

一次西南低涡诱发川南特大暴雨的综合诊断

陶丽 李国平

(成都信息工程学院大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225)

摘要: 利用NCEP/NCAR $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点再分析资料, 对2007年7月8—10日发生在川南地区的西南低涡暴雨做了一次较为全面的诊断分析, 结果表明: (1) 500hPa高度场上小槽与700hPa西南低涡缓慢东移; 流场上有低层辐合高层辐散的结构; 垂直速度场上维持有较强烈的上升运动; 这些都为暴雨的发展和维持提供了有利的条件。(2) 对流层低层假相当位温随高度降低, 有不稳定能量的存在, 易于触发暴雨。(3) 湿位涡分析得出, MPV1垂直结构呈正负值叠加的配置是暴雨发生发展的有利形势, 强降水落区基本位于MPV1正负值交界的等值线密集带; MPV2的增大可使对流运动和降水加强。

关键词: 西南低涡, 暴雨, 诊断, 湿位涡

Diagnostic Analysis of a Heavy Rainfall in Southern Sichuan of China Induced by Southwest Vortex

Tao Li, Li Guoping

(College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology / The Key Laboratory of Plateau Atmosphere & Environment of Sichuan Province, Chengdu 610225)

Abstract: Using NCEP data of $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ with 6-hour interval, the evolution of Southwest Vortex (SW) causing heavy rainfall in Southern Sichuan of China during 8-10 July 2007 is comprehensive diagnosis. The results indicate that: (1) On height field, there is a small groove on 500hPa, and 700hPa southwest vortex moving eastward slowly; on flow field; there is a structure of convergence on the low level and divergence on the upper level; on vertical velocity field, there maintains a relatively strong upward motion, they provide a favorable circulation background for the development and maintenance of heavy rainfall. (2) On the lower troposphere, the pseudo-equivalent temperature decreases with height. The existence of an unstable energy can easily trigger heavy rainfall. (3) Moist potential vorticity analysis gives a superposition of the vertical structure of the configuration, both positive and negative, to provide a favorable situation in the development of heavy rainfall. Strong precipitation areas are basically located in the dense band contour of the positive and negative junction of MPV1; the increase of MPV2 is conducive to the intensification of convection and rain.

Key words: southwest vortex, heavy rainfall, diagnosis, moist potential vorticity

1 引言

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700hPa或850hPa上。地面气压场有时但不一定每次过程都出现闭合中心, 其水平特征尺度一般为200~500km^[1, 2]。已有的研究表明^[1, 3], 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重要天气系统之一。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。大气中的气旋性

涡旋, 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。对于这些低值系统, 已有不少研究^[1-7], 但是对于西南低涡的研究尚有待深入。

2007年7月8—10日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), 特大暴雨主要位于四川盆地南部(28.84—29.45°N, 105.05—105.40°E)的范围内。对此次过程, 文献[8]从暴雨中尺度散度以及数值预报方面进行过讨论。本文针对“07-7-9”川南特大暴雨天气过程, 分别利用动力学物理量、热力学物理量、水汽物理量以及动力和热力综合物理量进行一次较为全面的诊断分析, 期望得出的一些结论能为今后低涡暴雨的预报提供参考。

收稿日期: 2011年4月21日 修回日期: 2011年9月14日

第一作者: 陶丽(1987—), Email:taoli8501416@126.com

通讯作者: 李国平, Email:leegp@126.com

资助信息: 国家自然科学基金(40875023); 灾害天气国家重点实验室开放课题(2009LASW-A01)

2 资料

本文所用降水资料为Micaps提供的6小时和24小时降水资料，物理量计算所用资料取自NCEP/NCAR提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 一天4次(00:00, 06:00, 12:00, 18:00 UTC)再分析资料，垂直分层至100hPa的21层网格点数据。

3 “07-7-9”川南特大暴雨概况

2007年7月8—10日四川盆地南部发生了一次特大暴雨过程，有44个站的降雨量超过100mm，有14个站的降雨量超过250mm。特大暴雨中心位于四川省内江市的隆昌县。依据Micaps 24小时和6小时的累积降水资料对此次暴雨进行降水量统计(见表1)，从24小时累积降水量可看出，7月10日08时(北京时，下同)，隆昌县(29.33°N, 105.30°E)累计最大降水量达到326mm。7月9日20时，隆昌县(29.33°N, 105.39°E)6小时累积降水量达到123mm。泸州市(28.77°N, 105.39°E)、豪江县(29.03°N, 106.63°E)24小时和6小时的累计降水量分别达到107mm和118mm。从降水量看，此次降水发生时段主要集中在7月9日08时—10日08时。

表1 2007年7月8—10日的暴雨统计

暴雨时间	24h最大降水量(mm)/位置	6h最大降水量(mm)/位置
7月8日	64/遂宁市(30.53°N, 105.58°E)	96/巴中市(31.86°N, 106.74°E)
7月9日	107/泸州市(28.77°N, 105.39°E)	123/隆昌县(29.33°N, 105.39°E)
7月10日	326/隆昌县(29.33°N, 105.30°E)	118/豪江县(29.03°N, 106.63°E)

4 环流分析

4.1 高度场分析

大暴雨发生前，7月8日14时(北京时，下同)500hPa(图1a)欧亚中高纬地区为“两槽一脊”环流形势，两长波槽分别位于我国巴尔喀什湖以南和我国中东部地区，高压脊位于甘肃、青海一带。位于我国中东部地区的大槽可延伸至四川东南部，川南地区大部处于槽前的西南气流中。9日02时(图1b)，随着西风气流，位于巴尔喀什湖的槽东移，强度不变，位于东北部的槽北抬，而脊有所加强。此时在四川北部地区有闭合的低压生成，暴雨中心处于低压前部的西南气流中，有利于气旋性环流的发展。10日(图略)川南地区已处于较为平直的风西气流中，降水强度有所减弱。

8日14时(图1c)，700hPa上西南涡在四川与青海交界地区活动，低涡中心位于四川西北部，中心位势达到3040gpm。至8日20时(图1d)低涡范围扩大，中心强度维持不变。至9日08时(图略)，西南低涡

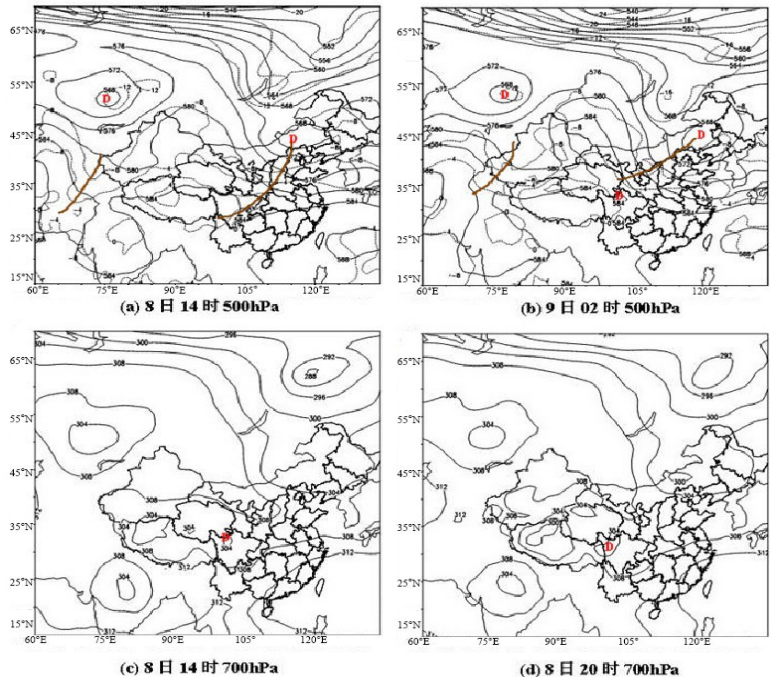


图1 2007年7月8日和9日500hPa(a,b)和700hPa(c,d)高度场分布(单位:gpm)

向东南移动，暴雨中心位于低涡右前部的西南气流中，受其影响出现了自西向东的强降水。同时，西南涡沿500hPa引导气流(西南气流)缓慢向东北方向移动，西南低涡在9日20时(图略)移至此次暴雨中心的隆昌县上空，10日02时(图略)移到重庆一带，但其强度变化不大。

4.2 流场分析

由前面的降水分析可知7月8—10日的主要降水时段发生在9日08时—10日08时，因此针对9日08时的流场进行主要分析，可以看到9日08时从高层300hPa至低层850hPa表现出一致的上升气流。850hPa上(图2a)，有明显的气流辐合带，暴雨中心的隆昌县(29.33°N, 105.30°E)基本处于气流辐合带中心，其东南侧西南气流显著发展。700hPa(图2b)重庆至陕西中部出现西南急流，四川东南部呈现气旋性弯曲，暴雨中心即在此弯曲的拐点处。500hPa(图2c)重庆西部出现反气旋弯曲，300hPa(图2d)在川南地区出现反气旋中心和较强的辐散气流，其右前侧有较强的负涡度。随着低涡的加强东移和急流的出现，雨区降水显著加强，随之出现此次过程的最强降水。综合850hPa至300hPa的流场分析可看出，低层气流辐合，高层气流辐散，有利于垂直运动发展，这是暴雨发生的必备条件。

5 物理量诊断

5.1 水汽通量及水汽通量散度

充足的水汽是暴雨形成的最基本条件。水汽通量矢量(qV)是表示水汽输送强度的物理量，而水汽

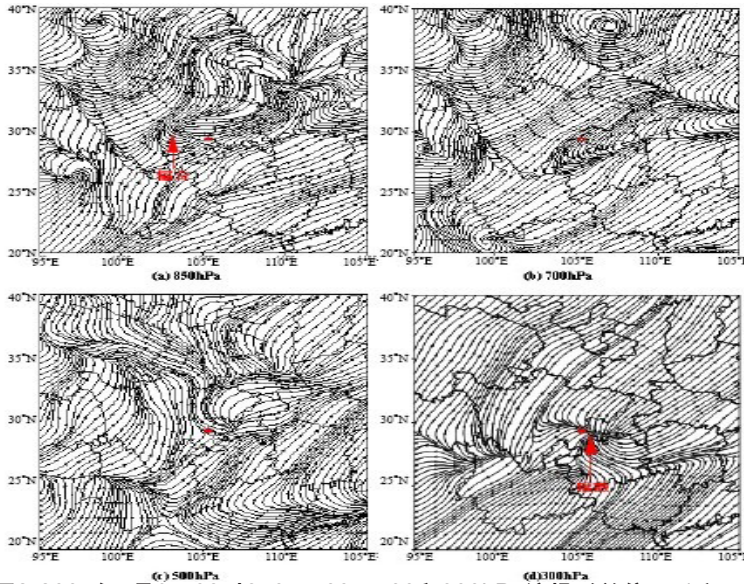


图2 2007年7月9日08时850, 700, 500和300hPa流场(单位: m/s), 圆点为标注的特大暴雨中心(29.3°N, 105.3°E) 通量散度则是水汽集中程度的物理量^[9, 10], 单位体积(底面积1cm², 高1hPa)的水汽通量散度计算公式为

$$A = \nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \mathbf{V} q \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{g} u q \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{g} v q \right) \quad (1)$$

当 $A > 0$, 则水汽通量是辐散的(水汽因输送出去而减少); 若 $A < 0$, 水汽通量是辐合的(水汽因输送进来而增加)。图3给出9日08时和14时850hPa水汽通量矢量和水汽通量散度的分布图。

从9日08时850hPa水汽通量矢量和水汽通量散度图(图3a)可以看出, 暴雨发生前, 四川西部地区一直维持一条显著的水汽通量输送带, 强劲的西南风将孟加拉湾的水汽输送到四川盆地西部一带(32°—34°N, 100°—103°E); 另外, 还有来自南海的水汽输送到四川盆地南部和重庆一带(28°—30°N, 105°—110°E)。雨区上空有水汽通量散度负值中心, 中心负

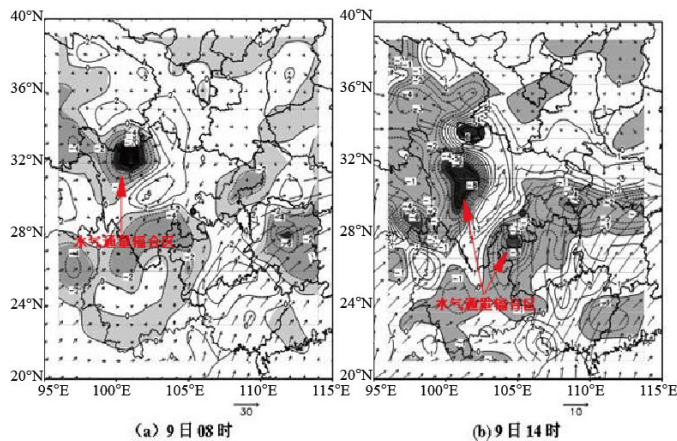


图3 2007年7月9日08时(a)和14时(b)850hPa水汽通量矢量及水汽通量散度(阴影区为水汽通量散度的负大值区, 单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 箭头为水汽通量矢量, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 圆点为特大暴雨中心)

值为 $-4 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 表明该地区有水汽通量辐合, 水汽在暴雨中心上空堆积, 为暴雨的发生孕育了良好的水汽条件。

暴雨发生过程中, 9日14时(图3b)水汽通量输送明显加强, 两支不同方向的水汽源向暴雨区输送了充足的水汽。两个水汽通量散度的负值中心强度增大, 一个位于四川盆地西北部(31°N, 102°E)强度为 $-8 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 另一个位于四川盆地南部(28°N, 105°E)强度为 $-5 \times 10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。水汽辐合区也明显扩大, 川南暴雨中心的隆昌县就处于水汽通量的辐合区内。10日08时(图略), 随着暴雨区上空水汽通量辐合区的消失, 暴雨明显减弱。这说明暴雨的形成、加强与减弱和暴雨上空水汽通量辐合区的演变关系密切。

5.2 假相当位温

假相当位温(θ_{se})是表征大气温湿特征的物理量, 其值大小反映了显热能和潜热能的高低, 其高值中心对应大气能量的积累。 θ_{se} 随高度的变化还反映大气层结稳定度状况^[9, 11], 当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$, 对流不稳定; 当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$, 对流稳定。图4给出这次过程7月9日14时850hPa的 θ_{se} 场和9日08时沿105.3°E的 θ_{se} 垂直剖面图。

从850hPa θ_{se} 场(图4左)可见, 与西南低涡东南侧西南暖湿气流相对应, 有一个 θ_{se} 大值(高能)中心位于四川省西部以及青海甘肃交界一带($\theta_{se} \geq 380\text{K}$), 与东北低压后部偏北气流相对应, 而在河南东部存在一个低能中心($\theta_{se} \leq 340\text{K}$)。这两支不同能量性质的气流(即高能舌与低能中心)之间, 存在一条南北向 θ_{se} 能量锋区, 暴雨中心的隆昌县位于两层能量锋区靠近低能一侧。700hPa的 θ_{se} 场(图略)同样可见能量锋区, 但 θ_{se} 高能中心最大值由395K减弱为375K, θ_{se} 随高度减小, 说明暴雨中心有不稳定能量存在, 只要有冷空气入侵, 极易释放不稳定能量, 有利于造成强降水。

分析7月9日08时(图4右)和14时(图略)沿105.3°E的 θ_{se} 垂直剖面图发现, 可以看到28°—29°N对流层低层 θ_{se} 随高度降低, 即 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$, 反映了该处大气处于不稳定, 而中层为中性层结, 这种大气层结有利于产生强对流性降水。并且14时假相当位温梯度较08时的梯度有所增强, 大值中心也由375K增大为390K。表明此次暴雨发生中心的隆昌

县(29.3°N, 105.4°E)的假相当位温随高度的变化达到最大值, 极易释放不稳定能量。但400hPa以上 θ_{se} 随高度升高, 即大气高层处于稳定状态。

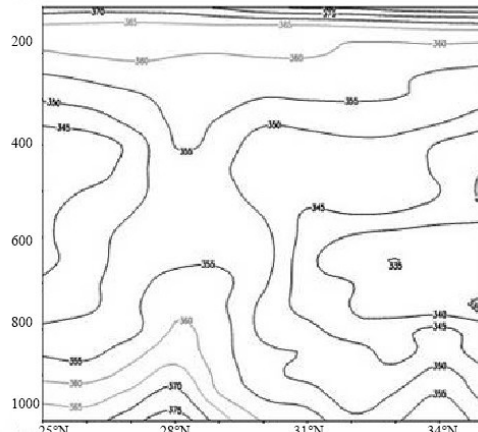
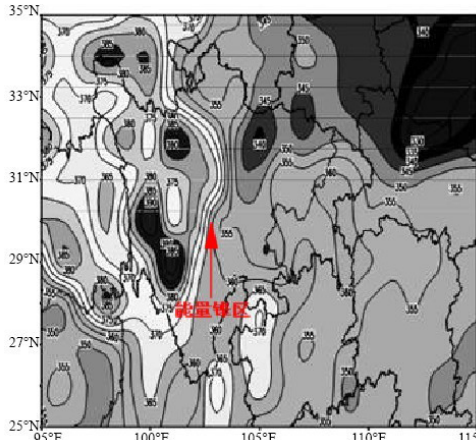


图4 2007年7月9日20时850hPa(左)和9日08时沿105.3°E的 θ_{se} 垂直剖面图(右)(单位: K)

5.3 湿位涡分析

当忽略垂直速度的水平变化时, p 坐标下的湿位涡为^[12, 13]:

$$MPV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (2)$$

一般, 湿位涡可分为湿正压项MPV1和湿斜压项MPV2, 即

$$MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (3)$$

$$MPV2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (4)$$

其中MPV1是湿位涡的第一分量(垂直分量), 表示惯性稳定度($\zeta+f$)和对流稳定度 $-g \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p}$ 的共同作用, 其值取决于空气块绝对涡度的垂直分量与相当位温的垂直梯度的乘积, 代表湿位涡的正压部分。MPV2是湿位涡的第二分量(水平分量), 它的数值由风的垂直切变(即水平涡度)和相当位温的水平梯度决定, 包含了湿斜压性($\nabla_p \theta_{se}$)和水平风垂直切变的贡献, 代表湿位涡的斜压部分。一般情况下, 绝对涡度为正值, 当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$ (对流稳定)时, 湿正压项 $MPV1 > 0$ 。故只有湿斜压项 $MPV2 < 0$, 垂直涡度才能得到较大增长, $MPV2$ 负值越大, 表明大气斜压性越强; 而当 $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$ (对流不稳定)时, $MPV1 < 0$, 只有 $MPV2 > 0$, 垂直涡度才能得到较大增长。表示湿位涡的单位为PVU ($1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$)。

5.3.1 850hPa上的正压湿位涡和斜压湿位涡

下面通过分析850hPa MPV1, MPV2的分布来考察暴雨区的不稳定状况。从850hPa MPV1分布图

(图5a)可见, 9日14时, 四川省西北部和湖北、河南交界处有两个MPV1负大值中心, 强度分别为 $-0.8PVU$ 和 $-1.0PVU$ 。四川省与重庆市其他大部地区也均为MPV1负值区, 降水中心的隆昌县正好位于MPV1正负值交界的等值线密集带。随后9日20时(图5b), 两个MPV1负值区范围逐渐扩大, 四川西部地区的负值中心的强度加强, 达到 $-0.9PVU$; 川南地区的MPV1负值区范围也有所扩大, 梯度也加强, 强降水落区基本位于MPV1正负值交界的等

值线密集带, MPV1负值中心有较弱的降水。

从850hPa MPV2的分布(图5c)可见, 9日14时, 850hPa暴雨区基本处于弱的MPV2正值区, 暴雨中心强度在 $0 \sim 0.1PVU$ 之间。到9日20时(图5d), MPV2正值范围扩大, 强度增强, 中心强度达到 $0.8PVU$, 负值范围相对较小, 强度为 $-0.5PVU$ 。正负值分布集中, 梯度较大。川南地区基本处于MPV2正值区内, 暴雨中心的隆昌县则位于零线附近, 梯度大, 降水强。至10日06时(图略)川南地区开始处于MPV2的负值区, 此时降水减弱, 暴雨趋于结束。因此, 湿斜压位涡MPV2的增大, 可导致垂直涡度的发展, 非常有利于对流运动和降水的加强。当MPV2正值区减弱或移出, 意味着暴雨区的暖湿气流减弱, 伴随对流不稳定区的移出, 暴雨过程趋于结束。

5.3.2 正压湿位涡的剖面分析

沿29°N做MPV1的垂直—经向剖面图。暴雨发生前(图6a), 在105°E附近可以看到900~1000 hPa高度上有MPV1的负值区($MPV1 < 0$), 中心强度达到 $-0.6PVU$, 为强对流不稳定区。900hPa向上延伸, 又转为MPV1正值区($MPV1 > 0$), 则MPV1随高度的发布呈现正负叠加排列。在300~400hPa处有正值中心, 强度为 $0.1PVU$, 表明对流层高层为对流稳定区。暴雨发生时(图6b), MPV1中心值增大, 对流层低层负值中心增大为 $-0.7PVU$, 正值中心在700~800hPa, 增大为 $0.2PVU$, 范围也有所扩大。垂直结构上, MPV1呈现高低层正负值叠加的配置, 是暴雨发生发展的有利形势。这种对流层高层正值区对应低层负大值中心的结构有利于低层不稳定能量的释放, 使对流不稳定迅速发展。则高层高值正位涡的下

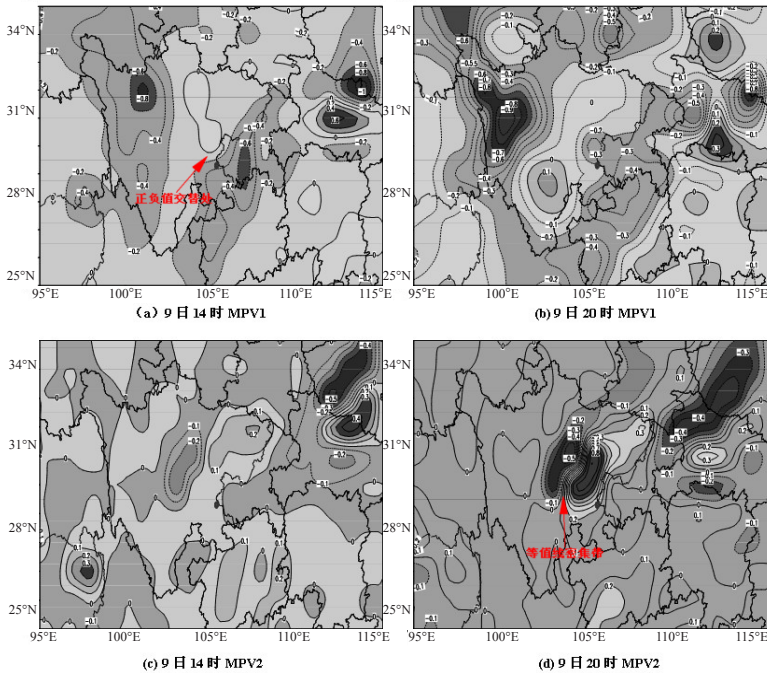


图5 7月9日14时和20时850hPa上MPV1和MPV2的分布(单位: PVU, 圆点为标注的特大暴雨中心)

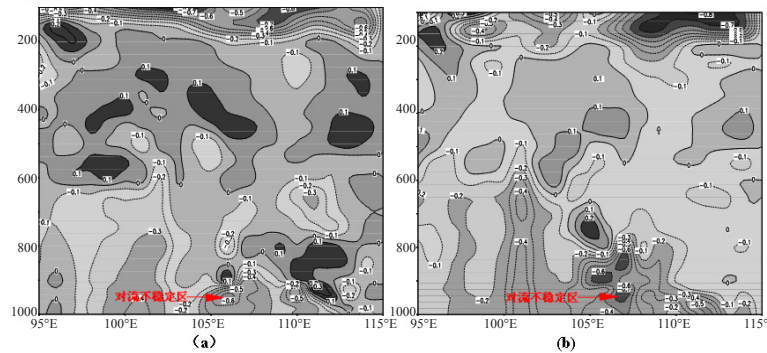


图6 MPV1(单位: PVU)沿29°N的垂直—纬向剖面图 (a) 9日08时; (b) 9日14时

传有利于低层气旋性涡度的发展, 低层的负位涡区也有利于对流加强, 两者的结合有利于暴雨产生。

6 结论

通过对2007年7月8—10日发生在川南地区由西南低涡诱发的特大暴雨进行的综合诊断分析, 得到以下几点结论:

(1) 这次暴雨过程是在有利的局地环流背景下发生的。高度场上, 500hPa上川南地区位于槽前的西南气流中, 700hPa西南低涡缓慢东移。流场上, 暴雨区发生前, 从300hPa至低层850hPa表现出一致的上升

气流, 低层气流辐合, 高层气流辐散, 十分有利于垂直运动发展。暴雨发生期间, 较强的上升运动为暴雨的发生与维持提供了动力条件。

(2) 暴雨过程中, 四川西部地区一直维持一条显著的水汽通量输送带, 强劲的西南风将孟加拉湾的水汽不断输送到四川西部, 同时对流层低层水汽通量辐合较强, 水汽的积聚为暴雨的发生、维持提供基本条件。

(3) 对流层低层 θ_{sc} 随高度减小, 反映了暴雨期间低层大气的的不稳定性, 而中层大气处于中性, 这种大气层结有利于产生对流性强降水。

(4) 这次特大暴雨过程的湿位涡分析表明, MPV1高低层正负值的配置是暴雨发生、发展的有利形势, 强降水落区基本位于MPV1正负值交界的等值线密集带; MPV2的增大, 可导致垂直涡度的发展, 非常有利于激发对流运动, 加大降水强度。

参考文献

- [1] 卢敬华. 西南低涡概论. 北京: 气象出版社, 1986: 1-270.
- [2] 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, 1977: 296-306.
- [3] 陶诗言等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980: 225-230.
- [4] 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.
- [5] Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. Characteristic features of "Baiu" front associated with heavy rainfall. Meteor Soc Japan, 1971, 49: 409-429.
- [6] Pettersen S, Sembye S J. On the development of extra tropical cyclones. Quart Roy Meteor Soc, 1971, 97: 457-482.
- [7] 陈志明, 闵文彬, 崔春光. 西南低涡研究的一些新进展. 高原气象, 2004, 24(增刊): 1-5.
- [8] 顾清源, 周春花, 青泉, 等. 一次西南低涡特大暴雨过程的中尺度特征分析. 气象, 2008, 40(4): 39-47.
- [9] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 2000: 369-372.
- [10] 于波, 林永辉. 引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析. 大气科学, 2008, 32(1): 141-154.
- [11] 郑京华, 董光英, 梁涛, 等. 一次西南低涡东移诱发的罕见暴雨诊断分析. 暴雨灾害, 2009, 28(3): 229-234.
- [12] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展. 气象学报, 1995, 53(4): 387-404.
- [13] 李国平, 刘行军. 西南低涡暴雨的湿位涡诊断分析. 应用气象学报, 1994, 5(3): 354-360.