

2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡 结构及其环境场的分析

赵思雄¹ 傅慎明^{1, 2}

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

摘 要 采用 NCEP 再分析资料、常规观测资料、卫星云图资料及地面降水资料, 对 2004 年 9 月 2 日~8 日发生在川东和重庆的大暴雨的影响系统及其环境场作了分析研究。结果表明, 此次暴雨分为三个阶段, 降水系统主要有两个: 第一、三阶段的主要降水系统是低空切变线; 第二阶段的主要降水系统是西南低涡, 而西南低涡影响期内的雨量最强、范围最大。西南低涡开始时为一 β 中尺度系统, 最后发展达 α 中尺度系统。其影响时间从 4 日 00 时到 6 日 06 时 (国际协调时), 持续了 54 小时。本文对此次暴雨过程所做的研究表明, 川东地区的特殊地形, 500 hPa 高空小槽以及 700 hPa、850 hPa 低层鞍型流场均是西南低涡产生和维持的重要条件; 西南低涡上层为暖性结构; 在暴雨过程中有 20 个雨团接连发生, 中尺度系统是这次暴雨的直接影响系统; 对水汽收支的计算表明, 水汽可能来自于低纬度热带地区。本文还对西南低涡与东北低涡的异同作了比较。

关键词 西南低涡 高空低槽 低空切变线 中尺度雨团 副热带高压

文章编号 1006-9895 (2007) 06-1059-17

中图分类号 P445

文献标识码 A

An Analysis on the Southwest Vortex and Its Environment Fields during Heavy Rainfall in Eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004

ZHAO Si-Xiong¹ and FU Shen-Ming^{1, 2}

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

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Based on the 6-hour-interval reanalysis data with $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ resolution from NCEP/NCAR, station observational data and so on, the environment fields and the influencing systems of the heavy rainfall during 2-8 September 2004 are analyzed. The results show that there are 3 stages during the heavy rainfall, and there exist two main rainy influencing systems in the first and third stages, the main rainy influencing system is the low level shear lines; in the second stage, the southwest vortex, which is the low pressure or vortex to the east of the Tibetan Plateau in the lower troposphere, is the main rainy influencing system, and in the second stage, both the precipitation and the range of rainfall reach the maxima. In earlier stage, the southwest vortex is a meso- β -scale system, then it develops, and its diameter reaches 200-500 km, which belongs to the meso- α -scale system. It appears at 0000 UTC 4 September and disappears at 0600 UTC 6 September. It lasts 54 hours.

In this paper, the heavy rainfall related to the southwest vortex is studied, and results indicate that the special terrain of eastern Sichuan, the trough at 500 hPa and the vortex at 700 hPa in the lower troposphere could be all favorable conditions contributing to the formation and maintenance of the southwest vortex; there are twenty rainy

clusters during the heavy rainfall; it implies that mesoscale system is the direct influencing system; the result of the moisture budget computation shows that the water vapor could come from the low-latitude tropical region.

Key words southwest vortex, upper level trough, low level shear line, mesoscale rainy cluster, subtropical high

1 引言

大气中的涡旋系统,主要是气旋性的涡旋(北半球为逆时针环流),诸如台风、季风低压、温带气旋,梅雨锋上的中尺度低压(扰动)、东北低涡等,常与降水天气甚至暴雨有密切的关系。对于这些系统,气象学者已有过一些研究^[1,2,5,11,15,19,21~27],但是对于另一类涡旋——通常发生于青藏高原东侧,即人们常称的西南低涡的研究尚不够深入。

西南低涡产生于我国的西南地区,它是一种对流层低层的中尺度涡旋系统,多见于 700 hPa、850 hPa 上,地面气压场有时可能但不一定是每次过程都出现闭合中心,其水平特征尺度一般为 200~500 km^[4,9]。已有的研究表明,西南低涡一年四季均有发生,但在夏季它是我国西南地区引发暴雨的天气系统之一,当它滞留原地时会引发川渝暴雨,而发展东移则可能会引起我国东部地区较大范围的降水。诸如:1935 年 7 月上旬,西南低涡东移、发展造成了长江流域“35.7”特大暴雨(又称五峰暴雨),引起了严重的灾害^[5];1963 年 8 月南下的冷空气与北上的西南低涡相互作用,于 8 月 4 日在邢台出现了日降水量达 865 mm 的“63.8”强暴雨,引发了大洪水^[5];再如,1981 年 7 月中旬,一个西南低涡发生、发展与长时间滞留导致四川盆地发生了百年不遇的“81.7”大洪水^[9];1998 年夏季我国长江流域出现的洪涝灾害也多与西南低涡的发生发展有密切的关联^[17,18]。

2004 年 9 月上旬,四川东部和重庆出现区域性暴雨和大暴雨天气过程,为 1981 年以来同期最强的一次。这次暴雨具有范围广、强度大、持续时间长等特点。暴雨始于 2004 年 9 月 2 日,3 日晚降雨系统由四川北部移入重庆。至 8 日过程全部结束。如图 1b 所示,这次暴雨过程雨量在 200 mm 以上的地区主要集中在四川的东北部和重庆,其中宣汉最高,降雨量为 419 mm;营山最低,降雨量也达 219 mm。从降水观测资料来看,特大暴雨由 3 个强降水时段构成,分别是:(1)9 月 2 日 06 时~4 日 00 时(国际协调时,下同),此时段主要受低空

切变线影响,3 日 18 时 700 hPa 上有 β 中尺度西南低涡的发生,降水主要集中在巴中市一带;(2)9 月 4 日 00 时~6 日 06 时,该时间段主要受西南低涡影响,降水主要集中于开县一带;(3)6 日 06 时以后,西南低涡消亡,此时段主要受低空切变线的影响,降水主要集中于忠县一带。应强调指出的是,此次暴雨过程中,第二阶段的降水直接由西南低涡造成,其降水无论强度和范围都大于第一和第三阶段,因此西南低涡应当是此次暴雨过程重点关注的系统。长期以来,我国的气象工作者对西南低涡做了一些总结和研究工作,取得了一些研究成果^[3~5,9,10,16~18,20]。有研究认为,青藏高原的特殊地形和一定的环流形势导致了西南低涡的形成^[9,20];还有研究表明^[20],西南低涡的形成与孟加拉湾的水汽输送密切相关。然而,由于我国青藏高原及其附近存在复杂的地形(见图 1a),以及资料的缺乏,对于西南低涡的一些问题至今还仍缺乏清楚的认识,因而很有必要作深入研究,这些问题涉及西南低涡的发生、发展、移动、消亡、结构、天气以及它的源地等,由于上述问题涉及面太宽,这里不可能一一讨论,本文只集中对 2004 年 9 月上旬(即“04.9”)暴雨过程中出现在川东和重庆地区的西南低涡的发生发展和维持特征作一研究。诸如,西南低涡发生发展不同阶段中的动力、热力因素的贡献如何?西南低涡中降水区的空间分布特征及其中尺度系统的作用?西南低涡的温度场和气压场的空间分布特征及其与温带气旋和热带系统的异同?处于内陆的川渝地区在这次西南低涡暴雨中,其水汽来源如何?期望能得到一些新的认识。

2 暴雨期的环流形势

西南低涡降水期间 500 hPa 环流形式大体如图 2 所示:中高纬度环流经向度较大,流场逐渐向“两槽一脊”型过渡:在乌拉尔山到里海为一深厚低压槽,贝加尔湖及其以西地区受高压控制,贝加尔湖以东到我国东北地区为一低压槽。这一稳定的“两槽一脊”环流型有利于冷空气向我国西南地区移动,为暴雨的发生提供了有利的环流条件。在图

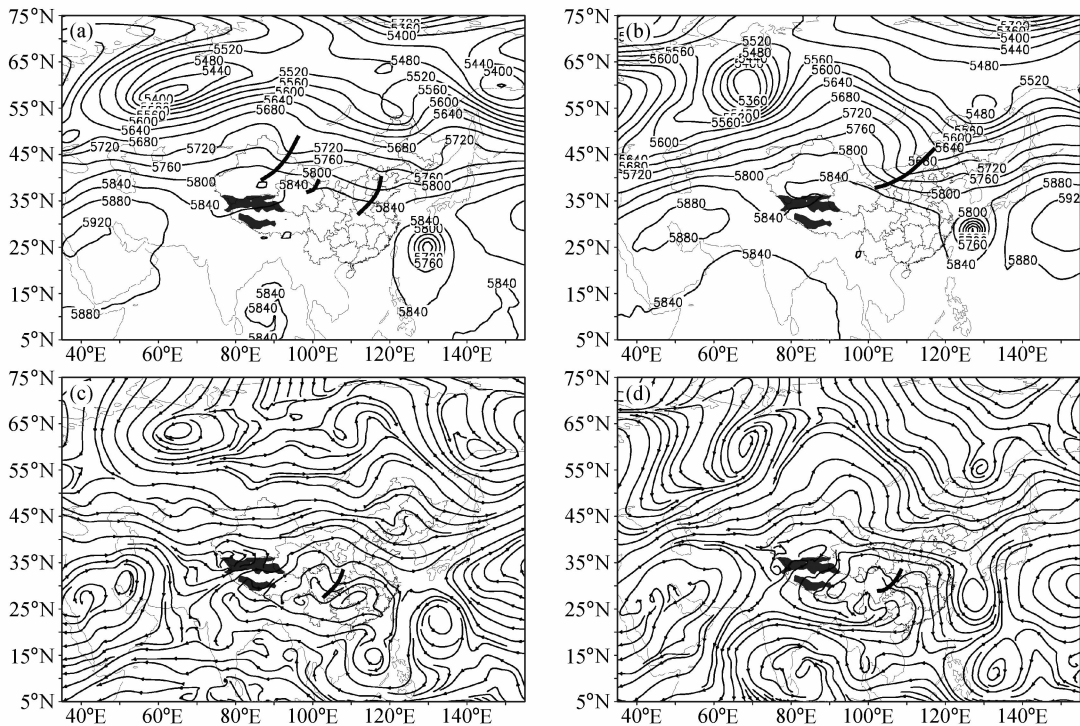


图 2 2004 年 9 月西南低涡降水期 500 hPa 位势高度场 (a、b, 单位: gpm) 和流场 (c、d): (a) 4 日 18 时; (b) 6 日 00 时; (c) 3 日 18 时; (d) 5 日 18 时。粗实线为槽线, 阴影区地形高度大于 5000 m

Fig. 2 The geopotential height (gpm) fields (a, b) and the stream line fields (c, d) at 500 hPa during southwest vortex precipitation in 2004: (a) 1800 UTC 4 Sep; (b) 0000 UTC 6 Sep; (c) 1800 UTC 3 Sep; (d) 1800 UTC 5 Sep. The thick solid lines represent trough lines, and the shaded areas are the terrains above 5000 m

2a, 乌拉尔山-巴尔喀什湖大槽不断分裂出小槽沿中纬度西风带东移, 尤其是不断有小槽 (如图 2c、d) 移至四川东北部, 小槽的槽线成东北-西南方向倾斜, 槽后脊前的偏北气流引导冷空气南下, 同时, 槽前的正涡度平流对低涡的维持亦很有帮助。暴雨过程中副热带高压稳定少动, 使我国西南地区上空的西风槽 (如图 2b) 东移速度减慢, 并与从上游快速不断移来的西风带小槽合并、增强, 这类移动缓慢的西风带小槽对西南低涡有十分重要的影响。当重庆和川东地区处于槽前时, 西南低涡维持, 即所谓的“北槽南涡”形势, 对西南低涡维持十分有利, 而当重庆和川东地区处于槽后时, 西南低涡减弱消亡。

3 降水过程综合分析

并非每次西南低涡都能引发较大的降水, 但是此次暴雨过程的确与西南低涡和切变线密切相关, 为此, 本节首先对这次降水过程做一分析。

3.1 9 月 1~8 日降水过程实况分析

由图 3a 可知, 9 月 1 日 00 时~2 日 00 时, 四

川境内的降水较弱, 雨区限于四川东北部。从 9 月 2 日开始, 降水逐渐加大。2 日 00 时~3 日 00 时在四川东北出现了一条西南-东北走向的降水带, 在四川东北部有一大于 50 mm 的强降水中心 (图 3b), 此降水带与低空流场的切变线相对应 (图略)。由图 3c 可以看到, 3 日 00 时~4 日 00 时, 该降水带大为增强, 并向东有所移动, 此时段主要的降水系统依然是切变线。在图 4 上, 3 日 18 时四川盆地北部 700 hPa 出现一个 β 中尺度西南低涡, 在此低涡东部有一降水中心。由图 5 a 可知, 低涡发生后, 巴中市的降水明显增加, 这再次表明该低涡出现后有利于降水增强。4 日 00 时~5 日 00 时, 西南低涡移至川东地区, 降水带也东移、南推, 在重庆北部出现了一个大于 100 mm 的强降水中心 (图 3d), 位于西南低涡移向右前方, 此时由于低空切变线减弱, 重庆以北降水减少。再由图 5a、b、c、e 可知, 在西南低涡出现以后 3 日 18 时~4 日 18 时, 受西南低涡影响的地区, 巴中 (西南低涡西北部)、达川 (西南低涡中北部) 以及开县和忠县

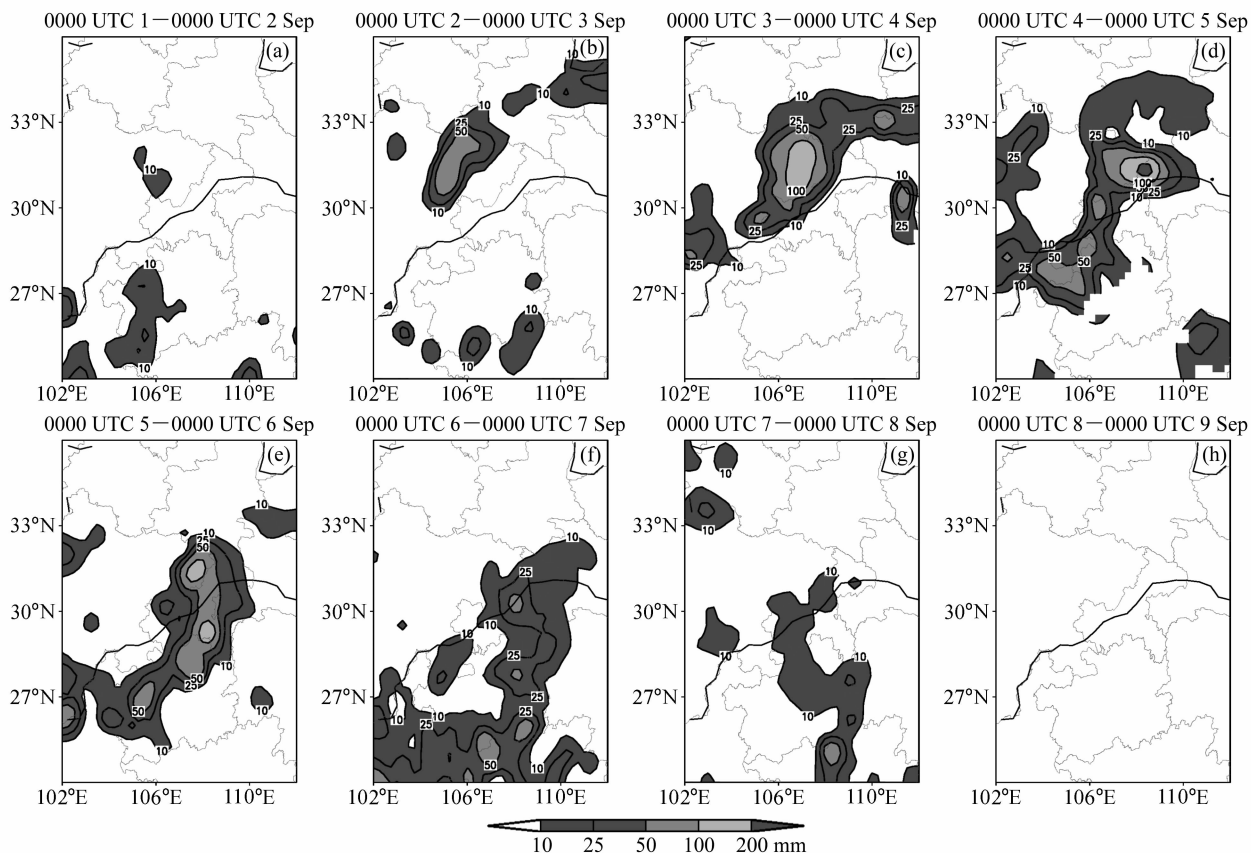


图3 2004年9月1~8日川东和重庆逐日24小时累计降水量

Fig. 3 The daily 24-hour accumulated precipitation (mm) in eastern Sichuan Province and Chongqing during 1–8 Sep 2004

(西南低涡东部)都出现了较强的降水,其中尤以开县为最大,其1小时最高降水量达48 mm。这表明,虽然西南低涡和低空切变线是这一降水期的主要降水系统,但西南低涡的出现大大增强了降水的强度。5日00时~6日00时,降水主要集中在重庆地区(图3e),相应于西南低涡东部,在重庆南北各有一个降水中心,其中北部的中心较强,超过了50 mm。可以注意到,此时随着低空切变线的减弱,西南低涡成为主要的降水系统。由图3f可知,6日00时~7日00时,西南低涡也减弱、并最后消亡,同时低空切变线也减弱、消失,相应的降水带减弱东移。重庆中部有一降水中心。由图3g看到,7日00时~8日00时,降水大大减弱只位于重庆的西南部,仅与850 hPa上该地区的弱的低空切变线相对应(图略)。8日00时后,四川和重庆的降水结束(图3h)。

综上所述,本次暴雨过程时间集中、强度较大,具有明显的中尺度特征。特别是在第二阶段的

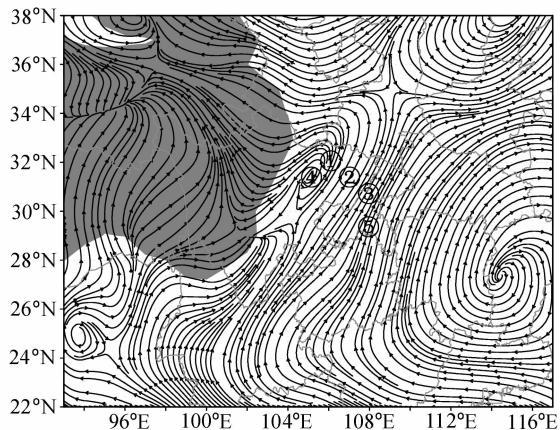


图4 9月3日18时西南低涡发生时700 hPa流场。阴影区地形高度大于3000 m

Fig. 4 The stream field at 700 hPa at 1800 UTC 3 Sep when the southwest vortex occurs. The shaded areas are the terrains above 3000 m

降水过程中,由于西南低涡稳定少动并长时间维持,对于强暴雨的出现十分有利。

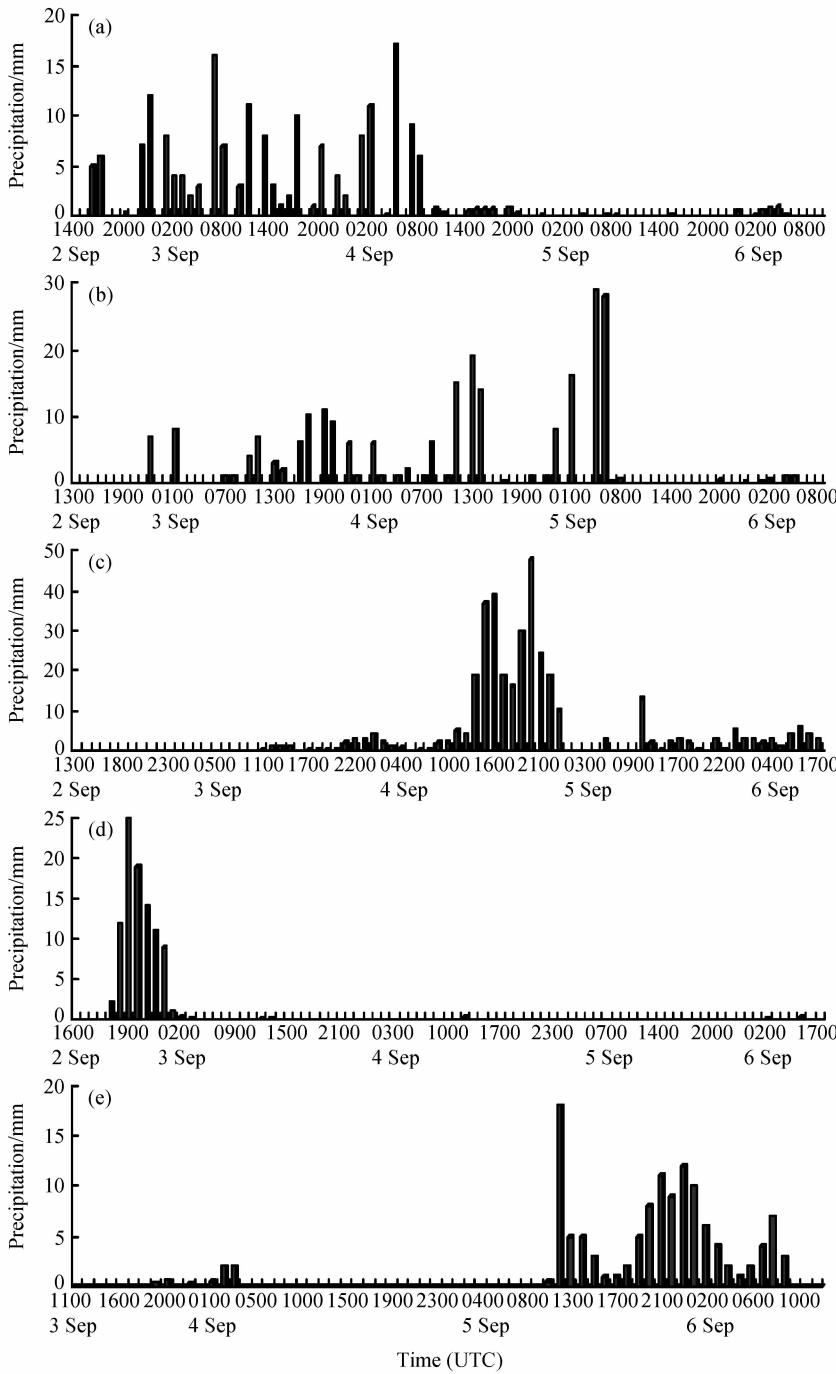


图 5 9 月 2~6 日受西南低涡影响的地区逐时降水量 (单位: mm): (a) 巴中; (b) 达川; (c) 开县; (d) 盐亭; (e) 忠县
Fig. 5 Hourly precipitation (mm) at the stations influenced by the southwest vortex during 2 - 6 Sep: (a) Bazhong; (b) Dachuan; (c) Kaixian; (d) Yanting; (e) Zhongxian

3.2 雨团活动分析

雨团与强降水有直接关联。为此，本文对该暴雨过程中的雨团作一分析。这里，中尺度雨团是指降雨量 ≥ 10 mm/h 的雨区。根据上述定义，利用四川和重庆地区逐时降水资料对 9 月 2~6 日四川东

北部和重庆地区雨团作了统计，结果如下：由表 1 可知，9 月 2~6 日降水过程中，位于重庆和四川东北部的降水雨团具有显著的中尺度特征，且其中绝大多数的雨团移动缓慢，位置变化不大，这十分有利于在该区域内强降水的发生。还应当指出，第 7~

表 1 2004 年 9 月四川东北部和重庆地区雨团分布

Table 1 Rainy clusters in the heavy rainfall area in northeastern Sichuan Province and Chongqing during 2 - 6 Sep 2004

序号	生成时间	消亡时间	运动特性	最大覆盖面积/km ²	最大中心雨强/mm · h ⁻¹	雨强中心
1	2 日 18 时	2 日 23 时	移动缓慢	150×150	25	盐亭
2	3 日 04 时	3 日 06 时	移动缓慢	50×50	10	万源
3	3 日 07 时	3 日 09 时	移动缓慢	50×160	16	巴中
4	3 日 11 时	3 日 12 时	移动缓慢	30×50	11	巴中
5	3 日 16 时	3 日 18 时	东北移动	40×200	25	宣汉
6	3 日 18 时	3 日 22 时	南移	100×300	35	岳池
7	4 日 01 时	4 日 03 时	移动缓慢	30×40	11	巴中
8	4 日 03 时	4 日 06 时	北移	100×70	17	巴中
9	4 日 09 时	4 日 12 时	移动缓慢	50×50	17	开江
10	4 日 13 时	4 日 17 时	移动缓慢	50×50	39	开县
11	4 日 18 时	5 日 00 时	东移	50×60	48	开县
12	5 日 00 时	5 日 03 时	移动缓慢	40×40	30	开江
13	5 日 04 时	5 日 06 时	移动缓慢	50×100	29	达川
14	5 日 09 时	5 日 11 时	北移	40×80	18	忠县
15	5 日 13 时	5 日 14 时	移动缓慢	40×40	15	利县
16	5 日 16 时	5 日 21 时	移动缓慢	40×50	25	丰都
17	5 日 17 时	5 日 18 时	移动缓慢	40×30	10	南川
18	5 日 19 时	6 日 00 时	移动缓慢	40×40	25	南川
19	5 日 20 时	5 日 22 时	移动缓慢	40×40	11	忠县
20	5 日 23 时	6 日 02 时	移动缓慢	30×30	12	忠县

20 号雨团直接与西南低涡有关,且主要位于西南低涡的东部和东北部的上升运动区,其中第 11 号雨团在开县引发了 1 小时 48 mm 的降水,是本次降水过程中的最强的 1 小时降水量。

3.3 降水云团分析

云团反映了某时刻云的状况,而雨团反映某一时段累积的降水量,降水云团与雨团有一定的联系,但它们之间不存在严格的一一对应关系。为此,本节利用卫星云图作一分析。

如图 6a,在四川盆地有中尺度对流云团①发展,该对流云团中心位置变化不大,范围随时间扩展,到 2 日 23 时,其在四川东北部成东北-西南向的带状云分布(正对应 700 hPa 上的切变线),最大范围接近 1000 km,3 日 11 时后消亡。3 日 16 时,在四川东北部和重庆地区有两个中尺度对流云团同时发展,到 3 日 18 时,合并成为一个大云团(如图 6b 中的云团②),位于四川东北部和重庆地区,停滞少动,在西南低涡出现后此云团加强,范围变大,最大尺度接近 1000 km(图略),4 日 11 时消亡。此云团最初与切变线相关,后又与西南低涡对

应。4 日 15 时,在四川东北部和重庆地区又有两个中尺度对流云团同时发展(如图 6c 中的云团③、④),到 5 日 00 时,两个小云团合并成带状云区,位置变化不大,主体位于四川东北部和重庆地区,最大范围接近 1000 km(图略),此云团在 5 日 15 时左右消亡。5 日 16 时在四川东部和重庆又有 2 个中尺度对流云团(见图 6d 中的云团⑤、⑥)发展,这两个小云团向四川东南部移动并合并成一个大云团,到 6 日 08 时消亡。

从卫星云图特征揭示出,中尺度对流云团与此次暴雨过程关系密切,西南低涡维持期内的中尺度对流云团是这次暴雨的重要影响系统,尤其是后 2 个时段的对流云团的发展,其中每个时段各有 2 个小对流云团存在(图 6c 中云团③、④以及图 6d 中云团⑤、⑥),它们分别位于西南低涡的东北部和东南部的上升运动区。

4 暴雨过程中西南低涡的发生、发展及垂直结构特征

由于高原东侧资料缺乏,对西南低涡的发生发

展的分析有时存在一定困难。为了弄清西南低涡对此次暴雨的贡献,我们利用尽可能收集到的资料对该暴雨过程中的西南低涡作了讨论。关于西南低涡,不同的作者给出的定义有一些差异,本文是将四川盆地及其临近地区 850 hPa 或 700 hPa 流场上出现的闭合气旋性涡旋称为西南低涡(有闭合等压线更好,但有时受地形等因素影响,画不出完整的低压)。当然,一般说来该类系统应与降水有关,与热低压有明显的不同。

4.1 西南低涡的形成与演变

从图 7a 可看到,4 日 00 时 850 hPa 最先出现西南低涡,而此时 700 hPa 上有较强气旋性切变区但未见闭合环流(图略)。6 小时后西南低涡垂直向上伸展达到 700 hPa(图 7d)。重庆东北方存在一条东北-西南走向的切变线,中心位置大致稳定在(28°N~33°N, 103°E~108°E)区域内(图 7e),西南低涡沿着切变线略向东北方向移动,我们取上述区域为西南低涡中心区(下同)。西南低涡影响时间为 4 日 00 时~6 日 06 时,持续时间达 54 小时,在其维持期内,川东和重庆发生了连续大暴雨。

为了讨论西南低涡的演变,在本节中对有效位能收支作了粗略估算。采用文献[14]中的公式。

$$\frac{\partial A}{\partial t} = G_A + N_{WA} + H_{ADV} + D_{NDT} + P_{SA} + R_{ES}, \quad (1)$$

$$H_{ADV} = \frac{1}{a} \int_a \int_{p_u}^{p_s} \left[\frac{c_p}{g} N (-\mathbf{V} \cdot \nabla T) \right] dp d\sigma, \quad (2)$$

$$V_1 = \frac{c_p}{g} N (-\mathbf{V} \cdot \nabla T). \quad (3)$$

公式(1)中 A 是有效位能; G_A 是非绝热加热引起的有效位能制造; N_{WA} 是直接热力环流引起的有效位能的释放; H_{ADV} 是水平温度平流对有效位能的贡献; D_{NDT} 是垂直温度平流造成的有效位能; P_{SA} 是由效率因子变化引起的有效位能变化; R_{ES} 是气压变化引起的有效位能变化。这里重点讨论 H_{ADV} 。需要说明的是, H_{ADV} 由公式(2)计算得到,其中 p_s 为地面气压; p_u 为高层气压; σ 为平面积分面元; a 为积分区域的面积; c_p 为定压热容量; g 为重力加速度; N 为效率因子; 在本文中,由于暴雨过程中水汽含量较大,应采用湿空气的定压热容量 c_{pv} 代替 c_p , 采用虚温 T_v 代替 T 。在本文中又将有效位能积分项定义为 V_1 [具体计算见公式(3)], 计

算结果见图 8f。

鞍形场是一种值得注意的环境场。在图 8a 上,西南低涡出现的前 6 小时即 3 日 18 时,四川盆地的东北方即存在一个鞍型场,川东和重庆正处于两高之间的气旋性切变区,有一较强的正涡度中心存在(图 8b)并且也有较强较强的上升运动(图 8c)。由图 2c 知,四川东北部和重庆上空 500 hPa 有小槽存在,500 hPa 高空槽对川东和重庆西南地区有正涡度平流输送(图 8d),槽前的正涡度输送有利于低层减压和气旋性涡度的加大,高原东南侧的偏南气流加强并在四川盆地形成明显的辐合;据地面观测,在高空槽影响下,位于重庆西南部的低压中心开始加强,同时该处地面气流呈现气旋性辐合(图略)。在槽后引导气流的影响下,850 hPa 有冷平流沿着四川盆地西侧进入川东和重庆地区(图 8e),冷平流一方面使等压面下降,另一方面其引起的位势不稳定有利于降水的发生。如前所述,通过公式(1)~(3)对冷平流引起的有效位能变化进行了计算,结果如图 8f,由图可见,850 hPa 温度平流使有效位能降低,这是由于冷暖空气温差不大,不利锋面形成(图略),冷平流进入并与暖空气较快地发生混合导致了该地区的有效位能降低,由此可见,冷平流的主要贡献是降低等压面,有利于西南低涡的发展。

850 hPa 上西南低涡出现的时间比 700 hPa 要早,这可能表明在一定条件下大气边界层内的特殊动力作用对低涡的形成可能有不可忽视的影响^[6,13,20]。川东和重庆地区边界层顶在 850 hPa 左右,边界层内水平气压梯度力、科里奥利力、湍流黏性力三力平衡,从较大尺度来看,边界层的摩擦作用使得风偏离等压线吹向低压^[12],气流在科里奥利力作用下有利于气旋性涡度的增加,由此可知,川东和重庆地区的边界层摩擦作用有利于低层偏南风的气旋性涡度增加。

4.2 凝结潜热的影响

降水的潜热释放和对流运动在一定程度上对西南低涡的加强和维持有帮助。在图 9a 上,虽然 3 日 18 时 850 hPa 上四川东北有强水汽辐合区,但重庆西南水汽辐合尚不明显,因而降水不明显,6 小时后,即 4 日 00 时,西南低涡出现在重庆西南部,由此可推断降水有关的凝结潜热的释放对该次西南低涡最初阶段的贡献不大,至少在本例中是这

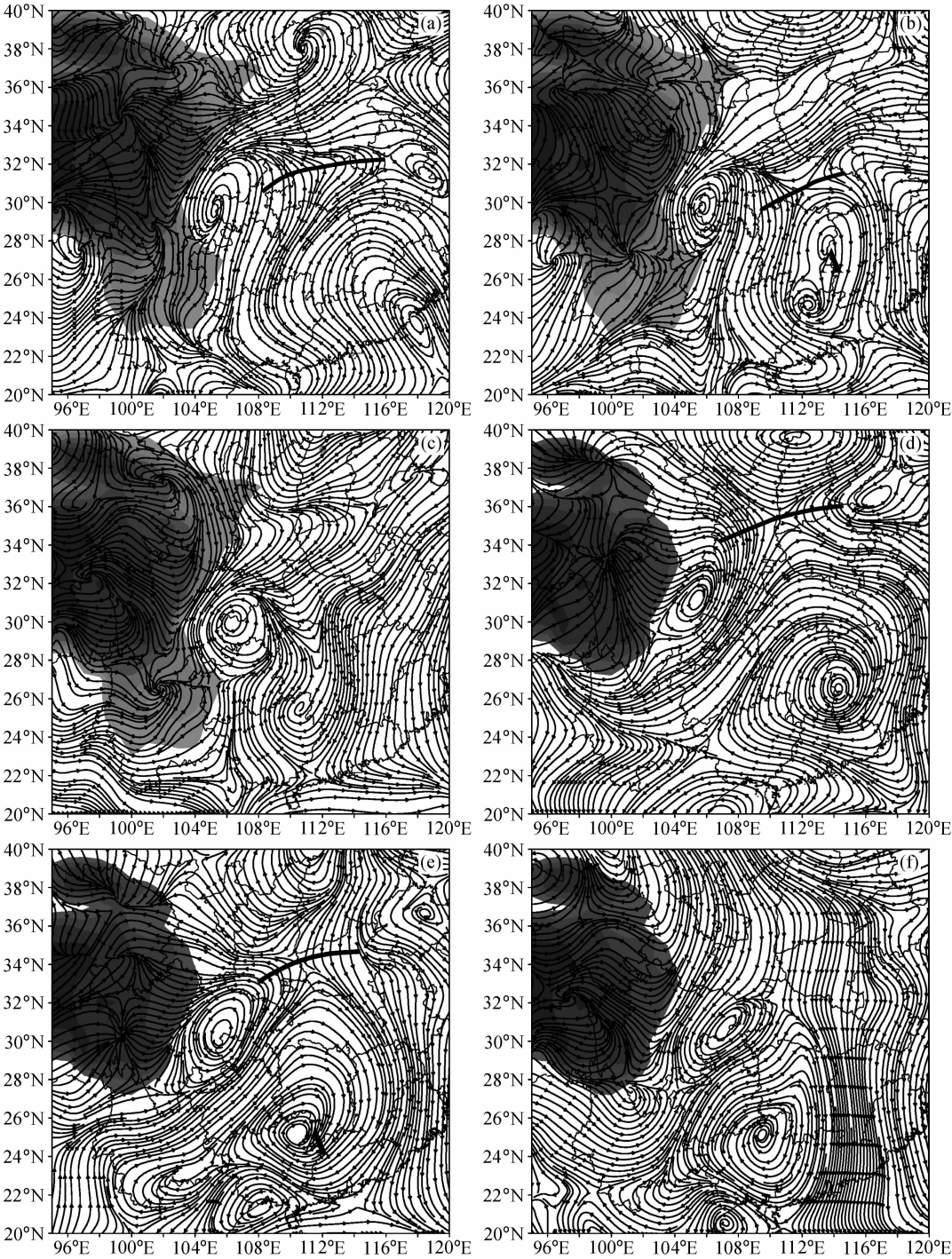


图 7 9 月 4~6 日 850 hPa 流场 (a~c) 和 700 hPa 流场 (d~f) 图: (a) 4 日 00 时; (b) 5 日 00 时; (c) 6 日 00 时; (d) 4 日 06 时; (e) 5 日 06 时; (f) 6 日 00 时。阴影区地形高度大于 1500 m, 粗实线为切变线, A 为反气旋

Fig. 7 Streamline fields at 850 hPa (a~c) and 700 hPa (d~f): (a) 0000 UTC 4 Sep; (b) 0000 UTC 5 Sep; (c) 0000 UTC 6 Sep; (d) 0600 UTC 4 Sep; (e) 0600 UTC 5 Sep; (f) 0600 UTC 6 Sep. The shaded areas are the terrains above 1500 m, the solid lines are shear lines, and A stands for anticyclone

样。700 hPa 的情况与此类似。在图 9b 上, 4 日 00 时, 虽然有弱的水汽辐合中心在重庆以西出现, 由图 5a、d 可知, 4 日 00 时~4 日 06 时该地区降水并

不明显。而由 4 日 18 时的 850 hPa 和 700 hPa 的水汽通量辐合图上可以看到, 此阶段后期水汽通量辐合已大大加强 (图 9c、d)。

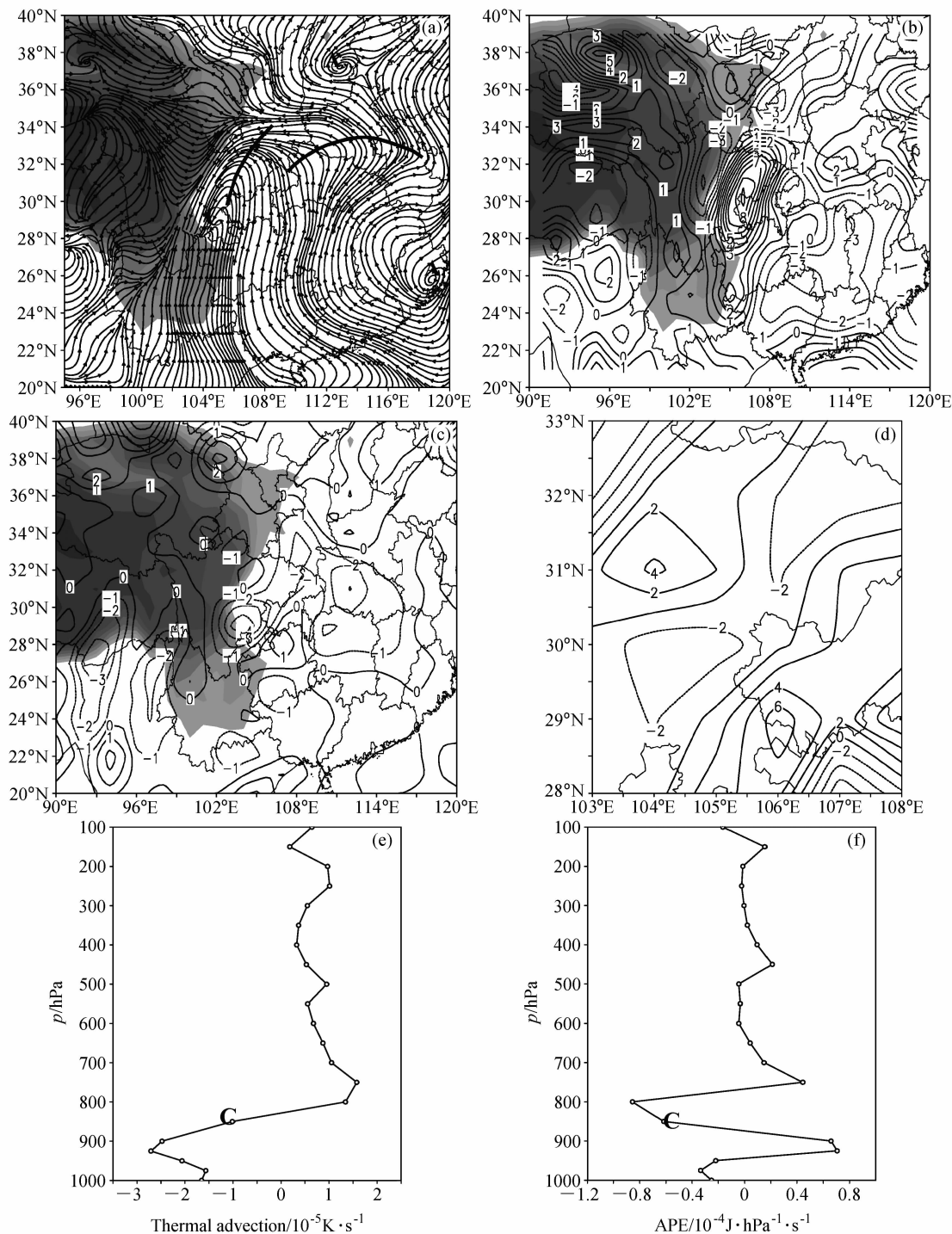


图 8 9 月 3 日 18 时西南低涡出现前 6 小时的要素场：850 hPa 流场 (a, A: 反气旋, B: 气旋, 粗实线: 切变线)、涡度场 (b, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 及垂直速度 (c, 单位: 10^{-3} hPa/s)；(d) 500 hPa 涡度平流 (单位: 10^{-10} s^{-2})；西南低涡中心区域平均温度平流 (e) 及有效位能 (APE) 制造 (f)。C: 高度为 850 hPa；阴影: 高度大于 1500 m 的区域

Fig. 8 Various meteorological parameters at 1800 UTC 3 Sep 2007: (a) Streamline field (A is anticyclone, C is cyclone, thick solid line is shear line), (b) vorticity (10^{-5} s^{-1}) field and (c) vertical velocity (10^{-3} hPa/s) at 850 hPa (the shaded area is the terrain higher than 1500 m); (d) vorticity advection (10^{-10} s^{-2}) at 500 hPa; area-averaged (e) thermal advection and (f) available potential energy (APE) produced by temperature advection in the southwest vortex region (point C stands for 850 hPa)

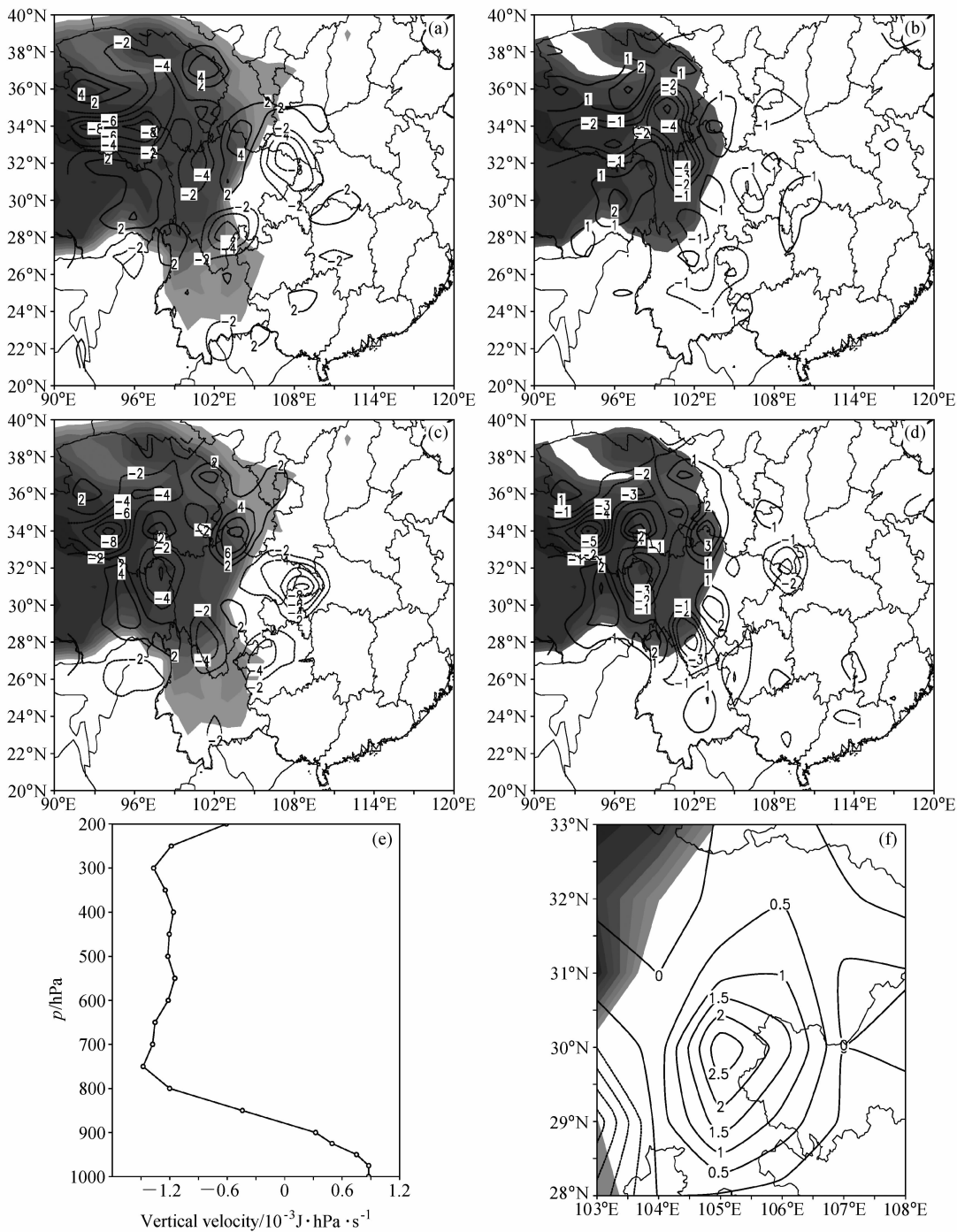


图 9 700 hPa 西南低涡产生时期的相关要素图: (a) 9 月 3 日 18 时 850 hPa 水汽通量散度 (单位: $10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$); 9 月 4 日 00 时 700 hPa (b) 和 4 日 18 时 850 hPa (c)、700 hPa (d) 上的水汽通量散度 (单位: $10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$); 9 月 4 日 00 时 850 hPa 西南低涡中心区域平均垂直速度 (e) 和 700 hPa 涡度垂直平流 (f, 单位: 10^{-9} s^{-2})。850 hPa 和 700 hPa 阴影区地形高度分别大于 1500 m 和 3000 m

Fig. 9 Related parameter distributions during the southwest vortex formation period: Divergences of moisture fluxes ($10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) (a) at 850 hPa at 1800 UTC 3 Sep, (b) at 700 hPa at 0000 UTC 4 Sep, (c) at 850 hPa at 1800 UTC 4 Sep, (d) at 700 hPa at 1800 UTC 4 Sep; area-averaged vertical velocity in the central part of the southwest vortex at 850 hPa (e) and vorticity vertical advection (10^{-9} s^{-2}) at 700 hPa (f) at 0000 UTC 4 Sep. The shaded areas at 850 hPa and 700 hPa are the terrains above 1500 m and 3000 m, respectively

4 日 06 时，西南低涡垂直发展到 700 hPa 以上。由图 9e 知，在 700 hPa，西南低涡中心区域内维持强上升运动，700 hPa 上（如图 9f），在重庆西南有一正涡度垂直输送中心，强度较大，由此可知，尽管在开始阶段热力作用的贡献不是最主要的，但低层强上升运动带来的正涡度的垂直输送在一定程度上帮助了西南低涡向对流层中层发展，而在此之后即西南低涡的发展阶段凝结潜热的作用才变得越来越明显^[7,8]（见图 9c、d）。

4.3 西南低涡温压场的垂直结构特征

在此次西南低涡维持期间，地面一直存在低压中心以及气旋性辐合中心（图 10a、b），两者位置差别不大，都位于西南低涡中心区域内，可见西南低涡的维持有利于地面减压、辐合。从 4 日和 5 日西南低涡中心区域散度、涡度和垂直速度的平均垂直廓线图（图略）可以看到：整个西南涡时期，在西南低涡中心区域内，850~500 hPa 间涡度都是正

值，且比散度大一个量级，最大值在 850 hPa 附近；散度垂直分布呈下层辐合上层辐散形式，无辐散层高度先是上升，可达 700 hPa 以上，后又下降至 800 hPa 以下；这种下层辐合上层辐散的形式非常有利于垂直上升运动、有利于低涡的维持以及暴雨的发生。垂直速度在 850 hPa 和 700 hPa 上都是负值，即上升运动，最大值在 850 hPa 附近，上升运动最高可达 200 hPa。

与热带气旋及温带气旋等涡旋的流场以及气压场（高度场）相比，西南低涡相对较弱。因而有时在地面天气图或高空天气图上难以直接分析出闭合低压系统。为此，本文采用离差剖面图来表达低涡温压场结构。具体做法是在某层沿某纬度（或某经度）求高度或温度的平均，然后再由某点该层的实际观测值减去相应层与相应纬度（或相应经度）的平均值，从而得到该点该层上的离差值，在此基础上绘制出高度或温度离差的垂直剖面图。由高度离

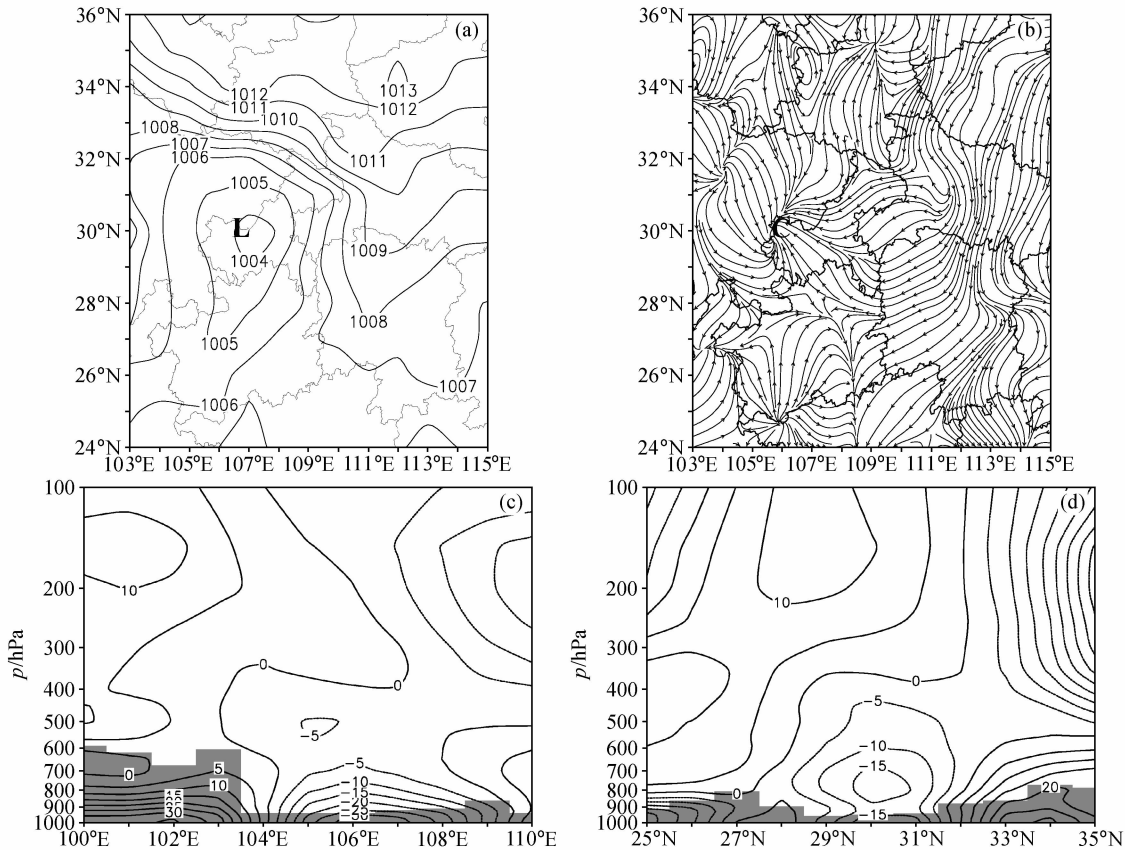


图 10 西南低涡结构剖面及环境要素图：9 月 5 日 00 时实测的地面气压图（a，单位：hPa）和地面流线图（b）；9 月 4 日 18 时沿 30.5°N（c）和 5 日 06 时沿 105.5°E（d）的位势高度离差垂直剖面图（单位：gpm），阴影处为地形

Fig. 10 Vertical cross sections of the southwest vortex and the environmental element fields: (a) Surface pressure (hPa) field and (b) surface streamline field observed at 0000 UTC 5 Sep; vertical cross sections of geopotential height deviation (gpm) (c) along 30.5°N, at 1800 UTC 4 Sep and (d) along 105.5°E at 0600 UTC 5 Sep (the shaded bars are the terrains)

差图(图 10c、d)知,西南低涡中心区域从地面到 400 hPa 附近都是负的高度离差,表明本例西南低涡是一相对的低压区,且较为深厚,西南低涡主要集中在对流层中低层。高度场离差最大的负值中心在 850 hPa 附近。

由图 11a、b 可知,850 hPa 附近,西南低涡中心维持冷心结构,对应 850 hPa 上冷舌由北向南伸入西南低涡(图略)。而 700 hPa 上,西南低涡中心起初是冷心(图 11a),在强的暖平流影响下(图略),温度略有升高(图 11b)。应当强调指出的是,西南低涡维持期间,其中心区域上空 400 hPa 附近一直维持一暖中心(图 11a、b),5 日 00 时其最大值达 1℃,这可能是由于对流降水所释放的凝结潜热

有利于暖心的形成与维持,但是,它的暖心比热带气旋的暖心要弱得多。还应当指出,对此次暴雨过程中西南低涡的分析,再次证实了文献[4]中的结果,即有一类西南低涡的确存在暖心结构,这与东北低涡等冷心结构的系统有明显的不同^[27]。

4.4 西南低涡降水时期的水汽来源

4 日 18 时 700 hPa 上(图 12a),来自孟加拉湾的水汽由偏南风向北输送,这支水汽在云南省西南方与来源于我国南海的水汽(由四川东南方反气旋南侧的偏东气流驱动)汇合后沿青藏高原南侧向东输送,在贵州省上空,这支合并后的水汽又与来自四川东南方的反气旋(图 7e)西侧的偏南气流的水汽输送再次合并,然后一起向重庆地区输送。4 日

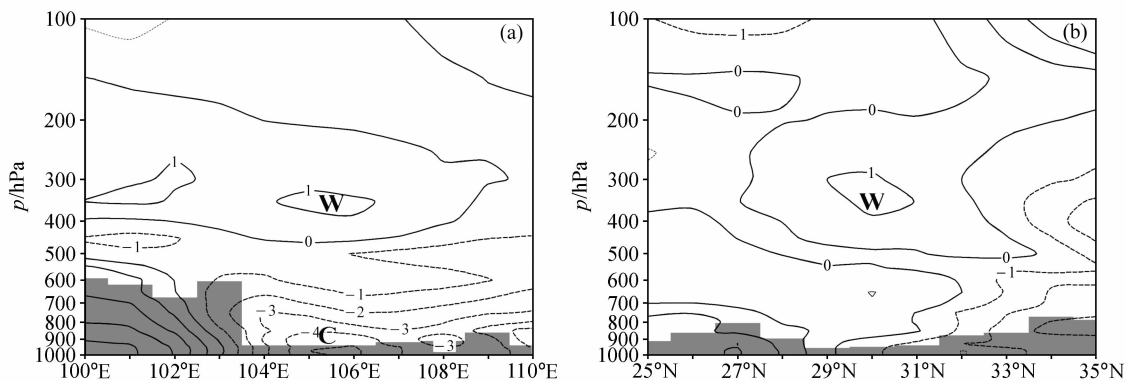


图 11 9 月 4 日 18 时沿 30.5°N (a) 和 5 日 00 时沿 105.5°E (b) 西南低涡温度离差(单位:℃)的垂直剖面。阴影处为地形

Fig. 11 Vertical cross sections of temperature deviation (°C) in southwest vortex (a) along 30.5°N at 1800 UTC 4 Sep and (b) along 105.5°E at 0000 UTC 5 Sep. The shaded bars are the terrains

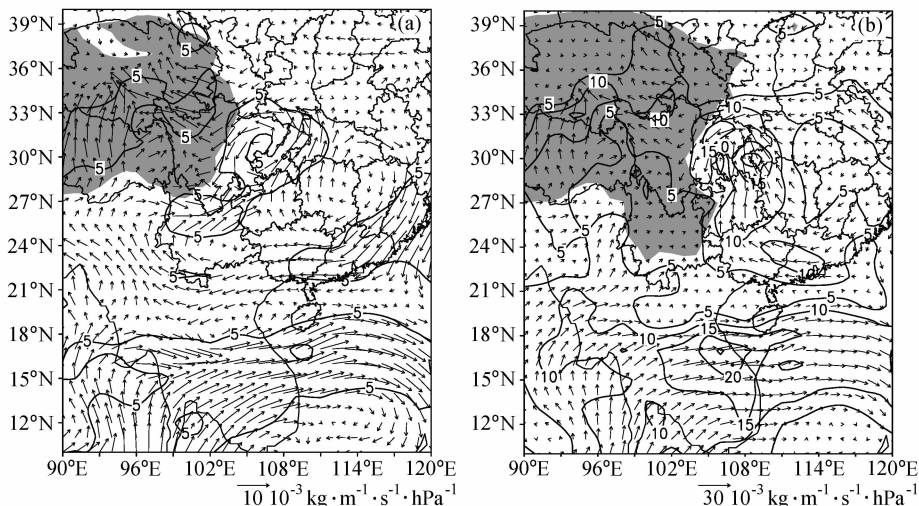


图 12 9 月 4 日 18 时 700 hPa (a)、850 hPa (b) 上的水汽通量。等值线代表水汽通量大小,850 hPa 和 700 hPa 阴影区地形高度分别大于 1500 m 和 3000 m

Fig. 12 The moisture fluxes in the area of the southwest vortex at 700 hPa (a) and 850 hPa (b) at 1800 UTC 4 Sep. The isolines show the magnitudes of the moisture fluxes, and the shaded areas at 850 hPa and 700 hPa are the terrains above 1500 m and 3000 m, respectively

表 2 2004 年 9 月川渝大暴雨过程中西南低涡中心区域整层水汽收支表 (单位: 10^4 kg/s)

Table 2 The moisture budget (10^4 kg/s) from the surface to 200 hPa in the central area of the southwest vortex during the heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in Sep 2004

时间	东边界整 层输出量	西边界整 层输入量	北边界整 层输出量	南边界整 层输入量	东西向整 层输出量	南北向整 层输出量	整层整区 域输出量
4 日 00 时	3.08	−5.54	−1.92	13.90	8.62	−15.82	−7.20
4 日 06 时	6.20	−7.42	−1.96	9.31	13.62	−11.27	2.35
4 日 12 时	1.29	−9.30	−7.06	4.29	10.59	−11.35	−0.76
4 日 18 时	−3.40	−9.83	−9.73	1.34	6.43	−11.08	−4.65
5 日 00 时	1.86	−5.26	−7.47	3.39	7.12	−10.86	−3.74
5 日 06 时	1.51	−7.21	−2.32	2.12	8.72	−4.44	4.29
5 日 12 时	−0.18	−8.53	−2.79	0.51	8.35	−3.30	5.05
5 日 18 时	−1.29	−4.35	−6.04	−0.88	3.06	−5.17	−2.10
6 日 00 时	1.32	−3.86	−9.55	−1.53	5.19	−8.02	−2.83
6 日 06 时	−1.59	−13.03	−7.94	−5.60	11.44	−2.33	9.11
	>0 输出	>0 输入	>0 输出	>0 输入	>0 输出	>0 输出	>0 输出

的一支来自于我国南海,是由四川东南方的小高压(图 7b)外围气流所驱动的水汽输送;较弱的一支有可能来自我国东海,由台风(图略)北侧偏东气流驱动的水汽输送,对降水也有一定影响。

由表 2 可知,西南低涡中心区域内,水汽的收支特点是:西边界上只存在水汽输出;北边界只存在水汽输入,结合图 12a 可知这支水汽输送主要靠西南低涡本身的流场驱动,在西南低涡降水的后期,桑达(0419 号)台风北上后其北侧的偏东气流对北边界的水汽输入也可能有一定的作用(图略);南边界开始时为水汽输入,随着四川东南方的小高压的西移减弱(图略)而转变为水汽输出,但是其总的效果是水汽输入;东边界水汽随时间有输入和输出的交替变化,但总的效果是水汽输出。由此可知,水汽的输送主要经过南北边界,与图 12a、b 中的水汽输送路径一致。东边界上一定时刻也存在水汽输入,结合图 12b 可知,东边界的水汽输入可能主要来源于低层 850 hPa 附近台风北部边缘的偏东气流的输送。

综上所述,西南低涡降水过程中水汽主要来源于南海、东海,甚至孟加拉湾,而其中南海和东海为最重要的水汽来源,四川东南方的反气旋的边缘气流是水汽输送的最主要载体,可能台风西侧和北侧的边缘气流对于水汽输送也有一定贡献。通过对低空急流(图略)的分析发现,四川东部和重庆地区,当西南低涡加强时,低空急流时有出现,但强度、范围均不太大,且维持时间较短(6 小时左

右),这与我国东部地区的情况有所不同。

4.5 西南低涡维持与减弱消亡

在这一期间西南低涡的维持有其一定的原因。由图 2d 可知,500 hPa 上四川东北部存在高空小槽,该小槽对西南低涡的维持至关重要。在西南低涡中心区域(图 13a),500 hPa 存在正涡度水平平流的大值区,此正涡度输送来源于四川东北部的高空小槽(图 2d)。正涡度平流造成高层辐散,低层减压,有利于西南低涡的维持。由图 13a 可知,700 hPa 也存在一个正涡度平流的极大值,这同样有利于西南低涡的维持。由图 13b 可知,700 hPa 上存在涡度垂直平流极大值,其量级与水平平流相当,可见上升运动带来的涡度垂直输送对于高层西南低涡的维持也是一个重要条件。850 hPa 存在负涡度水平和垂直平流(图 13a、b),这些不利于西南低涡的维持,850 hPa 存在辐合的极大值(图略),它通过涡度方程的辐散项对局地涡度产生正作用,经计算,其作用效果与水平和涡度垂直平流同一个量级,可见 850 hPa 上西南低涡的维持主要依靠该层的强辐合。

综上所述,西南低涡中心区域较高层正涡度水平和垂直平流是较高层西南低涡维持的主要因子;强辐合是西南低涡低层维持的主要因子;高层辐散,低层辐合的高低空配置以及持续的强上升运动也是西南低涡的维持的有利条件。

西南低涡稳定少动受大尺度环流背景影响,如图 2a 所示,4 日 18 时后重庆东北方处于 500 hPa

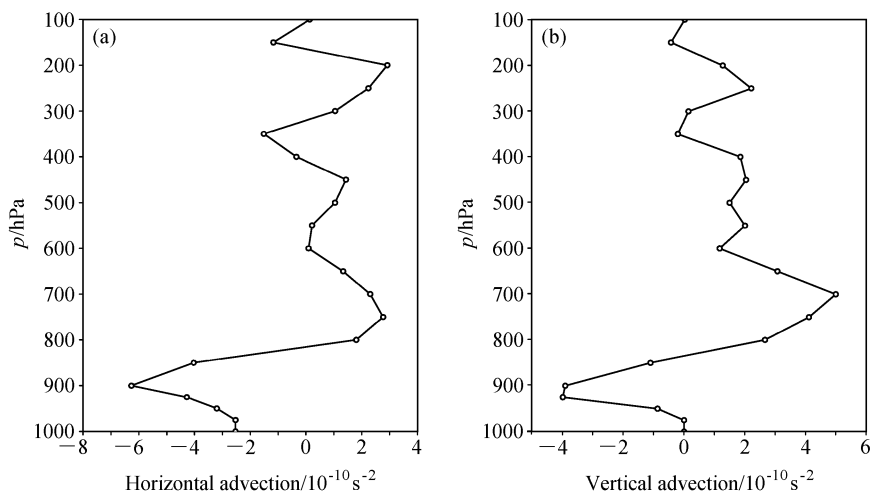


图 13 西南低涡中心区域 9 月 5 日 00 时平均涡度水平平流 (a) 和 9 月 4 日 18 时平均涡度垂直平流 (b) (单位: 10^{-10} s^{-2})

Fig. 13 The vertical profiles of horizontal advection (a) and vertical advection (b) of area-averaged vorticity in the central area of the south-west vortex; (a) 0000 UTC 5 Sep; (b) at 1800 UTC 4 Sep

西风带小槽槽后, 由于海上副高的作用, 该小槽移动减慢。高空 500 hPa 上的引导气流较弱 (图 2d), 以上条件均不利于西南低涡东移; 此外, 在 700 hPa、850 hPa 上, 西南低涡东侧持续存在反气旋 (图 7b、e), 这同样不利于西南低涡东移。

如前所述, 西南低涡的发生发展是在有利的大尺度环境下出现的, 即是“鞍形场”背景下, 500 hPa 槽和 700 hPa 涡的“北槽南涡”有利形势下得以维持和发展的。因而当这类有利形势不复存在时, 西南低涡便很快减弱、消亡。可以注意到, 6 日 00 时以后, 高空 500 hPa, 高原东北方的西风带小槽的东移, 使重庆和川东处于槽后。低空 850 hPa 以及 700 hPa, 西北小高压东移, 使四川以北位于高压东南方, 转为强的偏北风, 出现负的涡度平流 (图略), 且负的涡度平流随时间增强。以上一些条件的改变是导致该次西南低涡减弱、消亡的可能原因。

5 结论和讨论

本文利用 NCEP ($1^\circ \times 1^\circ$) 再分析资料、常规观测资料、卫星云图资料及逐时降水资料等, 对 2004 年 9 月 2~8 日, 发生在川东和重庆地区的大暴雨过程的环境场和西南低涡进行了研究, 结果表明:

(1) 此次暴雨的主要降水系统有两个: 暴雨过程的第一、三阶段的主要降水系统为低空切变线, 其中第一阶段后期 3 日 18 时在 700 hPa 一次 β 中

尺度西南低涡的发展大大增加了降水; 此后, 即第二阶段, 其主要降水系统为西南低涡, 而与西南低涡有关的降水, 其雨量和范围均为最大, 强降水主要集中在西南低涡的东部和东北部。由于大的形势稳定少动, 致使西南低涡在一个区域内长时间滞留是引发该地区连续暴雨的重要原因之一。

(2) 西南低涡不同于东北低涡, 前者主要集中于对流层低层, 而不是伸展到对流层中上层。本文中西南低涡影响的时间是 4 日 00 时~6 日 06 时, 持续 54 小时, 空间上, 其水平直径在 200~500 km 之间, 充分发展时达到 α 中尺度系统的范围。又, 本次西南低涡温度场的垂直分布为在低层偏冷, 在中上层为暖心结构, 但它比热带气旋系统的暖心要弱得多, 而它与中高层冷心的温带气旋系统有显著的不同。在本例中, 西南低涡发展初期可能降水的影响并不是最重要的, 风场的动力作用影响较大; 而在发展阶段, 潜热释放的影响以及上升运动的加强有利于西南低涡的维持和发展。

(3) 对本次西南低涡的研究还表明, 鞍形场背景下的“北槽南涡”的形势对于西南低涡的发生与维持十分有利。涡度平流、温度平流以及高原东侧边界层的特殊动力作用对西南低涡产生和维持有重要的影响, 其中 500 hPa 影响槽的涡度和温度平流是西南低涡在中高层维持的最主要因子, 而在 850 hPa 附近, 低涡区域的强辐合则是最主要的维持机制。

(4) 整个西南低涡范围内强降水区并不是均匀分布, 整体而言, 强降水集中在西南低涡的中心及其东侧, 表明除低涡本身外, 其东部的切变线亦有重要的影响, 值得重视。

(5) 在此次暴雨过程中, 先后有 20 个雨团在西南低涡及低空切变的背景下发展, 其中 9 月 4 日 18 时~5 日 00 时出现的雨团 1 小时最大降水量达 48 mm。正是由于这一系列雨团在川渝地区发生发展引发了大暴雨, 中尺度系统是这次大暴雨的直接制造者。

(6) 此次暴雨过程的水汽收支表明, 水汽来源主要是南海、东海, 也有一部分来源于孟加拉湾, 可见即使像四川、重庆这样的内陆省市, 低纬热带地区的水汽对其降水也有影响。当然, 要定论水汽是如何经长途跋涉由何路径进入川渝地区, 还要作进一步探讨。

由于本文是对 2004 年 9 月川渝大暴雨期间的西南低涡进行分析, 得到的结果还需要今后更多个例资料进行补充和修正。另外还需指出, 对长江流域中下游的低涡而言, 其中有东移的西南低涡, 有在三峡或宜昌发展的涡, 也有在当地就地形成的涡, 并不都源于西南低涡。因此, 要对具体情况作具体分析, 方可得出符合实际的结论, 否则可能会造成预报失误。

参考文献 (References)

- [1] Petterssen S, Sembye S J. On the development of extratropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1971, **97**: 457~482
- [2] Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. Characteristic features of "Baiu" front associated with heavy rainfall. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1971, **49**: 409~429
- [3] 中国科学院大气物理研究所模拟组. 西南低涡的初步研究. *大气科学*, 1976, (2): 28~38
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. A preliminary study on the southwest vortex. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1976, (2): 28~38
- [4] 赵思雄. 西南低涡结构的个例分析. 青藏高原气象会议论文集, 西宁, 1977, 296~306
Zhao Sixiong. Case study of southwest vortex structure. *Proceedings of Qingzang Plateau Meteorology Conference*, Xining, 1977, 296~306
- [5] 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyang, et al. *Rainstorms in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [6] 杨大升. 行星边界层对低涡降水过程的作用. 暴雨文集. 吉林: 吉林人民出版社, 1980. 47~57
Yang Dasheng. The effect of the planet boundary layer on low vortex precipitation. *Corpus of Heavy Rainfall* (in Chinese), Jilin: Jilin People Press, 1980. 47~57
- [7] 赵思雄, 周晓平, 张可苏, 等. 中尺度低压系统形成和维持的数值实验. *大气科学*, 1982, **6** (2): 109~117
Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, Zhang Kesu, et al. Numerical simulation experiment of the formation and maintenance of mesoscale low. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1982, **6**: 109~117
- [8] 赵思雄, 周晓平. 风场在预报暴雨发生中的作用——1975 年 8 月上旬特大暴雨的数值实验. *大气科学*, 1984, **8** (1): 1~6
Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping. The effect of wind field disturbances on the forecast of rainstorm formation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1984, **8** (1): 1~6
- [9] 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986. 270pp
Lu Jinghua. *Generality of the Southwest Vortex* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1986. 270pp
- [10] 李国平, 万军, 卢敬华. 暖性西南低涡形成的一种机制. *应用气象学报*, 1991, **2** (1): 91~99
Li Guoping, Wan Jun, Lu Jinghua. A potential mechanism of the warm vortex genesis in southwest China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1991, **2** (1): 91~99
- [11] Zhao Sixiong, Mills G A. A study of a monsoon depression bringing record rainfall over Australia. Part II: Synoptic-diagnostic description. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 2074~2094
- [12] 吕美仲, 彭永清. 动力气象学, 北京: 气象出版社, 1991. 453pp
Lü Meizhong, Peng Yongqing. *Dynamic Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1991. 453pp
- [13] 解明恩, 据建华, 卜玉康. 西南低涡 Ekman 层流场特征分析. *高原气象*, 1992, **11** (1): 31~38
Xie Ming'en, Ju Jianhua, Bu Yukang. The characteristic analysis of Ekman layer's streamline fields of the southwest vortex. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1992, **11** (1): 31~38
- [14] 丁一汇. 天气动力学中的诊断分析方法. 合肥: 中国科技大学研究生院, 1993. 18~190
Ding Yihui. *Research Methods of Synoptic Dynamics*. Hefei: Graduate School of University of Science and Technology of China (in Chinese), 1993. 18~190
- [15] Jia Yiqin, Zhao Sixiong. A diagnostic study of explosive development of extratropical cyclone over East Asia and West Pacific Ocean. *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **11** (3): 251~270

- [16] 陈忠明, 缪强, 闵文彬. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析. *应用气象学报*, 1998, **9** (3): 273~282
Chen Zhongming, Miao Qiang, Min Wenbin. A case analysis on mesoscale structure of severe southwest vortex. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1998, **9** (3): 273~282
- [17] 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究. *气候与环境研究*, 1998, **3** (4): 368~381
Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. Study of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 368~381
- [18] 陈忠明, 徐茂良, 闵文彬, 等. 1998 年夏季西南低涡活动与长江上游暴雨. *高原气象*, 2003, **22** (2): 162~167
Chen Zhongming, Xu Maoliang, Min Wenbin et al. Relationship between abnormal activities of southwest vortex and heavy rain the upper reach of Yangtze River during summer of 1998. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 162~167
- [19] 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 天气学和天气预报的研究进展. *大气科学*, 2003, **27** (4): 451~467
Tao Shiyan, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (4): 451~467
- [20] 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展. *高原气象*, 2004, **23** (Suppl.): 1~5
Chen Zhongming, Min Wenbin, Cui Chunguang. New advances in Southwest China Vortex research. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2004, **23** (Suppl.): 1~5
- [21] 董佩明, 赵思雄. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压(扰动)的诊断研究. *大气科学*, 2004, **28** (6): 876~891
Dong Peiming, Zhao Sixiong. A diagnostic study of mesoscale lows (disturbances) on Meiyu front and associated heavy rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (6): 876~891
- [22] 孔期, Ghulam Rasul, 赵思雄. 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. *气候与环境研究*, 2005, **10** (3): 526~542
Kong Qi, Ghulam Rasul, Zhao Sixiong. Study of the structure, vortex budget and moisture supply of a monsoon depression producing heavy rainfall in South Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, **10** (3): 526~542
- [23] 沈新勇, 倪允琪, 张铭, 等. β 中尺度暴雨系统发生发展的一种可能物理机制 I. 涡旋 Rossby 波的相速度. *大气科学*, 2005, **29** (5): 727~733
Shen Xinyong, Ni Yunqi, Zhang Min, et al. A possible mechanism of the genesis and development of meso- β rain-storm system. Part I. Phase velocity of vortex Rossby waves. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 727~733
- [24] 沈新勇, 倪允琪, 沈桐立, 等. β 中尺度暴雨系统发生发展的一种可能物理机制 II. 涡旋 Rossby 波的形成. *大气科学*, 2005, **29** (6): 854~863
Shen Xinyong, Ni Yunqi, Shen Tongli, et al. A possible mechanism of the genesis and development of meso- β rain-storm system. Part II. Formation of vortex Rossby waves. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 854~863
- [25] Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Study on cut-off low pressure systems causing flood in Northeast Asia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, **96**: 159~180
- [26] 龚晓雪, 赵思雄. 麦莎台风(0509)登陆后能量过程与水汽供应的诊断研究. *气候与环境研究*, 2007, **12** (3): 437~452
Kung Hiusuet, Zhao Sixiong. Diagnosis on energy budget and moisture supply of Matsa (No. 0509) after landfall. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (3): 437~452
- [27] 乔枫雪, 孙建华, 赵思雄. 一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水汽收支分析. *气候与环境研究*, 2007, **12** (3): 397~412
Qiao Fengxue, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (3): 397~412

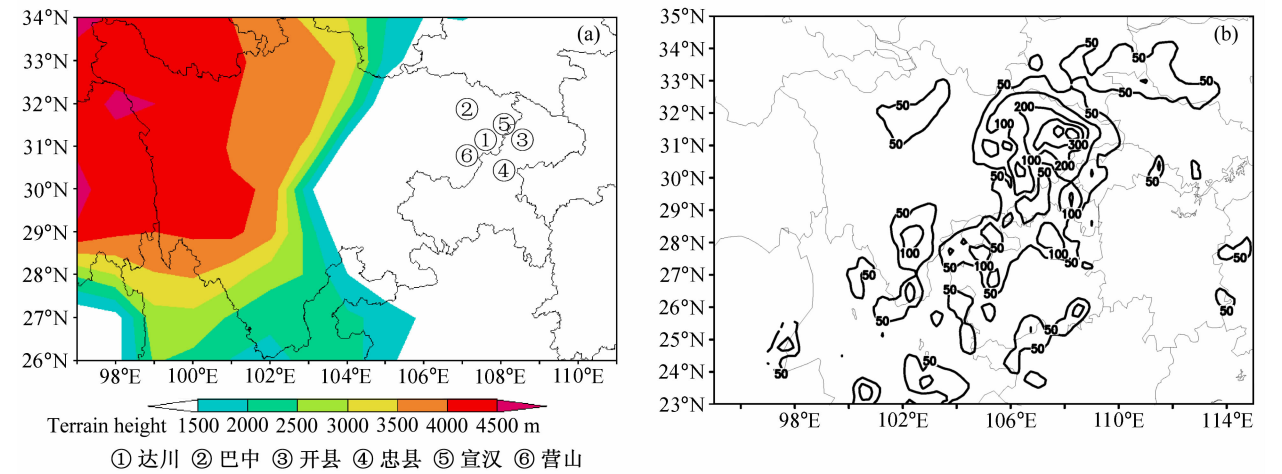


图 1 (a) 四川省和重庆市的地形特征以及本次降水过程涉及的主要县市分布；(b) 2004 年 9 月 2 日 00 时~7 日 00 时降水过程累计降水量 (单位: mm)

Fig. 1 (a) The geographical characteristics of Sichuan Province and Chongqing and the distribution of main cities and counties influenced during the heavy rainfall; (b) the accumulated precipitation (mm) during the heavy rainfall from 0000 UTC 2 Sep to 0000 UTC 7 Sep

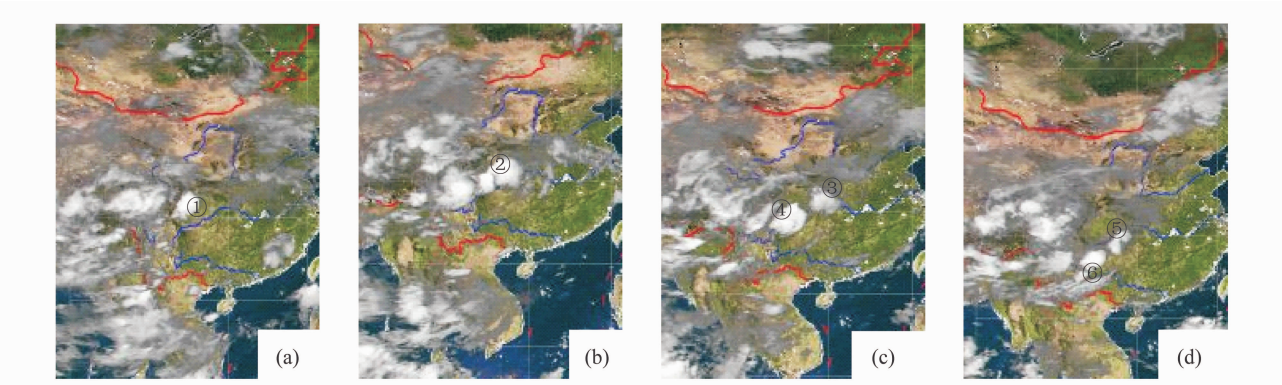


图 6 FY-2 卫星云图: (a) 9 月 2 日 18 时; (b) 9 月 3 日 18 时; (c) 9 月 4 日 18 时; (d) 9 月 5 日 18 时。图中①~⑥是云团的编号

Fig. 6 FY-2 satellite cloud images; (a) 1800 UTC 2 Sep; (b) 1800 UTC 3 Sep; (c) 1800 UTC 4 Sep; (d) 1800 UTC 5 Sep. ①-⑥ are the serial numbers of cloud clusters