

热带气旋与西南低涡相互作用的个例研究

I. 诊断分析*

P44 A

陈忠明

黄福均

何光碧

(四川省气象科学研究所, 成都 610072)

(四川省气象台, 成都 610072)

摘要 通过对1989年7月8~11日西南低涡与活动于南海的强热带气旋发生远距离相互作用的诊断分析, 揭示出中低纬系统相互作用在促进西南低涡发展和暴雨发生中所起的一些重要作用。

关键词: 西南低涡; 热带气旋; 暴雨

1 引言

热带气旋与中高纬度地区天气系统的相互作用是一类典型的系统相互作用过程, 它对天气系统的发展和暴雨等灾害性天气的发生具有极其重要的意义, 因而受到气象工作者的广泛重视。到目前为止, 人们对西太平洋热带气旋与中高纬度天气系统在我国东部地区发生相互作用并诱发暴雨天气进行了较多的研究, 取得了许多有意义的成果^[1~4]。但对热带气旋如何与我国西部地区的天气系统发生相互作用关注较少; 特别是对热带气旋与西南地区重要天气系统——西南低涡的相互作用问题, 无论是针对热带气旋的研究^[5], 还是针对西南低涡的研究^[6], 过去都很少涉及到。尽管热带气旋与西南低涡的相互作用在热带气旋与西风带系统相互作用中所占的比例不大, 在西南低涡与其他天气系统相互作用中所占的比例也较小, 然而, 一旦这两个系统发生相互作用, 就会导致西南低涡的强烈发展和区域性大暴雨天气的发生(如1989年7月8~11日四川盆地东部的特大暴雨)。因此, 开展热带气旋与西南低涡相互作用的研究, 对丰富西南低涡发展机理的认识和暴雨预报水平的提高具有积极意义。

本文以1989年7月8~11日四川盆地的一次特大暴雨过程为例, 对热带气旋与西南低涡的相互作用进行了诊断分析, 揭示了两者远距离相互作用对西南低涡发展和暴雨发生的影响。

2 热带气旋与西南低涡相互作用的过程

过去人们在研究热带气旋与副热带地区天气系统的相互作用时, 比较重视登陆热带气旋与其他低值系统的相互作用^[2~4], 也分析了热带气旋外围环流对远距离暴雨发生的

2000-10-19收到, 2001-04-16收到修改稿

* 国家自然科学基金资助项目49775263、四川省青年科技基金和中国气象局青年科技基金共同资助

影响^[2], 但较少注意南海热带气旋外围环流与西南低涡的直接相互作用。然而, 1989年7月8~11日西南低涡的异常发展及特大暴雨的发生就是两者相互作用的结果。图1给出了1989年7月8~10日850 hPa流场演变, 由图可见8日08:00至9日08:00, 热带气旋尚在西太平洋及菲律宾附近活动, 长江流域以南地区为一致的西南气流, 西南低涡位于西南风带北侧的四川盆地。到了9日20:00, 由于热带气旋快速西北移至南海中部, 导致副高脊线北推, 整个长江流域以南处于副高西南部的东南气流控制下。热带气旋东北部的偏东南气流叠加在副高西南侧的东南气流上, 在广州、柳州、河池、贵阳、重庆至达县一线形成一支风速大于 8 m s^{-1} 的东南风带, 与西南低涡东侧的偏东南气流融为一体。到10日08:00, 热带气旋继续向西北移行, 上述带状区内的东南风加大至 10 m s^{-1} 以上。这一东南风带将热带气旋和西南低涡有机地联系起来, 产生相互作用, 使热带地区的水汽和能量持续不断地向西南涡区内输送, 改变低涡及其邻域内的能量和风、压场分布, 激发西南低涡发展和暴雨天气的发生。

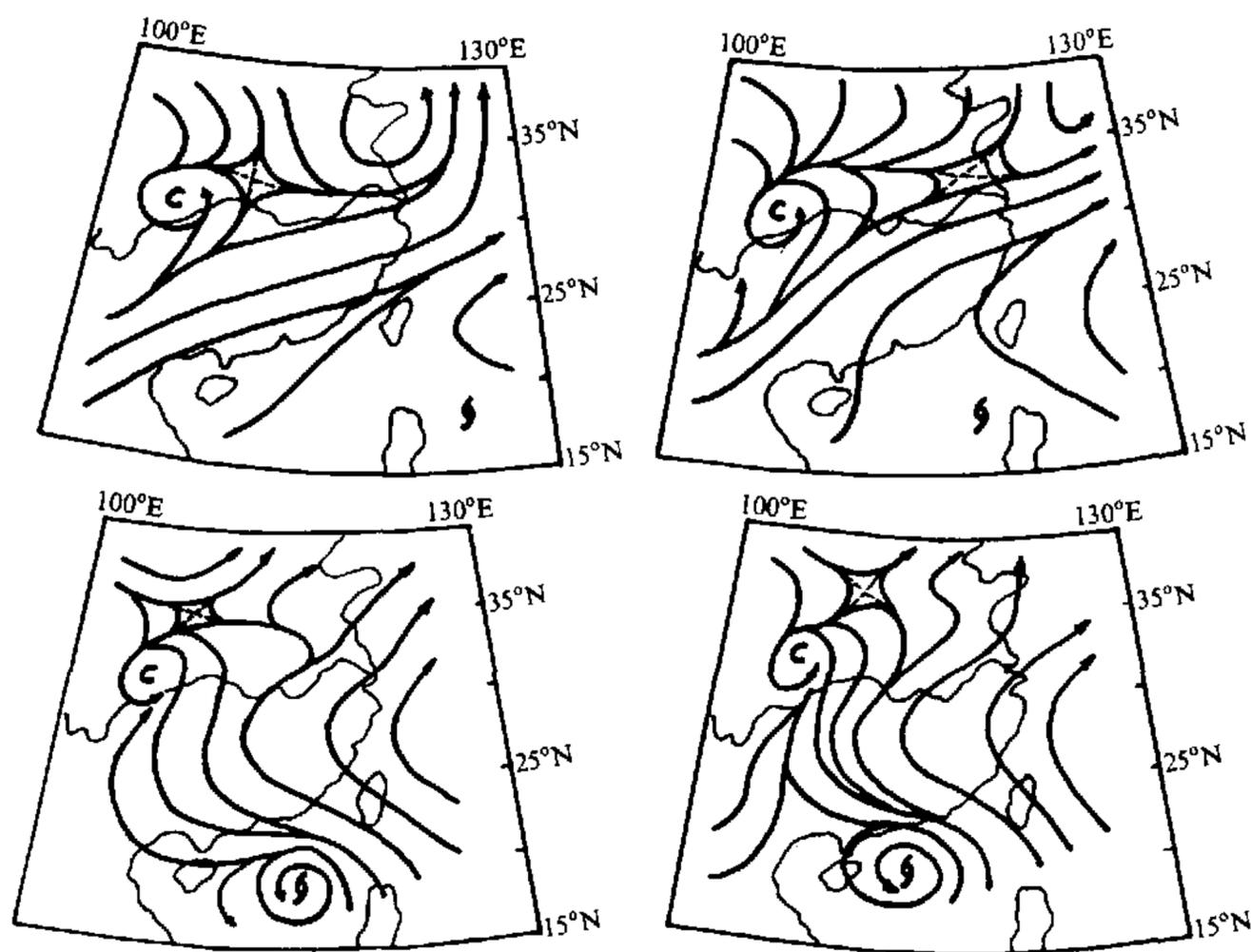


图1 1989年7月8~10日850 hPa流场
(a) 8日08:00; (b) 9日08:00; (c) 9日20:00; (d) 10日08:00

9日20:00至10日20:00之间的卫星云图资料更清晰地展示了上述带状东南气流在联系两者并产生相互作用的直观图像。由图2可见, 在上述带状东南气流的左侧, 一共有6个对流单体呈线状排列, 并随着东南气流引导向北传播, 合并到西南低涡东部的主体云图之中, 形成一个强大的中尺度复合体(MCC), 维持了十余小时。

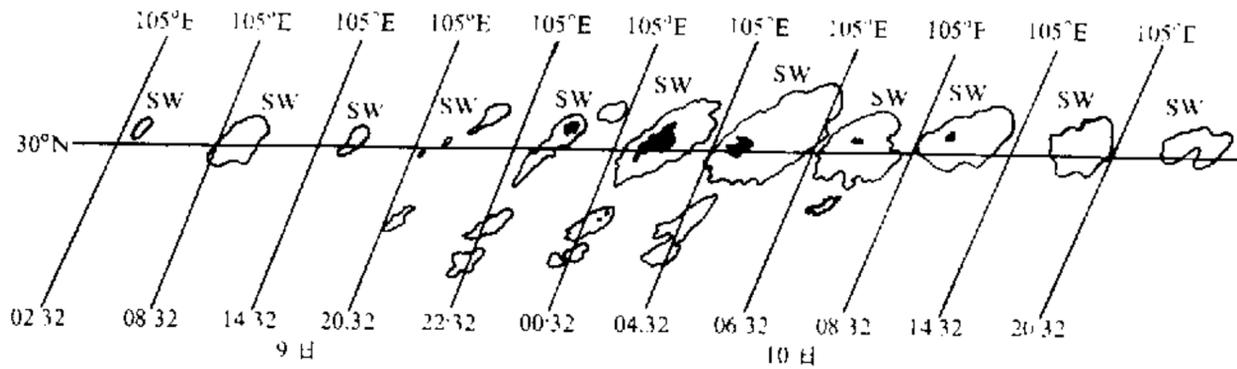


图2 1989年7月9~10日热带气旋与西南低涡相互作用期间云团演变特征
黑色区云顶温度低于 -82°C

可见, 热带气旋外围环流通过与西南低涡东侧气流的贯通, 实现了两者的相互作用, 为低涡发展及暴雨天气的发生提供了有利的环境条件。

3 热带气旋与西南低涡相互作用促进了低涡发展

图3展示了西南低涡强度的演变特征。由图可见, 在8日08:00低涡生成后, 一直至9日08:00其强度都少有变化, 850 hPa中心涡度值维持在 $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右。从9日08:00后, 低涡开始逐渐加强, 于10日08:00达最强, 850 hPa中心涡度值达 $23.2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 此后, 低涡逐渐减弱。可以看出, 低涡的发展阶段是和热带气旋外围环流与低涡相互作用的时段一致的。两者的相互作用对低涡的发展产生了极为重要的作用。

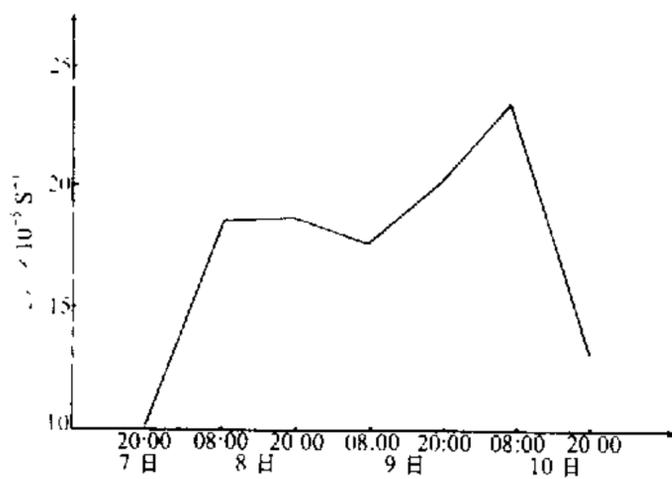


图3 1989年7月7~10日850 hPa西南低涡中心涡度值演变

可以看出, 低涡的发展阶段是和热带气旋外围环流与低涡相互作用的时段一致的。两者的相互作用对低涡的发展产生了极为重要的作用。

3.1 相互作用改变了低涡邻域内的非平衡性质

文献[8,9]的研究表明, 大气运动的非平衡动力强迫可通过激发散度场演化来促进中尺度系统的发展。为此, 我们

计算了8日08:00至10日08:00 850 hPa低涡及其邻域内的非平衡值。图4展示了热带气旋和低涡相互作用前后两个时次 $-\nabla^2 E + K \cdot [\nabla \times (f + \zeta)]V$ 的分布。由图可见, 在相互作用发生前(9日08:00前), 西南涡中心及其100 km邻域内 $-\nabla^2 E + K \cdot [\nabla \times (f + \zeta)]V$ 均为正值, 且被 $10 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ 的等值线包围, 这种非平衡强迫将激发辐散增长, 显然不利于低涡的维持和发展。分析此时段低涡维持的条件发现, 500 hPa上高空槽前正涡度平流强迫是主要原因。在相互作用发生(9日20:00)后, 这种相互作用改变了低涡东部的风压场结构, 使低涡区域的非平衡值发生变化。9日20:00低涡中心及其除西南象限的邻域内, 其非平衡值 $-\nabla^2 E + K \cdot [\nabla \times (f + \zeta)]V$ 小于0, 尤其是较9日08:00显著减小, 负值中心距低涡中心不足100 km, 强度达 $-19.3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ 。这种强非平衡能激发低层大气辐合的持续增长(10日08:00的散度场实况正是如此), 促

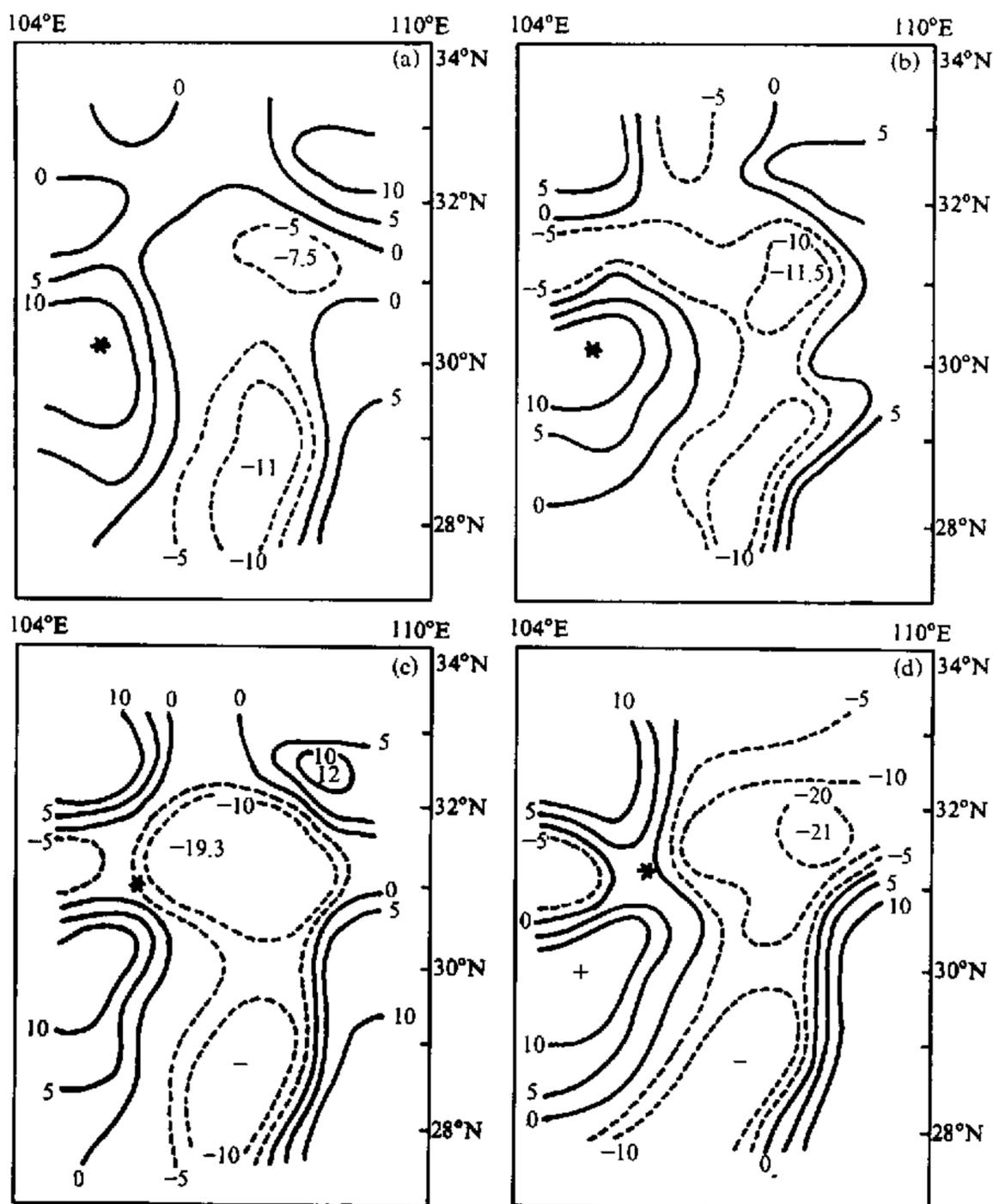


图4 1989年7月8日~10日850 hPa非平衡值分布(单位: $\times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$, *为低涡中心)

(a) 8日20:00; (b) 9日08:00; (c) 9日20:00; (d) 10日08:00

进低涡区域内的正涡度 $[-(f+\zeta)\nabla \cdot V > 0]$ 增大, 激励西南低涡的加速发展。10日08:00的情况与9日20:00类似, 但涡心已处于非平衡值零线附近, 强非平衡负值远离低涡中心几百公里, 这预示着低涡的东移或更替。

3.2 相互作用改变了低涡邻域内的暖湿平流结构

孙淑清等^[10]在研究长江流域低涡发生、发展时, 曾提出一种暖平流与风切变耦合相互作用激发低涡发展的机制。类似地, 在假绝热近似下有

$$\left(\frac{\partial D}{\partial t}\right)_{\text{平流}} = \frac{1}{\sigma_m} \nabla(V \cdot \nabla \theta_{se}) \cdot \frac{\partial V}{\partial P} \quad (1)$$

此式表明, 当暖湿平流非均匀分布与风垂直切变形成适当的配置时, 两者的耦合将激发辐合增长。比较热带气旋与西南低涡相互作用前后暖湿平流分布的变化(图5)可见, 在相互作用发生前, 前期沿高原边坡南下的弱冷空气受云贵高原的阻挡而停留在四川盆地南部变性, 致使低涡区域内, 南部为冷干平流, 中心及北部为暖湿平流, 则 $\nabla(V \cdot \nabla\theta_{se})$ 指向南, 它与低涡东侧的偏南风切变 $\partial V/\partial P$ (指向南) 耦合, 将激发辐散增长, 不利于低涡发展。而在相互作用发生后, 由于低涡东南侧暖湿输送带的建立, 在低涡中心及东南形成强的暖湿平流。在低涡西北部由于新的干冷空气入侵, 形成冷干平流。这种 θ_{se} 平流分布导致涡区内 $\nabla(V \cdot \nabla\theta_{se})$ 指向西北。另外, 因相互作用增强了低涡东部偏东南气流的垂直切变, 使方向指向东南, 数值增大。暖湿平流分布不均与

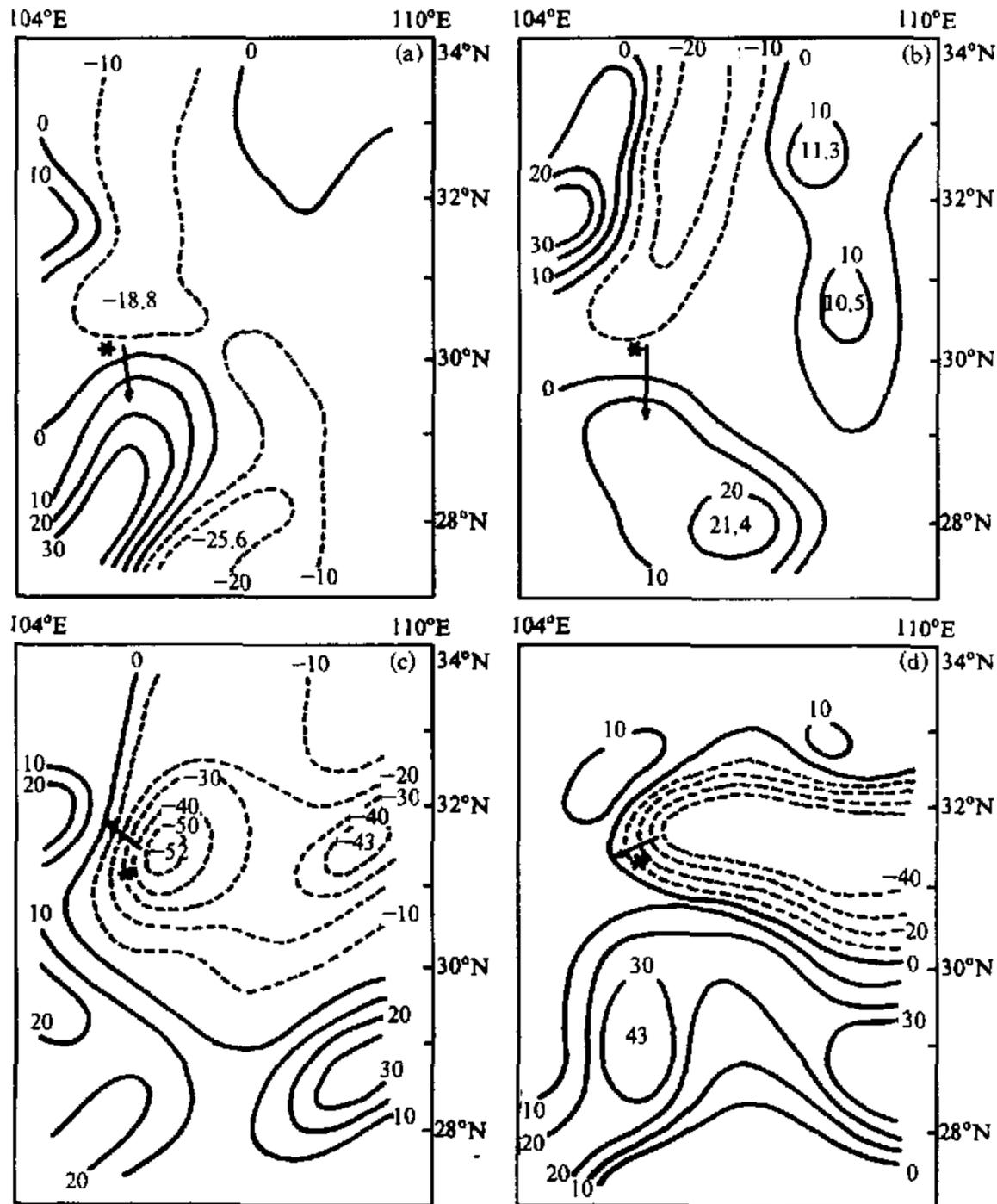


图5 1989年7月8日~10日850 hPa暖平流 $\nabla(V \cdot \nabla\theta_{se})$ 分布(单位: $\times 10^{-5} \text{ K s}^{-1}$, *为低涡中心)
(a) 8日20:00; (b) 9日08:00; (c) 9日20:00; (d) 10日08:00

垂直风切变的耦合使涡区内产生辐合增长, 促使西南低涡加速发展。

4 热带气旋与西南低涡相互作用对低涡结构的影响

关于西南低涡结构的研究, 过去已经作了较多的个例分析研究工作, 但没能形成为大家所接受的模式性结论, 这里暂且以 Kou 等^[11]的分析结果给出一个概貌。他们认为: “成熟发展期的西南低涡内部充满气旋性涡度, 从地面伸展到 250 hPa, 几乎没有倾斜; 涡内有强的垂直运动及高 θ_{se} 值, 水平动量均匀分布, 涡度场和垂直运动在涡的核心同相。”本例低涡的情况怎样? 热带气旋与西南低涡的相互作用对低涡的结构有什么影响? 对第一个问题, 文献[12]已作了分析, 下面我们着重分析后一个问题。

4.1 相互作用改变了低涡的暖湿结构

分析相互作用发生前后西南低涡中心及其邻域内的 θ_{se} 变化(图略)发现, 在相互作用发生前的 9 日 08:00, 西南低涡区内, 850 hPa 假相当位温 θ_{se} 低涡东部高于西部, 重庆与成都差值为 6 K, 低涡均处于暖湿气流控制下, 非对称性不显著。但到了 9 日 20:00, 由于热带气旋与低涡的相互作用, 所建立的暖湿气流带不断向低涡东部输送水汽和能量, 使东部地区 θ_{se} 增高。而低涡西部由于干冷空气入侵, θ_{se} 下降明显, 850 hPa 重庆与成都的差值达 18 K, 使涡区内的 θ_{se} 分布呈东南大、西北小的非对称分布, 增强了涡区大气的湿斜压特征, 改变了低涡原来相对均匀一致的暖湿结构。

4.2 相互作用改变了低涡的动量结构

分析相互作用发生前后两个时次的 850 hPa 低涡动量结构发现, 在相互作用发生前, 西南低涡东西两侧的动量(利用文献[13]的滤波分析方法, 取 $C_1 = 4\ 000\ \text{km}^2$, $C_2 = 60\ 000\ \text{km}^2$, $G_1 = G_2 = 0.3$, 构造一个通道波长为 300~900 km, 最大响应波长为 600 km 的中尺度滤波器。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, 由此获取的中尺度滤波场, 反映了西南低涡系统自身的主要特征。)分布比较均匀, 西部略大于东部, 低涡中心附近风速比较一致, 在 $4\ \text{m s}^{-1}$ 左右(图 6a)。而在相互作用发生后, 尤其是到了 10 日 08:00 低涡发展成熟后, 由于热带气旋加速西移, 增强了其外围的东南风带。该东南风带向低涡区东部输送大量的南风动量, 加大了低涡区东部的南风强度, 在低涡中心以东 100 km 左右, 南风达 $12\ \text{m s}^{-1}$, 而此时低涡西部的偏北风速尚不足 $4\ \text{m s}^{-1}$ (图 6b), 使西南低涡变成一个动量非对称的涡旋系统。

4.3 相互作用改变了低涡区域内的大气层结特征

分析相互作用发生前后低涡区内大气层结的分布特征发现, 热带气旋与西南低涡相互作用所建立的暖湿气流输送带极大地增强了低涡东部, 尤其是东南部的大气层结不稳定性, 850 hPa 与 500 hPa 的 θ_{se} 差值为 4 K。低涡西南部由于干冷空气入侵, 使层结稳定性增强, 850 hPa 与 500 hPa 的 θ_{se} 差值为 -8 K。两者对比, 使得低涡区内的大气层结特性也表现出显著的非对称性。

4.4 相互作用改变了低涡的动力结构

从相互作用发生前后低涡区域散度场的分布来看(图略), 在相互作用发生前, 低涡中心 100 km 邻域内均为辐散, 低涡外围为辐合, 强辐合位于低涡的东北象限。而在相互作用发生后, 低涡中心及其北部均为辐合, 且辐合强度显著增大, 在距涡心东北

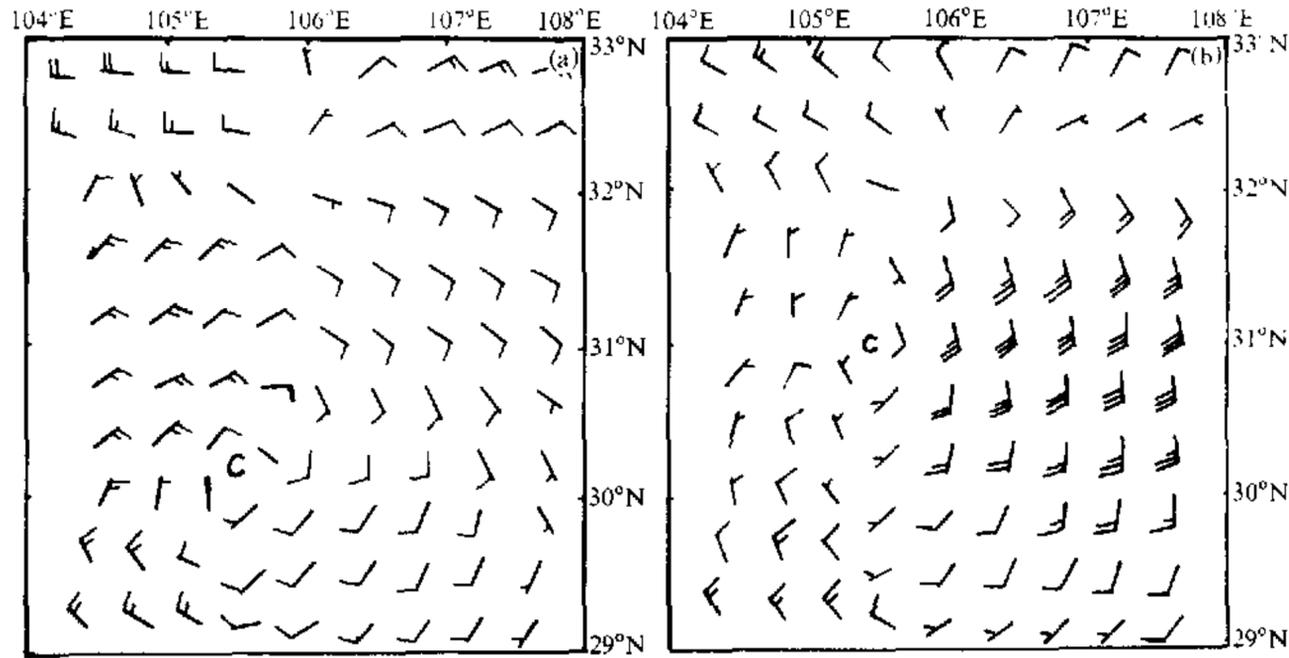


图6 1989年7月西南低涡区域及其邻域内的中尺度风场分布
(a) 9日08:00; (b) 10日08:00

100 km 处, 辐合值达 $-1.53 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; 辐散区则位于低涡的南部。这种散度场分布与相互作用使低涡东部偏南气流加强, 并导致东北辐合增强有关。

另外, 通过计算非地转涡度大小 $(-\frac{1}{f} \nabla^2 \Phi + \zeta)$, 可以用来诊断大气运动的非地转强弱。我们由此分析了相互作用发生前后西南低涡及其邻域内的非地转性质和强度变化。由图7可见, 相互作用不仅改变了低涡中心附近邻域内的非地转性质(非地转涡度由正转负), 而且使得低涡东部大气运动的非地转特性大大加强(非地转负涡度显著增

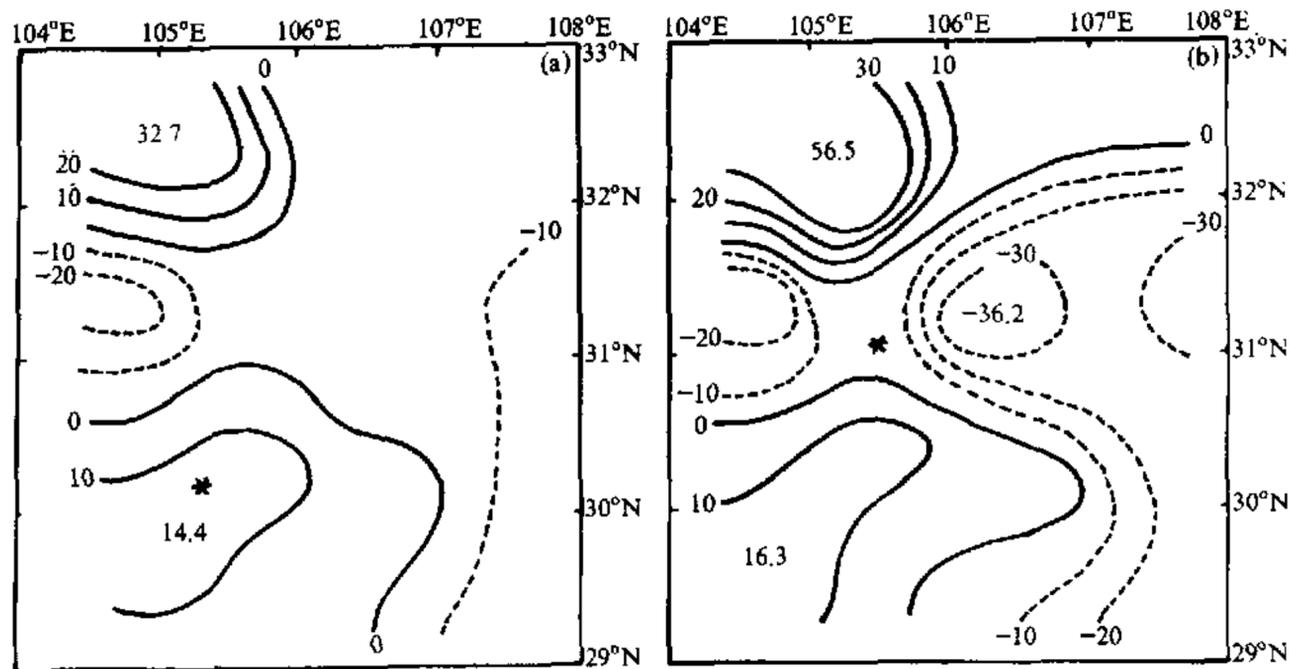


图7 1989年7月西南低涡区域及其邻域内的非地转涡度场分布 ($\times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$)
(a) 9日08:00; (b) 10日08:00

大), 低涡区域内大气运动的这种非地转分布对动量和质量分布的改变起着重要作用, 本例西南低涡位势高度低中心与流场中心不重合, 且偏于东侧(图略), 可能与此有关。

5 热带气旋与西南低涡相互作用激发暴雨天气

暴雨是在有利的大尺度环境条件下产生的。分析相互作用发生前后的雨强、雨区分布和持续时间可见。热带气旋与西南低涡相互作用后的雨强要强得多, 暴雨区面积要大得多, 持续时间要长得多。其主要原因是相互作用发生后, 建立了向暴雨区输送水汽和能量的通道(图8)。扩大了向暴雨区汇聚水汽和高能空气的范围。增强了低涡东侧暴雨区的对流不稳定层结, 提供了不稳定层结重建的物理机制。改变了低涡区内大气运动的非平衡性质, 建立了有利于低层大气辐合持续增长的风压场结构, 促进了低层上升运动的发展, 从而使热带气旋外围环流与西南低涡相互作用的区域产生持续性强降水天气, 12小时降水量达236mm, 引起川东地区发生洪涝灾害。

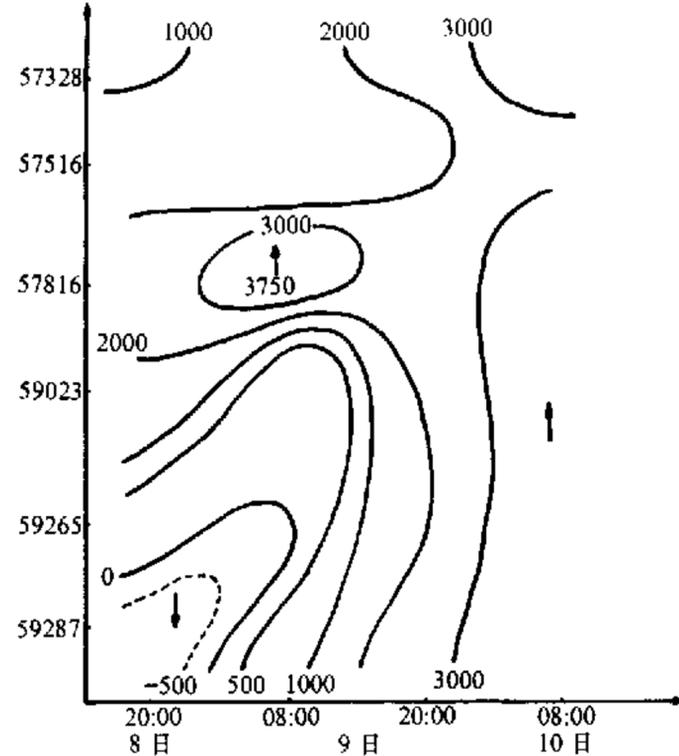


图8 1989年7月8~11日沿测站连线方向的 ω_{∞} 通量投影时间剖面(单位: $K m s^{-1}$)

6 结语

通过对1989年7月8~11日热带气旋与西南低涡相互作用的个例诊断, 使我们对两者相互作用促进西南低涡发展和暴雨发生的基本事实有了初步了解, 主要分析结果如下:

(1) 活跃于南海的热带气旋, 可通过其北侧偏东南低空强风带的向北伸展, 与四川盆地西南低涡东侧的偏南气流贯通, 实现两者的直接相互作用。建立水汽和能量输送带, 为处于内陆地区的西南低涡的强烈发展和特大暴雨天气的发生提供有利的环境场条件。

(2) 热带气旋与西南低涡的相互作用通过改变低涡邻域内的风压场分布, 使大气运动的非平衡性质发生改变, 促进低涡中心及其东部非平衡负值增强, 其动力强迫作用能激发低涡区内低层大气辐合和正涡度的持续增长, 激励低涡发展。

(3) 热带气旋与西南低涡相互作用所建立的能量输送带, 通过改变低涡邻域内的假相当位温平流场的分布与风垂直切变, 使两者的耦合作用激发涡区内辐合持续增长, 对促进西南低涡发展起积极作用。

(4) 热带气旋与西南低涡的相互作用通过改变低涡邻域内的风压场和能量场分布, 显著影响着低涡的结构。使西南低涡变成一个层结、温湿、动量等分布极不对称的系统。

(5) 热带气旋与西南低涡的相互作用还显著地改变着低涡区域内大气运动的动力性质, 使低涡东部的辐合和非地转性质大大增强。

(6) 热带气旋与西南低涡的相互作用通过向低涡区输送大量的水汽和热量, 为涡区内特大暴雨天气的发生提供水热条件。相互作用对低涡结构的改变, 促进低涡东部大气运动非平衡加剧, 其动力强迫激发的辐合和正涡度持续增长, 为涡区内特大暴雨的发生提供了动力条件。

参 考 文 献

- 1 蒋尚城, 中低纬系统的相互作用和大范围暴雨, 北方天气文集(4), 北京: 北京大学出版社, 1983, 1~10.
- 2 薛秋芳, 杨英, 王建忠, 丁一汇, 9406号台风与中纬度大气系统相互作用的数值分析, 中尺度天气和动力学研究, 北京: 气象出版社, 1996, 93~99.
- 3 谢安, 肖文俊, 登陆台风影响北方暴雨的数值试验, 北方天气文集(4), 北京: 北京大学出版社, 1983, 116~130.
- 4 姚祖庆, 唐新章, 丁金才, 登陆华东的台风大暴雨云团及环流场的研究, 暴雨·灾害, 北京: 气象出版社, 1997, 1(1), 107~114.
- 5 陈联寿, 丁一汇, 西太平洋台风概论, 北京: 科学出版社, 1979, 1~200.
- 6 卢敬华, 西南低涡概论, 北京: 气象出版社, 1986, 1~170.
- 7 陈久康, 丁治英, 高低空急流与台风环流耦合下的中尺度暴雨系统, 中尺度天气和动力学研究, 北京: 气象出版社, 1996, 171~179.
- 8 陈忠明, 大气内部非平衡激发暴雨天气的动力诊断, 科学通报, 1992, 14, 1432~1434.
- 9 陈忠明, 闵文彬, 刘富明, 李祖滨, 大气内部非平衡强迫行为与“94·6”华南暴雨, 1994年华南特大暴雨洪涝学术讨论会论文集, 北京: 气象出版社, 1996, 87~92.
- 10 孙淑清, 田生春, 朱翠娟, 陈怀义, 长江中游低涡的发生发展及其与暴雨的关系, 长江流域暴雨文集, 北京: 气象出版社, 1982, 125~133.
- 11 Kou, Y. H. et al., Mesoscale analyses of Sichuan flood catastrophe, 11-15 July 1981, *Mon. Wea. Rev.*, 1986, 114, 1984~2003.
- 12 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, 273~282.
- 13 陈忠明, 中尺度带通滤波分析, 气象学报, 1993, 50(4), 504~510.

A Case Study of Interactions between the Tropical Cyclone and the Southwest Vortex. Part I: Diagnostic Analysis

Chen Zhongming

(Meteorological Science Institute of Sichuan Province, Chengdu 610072)

Huang Fujun and He Guangbi

(Meteorological Observatory of Sichuan Province, Chengdu 610072)

Abstract The serious disastrous rainstorm event occurred in the Sichuan basin, in 8~11 July 1989. The interactions between the tropical cyclone and the southwest vortex played an important role in this event. Diagnostic analysis on the interactions between the tropical cyclone and the southwest vortex reveals its effects on the evolution of the southwest vortex and the occurrence of heavy rain.

Key words: southwest vortex; tropical cyclone; heavy rain