

傅慎明, 赵思雄, 孙建华, 等. 2010. 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 235-252. Fu Shenming, Zhao Sixiong, Sun Jianhua, et al. 2010. One kind of vortex causing heavy rainfall during pre-rainy season in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 235-252.

# 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究

傅慎明<sup>1,2</sup> 赵思雄<sup>1</sup> 孙建华<sup>1</sup> 李万莉<sup>2,3</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

**摘要** 采用 2008 年我国南方暴雨野外科学试验 (SCHeREX) 加密资料和 NCEP 再分析资料、FY-2C 卫星 TBB 资料以及常规观测资料对广西致洪暴雨进行了研究。研究发现, 西南涡是此次暴雨过程的直接影响系统, 对流和降水主要发生在低涡的中部及其东南方。中高纬切断低压和副热带高压稳定维持, 500 hPa 短波槽沿高原东侧南下, 诱导西南涡向东南移入广西, 这种情况并不太常见, 这是由于槽后冷空气活跃, 但路径偏西。受副热带高压西伸影响, 低槽与西南低涡移动缓慢。在移入广西前西南涡一度减弱, 但由于有明显的中、低纬系统相互作用存在, 季风槽为本次暴雨输送了充沛的水汽, 致使西南涡再度加强, 引发暴雨。暴雨过程中尺度对流云团活动频繁, 强度大, 降水强, 有大约 11 个中尺度雨团缓慢移动。桂林的探空资料表明, 暴雨区中低层温度层结多为中性, 这可能是对流混合的结果, 西南涡过境后, 低层风场有明显变化, 大气抬升凝结高度显著降低, 对流有效位能 (CAPE) 由于释放而降低。在上述研究的基础上, 本文提出了一类华南前汛期低涡切变型暴雨概念模型。

**关键词** 云顶亮温 西南涡 华南前汛期 季风槽

**文章编号** 1006-9895 (2010) 02-0235-18 **中图分类号** P426 **文献标识码** A

## One Kind of Vortex Causing Heavy Rainfall during Pre-rainy Season in South China

FU Shenming<sup>1,2</sup>, ZHAO Sixiong<sup>1</sup>, SUN Jianhua<sup>1</sup>, and LI Wanli<sup>2,3</sup>

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

**Abstract** Based on observations from the South China Heavy Rainfall Experiment (SCHeREX) and the reanalysis data from NCEP/NCAR, one kind of vortex with heavy rainfall during pre-rainy season in South China (1200 UTC 10 June-0000 UTC 13 June 2009) is analyzed, and the results are as follows. The southwest vortex (SWV) was the direct influencing system of heavy rainfall, convective activities and precipitation were always at the center or to the southeast of the southwest vortex. The rain areas moved from west to east with the southwest vortex and the short-wave trough. Convective clouds were active during this rainfall (some of them are meso-scale or meso-scale systems, respectively) and there were about 11 meso-scale rain clusters, which remained quasi-stationary or moved slowly. Neutral stratification, sometimes with thermal inversion, was located at the middle to low levels. After the

**收稿日期** 2009-04-13, 2009-10-28 **收修定稿**

**资助项目** 国家重点基础研究发展计划项目 (编号: 2009CB421401), 国家自然科学基金资助项目 40875021、40930951

**作者简介** 傅慎明, 男, 1981 年出生, 博士, 主要从事于中尺度气象学, 灾害天气动力学及数值模拟研究。E-mail: fushm@mail.iap.ac.cn

southwest vortex moved out, wind at low levels changed remarkably, and the convective available potential energy (CAPE) decreased. The long persistence of cut-off low and subtropical high contributed to the stable maintenance of circulation. The short-wave trough at 500 hPa moved southward along the Tibetan Plateau, leading the southwest vortex to move southeastward to Guangxi. Influenced by the subtropical high, the trough was quasi-stationary, and after 0000 UTC 13 June, as the subtropical high retreated, the trough moved eastward. During the heavy rainfall, there were obvious interactions between middle and low latitude systems: the cold air was active, and the monsoon trough transported enough moisture to Guangxi, which enhanced the SWV. Based on the above researches, the schematic model of one kind of vortex causing heavy rainfall has been proposed.

**Key words** TBB, southwest vortex, pre-rainy season in South China, monsoon trough

## 1 引言

我国的暴雨季节主要集中在每年夏季风爆发和盛行时期,在夏季风的影响下,我国东部先后会出现三个最主要的雨带(陶诗言等,1980;Tao and Ding,1981),它们分别位于华南地区、长江流域和华北地区,很多学者做了研究(孙淑清和杜长萱,1996;高守亭等,2003;方宗义等,2005;周玉淑等,2005)。过去的研究(陶诗言等,1980;陈红和赵思雄,2000;史学丽和丁一汇,2000)表明,华南前汛期降水是每年我国雨季开始出现最早的阶段,其降水强度常居我国三条雨带之首,降水量约占全年的40~60%,华南前汛期中的暴雨降水量又占同期降水量的50%。总体而言,华南前汛期的降水具有时间上的持续性、突发性(黄土松和李真光,1986),正是由于华南前汛期暴雨的这些特点,加之地形的复杂,使得华南地区易在前汛期阶段发生洪涝灾害,造成国家经济建设和人民生命财产的重大损失。不少学者对华南前汛期暴雨作了研究(陶诗言等,1980;黄土松和李真光,1986;孙建华和赵思雄,2000;张庆红和刘启汉,2000;文莉娟等,2006;Zhao et al.,2007)。为了弄清华南前汛期暴雨的问题,我国曾于1977~1979年开展华南暴雨试验,大体弄清了华南暴雨的大尺度特征(黄土松和李真光,1986)。而后,又于1998年5月~6月开展了“海峡两岸及其临近地区的暴雨试验”(HUAMEX),对其中的中尺度特征及影响系统有了进一步的揭示(周秀骥和薛纪善,2003)。上述研究表明,华南前汛期暴雨多数为锋前暖区暴雨,由于华南暴雨受中、低纬系统及海陆分布等的影响,其前汛期暴雨的特征是复杂的。为了进一步深

入探究华南前汛期暴雨的特点,2008年我国开展了南方暴雨野外科学试验(SCHeREX),取得了一些华南前汛期暴雨个例的观测资料,在此基础上,本文将讨论2008年6月中旬一次由低涡切变引发的华南前汛期暴雨。这次暴雨的不同特点在于它的影响系统显著(西南低涡),暴雨过程中存在明显的中低纬度间的相互作用(西南涌及季风涌),这次暴雨过程不同于一般的华南前汛期锋前暖区暴雨,可将之归纳为一类低涡切变型华南前汛期暴雨过程。

西南涡产生于我国西南地区,与华北冷涡等不同,它是位于对流层低层(多见于850 hPa、700 hPa上)的中尺度涡旋系统(高守亭,1987;陈忠明等,2004;陈启智等,2007),由于受地面特征影响,不一定每次过程都出现闭合中心,其水平特征尺度一般为200~500 km。西南涡是青藏高原和四川盆地特殊的地形条件与有利的大尺度环流背景共同作用的产物,很多学者对其作了研究(卢敬华,1986;陈忠明等,2003,2004;赵思雄,1977;赵思雄和傅慎明,2007),得到了一批成果。作为我国一种重要的暴雨天气系统,西南涡全年都有发生,但造成强降水或强对流天气的西南涡多出现在夏半年(陈忠明等,2004;陈启智等,2007)。西南涡多在西南地区生消,在有利的环流形势下一些涡旋可以东移,主要影响我国江淮流域地区(陈忠明等,2004),但也有东移北上影响我国华北地区者,如1963年8月的海河大暴雨(陶诗言等,1980),还有东南移动影响华南的,但为数甚少,本次广西暴雨过程就是受东南移动的西南低涡影响的。

季风槽一般是指西南季风期位于印度半岛中部的低气压槽,此槽一般成东东南-西西北走向,大致

与喜马拉雅山平行，槽线平均约位于山南 450 km 处，每日天气图上南北移动显著，西南季风的活跃和中断与此槽位置有密切关系，季风槽发展明显时，向东可扩展到中南半岛，并与菲律宾一带的近赤道槽连接，此时我国华南经常出现一西南季风和东南季风的辐合区，有人亦称此辐合区为季风槽。也有人把华南前汛期出现在南海地区的低压槽称为季风槽，此槽一般呈东西向，是华南前汛期降水的主要天气系统（孔期等，2005；李崇银和潘静，2007）。目前，对季风槽的定义还不够统一，本文中主要不是指印度季风槽，而是指位于中南半岛和南中国海的季风槽，因为后者对华南天气有更直接的影响，本次广西暴雨过程中其作用显著。

本次广西暴雨过程影响严重：2008 年 6 月 11 日 20 时至 13 日 08 时（国际协调时，下同）普降暴雨到大暴雨，局部出现特大暴雨，强降雨造成广西桂林、柳州、河池、梧州、贺州等 35 个县 158 万人受灾，最大降雨量出现在柳州市，24 小时降水量达 340.5 mm。受强降水影响，漓江、桂江、柳江、洛清江等江河水位暴涨，洛清江永福县域河段超越了实测历史最高水位。

本次广西暴雨过程就影响系统而言，不属于典型的锋前暖区暴雨，因此值得进一步分析，应弄清其中的一些问题。（1）为何此次暴雨来得较迟？发生在广西的强暴雨影响系统是什么，特点如何？（2）本次暴雨过程是在何种大尺度环流形势下发生的？为何 6 月 13 日后广西暴雨减弱？（3）西南涡为何向东南方移动至华南？西南涡东移出四川时一度减弱，进入广西后再次加强，是何原因？（4）季风槽（涌）及其水汽、热量输送对暴雨有何贡献？（5）这类华南前汛期暴雨与过去所研究的华南前汛期锋前暖区暴雨有何不同？为此，本文利用尽可能收集到的资料对 2008 年 6 月中旬广西致洪暴雨做了分析。

## 2 资料和研究方法

本文采用 6 小时一次  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的 NCEP/NCAR 再分析资料、逐小时地面加密观测资料、加密探空资料，FY-2C 卫星 TBB 资料以及常规台站观测资料进行研究。

主要研究方法如下：利用 NCEP/NCAR 资料和常规观测资料分析形势场和流场的演变过程，并

计算一些诊断量作进一步的深入分析。利用逐小时地面加密观测资料研究降水以及地面风场、气压场的演变过程。利用 FY-2C 卫星 TBB 资料分析对流活动，及其与降水和影响系统的关系。利用代表站的加密探空资料来进一步分析暴雨过程中各物理量的演变特征。综合各种资料的分析结果，给出本类暴雨的概念模型。

## 3 中尺度雨团和云团

广西暴雨开始于 2008 年 6 月 11 日 12 时，13 日 00 时结束，持续了 36 小时。由图 1 可知，本次降水覆盖了广西绝大部分地区，广西东北部降水最强，降水极值中心（桂林附近）超过 250 mm。降水始于广西西北部，随着西南涡移动，雨区向东南移动进入广西，降水随之加强，12 日 00 时，广西北部出现强降水（此时降水最强），此后降水减弱，继续东移，12 日 18 时，广西东北部降水加强，再次出现强中心，此后降水减弱、东移，13 日 00 时，雨区东移出广西，广西暴雨过程结束。雨区自西向东移动（极易与洪峰叠加）是本次降水的一个显著特征（与西南涡东移一致），降水的最强时段为 12 日 00 时~12 时。

图 2a~e 为各代表站的逐小时降水（11 日 19 时~23 时缺测），由此可知，本次降水过程有着显著的中尺度特征，其中桂林的降水强度最大，持续时间最长；12 日 00 时~12 时是各站降水的最强时段 [受强对流云团 C2~C4（见表 1）影响]。河池

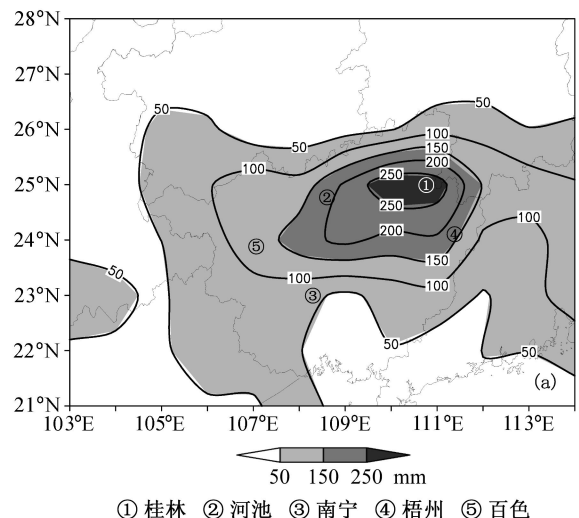


图 1 广西暴雨过程累计降水量

Fig. 1 The accumulated precipitation during Guangxi heavy rainfall

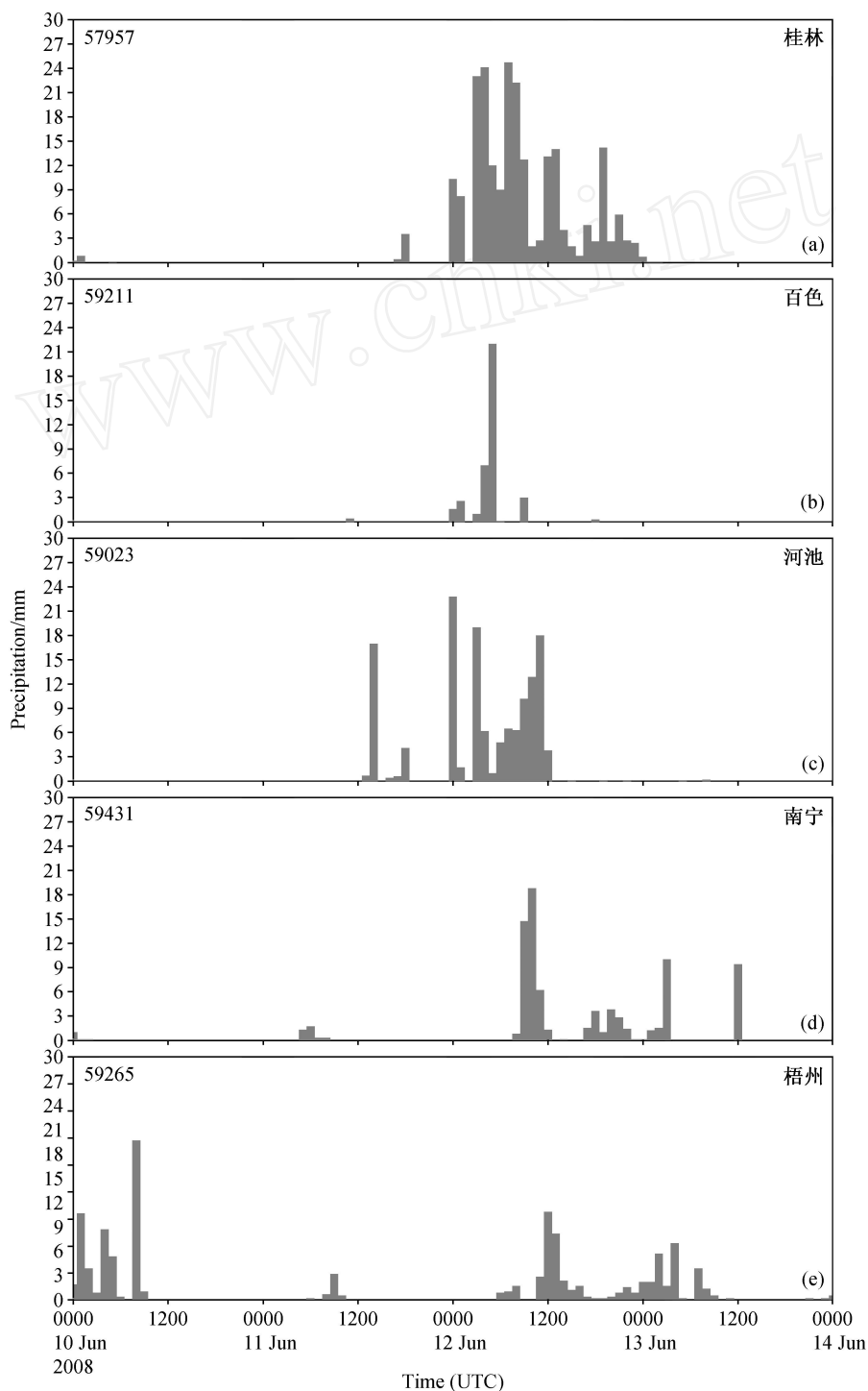


图2 (a) 桂林、(b) 百色、(c) 河池、(d) 南宁、(e) 梧州站的逐小时降水实况 (单位: mm)。左上角数字代表站号

Fig. 2 Hourly precipitation at (a) Guilin, (b) Baise, (c) Hechi, (d) Nanning, and (e) Wuzhou. The number on the top left corner stands for station ID

位置偏北、偏西因而降水开始和结束早于桂林, 偏南的南宁、百色和梧州降水期均较短, 整体雨量偏小。

雨团与强降水直接相关, 因而对暴雨过程中雨团的分析十分必要, 这里中尺度雨团是指降水率 10 mm/h 的雨区, 根据上述定义, 利用加密观测的

表 1 广西暴雨过程中主要对流云团的活动

Table 1 Convective cloud clusters during the heavy rainfall in Guangxi

| 编号 | 云团 TBB 范围/ K                                 | 最大 1 小时<br>降水量/ mm | 云团生命史                                | 云团位置             | 云团最大面<br>积估计/ km <sup>2</sup> | 产生降水的<br>持续时间 |
|----|--|--------------------|--------------------------------------|------------------|-------------------------------|---------------|
| C1 | - 52 以下, 没有 - 72 以下中心<br>出现                  | 42                 | 10 日 13 时 ~ 11 日 04 时,<br>约 16 小时    | 四川南部贵州西部         | 350 × 350                     | 约 14 小时       |
| C2 | - 52 以下, 伴有两次 - 72 以下<br>的强对流云团 C2-1、C2-2 发生 | 47                 | 11 日 08 时 ~ 12 日 06 时,<br>约 23 小时    | 广西西北部、北部<br>和东北部 | 400 × 500                     | 17 小时以上       |
| C3 | - 52 以下, 没有 - 72 以下中心<br>出现                  | 44                 | 12 日 01 时 ~ 12 日 08 时,<br>约 8 小时     | 广西中部和东部          | 100 × 100                     | 约 6 小时        |
| C4 | - 52 以下, 伴有 - 72 以下中心<br>出现                  | 90                 | 12 日 07 时 ~ 12 日 20 时,<br>约 14 小时    | 广西中部和东部          | 300 × 500                     | 约 14 小时       |
| C5 | - 52 以下, 没有 - 72 以下中心<br>出现                  | 26                 | 12 日 22 时 ~ 13 日 02 时,<br>约 5 小时     | 广西东北部            | 100 × 150                     | 约 5 小时        |
| C6 | - 52 以下, 伴有 - 72 以下中心<br>出现                  | 85                 | 12 日 16 时 ~ 13 日 11 时<br>以后, 20 小时以上 | 广东南部             | 400 × 500                     | 20 小时以上       |

表 2 广西降水过程中的雨团活动统计

Table 2 Statistics of rain clusters during the heavy rainfall in Guangxi

| 编号 | 生成时间      | 消亡时间      | 运动特性   | 最大覆盖面积/ km <sup>2</sup> | 最大 1 小时雨强/ mm | 雨团主要范围       |
|----|-----------|-----------|--------|-------------------------|---------------|--------------|
| 1  | 11 日 07 时 | 11 日 10 时 | 略有东移   | 130 × 150               | 45            | 贵州西南部广西西北部   |
| 2  | 11 日 11 时 | 11 日 13 时 | 稳定少动   | 90 × 130                | 47            | 广西西北部        |
| 3  | 11 日 13 时 | 11 日 17 时 | 东移     | 100 × 300               | 34            | 广西西北部        |
| 4  | 11 日 17 时 | 11 日 19 时 | 稳定少动   | 80 × 90                 | 32            | 广西西北部        |
| 5  | 12 日 00 时 | 12 日 03 时 | 略有东移   | 200 × 90                | 28            | 广西北部         |
| 6  | 12 日 03 时 | 12 日 06 时 | 稳定少动   | 250 × 500               | 44            | 广西北部         |
| 7  | 12 日 07 时 | 12 日 09 时 | 略有东移   | 150 × 400               | 38            | 广西北部 and 东北部 |
| 8  | 12 日 09 时 | 12 日 11 时 | 稳定少动   | 150 × 500               | 62            | 广西北部 and 东北部 |
| 9  | 12 日 12 时 | 12 日 17 时 | 南移     | 200 × 400               | 90            | 广西北部 and 东北部 |
| 10 | 12 日 18 时 | 12 日 21 时 | 略有南移   | 100 × 400               | 54            | 广西东北部        |
| 11 | 12 日 22 时 | 13 日 02 时 | 向东北方移动 | 130 × 180               | 26            | 广西东北部和广东北部   |

逐小时降水资料 (图 3) 对本次降水过程的中尺度雨团活动作了统计 (见表 2)。

由表 2 可知, 广西暴雨过程有着显著的中尺度特征, 其间大约有 11 个中尺度雨团活动, 其中最大 1 小时降水量为 90 mm, 而最长持续时间约为 5 小时, 雨团稳定少动或随降水影响系统移动。从雨团的时间分布可知, 本次降水有着很强的连续性 (降水影响系统西南涡稳定维持); 从雨团的空间分布可知, 降水雨团亦有自西向东移动的趋势 (这可能与西南涡自西向东移动有关)。

由 FY-2C 卫星云顶亮温 (TBB) 分析可知, 广西暴雨期间对流活动旺盛, 有多次强对流云团发生 (图 3), 其间 6 次强对流云团即 C1 ~ C6 伴有强降水, 而与广西暴雨关系最密切的云团为 C2 ~ C5,

它们是本次广西暴雨的直接制造者, 各云团活动特征见表 1。

综合分析对流云团活动可知, 暴雨过程中, 对流云团活动频繁, 强度大, 降水强, 对流云团多属于中尺度和中尺度的系统, 这十分有利于暴雨的产生。云团 C2 ~ C5 与广西暴雨紧密联系, 其 TBB 均在 - 52 以下, - 72 以下的强对流中心也时有出现, 其对应最强的 1 小时降水量为 90 mm, 对流云团的最长持续时间为 17 小时左右, 对流云团的最大覆盖面积约为 400 km × 500 km。对流云团亦自西向东移动, 与西南涡移速相当; 就影响系统而言, 500 hPa 的短波槽、700 hPa 的低空切变线、西南涡以及地面的低压区和风场辐合 (图略) 均是产生强对流的有利因素。

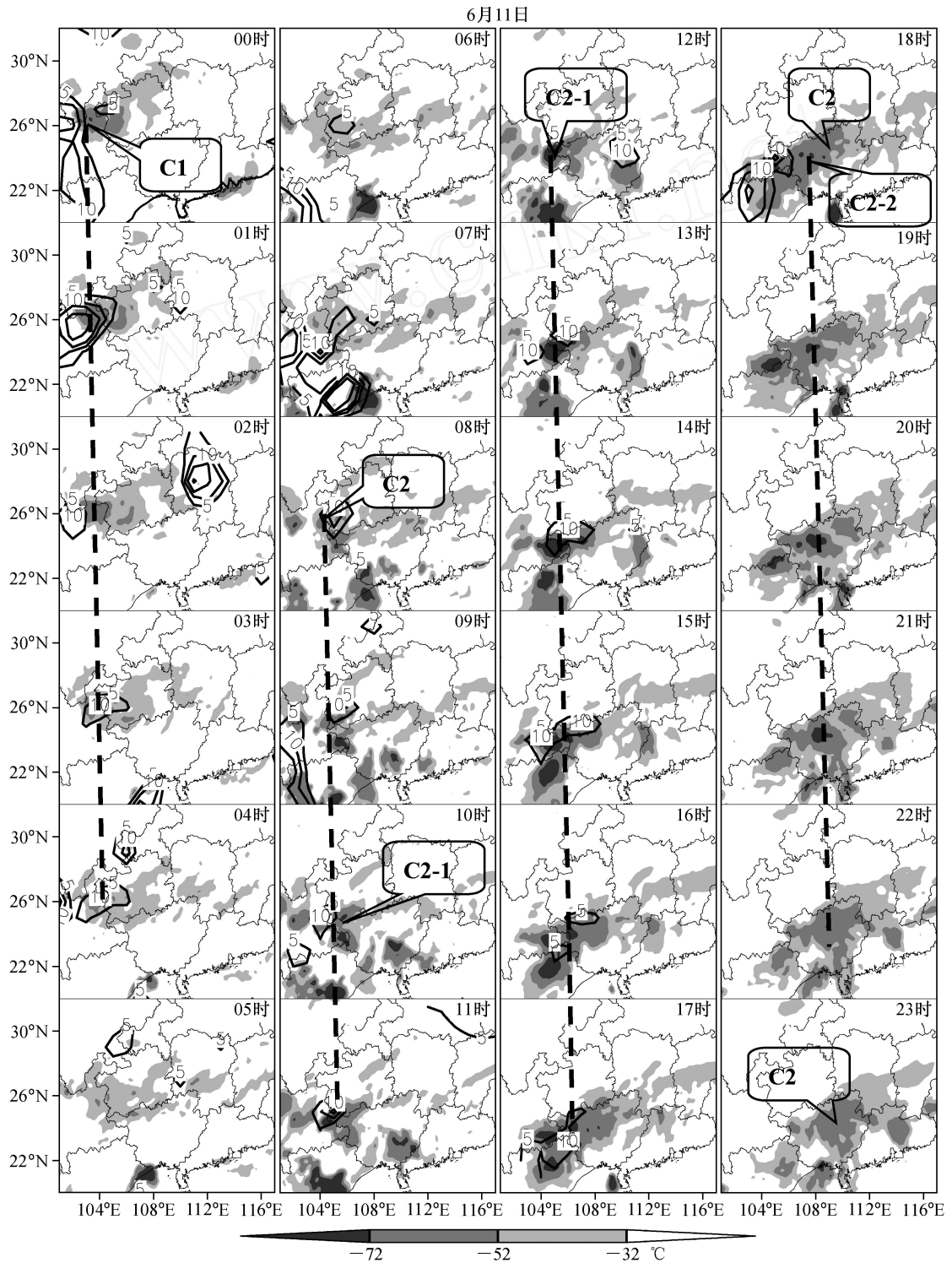


图3 2008年6月11~12日广西暴雨期间 TBB 逐小时演变 (阴影) 及 1小时降水 (等值线, 单位: mm) 分布图。虚线: 对流系统移动, C1~C6 代表强对流云团

Fig. 3 Hourly development of TBB (shadows) and hourly precipitation amount (isolines, units: mm) during Guangxi heavy rainfall during 11-12 Jun 2008. Dashed line: the convective systems move; C1-C6: intense convective cloud clusters

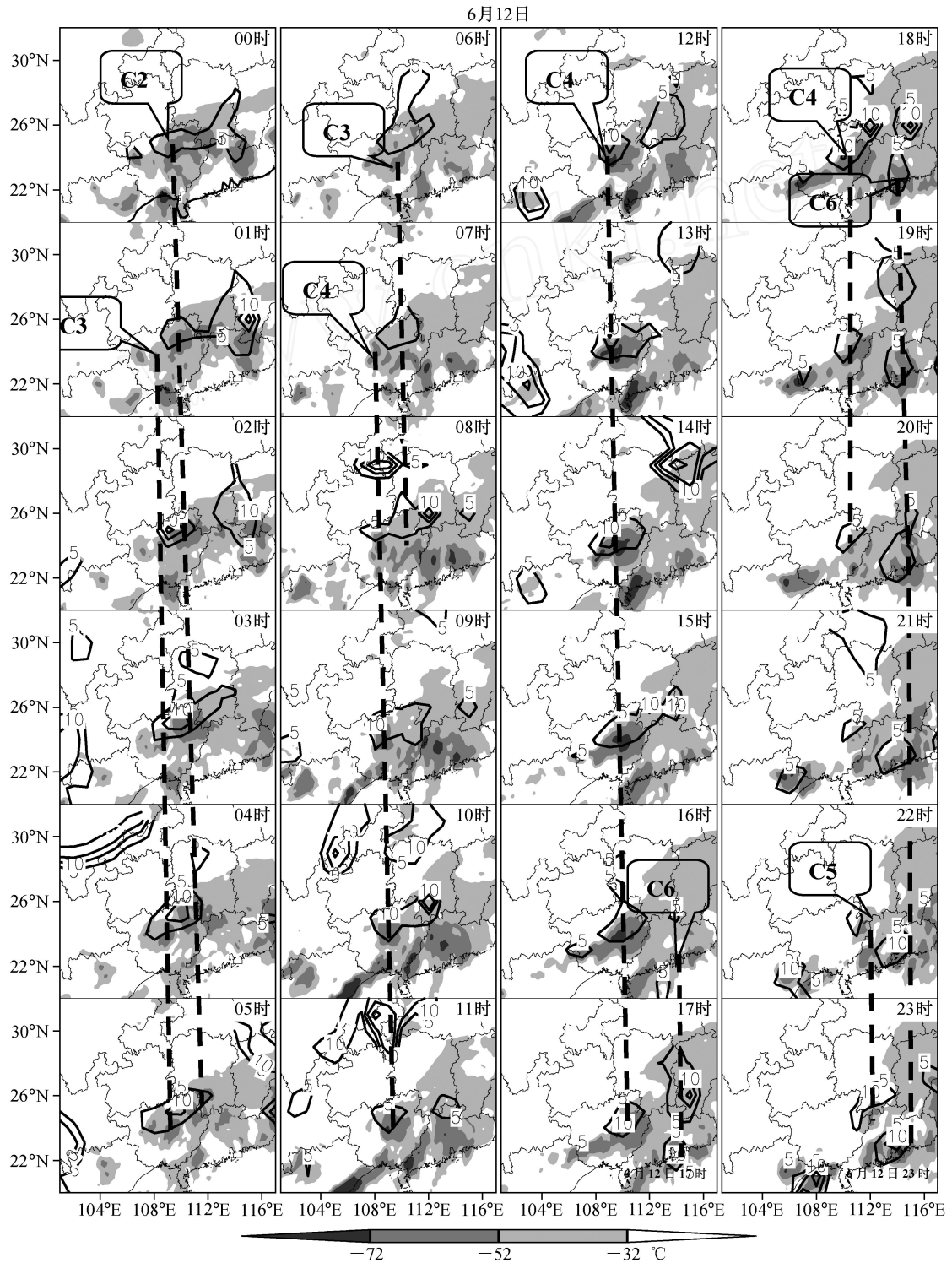


图3 (续)

Fig. 3 (Continued)

### 4 暴雨发生、发展过程的分析

#### 4.1 大尺度环境场的分析

由图 4b, 整个广西暴雨期间, 鄂霍次克海以

西、黑龙江以北有切断低压稳定维持, 6月9日18时切断低压形成, 此后, 略向东南方移动, 并于14日00时消亡, 与切断低压相伴在内蒙古上空有高压脊强烈发展(14日00时后出现5800 gpm的高

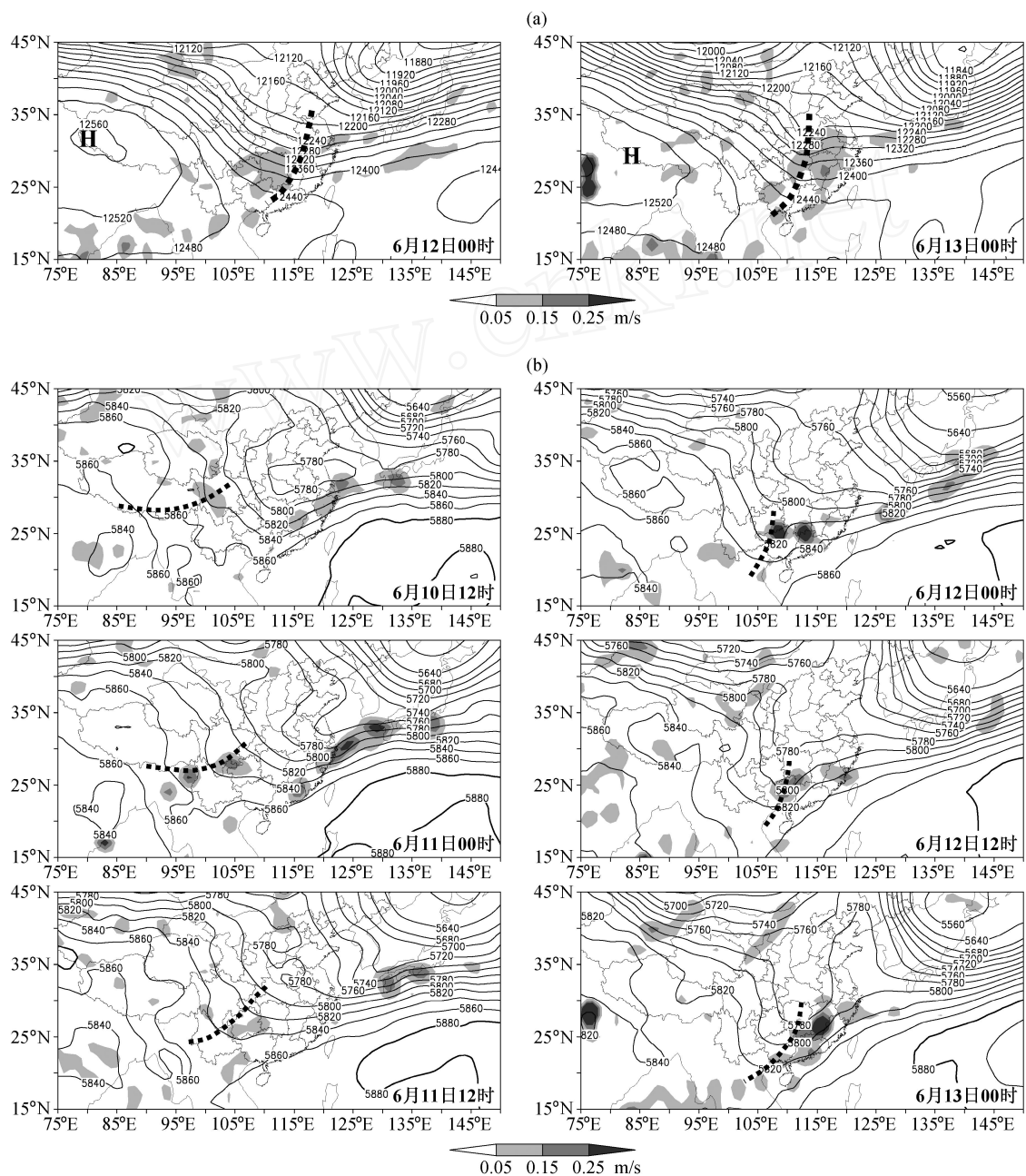


图4 广西暴雨期间中高层形势图: (a) 200 hPa; (b) 500 hPa。等值线: 位势高度 (单位: gpm); 阴影: 垂直速度 (单位: m/s); 点线: 槽线  
Fig. 4 Circulation at (a) 200 hPa and (b) 500 hPa during the heavy rainfall in Guangxi. Isolines: geopotential height (gpm); shaded: vertical velocity; dotted lines: trough lines

压中心), 整个中、低纬地区的环流经向度显著加大。值得注意的是在6月10日18时, 四川东部有短波槽发展, 槽后有偏北气流引导冷空气南下, 对本次降水有重要影响。此外, 广西暴雨过程中, 海上副高稳定少动, 十分有利于整个环流形势的稳定。

沿高原东侧南下的低槽是广西暴雨过程的重要影响系统, 现对其演变过程作一分析。由图4b, 10日12时, 青藏高原上有横槽发展, 其槽线走向近

似成西南-东北走向, 四川南部位于槽区附近, 伴有较强的上升运动, 此时四川南部出现大暴雨; 11日00时, 低槽稳定少动, 西南涡初生于四川南部, 即槽前的上升运动区, 此时降水很强; 11日12时, 低槽略有东移, 西南涡稳定少动, 雨区也稳定少动, 由于水汽输送减弱, 对应降水也减弱; 12日00时, 槽线显著转竖, 几乎成南北走向, 广西北部处于强上升运动区, 伴有很强的降水(图



3); 12 日 12 时, 低槽东移, 西南涡东南移动, 上升运动区位于广西东北部, 对应了该处的雨区。一般来说, 西南涡生成后多在原地消亡, 移出的不多, 而向南移至华南的更少, 而本例正是这样的例子。13 日 00 时, 西太平洋副高东撤致使低槽东移, 西南涡减弱、消亡, 这可以说明为何 12 日出现强降水而 13 日突然转低, 雨区移出广西。另外, 需要指出 13 日后, 低槽东北部出现新生低涡 B。特别需要强调的是, 13 日以后虽然也有低涡影响, 但已经不是原有意义上的西南涡了。

由图 4a 可知, 200 hPa 环流经向度很大, 其中南亚高压稳定维持在青藏高原上空, 广西上空维持一短波槽, 对应图 4b 的 500 hPa 上的短波槽, 可见该槽较为深厚, 此槽槽区附近伴有强烈的上升运动存在, 其中, 广西北部处于强上升运动区, 由于有充沛的水汽(图略)与之配合, 才触发了广西暴雨。

#### 4.2 西南涡的发生发展过程分析

上节对环流形势演变作了探讨, 本节对直接引发此次暴雨的系统——西南涡作一分析。

10 日 18 时, 在 700 hPa 上四川南部出现低空切变线(图 5), 此处对应着强降水(图略); 11 日 00 时, 西南涡初生于 700 hPa 四川南部, 这与 700 hPa 常规探空图(图略)上西南涡出现的时间较一致, 强降水主要集中在西南涡的南部、东南部。11 日 06 时, 受 500 hPa 低槽槽线转竖影响, 西南涡向南移动, 强降水也随西南涡南压, 主要位于西南涡东南部。11 日 12 时, 西南涡稳定少动, 由于水汽输送减弱(图略), 对应降水减弱, 降水主要位于西南涡东南部(图 3), 由于降水凝结潜热释放减小, 此时西南涡有所减弱。11 日 18 时, 受 500 hPa 低槽东移影响, 西南涡东南向移动, 降水再次加强, 降水主要位于西南涡东南部。12 日 00~06 时, 西南涡向东南移动, 强度加大, 强降水主要集中在西南涡东部, 此时 850 hPa 流场上出现很强的切变(图略)。西南涡从四川东移时有一个减弱过程, 进入广西后, 由于与季风槽的相互作用, 而再度加强, 从而使暴雨加强。12 日 12 时, 随着高原槽的东移, 西南涡开始向东北方移动, 此时西南涡已经向下伸展到 850 hPa(图略), 这也许是由于凝结潜热的释放, 而出现正反馈所致。12 日 18 时, 降水区开始移出广西; 13 日 00 时, 700 hPa 上原西南涡消亡, 850 hPa 上西南涡依然维持(图略), 广西境

内降水过程基本结束, 此时江西境内另有一低涡 B 新生(图 5), 低涡 B 初生后很快向下发展到 850 hPa, 引发了一系列暴雨。整个暴雨过程中, 并不是仅有一个低涡, 前期为西南涡, 后期为新生涡。

西南涡是广西暴雨过程的直接触发系统, 本次西南涡维持了 54 小时左右, 空间上属于中尺度系统。在 500 hPa 高原槽的影响下, 西南涡先向东南方移动后转向东北方移动, 高原槽东移是西南涡移动和转向的根本原因。

由逐小时地面加密观测资料(图略)可知, 11 日 12 时~12 日 12 时, 四川南部维持低压中心 L, 该低压中心向东南方向伸展出广阔的低压区, 并向东扩展, 这与 500 hPa 短波槽以及西南涡的东移过程一致(图 4b、图 5), 低压区内维持一条准“东-西”走向的地面风场辐合线, 在地面风场辐合线的附近(尤其是辐合线中部和东部)有降水发生。12 日 18 时, 四川南部的低压中心 L 消亡, 地面辐合线维持在广西北部, 强降水中心位于广西东北部, 6 小时后 500 hPa 短波槽移出广西(图 4b), 低压区显著减弱, 地面风场辐合线消亡(图略), 广西暴雨过程结束。综合上述, 地面低压区以及地面风场辐合是广西暴雨的有利条件, 当上述两者维持时, 暴雨维持, 消失时, 暴雨过程随之结束。

#### 4.3 西南涡中的降水云团

广西暴雨期间有多个对流云团出现(表 1), 其中对流云团 C2 和 C4 维持时间长, 产生降水大, 波及范围广, 是本次降水的重要系统, 因而有必要对之着重讨论。对流云团的发生、发展需要两个方面的条件, 一个是动力条件, 即动力抬升; 另一个是水汽条件, 即充足的水汽供应。下文将从上述两个方面讨论对流云团 C2 和 C4 的发生、发展和消亡。

11 日 06 时, 500 hPa 短波槽前的上升运动区位于广西云南交界处(图 4b), 700 hPa 上, 此处正位于西南涡东南方(图 5), 层内对流运动较为旺盛(图略), 为对流云团 C2 的产生提供了有利的动力条件。来自孟加拉湾的充沛水汽在广西云南交界处产生辐合(图略), 这为云团 C2 的产生提供了有利的水汽条件, 在上述有利的动力和水汽条件配合下, 11 日 08 时, 对流云团 C2 产生于广西云南交界处, 伴有低于 -72 的强对流中心 C2-1(对应中尺度系统)出现, 此后, 在偏西风的影响下(图 4b), 云团 C2 东移, 强对流中心 C2-1 于 11 日 18

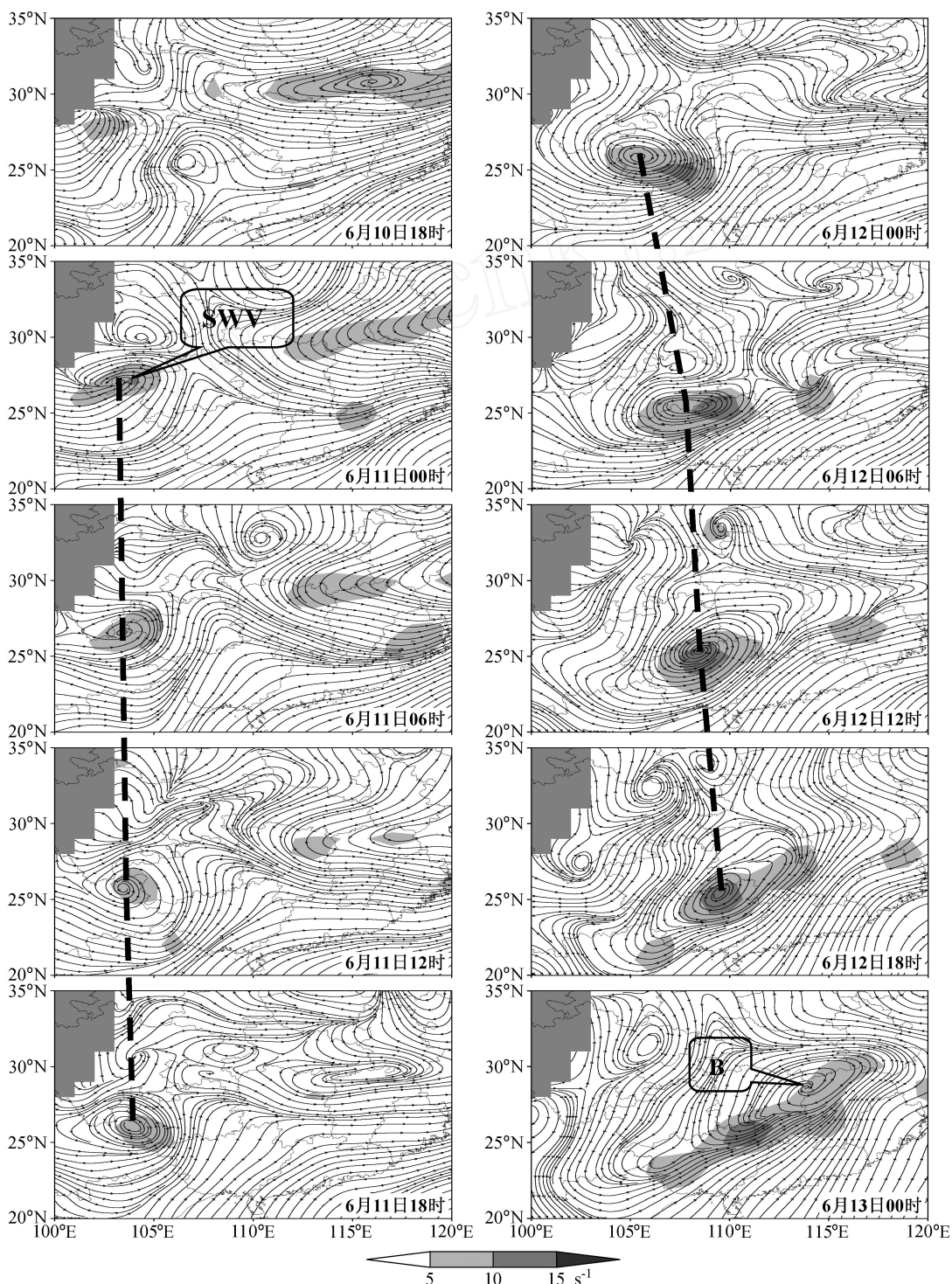


图 5 广西暴雨期间 700 hPa 流场图。阴影：涡度；SWV：西南低涡；地形高于 3000 m 填色；虚线：系统移动方向。

Fig. 5 Streamline at 700 hPa during the heavy rainfall in Guangxi. Vorticity and terrain above 3000 m are shaded; SWV: southwest vortex; dashed lines: system move

时消亡。而 11 日 18 时之后，对流云团 C2 内又有新的强对流中心 C2-2 (TBB < - 72 ) 发展，11 日 22 时，C2-2 消亡 (图 3)。应当指出，云团 C2 一直

维持在 500 hPa 短波槽槽前，700 hPa 西南涡东南方的强上升运动区，对流团 C2 受偏西风影响而向东移动，在其生命史内，动力条件一直有利于云团

C2 的维持, 水汽条件的变化是对流云团 C2 变化的关键。

12 日 06 时, 广西中北部位于 500 hPa 短波槽槽区附近的强上升运动区 (图 4b), 700 hPa 上此处位于西南涡南部 (图 5), 为对流云团 C4 的产生提供了有利的动力条件, 此时广西中部和南部维持很强的水汽辐合 (图略), 这为对流云团 C4 的产生提供了有利的水汽条件。在上述有利条件作用下, 云团 C4 于 12 日 07 时产生, 此后在偏西风作用下 (图 4b) 东移、发展。

由图 3 和图 4b, 12 日 18 时, 对流云团 C4 仍然位于 500 hPa 槽区附近, 700 hPa 西南涡南部的强上运动区, 动力条件有利于云团 C4 的维持, 而此时强水汽辐合中心已经移出广西 (图略), 受其影响, 12 日 20 时对流云团 C4 消亡。

#### 4.4 降水过程突变特征的分析

由前文分析可知, 500 hPa 短波槽、700 hPa 和 850 hPa 的西南涡以及地面的低压区和辐合线均对本次广西暴雨过程有重要影响, 而为了进一步了解其降水过程的具体情况, 将其有关演变过程列在表 3 中。

表 3 2009 年 6 月中旬广西暴雨期间降水及降水影响系统随时间的演变

Table 3 The evolutions of rainfall and its influencing systems during the heavy rainfall in Guangxi

| 时间                    | 700 hPa 和 850 hPa  | 500 hPa                                    | 地面   | 对流和 1 小时降水  |
|-----------------------|--|--|--|---|
| 11 日 00 ~ 05 时        | 700 hPa 西南涡初生于四川南部, 向南略有移动 (西南涡位于鞍形场西南部, 短波槽槽前)                                      | 短波槽位于四川中部上空, 稳定少动, 其槽线开始转竖 (槽线南部风速加大)      | 四川南部维持稳定少动的低压中心 L, 伴有地面风场辐合线               | 云团 C1 东移入贵州西部后消亡, 降水主要位于云团 C1 的中部和西南部, 其最大 1 小时降水为 42 mm  |
| 11 日 06 ~ 11 时        | 700 hPa 西南涡向南略有移动, 鞍形场逐渐消亡, 西南涡位于 500 hPa 短波槽的槽区附近                                   | 短波槽 T 向东南方移动, 四川南部云南北部贵州西部位于槽区附近           | 低压区 (中心为 L) 向东扩展, 范围显著扩大, 风场辐合线南压          | 贵州南部广西西北部有对流云团 C2 发展 (C2-1 为其强对流中心) 并稳定维持, 降水中心与之对应, 其最大 1 小时降雨为 45 mm  |
| 11 日 12 ~ 17 时        | 700 hPa 西南涡稳定少动 (位于短波槽槽区附近), 强度变化不大, 11 日 12 时西南涡开始进入广西                              | 短波槽稳定少动, 贵州, 云南东北部和广西西部位于槽前                | 低压区稳定维持, 风场辐合线东部显著北抬, 广西中部、西部处于低压区         | 对流云团 C2 的强对流中心 C2-1 有所东移, 强度减弱, 降水中心与对流中心相对应, 雨区主要位于广西西北部, 其最大 1 小时降水为 34 mm                                  |
| 11 日 18 ~ 23 时        | 700 hPa 西南涡东南移动 (位于短波槽槽区附近), 范围加大, 强度变强, 广西西北部位于西南涡东部                                | 短波槽稳定少动, 受副高短波槽线转竖显著, 广西处于槽前               | 低压区稳定维持, 低压区内的风场辐合变化不大                     | 11 日 18 时, 强对流云团 C2 中有新的对流中心 C2-2 发展, 22 时, C2-2 消亡 (降水缺测)  |
| 12 日 00 ~ 05 时        | 700 hPa 西南涡东南移动, 变化不大, 850 hPa 上广西西北部的切变线显著加强, 广西中部、北部位于西南涡南部                        | 短波槽东移, 广西中部、东部以及广东西部处于槽前                   | 低压中心 L 和低压区稳定维持, 风场辐合线北抬                   | 对流云团 C2 东北移动, 12 日 05 时消亡, 01 时广西中部有新对流中心 C3 发展, 对流中心 C3 和 C2 之间有很强降水发生, 其最大 1 小时雨强为 44 mm                    |
| 12 日 06 ~ 11 时        | 12 日 06 时, 700 hPa 西南涡向东移下高原, 伸展到 850 hPa, 850 hPa 西南涡中心位于 700 hPa 中心南部, 广西大部均受西南涡控制 | 短波槽略有东移, 广西东部和广东西部位于槽前                     | 低压中心 L 稳定维持, 低压区显著东扩, 风场辐合线西侧南压            | 对流云团 C3 东南移动并于 12 日 08 时消亡, 12 日 07 时, 广西中北部有新对流云团 C4 发展, C4 东南移动并加强, 降水与对流云团相对应, 主要位于广西北部, 其最大 1 小时降水为 62 mm |
| 12 日 12 ~ 17 时        | 西南涡向东北方向移动, 强度略减, 850 hPa 西南涡中心位于 700 hPa 中心南部, 广西大部以及广东西北部均受西南涡控制                   | 短波槽稳定少动, 槽线斜率减小, 北部的偏西风风速加大, 广西东部和广东西部位于槽前 | 中心 D 稳定维持, 低压区继续东扩, 风场辐合线南压, 广西以及广东西部位于低压区 | 对流中心 C4 东移, 强度加大, 与降水中心相对应, 其最大 1 小时雨强为 90 mm   |
| 12 日 18 时 ~ 13 日 00 时 | 700 hPa 西南涡消亡, 850 hPa 西南涡东北移动, 广东西北部受西南涡控制  | 短波槽东移, 广西东部和广东西部均位于槽前                      | 低压中心 L 消亡, 低压区范围缩小, 风场辐合线消失                | 对流中心 C4 东移, 消亡于 12 日 20 时, 其最大 1 小时降水量为 54 mm   |

#### 4.5 对桂林站(57957)加密探空的分析

由图 1a, 本次过程中, 桂林站累计降水量在 250 mm 以上, 由图 1b, 桂林自 11 日 17 时产生降水(如图 3, 19~23 时资料缺测), 12 日 00 时后, 桂林站维持强降水, 到 13 日 00 时结束, 桂林站降水经历了 8 个峰值, 其中最强 1 小时降水量为 25 mm, 11 日 18 时, 桂林位于西南涡以东的强对流区(图 5), 降水开始; 12 日 00~18 时, 桂林位于 700 hPa 西南涡东南部, 这是降水的最强时段; 13 日 00 时, 700 hPa 西南涡消亡, 桂林位于 850 hPa 西南涡南部, 降水依然维持较强; 13 日 00 时之后, 西南涡彻底消亡, 桂林降水结束。桂林站经历了西南涡自西向东移动以及消亡的过程, 受到了云团 C2 以及 C4 的长时间影响(图 3), 因而对其探空作一分析是很有意义的。

11 日 12 时, 西南涡开始进入广西(图 5), 由探空分析可知(图 6a), 此时气层内的水汽含量较大, 尤其是 700 hPa 以下, 相对湿度达到 75% 以上, 整个气层内的水汽含量极不均匀, 层次间变化比较大; 气块的绝热抬升曲线与温度探空曲线在 700~400 hPa 间近似重合, 因而此处层结近似为中性, 400 hPa 以上和 700 hPa 以下环境温度高于气块温度, 因而层结稳定, 从抬升指数(LI)来看, 地面 LI 为 0, 最不稳定层为 -4, 因而可能会有对流出现, 从整层的风场分布来看, 700 hPa 以下盛行弱的偏东风, 700 hPa 以上则是很强的偏西风, 大气的斜压性较强, 最不稳定层的对流有效位能最大, 约为 1214 J/kg。

12 日 00 时, 西南涡已经东移至广西中部(图 5), 桂林位于西南涡以东约 100 km 处, 强降水开始发生, 700 hPa 以下气层近似饱和(图 6b), 其相对湿度接近于 100% (气柱的可降水量 PW 增加显著), 此层内温度较 12 小时前降低(太阳辐射是主要影响因子), 其中地面温度降低了 4℃, 而露点温度则有所升高, 气层的抬升凝结高度显著下降(水汽相对湿度明显加大), 气块的绝热抬升曲线在温度探空曲线右方, 即气块温度高于环境温度, 这十分有利于对流发展(地面 LI 为 -4, 有利于对流发生), 这与云团 C2 的发展相对应。600~550 hPa 之间存在一逆温层, 该逆温层的存在可能与水汽凝结潜热的释放有关, 逆温层的存在, 使得对流活动被限于 550 hPa 以下, 非常有利于对流量能的积

累。700 hPa 以下盛行较弱的偏东风和较强的偏南风, 700 hPa 以上依然盛行偏西风但风速显著减弱, 整个气层的斜压性减弱, 对流有效位能能量降低(最不稳定层对流有效位能显著降低)。

12 日 12 时, 桂林位于西南涡东南部(图 5), 900 hPa 以下水汽近似饱和, 900 hPa~500 hPa 之间水汽含量下降(图 6c), 气层内的可降水量降低。此时, 逆温层消失, 200 hPa 以下温度探空曲线与气块绝热抬升曲线近似重合, 因而大气层结近似中性(最不稳定层和地面 LI 均为 0), 200 hPa 以上, 气层稳定。500 hPa 以下盛行偏南风 and 偏东风, 500 hPa 以上盛行偏西风和偏北风, 气层内的对流有效位能显著减小, 不利于对流活动维持。

13 日 00 时, 桂林位于 850 hPa 西南涡南部(图略), 此时 700 hPa 西南涡已经消亡(图 5), 500 hPa 以下的水汽含量再次增加(图 6d), 在 90% 以上, 气层内的可降水量再次加大, 450 hPa 以下, 大气层结近似中性(最不稳定层 LI 为 0), 逆温层再次出现, 约位于 450 hPa 附近, 450 hPa 以上, 大气层结稳定不利于对流发生。13 日 00 时以后, 桂林的降水停止。

## 5 季风槽和冷空气对广西暴雨的作用

广西暴雨期间, 季风槽稳定维持在孟加拉湾[图 7(见文后彩图)], 槽前伴有西南风的低空急流, 11 日 12 时~13 日 00 时广西境内出现了强烈的水汽辐合(图 8), 水汽的主要载体为西南风, 季风槽及其前沿的槽风涌为本次降水过程提供了充沛的水汽。另一方面, 当西南涡进入广西, 并与季风槽发生相互作用后, 使西南涡重新加强, 并引发强降水。与季风涌相关的暖平流沿对流层低层进入广西, 而冷空气沿对流层中层经高原东侧同时进入广西, 并叠置于冷空气之上, 为暴雨的发生提供了很不稳定的环境。

### 5.1 季风槽和季风涌的作用

广西暴雨过程持续时间长, 累计降水量大, 其水汽来源如何是个值得探讨的问题。由韩国气象厅出版的 850 hPa 天气图(图 7a) 可以看到, 12 日 00 时, 在中国大陆上空正好有短波槽在高原东北发展、南伸、加强, 而在低纬, 从印度、孟加拉湾至中南半岛有一东西向的季风槽存在, 在季风槽的东侧存在明显的季风涌。图 7a 中的一个最明显的特点

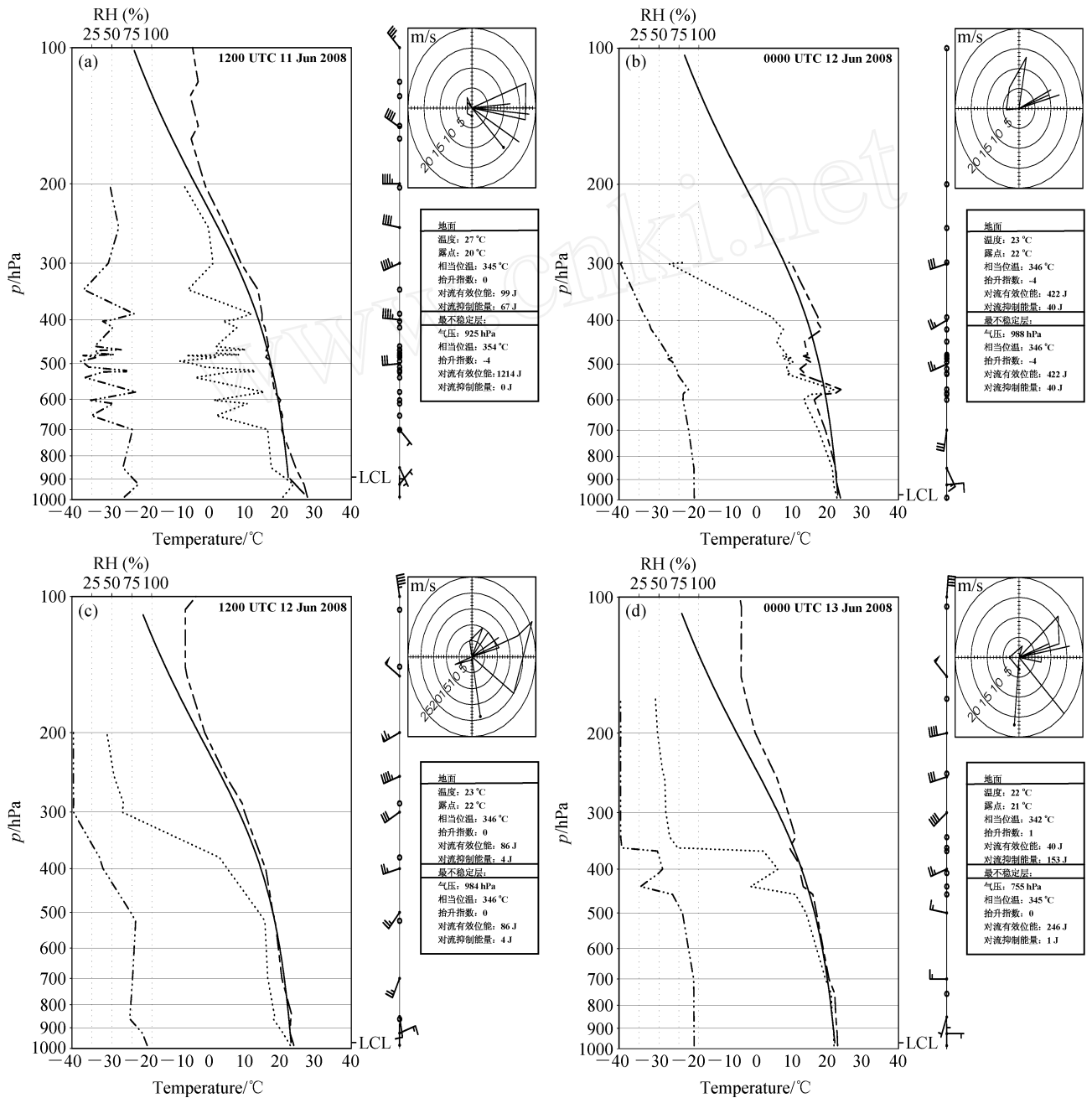


图 6 广西暴雨期间桂林站 (57957) 探空图。点虚线：相对湿度探空曲线；点线：露点探空；虚线：温度探空（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）；实线：气块抬升曲线；LCL：抬升凝结高度位置；风向标：风速探空；风玫瑰图：风场垂直分布

Fig. 6 Sounding charts at Guilin station (57957). Dash-dotted line: relative humidity (RH); dotted line: dew point; dashed line: temperature; solid line: air mass lifting line; LCL: the lifting condensation level; wind barb: wind at each level; wind rose map: wind at different levels; values in the box are calculated with sounding data

是我国广西存在一条准静止锋，其相当于风场上的一条切变线。而在锋面上有一个闭合的低压存在，其中心在  $24^{\circ}\text{N}$ ， $106^{\circ}\text{E}$ 。这是一次典型的低涡切变型的华南前汛期暴雨，与锋前暖区暴雨有很大不同。在这次暴雨过程中，低纬系统的作用十分重

要。13 日 00 时 850 hPa 上低涡已移至广东境内（图略）。图 7b 是这次过程中的 700 hPa 形势图，由之可知，季风槽由印缅伸至中南半岛，且与华南暴雨的低涡区相互连通。此时，广西暴雨已结束，但水汽通道仍存在，将会继续对我国东部产生影

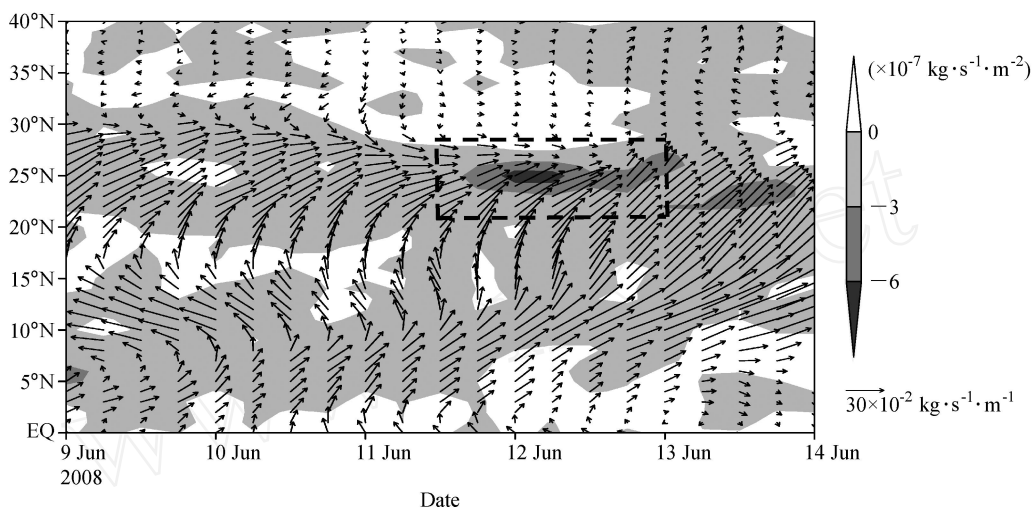


图8 98°E~118°E 平均的(地面至100 hPa 间)水汽积分图。箭头: 整层水汽通量(单位:  $10^{-2} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ); 阴影: 水汽辐合区(单位:  $10^{-7} \text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ); 虚方框: 暴雨期的广西地区

Fig. 8 Integrated (surface to 100 hPa) moisture transportation averaged over 98°E~118°E. Arrows are integrated moisture flux, shaded areas stand for moisture convergence, and dashed rectangle stands for Guangxi during the heavy rainfall

响,甚至影响长江中下游的降水。

## 5.2 广西暴雨期间冷暖空气的交绥

本次暴雨过程中冷暖空气有明显的相互作用,图9(见文后彩图)给出了2008年6月12日12时500 hPa和850 hPa上的温度平流分布,由之可知,冷暖平流的分界线处于广西西部,呈“东北-西南”走向,区别在于500 hPa冷平流区比低层要强,而850 hPa上暖平流区比中上层更为明显,这表明此例中冷暖空气均较活跃,此时已经处于6月中旬,冷空气能到达华南,这与其他个例很不相同。另外,冷平流大值区几乎成南北向分布,且位置偏西,这也许是为何6月12日大暴雨发生于广西而不是广东的主要原因。

为了讨论季风涌的贡献,在图8中给出了2008年6月9日00时~14日00时,98°E~118°E平均的整层(地面到100 hPa)水汽通量。从图8上可以明显发现季风槽的作用:季风槽输送了丰富的水汽至24°N附近,尤其是在11日12时至13日00时之间(广西境内出现水汽的强辐合),这可能是广西暴雨的重要影响因子。

## 6 结论与讨论

本文通过对2008年6月11~13日广西持续性暴雨的分析,揭示和确认了一些值得注意的事实,主要结论如下:

(1) 有利环流场引导西南涡移至华南: 中高纬东北亚地区切断低压和西太平洋副热带高压的稳定维持使中、低纬环流经向度加大,有利于环流形势的稳定维持。中纬度西风带短波槽沿高原东侧南下入侵广西,是广西暴雨的重要影响系统,暴雨主要集中在该槽槽前的上升区,低层西南涡及其雨区随影响槽自西向东移动。

(2) 西南涡是这次广西暴雨过程的直接影响系统,本次广西暴雨属于一类低涡切变型华南暴雨。本次暴雨过程中西南涡持续了54小时左右,空间上属于中尺度系统,其源地可追溯至四川盆地。在500 hPa短波槽的影响下,低涡先向东南方移动后向东北方移动,副高的迅速东退和短波槽的快速东移是低涡移动折向东北的根本原因。对流和降水总是发生在西南涡的中心附近、移动的前方和右前方,西南涡消亡后广西境内暴雨基本结束。本次广西暴雨属于华南低涡切变型暴雨,与锋前暖区式暴雨有显著不同。降水过程中对流云团活动频繁,强度大,降水强,对流云团多属于中尺度和中尺度的系统。中尺度雨团是广西暴雨的直接制造者,本次降水过程中大约有11个中尺度雨团出现。

(3) 中低纬度系统的相互作用很明显: 在本次暴雨过程中,西南涡移出四川时曾一度减弱,而进入广西后,尤其是6月12日与季风槽(或切变线)相互作用,西南涡再次加强,并引致暴雨加强(13

日后低涡东移暴雨减弱)。冷空气偏西入侵广西，而季风涌向北的暖平流很强，冷、暖空气在广西交汇。对水汽输送的分析表明：季风槽对该次广西暴雨的作用至关重要，其稳定维持为广西暴雨提供了充沛的水汽，对于来自孟加拉湾的水汽，季风槽是主要的输送载体。南中国海也是本次暴雨过程另一水汽来源。

(4) 使用 SCHeREX 加密观测对暴雨中尺度系统等的分析表明暴雨发生前环境条件十分有利：大气中低层绝大部分时间内为中性层结，有时还会出现逆温（尤其是暴雨发生时，这也许是暴雨发生的结果）。西南涡过境后，桂林站低层风场有明显的变化，大气抬升凝结高度显著降低（与仍有充沛的水汽供应有关），对流有效位能能量释放后显著减小。

(5) 在上述研究工作的基础上，本文概括出一类低涡切变型华南前汛期暴雨的概念模型（图 10）。该模型表明，此次广西暴雨与过去研究的华南前汛

期锋前暖区暴雨（夏茹娣等，2006）很不相同，它是一类出现在锋区（或切变线）附近，由低涡引发的暴雨，影响系统很明显，而锋前暖区暴雨过程中主要的影响系统往往不甚清楚。

如上所述，这次暴雨过程有鲜明的特点，属于一类华南前汛期低涡切变型的暴雨，它是在某些特定情况下发生的，大体可以帮助理解和回答引言中所列的几个主要问题，诸如：

(1) 冷空气活动：与锋前暖区暴雨不同，此次广西暴雨过程中冷空气偏晚、偏强、偏西，雨区主要集中在高原东南侧的广西地区。

(2) 西南涡多生成于西南地区，移出的是少数，移向华南的更少（陈忠明等，2004；陈启智等，2007），这次西南涡东南移动是短波槽偏南引导的结果，西南涡移入广西后的再次加强是由于中低纬系统相互作用，而大量对流云团产生，致雨，对低涡加强有正反馈作用。

(3) 季风槽向东伸展且异常活跃，其中的季风

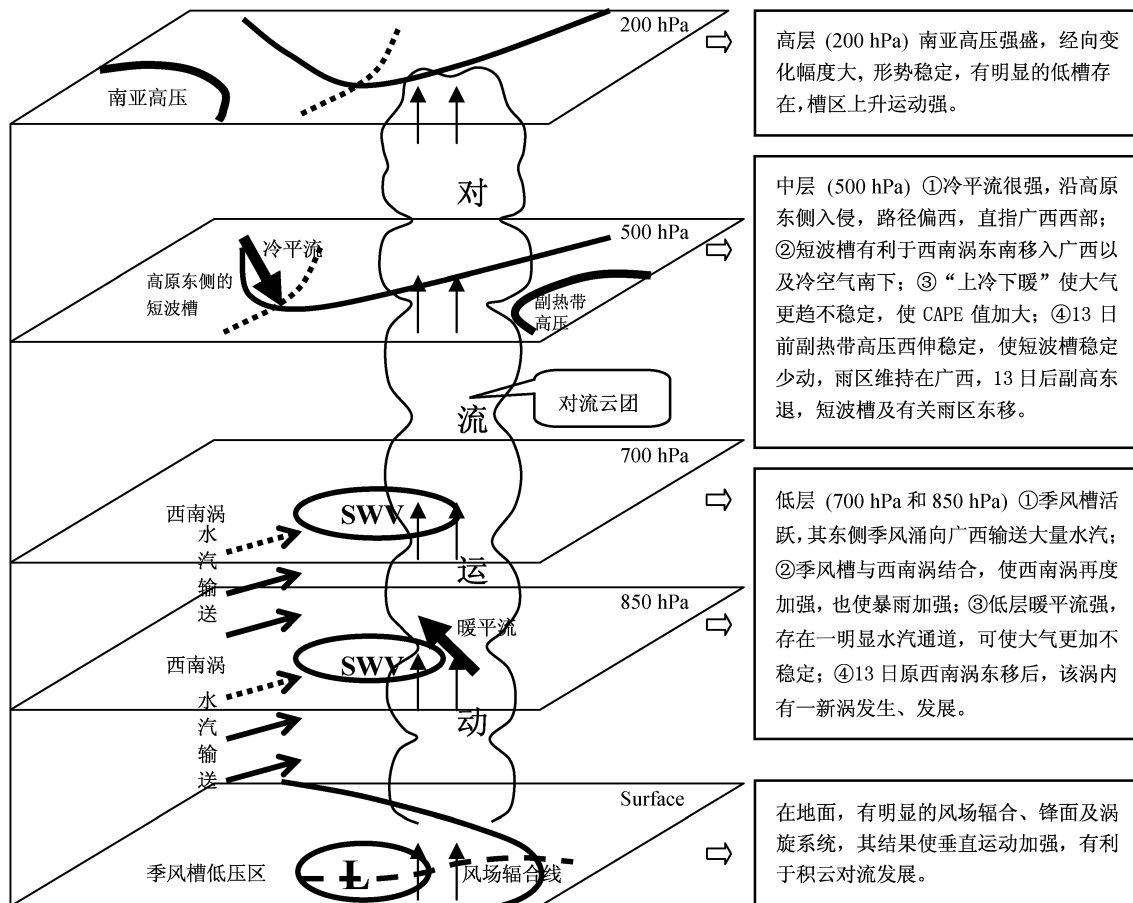


图 10 一类低涡切变型华南大暴雨的概念模型

Fig. 10 Schematic model of one kind of vortex-shear heavy rainfall in South China during the pre-rainy season

涌从中南半岛移向华南,且冷暖空气在广西明显交绥,是本次暴雨过程又一特点。

(4) 副热带高压先西伸后东撤,使暴雨区先停滞于广西,6月12日达到鼎盛,13日后副高东撤,高原槽东移,原西南涡减弱、消亡,在该涡范围内有新涡形成,之后,新涡向东北方向移动,广西暴雨结束,雨区移至长江流域。这次暴雨是温带、副热带和热带系统共同影响的结果。

需要指出的是,尽管本次个例特征明显,但是由于华南前汛期的暴雨情况十分复杂,今后还需对更多暴雨过程作更深入的研究。

### 参考文献 (References)

- 陈红, 赵思雄. 2000. 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, 24 (2): 238-252. Chen Hong, Zhao Sixiong. 2000. Heavy rainfalls in South China and related circulation during first GRAP global experiment period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (2): 238-252.
- 陈启智, 黄奕武, 王其伟, 等. 2007. 1990~2004年西南低涡活动的统计研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 43 (6): 632-642. Chen Qizhi, Huang Yiwu, Wang Qiwei, et al. 2007. The statistical study of the southwest vortexes during 1990-2004 [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 43 (6): 632-642.
- 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等. 2003. 1998年夏季西南涡活动与长江上游暴雨 [J]. 高原气象, 22 (2): 162-167. Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbin, et al. 2003. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (2): 162-167.
- 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 2004. 西南低涡研究的一些新进展 [J]. 高原气象, 23 (Suppl.): 1-5. Chen Zhongming, Min Wenbin, Cui Chunguang. 2004. New advances in Southwest China vortex research [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (Suppl.): 1-5.
- 方宗义, 项续康, 方翔, 等. 2005. 2003年7月3日梅雨锋切变线上的-中尺度暴雨云团分析 [J]. 应用气象学报, 16 (5): 569-575. Fang Zongyi, Xiang Xukang, Fang Xiang, et al. 2005. Analysis of the meso-convective cloud cluster over Meiyu front on 3 July 2003 [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 16 (5): 569-575.
- 高守亭, 1987. 流场配置及地形对西南低涡形成的动力作用 [J]. 大气科学, 11 (3): 263-271. Gao Shouting. 1987. The dynamic action of the disposition of the fluid fields and the topography on the formation of the south-west vortex [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11 (3): 263-271.
- 高守亭, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 618-627. Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 618-627.
- 黄士松, 李真光. 1986. 华南前汛期暴雨 [M]. 广州: 广东科技出版社, 244pp. Huang Shisong, Li Zhenguang. Heavy Rainfall in Pre-Rainy Season in South China (in Chinese) [M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press (in Chinese), 244pp.
- 孔期, Ghulam Rasul, 赵思雄. 2005. 一次引发南亚大暴雨的季风低压结构、涡度与水汽收支分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 526-542. Kong Qi, Ghulam Rasul, Zhao Sixiong. 2005. Study of the structure, vortex budget and moisture supply of a monsoon depression producing heavy rainfall in South Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 526-542.
- 李崇银, 潘静. 2007. 南海夏季风槽的年际变化和影响研究 [J]. 大气科学, 31 (6): 1049-1058. Li Chongyin, Pan Jing. 2007. The interannual variation of the South China Sea summer monsoon trough and its impact [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1049-1058.
- 卢敬华. 1986. 西南涡概论 [M]. 北京: 气象出版社, 1-270. Lu Jinghua. 1986. Generality of the Southwest Vortex (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 1-270.
- 史学丽, 丁一汇. 2000. 1994年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的研究 [J]. 气象学报, 58 (6): 666-678. Shi Xueli, Ding Yihui. 2000. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (6): 666-678.
- 孙建华, 赵思雄. 2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (3): 381-392. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2000. A diagnosis and simulation study of a strong heavy rainfall in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 24 (3): 381-392.
- 孙淑清, 杜长萱. 1996. 梅雨锋的维持与其上扰动的发展特征 [J]. 应用气象学报, 7 (2): 153-159. Sun Shuqing, Du Changxuan. 1996. The maintenance of Meir-Yu front and development associated disturbance [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 7 (2): 153-159.
- 陶诗言, 等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyang, et al. Rainstorms in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225pp.
- Tao Shiyang, Ding Yihui. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 62: 23-30.
- 文莉娟, 程麟生, 左洪超, 等. 2006. "98.5"华南前汛期暴雨中尺度系统发生发展的动力、热量和水汽收支诊断 [J]. 高原气象, 25 (1): 672-684. Wen Lijuan, Cheng Linsheng, Zuo Hongchao, et al. 2006. Dynamic and thermodynamic diagnostic analysis about "98.5" heavy rainstorm of South China in pre-summer flood season [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (1): 672-684.



- 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 中尺度系统环境特征的分析研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 988-1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of meso-scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5), 988-1008.
- 张庆红, 刘启汉, 王洪庆, 等. 2000. 华南梅雨锋上中尺度对流系统的数值模拟 [J]. 科学通报, 45 (18): 1988-1992. Zhang Qinghong, Lau Kai-Hon, Wang Hongqing, et al. 2000. The numerical simulation on mesoscale convective system along Mei-Yu front in southern China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 45 (18): 1988-1992.
- 赵思雄, 傅慎明. 2007. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南涡结构及其环境场的分析 [J]. 大气科学, 31 (6): 1059-1075. Zhao Sixiong, Fu Shenming. 2007. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1059-1075.
- Zhao Sixiong, Bei Naifang, Sun Jianhua. 2007. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. Advanced in Atmospheric Sciences, 24 (4): 555-572.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. 98 华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 218pp. Zhou Xiujie, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. Study of Experiment of Heavy Rainfall in South China in 1998 (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 218pp.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195-204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195-204.

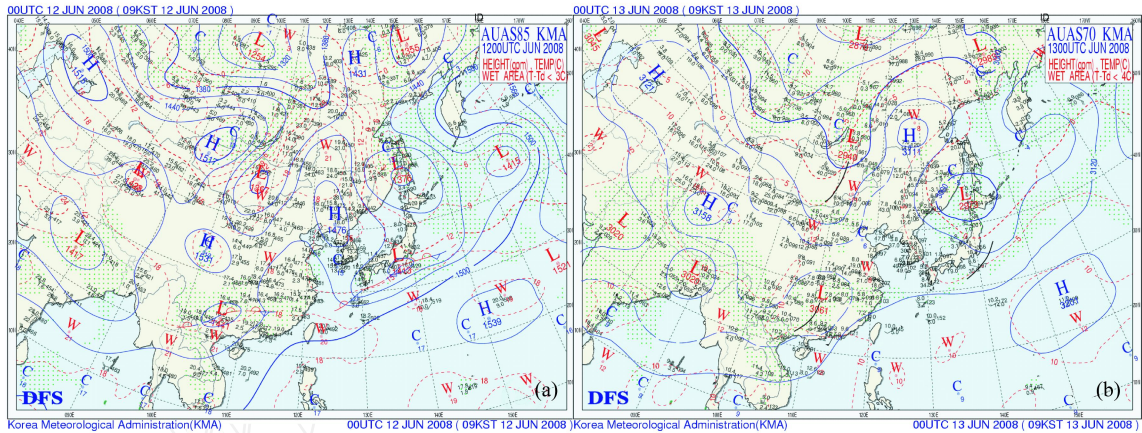


图 7 广西暴雨期间韩国天气图：(a) 6 月 12 日 00 时 850 hPa；(b) 6 月 13 日 00 时 700 hPa

Fig. 7 Synoptic chart from the Korean Meteorological Administration during the heavy rainfall in Guangxi : (a) At 850 hPa at 0000 UTC 12 Jun; (b) at 700 hPa at 0000 UTC 13 Jun

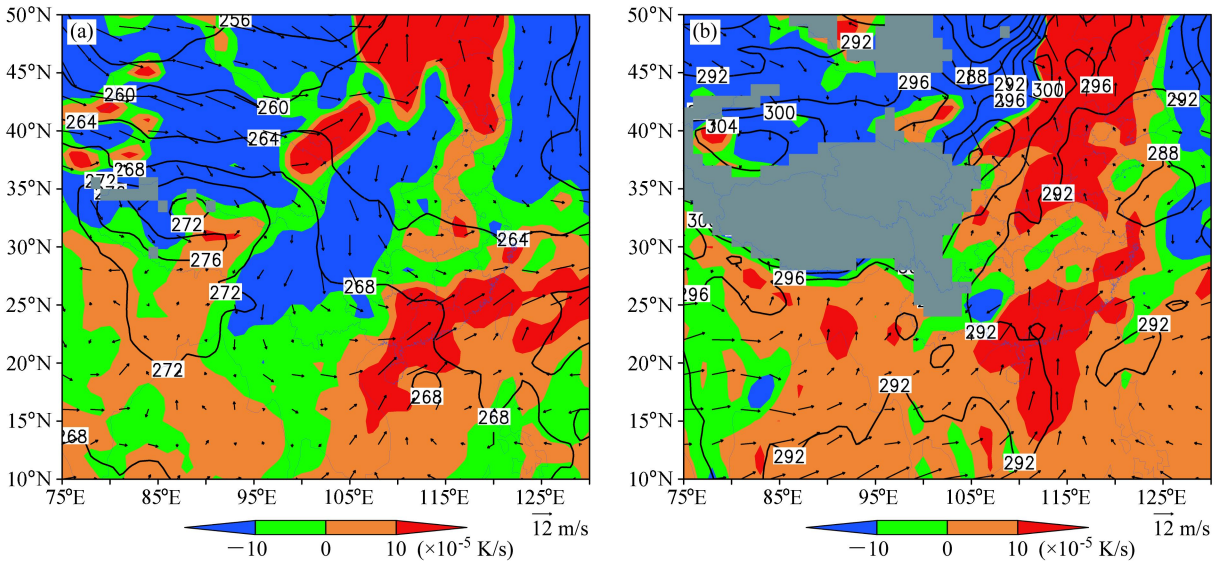


图 9 2008 年 6 月 12 日 12 时广西暴雨期间温度平流图 (阴影, 单位:  $10^{-5} K/s$ ) : (a) 500 hPa (灰色: 地形大于 5000 m) ; (b) 850 hPa (灰色: 地形大于 1500 m)。等值线: 温度 (单位: K) ; 箭头: 风场

Fig. 9 Temperature advection (shaded) during the heavy rainfall in Guangxi : (a) 500 hPa (terrain higher than 5000 m is shaded in grey) ; (b) 850 hPa (terrain higher than 1500 m is shaded in grey). Isolines: temperature (K) ; arrows: wind field