

杨忠明,吴哲红,王兴菊,等. 贵州中南部2次MCC致洪暴雨的综合分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):362-372, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0362

## 贵州中南部2次MCC致洪暴雨的综合分析

杨忠明<sup>1,2</sup>, 吴哲红<sup>1</sup>, 王兴菊<sup>1</sup>

(1. 贵州省安顺市气象局, 贵州 安顺 561000; 2. 贵州省山地气候与资源重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:**应用常规观测资料、卫星产品和 NCEP  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  逐 6 h 再分析资料, 对 2008 年 5 月 25 ~ 27 日和 2011 年 6 月 4 ~ 5 日贵州中南部对流性暴雨天气的成因及异同点进行了分析。结果表明, 2 次连续性暴雨过程都是在 500 hPa 相对稳定的环流形势下, 青藏高原有小槽不断东移, 配合中低层的低涡切变等中尺度系统产生的。2 次暴雨过程均为 MCC 反复在贵州生成所致。第一次过程(5 月 25 ~ 27 日), 大气不稳定能量很高, 层结极不稳定, 上升运动非常强; 而第二次过程(6 月 4 ~ 5 日) 地面上贵州一直有静止锋维持在中部一线, 大气为中性或稳定层结, 但低空急流条件明显优于第一次过程。2 次过程在水汽条件、不稳定条件和抬升机制等方面均有一定差异, 而这些差异与副热带高压的位置有关。地面中尺度低压中的辐合线或静止锋的存在, 加强了辐合上升运动, 从而在贵州中南部反复生成中尺度对流复合体。根据分析结果, 尝试探讨了这类暴雨的预报指标。

**关键词:**持续性致洪暴雨; 低空急流; 大气不稳定; MCC

**文章编号:**1006-7639(2013)-02-0362-11 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2013)-02-0362

**中图分类号:**P458.1+21

**文献标识码:**A

### 引 言

暴雨是贵州夏季的灾害性天气之一, 其发生发展具有突发性兼持续性, 有来势猛、强度大和局地性强的特点, 并由此引发山洪、泥石流、滑坡等重大地质灾害, 给人民生命财产造成严重损失。统计表明<sup>[1-2]</sup>: 由于受地形的影响, 贵州中部的安顺市、黔西南州的望谟和黔南州的罗甸等地均是暴雨中心, 时常有灾害性暴雨发生, 因此研究贵州中南部的暴雨对于防灾减灾是十分必要的。国内对灾害性暴雨的研究表明, 大范围对流性暴雨多数是由中尺度对流系统或中尺度对流复合体而产生<sup>[3-4]</sup>。项续康等<sup>[5]</sup>对我国南方地区的中尺度对流系统和中尺度对流复合体进行了分析研究, 指出 MCC 主要形成在  $25^{\circ}\text{N} \sim 31^{\circ}\text{N}$ ,  $103^{\circ}\text{E} \sim 108^{\circ}\text{E}$  的小区域中。毛冬艳等<sup>[6]</sup>、李登文等<sup>[7]</sup>对 2006 年 6 月 12 日夜间发生在贵州南部的突发性大暴雨过程进行中尺度分析, 结果表明准 MCC 的对流云团的发生, 是造成大暴雨的直接原因; 伍红雨等<sup>[8-9]</sup>用 MM5 中尺度模式对 2 次暴雨过程进行了数值模拟与诊断分析, 结果表明: 贵

州大暴雨对应的中尺度系统是很典型的中  $\beta$  尺度系统, 强降水与强上升运动区及正涡度区有很好的对应关系, 西南低空急流、垂直运动增强等条件是暴雨维持和发展的重要机制之一; 刘开宇等<sup>[10]</sup>应用湿位涡理论, 对 2004 年贵州的 6 次暴雨过程进行分析, 讨论了湿位涡与贵州暴雨的关系; 万雪丽等<sup>[11]</sup>从天气学的角度分析了低空急流与贵州夏季暴雨的关系, 指出暴雨的产生与低空急流有高相关性, 低空急流的位置决定了暴雨产生的区域。从以上的研究结果可以看出, 贵州夏季暴雨的发生, 大都与中尺度对流系统(MCC 或 MCS)和低空急流有密切的关系。目前针对在贵州中南部连续几天生成 MCC 引发暴雨天气的研究还较少, 因此进一步研究有助于了解在低纬高原山区 MCC 以及由其引发的暴雨天气, 对减轻暴雨带来的灾害具有十分重要的意义。

本文采用天气动力学和动力诊断相结合的方法, 分析 2 次发生在贵州中南部的 MCC 致洪暴雨过程, 从环流背景、影响系统和物理量特征等方面, 寻找该类暴雨发生的共同点和存在的差异。着重分析 MCC 生成的环境条件, 提炼预报因子, 力求根据暴

收稿日期: 2012-12-31; 改回日期: 2013-02-20

基金项目: 中国气象局预报员专项项目“贵州西南部暴雨不稳定性分析”(CMAYBY2012-053)资助

作者简介: 杨忠明(1957-), 男, 高工, 主要从事短期天气预报工作。E-mail: asyym@sina.com

雨发生前能获取的资料,提高对这类暴雨的预测能力。采用的资料包括:实况观测资料,地面加密自动站观测资料,NCEP  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$  逐6 h 再分析资料,FY-2C 的红外云图 TBB 资料。

## 1 暴雨概况及环流背景

### 1.1 暴雨概况

受高空槽和中低层切变的共同影响,2008年5月25日夜間到27日夜間,贵州的中南部地区出现了一次连续性强降水过程(以下简称过程1)。截止28日08时贵州中南部地区的安顺市和黔西南州出现暴雨和大暴雨天气,暴雨中心在黔西南自治州望谟县和贞丰县,2站27~28日24 h 降雨量分别为147 mm、127 mm,望谟站强降水时段集中在27日22时至28日02时,这4 h 的累积降水量为131 mm,其中28日01~02时1 h 雨量最大达到50 mm(图

1)。伴随强降雨,部分地区还出现了强雷电和大风冰雹天气。此次过程由于降雨持续时间长,而且还出现了短时强度较强的降水,从而使得中南部地区出现了洪涝灾害,造成人员伤亡和较重的经济损失。2011年6月4日夜間到6日上午(以下简称过程2),贵州省再次出现连续性暴雨天气过程,强降水中心仍然是在贵州的中南部,大暴雨中心小时雨量达50 mm 以上,暴雨中伴有强雷暴。5日夜間的强降水主要出现在贵州省的南部,2县出现大暴雨(贞丰106.1 mm、兴仁106 mm),10个县市出现暴雨(图1)。由于降水强度大,且较长时间在贵州西南部维持,造成黔西南州的望谟县城被淹、37人死亡,15人失踪。综上所述并结合图1可见,2次过程的强降水中心都在贵州省的南部,过程1暴雨中心降水强度稍强,但暴雨以上量级的范围远没有过程2大。

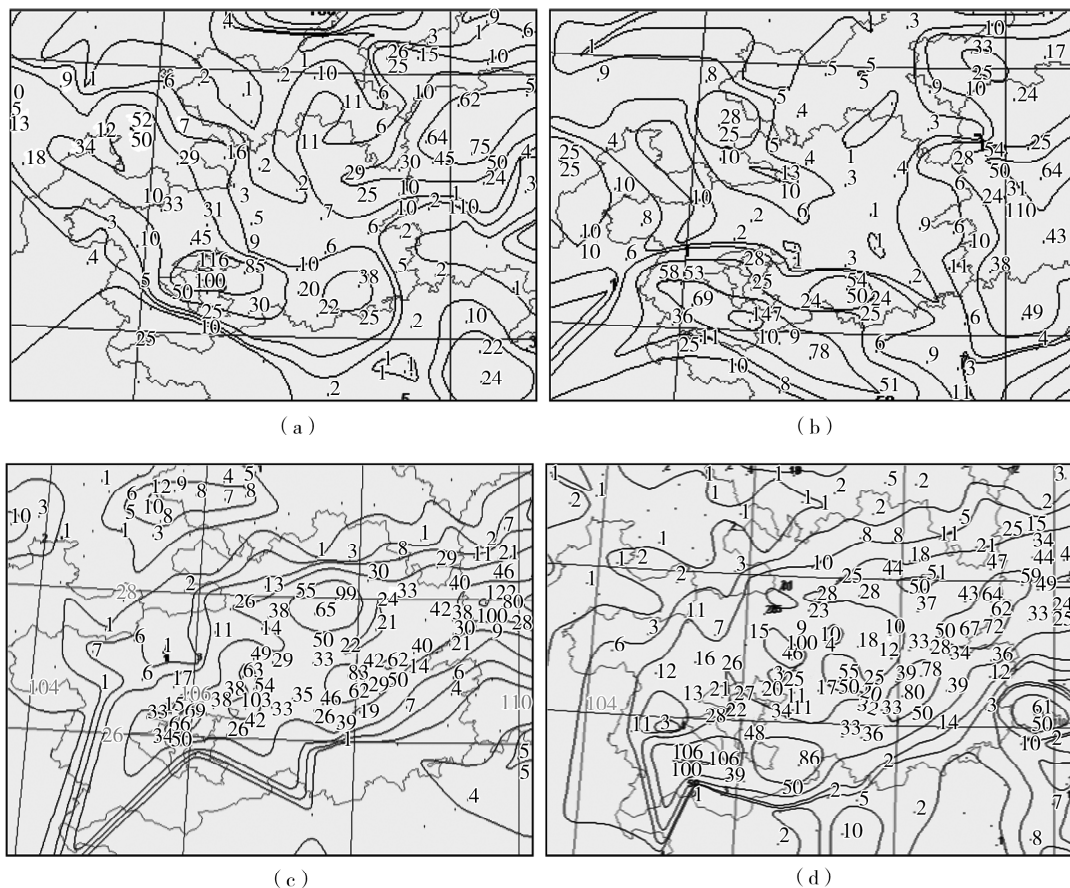


图1 贵州2次强降水过程降雨量分布(单位:mm)

(a) 2008年5月26日08时至27日08时降雨量;(b)2008年5月27日08时至28日08时降雨量  
(c) 2011年6月4日08时至5日08时降雨量;(d)2011年6月5日08时至6日08时降雨量

Fig.1 The precipitation distribution of two heavy rainfall processes in Guizhou (Unit: mm)

(a) from 08:00 26 to 08:00 27 May 2008; (b) from 08:00 27 to 08:00 28 May 2008  
(c) from 08:00 4 to 08:00 5 June 2011; (d) from 08:00 5 to 08:00 6 June 2011

## 1.2 环流背景和主要影响系统

2008 年 5 月 25 日 08 时到 27 日 20 时(图 2a), 500 hPa 平均高度场上, 中高纬经向环流较小, 我国东北部地区有一冷涡, 在其北面有一阻塞高压,  $110^{\circ}\text{E}$  以西的中高纬为一宽广的低压区。中低纬度盛行纬向型环流, 气流较平直, 无强冷空气活动, 西太平洋副热带高压(以下简称副高)位置较偏东, 脊线在  $20^{\circ}\text{N}$  附近, 贵州受 584 线控制; 孟加拉湾低槽深厚, 有充沛的水汽向贵州输送。青藏高原东侧有连续产生的低槽东移, 表现为从川东到贵州西部有稳定少动的低槽维持。26 日 08 时 700 hPa 从陕西到川东南有切变线维持, 20 时川东到贵州北部有低涡生成, 川东南的切变线南移到贵州北部, 维持到 27 日 08 时, 20 时南压到贵州省的南部。26~27 日, 850 hPa 从湖北经贵州北部到云南北部, 有一条东北—西南向的切变维持, 同时从 25 日 20 时起西南急流建立, 26~27 日最大风速达  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 贵州处于急流的左侧(图 2b)。地面图(图略)上 26~27 日贵州受均压场控制, 无明显冷空气影响, 有一条辐合线自省北部向南缓慢移动。28 日 500 hPa 槽已东移

出贵州省, 整个环流已发生了根本变化, 加之地面辐合线快速南压影响, 降水系统很快南移出贵州省, 过程结束。

2011 年 6 月 4 日 08 时到 5 日 20 时, 500 hPa 欧亚中高纬环流为 2 槽 1 脊型, 巴尔喀什湖到贝加尔湖之间的  $70^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{N}$  为阻塞高压稳定少动, 经向环流较过程 1 大, 脊前偏北气流引导低层冷空气从东北路径南下影响我国。副高北界在  $23^{\circ}\text{N}$  附近, 其西伸脊点在  $100^{\circ}\text{E}$  左右。贵州处于副高西北侧的西南气流控制下, 同时在高原上不断有小槽东移。孟加拉湾低槽深厚活跃, 不断有大量的暖湿气流经中南半岛输送到贵州(图 2c)。700 hPa 从长江中下游到四川南部维持一条东西向的切变线, 川西有一中心强度为 308 dagpm 的低涡(图略)。4 日 08~20 时 850 hPa 从湖北经贵州中部到云南中部有一低涡切变, 稳定少动; 5 日 08 时切变有所南压, 切变线从浙江北部经过江西、湖南、贵州中部到云南南部。同时从 3 日 20 时起西南急流建立, 4~5 日维持且有所加强, 最大风速达  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 贵州处于急流的左侧(图 2d)。从 6 月 4 日到 5 日 20 时的地面图

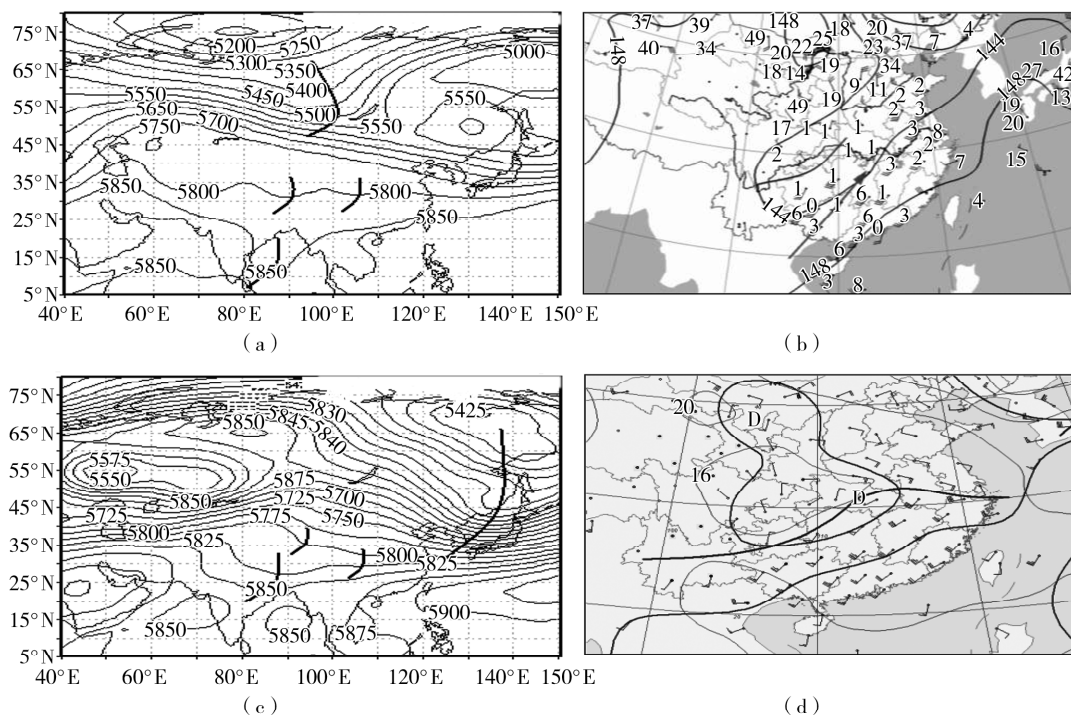


图 2 2008 年 5 月 25 日 08 时至 27 日 20 时 500 hPa 平均高度场(等高线间隔 5 gpm)(a),  
2008 年 5 月 27 日 08 时 850 hPa 天气形势图(b),  
2011 年 6 月 4 日 08 时至 5 日 20 时 500 hPa 平均高度场(等高线间隔 3 gpm)(c),  
2011 年 6 月 5 日 08 时 850 hPa 天气形势图(d)

Fig. 2 The average height field of 500 hPa from 08:00 25 to 20:00 27 May 2008 (contour interval: 5 gpm)(a); The synoptic chart for 850 hPa at 08:00 on 27 May 2008(b),  
The average height field of 500 hPa from 08:00 4 to 20:00 5 June 2011 (contour interval: 3 gpm)(c),  
The synoptic chart for 850 hPa at 08:00 on June 5, 2011(d)

演变来看(图略),在这段时间内,贵州中西部到云南东部一直为一个中尺度低压控制,且在江西、湖南直到贵州的中部偏南一线始终有静止锋维持,四川到青海一带则维持一个弱的小高压。分析14时和20时的24 h变温可见,贵州北部到四川有负变温,而贵州中南部始终维持正变温(图略)。这一现象说明,由于近地面低空急流的存在,带来了大量的暖湿气流,所以贵州中南部一直处于高温高湿的状态。四川一带由于有弱冷空气侵入,西南暖湿气流遇冷空气抬升,使上升运动维持和加强,激发不稳定能量释放,进而在辐合上升运动强的地区生成中尺度对流云团,产生强对流和强降水天气。

综上所述,2次连续性暴雨过程的环流背景有某些共同之处,都是在500 hPa相对稳定的环流形势下,配合中低层的低涡切变等中尺度系统产生暴雨。但阻塞高压的位置不同,过程1阻高在 $120^{\circ}\text{E}$ 以东,无明显冷空气影响贵州;过程2阻高在 $80^{\circ}\text{E}$ 附近,脊前偏北气流引导低层冷空气从东北路径南下影响我国,导致影响贵州的冷空气较过程1强。地面均存在中尺度辐合线,有利于长时间在辐合区内形成强的上升运动。过程2西南急流强于过程1,从而带来更丰沛的水汽,有明显的冷空气配合,产生暴雨的范围更大。

## 2 中尺度系统的云图特征

### 2.1 中尺度云团的发生发展

由TBB云图的演变可见,2008年5月26日14时左右(图3a),在贵州西北部已有一些对流云团发展,这些初生的对流云团范围较小,只是中 $\gamma$ 尺度或中 $\beta$ 尺度系统,这些云团范围和强度发展得比较缓慢,首先向偏南方向移动,然后向东扩大,到27日00时发展为一个TBB最小值为 $<196\text{ K}(-77^{\circ}\text{C})$ 的中尺度对流系统(图3b)。之后至次日凌晨03时,该云团强度进一步增强,不仅冷云盖的面积逐渐增大,同时云顶亮温的最低值均降至 $-80^{\circ}\text{C}$ 以下(图3c),显示出旺盛的对流发展和较高的上冲云顶特征,该时段正好是贵州中部强降水发生的时段。至27日13时左右,该云团逐渐东移进入湖南,对应贵州中南部的降水也趋于结束。27日15时左右,又有对流云团在黔西南州的东部生成(图3d),逐步发展向四周扩大,到27日22时(图3e)发展为一个TBB最小值为 $<196\text{ K}(-77^{\circ}\text{C})$ 的中尺度对流系统,28日01时该云团强度进一步增强,云顶亮温的最低值均降至 $-95^{\circ}\text{C}$ 以下(图3f),此时正是安顺南部和黔西南州降雨最强的时段;至28日08时左右,该云团逐渐东南移

进入广西,对应贵州南部的降水结束。

2011年6月4日20时开始,有对流云团在毕节南部到安顺北部一带生成,与此同时,有较强块状回波在六盘水、织金等地出现,回波出现的区域开始产生强雷暴和降水。5日00时对流云团已发展为一个云顶亮温达 $-60\sim-80^{\circ}\text{C}$ 的中尺度对流系统,并于5日00~01时在安顺西秀区南部和贵阳的花溪产生强降水,花溪1 h降水达53 mm。此后云团逐渐东扩,与在贵州省北部发展起来的2个对流云团合并,于5日02:30左右达到强盛(图略),在贵州省的中东部地区产生暴雨。5日17时左右,又有对流云团在黔西南州的东部生成(图3g),逐步发展加强向南和东部扩大,到6日00时左右(图3h)发展为一个TBB最小值为 $<196\text{ K}(-77^{\circ}\text{C})$ 的中尺度对流系统,6日02时云团强度进一步增强,云顶亮温的最低值均降至 $-87^{\circ}\text{C}$ 以下(图3i),安顺和黔西南州降雨增强。至6日11时左右,贵州南部的降水结束。

### 2.2 云团特征

从TBB的分布可以看出,2次连续性暴雨过程的对流云团在形态上与中尺度对流复合体(MCC)很相似。对照Mad-dox<sup>[12]</sup>1980年概括的MCC定义和物理特征,2008年5月26日在云团发展阶段,云区中以 $TBB\leq-52^{\circ}\text{C}$ 的对流云为主。到27日00时 $TBB\leq-52^{\circ}\text{C}$ 的冷云盖面积达到了 $8\times10^4\text{ km}^2$ ,低于 $-32^{\circ}\text{C}$ 的云盖达到了 $11\times10^4\text{ km}^2$ (冷云盖面积根据micaps3.1计算面积的工具算出),此后,上述2种冷云盖面积同时达到标准的时间持续了6 h以上;在不考虑偏心率的情况下,该对流云团达到MCC的标准。按上述标准对27日夜间的对流云团分析,该对流云团也达到MCC的标准。2011年6月4日夜间的对流云团,其 $TBB\leq-52^{\circ}\text{C}$ 的冷云盖面积和 $TBB<-32^{\circ}\text{C}$ 的云盖面积均达到了MCC的标准,但满足云顶温度条件的持续时间只有4 h,所以称为一次准MCC过程。6月5日夜间的对流云团在6日00时左右,其 $TBB\leq-52^{\circ}\text{C}$ 的冷云盖面积达 $6.5\times10^4\text{ km}^2$ 和 $TBB<-32^{\circ}\text{C}$ 的云盖面积达 $11\times10^4\text{ km}^2$ ,此后,上述2种冷云盖面积同时达到标准的时间持续到6日06时以后,因此5日夜间的对流云团也达到MCC的标准。

从降水量与TBB的对应关系来看,强降水时段,出现强降水的地区,一般是TBB等值线的密集区,TBB温度梯度大值区则说明云体边缘陡直,对流非常旺盛。分析MCC最初对流云的生成地及移动方向与850 hPa的关系可见,当08时850 hPa切变

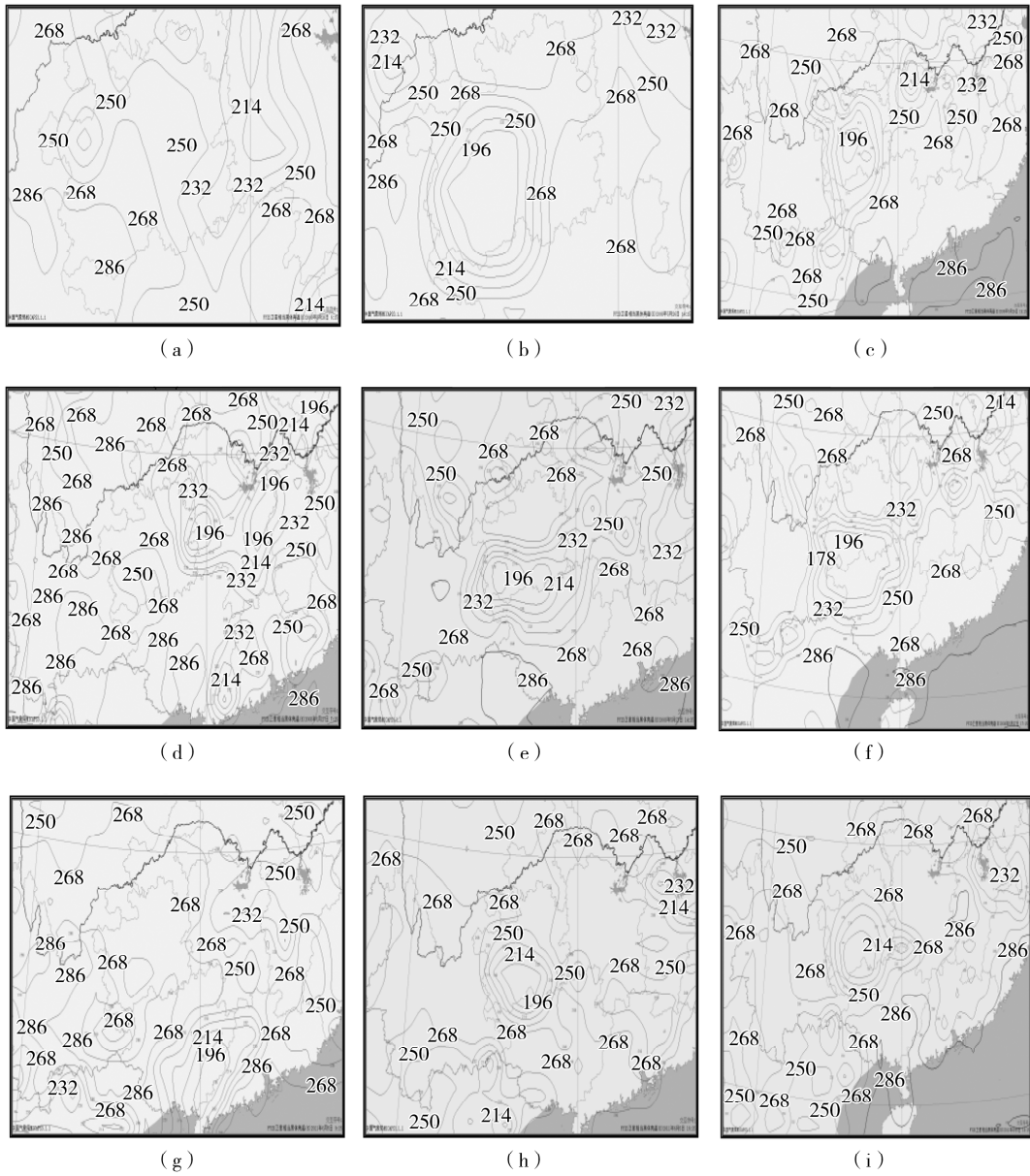


图3 2次过程中TBB演变特征(单位:K)

(a)2008年5月26日14时,(b)27日00时,(c)27日03时TBB等值线分布  
(d)2008年5月27日15时,(e)27日22时,(f)28日01时TBB等值线分布  
(g)2011年6月5日17时,(h)6日00时,(i)6日02时TBB等值线分布

Fig.3 The TBB evolution characteristics during two rainstorm processes(Unit: K)

(a)14:00 May 26, 2008, (b)00:00 May 27, (c)03:00 May 27  
(d)15:00 May 27, 2008, (e)22:00 May 27, (f)01:00 May 28  
(g)17:00 June 5, 2008, (h)00:00 June 6, (i)02:00 June 6

线在贵阳以北时,对流云团在贵州省的西部生成,然后向中南部发展,最后东移出省;当08时850 hPa切变线在贵阳以南时,对流云团在贵州省的南部生成,然后向贵州南部和广西北部发展,最后东南移出贵州省。

3 产生中尺度系统的环境条件

3.1 水汽条件与动力结构

图4给出了2次暴雨过程期间850 hPa平均风矢量及水汽通量分布。过程1的水汽主要来自孟加拉湾。

拉湾经中南半岛的西南风水汽输送(图4a),西南急流携带大量水汽,在贵州东南部到广西北部 and 湖南东部,形成一个水汽通量的大值区,其中心最大值达  $14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以上。从贵阳  $T-\ln p$  图可见(图略),强降水发生期间,700 hPa 和 850 hPa 的比湿均达到  $10 \text{ g/kg}$  和  $12 \text{ g/kg}$  以上,特别是 26~27 日 850 hPa 比湿达到  $14 \text{ g/kg}$  以上。过程 2 的水汽通道主要有 2 条(图 4b),一条是来自孟加拉湾经中南半岛的西南风水汽通道,强劲的西南急流携带大量水汽,在贵州东南部到广西北部 and 湖南一带,形成一个水汽通量的大值区,其中心最大值达  $18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以上,是主要的水汽输送带;另一

个是来自副热带高压西侧的东南气流的水汽输送带,由于其风速较弱,水汽通量值较小,但对暴雨区的水汽输送是有贡献的。分析贵阳探空图(图略),2011 年 5 月 4 日 20 时湿层比较深厚,从地面到 550 hPa,相对湿度  $> 80\%$ ,各地 14 时的水汽压明显上升;5 日 20 时,850 hPa 的比湿达  $15 \text{ g/kg}$ 。可见由于低空急流的维持,2 次过程期间的水汽输送条件是非常有利于强降水的,但过程 2 的水汽输送条件比过程 1 好。

图 5 给出的是过程 1 和过程 2 暴雨期间 700 hPa 以下整层水汽通量散度沿  $106^\circ\text{E}$  的时间—纬度剖面。

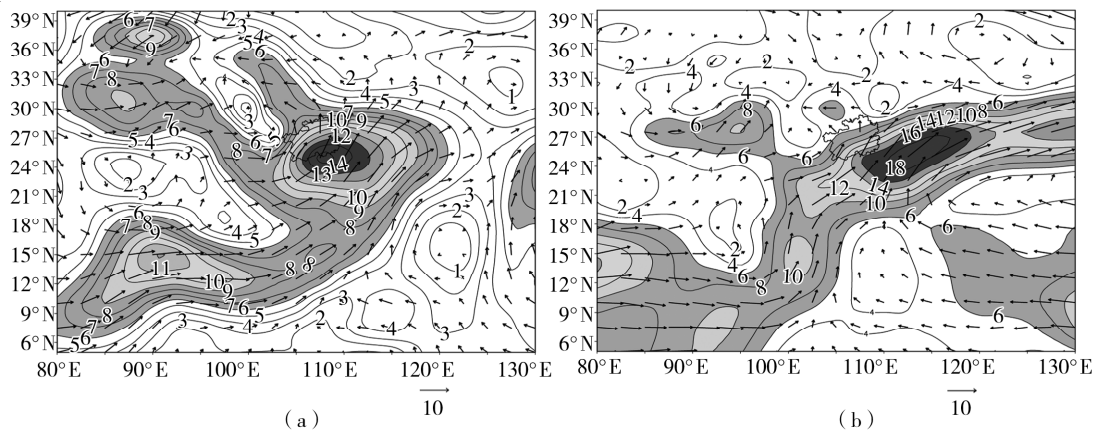


图 4 850 hPa 平均水汽通量(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)2008 年 5 月 25 日 08 时至 27 日 20 时,(b)2011 年 6 月 4 日 08 时至 6 日 08 时

Fig. 4 The average water vapor flux(Unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

and wind field (Unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at the level of 850 hPa

(a)08:00 25th to 20:00 27th May,2008, (b)08:00 4th to 08:00 6th June,2011

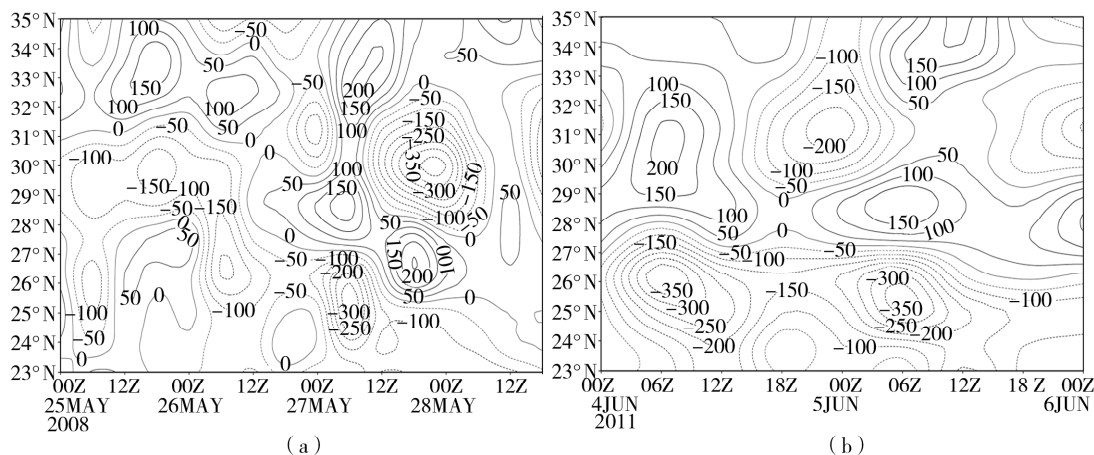


图 5 700 hPa 以下整层水汽通量散度(单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)2008 年 5 月 25 日 08 时至 27 日 20 时沿  $106^\circ\text{E}$  的时间—纬向剖面

(b)2011 年 6 月 4 日 08 时至 6 日 02 时沿  $106^\circ\text{E}$  的时间—纬向剖面

Fig. 5 The cross sections of water vapor flux divergence below 700 hPa along  $106^\circ\text{E}$ (Unit: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)08:00 25th to 20:00 27th, May,2008, (b)08:00 4th to 02:00 6th June,2011

2次暴雨过程期间,贵州中南部地区为强水汽辐合区,在纬向剖面上,过程1期间,水汽辐合中心位于 $25^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}$ 。过程2期间,4日夜暴雨中心在贵州省的中部,相应的水汽辐合高值区在 $26^{\circ}\text{N}$ 附近,5日夜暴雨区在贵州省的南部,水汽辐合中心南移到 $25^{\circ}\text{N}$ 附近。在经向剖面上,水汽辐合中心位于 $105^{\circ} \sim 106^{\circ}\text{E}$ 附近,辐合中心正好位于暴雨中心区。从影响贵州的水汽通量和水汽通量散度的量值来看,过程1期间的水汽条件较过程2差一些,这是因为前一次过程期间副高较弱,水汽主要来自孟加拉湾,后一次过程水汽来自孟加拉湾和南海。后一次强降水的范围较前次大,可见夏季副高的位置对强降水的影响是很大的。

图6给出了过程1和过程2期间暴雨区( $24^{\circ} \sim 27^{\circ}\text{N}, 104^{\circ} \sim 107^{\circ}\text{E}$ )涡度和散度的时间—高度剖面。2次过程期间,暴雨区上空具有相似的动力结

构,但在量值上有较大差异。由于200 hPa在 $35^{\circ}\text{N}$ 附近有东西向高空急流(图略),850 hPa贵州的右侧有低空急流,高低空急流的耦合使得暴雨区内散度场从地面到高层,形成“辐合—辐散—辐合—辐散”的接力式上下大气运动<sup>[13]</sup>,低层为强的辐合,高层为强辐散,抽吸作用明显,有利于对流发展。过程1期间,26日正涡度伸展到200 hPa以上,最大正涡度层位于300 hPa,涡度中心强度达 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上;27日正涡度层在500 hPa以下,最大正涡度层位于850~700 hPa,对流层上层为一致的负涡度区;过程2正涡度层在500 hPa以下,最大正涡度层位于850 hPa,对流层上层为一致的负涡度区,强度较前一次强。暴雨中心存在的这种明显的正负涡度柱、负正散度柱的耦合形势有利于低层辐合、高层辐散和垂直运动的发展,从而形成强烈的抽吸作用,对大暴雨的维持和发展起到了重要的作用。

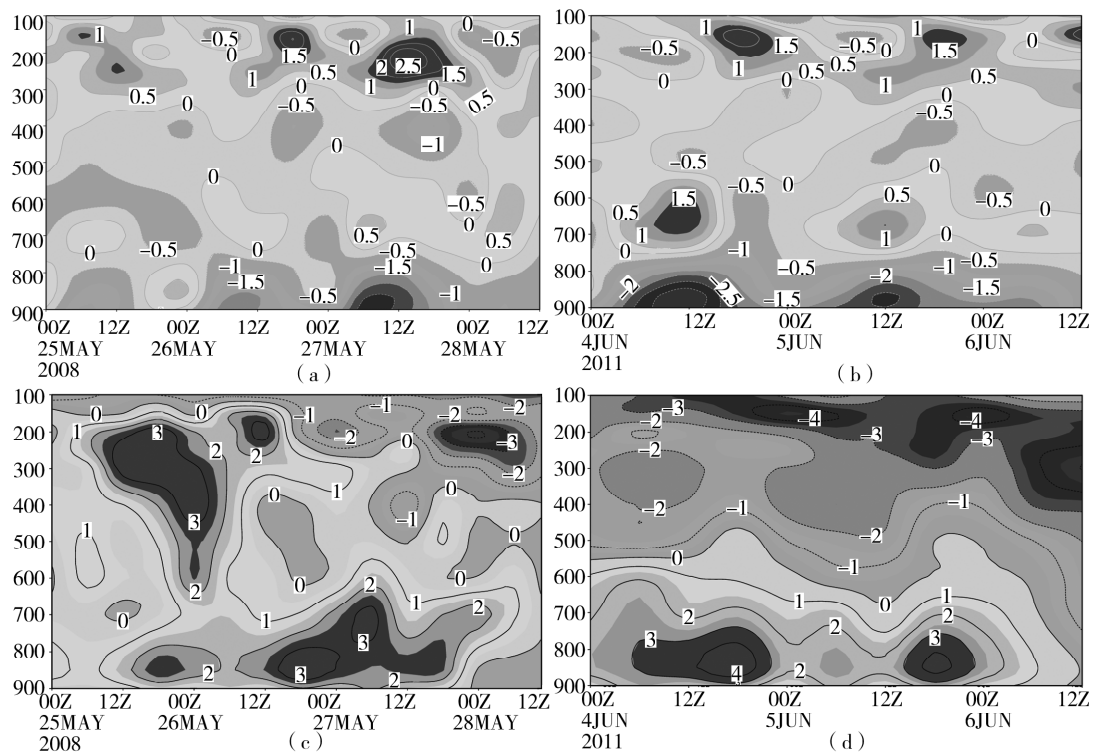


图6 2008年5月25日08时至28日20时暴雨区上空平均散度(a)和涡度(c)的时间—高度垂直剖面(单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), 2011年6月4日08时至6日20时暴雨区上空平均散度(b)和涡度(d)的时间—高度垂直剖面(单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 6 The vertical profiles of the average divergence(a,b) and vorticity(c,d) over the heavy rainfall area from 08:00 May 25 to 20:00 May 28, 2008(a,c) and from 08:00 June 4 to 20:00 June 6, 2011(b,d) (Unit: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )



2次过程期间,暴雨区一直维持较强的上升运动(图略)。分析2008年5月27日20时和2011年6月5日20时的垂直速度的经向剖面可见(图略):在包含暴雨区在内的 $103^{\circ} \sim 107^{\circ} \text{E}$ 之间地面以上为一致的上升运动区,前一次最强中心在300 hPa,强上升运动大值区从低层到高层向东倾斜。后一次最强中心在 $105^{\circ} \text{E}$ 的700 hPa,强上升运动大值区从低层到高层向东倾斜,前一次的上升运动比后一次强,这可能是过程1的降水强度比过程2强的一个因素。从垂直速度的纬向剖面可见(图略):2次过程上升运动区在 $24^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$ 之间,最强中心在300 hPa,强上升运动大值区从低层到高层向南倾斜,上升区的北面有下沉气流。综上所述,强的辐合上升运动主要集中在贵州中南部,强上升气流从低层到高空向东南方向伸展、倾斜。因此,2008年5月27日夜間和2011年6月5日夜間的强降水主要出现在贵州省的南部。

### 3.2 能量和层结稳定性

分析2008年5月25~27日 $T-\ln p$ 图(图略),贵阳层结一直都处于不稳定状态。特别是26和27日20时,贵阳及广西河池的沙氏指数在 $-3.0^{\circ} \text{C}$ 和

$-5.2^{\circ} \text{C}$ 之间, $K$ 指数达到 $42 \sim 43^{\circ} \text{C}$ , $CAPE$ 值达 $1091.1 \sim 1109.5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,说明强降水发生前贵州及广西北部存在较大的不稳定能量,大气层结不稳定,有利于强对流和强降水天气的发生。

2011年5月4日20时贵阳探空图(图略),在850~750 hPa之间有一个比较薄的逆温层,大气层结呈相对稳定状态, $K$ 指数为 $33^{\circ} \text{C}$ 。贵州南面的广西白色与河池站大气层结极不稳定,河池站 $CAPE$ 值为 $1385.1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ ,从地面到850 hPa为强劲的偏南气流控制(图略)。同时贵州中部4日14时的气温普遍高于 $25^{\circ} \text{C}$ ,南部地势低的地方达 $35^{\circ} \text{C}$ 以上,各地14时的水汽压明显上升。5日20时,贵阳大气层结呈弱不稳定状态, $K$ 指数和 $CAPE$ 值都有所上升,其南面的白色、河池大气层结为强不稳定状态。可见过程1贵州及广西北部大气层结不稳定,过程2不稳定区域集中在贵州南部到广西北部。

由于假相当位温可以综合反映大气温度、湿度和气压等特征,其随高度的变化能反映出大气层结稳定度<sup>[14-16]</sup>。进一步分析2008年5月26日20时和27日20时沿 $106^{\circ} \text{E}$ 的剖面可见(图7),暴雨中心区 $24^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$ 地面到高空为一致的上升气流,在

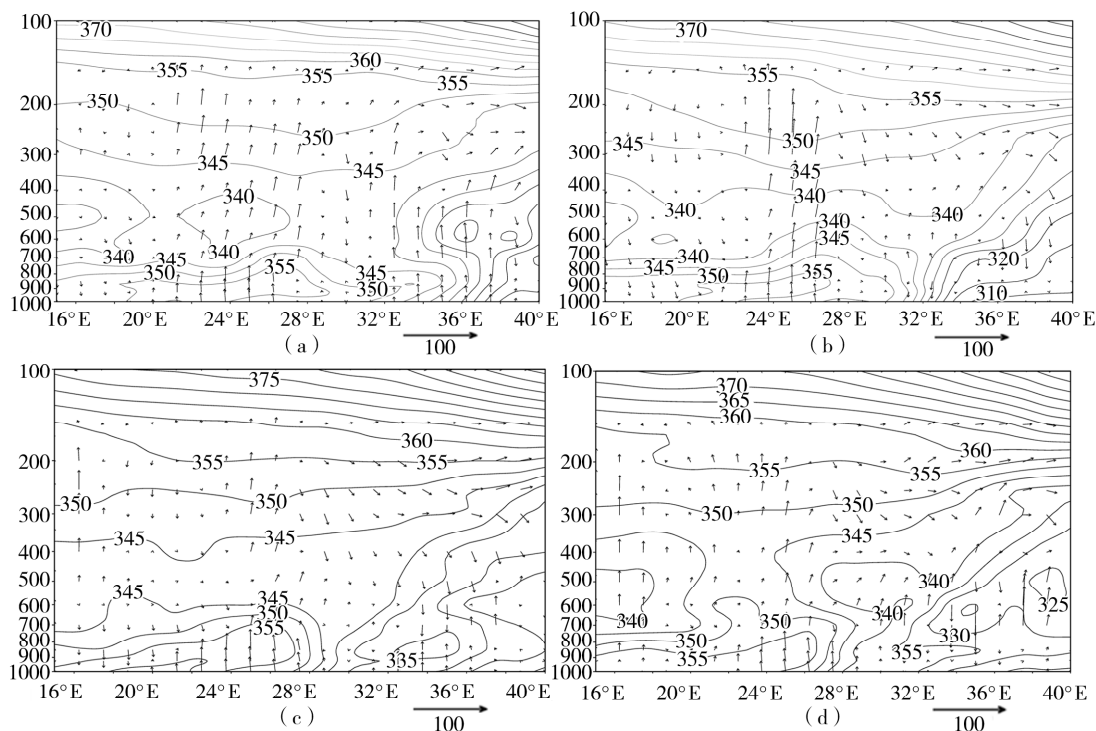


图7 沿 $106^{\circ} \text{E}$ 的 $\theta_{se}$ 纬向剖面与垂直环流叠加(单位: $\theta_{se}: \text{K}$ ,  $v: \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $w: 1/300 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
(a)2008年5月26日20时,(b)2008年5月27日20时,(c)2011年6月4日20时,(d)2011年6月5日20时

Fig. 7 The zonal cross section of  $\theta_{se}$  along  $106^{\circ} \text{E}$  and vertical circulation

(Unit:  $\theta_{se}: \text{K}$ ,  $v: \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $w: 1/300 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)20:00 May 26, 2008, (b)20:00 May 27, 2008, (c)20:00 June 4, 2011, (d)20:00 June 5, 2011



暴雨中心区的北侧和南侧有下沉气流补偿,使得上升气流长时间维持。26 日在  $22^{\circ} \sim 27^{\circ}\text{N}$ , 700 hPa 以下  $\theta_{\text{se}}$  高值区自地面向上伸展, 355 K 的高能舌自南向北伸展到  $29^{\circ}\text{N}$ ,  $22^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}$  上空 700 ~ 400 hPa 之间有  $< 340$  K 的低能中心, 该区域内  $\theta_{\text{se}}$  随高度递减, 且  $\Delta\theta_{\text{se}(500-850)} < -10$  K, 可见暴雨区大气层结为对流不稳定。27 日大气层结仍维持对流不稳定, 355 K 的高能舌南退到  $26^{\circ}\text{N}$  附近, 说明低层有冷空气渗透影响, 但连续 2 d 的能量锋区都在  $30^{\circ}\text{N}$  以北, 26 日无明显冷空气影响。分析 2011 年 6 月 4 日 20 时和 5 日 20 时沿  $106^{\circ}\text{E}$  的剖面可见(图 7), 暴雨中心区  $24^{\circ} \sim 26^{\circ}\text{N}$  地面到高空为上升气流控制, 但强度较过程 1 弱, 暴雨区的北侧和南侧同样有下沉气流补偿, 使得上升气流长时间维持。高能舌从地面向上向北伸展, 4 日 20 时 355 K 的高能舌自南向北伸展到  $27^{\circ}\text{N}$ , 能量锋区到达  $29^{\circ}\text{N}$  附近, 5 日高能舌南退到  $26^{\circ}\text{N}$  附近, 与过程 1 相比, 这次的高能区较偏南, 4 日的能量锋区南伸到贵州省的北部; 5 日 20 时近地面的低能舌进一步南移到  $27^{\circ}\text{N}$ , 在 500 ~ 400 hPa 层也有低能舌南伸到暴雨区上空, 使得暴雨区层结更加不稳定。

湿位涡 MPV 的分布可反映大气的湿对称不稳

定性<sup>[17]</sup>, 根据 Hoskins 位涡理论<sup>[18]</sup>可以认为, 负的湿位涡代表不稳定的暖湿气流, 正的湿位涡用来表示冷空气活动。王宏、曲晓黎等气象工作者运用湿位涡理论, 对河北的暴雨过程进行了诊断分析<sup>[19-20]</sup>, 得到了一些有意义的结果。2 次暴雨期间, 在贵州上空 500 hPa 以下  $MPV < 0$ , 最小值  $MPV \leq -3$  pvu, 大气湿对称不稳定, 说明贵州上空存在较强的倾斜上升运动。500 hPa 以上为  $MPV > 0$  的正值区(图 8); 但过程 2 在  $30^{\circ}\text{N}$  以北有舌状正的位涡从高空伸向地面, 说明有较强的冷空气从北面进入贵州, 这与前面对  $\theta_{\text{se}}$  剖面的分析相符。中高层湿对称稳定的大气与低层对称不稳定的大气相叠加, 有利于对流发展, 降水增强。

通过以上分析可见, 2 次过程期间贵州大气稳定度有较大差异, 过程 1 贵州能量大, 层结不稳定; 过程 2 能量条件不及过程 1, 不稳定区在贵州南部到广西北部。虽然 2 次过程在热力和动力方面存在差异, 但却同时在贵州生成了 MCC, 说明在高能、高湿不稳定环境中, 由于垂直涡度发展强烈, 低层强辐合及高层强辐散的动力结构使得暴雨区维持强烈的上升运动, 对流云团易发展为 MCC, 只是最初生成对流云团的地点不同, 暴雨落区有所不同。

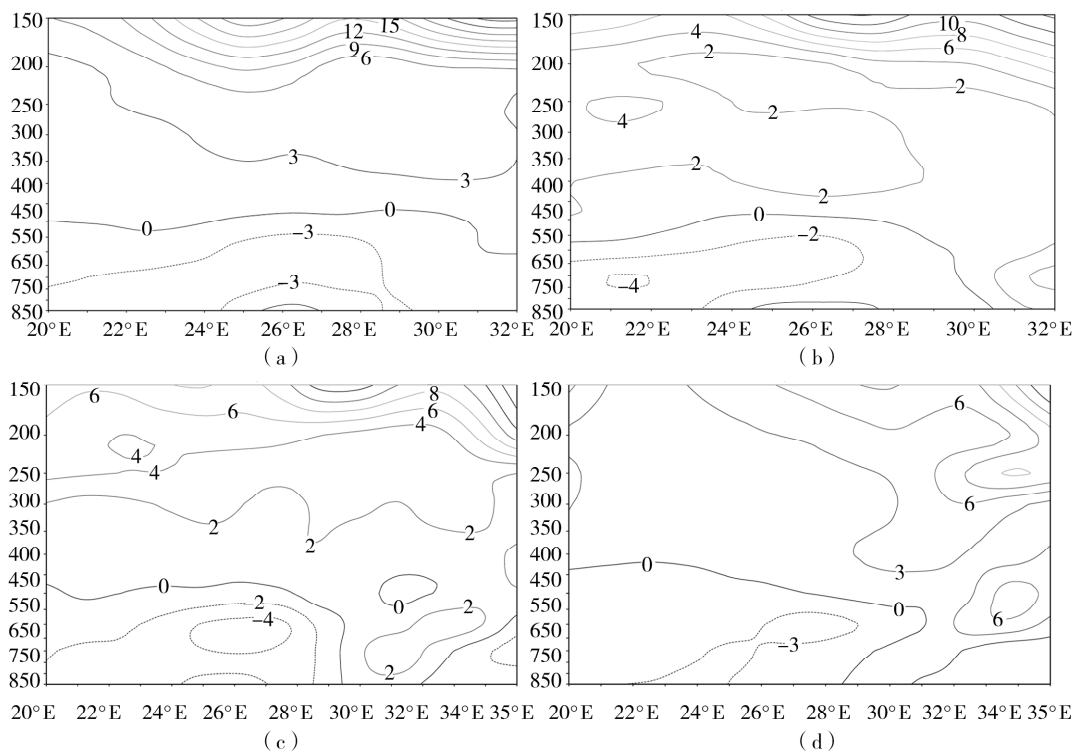


图 8 湿位涡沿  $106^{\circ}\text{E}$  纬向—高度剖面(单位: pvu)

(a) 2008 年 5 月 26 日 20 时, (b) 2008 年 5 月 27 日 20 时, (c) 2011 年 6 月 4 日 20 时, (d) 2011 年 6 月 5 日 20 时

Fig. 8 The latitude - height cross sections of MPV along  $106^{\circ}\text{E}$  (Unit: pvu)

(a) 20:00 on 26 May, 2008, (b) 20:00 on 27 May, 2008, (c) 20:00 on 4 June, 2011, (d) 20:00 on 5 June, 2011

## 4 触发机制及暴雨落区

中尺度系统的发生发展不仅需要高温、高湿和层结不稳定等这些有利的环境条件<sup>[21]</sup>,同时还需要一定的触发条件,包括锋面抬升、低空急流抬升、地形抬升和热力抬升等。2次过程期间贵州中南部已经具备了产生强降水的环境条件,此时如果存在某种触发机制,使低层空气上升到自由对流高度,则对流系统就会迅速发展。2次暴雨过程的触发机制可归纳为几个方面:一是低空急流的抬升,二是近地面层冷空气的入侵,三是地面低压和中尺度辐合线以及特殊的地形等几方面。朱乾根等指出<sup>[22]</sup>:低空急流是暴雨区低空对流不稳定层结的建立者和维护者,是暴雨区上升气流的建立者和对流不稳定能量的触发者。过程1和过程2期间,850 hPa一直有急流维持,贵州处于急流轴的左侧,可见低空急流对维持贵州的高能高湿和不稳定层结、触发不稳定能量的释放起到了重要的作用。过程1从 $\theta_{se}$ 的剖面来看,26日无明显冷空气影响,27日夜间有弱冷空气南下,触发不稳定能量的释放,暴雨发生在暖湿区。过程2期间,根据上节对 $\theta_{se}$ 剖面的分析,已看到有较强冷空气影响贵州,从而触发了不稳定能量的释放。过程1期间冷锋还远在川北一线,但贵州受中尺度低压控制,在暴雨出现前,暴雨区有中尺度辐合线出现并长时间维持,有利于长时间在辐合区内形成强的上升运动。根据贵州地面区域自动站资料和雷达回波拼图可见(图略),降水云团初生阶段和强盛期间,强降水回波主要出现在地面中尺度辐合线附近气温高、湿度大的区域。可见中尺度低压和辐合线先于暴雨出现,可能是暴雨发生的一种触发机制。

分析暴雨落区与各层天气系统的关系发现:暴雨主要出现在850 hPa切变线偏南风一侧,出现在地面辐合线附近。当地面和850 hPa贵阳为偏南气流控制时,暴雨区主要在贵州中部或北部,当贵阳转为偏北气流时,暴雨区主要在贵州南部到广西北部。

## 5 小结和暴雨预报指标

(1)2次连续性暴雨过程均是在500 hPa较稳定的环流背景下,即中高纬存在阻塞形势,孟加拉湾低槽深厚活跃,高原上不断有槽生成东移,配合中低层在川黔间的切变共同影响产生的。过程1无明显冷空气影响贵州,属于降水强度大、范围较小的暖区暴雨;过程2有明显的冷空气从东北路径南下影响我国,导致影响贵州的冷空气较过程1强,西南急

流强于过程1,从而带来更丰沛的水汽,冷空气与暖湿气流相互作用,产生暴雨的范围更大。2次暴雨过程均为MCC反复在贵州生成所致。过程1大气不稳定能量很高,层结极不稳定,上升运动非常强,导致降水强度比过程2强。地面中尺度低压中的辐合线或静止锋的存在,维持和加强了长时间的辐合上升运动。

(2)850 hPa低空急流的建立和维持,为暴雨区输送了充沛的水汽,使得贵州中南部在暴雨期间处于高温高湿的状态,大气层结对流不稳定和对称不稳定。垂直涡度发展强烈,低层强辐合及高层强辐散的动力结构使得暴雨区维持强烈的上升运动。

(3)在高温高湿和不稳定的环境下,高空槽前和低层切变线的西端易反复生成对流云团,08时850 hPa切变线在贵阳以北时,对流云团在贵州省的西部生成;08时850 hPa切变线在贵阳以南时,对流云团在贵州省的南部生成。在冷空气、静止锋或地面中尺度辐合线的共同影响下,对流云团发展为MCC。

(4)暴雨主要出现在850 hPa切变线偏南风一侧,出现在地面辐合线附近。当地面和850 hPa贵阳为偏南气流控制时,暴雨区主要在贵州中部或北部,当贵阳转为偏北气流时,暴雨区主要在贵州南部到广西北部。

(5)根据上述分析和以往的工作,我们认为在有利于发生暴雨的天气形势下,分析地面贵州省及上游地区的24 h变温,可以直观地判断冷空气的活动,当贵州北部到四川南部出现负变温时,易触发不稳定能量的释放,在贵州中南部产生暴雨;贵州省及邻近地区的探空资料提供了大气层结稳定度、水汽条件、能量条件等大量信息。当贵阳K指数>35℃,700 hPa比湿>12 g/kg、850 hPa比湿>14 g/kg时,可以认为贵州大气为高温高湿状态。

### 参考文献:

- [1] 白惠,陈贞宏,李长波,等.贵州省主汛期暴雨的气候特征[J].贵州气象,2012,36(3):1-6.
- [2] 伍红雨,王谦谦.贵州夏季降水异常的区域特征[J].干旱气象,2008,26(1):41-46.
- [3] 杨晓霞,等.2007年7月18-19日山东省大暴雨天气分析[J].气象,2008,34(4):61-71.
- [4] 康岚,等.一次川渝大暴雨的中尺度分析[J].气象,2008,31(10):41-50.
- [5] 项续康,江吉喜.我国南方的中尺度对流复合体[J].应用气象学报,1995,6(1):10-17.
- [6] 毛冬艳,钱传海,乔林,等.贵州南部一次突发性大暴雨的中尺度分析[J].南京气象学院学报,2007,30(5):601-609.

- [7] 李登文,杨静,乔琪. 2006-06-13 贵州省望谟县大暴雨的诊断分析[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 511-519.
- [8] 伍红雨. 贵州一次大暴雨过程的中尺度数值模拟与诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2007, 26(4): 361-368.
- [9] 伍红雨. 贵州大暴雨个例形成机制数值模拟[J]. 气象科技, 2008, 36(5): 529-536.
- [10] 刘开宇,赵重安,牟佳,等. 贵州暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 贵州气象, 2005, 29(6): 15-18.
- [11] 万雪丽,杨静. 低空急流对贵州夏季暴雨的作用分析[J]. 贵州气象, 2007, 31(3): 16-18.
- [12] Mad-dox R A. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61(11): 1374-1387.
- [13] 赵兵科,姚秀萍,吴国雄,等. 2003 年夏季淮河流域梅雨期西太平洋副高结构和活动特征及动力机制分析[J]. 大气科学, 2005, 29(5): 771-779.
- [14] 王建兵,王振国,李晓媛,等. 甘南高原一次突发性强对流天气的诊断分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 54-60.
- [15] 刘利民,德庆措姆,孟丽霞,等. 甘肃河东一次区域性暴雨天气过程分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(3): 272-275.
- [16] 滕水昌,渠永兴,王坚,等. 河西走廊一次突发性暴雨天气的诊断分析[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 67-71.
- [17] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁,等. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.
- [18] 寿绍文,励申申. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 283-285.
- [19] 王宏,马凤莲,王万筠,等. 湿位涡分析在河北东北部暴雨预报中的应用[J]. 干旱气象, 2008, 26(4): 87-90.
- [20] 曲晓黎,段宇辉,秦宝国,等. 河北省中南部一次 MCC 造成的暴雨过程分析[J]. 干旱气象, 2011, 29(1): 70-73.
- [21] 尹洁,郑婧,张瑛,等. 一次梅雨锋特大暴雨过程分析及数值模拟[J]. 气象, 2011, 37(7): 827-837.
- [22] 朱乾根,林锦瑞,寿少文,等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社. 398-399.

## Comprehensive Analysis of Two Rainstorm Weather Processes Caused by MCC in Central and Southern Areas of Guizhou

YANG Zhongming<sup>1,2</sup>, WU Zhehong<sup>1</sup>, WANG Xingju<sup>1</sup>

(1. Anshun Meteorological Bureau of Guizhou Province, Anshun 561000, China;

2. Key Laboratory of Mountainous Climate and Resources of Guizhou Province, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** By using the observational data, satellite product and NCEP reanalysis data, the two convective rainstorm weather processes in central and southern areas of Guizhou from May 25 to 27, 2008 and from June 4 to 5, 2011 were analyzed. The results show that under the relatively stable circulation situation on 500 hPa, there were small trough moving eastward continuously over the Qinghai-Xizang plateau with low vortex shear at the middle and low level, which resulted in the two torrential rain processes, and two rainstorm processes were caused by MCC in Guizhou. During the first weather process (May 25 to 27, 2008), the atmospheric stratification was extremely unstable, and the upward movement was very strong, but during the second process (June 4 to 5, 2011), there was stationary front maintaining in the central line on the ground in Guizhou, the atmospheric was neutral or stable stratification, but low-level jet condition was better than that of the first process. There were some differences in moisture condition, instability condition and uplift mechanism during two rainstorm processes, which associated with the location of the subtropical high. The mesoscale low pressure convergence line or the stationary front existed on the ground, which strengthened convergence movement and resulted in mesoscale convective complex generation in the south region of Guizhou Province. Based on the analysis results, this kind of rainstorm forecast index was discussed in this paper.

**Key words:** rainstorm; low level jet; atmospheric instability; MCC