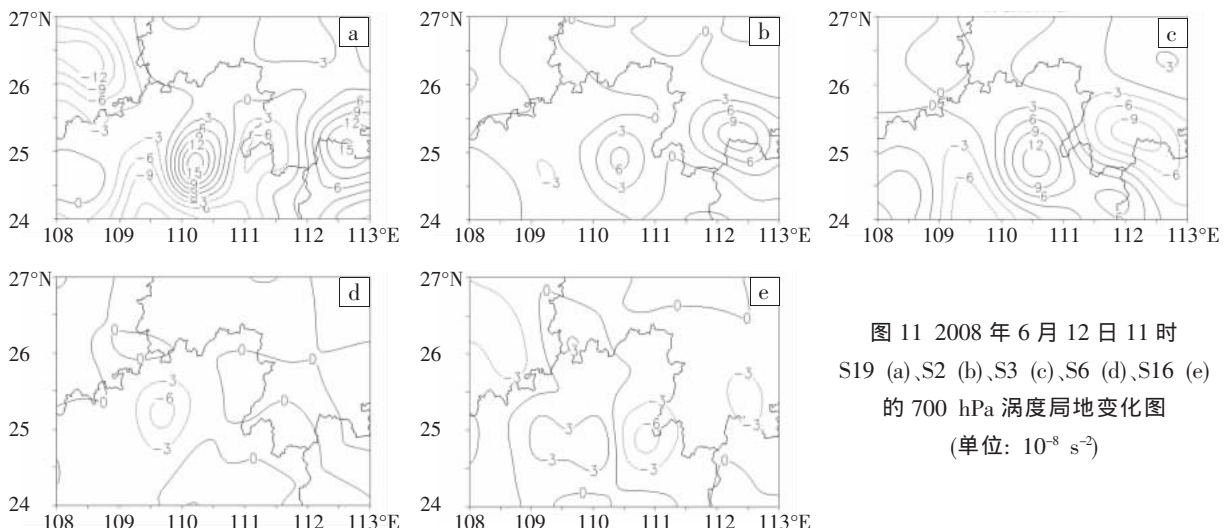


图 11 2008 年 6 月 12 日 11 时 S19 (a)、S2 (b)、S3 (c)、S6 (d)、S16 (e) 的 700 hPa 涡度局地变化图 (单位: $10^{-8} s^{-2}$)

5.1 第一类中尺度低压的发展消亡因子

在第一类中尺度系统发展阶段，如 11 日 17 时，带通涡度的局地变化 S19 项($\partial \xi_z / \partial t$)正值区对应下一时段中尺度低压位置(图 10a)，而对此正值区贡献最大的是平均风对扰动涡度的平流输送项 S3($-V_D \cdot \nabla \xi_z$)，见图 10b；S19 在低压中心(108.0°E、23.5°N)附近值为 $6 \times 10^{-8} s^{-2}$ ，而 S3 的值与之相当。也就是说，第一类低压的发展主要是大尺度能量向中尺度扰动的转化引起的。此时低空急流恰好处于涡度变化的正值区以南 (图略)，可认为是低空急流能量向扰动能量的转化引起该中尺度低压产生和发展。同理，中尺度低压减弱主要是由平均风对扰动涡度的输送作用为负贡献而决定的(图 10c)，11 日 23 时原中尺度低压所在位置 S3 为负值。

其意义是，这类低压在发展过程中中尺度扰动平流以及中尺度涡管扭曲引起的正作用所占比重较大；另外，因暖空气剧烈上抬，中尺度垂直运动消耗了能量，不利于低压持续发展。这说明这类中尺度低压需在中尺度扰动活跃的环境中才能产生并发展，而已存在的雨带提供了这样的环境。

在减弱阶段 (图略)，S16 作用减弱至几乎可忽略。S6 变为正值，说明垂直运动因消耗能量总是抑制当前低压的变化趋势。S2、S3 均为负值，与 S19 同号，说明平流项是中尺度低压发展消亡的最终决定因素。

5.3 两类中尺度低压发展因子异同

综上所述可知,两类中尺度低压发展演变均受到低空急流扰动能量向中尺度扰动能量转化(体现为对中尺度涡度的平流输送)的作用,在第一类低压发展消亡过程中,这种作用甚至是决定性的,其为正贡献时促使中尺度低压发展,为负贡献时促使中尺度低压消亡。这说明大、中尺度相互作用是决定第一类中尺度低压发展和消亡的决定因素。

在第二类低压发展消亡过程中,扰动涡度平流的涡度集中作用、扰动垂直运动能量的消耗以及带通涡管扭曲作用均十分重要。扰动涡度平流的贡献正、负与中尺度低压的发展消亡同向;扰动垂直输送则与当前系统的变化趋势反向;中尺度涡管扭曲只在中尺度低压发展阶段的促进作用较为明显。

总体上,大尺度提供能量是两类低压发展过程所必须的,大、中尺度相互作用是中尺度低压发展的重要机制;第二类中尺度低压发展过程中中尺度扰动本身的作用较前一类更为显著;无论是哪类低压,其产生与发展过程均是促进因子和抑制因子并存,如垂直运动总是抑制当前低压的变化趋势。正是这种由大尺度风场和中尺度扰动垂直速度、涡度的配置和作用,决定了两类低压的发展消亡。

6 结论与讨论

通过对比分析中尺度扰动和雨团出现的时间先后,将中尺度低压分为降水前产生的中尺度低压和降水后产生的中尺度低压两类,分别分析了其发展演变、动力热力垂直结构特征及发展消亡因子。虽然两类中尺度低压的尺度相当,均表现为气压场向风场适应,且与降水有关,但二者也存在较大差异:

(1) 第一类先于降水产生,是雨团生成的原因;第二类后于降水产生,可能是降水导致的结果。

(2) 第一类低压在产生降水之前偏于冷性,随降水凝结潜热释放,低压发生变性,变性后低压趋于消亡。第二类低压从产生之初就是暖性的,其发展伴随暖空气抬升、暖中心上移,当雨团低层冷空气势力增强,抬升暖空气至中层时,低压趋于消亡。

(3) 就发展因子而言,第一类低压发展消亡均主要取决于大、中尺度的相互作用,表现为平均风对扰动涡度的平流输送贡献较大;第二类低压发展趋势同时还取决于中尺度扰动本身的作用,表现为扰动涡度平流、扰动垂直输送、扰动涡管扭曲的作用都很重要。

以上结论均基于个例观测研究,是否具有普遍性尚有待作批量个例检验。另外,为什么有些中尺度低

压并不伴随降水过程?或某些降水并未引发中尺度低压产生?不同类型中尺度低压的发展机制如何?仍不清楚。本文仅从大、中尺度作用方面进行了分析,从其他方面更为全面深刻的探讨也是必要的。此类问题还有待使用更高时空分辨率的观测资料深入研究。

参考文献:

- [1] 黄土松,李真光,包澄澜,等.华南前汛期暴雨[M].广州:广东科技出版社,1986.
- [2] 彭丽英,王谦谦,马慧.华南前汛期暴雨气候特征的研究[J].南京气象学院学报,2006,29(2):249-253.
- [3] 陈红,赵思雄.第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究[J].大气科学,2000,24(2):238-252.
- [4] 马慧,陈植华,毛文书,等.华南前汛期降水异常及其环流特征分析[J].热带气象学报,2009,25(1):89-96.
- [5] 朱乾根.低空急流与暴雨[J].象科技资料,1975,21(8):12-18.
- [6] 王蕾,张文龙,周军.中国西南低空急流活动的统计分析[J].南京气象学院学报,2003,26(6):797-805.
- [7] 张文龙,董剑希,王昂生,等.中国西南低空急流和西南低层大风对比分析[J].气候与环境研究,2007,12(2):199-210.
- [8] 赵玉春,王叶红.近 30 年华南前汛期暴雨研究概述[J].暴雨灾害,2009,28(3):193-202,228.
- [9] 蒙伟光,张艳霞,戴光丰,等.华南沿海一次暴雨中尺度对流系统的形成和发展过程[J].热带气象学报,2007,23(6):521-530.
- [10] 陈敏,陶祖钰,郑永光,等.华南前汛期锋面垂直环流及其与中尺度对流系统的相互作用[J].气象学报,2007,65(5):785-791
- [11] 张晓惠,倪允琪.华南前汛期锋面对流系统与暖区对流系统的个例分析与对比研究[J].气象学报,2009,67(1):108-121.
- [12] 孙健,赵平,周秀骥.一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响[J].气象学报,2002,60(3):333-342.
- [13] 孙建华,赵思雄.华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究(一):物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J].大气科学,2002,26(5):633-646.
- [14] 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.
- [15] 王立琨,郑永光,王洪庆,等.华南暴雨试验过程的环境场合云团特征的初步分析[J].气象学报,2001,59(1):115-119.
- [16] 慕建利,王建捷,李泽椿.2005 年 6 月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析[J].气象学报,2008,66(3):437-451.
- [17] 莫毅,潘晓滨,臧增亮,等.资料同化对一次华南暴雨影响的数值试验研究[J].暴雨灾害,2008,27(4):289-294.
- [18] 夏茹娣,赵思雄,孙建华.一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究[J].大气科学,2006,30(5):988-1008.
- [19] 倪允琪,周秀骥,张人禾,等.我国南方暴雨的试验与研究[J].应用气象学报,2006,17(6):690-704.
- [20] 李红莉,崔春光,王志斌,等.LAPS 的设计原理、模块功能与产品应用[J].暴雨灾害,2009,28(1):64-70.
- [21] 徐元泰,丁一汇.气象场的客观分析和中尺度滤波[J].大气科学,1988,12(3):274-282.
- [22] 周毅,赵磊刚,李昀英.台风暴雨过程中不同尺度系统的相互作用[J].气象科学,2009,29(2):173-180.