

# 一次无地面冷空气触发的西南涡特大暴雨分析

王 中<sup>1,2</sup> 白莹莹<sup>1</sup> 杜 钦<sup>1</sup> 李东川<sup>3</sup>

(1. 中国气象局武汉暴雨研究所, 430074; 2. 重庆市气象科学研究所;  
3. 重庆市万州区气象台)

**提 要:** 利用 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  的再分析资料对 2007 年 7 月 17 日重庆西部的特大暴雨天气过程的环流背景、主要影响系统——西南涡的演变进行诊断分析。结果表明: (1) 在有利的大尺度环流背景配合下, 产生此次过程的主要影响系统为西南涡和低空急流, 副热带高压的西进北抬为水汽的输送提供了有利的条件; (2) 最强降水时段出现在西南涡的最强盛期, 垂直螺旋度的大值中心和强弱变化与低涡及强降雨的位置和强度有很好的对应关系; (3) 在此次过程中虽然无地面冷空气的触发, 但由于高层较强的冷平流形成的干冷盖和低层的暖湿气流与强烈的上升运动的极佳配合, 使得强对流天气得以发生, 高层的干侵入成为此次过程的触动力; (4) 西南低涡上空的不同高度上不同强度的干侵入效应, 使得高层高位涡下传, 而高层高位涡区的下传和中低层高位涡区的加强, 导致西南低涡的气旋性环流加强, 降水增强。

**关键词:** 特大暴雨 西南涡 垂直螺旋度 位涡 干侵入

## Analysis of a Torrential Southwest Vortex Rainstorm Without Surface Cold Air Intrusion

Wang Zhong<sup>1,2</sup> Bai Yingying<sup>1</sup> Du Qin<sup>1</sup> Li Dongchuan<sup>3</sup>

(1. Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, 430074; 2. Chongqing Institute of Meteorological Sciences;  
3. Wanzhou Weather Office of Chongqing)

**Abstract:** Based on the reanalysis data with  $1.0^\circ \times 1.0^\circ$  resolution from NCEP/NCAR, the circulation background and the main influencing systems of "07.17" torrential rainstorm in the west of Chongqing in 2007 are analyzed. The results indicate that under advantageous large-scale circulation background coordination, the main influence systems were the southwest vortex and low-level jet stream. The west Pacific subtropical high provided the advantageous condition for transportation

基金项目: 中国气象局武汉暴雨研究所暴雨研究开放基金项目(IHR2007G03); 重庆市自然科学基金项目(CSTC, 2007BB9248); 中国气象局成都高原气象研究所开放基金项目(LPM200814)共同资助。

收稿日期: 2008年4月7日; 修定稿日期: 2008年9月16日

of water vapor by its west stretch and north lift. The strong raining processes began at the peak of the development of southwest vortex. The high center and intensity of vertical helicity had a corresponding connection with the position and intensity of heavy rainfall. Although without surface cold air intrusion, in the upper troposphere the dry air intrusion provided triggering power of rainstorm. The strong convection weather was affected directly by the dry and cold lid at high level caused by strong cold advection and the warm and wet air at low level when they interacted with strong ascending. The different influences of dry intrusion at different levels over the southwest vortex made high potential vorticity in upper troposphere go down and increase in lower troposphere, which strengthened southwest vortex and the intensity of precipitation.

**Key Words:** torrential rainstorm southwest vortex vertical helicity potential vorticity dry air intrusion

## 引 言

暴雨灾害是重庆市夏季最重要的气象灾害,每年均会因其影响而对重庆造成巨大的经济损失。以前的研究表明在有利的环流背景条件下,产生重庆区域性暴雨的主要影响系统有高原槽(涡)、西南涡、低空急流、地面冷锋等<sup>[1]</sup>。西南低涡是我国最强烈的暴雨系统之一,它是青藏高原特殊地形与环流相互作用下的产物,其主要生成源地有三个,其中四川盆地生成区是其第二集中区<sup>[2]</sup>,因而也称为盆地涡。西南低涡对全国及四川盆地暴雨的影响已有较多的分析和研究<sup>[2-7]</sup>,黄福均等<sup>[4]</sup>认为冷平流从低涡的西侧进入有利于低涡的发展,姜勇强等<sup>[7]</sup>认为水汽通量散度辐合柱状结构,对暴雨的发生提供动力和水汽条件,王丛梅等<sup>[8]</sup>运用湿位涡分析西北涡暴雨发现湿位涡“正负区叠加”的配置是低涡暴雨发展的有利形势,姚秀萍、杨贵明等<sup>[9-10]</sup>运用等熵面上位涡分析干侵入对低涡暴雨的作用时表明干侵入对低涡降水起重要的增幅作用。西南低涡是引起重庆暴雨的非常重要的系统,但对西南低涡引起的盆地暴雨过程中干侵入作用的分析研究少见。

2007年7月17日重庆西南部发生特大

暴雨,多个站日降水量均创有气象记录以来的历史极值,此次过程产生前,高空影响系统确实比较明显,但地面并无冷空气存在,似乎没有触发强降水发生的机制,而且多家数值预报模式提供的信息存在比较大的差异,加大了其预报难度,因此深入研究其发生发展条件和触发机制,对今后该类天气的预报非常必要。

## 1 天气概况

2007年7月16—17日,在四川东部、重庆西部出现了有气象纪录以来百年不遇的特大暴雨天气过程。此次过程具有持续时间长、强度强的特点。分析小时降水过程看(图略):7月16日午后重庆市西部偏北地区首先出现降水,随后阵性降水范围扩展到西部大部地区,小时降水量大于20mm的强降水17日06时(北京时,下同)在重庆西北部的合川、北碚出现,其后在09—13时相继在重庆主城区等西部产生小时降水量大于50mm的强降水,特别是在12时铜梁出现了小时降水量达69.5mm的特强降水,17日傍晚到夜间降水减弱。在此次过程中强降水主要出现在重庆中西部,特别是重庆主城区及周边区县(图1),仅在重庆西部15个区县中有11

站 24 小时雨量达暴雨( $\geq 50.0\text{mm}$ ),其中有 7 站大暴雨(包括 2 站特大暴雨)。24 小时最大雨量出现在重庆主城区沙坪坝,达到 262.9mm,其中最大 1 小时雨量达 55.6mm,均创造了有 115 年气象记录以来的历史纪录。

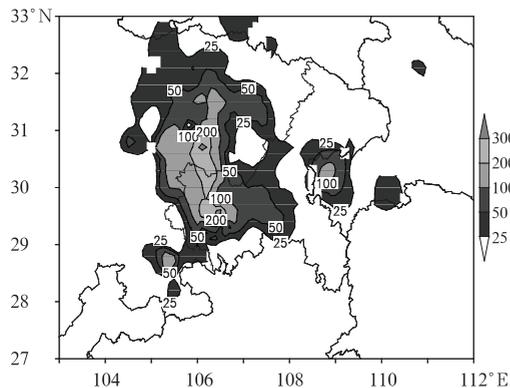


图 1 2007 年 7 月 16 日 20 时至 17 日 20 时重庆及周边 24 小时雨量(mm)分布

特大暴雨引发了 20 多个区县 66 起较大规模的山体滑坡、危岩崩塌等地质灾害,重庆主城区形成大范围的洪水渍涝,部分郊县成泽国,此次过程致使 37 人死亡,14 人失踪,直接经济损失达 21.42 亿元。

## 2 环流背景和主要影响系统分析

在 15 日 08 时的 500hPa 上,在贝加尔湖以西到巴尔克什湖以东存在一非常强的低压槽,而川西高原到盆地为弱脊。随着低压槽的东移(15 日 20 时),青藏高原中部有高原涡生成,并且盆地上的弱脊消失,川西高原到盆地转为偏西气流。16 日 08 时河套西部到盆地的低压槽生成,其后(16 日 20 时)得到发展加强,并且在盆地中部有气旋性环流生成(17 日 08 时)。此时西太平洋副热带高压较前期略有西进北抬,其西侧较强的西南气流正好有利于引导低层水汽向四川盆地输送。在高层有低值系统发展生成的同时,在 700hPa 上河套西部到川西高原的低压槽也东

移发展,并最终在盆地中部形成西南涡(17 日 08 时,图 2),为了对其生成位置更为准确的描述,将其称为盆地涡;华中到华东为强大阻塞高压,高压西部为较强的西南低空急流,该系统的存在对水汽的输送起到了非常重要的作用;而且 850hPa 上,从 15 日 20 时到 17 日 08 时盆地中部的气旋性环流一直存在。从剖面图(图略)上看到,高空的低压槽超前于低层的涡,形成低层到高层的前倾低压柱,这样从高层到低空深厚的低值系统的耦合促进了盆地涡的加强,非常有利于强对流的发展,阻塞高压的阻挡又有利于盆地涡在原地稳定少动,从而引起持续性的强降水。因而盆地涡也就成为此次天气过程的主要影响系统。

在同时期的地面图上(图 2),地面暖低压中心从高原东南移到四川盆地,在强降水产生前后 24 小时盆地东部均维持为暖低压中心,而且其后部的冷空气较弱。17 日 08 时冷锋在蒙古附近,18 日 14 时才有小股弱冷空气进入到四川盆地北部,因而在此次过程中,并无地面冷空气的存在,而地面冷空气的触发作用是重庆区域性暴雨产生的非常重要条件之一,因此此次特大暴雨的出现具有非常特别的原因,其触发机制有必要进行深入的研究。

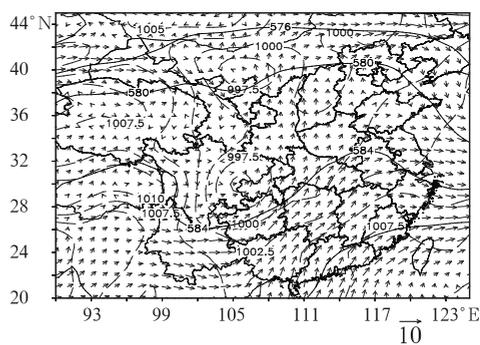


图 2 2007 年 7 月 17 日 08 时 500hPa 位势高度( $\times 10\text{gpm}$ )、地面气压(hPa)和 700hPa 风场  
实线:500hPa 位势高度,虚线:地面气压,  
箭头:700hPa 风矢量

### 3 西南涡的演变

上面的分析表明西南涡为此次天气过程的主要影响系统,它主要发生在四川盆地上空对流层下层,下面分析盆地上空700hPa流场,以揭示在此次过程中西南涡的演变。

如图3所示,特大暴雨过程发生前的16日08时(图3a),在河套到川西高原有低压槽存在,槽前为较强的西南气流,秦岭附近有切变存在。随后在16日20时(图3b),在低压槽东移过程中由于秦岭切变和西南气流的

作用,成都和达川的风向发生了明显的转变,在四川盆地北偏东部开始有气旋性环流生成。到最强降水出现时的17日08时(图3c),盆地东部的东南气流加强,从而导致盆地中东部明显完整的气旋性低压系统即盆地涡达到最强盛期,它为此次特大暴雨提供了中小尺度条件。17日20时(图3d),由于达川的风向由东南风转为西南风,盆地东部的气流发生变化,西南涡减弱,于是此次强降水随之减弱。在此次过程中云贵高原到华中的西南低空急流始终存在,强降水就出现在急流轴的左前侧(图3c)。

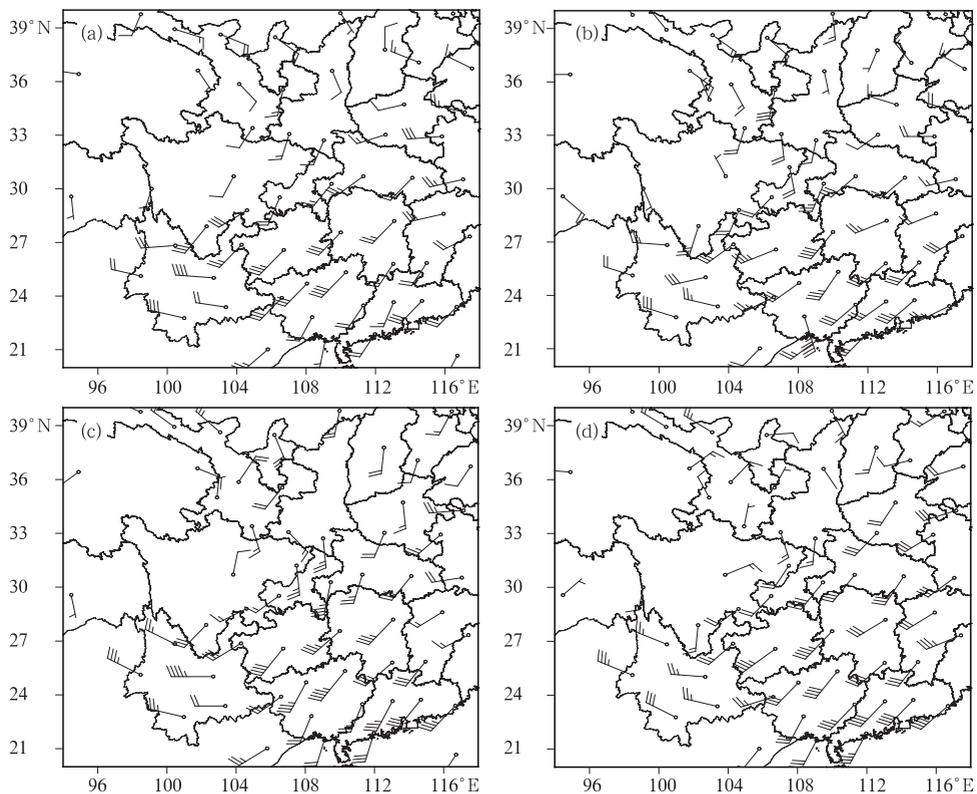


图3 2007年7月16—17日700hPa风向风速实况  
a:16日08时, b:16日20时, c:17日08时, d:17日20时

### 4 卫星云图分析

通过FY-2C的TBB资料(图4)分析发

现,在17日00时前,主要降雨云团位于四川南部,而在重庆西部没有强对流云团,但重庆西北部部分地区有弱的降水出现。到02时在重庆西部才开始有分散的对流单体云团生

成,04 时在重庆中西部合并在一起,其后又分裂为西、中部各一个云团,并且中部的云团迅速减弱消失,而西部云团逐渐发展加强,呈近似圆型的 MCC,开始有小时降雨量大于 25mm 的强降雨产生。在 17 日 09 时 MCS 已经发展为比较完整的强对流云团,云顶亮温在  $-80^{\circ}\text{C}$  以下的云团完全控制了重庆西部地区,中心最强达  $-90^{\circ}\text{C}$  以下,相继在重庆西部出现了 50mm 以上的最强小时雨量。

成熟的 MCC 从 09—14 时维持了近 5 个小时;15 时从影响范围和 TBB 值都可以发现 MCC 开始减弱,17 时低于  $-60^{\circ}\text{C}$  的范围已经很少,此次强降雨时段趋于结束。29.5°N、106.5°E 点 TBB 数据也反映随着 TBB 的变化,沙坪坝小时雨量加强和减弱(图 5),TBB 值最低时刻雨量也最大。因而从 TBB 资料分析结果表明,在此次过程中中小尺度系统为主要影响系统。

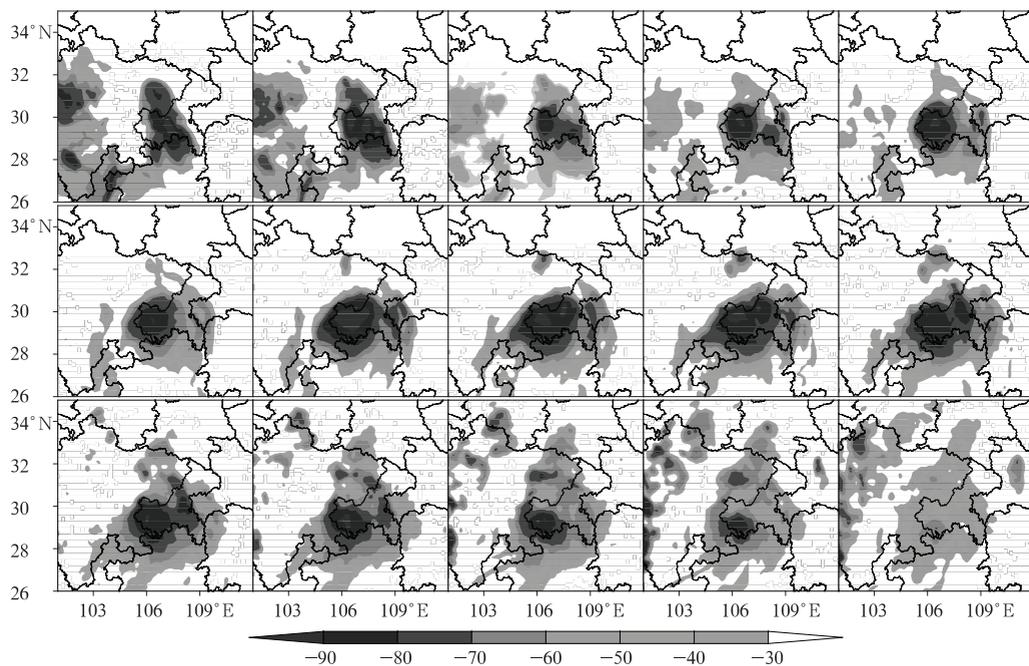


图 4 2007 年 7 月 16 日 20 时至 17 日 10 时每小时 TBB (FY-2C)图

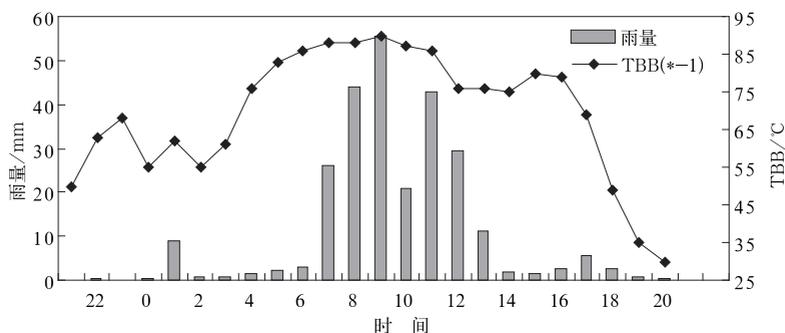


图 5 2007 年 7 月 16 日 21 时至 17 日 20 时沙坪坝小时雨量及对应时刻的单元(29.5°N、106.5°E)TBB

## 5 水汽条件分析

充沛的水汽供应是区域性暴雨产生的重要条件之一,在强降水过程中需有源源不断的水汽输入。对流层低层水汽在大气水汽中占有重要位置<sup>[11]</sup>,水汽通量辐合提供了低层抬升和被抬升空气潮湿程度的度量<sup>[12]</sup>,为此对这次暴雨过程中 700hPa 水汽通量散度作如下分析。在暴雨开始前 24 小时(16 日 08 时,图略),从云南东南部到重庆西南部有水汽通量散度辐合中心,四川盆地大部为辐散区,而未来强降水区上空为弱的辐合;在强降水开始时(17 日 08 时),云南东南部到重庆南部的的水汽通量散度辐合仍然存在并有所加强,说明水汽的供应非常充分,同时四川南部到重庆西部有  $-2\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的水汽通量散度辐合中心生成(图 6a);强降水减弱时(17 日 14 时,图略),虽然四川盆地东部仍有水汽通量散度的负值区存在,但范围减小,更重要的是云南东部到重庆南部的的水汽通量散度转为正,表明水汽输送通道已经不存在,不利于强降水的继续。通过  $29^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\text{E}$  水汽通量散度时空剖面图(图 6b)也反映出,在强降水过程中,近地面到 700hPa 为一致的水汽辐合,表明此时降雨区上空气柱中的水汽条件非常有利于强降水的产生,而过程前和降水减弱时中层或近地层水汽通量散度为正值,气柱中的水汽输送未完全建立或开始出现减弱。从上述分析可以看出,在这次特大暴雨过程中对流层低层 700hPa 的水汽通量散度变化与降雨的形成、加强和减弱有很好的 consistency。

## 6 螺旋度分析

螺旋度严格的定义为风速与涡度点积的体积分,其大小反映了旋转与沿旋转轴方向

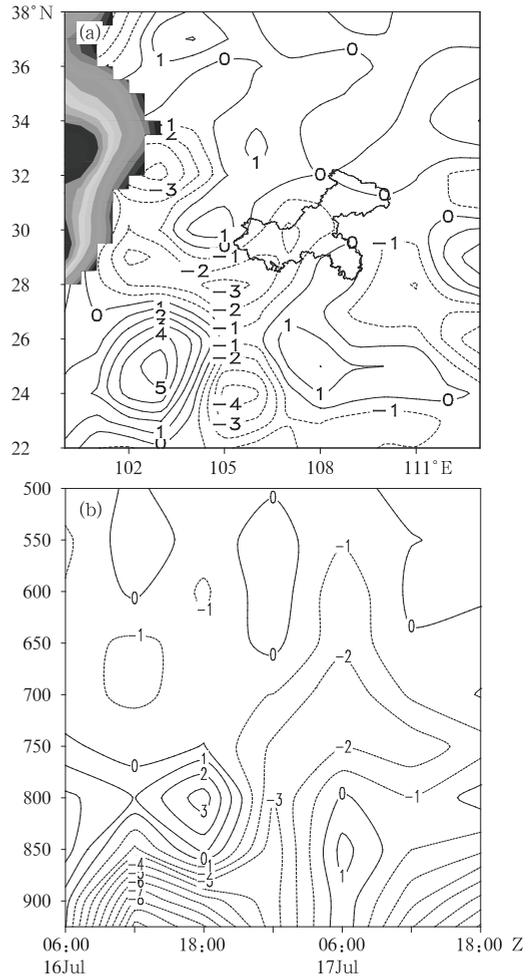


图 6 2007 年 7 月 17 日 08 时 700hPa 水汽通量散度(a)及  $29^{\circ}\text{N}$ 、 $105^{\circ}\text{E}$  水汽通量散度时空剖面(b)

a 中阴影区为  $\geq 3000\text{m}$  的地形;水汽通量单位:  $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;水汽通量散度单位:  $\text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

运动的强弱程度<sup>[13]</sup>,在  $P$  坐标系中,垂直方向上的螺旋度为:

$$H_p = -\zeta \times \omega$$

式中  $\zeta$  表示涡度,  $\omega$  表示垂直速度,  $H_p$  表示垂直螺旋度,单位为  $10^{-6} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ 。李耀辉<sup>[4]</sup>等认为螺旋度大的环境有利于强对流系统以至低涡气旋的生成和发展。

分析 17 日 08 时 700hPa 的垂直螺旋度

(图 7),发现在  $30^{\circ}\text{N}$ 、 $104^{\circ}\text{E}$ 处有较大的正值中心,超过  $9 \times 10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$ ,而其东部  $106^{\circ}\text{E}$ 附近的垂直螺旋度几乎为零,同时该点的时空剖面也反映出强降水开始时从低层到高层有正垂直螺旋度的急剧增加,特别是中层  $700\text{hPa}$  的正垂直螺旋度增大非常明显,说明此时低涡发展到最强盛时期,低涡左前方的最强降水开始,14 时左右垂直螺旋度由正转为负值,降水也逐渐减弱。因而在此次过程中垂直螺旋度的大值中心位置和强弱变化与低涡及强降雨的位置和强度有很好的对应关系。

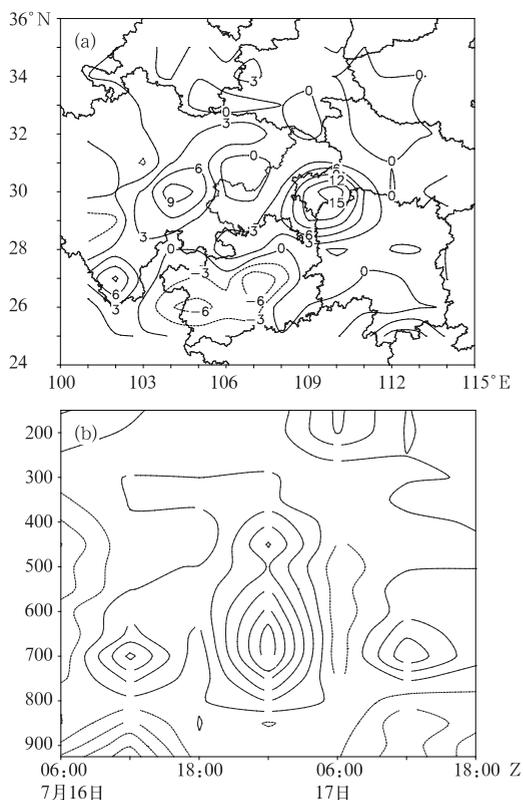


图 7 2007 年 7 月 17 日 08 时  $700\text{hPa}$  垂直螺旋度(a)和  $30^{\circ}\text{N}$ 、 $104^{\circ}\text{E}$  垂直螺旋度时空变化(b)  
垂直螺旋度单位:  $10^{-6} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-2}$

## 7 干侵入作用分析

由于温度是大气的重要物理属性之一,温度平流除能直接引起大气热力结构的变化

外,还可以引起其他大气物理属性的变化。所以温度平流在天气系统的发生发展及天气现象的产生过程中起到重要作用。从图 8 可以看出,在强降水开始到结束之间,低层到高空  $500\text{hPa}$  均为为暖平流,最大中心值超过  $60 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,特别是在  $700 \sim 500\text{hPa}$  之间,同时相对湿度在  $90\%$  以上,几乎达到饱和,即为强烈的暖湿气流。而在  $500\text{hPa}$  以上,则为逐渐加强的冷平流,中心强度达到  $-30 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而且湿度小,在上空形成强大的干冷盖,从而构成上冷下暖的垂直不稳定,而在冷暖平流之间又有强烈的上升运动,导致低涡的强烈发展<sup>[14]</sup>,三者**在强降水期间表现得更为剧烈,显然这种现象的存在对产生强对流天气极其有利,而在强降水开始前和结束后三者并没有最佳的配合,主要是没有较强的冷平流的存在,表明在此次过程中,冷平流就成为了在没有地面冷空气存在的情况下的触发机制。杨贵名等<sup>[9]</sup>认为,干侵入不仅使得气旋发展从而促使强降水发展,而且还激发出 MCC 系统,此种物理机制在此次过程中得到了极好的体现。**

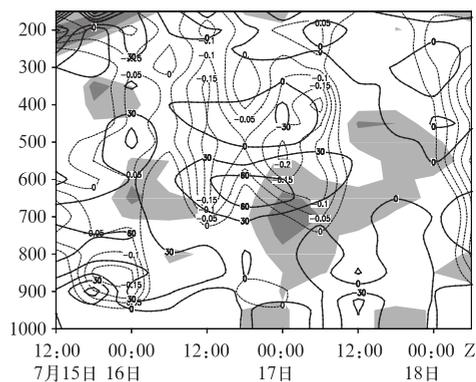


图 8 2007 年 7 月 15—18 日  $30^{\circ}\text{N}$ 、 $106^{\circ}\text{E}$  点的温度平流( $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )、垂直速度( $\text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )和相对湿度( $\%$ )时空剖面  
粗实线为温度平流,虚线为垂直速度,  
阴影区为相对湿度  $\geq 90\%$  区域

强降水出现前 700hPa 附近较强的暖湿气流的出现,预示着低涡中的温湿结构的改变,这种变化对低涡的发展有着重要的作用。

由于干侵入可以用位涡来表征<sup>[15]</sup>,为进一步分析干侵入对低涡发展及其对降水的增强作用,下面从不同时间和不同等熵面上位涡变化来分析干侵入的特征(图 9)。

在低涡发展初期(16 日 08 时),在 340K 等熵面上,盆地中北部有一大于 1.4PVU 的高位涡中心,呈西北东南向,中心处的风较小,为气旋性环流(图 9d),而低层(320K)同位置处的位涡较小,且位于低压槽中(图 9a);16 日 20 时,高层的高位涡中心强度略有减小,但西北气流加强,预示着位涡中心将

可能向东南方向移动,并且向下侵入,使得低层的位涡加强;在低涡发展到最强盛期(17 日 08 时),由于前面所说的原因,320K 和 340K 等熵面上在强降水区上空都出现高位涡中心(分别大于 1.0PVU 和 1.6PVU)和气旋性环流,且范围明显扩大(图 9e、f),正是由于这种低涡上方的不同高度上存在的不同强度的干侵入现象,使得高层高位涡下传,而高层高位涡区的下传和中低层高位涡区的加强,导致对流不稳定得以发展,低涡的气旋性环流加强,降水增强。这种现象与姚秀萍等在分析梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入效应一致<sup>[10]</sup>。

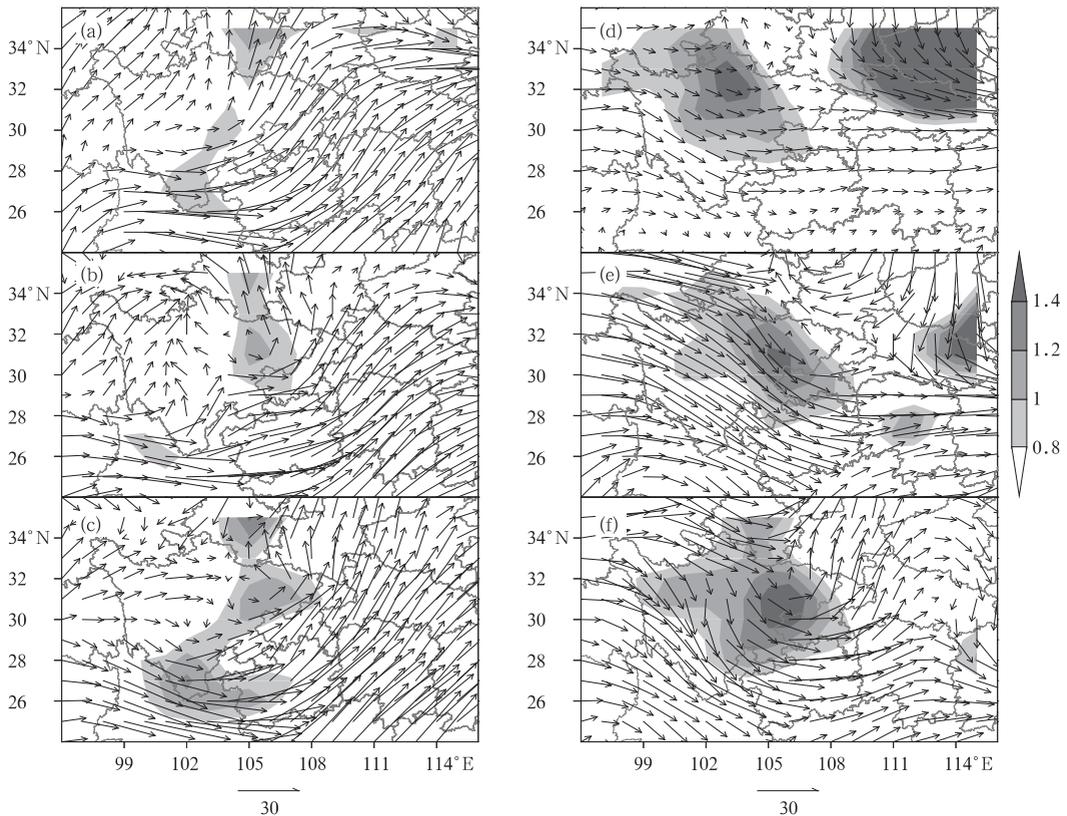


图 9 2007 年 7 月 16—17 日 320K(左)与 340K(右)等熵面上位涡(PVU)和风向

a、d. 16 日 08 时; b、e. 16 日 20 时; c、f. 17 日 08 时;  $1\text{PVU}=10^{-6}\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$

## 8 结论

(1) 此次特大暴雨天气过程是在高原低压槽东移到四川盆地与盆地涡耦合,西太平洋副热带高压西进北抬提供强大水汽输送的环流背景下,盆地涡和低空急流作为主要影响系统而产生。虽然没有地面冷空气的触发,但由于高层较强的冷平流形成的干冷盖和低层的暖湿气流与强烈的上升运动的极佳配合得以产生较强的降水,高层的冷平流成为此次过程的触发机制。由于华中高压脊的阻塞作用,使得盆地涡在原地停留,从而出现持续性的强降水。垂直螺旋度的大值中心位置和强弱变化与低涡及强降雨的位置和强度有很好的对应关系。

(2) 云图 TBB 资料分析表明,在此次过程中有 MCC、MCS 发展,强降水中心雨强随 TBB 值的发展而变化,中小尺度系统是此次过程的主要角色。

(3) 无地面冷空气触发的西南低涡特大暴雨在四川盆地内出现的概率极低,通过对此次过程的分析,发现没有地面冷空气的触发,但在高空较强的冷平流和有利的环流背景及影响系统的配合下,也同样会出现强对流天气,主要是由于西南低涡上方的不同高度上不同强度的干侵入效应,使得高层高位涡下传,而高层高位涡区的下传和中低层高位涡区的加强,从而导致西南低涡的气旋性环流加强,降水增强,在今后的实际业务预报中应引起注意。

## 参考文献

[1] 王中,陈艳英. 触发重庆山洪灾害的典型大气环流

和主要影响系统分析[J]. 高原气象,2007,26(3):609-614.

- [2] 陈忠明,闵文彬,崔春光. 西南低涡研究的一些新进展[J]. 高原气象,2004,23(增刊):1-5.
- [3] 黄福均,肖洪郁. 西南低涡暴雨的中尺度特征[J]. 气象,1989,15(8):3-9.
- [4] 黄福均. 西南低涡的合成分析[G]. 青藏高原气象学研究文集. 北京:气象出版社,2004:138-143.
- [5] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京:气象出版社,1986.
- [6] 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[J]. 高原气象,2003,22(2):162-167.
- [7] 姜勇强,张维桓,周祖刚,等. 2000年7月西南涡暴雨过程的分析和数值模拟[J]. 高原气象,2004,23(1):55-61.
- [8] 王丛梅,丁治英,张金艳. 西北涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 气象,2005,31(11):28-33.
- [9] 姚秀萍,吴国雄,赵兵科,等. 与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J]. 中国科学 D 辑,2007,37(3):417-428.
- [10] 杨贵名,毛冬艳,姚秀萍. “强降雨和黄海气旋”中的干侵入分析[J]. 高原气象,2006,25(1):16-28.
- [11] 郁淑华. 一次华西秋季大暴雨的水汽分析[J]. 高原气象,2004,23(5):689-696.
- [12] 刘健文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社,2005:64-69.
- [13] 尤红,姜丽萍,彭端. 2005年6月广东特大暴雨垂直螺旋度分析[J]. 气象,2007,33(4):71-76.
- [14] 陈栋,李跃清,黄荣辉. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学,2007,31(2):185-201.
- [15] 于玉斌,姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报,2003,61(6):769-778.