

文章编号: 2096-1618(2020)04-0447-08

# 尺度分离技术在一次切变线诱发西南涡暴雨个例中的应用

侯劭禹<sup>1</sup>, 巩远发, 赵福虎<sup>2</sup>, 刘海文<sup>3</sup>

(1. 成都信息工程大学 大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 重庆市气象台, 重庆 401147; 3. 中国民航大学, 天津 300300)

**摘要:**为探讨次天气尺度系统引发暴雨的主要机制和 Shuman-shapiro 滤波在盆地暴雨中尺度分离的效果, 利用中国气象局逐小时降水加密观测资料、CMORPH 融合格点降水资料、GFS 全球预报场资料及 FY-2E 卫星相当黑体亮温(TBB)数据对 2018 年 7 月 10-11 日一次盆地暴雨过程(简称“7.11 暴雨”)进行初步分析, 结果发现, 有利的大气环流形势下, 冷空气入侵四川盆地后推动切变线南移并诱发西南涡是“7.11 暴雨”产生的主要原因; Shuman-shapiro 滤波技术能够很好地分离出“7.11 暴雨”中的次天气尺度扰动; 热力性质不同的冷暖空气在四川盆地交绥, 使大气斜压不稳定增强, 对流层低层切变线及其伴随的西南涡为“7.11 暴雨”的产生提供了有利的动力条件, 同时配合有利的水汽条件, 最终导致 7.11 暴雨的产生。

**关键词:**气象学; 天气诊断; 尺度分离; 西南涡; 低层切变线

**中图分类号:**P458

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcui.2020.04.014

## 0 引言

四川盆地是中国夏季暴雨的高发区域<sup>[1]</sup>, 其特殊的地理位置和复杂的地形条件导致了形成西南地区暴雨的天气系统异常复杂<sup>[2-4]</sup>, 同时由暴雨引发的山洪、滑坡、泥石流等次生灾害频发<sup>[5]</sup>, 给川渝地区造成极重的损失, 因此四川盆地暴雨的形成机制机理受到了学者的高度关注<sup>[6-7]</sup>。

四川盆地暴雨常在有利的大尺度环流背景下产生, 形成四川盆地暴雨的大尺度系统主要有西南季风、高空急流、西太平洋副热带高压等系统<sup>[8-11]</sup>。而暴雨往往需要在较强的不稳定能量和充足的水汽条件下才能产生, 在西南低空急流的作用下, 盆地上空大气不稳定能量增强, 也为盆地带来大量水汽, 因此盆地暴雨基本在西南低空急流盛行时节出现。与四川盆地暴雨直接相关的次天气尺度系统有西南涡、高原涡、低层切变线、低空急流等<sup>[12-15]</sup>。2012-2016 年, 夏季共生成西南涡 116 例, 受西南涡影响, 平均每年夏季出现 17.8 场盆地区域暴雨过程, 因此西南涡是形成盆地暴雨的主要影响系统之一<sup>[16-22]</sup>, 而它往往是在有利的大尺度环流与地形相互作用下才能形成<sup>[23]</sup>。除西南涡外, 四川盆地也会在切变线、高原涡、台风、盆地特殊地形抬升等因素影响下, 形成盆地大范围的区域暴雨天气过程<sup>[24-27]</sup>。

一般情况下, 天气尺度系统引发的上升运动强度还不能产生暴雨, 而在天气尺度系统背景中的次天气尺度系统形成的强烈上升运动才是造成暴雨的直接因

素<sup>[28]</sup>。对于次天气尺度系统, 现有的常规观测体系难以对其进行捕捉, 因此常借助尺度分离技术将大尺度背景场中的次天气尺度系统挖掘出来, 或借助数值模式模拟次天气尺度系统的内部结构和形成机理。在尺度分离技术应用方面, 陈忠明<sup>[29]</sup>利用 Barnes 滤波函数, 对一例西南涡引发的暴雨进行诊断分析, 并分离出中  $\alpha$  尺度(300 ~ 900 km)系统, 覃丹宇<sup>[30]</sup>通过 shuman-shapiro 滤波尺度分离技术分离了与对流云团有关的扰动场(220 ~ 880 km), 取得了较好效果, 张虹等<sup>[31]</sup>利用 Barnes 滤波函数刻画出盆地内影响暴雨的中  $\alpha$  尺度(300 ~ 800 km)环流特征<sup>[31]</sup>, 并进一步用滤波后的资料进行螺旋度的诊断分析; 在数值模拟方面, 孙建华等<sup>[32]</sup>利用 WRF 模式成功地模拟对流层底层辐合线、西南低涡和雨带分布, 并分析了中  $\alpha$  尺度系统的结构及其与地形的相互作用; 同时还有学者利用资料融合技术<sup>[33]</sup>和大气遥感再分析场重构技术<sup>[34]</sup>处理和分析中尺度系统。目前应用尺度分离技术诊断分析四川盆地暴雨过程的相关研究中, 大多用到 Barnes 滤波器<sup>[35-37]</sup>, 然而在众多研究中, 应用 shuman-shapiro 滤波尺度分离技术对四川盆地暴雨进行诊断分析的研究尚不多见<sup>[38]</sup>, 该技术可直接从格点资料中提取出适当格距的扰动信号, 文中尝试运用该方法提取一例影响盆地暴雨的次天气尺度扰动信号。

2018 年 7 月, 四川盆地接连出现了多场大暴雨, 并引发了严重的洪涝灾害, 给川渝地区造成了极大的经济损失, 其中在 10-11 日的强降水过程中, 四川多地达到暴雨标准, 其中彭州日降水量达到 253.4 mm, 突破了当地的历史极值<sup>[39]</sup>, 受此次暴雨过程影响, 长江流域上游部分支流出现了 50 年一遇的特大洪水<sup>[40]</sup>。“7.11 暴雨”是在有利的大气环流形势下, 由

收稿日期: 2020-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41775079), 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91537214)和民航局 2020 年民航安全能力建设资金资助项目(20600822)

多个次天气尺度系统共同作用造成的。那么,此次区域暴雨过程中 Shuman-shapiro 滤波尺度分离技术效果如何? 分离出的次天气尺度系统如何影响盆地? 其内部机制机理是什么? 文中主要围绕这3个问题开展深入研究,以揭示次天气尺度系统引发此次区域暴雨过程主要物理机制。

## 1 资料和方法

采用的资料有:四川盆地 106 个台站逐小时降水加密观测资料和空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  逐时 CMORPH 融合格点降水资料,卫星观测资料为 FY-2E 的逐时相当黑体亮温 (TBB), 美国国家环境预报中心 (NCEP) 的空间分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的逐 6 小时 GFS 全球格点预报场资料。

为研究“7.11 暴雨”次天气尺度特征,采用 Shuman-shapiro 滤波尺度分离技术<sup>[41-42]</sup>对“7.11 暴雨”的产生系统进行了空间尺度分离。Shuman-shapiro 滤波是基于格点资料,通过一维三点平滑算子,选择适当的平滑系数  $S$  和平滑次数,消除原始物理量场  $f$  中的高频波(次天气尺度)分量,同时尽量完整的保留低频波(天气尺度)分量  $\hat{f}$ ,通过运算  $(f - \hat{f})$  即可得到原始物理量场  $f$  中的次天气尺度扰动场,其波长以格点的格距为单位。这种方法与奇异谱尺度分离技术相比,多次平滑后容易丢失大气中的次天气尺度扰动信号<sup>[43]</sup>,随后夏大庆等<sup>[42]</sup>将该方法改进为 25 点平滑算子,并对比分析了几种平滑算子在二维场中的尺度分离应用效果,发现  $s_1 = 0.5$ 、 $s_2 = 0.6666$ 、 $s_3 = 1$ 、 $s_4 = 1.4472$  时,就可以得到几乎全部的 2~5 倍格距波和最少 60% 的 6~9 倍格距波,而波长大于 17 倍格距的波动衰减了 80% 以上(图 1)。文中所使用格点资料的格距约为 56 km,利用上述方法基本分离了天气尺度(1000 km 以上)和次天气尺度(100~500 km)扰动,达到了将低层切变线及其引发的西南涡从背景场中分离出来的目的。

应用于二维场  $f$  中的平滑公式的离散化形式为(相应的格点标号见图 2):

$$\begin{aligned} \hat{f}_0 = & \left[ (1-s_1)(1-s_2) + \frac{s_1 s_2}{2} \right]^2 f_0 + \frac{1}{2} [s_1(1-s_2) + s_2(1-s_1)] \\ & \left[ (1-s_1)(1-s_2) + \frac{s_1 s_2}{2} \right]^4 \sum_{i=1}^4 f_i + \frac{1}{4} [s_1(1-s_2) + s_2(1-s_1)]^2 \sum_{i=5}^8 f_i \\ & + \frac{s_1 s_2}{4} \left[ (1-s_1)(1-s_2) + \frac{s_1 s_2}{2} \right]^2 \sum_{i=9}^{12} f_i + \frac{s_1 s_2}{8} [s_1(1-s_2) + s_2(1-s_1)] \\ & \sum_{i=13}^{20} f_i + \left( \frac{s_1 s_2}{4} \right)^2 \sum_{i=21}^{24} f_i \end{aligned} \quad (1)$$

其响应函数为

$$R = \prod_{m=1}^4 \left( 1 - 2s_m \sin^2 \frac{k\Delta x}{2} \right) \quad (2)$$

式中:  $s_m$  为滤波系数;  $k$  代表波数;  $\Delta x$  为网格格距。当  $s_1 = 0.5$ 、 $s_2 = 0.6666$ 、 $s_3 = 1$ 、 $s_4 = 1.4472$  时,取得的响应函数曲线如图 1 所示。

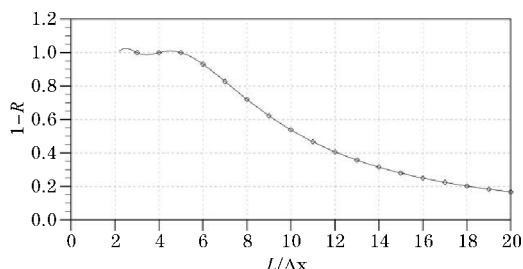


图1 尺度分离方案的响应函数曲线

22	15	10	14	21
16	6	2	5	13
11	3	0	1	9
17	7	4	8	20
23	18	12	19	24

图2 格点标号

## 2 2018 年 7 月 10-11 日暴雨过程的降水特征和环流背景

2018 年 7 月 10-11 日四川盆地西北部至陕西汉中出现一次区域性暴雨天气过程(图 3),雨带呈东北-西南走向,在盆地形成 3 个独立的中小尺度雨团,中心值都超过 100 mm,达到大暴雨量级。图 4(a)给出了 2018 年 7 月 10 日 20 时-11 日 19 时四川盆地 106 个站总降水的时间演变,由图 4(a)可见,10 日 20 时四川盆地已有降水产生,在 11 日凌晨 02 时降水量达到峰值,此时盆地总降水量达 391.1 mm,随后总降水量逐渐减弱;并在 11 日 08 时出现一个次峰值,此时盆地总降水量达 323.8 mm,随后盆地总降水量逐渐减小直至降水停止,可见此次暴雨过程中强降水主要发生在两个时段,具有明显的双峰特征。

由于彭州、德阳和北川是此次区域暴雨过程的 3 个强降水中心点,图 4(b)给出了 3 个站点的逐时降水实况,由图可见,彭州站的主要降水时段为 11 日 01-07 时,雨强最大时刻为 11 日 04 时,小时降水量达 52.7 mm,表现极强的对流性降水特征;位于彭州站东北方向的北川站,主要降水时段为 00-11 时,雨强最大时刻为 11 日 02 时,小时降水量达 36.2 mm,较彭州站最强降水时刻早 2 小时;德阳站的主要降水时段为 00-13 时,雨强最大的时刻为 05 时,小时降水量达 29.2 mm,同样在 11 日 02 时出现次峰值,小时降水量达 23 mm,可以看出靠近龙门山脉的彭州站累积降水量大、对流性强。

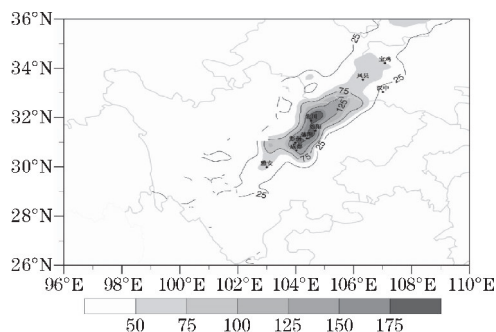


图3 2018 年 7 月 10 日 20:00-11 日 19:00 累计降水量

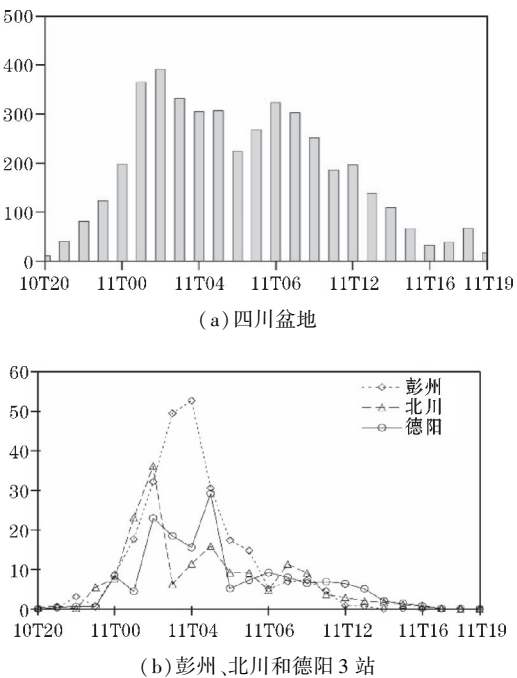


图 4 2018 年 7 月 10 日 20:00–11 日 19:00 逐时  
降水量随时间演变

暴雨在有利的大尺度环流形势下产生<sup>[44]</sup>,图 5 为 7 月 10 日 20 时–11 日 14 时平均环流形势图。降水期间对流层高层(图 5a)中高纬环流表现为南亚高压向

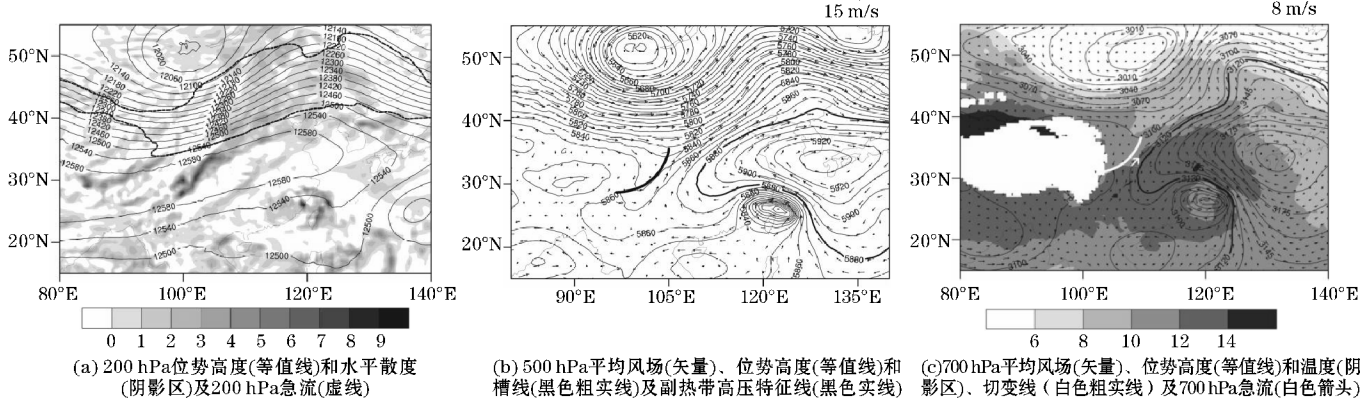


图 5 2018 年 7 月 10 日 20:00–11 日 14:00 平均环流形势

相当黑体亮温(TBB)可以反映对流云顶的高低,数值越小对应云顶越高,对流活动越强,有学者指出相当黑体亮温可以反映从天气尺度到中尺度,再到雷暴尺度各种不同天气系统的活动特征,在研究大气中的动力和热力过程时发挥重要作用<sup>[45]</sup>。结合红外云图(图略),从图 6 可以看出,10 日 20 时四川盆地上空有一条东北–西南走向呈带状分布的叶状云系,推测是由 500 hPa 和 700 hPa 的西风槽前上升运动和地面锋面活动而形成(图 5b 和图 5c);同时在四川盆地南部有对流系统强烈发展,对应的对流云系近似团状,TBB 最小值达到 $-80^{\circ}\text{C}$ (图 6a);11 日 02 时东北–西南向的叶状云系移动缓慢,此时盆地的东北部对流系统强烈发展而形成一个 MCS,该云团的 TBB 最小值小于 $-80^{\circ}\text{C}$ ,表明对流的云的高度已穿透对流层顶,已形成云砧,云团周围

东伸展到中国东部地区上空,较气候平均而言显著偏强、偏东,青藏高原和四川盆地上空在南亚高压控制下,由散度分布可以看出,四川盆地位于南亚高压北侧高空西风急流入口区右侧强烈的高空辐散区中,高空强辐散有利于高层的动力抽吸作用,增强上升运动。降水期间 500 hPa(图 5b)平均环流场上东亚地区中高纬表现为“一脊一槽”型,中国东北地区为脊区,贝加尔湖地区有低涡形成,中心值达 562 dgpm,低涡南侧槽线向南延伸至四川盆地,该低槽的维持有利于持续引导冷空气南下从秦岭–大巴山山口处侵入四川盆地。西太平洋副热带高压呈带状分布控制长江中下游流域一带,脊线位于  $31^{\circ}\text{N}$  附近,588 dgpm 西脊点位于  $108^{\circ}\text{E}$  附近,抵达川东一带。副高南侧有台风“玛莉亚”活动,加大了副高南侧的气压梯度,风速显著增强,有利于水汽和能量向盆地输送,台风“玛莉亚”在四川盆地降水过程中登陆福建,受台风“玛莉亚”的影响,使副高西脊点位置显著偏西;孟加拉湾有低压气旋活动,有利于水汽从孟加拉湾向盆地输送。700 hPa(图 5c)上四川盆地西北侧形成风向切变,切变线东侧维持较强的西南低空急流,切变线北侧的冷空气在高空槽的引导下向南入侵四川盆地,起始于孟加拉湾的西南气流、副高南侧的东南气流和偏北冷空气 3 股气流交绥在盆地北部。

### 3 暴雨过程中各物理量尺度分离结果分析

#### 3.1 流场和高度场的尺度特征

为研究次天气尺度系统在此次盆地暴雨过程中的作



用,通过上述尺度分离技术得到造成“7. 11 暴雨”的次天气尺度扰动流场和扰动高度场(图 7)。10 日 20 时四川盆地西北侧边缘有一条长度为 4 个纬距左右的南北向低层切变线,其东侧伴随有局地涡旋,与之相对应的是高度场扰动低值区,6 h 降水主要位于扰动场中切变线南侧的低压辐合区内(图 7a)。11 日 02 时扰动切变线向南移动进入四川盆地,其南侧的流场开始呈现气旋性环流结构,

高度场扰动低值中心在-3 gpm 以下,此时盆地内降水达到峰值,强降水落区依然位于扰动场中切变线附近的低压辐合区内(图 7b)。6 h 后,扰动切变线位置进一步向南移动,其南侧局地涡旋的位置也随之而移动(图 7c)。11 日 14 时扰动切变线的强度明显减弱,局地涡旋的范围显著减小,对应的扰动低压区范围也明显缩小,中心值减弱为-2 gpm。此时降水过程基本结束(图 7d)。

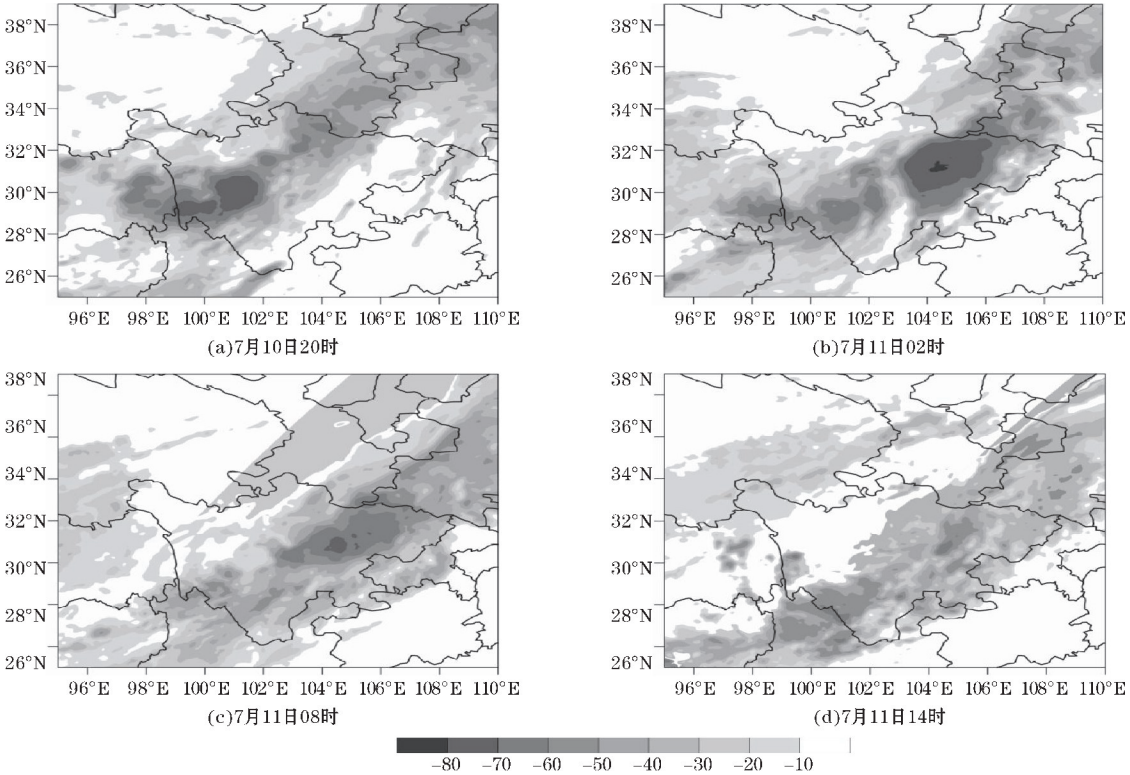


图 6 相当黑体亮温

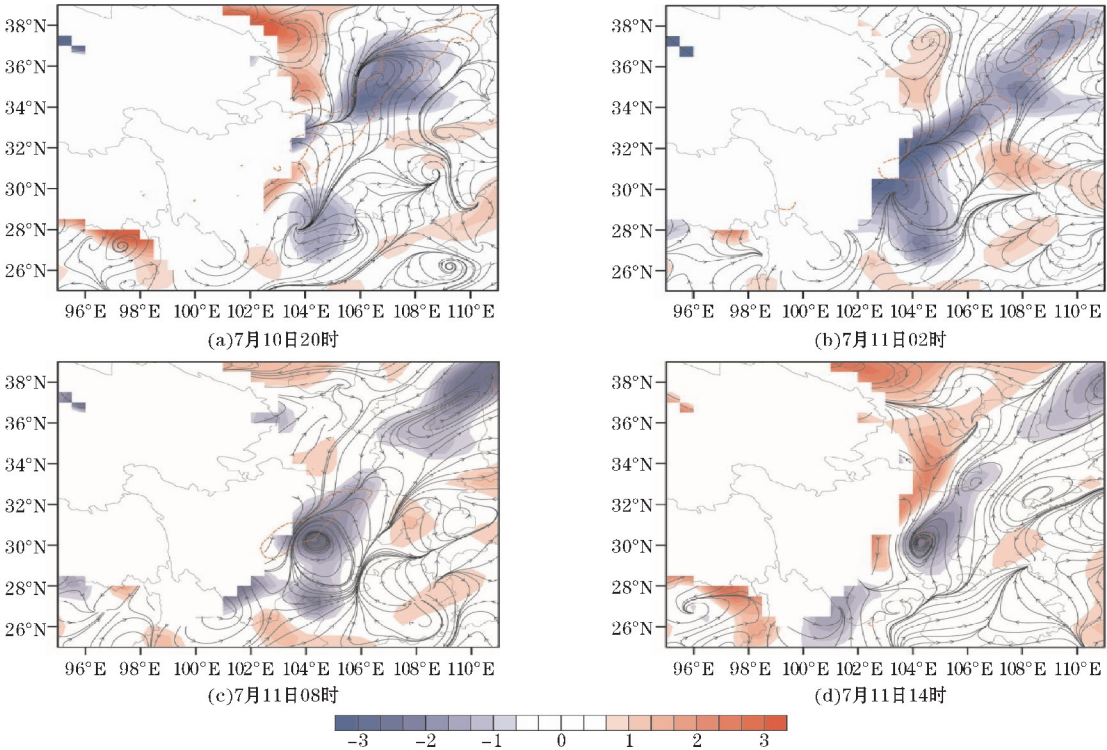


图 7 700 hPa 扰动流场和高度场(阴影区)以及未来 6 h 累计降水大于 20 mm 的区域(虚线)

通过尺度分离后在扰动场中出现了低层切变线和局地涡旋,二者均与6 h大于20 mm降水的区域有较好的对应关系。扰动切变线南移的过程中,在四川盆地诱发局地涡旋,而此刻700 hPa天气图上西南涡正强烈发展(图略),因此推测扰动切变线南压过程中诱发的局地涡旋与西南涡的生成密切相关,强降水和局地涡旋都发生在切变线附近的低压辐合区中。

3.2 温度场和湿度场的中尺度特征

除低层扰动切变线及其引发的局地涡旋为此次暴雨过程的产生提供有利动力条件外,大气热力状况<sup>[46-47]</sup>和水汽<sup>[48-49]</sup>条件也有重要影响,水汽通量散度反映了水汽的汇集程度<sup>[50]</sup>,可以代表水汽条件的充足与否,而假相当位温可以在一定程度上反映气团的热力性质<sup>[51-52]</sup>。

图 8 给出了 700 hPa 上假相当位温和水汽通量散度滤波后的扰动场,由图 8 可见,10 日 20 时四川盆地北侧形成了强度较强的水汽通量散度扰动负值中心,中心值达 $-6\times 10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,代表了强烈的次天气尺度水汽辐合,与水汽的扰动辐合中心位置相对应是假相当位温扰动场正负中心之间的温湿梯度大值区,而强降水主要位于温湿梯度大值区南侧的水汽辐合中心。在四川盆地东南侧的重庆、贵州等地,同样存在水汽的

扰动辐合中心,但并未产生强降水,因此推测只有次天气尺度的水汽辐合还不能决定强降水的出现,还需有利的热力条件相配合,才能共同决定是否产生强降水(图 8a)。11 日 02 时水汽通量散度场的扰动负值区向南延伸进入四川盆地,其负值中心南移至四川盆地西北部,强降水落区位于扰动场中暖湿区与水汽辐合中心相叠加的区域,此时盆地降水达到了峰值(图 4a)。11 日 08 时假相当位温和水汽通量散度的扰动场均向南移动,相比上一个时次,强度有所减弱,与之对应的强降水也随之减弱(图 8c)。11 日 14 时水汽通量散度场的扰动负值中心明显减弱,中心值约为 $-2\times 10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,盆地内扰动场中暖湿区的范围明显缩小,此时降水过程基本结束(图 8d)。

通过假相当位温扰动场的位置分布可以看出,四川盆地北部的干冷空气沿盆地地形边缘南下,与盆地内部的暖湿空气交绥,在盆地西北侧形成温湿梯度大值区并向南移动,期间与水汽扰动辐合中心、强降水落区保持很好的对应关系。由此可见,强降水的出现与水汽辐合以及气团的热力性质有密切联系,其原因一方面是由于温湿梯度大值区及其南侧的暖湿区往往对应水汽辐合中心,为暴雨的产生提供充足的水汽条件;另一方面温湿梯度大值区往往对应斜压锋区,有利于形成上升运动。

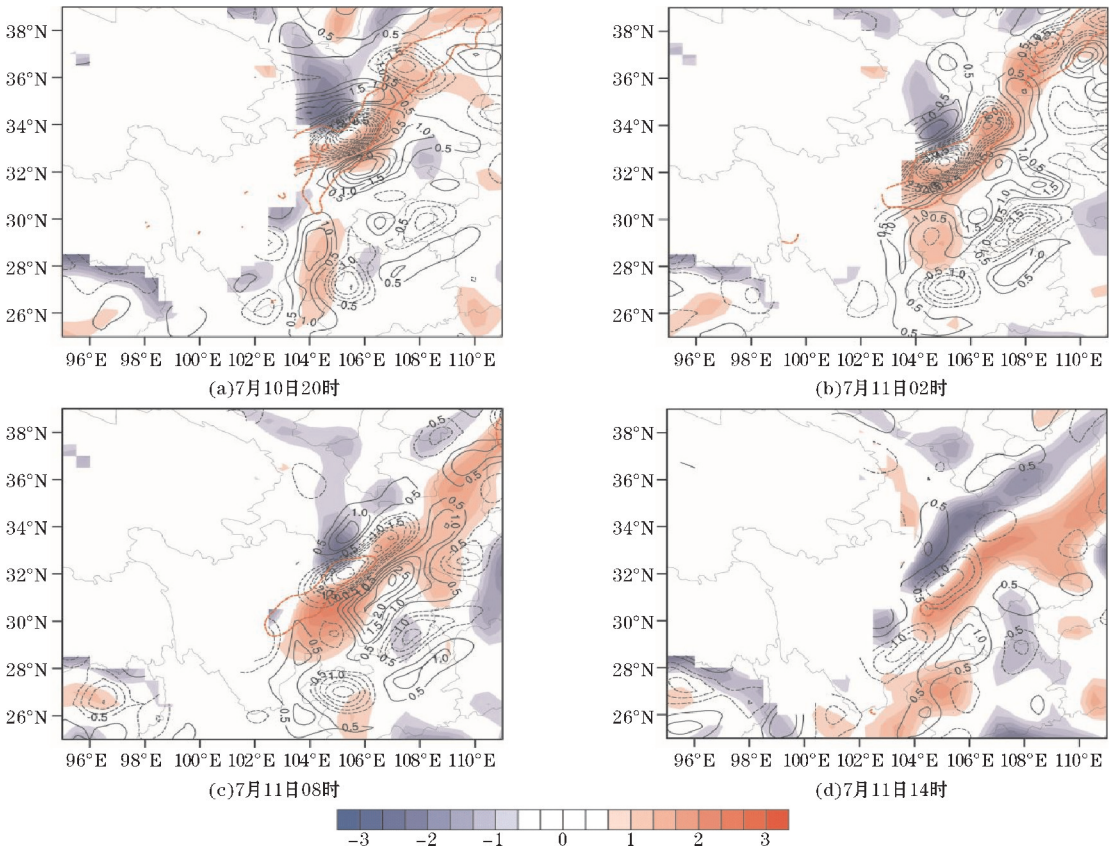


图 8 700 hPa 扰动假相当位温场(阴影)和水汽通量散度场(等值线)及未来 6 h 累计降水大于 20 mm 的区域(红色等值线)



### 3.3 多尺度系统对暴雨形成的可能原因分析

“7.11 暴雨”是在有利的大尺度环流形势作用下,由多个次天气尺度系统共同作用而产生(图9)。从暴雨发生的大尺度环流背景看,四川盆地对流层高层由强盛的南亚高压控制,并位于高空急流入口区右侧,两者共同作用形成了盆地上空的强辐散;对流层中层副热带高压受南侧台风“玛莉亚”的挤压作用,加大了副高南侧的气压梯度,风速明显增强,水汽输送同步增强,同时与北侧高压脊同位相叠加,使由贝加尔湖低涡延伸至四川盆地的西风槽长时间停留于四川盆地。从直接影响暴雨形成的次天气尺度系统看,四川盆地北侧的对流层低层有南-北走向切变线,切变线东侧的低空急流加强了水汽的输送,为暴雨区源源不断地提供水汽。随着切变线向南移动,西南涡快速发展增强,同时冷暖空气交错于盆地,为暴雨的发生提供次天气尺度的热动力条件,而次天气尺度的水汽辐合,为暴雨的发生提供水汽条件。就“7.11 暴雨”而言,次天气尺度系统的热力、动力作用和次天气尺度的水汽辐合直接导致了此次暴雨过程的产生。

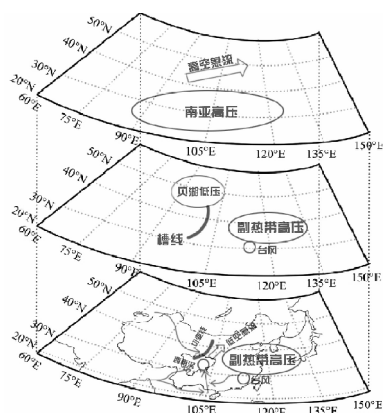


图9 “7.11 暴雨”多尺度、多层次系统配置示意图

## 4 结束语

对一次发生在四川盆地的区域暴雨过程,围绕尺度分离方法在此次区域暴雨中的应用和次天气尺度系统对暴雨的影响及其内部机制机理进行了初步分析,得到如下结论:

(1)“7.11 暴雨”过程期间,南亚高压较常年偏东偏强,盆地处于高空急流入口区右侧的强辐散区中;副热带高压位置异常偏北,有利于西风槽缓慢东移,使此次降水过程持续时间长;同时由于副高南侧台风的作用,副高南侧的东南气流增强,加大了水汽向盆地输送的力度;冷空气侵入四川盆地后在切变线南侧和东侧诱发了局地涡旋,使西南涡显著增强;低层切变线和西

南涡与强降水落区有较好的对应关系。

(2)Shuman-Shapiro 滤波尺度分离方法可以使切变线和相对弱的西南低涡有较好反映,证明该方法能有效分离出四川盆地的次天气尺度系统;扰动流场中切变线及其周围的局地涡旋与扰动低压区相对应,强降水中心发生在扰动切变线附近的低压辐合区内;假相当位温扰动场中的温湿梯度大值区及其南侧的暖湿区与水汽的扰动辐合中心相叠加,往往会出现强降水与之对应。

(3)通过综合分析文中各物理量扰动场的位置和强度发现:假相当位温扰动场正负中心之间的温湿梯度大值区与扰动流场中切变线的位置相对应,强降水中心发生在扰动切变线南侧、东南侧的暖湿区中;扰动高度场和扰动水汽通量散度场负位相重合区对强降水的落区有极强的指示作用,并且降水强度的变化与扰动低压区和水汽扰动辐合中心的强度变化相对应。降水量大的时段,扰动低压区和水汽的扰动辐合中心相叠加,且两者强度均较强,降水趋于停止减弱时,两者的中心分离,并且强度均明显减弱小;“7.11 暴雨”是在切变线和西南涡及其引发的次天气尺度扰动的共同作用下产生的。

需要指出的是,文中的结果主要是由一例四川盆地的区域暴雨过程而得出,研究结果还不一定适合其他个例,因此有必要结合更多的个例开展分析和研究,总结出普适的规律特征。

## 参考文献:

- [1] 廖文超,刘海文,朱玉祥,等. 2013 年 7.18 四川暴雨分析[J]. 大气科学学报,2016,39(5):702-711.
- [2] 彭贵康,柴复新,曾庆存. “雅安天漏”研究 I: 天气分析[J]. 大气科学,1994,18(4):466-475.
- [3] 康岚,顾清源,蒲吉光. 一次低能大暴雨成因分析[J]. 气象科技,2002,30(5):284-287.
- [4] 顾清源,康岚,徐琳娜. 川北两次特大暴雨天气过程成因的对比分析[J]. 气象科技,2004,32(1):29-33.
- [5] 郁淑华. 诱发泥石流灾害的四川盆地大暴雨过程分析[J]. 气象,2002,28(8):30-33.
- [6] 陈忠明,闵文彬,缪强,等. 高原涡与西南涡耦合作用的个例诊断[J]. 高原气象,2004,23(1):75-80.
- [7] Chen Y, Xie S. Temporal and spatial visibility trends in the Sichuan Basin, China, 1973 to 2010 [J]. Atmospheric Research,2012,112:1-34.
- [8] 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.
- [9] 顾清源, 师锐, 徐会明. 移出与未移出高原的两类低涡环流特征的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(4): 7-15.
- [10] 师锐, 陈永仁, 王春国. 副高断裂前后四川盆地一次暴雨过程的比较分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 18-25.
- [11] 肖递祥, 杨康权, 徐栋夫, 等. 副高西侧四川盆地两次极端暴雨过程分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(4): 10-18.
- [12] 彭新东, 程麟生. 高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究: I. 分析和诊断[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1992, 28(2): 163-168.
- [13] Wang B. The Development Mechanism for Tibetan Plateau Warm Vortices[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1987, 44(20): 2978-2994.
- [14] 赵玉春, 王叶红. 高原涡诱发西南涡特大暴雨成因的个例研究[J]. 高原气象, 2010(4): 3-15.
- [15] 顾清源, 肖递祥, 黄楚惠, 等. 低空急流在副高西北侧连续性暴雨中的触发作用[J]. 气象, 2009, 35(4): 59-67.
- [16] 叶瑶, 李国平. 近61年夏半年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析[J]. 高原气象, 2016, 35(4): 946-954.
- [17] 李跃清, 徐祥德. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. 气象科技进展, 2016, 6(3): 134-140.
- [18] 罗清, 郁淑华, 罗磊, 等. 不同涡源西南涡的若干统计特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(4): 8-15.
- [19] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 西南低涡年鉴 2013 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-262.
- [20] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 西南低涡年鉴 2014 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 1-3.
- [21] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 西南低涡年鉴 2015 [M]. 北京: 科学出版社, 2016: 1-230.
- [22] 中国气象局成都高原气象研究所, 中国气象学会高原气象学委员会. 西南低涡年鉴 2016 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 1-262.
- [23] 卢敬华. 西南低涡概论[M]. 北京: 气象出版社, 1986: 1-270.
- [24] 彭新东, 程麟生. 高原东侧低涡切变线发展的个例数值研究: I. 分析和诊断[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1992, 28(2): 163-168.
- [25] 缪强, 刘波. 青藏高原天气系统与背风坡浅薄天气系统耦合相互作用的特征分析[J]. 四川气象, 1999, 9(3): 18-22, 45.
- [26] 邱静雅, 李国平, 郝丽萍. 高原涡与西南涡相互作用引发四川暴雨的位涡诊断[J]. 高原气象, 2015, 34(6): 48-57.
- [27] 雷丽娟, 雷小途. 东海台风对四川东部暴雨的影响研究[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 314-323.
- [28] 朱乾根. 暴雨维持和传播的机制分析[J]. 大气科学学报, 1979(1): 1-7.
- [29] 陈忠明. 一次强烈发展西南低涡的中尺度结构分析[J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 273-282.
- [30] 覃丹宇. 用滤波方法进行  $M\alpha CS$  云团形态差异的个例分析[J]. 大气科学, 2010, 34(1): 154-162.
- [31] 张虹, 李国平, 王曙东. 西南涡区域暴雨的中尺度滤波分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 361-371.
- [32] 孙建华, 李娟, 沈新勇, 等. 2013年7月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征[J]. 气象, 2015, 41(5): 533-543.
- [33] 徐祥德, 翁永辉, 孟智勇, 等. 卫星资料变分分析"98·7"武汉-黄石地区特大暴雨中尺度锋面对流特征[J]. 大气科学, 2002, 26(6): 845-856.
- [34] 徐祥德. 大气遥感再分析场构造技术与原理[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 15-120.
- [35] 张秀年, 段旭. 低纬高原西南涡暴雨分析[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 941-947.
- [36] 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, 34(4): 39-47.
- [37] 黄瑶, 肖天贵, 刘思齐. 2016年7月四川持续性强降水的中尺度滤波分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(3): 307-317.
- [38] 陈玉春, 李素华, 顾弘道, 等. 1981年7月四川特大暴雨的数值预报和中尺度系统的分离[J]. 高原气象, 1988(4): 300-311.
- [39] 张夕迪, 孙军. 2018年7月大气环流和天气分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1370-1376.
- [40] 张晶, 邢文慧, 许银山. 2018年长江第1, 2号洪水三峡入库洪峰预报分析[J]. 人民长江, 2018, 49(22): 22-26.
- [41] Shapiro R. Smoothing, filtering, boundary effects [J]. Reviews of Geophysics, 1970, 8(2): 359-387.
- [42] 夏大庆, 郑良杰, 董双林, 等. 气象场的几种中尺度分离算子及其比较[J]. 大气科学, 1983, 7(3): 303-311.

- [43] 魏凤英,朱福康.一种分离暴雨过程天气尺度和次天气尺度特征的方法[J].大气科学,2003,27(2):191-202.
- [44] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980:1-71.
- [45] 傅昺珊,岳艳霞,李国翠.TBB资料的处理及应用[J].气象,2006,32(2):40-45.
- [46] 段海霞,陆维松,毕宝贵.凝结潜热与地表热通量对一次西南低涡暴雨影响分析[J].高原气象,2008,27(6):1315-1323.
- [47] 胡祖恒,李国平,官昌贵,等.中尺度对流系统影响西南低涡持续性暴雨的诊断分析[J].高原气象,2014,33(1):116-129.
- [48] 宋雯雯,李国平,唐钱奎.加热和水汽对两例高原低涡影响的数值试验[J].大气科学,2012,36(1):117-129.
- [49] 宋雯雯,李国平,王皓.四川盆地一次强降水过程水汽特征[J].气象科技,2018,46(1):129-138.
- [50] 李山山,李国平.一次鞍型场环流背景下高原东部切变线降水的湿 $Q$ 矢量诊断分析[J].高原气象,2017,36(2):317-329.
- [51] 刘还珠,张绍晴.湿位涡与锋面强降水天气的三维结构[J].应用气象学报,1996,7(3):275-284.
- [52] 李国翠,李国平,岳艳霞,等.副高边缘暴雨过程中的GPS可降水量和假相当位温分布特征[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2012,4(2):125-131.

## Application of Scale Separation Technology in a Case of Southwest Vortex Rainstorm Induced by a Shear Line

HOU Shaoyu<sup>1</sup>, GONG Yuanfa<sup>1</sup>, ZHAO Fuhu<sup>2</sup>, LIU Haiwen<sup>3</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China; 3. Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** In order to explore the main mechanism of rainstorms caused by subsynoptic scale system and the effect of Shuman-shapiro filtering on scale-separation of rainstorm in basin. And based on the encrypted observation data of hourly precipitation, the CMORPH fusion grid precipitation data, the GFS global prediction field data and the FY-2E satellite equivalent blackbody brightness temperature (TBB) data in China Meteorological Administration, this paper made a series of preliminary analysis upon the basin rainstorm process in July 10, 2018 to July 11, 2018 (referred to as the "7.11 Rainstorm"). And it turns out that, under favorable atmospheric circulation conditions, the cold air invades the Sichuan Basin and pushes the shear line to the south and induces the southwest vortex (SWV) is the main reason for the "7.11 rainstorm". It further proves that Shuman-shapiro filtering technique can well separate the subsynoptic scale disturbances in "7.11 Rainstorm". The cold and warm air with different thermal properties fought each other in Sichuan Basin which makes the phenomenon of atmospheric baroclinic unsteadily enhanced. The generation of lower tropospheric shear lines and its accompanying southwest vortexes have provided favorable dynamic conditions for the occurrence of "7.11 Rainstorm", and at the same time, combined with favorable water vapor conditions, finally resulted in the occurrence of 7.11 rainstorm.

**Keywords:** meteorology; synoptic diagnosis; scale separation technology; southwest vortex; low level shear line