

# 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析

顾清源<sup>1,2</sup> 周春花<sup>1</sup> 青 泉<sup>1</sup> 张 驹<sup>3</sup>

(1. 四川省气象台, 成都 610072; 2. 成都高原气象研究所; 3. 四川省德阳市气象局)

**提 要:** 针对西南低涡诱发的 2007 年 7 月 9 日川南特大暴雨个例, 采用 Barnes 带通滤波和非平衡动力强迫的中尺度特征分析方法, 对特大暴雨过程中西南低涡内的中尺度系统活动特征进行分析。结果得出: 特大暴雨过程中西南低涡内存在着一个向西南倾斜的、深厚的中- $\beta$  尺度低涡, 具有低层辐合、高层辐散的暴雨典型垂直结构。在特大暴雨天气过程中对流层中低层中尺度辐合和高层中尺度辐散呈现出一种先逐渐加强然后逐渐减弱的演变规律, 并且特大暴雨区逐渐向中尺度低涡中心靠近。在特大暴雨发生的初始阶段, 西南低涡内的大气运动已处于较强的非平衡状态, 且越临近特大暴雨发生, 低层  $U < 0$  的非平衡性越强, 促进了西南低涡内中- $\beta$  尺度低涡的发展, 而在特大暴雨最强时刻, 大气运动即由  $U < 0$  的非平衡态转为  $U \approx 0$  的准平衡态。

**关键词:** 特大暴雨 西南低涡 非平衡强迫 中尺度系统

## Mesoscale Characteristics Analysis of Severe Torrential Rain Caused by a Southwestern Low Vortex Process

Gu Qingyuan<sup>1,2</sup> Zhou Chunhua<sup>1</sup> Qing Quan<sup>1</sup> Zhang Ju<sup>3</sup>

(1. Sichuan Provincial Meteorological Observatory, 610072; 2. Chengdu Institute of Plateau Meteorology;  
3. Deyang Meteorological Office, Sichuan Province)

**Abstract:** By using Barnes band-pass filter and meso-scale characteristic analysis method of unbalance dynamical forcing, the activity features of a Southwestern Vortex (SWV) producing severe torrential rain on 9 Sept. 2007 in Sichuan were discussed. The case study not only enables us to know that in SWV there might be a deep mid- $\beta$  scale vortex with its axes westerly declining but also shows that SWV had a typical vertical structure of heavy rain, namely, it has strong convergence in the lower level and divergence in the upper, and this kind of structure enhanced till to its top stage before wearing off. During this period, the rain area tended to approach to the center of SWV. In the point of air unbalance and at the early stage of this heavy rain process, the air had

been in relatively unbalanced state. This unbalance in lower level became stronger and stronger as time goes, which was favorable for development of the mid- $\beta$  vortex. While heavy rain was at its largest stage, the air had changed from unbalanced state ( $U < 0$ ) into quasi-balanced state,  $U \approx 0$ .

**Key Words:** torrential rain    southwestern vortex    unbalance forcing    mesoscale system

## 引 言

2007年7月8日03时到10日08时(北京时间,下同)的53个小时内,四川盆地南部发生了一次特大暴雨天气过程(以下简称“07-7-9”川南特大暴雨),特大暴雨区域主要位于四川盆地南部(28.84~29.45°N、105.05~105.4°E)的1300km<sup>2</sup>范围内,有44个站(包括区域气象观测站,下同,见图1)的降雨量超过100mm,有14个站的降雨量超过250mm。特大暴雨中心位于内江市的隆昌县,36小时累计降雨量达到378.5mm,隆昌县最大1小时降雨量67mm,最大3小时降雨量179mm,隆昌县胡家镇累计降雨量达到435mm。通过对“07-7-9”川南特大暴雨天气过程中中尺度雨团<sup>[12-13]</sup>活动的分析发现,在长生命史、稳定少动的西南低涡形成的特大暴雨区内,存在多个中尺度雨团活动,中尺度雨团活动有沿基本气流移动和逆基本气流移动的两种移动方式,也有呈气旋性的旋转扩大后又呈气旋性旋转缩小的现象发生。特大暴雨是由多个中尺度雨团相继影响造成的,每个中尺度雨团在特大暴雨区形成一个相对集中的强降雨时段,在每个强降雨时段内又存在着两个或多个短时强降水峰值,表现出明显的中尺度特征,在2007年7月9日4时27分25秒川南特大暴雨区内宜宾雷达探测到的径向速度垂直剖面图(图2)上,反映出西南低涡暴雨具有中- $\beta$ 尺度的“低层辐合、高层辐散”的垂直结构。与之相对应的卫星云图上,在长生命史的、稳定的西南低涡内存在4个MCS对流云团的连续生消,4个MCS云团冷云中心都呈圆形或椭圆形,且移

动十分缓慢,主要表现为云团范围的扩大和缩小,强降水均集中于云团中心,且每次强降水均持续了3~4小时,MCS云团强盛阶段冷云中心TBB值低于80℃,发展极强盛,TBB峰值和降水峰值有较好的一一对应关系。在特大暴雨区对流层中低层850hPa、700hPa、500hPa层上存在一个深厚的、长生命史的、稳定少动的西南低涡,正涡度区深厚,在特大暴雨区对流层高层则为强大的南亚高压控制,高层负涡度出流宽广,并且在特大暴雨期间存在低层辐合高层辐散的大暴雨典型结构(图略)。有关西南低涡诱发大暴雨天气的研究已相当广泛<sup>[1-6]</sup>,陈忠明等<sup>[7-9]</sup>对于这类西南低涡发展到强盛阶段的结构特征利用中尺度滤波方法进行了分析,分析结果表明:西南低涡是一个十分深厚的系统,其正涡度可以伸展到100hPa以上,低涡中心轴线近于垂直,流场和高度场表现为贯穿对流层的中尺度气旋和低压,是一个准圆形而非对称的中尺度系统,陈忠明<sup>[10]</sup>利用散度方程,从动力学上研究了中尺度强暴雨系统高低层散度演化,揭示了系统发展强盛期高层辐散大于低层辐合的物理机制。杨帅等<sup>[11]</sup>对三维散度场与降水的关系进行了诊断分析,发现三维散度场能较好地诊断降水。孙健康等<sup>[14]</sup>对一次大暴雨过程进行分析,发现深厚的上升气流和有利的散度场分布有利于正涡度增长和中小尺度天气系统的形成和发展,为强降水形成提供了有利的动力条件。“07-7-9”川南特大暴雨天气过程是由位于(27~34°N、100~108°E)范围内的一个次天气尺度的西南低涡产生的。本文针对“07-7-9”川南特大暴雨个例,着重分析了西南低涡诱发特大暴雨的中尺度散度特征。

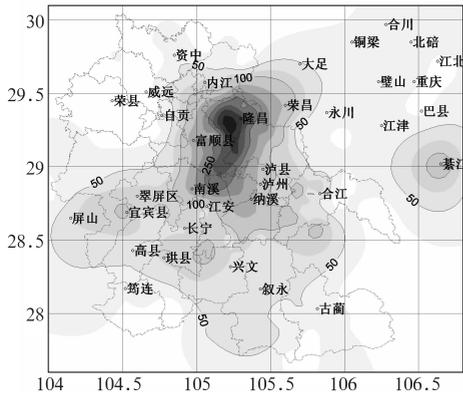


图 1 2007 年 7 月 8 日 20 时至 10 日 08 时川南特大暴雨过程雨量图(单位:mm)

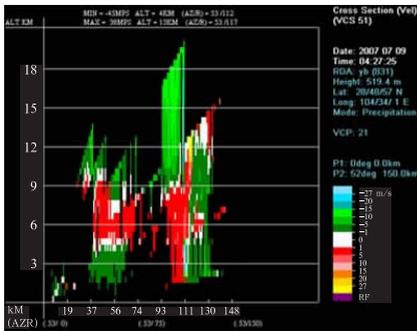


图 2 宜宾站 2007 年 7 月 9 日 04 时 27 分沿 52°方位角的径向速度垂直剖面图

## 1 中尺度系统滤波分析

从上面的分析发现,这次过程存在着明显的中尺度特征,本文以 T213 模式的实时分析资料为样本,对“07-7-9”川南特大暴雨天气过程进行滤波,分析此次暴雨产生的中尺度系统的活动情况。

### 1.1 中尺度系统滤波方法

利用 T213 模式分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  经纬度的实时分析资料,采用 Barnes<sup>[16]</sup>带通滤波方法进行中尺度分离,对每个原始网格点  $F_0(i, j)$  过滤原始资料,即

$$F_0(i, j) = \sum_{n=1}^N W_n F_n(i, j) \left[ \sum_{n=1}^N W_n \right]^{-1} \quad (1)$$

式中  $W_n(i, j) = \exp\left(-\frac{r_n^2}{4Gc}\right)$  为距离权重系数,

$F_n(i, j)$  是  $F_0(i, j)$  周围的原始格点值,  $N$  是  $F_0(i, j)$  周围的格点数,本研究取  $F_0(i, j)$  周围的 8 个格点,然后使用式(2)对其进行订正

$$F_1(i, j) = F_0(i, j) + \sum_{n=1}^N W'_n D_n(i, j) \left[ \sum_{n=1}^N W'_n \right]^{-1} \quad (2)$$

$D_n(i, j) = F_n(i, j) - F_0(i, j)$  为余差,  $W'_n(i, j) = \exp\left(-\frac{r_n^2}{4Gc}\right)$  为修正的距离权重系数。最后得到中尺度带通滤波场

$$B(i, j) = F_n(i, j) - F_1(i, j) \quad (3)$$

其中  $c = 150000, G = 0.3, \lambda = 800\text{km}, R = 0.10$ 。

### 1.2 中尺度系统滤波分析

暴雨是不同天气尺度相互作用的结果,在大尺度环流背景条件下,中小尺度系统的活动是导致暴雨的关键。为了较完整的诊断“07-7-9”川南特大暴雨天气过程中中尺度系统结构特征及其演变规律,我们运用上述方法对特大暴雨临近阶段(8日20时)、加强阶段(9日08时)、强盛阶段(9日20时)的 700hPa、500hPa、300hPa、100hPa 流场分别进行了滤波分析。

#### 1.2.1 临近阶段中尺度特征分析

对“07-7-9”川南特大暴雨天气过程的临近阶段滤波分析发现,700hPa 层上,在西南低涡内存在着一个中- $\beta$  尺度低涡,中心位于  $30.4^\circ\text{N}, 105.2^\circ\text{E}$ , 控制范围为  $30 \sim 31^\circ\text{N}, 103.5 \sim 106.5^\circ\text{E}$ , 形成了散度为  $-1.5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  的中尺度辐合(见表 1), 特大暴雨中心位于中尺度低涡中心的西南方向约 80km 处。与此同时,在 700hPa 西南低涡上空的 500hPa 和 300hPa 层上,也分别存在着中尺度低涡,中心分别位于  $29.8^\circ\text{N}, 104.5^\circ\text{E}$  和  $29.3^\circ\text{N}, 104.2^\circ\text{E}$ , 中尺度低涡控制范围分别为  $29 \sim 30.5^\circ\text{N}, 103.5 \sim 106^\circ\text{E}$  和  $28.8^\circ \sim 30^\circ\text{N}, 103 \sim 105.5^\circ\text{E}$ , 特大暴雨中心分别位于低涡中心东南方向的 50km 和 100km 处。在对流层高层的 100hPa 层上,700hPa 西南

低涡上空存在着一个中尺度辐散区域,辐散中心位于  $30.2^{\circ}\text{N}$ 、 $103.5^{\circ}\text{E}$ 。在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程的临近阶段,西南低涡内存在着一个中尺度低涡,随着高度的上升,中尺度低涡中心位置逐渐向西南方向倾

斜,并且在  $300\text{hPa}$  上仍表现为中尺度低涡,是一个向西南倾斜的深厚系统。中尺度低涡的形成先于特大暴雨出现,未来的特大暴雨中心位于临近阶段的中尺度低涡东南方向  $50\sim 100\text{km}$  范围内。

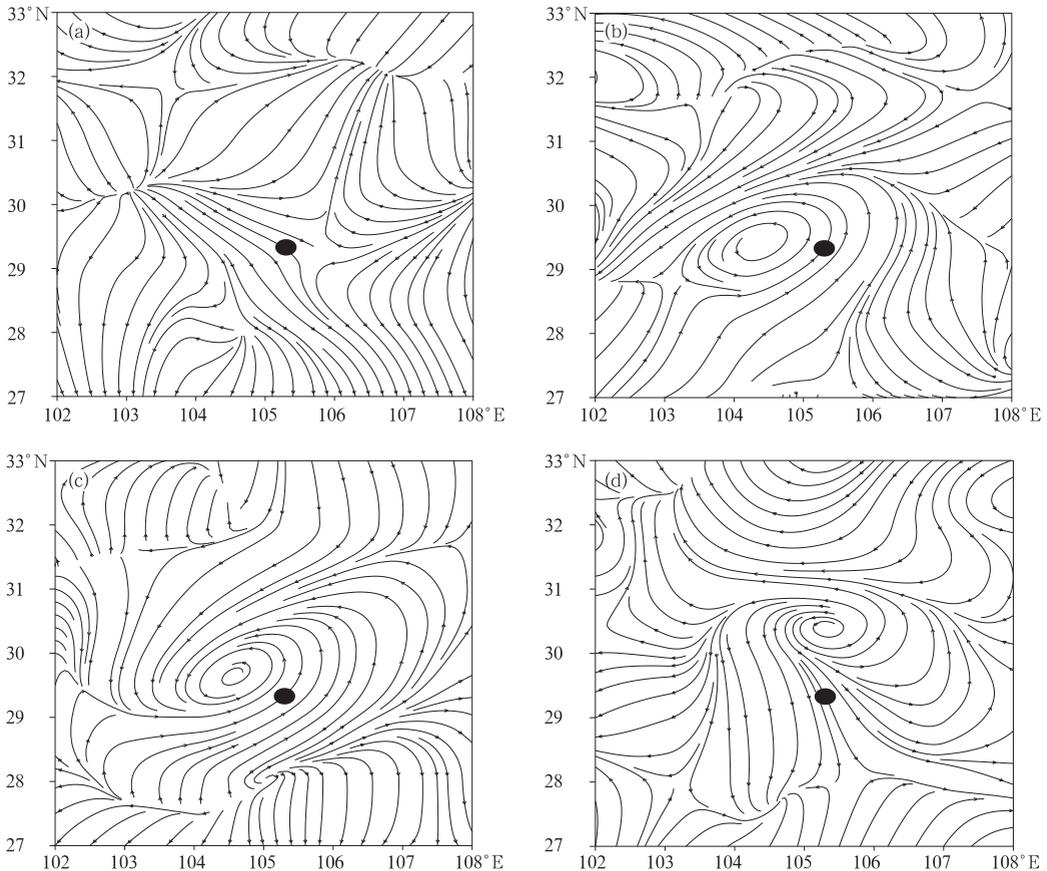


图 3 2007 年 7 月 8 日 20 时滤波后的流场  
(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 黑色圆点为标注的特大暴雨中心  $29.339^{\circ}\text{N}$ 、 $105.222^{\circ}\text{E}$ )  
a.  $100\text{hPa}$ , b.  $300\text{hPa}$ , c.  $500\text{hPa}$ , d.  $700\text{hPa}$

### 1.2.2 加强阶段中尺度特征分析

在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程的加强阶段(图 4),在  $700\text{hPa}$  层上西南低涡内同样存在着一个中尺度低涡,中尺度低涡中心位于  $29.5^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\text{E}$ ,控制范围为  $29\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $104.5\sim 106.5^{\circ}\text{E}$ ,形成了散度为  $-3.4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的中尺度辐合(表 1),比特大暴雨天气过程临近阶段明显加强,特大暴雨中心位于中尺度低涡中心的西南方向约  $30\text{km}$  处。与此同时,在  $700\text{hPa}$  西南低涡上空的  $500\text{hPa}$  和

$300\text{hPa}$  层上,也分别存在着中尺度低涡,中心分别位于  $29^{\circ}\text{N}$ 、 $104.8^{\circ}\text{E}$  和  $28.8^{\circ}\text{N}$ 、 $103.8^{\circ}\text{E}$ ,控制范围分别为  $28.5\sim 30^{\circ}\text{N}$ 、 $103\sim 106^{\circ}\text{E}$  和  $28\sim 29.5^{\circ}\text{N}$ 、 $102.5\sim 105.5^{\circ}\text{E}$ ,中尺度低涡在特大暴雨中心形成了散度为  $-1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的中尺度辐合,特大暴雨中心分别位于低涡中心东南方向的  $50\text{km}$  和  $150\text{km}$  处。在对流层高层的  $100\text{hPa}$  层上, $700\text{hPa}$  西南低涡上空也存在着一个中尺度辐散区域,辐散中心位于  $30.2^{\circ}\text{N}$ 、 $103.8^{\circ}\text{E}$ ,在特大暴雨中心形成了散

度为  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的中尺度辐散。与“07-7-9”川南特大暴雨天气过程的临近阶段比较，西南低涡内的中尺度低涡仍然是一个向西南倾斜的深厚系统，所不同的是在特大暴雨天气过程开始时，深厚的中尺度低涡整体南压，

700hPa 和 500hPa 层上的中尺度强辐合进一步加强，对流层高层的中尺度辐散更加明显，具有对流层“低层辐合、高层辐散”的暴雨典型垂直结构，暴雨区向中尺度低涡中心逼近。

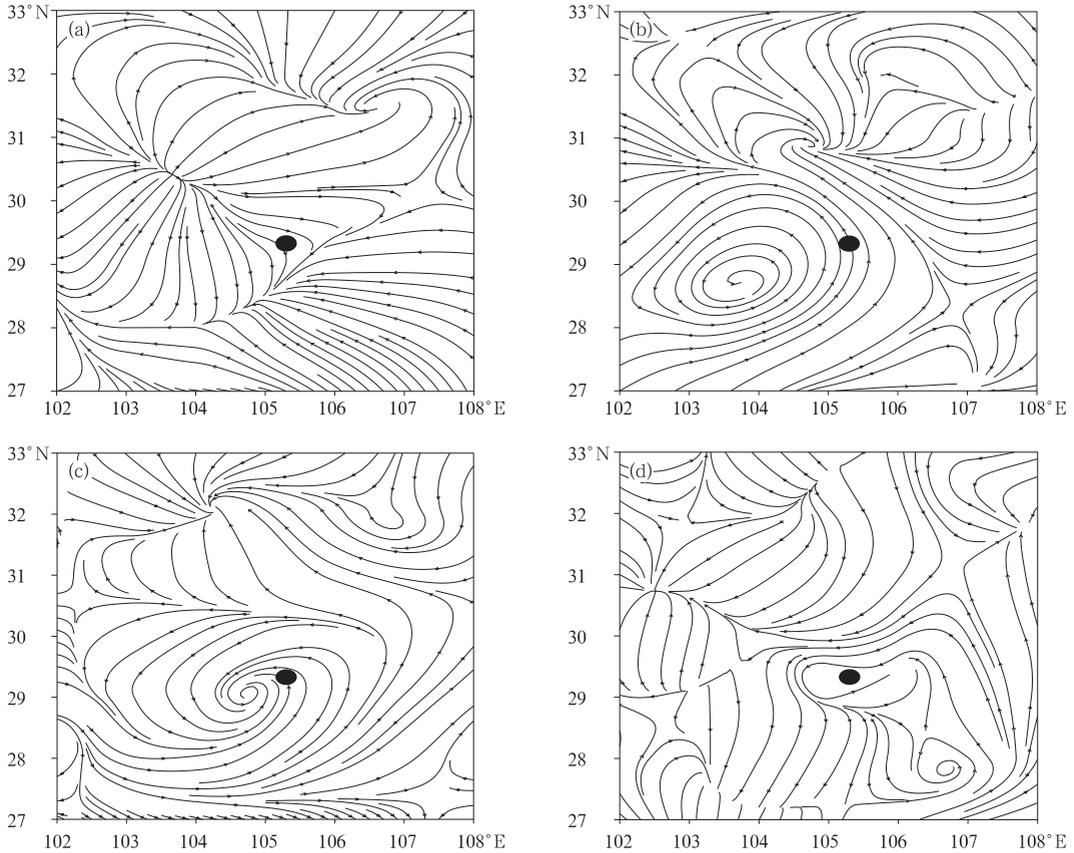


图 4 2007 年 7 月 9 日 08 时滤波后的流场  
(单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，黑色圆点为标注的特大暴雨中心  $29.339^\circ\text{N}, 105.222^\circ\text{E}$ )  
a. 100hPa, b. 300hPa, c. 500hPa, d. 700hPa

### 1.2.3 强盛阶段中尺度特征分析

在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程的强盛阶段(见图 5)，700hPa 层上，西南低涡内的中尺度低涡仍然存在，中尺度低涡中心位于  $29.5^\circ\text{N}, 104.5^\circ\text{E}$ ，控制范围为  $28.5 \sim 30^\circ\text{N}, 103.5 \sim 106.5^\circ\text{E}$ ，中尺度辐合比特大暴雨天气过程开始阶段有所减弱，但仍然较强，散度为  $-2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (见表 1)，特大暴雨中心位于中尺度低涡中心的正东方向 50km 处。与

此同时，在 700hPa 西南低涡上空的 500hPa 和 300hPa 层上也有中尺度低涡存在，中心分别位于  $29.5^\circ\text{N}, 104.5^\circ\text{E}$  和  $29^\circ\text{N}, 104.5^\circ\text{E}$ ，控制范围分别为  $28 \sim 31^\circ\text{N}, 103 \sim 106^\circ\text{E}$  和  $28 \sim 29.5^\circ\text{N}, 103 \sim 106^\circ\text{E}$ ，特大暴雨中心分别位于低涡中心的正东方向 50km 和东北方向 50km 处。在对流层高层的 100hPa 层上，700hPa 西南低涡上空存在着一条南北向的辐散带，辐散中心位于  $28.8 \sim 30.5^\circ\text{N}$ 、

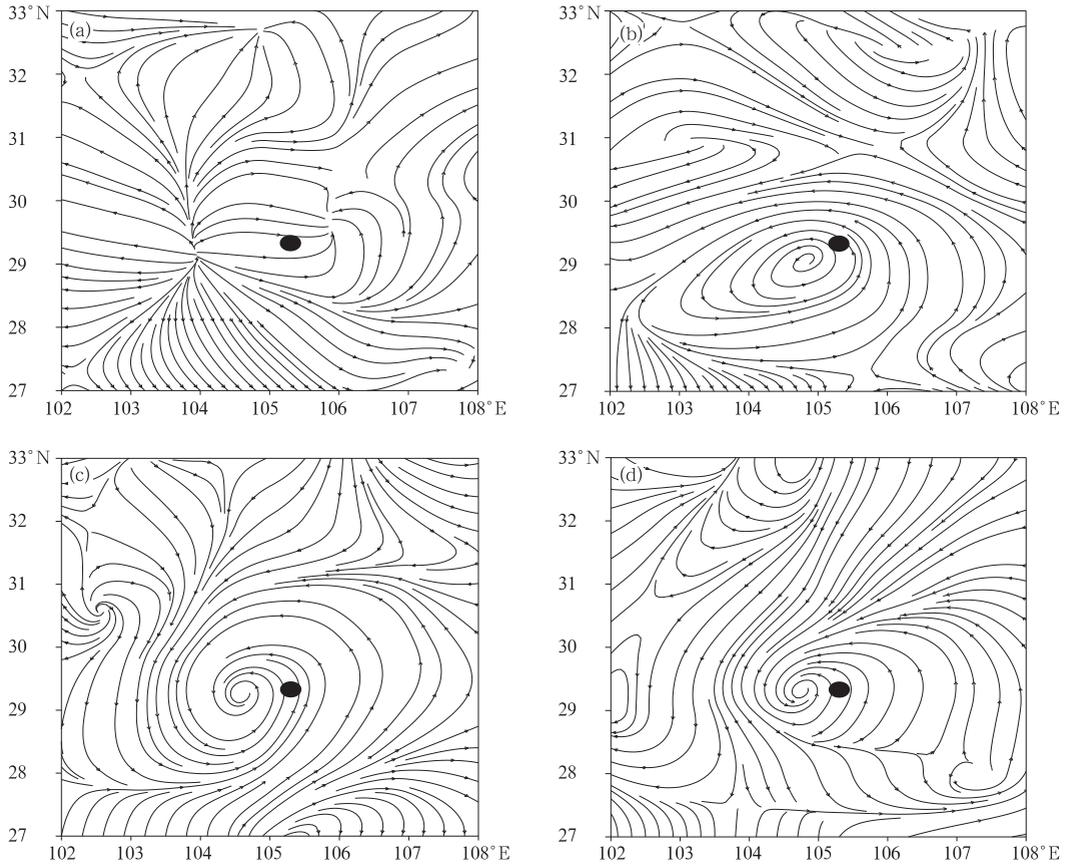


图 5 2007 年 7 月 9 日 20 时滤波后的流场  
(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 黑色圆点为暴雨中心  $29.339^\circ\text{N}$ 、 $105.222^\circ\text{E}$ )  
a. 100hPa, b. 300hPa, c. 500hPa, d. 700hPa

表 1 暴雨中心 ( $29.339^\circ\text{N}$ 、 $105.222^\circ\text{E}$ ) 滤波后散度 (单位  $10^{-5} \text{s}^{-2}$ )

	700hPa	500hPa	300hPa	200hPa	100hPa
8 日 20 时	-1.5	0	2.5	0	4.5
9 日 08 时	-3.4	-1.5	-1.5	1	0
9 日 20 时	-2.0	-1	-6	0	0.5

$103.8^\circ\text{E}$ 。与上述两个阶段分析比较发现,在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程的强盛阶段西南低涡内的中尺度低涡还是一个向西南倾斜的深厚系统,“低层辐合、高层辐散”的特大暴雨典型垂直结构十分清晰,并且特大暴雨中心进一步向中尺度低涡中心靠近。

综上所述,“07-7-9”川南特大暴雨天气过程是由西南低涡产生的,在西南低涡内存在着一个中- $\beta$  尺度低涡,这个中- $\beta$  尺度低涡是一个向西南倾斜的深厚系统,具有对流层“低层辐合、高层辐散”的特大暴雨典型垂

直结构,并且中尺度低涡的形成先于特大暴雨出现,在特大暴雨天气过程中对流层中层中尺度辐合和高层中尺度辐散呈现出一种先逐渐加强然后逐渐减弱的演变规律(见表 1),特大暴雨中心位于中尺度低涡东南方向 50km 到 100km 范围内,并逐渐向中尺度低涡中心靠近。

## 2 中尺度非平衡特征

西南低涡内的中尺度低涡长时间维持是

“07-7-9”川南特大暴雨天气过程产生的关键,是什么机制使中尺度场长时间维持呢?为此我们做了中尺度非平衡特征分析。文献[4]在研究尺度为数百千米的中尺度运动时,提出了诊断中尺度运动准平衡性质的物理量:

$$U = \frac{\partial D}{\partial t} = -\nabla^2(\phi + \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}}{2}) + \mathbf{k} \cdot [\nabla \times (f + \zeta)\mathbf{V}] \quad (4)$$

式中 $\phi$ 为位势,本文计算时使用向后差分的方法, $\Delta t$ 为12小时, $U$ 表示非平衡值,其余为惯用符号,当 $U \approx 0$ 时,大气运动处于准平衡状态,大气运动变化的速度比较缓慢,中尺度系统稳定少变;当 $U \neq 0$ 时,大气运动处于强烈的非平衡状态,大气运动变化的速度非常快(相比于准平衡状态下的变化),中尺度系统处于快速发展或减弱阶段。暴雨持续期间,大气运动处于强烈非平衡状态,在暴雨中心附近,中尺度非平衡强迫支撑着低层强辐合的维持,是暴雨持续的重要动力因子<sup>[3,15]</sup>。邹波等<sup>[8]</sup>通过对一次强烈发展的西南低涡过程进行诊断指出:大气低层的非平衡动力强迫通过激发气流辐合和正涡度增长,进而促进西南低涡的发展。在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程中,中尺度非平衡强迫对中尺度系统发展的作用也十分明显。

周围大气运动速度变化较快<sup>[3-4]</sup>,在对流层中低层, $U < 0$ ,有利于辐合发展,将促进气流辐合的持续增长;在对流层高层, $U > 0$ ,有利于对流层中低层辐合发展。我们选择700hPa和200hPa两层,分别计算了大暴雨发生临近阶段、开始阶段、强盛阶段的非平衡值(图6和表2),对“07-7-9”川南特大暴雨天气过程中中尺度非平衡强迫特征进行分析。

在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程临近阶段(8日20时),700hPa上,特大暴雨中心西南部存在着一个强度达 $-2.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ 的 $U$ 值负中心,特大暴雨中心位于该 $U$ 值中心的东北部, $U$ 值为 $-1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,有利于激

发特大暴雨中心附近对流层中低层辐合运动发展。而在对流层高层200hPa层上,特大暴雨中心北部存在着一个强度达 $6 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ 的 $U$ 值正中心,特大暴雨中心位于该 $U$ 值正中心的南部, $U$ 值为 $2.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,有利于激发特大暴雨区高层辐散运动发展,高层辐散的发展将带动低层辐合运动发展,形成上升运动。

在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程加强阶段(9日08时),在对流层高层200hPa层上,特大暴雨中心北部仍然存在着一个 $U$ 值正中心,强度达 $10 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,特大暴雨中心处于该 $U$ 值正中心的南部, $U$ 值为 $(6.0 \sim 0) \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,较特大暴雨天气过程临近阶段大气运动的非平衡特征更明显,激发特大暴雨区高层辐散运动强烈发展,诱发低层辐合运动发展。与此同时,在700hPa上,特大暴雨中心则位于 $U$ 值负中心的北部, $U$ 值负中心的绝对值较特大暴雨天气过程临近阶段进一步加大,达到了 $-3.8 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,特大暴雨区已经处于强烈的非平衡状态,大气非平衡动力强迫作用加强,促进低层辐合运动强烈发展。

在“07-7-9”川南特大暴雨天气过程强盛阶段(9日20时),700hPa上特大暴雨中心仍处于非平衡运动区, $U$ 值为 $-0.5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,非平衡动力还在激发辐合运动进一步发展,但特大暴雨区附近的 $U$ 值中心明显弱于上两个阶段,中心值只有 $-1 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ 。而200hPa上,中尺度非平衡特征较上两个阶段变化更大,特大暴雨区附近的 $U$ 值中心值只有 $2 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ ,暴雨中心 $U$ 值则为0,非平衡强迫的动力作用结束。此时暴雨云团附近环境大气运动已处于准平衡状态<sup>[3,5]</sup>,但低层气流辐合还将维持一定时间。

在暴雨发生的初始阶段,西南低涡内的大气运动已处于较强的非平衡状态,且越临近暴雨发生,低层 $U < 0$ 的非平衡性越强,而在暴雨最强时刻,大气运动即由 $U < 0$ 的非平衡态转为 $U \approx 0$ 的准平衡态。在“07-7-9”

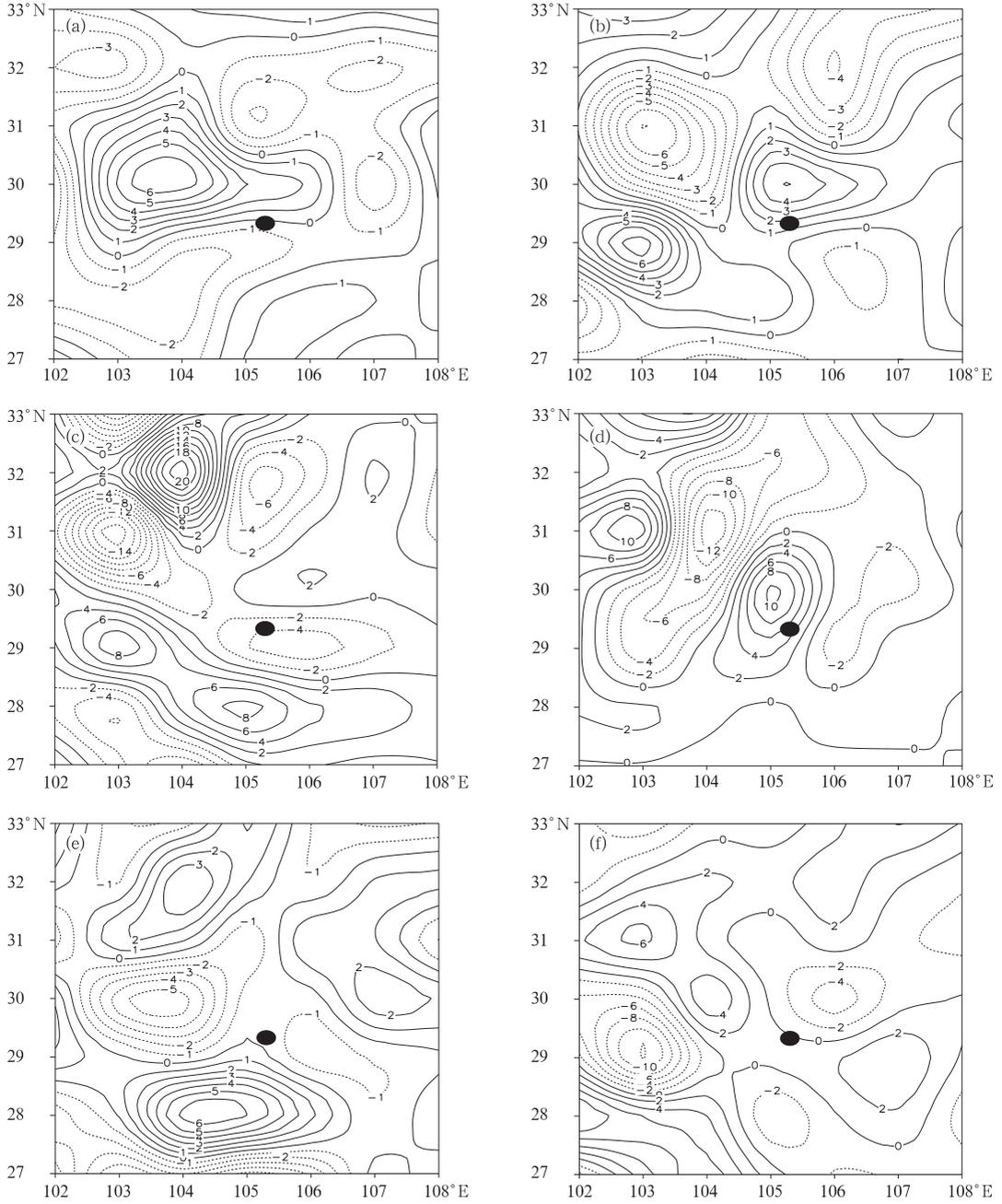


图 6 2007 年 7 月 8 日 20 时到 9 日 20 时的中尺度非平衡值分布图  
 单位:  $10^{-8} s^{-2}$ , 黑色圆点为暴雨中心(29.339°N、105.222°E) a. 8 日 20 时 700hPa, b. 8 日 20 时 200hPa,  
 c. 9 日 08 时 700hPa, d. 9 日 08 时 200hPa, e. 9 日 20 时 700hPa, f. 9 日 20 时 200hPa

表 2 暴雨中心(29.339°N、105.222°E)非平衡值(单位  $10^{-8} s^{-2}$ )

	700hPa	500hPa	300hPa	200hPa	100hPa
8 日 20 时	-1	0	-2	2	3
9 日 08 时	-3.8	-4	0	6	-1.2
9 日 20 时	-0.5	-1	-8.5	0	-4

川南特大暴雨天气过程中,西南低涡(27~34°N、100~108°E)内的中尺度非平衡特征也同西南低涡内中- $\beta$ 尺度低涡的演变一样,呈现出一种逐渐加强到逐渐减弱的演变规律,持续的非平衡振动激发低层辐合、高层辐散增长,形成强烈的上升运动,促进了西南低涡内中- $\beta$ 尺度低涡的发展,非平衡动力强迫作用是西南低涡内特大暴雨天气过程形成的关键。在本项研究中发现,特大暴雨区与反映大气运动中尺度非平衡状态的 $U$ 值中心非一一对应关系,图5所展示的在“07-7-9”川南特大暴雨外围还存在着另一个明显的 $U$ 值中心等,都与以往的研究存在一定差异,其机理有待进一步深入研究。

### 3 小结

通过对典型环流结构的西南低涡诱发“07-7-9”川南特大暴雨个例的中尺度散度场特征分析,我们得到以下结论。

(1) 在西南低涡内,存在着一个向西倾斜的、深厚的中- $\beta$ 尺度低涡,具有“低层强辐合、高层强辐散”的暴雨典型垂直结构,在暴雨天气过程中对流层中低层中尺度强辐合和高层中尺度辐散呈现出一种逐渐加强到逐渐减弱的演变规律,暴雨区逐渐向中尺度低涡中心靠近。

(2) 在暴雨发生的初始阶段,西南低涡内的大气运动已处于较强的非平衡状态,且越临近暴雨发生,低层 $U < 0$ 的非平衡性越强,而在暴雨最强时刻,大气运动即由 $U < 0$ 的非平衡态转为 $U \approx 0$ 的准平衡态,暴雨天气过程中

非平衡状态呈现出从逐渐加强到逐渐减弱的演变规律,持续的非平衡振动激发低层辐合、高层辐散增长,形成强烈的上升运动,促进了西南低涡内中- $\beta$ 尺度低涡的发展。

### 参考文献

- [1] 陈忠明, 闵文彬, 陈茂良. 大气运动非平衡强迫与“98·7”暴雨云团的中尺度特征[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 375-383.
- [2] 姚蓉, 黎祖贤, 叶成志, 等. 强热带风暴碧利斯特大暴雨山洪成因分析[J]. 气象, 2007, 33(8): 40-46.
- [3] 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[J]. 气象, 2007, 33(1): 45-50.
- [4] 陈忠明. 大气内部非平衡激发暴雨天气的动力诊断[J]. 科学通报, 1992, 37: 1432-1433.
- [5] 刘龙章, 周树华. 一次特大暴雨垂直速度场的计算与分析[J]. 气象, 2000, 26(7): 23-26.
- [6] 范俊红, 郭树军, 王世彬, 等. 一次秋季暴雨天气成因分析[J]. 气象, 2005, 31(9): 62-65.
- [7] 陈忠明, 缪强. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9: 273-282.
- [8] 邹波, 陈忠明. 一次西南低涡发生发展的中尺度诊断[J]. 高原气象, 2000, 19(2): 141-149.
- [9] 陈忠明, 缪强. 长江上游区域性暴雨发生前的中尺度特征[J]. 气象, 2000, 26(10): 15-18.
- [10] 陈忠明. 中尺度强暴雨系统高低层散度的非对称发展[J]. 高原气象, 2004, 23(增刊): 28-30.
- [11] 杨帅, 高守亭. 三维散度方程及其对暴雨系统的诊断分析[J]. 大气科学, 2007, 31(1): 167-179.
- [12] 寿绍文. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 177-180, 256-259, 350, 240.
- [13] 陆汉城, 杨国祥. 中尺度天气原理和预报北京[M]. 气象出版社, 2004: 170-172.
- [14] 孙健康, 武麦凤, 许伟峰. 高原东部一次大暴雨过程成因分析[J]. 陕西气象, 2007(1): 5-7.
- [15] 解明恩, 据建华, 卜玉康. 西南低涡 Ekman 层流场特征分析[J]. 高原气象, 1992, 11(1): 31-38.
- [16] 段旭, 李英, 许美玲, 等. 低纬高原地区中尺度天气分析与预报[M]. 北京: 气象出版社, 2004: 37-42.