

# A Diagnostic Analysis of “7.19” Rainstorm over Central and Eastern China

Ci Song, Man Wang, Jiajin Zhu

Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan  
Email: songcicuit@126.com

Received: Jul. 6<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2020; published: Jul. 29<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Using NCEP/NCAR daily 4 times the FNL global reanalysis and CMORPH hourly precipitation data, the large-area rainstorm process occurring on July 19, 2016 are the diagnosed and analyzed. The results show that the southwest vortex is formed greatly influenced by the stable two troughs and two ridges over high latitudes, the Western Pacific subtropical high and the short wave trough over Qinghai-Tibet plateau. The stable of high latitude trough and Western Pacific subtropical high over middle and low latitudes are favorable for the eastward movement of southwest vortex and vortex over North China, the water vapor transport and the unstable energy accumulation, and finally create favorable conditions for the occurrence of rainstorm. The wet  $Q$  vector also has a good indicator effect on the next 6 h precipitation. In the areas with obvious upward movement in the middle and lower troposphere in the rainstorm area, unstable stratification is easy to be stimulated to generate strong convective activities, corresponding to strong wet  $Q$  convergence. Therefore, the wet  $Q$  convergence area is positively correlated with the precipitation intensity. The large positive center of  $Z$ -helicity area in the middle and lower troposphere has a good indication for the precipitation area in the next 6 hours. The distribution of the positive  $Z$ -helicity area in the horizontal direction is consistent with the main precipitation area. The center of positive  $Z$ -helicity area corresponds to strong convergence ascending motion, which is an effective physical quantity for rainstorm forecast.

## Keywords

Rainstorm, Pseudo-Equivalent Potential Temperature, Wet  $Q$  Vector,  $Z$ -Helicity

---

# “7.19” 中国中东部地区暴雨过程诊断分析

宋 辞, 王 蔓, 朱家瑾

成都信息工程大学, 四川 成都  
Email: songcicuit@126.com

收稿日期: 2020年7月6日; 录用日期: 2020年7月22日; 发布日期: 2020年7月29日

## 摘要

采用NCEP/NCAR提供的逐日4次的FNL全球再分析格点资料和CMORPH融合逐时降水格点数据,对2016年7月19日发生的大范围强降水过程进行了诊断分析,研究结果表明:受中高纬度稳定的两槽两脊、西太平洋副热带高压,以及青藏高原短波槽的影响,西南涡在四川东部生成。高纬度槽和中低纬度西太副高的稳定维持利于西南涡和华北上空低涡的东移、水汽输送和不稳定能量的积蓄,为暴雨创造了有利条件。湿 $Q$ 矢量也对未来6 h降水也有很好的指示作用,暴雨区对流层中低层上升运动明显的区域易激发出不稳定层结产生强对流活动,对应强的湿 $Q$ 辐合,因此湿 $Q$ 辐合区与降水强度呈正相关。对流层中底层 $Z$ -螺旋度正值区大值中心对未来6 h降水落区有较好的指示意义,在水平方向上, $Z$ -螺旋度正值密集区分布和主要降水区仍然保持一致。 $Z$ -螺旋度正值区中心对应强辐合上升运动,是暴雨预报的有效物理量。

## 关键词

暴雨, 假相当位温, 湿 $Q$ 矢量,  $Z$ -螺旋度

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

暴雨的产生是多种因素的共同结果,其既受中尺度系统热动力作用影响,又是大尺度环流系统配置调整的结果,为多尺度系统相互作用下产生,大暴雨的发生、发展与低空流场的辐合、垂直运动的急速发展密切相关,并常常出现气旋性垂直涡度在短时间内迅速增大的现象[1]。西南涡引起的降水在一年四季均有发生,对我国西南地区造成很大影响。从西南涡的影响范围上来看,它不仅影响源地的天气,当西南涡东移时,也会影响路径上的天气,造成暴雨[2]。从西南涡的垂直结构可以看出,下层辐合上层辐散的形式非常有利于垂直上升运动、低涡的维持以及暴雨的发生[3],孟加拉湾的水汽与也与西南低涡的形成密切相关[4]。

对于西南低涡发生发展的动力机制也有了很多研究。如吴国雄等[5]利用 $\theta$ 坐标绝热模式,提出了西南低涡形成的倾斜涡度发展机制。朱禾等[6]提出在湿位涡守恒条件下,局地降水增强与消亡和西南涡的发展密切相关,提出了西南涡影响降水的成因和理论。也有很多学者研究了非地转湿 $Q$ 矢量在暴雨中的应用。1978年Hoskins[7]首次提出 $Q$ 矢量概念, $Q$ 矢量理论在近年来不断发展。如杨晓霞等[8]将湿 $Q$ 矢量在垂直和平行于等位温线的方向进行分解,揭示了非绝热加热对暴雨的发生有很大作用。黄楚慧等[9]发现低层非地转湿 $Q$ 矢量散度的辐合中心和强降水中心基本吻合,其垂直分布对短时降水落区提供有效参考。张雪琦等[10]进一步开展 $Q$ 矢量散度的研究,提出 $Q$ 矢量散度辐合垂直带的西南一侧有更大概率出现西南涡。然而,仅仅用湿 $Q$ 矢量进行预报还有所不足,也有学者提出 $Z$ -螺旋度也可用于降水区的预报。王璐思等把中低层水平湿 $Z$ -螺旋度负值区与天气系统相联系,发现它们有很好的对应关系[11]。暴雨总发生在螺旋度锋区内靠近正值区的一侧,并且反映的降水落区范围较实际的要大[12]。相关诊断量的应用都为对暴雨的预报提供了有效参考。本文将对2016年7月18~23日我国中东部地区一次暴雨天气过程进行诊断分析,以期对未来的降水预报有一定的参考作用。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

使用的主要资料包括美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供逐日四次的2016年7月19至7月23日 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点再分析数据和中国气象局提供的中国自动气象站与CMORPH (Climate Prediction Center Morphing Technique)降水数据融合的逐时 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 数据产品。

### 2.2. 方法

为了更好的找出低涡与暴雨关联特性, 本文将对一次西南涡东移引发我国大范围暴雨进行诊断分析。利用湿 $Z$ -螺旋度和湿 $Q$ 矢量这两个诊断量来研究西南涡东移北上过程中发生发展的结构特征。以下是相关诊断量的计算方法及原理:

#### (1) 湿 $Q$ 矢量

准地转 $Q$ 矢量这个概念最早由Hoskins等[7]提出, 并广泛应用于暴雨等强天气过程的诊断分析中。张兴旺[13]在考虑大尺度稳定性加热的情况下, 推导出湿 $Q$ 矢量的计算表达式。此后湿 $Q$ 矢量理论并不断发展和完善, 在暴雨的分析和预报工作中得到进一步广泛使用。

在采用地转风垂直切变平衡代替实际风垂直切边平衡的条件下, 可以推导出 $x$ 方向和 $y$ 方向的 $Q$ 矢量的表达式, 即:

$$Q_x^* = \frac{1}{2} \left[ f \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial x} \right) - h \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \nabla \theta + \frac{\partial(hH)}{\partial x} \right] \quad (1)$$

$$Q_y^* = \frac{1}{2} \left[ f \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial v}{\partial y} \right) - h \frac{\partial V}{\partial y} \cdot \nabla \theta + \frac{\partial(hH)}{\partial y} \right] \quad (2)$$

$Q_x^*$ ,  $Q_y^*$ 分别表示在 $x$ 和 $y$ 方向上的湿 $Q$ 分量。在不考虑凝结潜热作用下, 其本质与Hoskins等[7]定义的准地转湿 $Q$ 一致。在考虑凝结潜热的作用下, 作 $\frac{\partial}{\partial x}(2) + \frac{\partial}{\partial y}(3)$ 得湿 $Q$ 矢量散度为强迫项的非地转 $\omega$ 方程:

$$\nabla^2(\sigma\omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = -2\nabla \cdot Q^* \quad (3)$$

从该式可以看出, 湿 $Q$ 矢量与次级环流密切相关, 在700 hPa, 具体为 $\nabla \cdot Q^* < 0$ 表现为辐合,  $\omega < 0$ , 作上升运动;  $\nabla \cdot Q^* > 0$ 表现为辐散,  $\omega > 0$ , 下沉运动。由此可通过湿 $Q$ 矢量散度来鉴别垂直运动的发展情况。

#### (2) 湿- $Z$ 螺旋度:

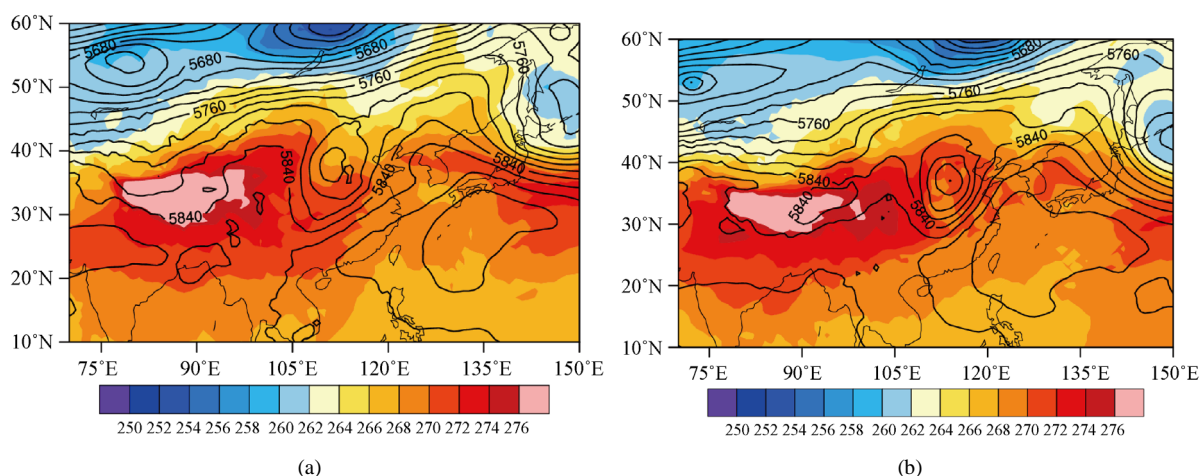
$$F = w\zeta = w \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\omega}{pg} \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

简单来讲,  $Z$ -螺旋度为垂直方向上涡度与速度的乘积。Lilly [14]最早将螺旋度这个概念运用到强风暴雨研究中, 并指出强对流风暴中螺旋度的值往往很大。(5) 式中 $F$ 代表湿垂直螺旋度, 单位为 $m^{-2} \cdot s^{-1}$ ,  $\omega$ 为 $p$ 坐标系中的垂直速度,  $w$ 是 $z$ 坐标系中的速度, 单位是 $m \cdot s^{-1}$ 。当有上升运动( $w > 0$ )且存在正涡度( $\zeta > 0$ )时, 螺旋度为正值; 反之, 当有上升运动, 且存在负涡度( $\zeta < 0$ )时, 螺旋度为负值。该式表示了此次降水过程的水汽垂直输送状况。

### 3. 研究结果

#### 3.1. 环流形势与降水过程

受西太副高和高空槽共同影响,东亚地区中高纬呈“两槽两脊”环流形势,有利于引导北方干冷空气向南输送。7月19日12时(图1(a)),西太平洋地区存在一个高压脊,东亚大槽控制影响我国东北至渤海地区,蒙古高原中部出现闭合一小低涡,低涡南侧的低压槽系统控制的范围很大,从北向南依次为华北西部、陕西、四川盆地、云南。7月20日12时(图1(b)),华北中部上空的闭合低涡系统继续加深发展,维持时间长达24 h,副热带高压稳定于太平洋西岸,由海上西伸至中国华东-华南沿海,这有利于大量冷空气南下;与来自低纬地区得暖湿空气相遇,从而为暴雨的发生提供了有利的条件。



**Figure 1.** 500 hPa height field and temperature field at 12 hours on (a) 19 and (b) 20 July 2016 (colouring map, unit: °C)  
**图 1.** 2016 年 7 月(a) 19 日 12 时和(b) 20 日 12 时的 500 hPa 高度场和温度场(填色图, 单位: °C)

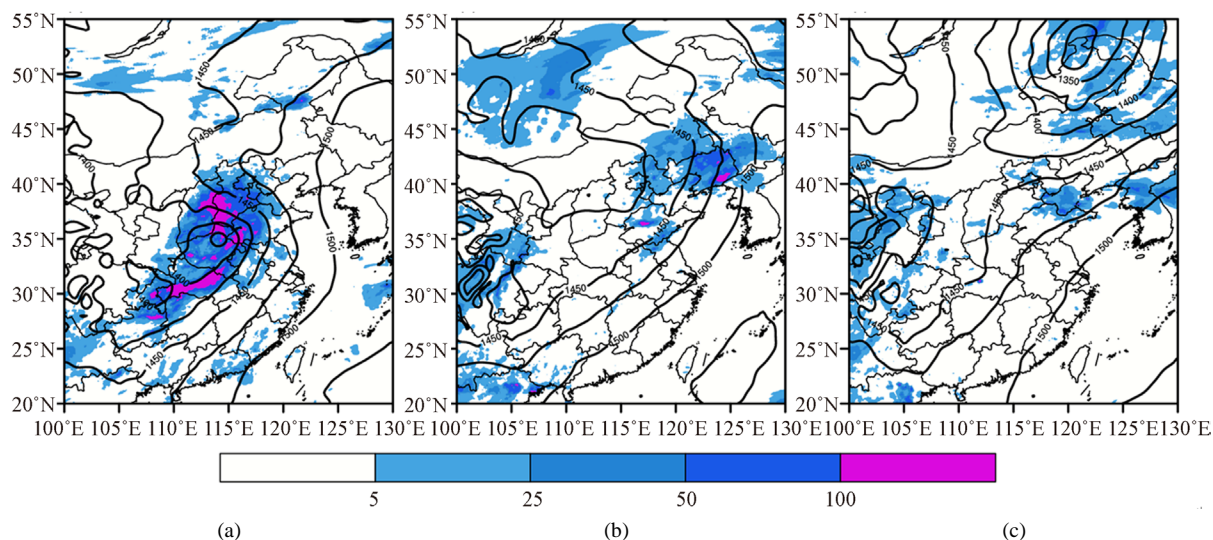
受高低纬度系统的相互影响,从7月19日开始我国出现了一次大范围暴雨过程。由7月19日24 h累积降水量(图2(a))分布可见,我国重庆、湖北、安徽和河南等地出现了强度较大的暴雨,部分地区24 h最大降水量超过100 mm,对应地区出现低涡中心。在21日(图2(b))降水强度有所减弱,降水最大值移到我国东北地区,强度和范围均有所减弱,降雨带呈西南-东北走向。到了23日(图2(c)),降水趋于消散,对应低涡也有所北移。上述研究结果表明2016年6月19日呈大强度和范围降水,因此在接下来的分析中,将重点对19日发生的暴雨进行诊断分析。

为了表征大气温度、压力与湿度的综合性特点,假相当位温 $\theta_{se}$ 常作为参数来使用,其值分布可反应大气湿静力能量的分布。当 $\frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} > 0$ 时,就表示该区域存在不稳定能量,高温高湿的环境有利于降水的发生。 $\theta_{se}$ 场等值线密集区为能量锋区,降水常常发生在此处。

#### 3.2. 假相当位温

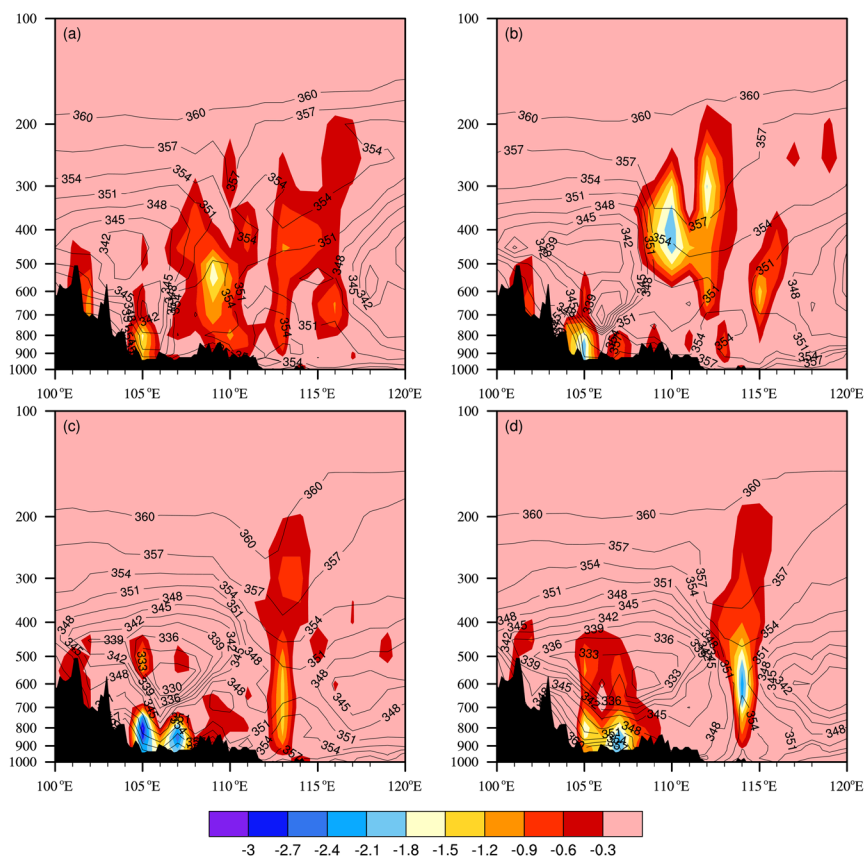
从2016年7月19日00时的假相当位温和垂直速度纬向剖面图可以看到,在105°E,800 hPa左右 $\theta_{se}$ 场等值线陡峭密集,说明此时大气低层处于层结不稳定状态,结合上文分析可知为暴雨落区(图3)。从19日00时开始,此时对流开始发展,降雨落区该处。随后西南涡在105°E处发展加强,19日12时,600~400 hPa为假相当位温密集带,600 hPa以下仍存在剧烈的上升运动,为较强的对流不稳定区,有利于盆地对流发展强度增强,强烈的辐合上升运动的大气环境配置是低涡的发展及暴雨的有效触发机制。到了18时,





**Figure 2.** Accumulated precipitation in 24 h (colouring map, unit: mm) and the geopotential height of 700 hPa at 12:00 on the corresponding day (contour line), (a) 18<sup>th</sup>, (b) 20<sup>th</sup> and (c) 22<sup>th</sup> on July

**图 2.** 24 h 累积降水量(填色图, 单位: mm)和对应当日 12 时 700 hPa 位势高度场(等值线)。(a) 7 月 19 日; (b) 7 月 21 日; (c) 7 月 23 日



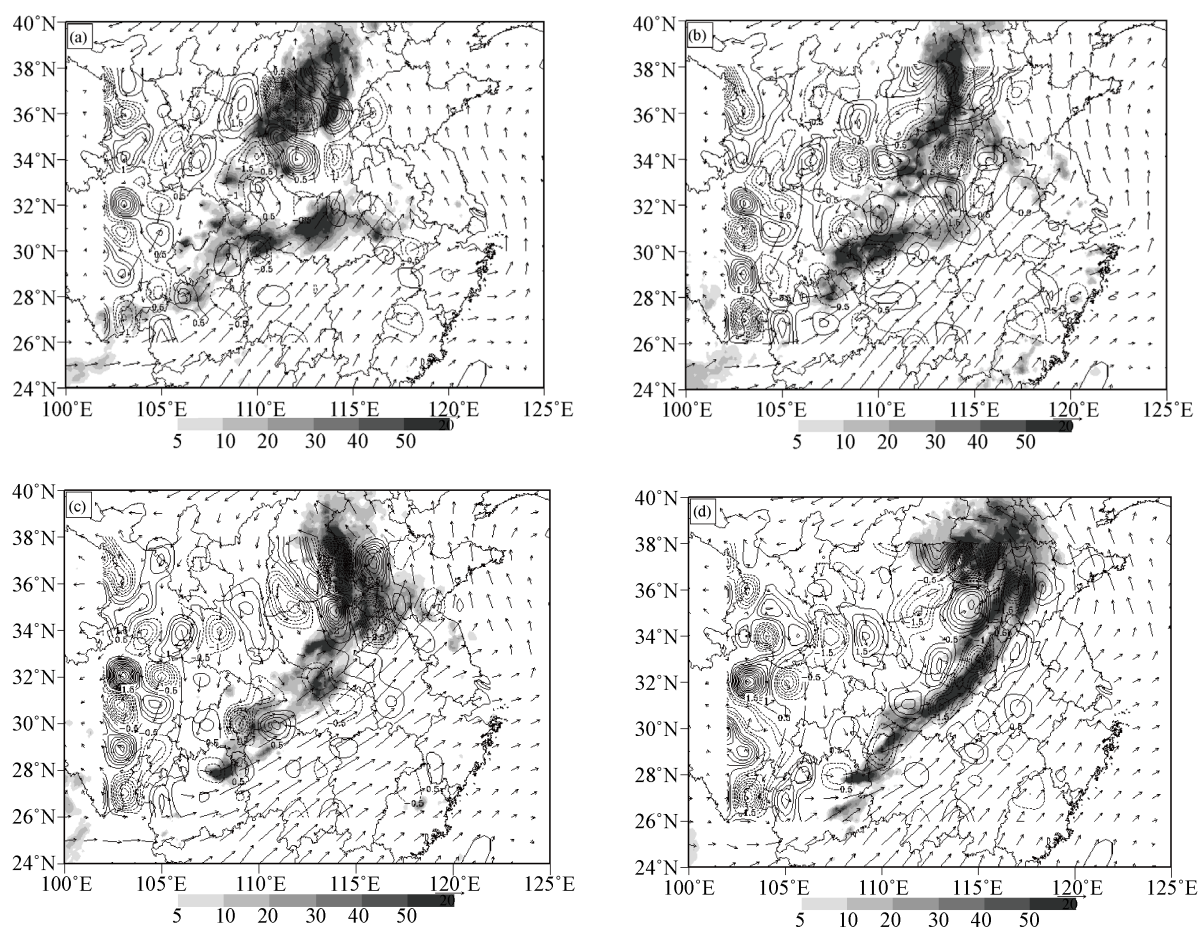
**Figure 3.** Vertical velocity along 32°N (colorimetric map, unit: Pa/s) and  $\theta_{se}$  (line, unit: K), black shadows indicate terrain, (a) 00:00, (b) 06:00, (c) 12:00, (d) 18:00 on 19<sup>th</sup>, July

**图 3.** 沿 32°N 的垂直速度(填色图, 单位: Pa/s)和假相当位温(等值线, 单位: K), 黑色表示地形, 7 月 19 日。(a) 00 时, (b) 06 时, (c) 12 时, (d) 18 时

能量锋区主要位于  $107^{\circ}\text{E}$  附近。由此可见, 降水东移, 强度增强。这些结果都表明了该时刻对应区域上空积蓄了巨大的不稳定能量, 从而有利于暴雨的发生发展。

### 3.3. 湿 $Q$ 矢量

利用再分析资料计算了 19 日 00 时、06 时、12 时和 18 时 700 hPa 湿  $Q$  矢量散度及其散度等量, 并与该时刻未来 6 小时累积降水进行对比。由图 4 可见, 在此次大范围强降水过程中, 非地转湿  $Q$  散度主要呈块状和带状分布, 水平尺度具有明显的中小尺度特征。根据 19 日 700 hPa 的非地转湿  $Q$  散度分布可知, 中国地区主要有两个降水区: 中国的东北部的大面积降水和四川东部的小面积降水。四川东部地区在 19 日 00 时开始出现的降水, 对应区域存在一个东 - 西向弱的湿  $Q$  辐合带, 辐合带分布特征和降水区域的分布基本重合。19 日 06 时西南涡开始生成, 降水范围和强度都有所增大, 此时的降水范围也随之增大, 湿  $Q$  矢量等值线密集。结果显示, 等值线密集的湿  $Q$  辐合区与未来 6 h 累积降水落区基本重叠。

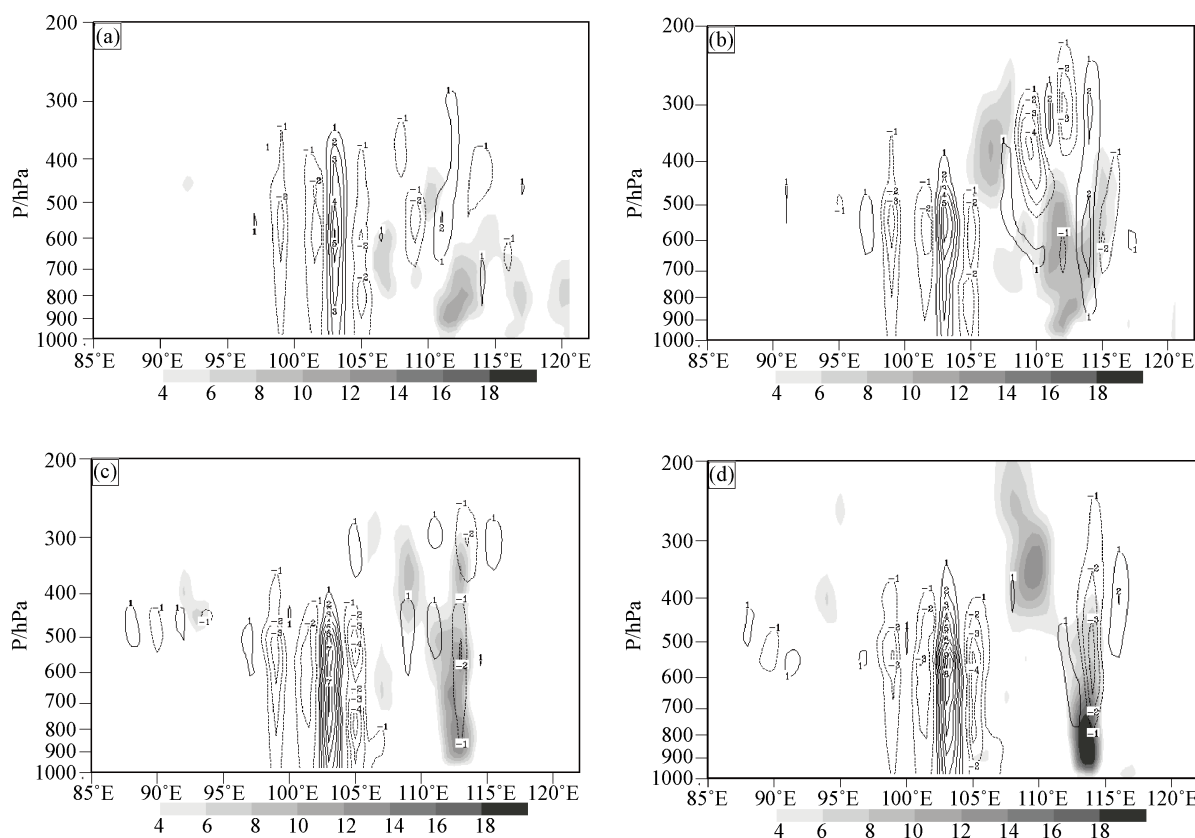


**Figure 4.** The wet  $Q$  vector divergence (line, unit:  $1 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ) and the accumulated precipitation in the future 6 h at this moment (shading, unit: mm), (a) 00:00, (b) 06:00, (c) 12:00 and (d) 18:00 on 19<sup>th</sup> July

**图 4.** 湿  $Q$  矢量散度(等值线, 单位:  $1 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ )与该时刻未来 6 h 累积降水量(阴影区, 单位: mm) 7 月 19 日 (a) 00 时, (b) 06 时, (c) 12 时, (d) 18 时

非地转湿  $Q$  矢量散度可以表示垂直运动的强度, 为了研究垂直运动和非地转湿  $Q$  矢量之间的关系, 从而揭示降水与湿  $Q$  矢量的关联, 给出了 19 日 00 时、06 时、12 时、18 时沿  $32^{\circ}\text{N}$  的  $Q$  矢量散度剖面(图 5)。从该日湿  $Q$  矢量垂直剖面的发展变化上来看, 在  $100^{\circ}\text{E} \sim 105^{\circ}\text{E}$  处, 辐散辐合场始终从对流层低层延

伸到 500 hPa 高度及以上, 说明了本次暴雨过程的垂直运动很强。在 19 日 00 时, 湿  $Q$  矢量最大辐合中心位于 500~600 hPa 之间, 103°E。19 日 06 时, 华北上空的湿  $Q$  矢量散度辐合加大加强; 到了 12 时, 西南地区上空湿  $Q$  矢量最大辐合中心向东移动了约一个经度, 等值线变密集, 华北上空反映了湿  $Q$  矢量散度辐合场的强度增强, 垂直运动加强, 且有向东移动的趋势, 18 时华北地区低层湿  $Q$  辐合达到最强, 上升运动强烈, 这说明 19 日经历了西南低涡强度加强, 并向向东移动的过程。降水主要发生在低涡附近, 从图中可以看出, 非地转湿  $Q$  散度和低涡有很好的对应关系, 湿  $Q$  散度随高度向北倾斜, 且暴雨区对流层中低层辐合一致。



**Figure 5.** Vorticity (shadow, unit:  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and non-geostrophic wetting  $Q$  divergence (contour line, unit:  $1 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ) along the vortex center, (a) 00:00, (b) 06:00, (c) 12:00 and (d) 18:00 on 19<sup>th</sup> July

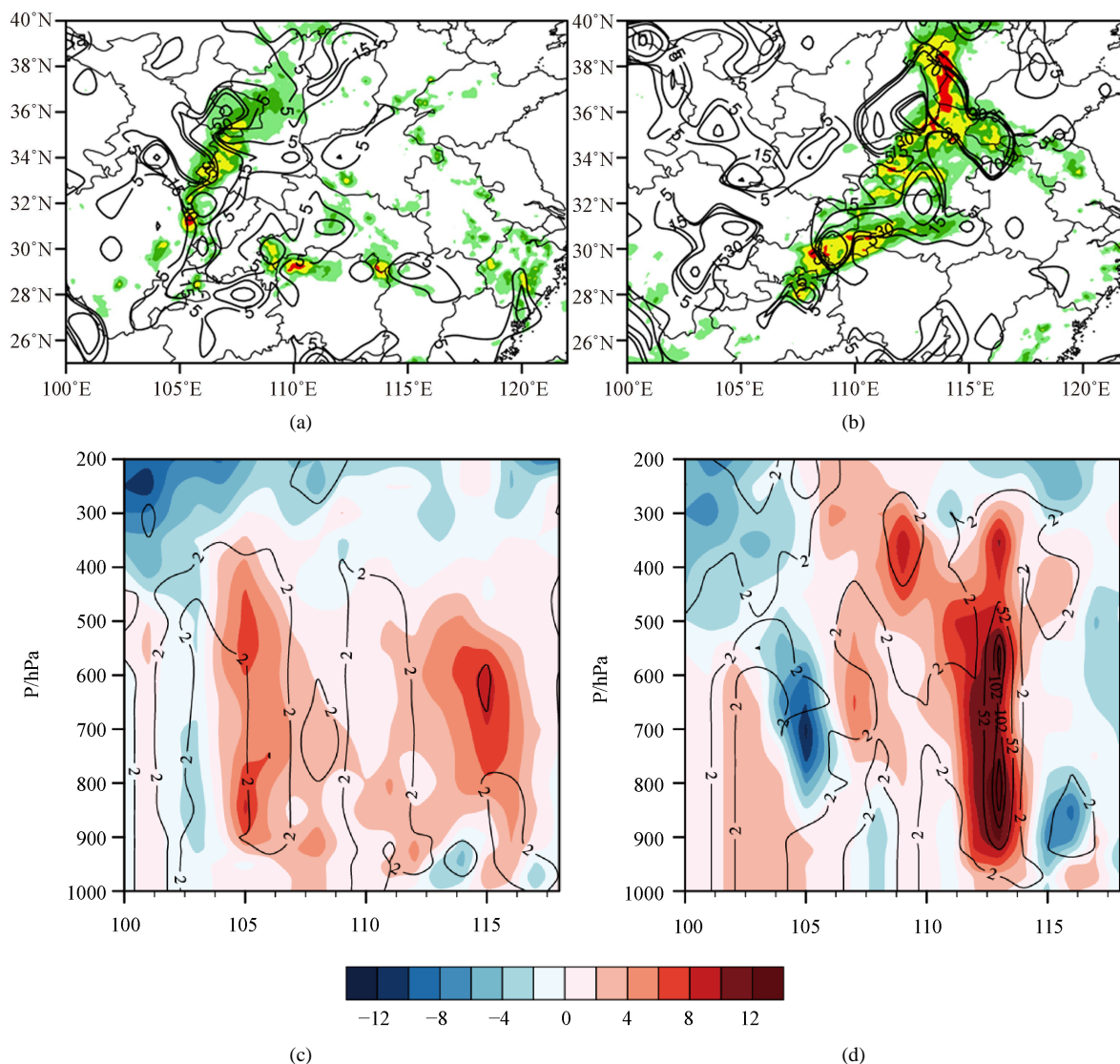
**图 5.** 沿低涡中心的涡度(阴影, 单位:  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )和非地转湿  $Q$  散度(等值线, 单位:  $1 \times 10^{-15} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ ), 7 月 19 日 (a) 00 时, (b) 06 时, (c) 12 时, (d) 18 时

### 3.4. Z-螺旋度

由 Z-螺旋度定义可知, 当有上升运动且存在正涡度发展时, Z-螺旋度为正值[15], 因此主要对 Z-螺旋度正值区进行分析。由 18 日 12 时 700 hPa, Z-螺旋度和未来 6 h 降水量分布(图 6(a))可见, 位于四川东部, 甘肃南部的雨区与 Z-螺旋度区相重合, 降水中心发生在 Z-螺旋度的正值范围区域。由 18 日 12 时相对涡度和 Z-螺旋度分布(图 6(c))可看出, 降水中心上空 Z-螺旋度正值柱从对流层低层一致延伸到 300 hPa 附近, 有两个正值最大中心, 分别在 108°E 和 112°E, 与正涡度区域相重合, 表明该区域内存在较强的上升运动, 为暴雨发生发展提供了有利条件。到 19 日 12 时(图 6(b)), Z-螺旋度分布和主要降水区仍然保持一致, 降水中心仍位于 Z-螺旋度等值线密集区。从垂直方向来看(图 6(d)), 降水中心也与 Z-螺旋度正值



中心相对应,正值区从 900 hPa 伸展到 550 hPa 附近,且与涡度正值区相叠加,涡度正值区和 Z-螺旋度正值区范围相较于 18 日 12 时有所增大,Z-螺旋度中心最大值增大到  $102 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,在低层 113°E 处正涡度区引导下,亦有东移增强趋势,表明降水区上空存在较强的上升运动,低涡强度增强,降水也随之增强。可见,对于降雨落区和强弱和 Z-螺旋度正值区的分布和强度有很好的对应关系。



**Figure 6.** Z-helicity (unit:  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) and 6 h precipitation (shaded area, unit: mm) horizontal distribution (a) at 12:00 on July 18 and (b) 12:00 on July 19. Vertical profiles of relative vorticity (shaded area, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and Z-helicity (unit:  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) along  $32^{\circ}\text{N}$  at 12:00; (c) on July 18, 2016 and 12:00; (d) on July 19, 2016

**图 6.** 2016 年 7 月(a) 18 日 12 时和(b) 19 日 12 时 Z-螺旋度(单位:  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )及 6 h 降水量(阴影区, 单位: mm)水平分布; 2016 年 7 月 18 日 12 时(c)和 2016 年 7 月 19 日 12 时(d) 沿  $32^{\circ}\text{N}$  的相对涡度(阴影区, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )及 Z-螺旋度(单位:  $10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ )垂直剖面

#### 4. 结论

采用 NCEP/NCAR 提供的逐日 4 次的 FNL 全球再分析格点资料和 CMORPH 融合逐时降水格点数据, 对 2016 年 7 月 19 日发生的一次大范围强降水过程进行了诊断分析, 得到以下结论:



(1) 受中高纬度稳定的两槽两脊结构的影响,低纬华南地区受西太平洋副热带高压的控制,以及青藏高原短波槽的影响,西南涡在四川东部生成。高纬度槽和中低纬度西太副高的稳定维持,西南涡和华北上空低涡的东移和水汽输送和不稳定能量的积蓄为暴雨的发生创造了有利条件。

(2) 湿  $Q$  矢量对未来 6 h 降水也有很好的指示作用,暴雨区对流层中低层上升运动明显的地方,易激发出不稳定层结,产生强对流活动,对应强的湿  $Q$  辐合,因此湿  $Q$  辐合区与降水强度呈正相关。

(3) 对流层中底层 Z-螺旋度正值区大值中心也对未来 6 h 降水落区有较好的指示意义,在水平方向上, Z-螺旋度正值密集区分布和主要降水区仍然保持一致。Z-螺旋度正值区中心对应气流的辐合上升作用强,是暴雨预报的有效物理量。

## 基金项目

四川省省级大学生创新创业训练计划项目(S201910621105)和成都信息工程大学本科教学工程项目(BKJX2019007, BKJX2019013, JY2018012)支持。

## 参考文献

- [1] 陶诗言,等. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 196-199.
- [2] 刘红武, 李国平. 三十年西南低涡研究的回顾与展望[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(2): 68-72.
- [3] 赵思雄, 傅慎明. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1059-1075.
- [4] 史小康, 李耀东, 刘健文, 等. 华北一次暴雨过程的螺旋度分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 48-56.
- [5] 吴国雄, 刘还珠. 全型垂直涡度倾向方程和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1999, 57(1): 1-14.
- [6] 朱禾, 邓北胜, 吴洪. 湿位涡守恒条件下西南涡的发展[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 343-351.
- [7] Hoskins, B.J., Draghici, I. and Davies, H.C. (1978) A New Look at the M-Equation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **104**, 31-38. <https://doi.org/10.1002/qj.49710443903>
- [8] 杨晓霞, 沈桐立, 刘还珠, 等. 非地转湿  $Q$  矢量分解在暴雨分析中的应用[J]. 高原气象, 2006(3): 464-475.
- [9] 黄楚惠, 李国平. 基于螺旋度和非地转湿  $Q$  矢量的一次东移高原低涡强降水过程分析[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 319-326.
- [10] 张雪琦, 白爱娟. “15·8”川东西南涡暴雨的  $Q$  矢量分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(3): 32-38.
- [11] 王璐思, 陈林琳, 张晓涵, 等. 四川盆地 2013 年夏季三次特大暴雨过程对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(1): 86-91.
- [12] 史小康, 李耀东, 刘健文, 等. 华北一次暴雨过程的螺旋度分析[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(4): 48-56.
- [13] 张兴旺. 湿  $Q$  矢量表达式及其应用[J]. 气象, 1998(8): 4-8.
- [14] Lilly, D.K. (1986) The Structure, Energetics, and Propagation of Rotating Convective Storms. Part II: Helicity and Storm Stabilization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **43**, 126-140. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043<0126:TSEAPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043<0126:TSEAPO>2.0.CO;2)
- [15] 李耀辉, 寿绍文. 旋转风螺旋度及其在暴雨演变过程中的作用[J]. 南京气象学院学报, 1999(1): 98-105.