

一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析*

陈忠明 缪强 闵文彬

(四川省气象科学研究所, 成都 610072)

提 要

通过对1989年7月8~10日发生于四川盆地东部的西南低涡的诊断分析, 揭示了西南低涡成熟期的三维结构. 结果表明, 成熟阶段的西南低涡正涡度可伸展到100 hPa以上, 中心轴线垂直; 其流场和高度场表现为贯穿对流层的中尺度气旋和低压, 涡区内动量、层结、垂直运动等呈非对称分布, 是一个准圆形而非对称的中尺度系统.

关键词: 西南低涡 中尺度结构 诊断分析

引 言

1981年7月13日因西南低涡发展引起四川盆地发生百年不遇的特大洪灾后, 国内外许多气象专家都对西南低涡的研究发生了极大的兴趣. Kou^[1]、钱正安^[2]、黄福均^[3]、卢敬华^[4]、Wang^[5]和程麟生^[6]等对西南低涡的发生、发展及其降水等作了动力诊断和模拟研究. 然而, 正如Kou^[1]、卢敬华^[7]等指出的那样, 西南低涡的研究工作尚处于起步阶段, 有许多问题尚没有认识清楚, 如低涡的结构问题, 尤其是低涡成熟期的三维结构, 尽管过去已作了一些典型个例分析或合成分析, 但因各自针对的个例不同, 其得出的结果也不尽相同, 尚未能形成完整的模式性结论, 还有待对更多的典型实例进行细致分析, 揭示其成熟期的结构特征.

本文将对引起1989年7月10日川东特大暴雨的强西南低涡进行研究, 由于该低涡发展导致的降水强度(12 h雨量达236.4 mm)显著超过了“81.7”低涡暴雨. 因此, 对此次西南低涡成熟期的三维结构特征进行分析, 有助于丰富和提高我们对西南低涡的认识.

1 过程概况和大尺度环流

1989年我国长江流域梅雨后期, 四川盆地东部于7月8~10日发生了一次特大暴雨天气过程. 强降水集中出现在29°~32°N、105°~110°E的区域内, 过程总降水量大于

* 本工作得到攀登B项目“青藏高原对气候和灾害性天气影响”预研经费资助.
1996-12-09收到, 1997-10-15收到再改稿.

200 mm 的面积达 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中有 4 个县的雨量超过 400 mm, 降水中心的武胜县达 505 mm, 其强度超过了著名的“81.7”特大暴雨. 由于降水持续时间较长, 加之降水集中, 引发川东地区发生大面积洪涝和山体滑坡等地质灾害. 从本次过程的逐时雨量资料来看, 特大暴雨由 3 个强降水时段构成, 分别是 8 日 08~16 时, 9 日 02~08 时, 9 日 20 时~10 日 23 时. 暴雨初期的两次强降水主要由 700 hPa 梅雨切变线和低空急流相互作用引起, 而后一次强降水则和西南低涡的强烈发展密切相关. 无论是降水强度, 还是雨区面积, 后者都远大于前两次.

本次暴雨过程是在稳定的大尺度环流形势下发生的. 500 hPa 中高纬地区为标准的梅雨环流(双阻型), 副高稳定, 脊线位于 25°N 附近, 588 dagpm 等值线由腾冲经重庆、汉口到杭州一线. 700 hPa 江淮梅雨切变线西伸至四川盆地, 云贵到四川盆地为一支较强的偏南暖湿气流, 这支气流的活跃和加强是导致暴雨天气发生和低涡发展的重要外部因素.

2 计算和分析方法

在分析西南低涡结构及确定低涡中心位置时, 需要了解低涡区域内部和邻近区域内的涡度、散度及其他物理量分布特征. 为此, 根据作者提出的直接利用观测资料计算场空间任一点涡度、散度的方案^[8]

$$\zeta_{(x,y)} = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \left(-\frac{1}{2C}\right) \frac{1}{\sum_{k=1}^n w_k} \sum_{k=1}^n w_k \{ (x-x_k)[v_k - v_{(x,y)}^0] - (y-y_k)[u_k - u_{(x,y)}^0] \} + \left(-\frac{1}{2GC}\right) \frac{1}{\sum_{k=1}^n w'_k} \sum_{k=1}^n w'_k \{ (x-x_k)[dv_k - dv_{(x,y)}^0] - (y-y_k)[du_k - du_{(x,y)}^0] \} \quad (1)$$

$$D_{(x,y)} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \left(-\frac{1}{2C}\right) \frac{1}{\sum_{k=1}^n w_k} \sum_{k=1}^n w_k \{ (x-x_k)[u_k - u_{(x,y)}^0] + (y-y_k)[v_k - v_{(x,y)}^0] \} + \left(-\frac{1}{2GC}\right) \frac{1}{\sum_{k=1}^n w'_k} \sum_{k=1}^n w'_k \{ (x-x_k)[du_k - du_{(x,y)}^0] + (y-y_k)[dv_k - dv_{(x,y)}^0] \} \quad (2)$$

对低涡内部及其邻域内的任一点处之涡度 ζ 和散度 D 进行诊断. 式中 x_k, y_k 为测站坐标, n 为参与计算某点 (x, y) 物理量的资料样本数, 有关该公式的详细情况可参见文献[8].

对于其他物理量(如 θ_s 等), 采用文献[9]的分析方案:

$$f_{(x,y)} = \frac{\sum_{k=1}^n w_{k(x,y)} \cdot f_{(x_k,y_k)}}{\sum_{k=1}^n w_{k(x,y)}} + \frac{\sum_{k=1}^n w'_{k(x,y)} \cdot Df_{(x_k,y_k)}}{\sum_{k=1}^n w'_{k(x,y)}} \quad (3)$$

计算出低涡区域内任一点处的物理量值。根据西南低涡活动的地理位置,在计算分析中,采用52、53、56、57、59区的高空观测资料,分析范围为 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 、 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ (为了突出低涡的结构特征,文中插图仅给出低涡区域附近 $104^{\circ}\sim 108^{\circ}\text{E}$ 、 $29^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 的计算结果),分析格距在低涡中心附近为 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,其余为 $0.2^{\circ}\times 0.2^{\circ}$ 。

西南低涡是700 hPa上出现在西南特定地区的闭合气旋系统,在低涡中心处正涡度最大。因此,可通过式(1)、(2)、(3)计算出低涡邻域内任意点的涡度和其他物理量分布,确定出低涡区域内正涡度中心的具体位置,进而较准确地确定出西南低涡的中心位置。利用文献[12]的方案,沿任意方向、任意地点进行剖面分析,揭示出低涡的结构特征。

3 西南低涡初生阶段的结构

7月9日08时西南低涡在700 hPa西南强风带延长线和切变线交点之右侧生成,中心C位于南充附近(图1a)。此时,西南低涡还是一个浅薄天气系统,其正涡度仅限于500 hPa以下,强中心位于850 hPa附近,强度达 $16.2\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ (图1d)。从低涡区域内部及其邻近地区的散度场分布来看,散度场与低涡的配置极不协调。在850、700 hPa上,低涡区域内部为辐散气流控制,且低涡中心处辐散最强,700 hPa上强度达 $4.3\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ (图1b);而低涡中心以外100 km的邻域均为辐合场控制,强辐合区位于低涡东北侧的切变线上,中心强度为 $-6.8\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。本例低涡的这种散度场分布与文献[1][3][7][10]等揭示的特征完全不同。

从综合表征温湿特征的 θ_w 分布来看,西南低涡处于 θ_w 大值区内(图1a), θ_w 锋区位于低涡北侧300 km处。可见,在初生阶段,低涡尚未受到冷空气的影响,对流层中、低层低涡内部充满了高能暖湿空气。从低涡区内 θ_w 的垂直分布看,在850~500 hPa间, θ_w 随着 p 的减小而减小,气柱表现出较强的不稳定性,有利于低涡区内对流的发生、发展。

从低涡内部及其邻域内的云顶温度和降水分布可见(图1c),对流和较强的降水天气并没有发生在低涡中心,也没有发生在低涡东北部的强辐合区内,而是发生在低涡的东南象限。这种异常配置与边界层流场的强迫作用密切相关(图略)。

4 西南低涡成熟期的结构特征

经过12 h的发展,低涡已达到相当强度,正涡度由地面贯穿至300 hPa,并在700 hPa和400 hPa高度上分别有一个最大和次大中心,强度分别达 $26.2\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 和 $12\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 。对流层高层200 hPa对应着强的负涡度值,强度为 $-13.7\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ (图2)。这种涡度垂直分布特征与Kou^[1]等分析的“81.7”低涡成熟期的结构完全一致。但由于此时低涡中心轴线尚未达到完全垂直(向北倾斜0.5纬距),对流发展也不旺盛,因此低涡的发展尚未到达极盛成熟期。又经历了12 h发展,从卫星云图上的云顶温度、降水和位势高度等资料的连续演变来看,涡区内的对流和降水自9日23时起逐渐增强,到10日03时达到最强,并一直持续到10日12时,此后逐渐减弱;700 hPa低涡中心附近的位势高

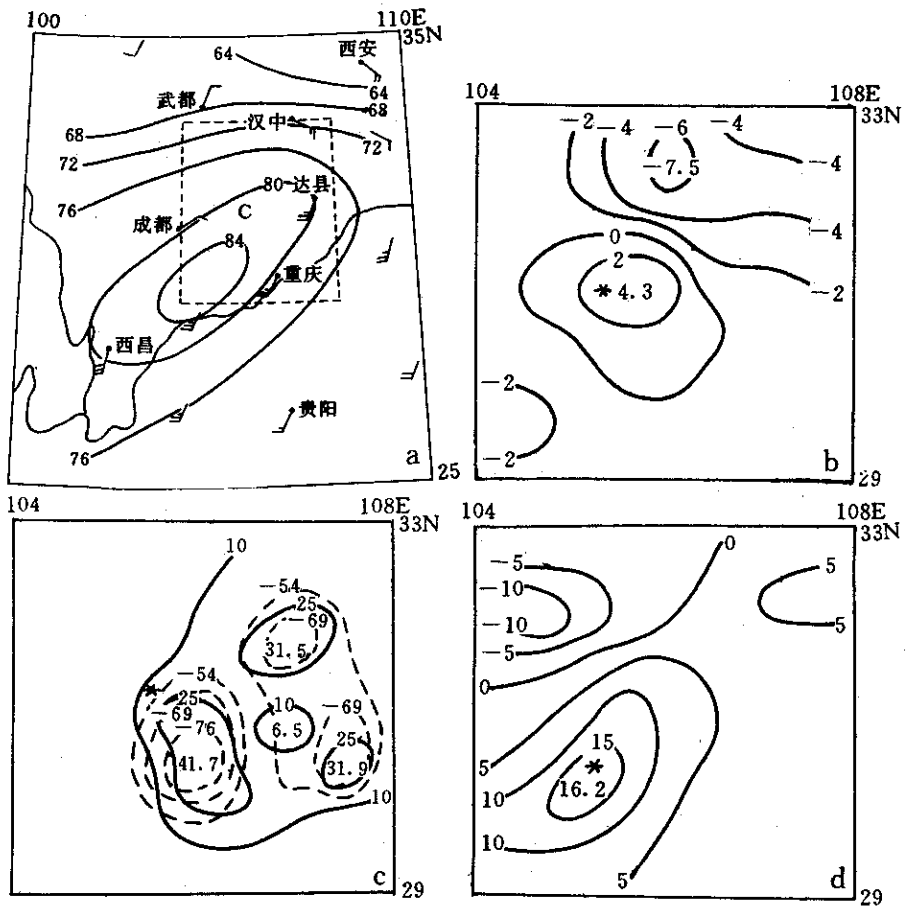


图1 1989年7月9日08时西南地区物理量分布(*为低涡中心) (a) 700 hPa 风场和 θ_e (C) 分布(虚线框为物理量分析区) (b) 700 hPa 散度场($\times 10^{-5} s^{-1}$) (c) 9日08~20时降水量(实线, mm)与9日08时32分云顶温度(虚线, C)等值线 (d) 850 hPa 涡度场($\times 10^{-5} s^{-1}$)

度也在10日08时降至最低;表明西南低涡在10日08时前后达到了极盛成熟期。

4.1 涡度场特征

图3展示了10日08时穿过西南涡中心(105.7°E、31.2°N)的经向和纬向涡度垂直剖面。由图可见,在低涡区域内,正涡度从边界层一直贯穿至对流层顶的100 hPa以上,大值轴线完全处于垂直状态,在700和150 hPa分别有一个正涡度大值中心和次大中心,强度为 $29.3 \times 10^{-5} s^{-1}$ 和 $14.5 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。这与 Kou^[1]等指出的发展成熟的低涡对流层高层200 hPa上为负涡度的结论完全相反,也与骆红等^[10]指出的成熟期的低涡为斜压结构的结果不同。促使本例低涡的正涡度达到如此高度的原因是一个值得研究的问题。

4.2 散度场及其垂直运动特征

图4展示了10日08时低涡的散度场分布。由图可见:在西南低涡中心及其东部,

从边界层到 300 hPa 均为辐合场控制，边界层内，强辐合区位于低涡的东南象限，中心辐合值达 $-6.9 \times 10^{-5} s^{-1}$ ；边界层以上，强辐合区位于低涡的东北象限，700 hPa 辐合强度为 $-19 \times 10^{-5} s^{-1}$ ；在低涡西部，300 hPa 以下均为辐散场控制；在 200 hPa 上，除低涡东北象限为较强的辐合外，其余均为较强的辐散场控制，强辐散位于低涡东南象限，中心值达 $9.4 \times 10^{-5} s^{-1}$ 。低涡区内如此深厚的辐合流以及 200 hPa 强的辐散流是“81.7”低涡所不及的。

大气的垂直运动，用连续方程对散度场进行积分来计算，但误差较大。由于降水量和对流发展与垂直运动关系密切，因此，采用低涡区内的降水量和云顶温度来反映垂直运动是合适的。由低涡区内的 12 h 降水量分布图(图 4b)，以及卫星云图上云顶温度的变化(图略)，均反映出低涡东部为上升运动，西部为下沉运动，且强上升运动始终位于低涡的东南象限，距低涡中心 100~200km。这与 Kou^[1] 等指出的成熟期的低涡涡度场与垂直运动同相的

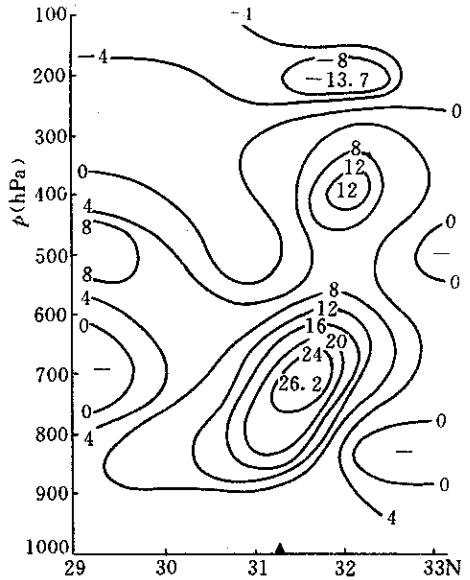


图 2 1989 年 7 月 9 日 20 时穿过西南低涡中心沿 105.7°E 的涡度垂直剖面图(▲表示低涡中心，下同)

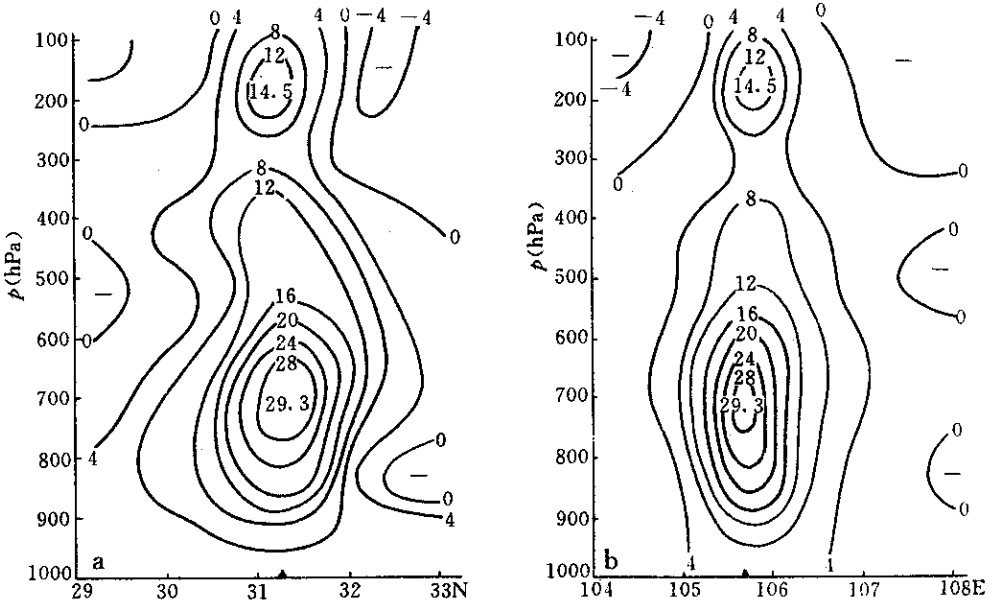


图 3 1989 年 7 月 10 日 08 时穿过西南低涡中心(105.7°E, 31.2°N)处的经向(a)和纬向(b)涡度剖面图(说明同图 2)

结果不同.

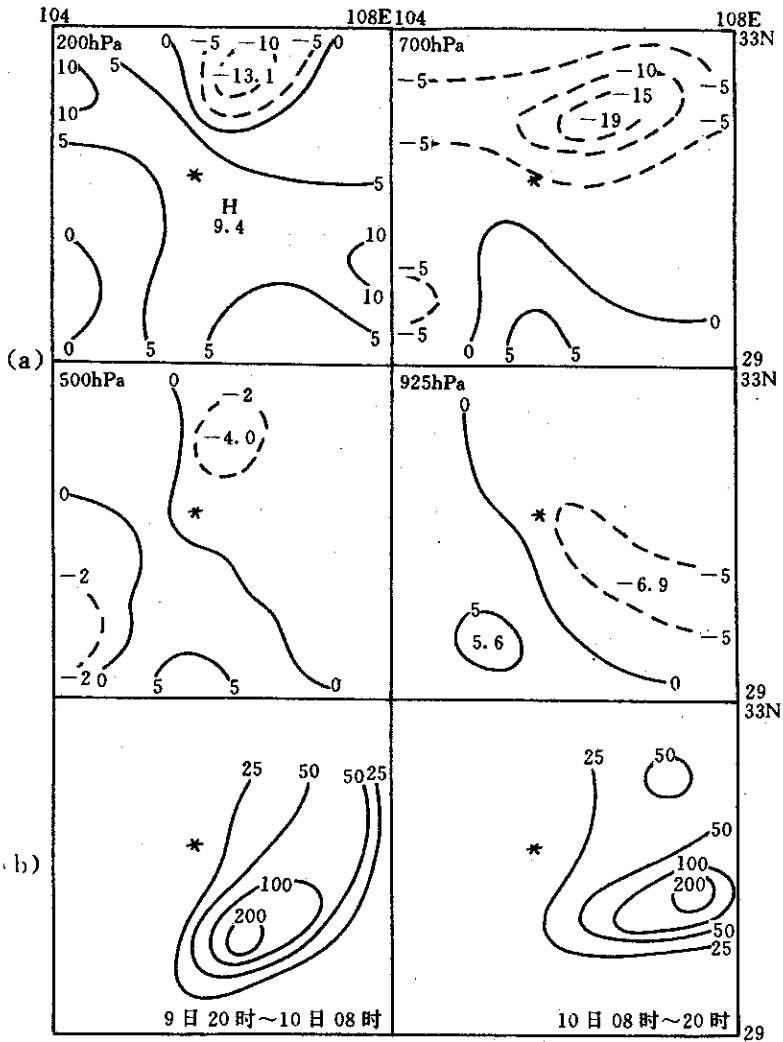


图4 (a)1989年7月10日08时925~200 hPa散度场($\times 10^{-5} s^{-1}$) (b)前后12 h降水量分布(mm)(*为低涡中心)

4.3 中尺度流场和高度场特征

西南低涡是水平尺度为300~500 km的中- α 系统,其流场和气压场都比较弱,自身的环流特征常被强大的环境西风基流所掩盖,闭合气旋和低压环流仅在基流十分弱的对流层低层表现出来.因此,过去直接使用包含大中尺度信息的混合场来分析西南低涡流场和气压场结构的方法是不尽合理的,也难以揭示低涡中尺度结构的本质特征,有必要将低涡流场同大尺度环境场区分开来.利用文献[11]的方案,取 $c_1 = 4000 \text{ km}^2$, $c_2 = 60000 \text{ km}^2$, $G_1 = G_2 = 0.3$,构造了一个通道波长为300~900 km,最大响应波长为600 km的中尺度带通滤波器.利用该滤波器,能有效地将西南低涡和大尺度环境场分离

开。图 5 展示了由边界层到对流层高层的低涡流场和高度场结构。由图可见，在中尺度流场上，西南低涡从边界层到对流层高层均表现为一致的闭合气旋环流，气旋中心轴线几乎垂直。在 300 hPa 以下，低涡区内气流呈气旋式流入，其上为气旋式流出。从中尺度高度场上看，低涡区域从边界层到 200 hPa 以上均为低位势区，低值中心与低涡中心有一定相差，位于低涡中心东侧 100 km 处，其中心轴线也呈垂直状态。而在低涡南侧有一弱的高位势区。这与人们长期以来所形成的西南低涡在高层对应为反气旋和高脊的概念模式^[7]是不同的。

4.4 温湿场特征

从穿过低涡中心处滤掉大尺度环境温度场后的中尺度扰动温度之南北剖面(图略)可见，本例低涡从对流层低层到高层均为一致的暖性结构，且低层的暖性程度更强，在对流层高层 200 hPa 上，未见到有如文献[1, 7]揭示的温度偏高 1.5~2 °C 的暖心结构。从低涡区内的湿度场来看(图略)，整个低涡区内从低层到 200 hPa 均为高湿准饱和区， $(T - T_d) < 3$ °C，高比湿中心位于低涡的东南象限。从 θ_{se} 的垂直分布来看，在对流层中低层，除低涡东部的偏南区域 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$ ，即大气层结表现为对流不稳定外，其余大部大气层结均呈稳定态。可见，低涡区域内的热力特征是极不均匀的，这种不均匀性导致了低涡区内降水分布的非均匀特征。

4.5 水平动量特征

由低涡区内动量分布图(图 6)可见：低涡东侧的切向水平动量(南北风分量 v)要比西侧大好几倍，且其动量的径向切变也相当强，在 850~700 hPa 层达 10^{-4}s^{-1} 的量级；低涡区内水平动量的垂直分布也极不均匀，在低涡东侧，水平动量具有显著的垂直切变，边界层内的垂直风切变值高达 10^{-2}s^{-1} 以上的量级，而在低涡之西侧，整个对流层动量均匀，其垂直切变值要比东侧小一个量级以上。低涡水平动量的这种非均匀分布不仅有利于低涡东部中小尺度扰动发展，而且有利于低涡东移。

从图 6 还可以看出，在对流层中层的 500~300 hPa，西南低涡之西侧的切向分量是微弱的偏南气流，但这并不意味着低涡是一个浅薄系统。因为该层次上低涡后部的偏北风被较强的环境偏南风所抵消，从而在综合流场上表现为弱的偏南风。实际上，从滤掉大尺度环境场获得的西南涡中尺度流场(图 5a)可清楚地看出低涡后部为偏北气流。

5 减弱期西南低涡的结构

本例低涡在维持 10 余小时的强盛期后，逐步进入东移减弱阶段，10 日 20 时低涡移至 107.8°E、32.2°N。7 月 10 日 20 时穿过低涡中心处的涡度垂直剖面(图略)表明，在对流层低层，涡区内的相对涡度分布与成熟期相比变化不大，正涡度中心仍位于 700 hPa 上，中心强度略有减弱($+22.3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)；而在 400 hPa 以上，原伸展到 100 hPa 以上的正涡度全被负涡度取代，西南低涡减弱为 500 hPa 以下的浅薄系统。此时，冷锋已从低涡底部插入，850 hPa 以下低涡区降温显著，低涡由原来的暖性系统转变为斜压系统。

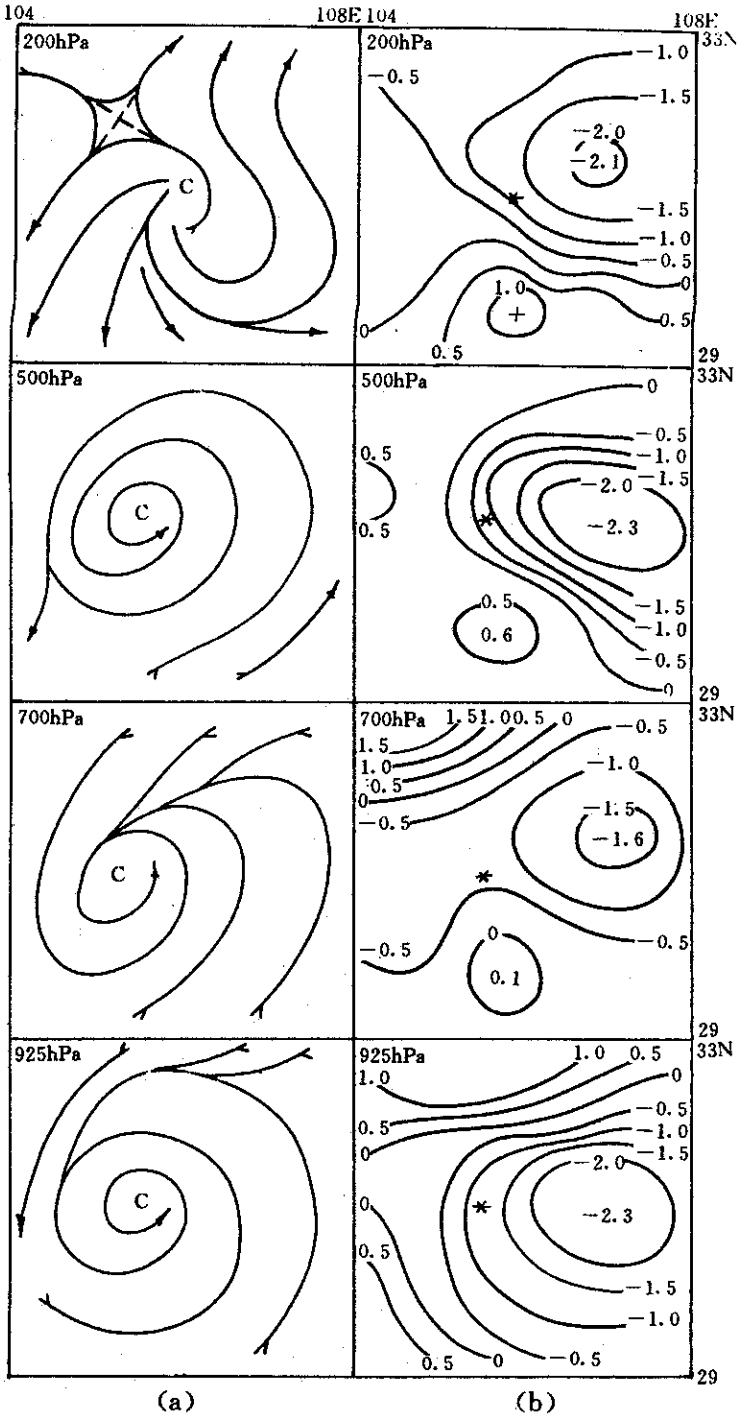


图5 1989年7月10日08时925~200 hPa (a) 中尺度流场和(b) 高度场(dagpm)

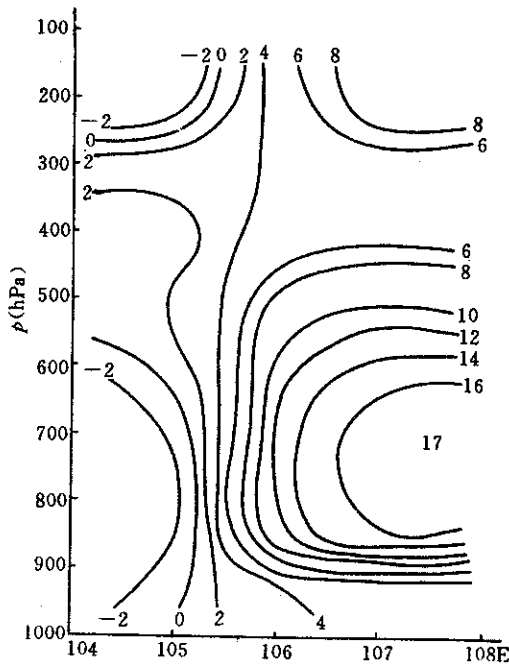


图 6 1989 年 7 月 10 日 08 时穿过低涡中心沿 31.2°N 所作的 v 分量纬向垂直剖面 (m/s)

6 小结与讨论

通过对 1989 年 7 月 10 日在川东地区强烈发展之西南低涡的综合分析, 揭示了本例低涡的结构特征, 初步结果如下:

(1) 本例低涡是在低层梅雨切变和低空急流相互作用下形成的。

(2) 本例低涡在初生阶段是一个 500 hPa 以下的浅薄天气系统, 低涡成熟阶段, 从边界层到对流层顶, 西南低涡不仅是一个深厚的闭合气旋系统, 而且还是一个深厚的暖湿低压系统(但不具暖心结构)。西南低涡还是一个非对称的准圆形系统。低涡在减弱阶段是一个斜压浅薄系统。受冷空气入侵影响, 对流层低层低涡为冷性结构。

本例低涡成熟期的结构在若干方面与过去的分析结果不同。因此, 有必要继续加强对低涡结构的个例分析, 以揭示西南低涡的完整结构特征。此外, 就本例低涡而言, 促使低涡区正涡度垂直伸展到 100 hPa 以上的原因以及西南低涡的流场中心和高度场中心的不一致是否与对流活动的非对称有关, 涡区内的强降水与低涡自身流场的强迫辐合有多大联系等等问题, 还值得我们作进一步的分析和探索。

致谢: 本工作得到王为德, 刘富明研究员和陈受钧教授的关心和支持, 谨致谢意。

参考文献

- 1 Kou Y H, Cheng L and Anthes R. A. Mesoscale analyses of Sichuan flood catastrophe, 11~15 July 1981. *Mon. Wea. Rev.*, 1986, **114**: 1984~2003.
- 2 钱正安, 顾弧道, 颜宏, 等. 四川“81.7”特大暴雨和西南涡数值模拟. *气象学报*, 1990, **48**(4): 415~423.
- 3 黄福均. 西南低涡的合成分析. *大气科学*, 1986, **10**(4): 402~408.
- 4 卢敬华, 赵平. 一次西南低涡形成机制的数值试验. *低纬高原天气*, 1990, **3**(1): 47~53.
- 5 Wang Wei, et al. A diabatically driven mesoscale vortex in the lee of Tibetan plateau. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**: 2542~2561.
- 6 程麟生, 郭英华. “81.7”四川暴雨期西南涡生成和发展的涡源诊断. *大气科学*, 1988, **12**(1): 18~26.
- 7 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986. 1~170.
- 8 陈忠明, 李祖滨, 缪强, 等. 直接利用观测资料计算涡度、散度的一种方案. *大气科学研究与应用*, 1997, **2**(1): 22~31.
- 9 陈忠明. 客观分析的一种高效省时计算方案. *低纬高原天气*, 1994, **7**(1): 27~32.
- 10 骆红, 郁淑华. 川东北涡的合成分析. *高原气象*, 1991, **10**(2): 187~193.
- 11 陈忠明. 用常规资料获取中尺度气象信息的简便方案. *气象*, 1994, **20**(1): 39~42.
- 12 陈忠明. 剖面图的制作方案与应用研究. *气象*, 1997, **23**(1): 6~10.

A CASE ANALYSIS ON MESOSCALE STRUCTURE OF SEVERE SOUTHWEST VORTEX

Chen Zhongming Miao Qiang Min Wenbin

(*Sichuan Research Institute of Meteorological Science, Chengdu 610072*)

Abstract

Diagnostic analysis on a case of southwest vortex over the eastern Sichuan basin in 8~10 July 1989 reveals its three-dimensional structure in mature stage. The results show that the southwest vortex is a mesoscale cyclone and depression throughout the troposphere. Its cyclonic vorticity could vertically extend to 100 hPa, and center axis is nearly vertical. The distributions of momentum, stratification and vertical motion present asymmetry in the vortex.

Key words: Southwest vortex Mesoscale structure Diagnostic analysis