

高安宁, 赖珍权, 张瑞波, 等. 2013. 不同环境风场条件下两次华南西部低涡暴雨个例对比分析. 气象, 39(1): 11-19.

# 不同环境风场条件下两次华南西部 低涡暴雨个例对比分析<sup>\*1</sup>

高安宁<sup>1</sup> 赖珍权<sup>1</sup> 张瑞波<sup>2</sup> 陈 见<sup>1</sup> 陈伟斌<sup>1</sup>

1 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022

2 广西壮族自治区人工影响天气办公室, 南宁 530022

**提 要:** 利用常规观测资料、FY-2C 卫星 TBB 资料、自动站降水量以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 对 2009 年 7 月 3—4 日(简称“09.7”)和 2008 年 6 月 16—17 日(简称“08.6”)两次发生在华南西部的低涡暴雨过程进行对比分析, 结果表明: (1) 低涡是两次暴雨过程的直接影响系统, “09.7”过程伴随西南低空急流, “08.6”过程无低空急流配合, 中尺度辐合可能在两次强降水过程中有着直接的触发作用。 (2) “09.7”过程的低层辐合强度及上升运动强度明显强于“08.6”过程。“09.7”过程较“08.6”过程, 暖平流强度明显偏强, 等温度平流线也较密集。 (3) 相比“08.6”过程, “09.7”过程水汽净流量更大, 这是西南低空急流将充足水汽往暴雨区输送的结果。 (4) “09.7”和“08.6”两次暴雨过程均与高空西风急流南侧的垂直环流圈密切相关, “09.7”过程由于低空有急流存在, 上升运动维持时间长, 降水强度大, 历时长, “08.6”过程广西境内低空无急流, 上升运动维持时间短, 降水强度偏弱, 历时短。

**关键词:** 华南西部, 不同环境风场, 温度平流, 垂直环流、暴雨

**中图分类号:** P458

**文献标识码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.01.002

## Comparative Analysis of Two Heavy Rainfall Events with Different Environmental Wind Field in the Western Part of South China

GAO Anning<sup>1</sup> LAI Zhenquan<sup>1</sup> ZHANG Ruibo<sup>2</sup> CHEN Jian<sup>1</sup> CHEN Weibin<sup>1</sup>

1 Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022

2 Guangxi Weather Modification Office, Nanning 530022

**Abstract:** Based on the conventional observational data, brightness temperature (TBB) data, automatical observational precipitation and NCEP/NCAR reanalysis data, two heavy rainfall processes triggered by low-vortex in the western South China during 3—4 July 2009 and 16—17 June 2008 respectively were compared and analyzed. The major conclusions can be drawn as follows: (1) The low-vortex was the direct influencing system of these two heavy rainfall processes, the strong southwest jet at low levels was accompanied in the July 2009 process, but not in the June 2008 process. Mesoscale convergence may have a direct triggering effect on these two heavy rainfalls. (2) In the July 2009 process, the intensity of low-level convergence was stronger than that in the June 2008 process, so was the intensity of the upward motion and warm advection, and the temperature advection lines were more dense. (3) The net transport of water vapor was more in the July 2009 process than that in the June 2008 process, as a result of the sufficient water vapor transport to the storm area by the southwest low-level jet. (4) Both storm processes are closely related to the vertical circulation south of the westerly jet at the high altitude. In the July 2009 process, because of the low-level, the upward motion maintains longer than that in the June 2008 process, the intensity of rainfall stronger, and its duration longer.

**Key words:** western South China, environmental wind field, temperature advection, vertical circulation, heavy rainfall

\* 中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2011-040)资助

2011 年 11 月 28 日收稿; 2012 年 5 月 30 日收修定稿

第一作者: 高安宁, 主要从事天气预报与气象决策服务. Email: gx\_gaoan@sina.com

## 引言

华南暴雨主要发生在汛期(伍红雨等,2011),气象学者对华南暴雨的成因和机理进行了大量研究(罗建英等,2009;廖胜石等,2007;黄忠等,2008)。华南西部的暴雨,尤其是大暴雨,大多与西南低涡活动有关(彭本贤,1989)。低涡切变所造成的暴雨天气强度仅次于热带气旋(刘国忠等,2007),是预报关注的重点。低涡东南侧西南急流的加强,引起低层辐合,有利于低涡的发展和维持,为暴雨发生提供动力条件和水汽输送(何光碧等,2005;杨帅等,2006;傅慎明等,2010;王中等,2008;陈静等,2002),但是在无低空西南急流配合的弱环境风场条件下,华南西部也可以产生大范围的暴雨,甚至特大暴雨天气。高安宁等(2009)对 16 例在弱环境风场条件下的广西大范围暴雨过程进行了分析研究,指出在 5—9 月汛期期间,华南西部基本上处于高温、高湿的状态下,一旦具备一定的动力触发机制,即使在 850 hPa 无低空西南急流配合的弱环境风场条件下,依然可以产生大范围的暴雨,甚至特大暴雨天气。2009 年 7 月 2 日 20 时至 4 日 20 时(简称“09.7”过程)(北京时,下同)和 2008 年 6 月 15 日 20 时至 17 日 20 时(简称“08.6”过程),同样受低涡影响,前者 850 hPa 伴有西南急流,而后者则无西南急流配合,两次过程在暴雨强度和范围上均有明显的差异。本文试图基于这两个个例,对比分析不同环境风场条件下低涡暴雨的物理特征及其差异,以加深对类似暴雨过程的认识,提高预报能力。

## 1 两次暴雨过程概况

2009 年 7 月 2 日 20 时至 4 日 20 时,广西连续两天出现全区性的强降水,过程累计雨量大于 250 mm 的有 4 站,大于 100 mm 有 27 站(图 1a)。强降水时段为 2 日 20 时至 3 日 20 时,全区有大暴雨 13 站,暴雨 20 站,降水中心位于融安 263 mm。

2008 年 6 月 15 日 20 时至 17 日 20 时,广西北部出现较强降水,过程累计雨量大于 100 mm 的有 11 站,大于 50 mm 有 24 站(图 1b)。强降水时段为 15 日 20 时至 16 日 20 时,全区有大暴雨 5 站,暴雨 17 站,降水中心位于忻城 160 mm。

由此可见,“09.7”过程无论在降水强度还是降水范围都要比“08.6”过程大。

## 2 大尺度对比分析

### 2.1 高空槽发展演变的差异

“09.7”过程,2 日 20 时,500 hPa 亚洲中高纬为两槽一脊型,青藏高原中部和华东地区为低槽区(图 2a),3 日 08 时,青藏高原中部低槽东移南下,引导地面弱冷空气影响华南西部。同时,在槽前正涡度平流和暖平流作用下,在贵州西南部诱发了 850 hPa 西南低涡的发生发展。3 日 20 时,随着 500 hPa 小槽继续南压,850 hPa 西南低涡移入广西,为暴雨的产生和持续提供动力抬升条件。4 日 20 时,500 hPa 小槽移出广西,导致低涡环流减弱,暴雨过程结束。

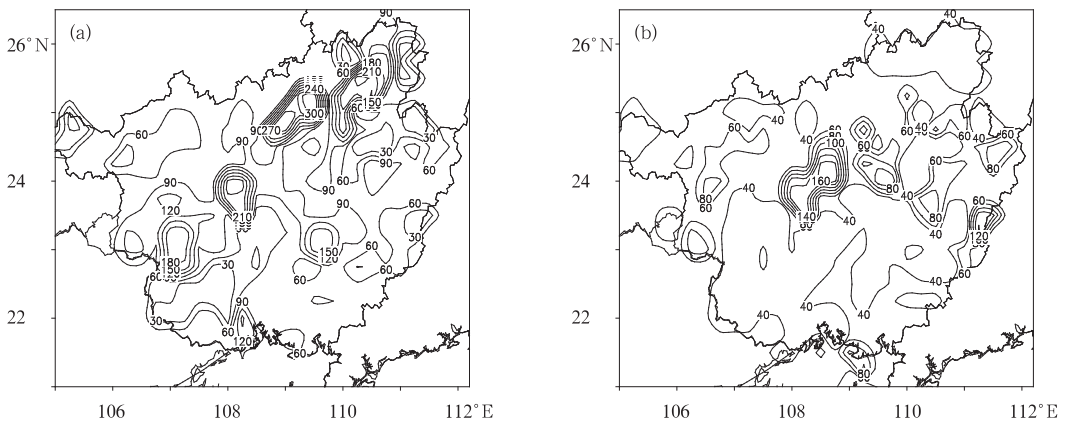


图 1 暴雨过程降雨量分布(单位: mm)

(a) 2009 年 7 月 2 日 20 时至 4 日 20 时, (b) 2008 年 6 月 15 日 20 时至 17 日 20 时

Fig. 1 Distributions of precipitation of the heavy rainfall (unit: mm)

(a) 20:00 BT 2 July to 20:00 BT 4 July 2009 and

(b) 20:00 BT 15 June to 20:00 BT 17 June 2008

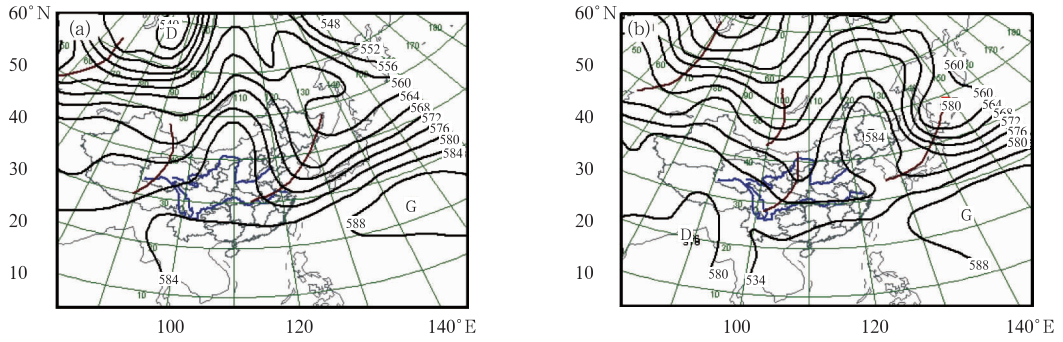


图 2 500 hPa 环流形势

(a)2009 年 7 月 2 日 20 时,(b)2008 年 6 月 15 日 20 时

Fig.2 Circulation situations at 500 hPa (unit: dagpm)

(a) 20:00 BT 2 July 2009, (b) 20:00 BT 15 June 2008

“08.6”过程,15日20时,500 hPa 在贝加尔湖和青藏高原东部各有一个低槽,形成阶梯槽形势(图 2b),随着高原槽的东移,槽后西北气流携带冷空气从贵州南下影响广西,在冷空气作用下,激活了对流云团的发展而产生暴雨。6日20时,低槽东移北收减弱,17日20时,低槽移出华南西部,广西上空转为偏北气流控制,暴雨过程结束。

### 2.2 副热带高压强度和位置差异

两次暴雨过程,副热带高压(简称副高)主体的位置差异不大,主要表现为 588 线副高位置均偏东,西脊点平均位于 130°E 附近(图 2a 和 2b)。整个南海的位势高度差别也不明显,均在 585~587 dagpm 之间。但从风场的分析中仍发现两次过程存在某些差异。“09.7”过程,2日20时,西沙吹偏西风,副高脊线位于 17°N 附近。到 3日08时转吹东南风,脊线向北抬了两个纬距,位于 19°N 附近,副高在暴雨

发生的过程中有一次加强北抬的现象;到 3日20时至 4日20时,由于高原有小槽东移南压,向华南西部输送冷平流,导致副高有所减弱南撤,西沙由东南风转吹西南风。而分析“08.6”过程发现,15日20时至 17日20时,西沙一直吹西南风,表明副高脊线比较稳定的维持在 17°N 附近,这是华南西部产生暴雨的有利位置。

### 2.3 低空西南急流差异

两次暴雨过程在爆发前,低空西南急流存在着明显的差异。“09.7”过程,3日08时,青藏高原东部有一小槽东移南下,引导地面冷空气影响华南西部,850 hPa 广西上空西南风加大,风速达 12 m·s<sup>-1</sup> 以上,伴有西南急流的出现(图 3a);而“08.6”过程,15日20时,850 hPa 由偏东风与西南风构成的暖式切变线位于广西中部,切变线南侧广西上空风速大部在 4~8 m·s<sup>-1</sup> 之间,并无西南急

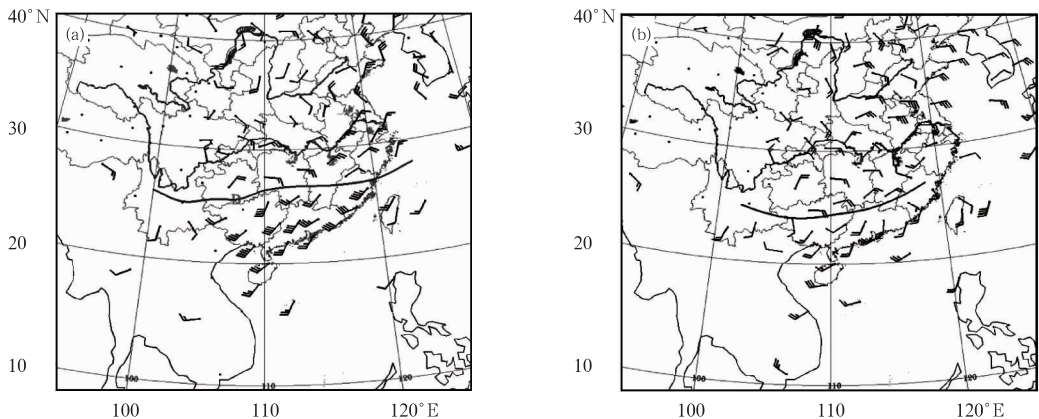


图 3 两次暴雨过程 850 hPa 风场特征

(a) 2009 年 7 月 3 日 08 时,(b) 2008 年 6 月 15 日 20 时

Fig.3 Wind fields at 850 hPa

(a) 08:00 BT 3 July 2009, (b) 20:00 BT 15 June 2008

流的出现(图 3b)。由此可见,“09.7”暴雨过程是广西低层 850 hPa 伴随有西南急流的强环境风场条件下产生的,而“08.6”暴雨过程是广西低层 850 hPa 处在弱环境风场条件下产生的。

### 3 中尺度雨团和对流云团特征

由上述分析可以清楚地看到:“09.7”暴雨过程是在有西南急流的强环境风场条件下产生的。而“08.6”暴雨过程是无西南急流伴随的弱环境风场条件下产生的。从两次暴雨过程的环境风场来看它们虽存在着较大差异,但都产生了暴雨,这与中尺度雨团和对流云团的发生、发展有密切的关系,下面我们在这方面做重点分析。

#### 3.1 中尺度雨团

雨团和强降水直接相关,这里中尺度雨团指的是降水率 $\geq 10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的雨区。利用逐小时广西自动站雨量详细分析这两次过程的中尺度雨团的空间分布及其活动特点。

分析“09.7”过程中尺度雨团活动特点发现:(1)2009年7月2日20时至4日20时,广西强降水有显著的中尺度特征,期间大约有14个中尺度雨团活动,其中1h降水量最大为100mm;(2)追踪这些中尺度雨团发现,它们随着850hPa切变线的南移而自北向南移动,此外,切变线上还有准静止的雨团活动;(3)暴雨期间,有3个由多个 $\beta$ 甚至 $\gamma$ 中尺度雨团构成的、呈东北—西南向的中尺度雨带,一类为移动性雨带,沿切变线移动,雨带生命史为6~9h;一类为准静止雨带,稳定维持在桂西,雨带生命史为6h。

分析“08.6”过程中尺度雨团活动特点发现:(1)2008年6月15日20时至17日20时,广西强降水期间大约有8个中尺度雨团活动,最大1h降水量为79mm;(2)雨团表现为稳定少动或随降水影响系统向东北移动。

为进一步了解强降水中心的雨强变化特征,对“09.7”过程暴雨中心融安和“08.6”过程暴雨中心忻城的逐小时雨量演变特征进行分析(图略),可以看到:(1)融安强降水主要集中在3日00—14时,有3次降雨峰,降水强度大,一般都达到 $30 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最大为 $38.1 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。(2)忻城强降水主要集中在15日20时至16日14时,有4次降雨峰,降水强度在 $15 \sim 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,最大有 $20.5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。(3)对比两次过程暴雨中心的降水分布,两个暴雨中心的降水均较集中,但“09.7”过程暴雨中心融安的降水强度比“08.6”过程暴雨中心忻城的要强。

#### 3.2 对流云团活动特征

利用FY-2C卫星逐时的 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的TBB资料,对暴雨中心的中尺度对流云团的活动特点进行分析。图4分别是“09.7”过程和“08.6”过程暴雨中心的TBB随时间变化的纬向剖面图,由图4a可见,“09.7”过程中,2日22时,柳州北部有对流云团生成发展,对应暴雨中心融安3日00—04时强降水,3日02时, $26^\circ \text{N}$ 黔桂交界有一对流云团生成发展,并逐渐南移扩大,3日05时,与其南部对流云团相接后,在暴雨中心西南部上空发展,给融安带来数小时强降水,值得指出的是强降水并没有发生在TBB的中心位置,而是在TBB的梯度最大处。同样,由图4b可见,“08.6”过程中,15日20时,在桂西由低涡激发的对流云团逐渐发展,并随低涡东

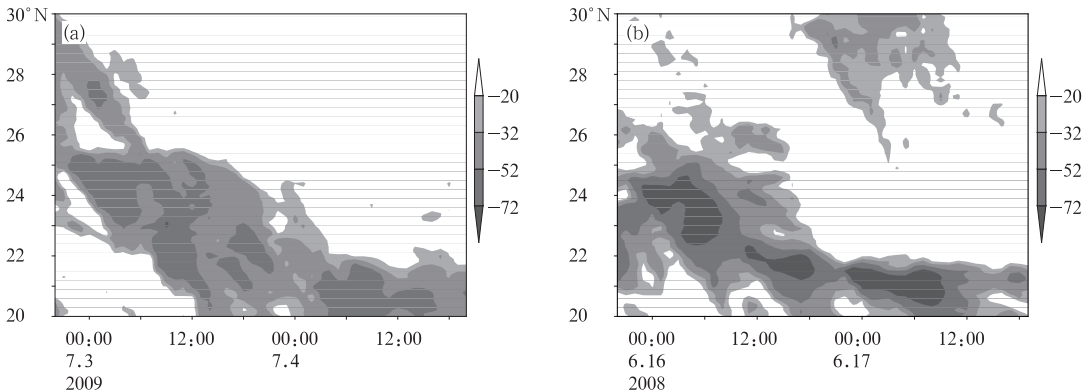


图 4 沿暴雨中心的 TBB 随时间-纬度的分布(单位:  $^\circ \text{C}$ )

(a) “09.7”过程, (b) “08.6”过程

Fig. 4 Time-latitude cross sections of the TBB along the rainstorm center (unit:  $^\circ \text{C}$ ) for the July 2009 process (a), and the June 2008 process (b)

移,16日01时,云团发展最强,TBB值在 $-72^{\circ}\text{C}$ 以下,位于广西中西部,随后对流云团继续东移,范围扩大,16日16时,强对流云团主要位于桂东,忻城16日08时强降水发生在对流云团中心处,降雨峰值也发生在TBB的梯度大值处。

## 4 中尺度系统触发条件

### 4.1 地面中尺度辐合线

地面风场辐合线可能对中尺度系统的触发和维持起到了重要的作用(夏茹娣等,2008),而中尺度辐合可能在对流系统的连续发展过程中有更加直接的触发作用(张晓美等,2009)。风速辐合对触发暴雨

的产生效果十分明显,它有可能激发出 $\beta$ 中尺度强降雨团。通过对10 m风场分析可以看到,“09.7”过程中,7月3日02时,桂西北有一中尺度气旋环流,气旋东部为东北与偏南风构成的辐合线,3日08时(图5a),辐合线一直维持在广西北部,期间,中尺度对流云团源源不断地在辐合线上生成发展,这个时段亦对应着广西北部的强降水。“08.6”过程中,6月16日02时(图5b),桂西南出现一中尺度气旋环流,其北部为东北与偏东风构成的辐合线,辐合线上不断有中尺度对流云团的生成发展,02—08时,强降水发生在辐合线附近,16日08时,辐合线明显南压移出广西,强降水减弱。可见,在这两次强降水过程中,中尺度辐合线可能在强降水过程中起着直接的触发作用。

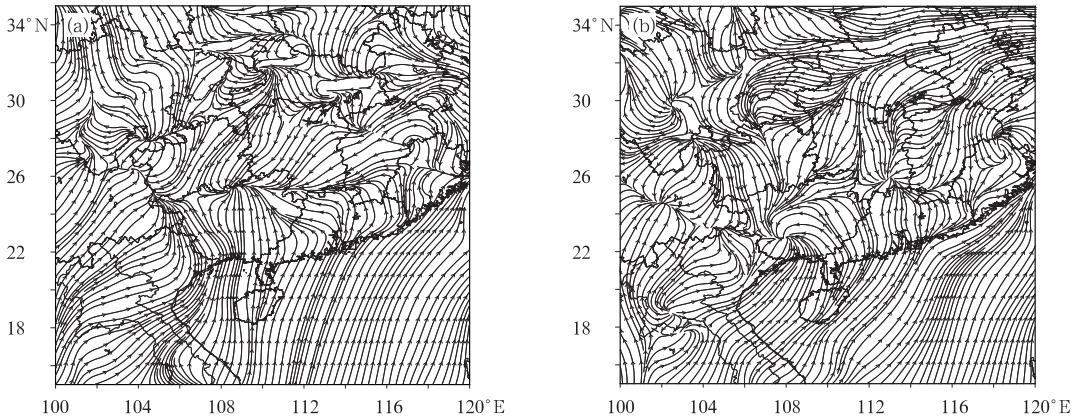


图5 地面10 m流场

(a)7月3日08时,(b)6月16日02时

Fig. 5 The flow fields of 10 m above the ground at 08:00 BT 3 July 2009 (a) and at 02:00 BT 16 June 2008 (b)

### 4.2 850 hPa 低涡

“09.7”过程,2日20时,850 hPa 滇黔桂交界处有低涡生成并伴有东北气流与西南气流的切变线,在低涡东部切变线附近出现强降水,3日08时,低涡东移(图3a),位于黔桂交界,强降水仍主要出现在桂北,3日20时,低涡维持,切变西段有所南压,强降水主要位于桂西。4日20时,低涡环流减弱,暴雨过程结束。“08.6”过程,15日20时,850 hPa 由偏东风与西南风构成的暖式切变线位于广西中部(图3b),主要辐合区位于桂西北,桂西北出现强降水。16日08时,850 hPa 在广西西北部有一低涡生成,低涡东部出现较强降水,16日20时低涡东移至广西中部,低涡东部辐合较大处出现了较强局地降水。17日20时,850 hPa 低涡减弱、消亡,降水随之结束。可见,

850 hPa 低涡切变是两次暴雨过程的直接影响系统。

为什么在弱的环境风条件下同样可以形成低涡,引发暴雨,驱动对流发展的机制是什么?它和强环境风条件下形成低涡和暴雨在形成机理上有什么差别?针对这一问题,作者普查了1998—2008年5—9月发生在华南西部的169例暴雨过程,其中在弱环境风场条件下产生的暴雨有16例,约占暴雨过程总数的10%。从天气尺度对比分析发现,弱环境风场条件引发暴雨,驱动对流发展的机制与强环境风场条件下基本相同,主要影响系统是:高原槽或华北槽在东移南下的过程中发展加深,槽前正涡度平流的作用,引起低层减压,导致华南西部850 hPa流场发生变化,诱发低涡、切变、气旋性拐点等中尺度系统的发生发展,为暴雨的产生提供动力触发机制。但从温度、湿度和风等要素场上分析却发现,它们之

间存在的最大差别表现在 16 例弱环境风场产生的暴雨均发生在垂直风切变较小的环境场中。由表 1 可见,16 例弱环境风场产生的暴雨,有 9 例为西南低涡,7 例为切变线。无论是西南低涡,还是切变线,在暴雨发生前的区域上空,垂直风切变均较小,绝大部分暴雨发生在垂直风切变( $u_{200} - u_{850}$ ) $\leq 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的环境条件下。此外,华南地处热带低纬度南临海洋,汛期 850 hPa 平均比湿在  $12 \sim 15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间,水汽充沛,大气常处在高温高湿不稳定状态。在弱环境风场条件下垂直风切变小,第二类条件不稳定(conditional instability of the second kind, CISK)机制可能是诱发低涡形成,引发暴雨,驱动对流发展的重要机制之一。这主要是通过边界层辐合或水汽向上输送的作用,使得水汽凝结潜热释放,高空增暖和质量流出,地面气压下降,辐合增

强,如此循环,有利于低涡的形成,驱动对流云团的发生发展而引发暴雨。倪允琪等(2006)在我国南方暴雨的试验与研究中指出,在华南梅雨锋上 MCS 中心上空风的垂直切变小,有利于热量和水汽的积聚,使扰动的温度和湿度可以大大超过周围环境值。这也证明华南 MCS 在对流层上层具有热带中尺度环流特征。侯建忠等(2005)对青藏高原东北侧发生的一次中尺度对流复合体(MCC)研究表明,风垂直切变相对较小,有利于 MCC 的发展。高安宁等(2009)在分析 2006 年 6 月 6 日 20 时至 7 日 20 时在弱环境风场条件下华南西部一次大范围暴雨过程中,结合卫星云图分析对流云团的发展和 TBB 的变化,也进一步证实了在有利于降水的环流背景下,垂直风切变小时,有利于低涡系统的形成,导致中尺度对流云团的强烈发展。

表 1 1998—2008 年 5—9 月 16 例弱环境风场条件下广西暴雨个例一览表  
Table 1 The 16 cases of heavy rains occurring in the weak environmental wind fields in Guangxi during May to September from 1998 to 2008

弱环境风场条件下暴雨个例		影响系统		
日期 (20 时—20 时)	暴雨站数	500 hPa	850 hPa	暴雨区域垂直风切变 ( $u_{200} - u_{850}$ )/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1998.05.22—23	30	高原槽	西南低涡	4~8
1998.06.08—09	12	高原槽	西南低涡	6~8
1999.07.11—12	20	高原槽	西南低涡	2~6
2001.05.24—25	21	华北槽+南支槽	切变线	4~8
2001.08.01—02	21	华北槽	切变线	6~8
2002.06.01—02	23	华北槽	西南低涡	6~8
2003.05.23—24	16	华北槽	切变线	4~8
2004.05.30—31	20	华北槽	西南低涡	4~8
2004.06.15—16	14	高原槽	西南低涡	2~4
2005.06.04—05	17	河套槽	切变线	4~6
2005.06.06—07	14	河套槽	西南低涡	2~4
2006.06.06—07	16	高原槽	西南低涡	2~4
2007.05.11—12	14	华北槽	切变线	4~6
2007.08.12—13	13	华北槽	切变线	4~8
2007.09.02—03	13	华北槽	切变线	2~5
2008.06.15—16	22	高原槽	西南低涡	8~10

## 5 暴雨系统的特征对比

为研究“09.7”、“08.6”两次低涡过程的结构特点,选取强降水期间典型的暴雨区域,由于暴雨区略有摆动,对“09.7”过程,3 和 4 日暴雨区分别取为  $24^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$ 、 $109^{\circ} \sim 111^{\circ} \text{E}$ 、 $22^{\circ} \sim 24^{\circ} \text{N}$ 、 $107^{\circ} \sim 109^{\circ} \text{E}$ ;对“08.6”过程,16 和 17 日暴雨区分别取为  $23^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ 、 $108^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ 、 $23^{\circ} \sim 25^{\circ} \text{N}$ 、 $110^{\circ} \sim 112^{\circ} \text{E}$ 。下面对所选取的区域进行平均,并计算一日 4 次平均的物理量垂直分布,对比分析两次低涡暴雨系统的差异。

### 5.1 散度、垂直速度

从“09.7”、“08.6”两次过程的暴雨区的散度及垂直速度的垂直分布图(图略)上可见,“09.7”过程,3 日,在暴雨区对流层中低层辐合、高层辐散,1000~800 hPa 附近为一强的辐合中心,强度达到  $-4.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,400~150 hPa 附近为一辐散中心,强度较低层辐合小;4 日,暴雨区上空低层辐合中心值减小,仅为  $-2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,相应降水强度较 3 日减弱。“08.6”过程,16 日,暴雨区在 1000~850 hPa 附近为辐合中心,900 hPa 附近为辐合大值中心,值

为  $-2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 300~100 hPa 为辐散中心, 高层辐散要大于低层辐合; 17 日, 暴雨区上空亦为低层辐合、高层辐散, 但强度均较 16 日偏弱。

“09.7”过程, 3 日, 暴雨区整个对流层均为强盛的垂直上升运动, 800~400 hPa 为峰值区, 最大值为  $-63 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ , 如此强而深厚的上升运动, 是导致 3 日强降水的主要原因; 4 日, 对流层低层到 300 hPa 为上升运动, 大值区主要位于 850~650 hPa, 最大值为  $-50 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。“08.6”过程, 16 日, 暴雨区整个对流层均为强盛的上升运动, 峰值位于 400 hPa, 值为  $-53 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 17 日整个对流层基本维持上升运动, 但峰值出现高度下降至 700 hPa, 强度明显减小, 仅为  $-25 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ , 并且随高度上升, 垂直速度迅速减弱。

从上面分析可以看到, “09.7”过程相比“08.6”过程强度大, 维持时间长。“08.6”过程西南低空急流并不出现在广西境内, 低层辐合强度及上升运动强度也明显不及“09.7”过程。

### 5.2 水汽输送

分析“09.7”、“08.6”暴雨区的东、西、南、北边界的水汽输送(表 2), “09.7”过程南边界为强的水汽输入, 北边界为弱水汽输出, 西边界为弱水汽输入, 东边界为水汽输出, 东边界水汽输出要比西边界水汽输入要大, 水汽的纬向净输送为负, 因此, “09.7”暴雨区主要以水汽的经向输送为主, 同时可以看到, 3 日的水汽净输送比 4 日的大。“08.6”过程, 16 日水汽的经向和纬向输送均为正, 但仍主要以经向输

送为主, 17 日, 水汽经向和纬向输送相当, 均为正, 净流值为  $38.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

从上面分析可以看到, “09.7”过程中, 3 日暴雨区的水汽净输送要比 4 日的大, 而“08.6”过程中, 16 日暴雨区的水汽净输送要比 17 日的大, 分别对应着 3 和 16 日的降水强度较大。同时可以看出, 相比“08.6”, “09.7”净流入明显要大, 这是西南低空急流将充足水汽往暴雨区输送的结果。

表 2 “09.7”、“08.6”暴雨区域不同边界上整层垂直积分的水汽水平输送(单位:  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )

Table 2 The entire vertically integrated horizontal transport of water vapor at different boundary layer of the storm area of the July 2009 process and the June 2008 process respectively (unit:  $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ )

过程	时间	南边界	北边界	西边界	东边界	净流
“09.7”	3 日	121.4	12.6	19.7	34.6	93.8
	4 日	104.8	5.6	1.5	34.5	66.2
“08.6”	16 日	56.3	-0.1	-6.1	-14.6	64.9
	17 日	19.5	3.9	19.4	-3.6	38.5

注: 南、北边界表示水汽的经向输送, 东、西边界表示水汽的纬向输送; 计算中先对水汽通量进行整层积分, 然后分别对暴雨区域东、西、南、北边界求和。

### 5.3 垂直螺旋度

垂直螺旋度是垂直涡度和垂直速度的乘积, 它在一定程度上不仅能反映系统的维持状态, 还能反映系统发展、天气现象的剧烈程度。垂直螺旋度对暴雨是个相关性较强的参数, 作为一种动力触发机制, 其量值大小、分布特征的变化对天气系统的移动、发展及暴雨的落区、强度有很好的指示意义(尤红等, 2007; 章征茂等, 2008)。

图 6 分别给出了两次过程沿暴雨中心的垂直螺

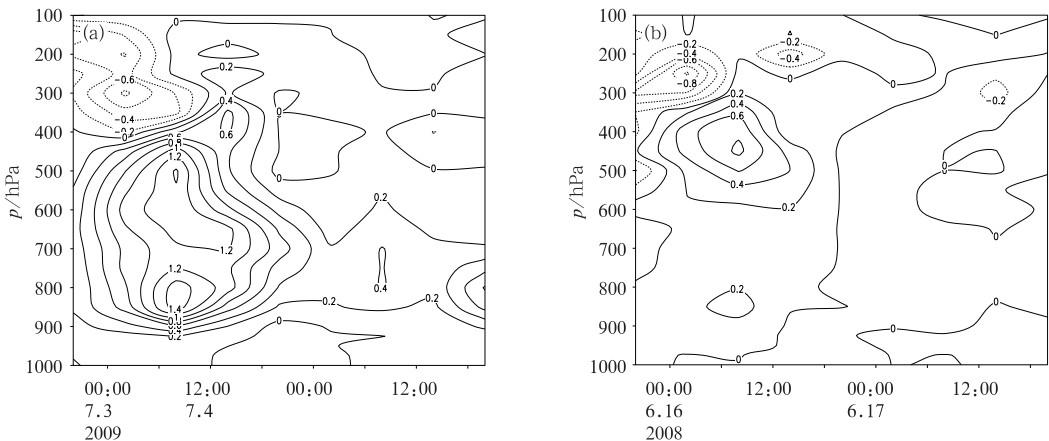


图 6 暴雨中心垂直螺旋度的时空剖面(单位:  $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ )  
(a) “09.7”过程, (b) “08.6”过程

Fig. 6 Pressure-time sections of the vertical helicity of the rainstorm center (unit:  $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) in (a) the July 2009 process, and (b) the June 2008 process

旋度时空分布特征。由图 6a 可见:“09.7”过程,2 日 20 时至 3 日 14 时为正螺旋度大值区,呈柱状分布,大值中心出现在 3 日 08 时附近,螺旋度强中心值为  $1.4 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,分别位于 500 和 800 hPa 附近,对应暴雨中心强降水时段,强降水时段与螺旋度强中心分布时段一致,3 日 14 时后,螺旋度明显减弱,对应融安站降水减弱。而图 6b 显示:“08.6”过程,15 日 20 时至 16 日 14 时为正螺旋度大值时段,大值中心出现在 16 日 08 时附近,螺旋度中心值为  $0.8 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ,位于 450 hPa 附近,15 日 20 时至 16 日 14 时正是忻城暴雨中心的主要降雨时段,3 日 14 时后,螺旋度值趋于 0,对应忻城站降水基本结束。

由此可见,伴随有低空急流的“09.7”过程的垂直螺旋度明显强于无低空急流的“08.6”过程。“09.7”过程的暴雨强度也比“08.6”过程强。

#### 5.4 温度平流

“09.7”过程,沿暴雨中心  $110^\circ\text{E}$  作温度平流垂直剖面图(图 7a),2 日 20 时, $26^\circ \sim 28^\circ\text{N}$  近地面层为冷平流,高层为暖平流, $26^\circ\text{N}$  以南整层均为暖平

流,3 日 02 时, $26^\circ\text{N}$  以南中低层暖平流加大,在  $25.5^\circ\text{N}$  附近冷暖气团交界面上形成倾斜的等温度平流密集带,对应暴雨中心强降水开始,3 日 08 时,冷空气沿着近地面向南推进,暖湿空气沿着等温度平流密集带爬升,暖平流强度继续增大,低层冷空气在这一过程中表现为“冷垫”的作用,此时对应暴雨中心降水峰值。3 日 14 时,冷空气侵入到  $24^\circ\text{N}$ ,等温度平流密集带南移,此时暴雨中心降水开始减弱,4 日 02 时,暴雨中心上空均为暖平流。

“08.6”过程,沿暴雨中心  $109^\circ\text{E}$  作温度平流垂直剖面图(图 7b),15 日 20 时, $24^\circ\text{N}$  以北近地面层为冷平流,以南为弱的暖平流区,16 日 08 时,冷空气南下侵入,暖平流强度有所加大,冷暖空气在  $24^\circ\text{N}$  附近交汇,对应暴雨中心强降水,16 日 20 时,冷空气继续南下,暴雨中心上空均为冷平流,等温度平流密集带南移至  $22^\circ \sim 23^\circ\text{N}$  之间,暴雨中心降水减弱消失。

“09.7”过程较“08.6”过程,暖平流强度明显偏强,等温度平流线也较密集,对应着“09.7”过程暴雨中心较强的降水。

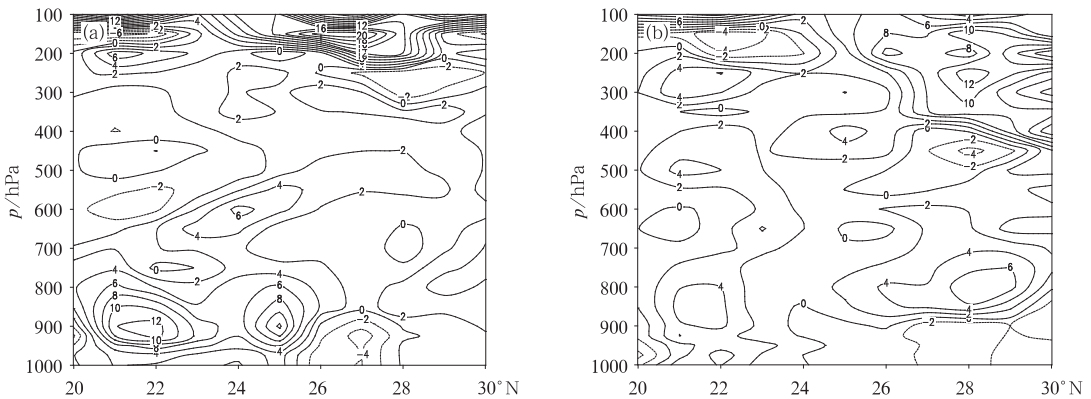


图 7 两次暴雨过程温度平流垂直剖面(单位:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) 2009 年 7 月 3 日 08 时, (b) 2008 年 6 月 16 日 08 时

Fig. 7 Profiles of temperature advection (unit:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at

(a) 08:00 BT 3 July 2009, and (b) 08:00 BT 16 June 2008

#### 5.5 垂直环流

分析“09.7”和“08.6”两次暴雨过程  $105^\circ \sim 112^\circ\text{E}$  区域内的平均全风速纬度高度剖面和经向垂直环流演变图(图略)可知:“09.7”过程:3 日 02 时,低空急流轴位于  $24^\circ\text{N}$  附近,风速大值中心位于 800 hPa 高度上,高空西风急流轴位于  $35^\circ\text{N}$  附近 200 hPa 高度上,东风急流轴位于  $13^\circ\text{N}$  附近 150 hPa 高度上,低空急流北侧有强上升运动,气流

上升至 250 hPa 高度,在  $22^\circ\text{N}$  附近下沉,向北回流形成垂直环流圈。3 日 14 时,低空急流和高空西风急流略向北推进,东风急流无明显移动。4 日 02 时,低空急流偏东,平均全风速大值区偏南,强度减弱, $20^\circ \sim 25^\circ\text{N}$  中高层出现明显偏北风,与低层偏南气流在  $21^\circ \sim 23^\circ\text{N}$  交汇,上升运动区南压,位于  $21^\circ \sim 24^\circ\text{N}$ ,气流上升至 200 hPa,在  $18^\circ\text{N}$  附近有弱下沉气流。4 日 14 时,高空东风急流南退至  $5^\circ\text{N}$ ,强度明显减弱,西风急流北撤至  $43^\circ\text{N}$ ,环流圈消失。



“08.6”过程:16日02时,低空急流轴位于 $18^{\circ}\text{N}$ 附近,风速大值中心位于850 hPa高度上,高空西风急流轴位于 $33^{\circ}\text{N}$ 附近200 hPa高度上,东风急流轴位于 $3^{\circ}\text{N}$ 附近150 hPa高度上, $21^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 有强盛垂直上升运动,气流上升至200 hPa,在 $19^{\circ}\text{N}$ 附近下沉,形成垂直环流圈。17日02时,高空西风急流和东风急流位置、强度基本维持,垂直上升运动强度明显减弱,环流圈高度位于500 hPa以下。17日14时,环流圈基本消失,低空无急流,高空东风急流、西风急流稳定少动,其中西风急流值减小。

由上分析可见,“09.7”、“08.6”两次暴雨过程均与高空西风急流南侧的垂直环流圈密切相关,“09.7”过程由于低空有急流存在,上升运动维持时间长,降水强度大,历时长。“08.6”过程广西境内低空无急流,上升运动维持时间短,降水强度偏弱,历时短。相比“08.6”,“09.7”过程与高空东、西风急流活动关系密切,暴雨发生期间,高空东风急流北进,西风急流南压;高空西风急流北撤,东风急流南退后,过程趋于结束。

## 6 结论

通过对两次不同环境风场条件下华南西部低涡暴雨过程的对比分析,得出如下结论:

(1)“09.7”过程,广西强降水有显著的中尺度特征,期间大约有14个中尺度雨团活动,沿850 hPa切变线自北向南移动,此外,切变线上还有准静止的雨团活动;“08.6”过程,广西强降水期间大约有8个中尺度雨团活动,雨团表现为稳定少动或随降水影响系统向东北移动。

(2)两次暴雨过程明显处在不同的环境风场条件下。“09.7”过程伴随着强盛西南低空急流;而“08.6”过程无低空急流配合。但两次暴雨过程的触发机制基本相同,地面中尺度辐合线和850 hPa低涡对暴雨的产生起到重要的触发作用。弱环境风场条件下风垂直切变小,CISK第二类条件不稳定是诱发低涡形成,驱动对流发展,引发暴雨的重要机制。

(3)“09.7”过程的低层辐合强度及上升运动强度明显强于“08.6”过程。两个过程的垂直螺旋度的大小及变化均能很好地反映降水的强度及变化,“09.7”过程的垂直螺旋度的强度明显较“08.6”过程强,对应的暴雨中心降水也强。

(4)“09.7”过程中,3日暴雨区的水汽净输送要

比4日的大,而“08.6”过程中,16日暴雨区的水汽净输送要比17日的大,分别对应着3和16日的降水强度较大。同时可以看出,相比“08.6”,“09.7”水汽净流入明显要大,这是西南低空急流将充足水汽往暴雨区输送的结果。

(5)“09.7”、“08.6”两次暴雨过程均与高空西风急流南侧的垂直环流圈密切相关,“09.7”过程由于低空有急流存在,上升运动维持时间长,降水强度大,历时长,“08.6”过程广西境内低空无急流,上升运动维持时间短,降水强度偏弱,历时短。

## 参考文献

- 陈静,李川,谌贵. 2002. 低空急流在四川“9.18”大暴雨中的触发作用. 气象,28(8):24-29.
- 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. 大气科学,34(2):235-252.
- 高安宁,李生艳,陈见,等. 2009. 弱环境风场条件下华南西部大范围暴雨特征分析. 热带气象学报,25(增刊):9-17.
- 何光碧,陈静,李川,等. 2005. 低涡与急流对“04.9”川东暴雨影响的分析与数值模拟. 高原气象,24(6):1012-1023.
- 黄忠,吴乃庚,冯业荣,等. 2008. 2007年6月粤东持续性暴雨的成因分析. 气象,33(4):53-60.
- 侯建忠,孙伟,杜继稳. 2005. 青藏高原东北侧一次MCC的环境流场及动力分析. 高原气象,24(5):805-810.
- 廖胜石,罗建英,蔡芴宁. 2007. “05.6”华南致洪暴雨过程中FY2C卫星TBB场分析. 气象,33(1):81-86.
- 刘国忠,丁治英,贾显锋,等. 2007. 影响华南地区西南低涡及致洪低涡活动的统计研究. 气象,33(1):45-50.
- 罗建英,廖胜石,黄归兰,等. 2009. 广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析. 气象,35(10):50-57.
- 倪允琪,周秀曦,张人禾,等. 2006. 我国南方暴雨的试验与研究. 应用气象学报,17(6):690-704.
- 彭本贤. 1989. 西南低涡与广西暴雨. 广西气象,10(3):2-4.
- 王中,白莹莹,杜钦,等. 2008. 一次无地面冷空气触发的西南涡特大暴雨分析. 气象,34(12):63-71.
- 伍红雨,杜尧东,秦鹏. 2011. 华南暴雨的气候特征及变化. 气象,37(10):1262-1269.
- 夏茹娣,赵思雄. 2008. 2005年6月广东锋前暖区暴雨 $\beta$ 中尺度系统特征的诊断与模拟研究. 大气科学,33(3):468-488.
- 杨帅,丁治英,徐海明. 2006. 梅雨暴雨中高低空急流与西南涡的活动. 南京气象学院学报,29(1):122-128.
- 尤红,姜丽萍,彭端,等. 2007. 2005年6月广东特大暴雨垂直螺旋度分析. 气象,33(4):71-76.
- 张晓美,蒙伟光,张艳霞,等. 2009. 华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析. 热带气象学报,25(5):551-560.
- 章征茂,沈桐立,马月枝,等. 2008. “05.8”十堰大暴雨的数值模拟与诊断分析. 暴雨灾害,27(1):24-31.