

# A Diagnostic Analysis of Heavy Rain over Middle and Lower Reaches of Yangtze River in 2016

Man Wang, Ci Song, Jiajin Zhu

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

Received: Jun. 28<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 13<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 20<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

Using the FNL global analysis data provided by NCEP/NCAR and the hourly CMORPH precipitation data provided by China Meteorological Administration, a heavy rain case over middle and lower reaches of Yangtze river was studied by wet  $Q$ -vector and  $z$ -helicity. The results show that the atmospheric is unstable before the occurrence of the southwest vortex rainstorm; the divergence in the upper layer are strong and the convergence in the lower layer is also intense; meanwhile, the convection strong develop; and the unstable energy released sharply, which are favorable for the occurrence of the rainstorm. The wet  $Q$ -vector divergence has a good indication for the next 12 h precipitation. The wet  $Q$ -convergence area in the middle and lower troposphere are consent to the rainstorm area, and the rainstorm center is basically coincident with the convergence center. The convergence intensity of wet  $Q$  vector can directly affect the intensity of vertical motion. The stronger the convergence of wet  $Q$  vector is, the stronger the rainfall intensity will be and the longer the duration can be found. Wet  $Q$  vector is an important tool for the diagnosis and analysis of rainstorm. Moreover, the greater the intensity of  $z$ -helicity is, the greater the intensity of precipitation was found. Under the favorable high trough ridge situation and the rapid development of low vortex, the main falling-water area is generally located in the east of the  $z$ -helicity positive center.

## Keywords

Southwest Vortex, Wet  $Q$ -Vector,  $z$ -Helicity

---

# 2016年长江中下游地区一次暴雨过程诊断分析

王蔓, 宋辞, 朱家谨

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

收稿日期: 2020年6月28日; 录用日期: 2020年7月13日; 发布日期: 2020年7月20日

## 摘要

采用美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的一日4次的FNL资料和中国气象局自动站与CMORPH融合降水资料,采用非地转湿 $Q$ 矢量和 $z$ -螺旋度等方法对长江中下游地区暴雨过程进行了诊断分析,结果表明:西南涡暴雨产生之前,大气层结不稳定,高层辐散抽吸作用强大,低层辐合,对流上升运动发展剧烈,不稳定能量大量释放,是暴雨天气产生的有利条件。非地转湿 $Q$ 矢量散度对未来12 h降水落区有较好的指示意义,对流层中低层湿 $Q$ 辐合区对应降雨落区,暴雨中心与辐合中心基本重合。非地转湿 $Q$ 矢量的辐合强弱可直接影响上升运动的剧烈程度,湿 $Q$ 辐合越强,降雨强度越强,所持续时间较长,湿 $Q$ 矢量是诊断分析降雨落区的重要工具。 $z$ -螺旋度强度越大,降水强度越大。在有利的高空槽脊形势和低涡剧烈发展下,主要降水区一般位于 $z$ -螺旋度正值中心偏东地区。

## 关键词

西南涡, 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

西南涡作为仅次于台风的暴雨系统,在我国的许多暴雨洪涝灾害中扮演了非常重要的角色。1963年8月上旬的发生于海河流域南部地区的持续性特大暴雨,暴雨中心的河北省内邱县獐仵村24 h降雨量高达865 mm,该过程中稳定深槽、低涡、切变等天气系统的叠加,造成了此次罕见暴雨[1]。2000年7月上旬,受北上型西南涡影响,重庆、湖北、河南相继出现暴雨区,其中河南省延津县24 h暴雨量最大将近500 mm[2]。随后,李佳颖等[3]研究指出,2014年受西南涡和高空槽影响,广西多地出现大范围暴雨天气,导致洪涝灾害,造成严重经济损失。西南涡结构方面,西南涡正涡度柱可向上延伸到对流层顶部,且中心轴线为垂直分布,其流场和高度场上为中尺度气旋和低压系统[4]。王新敏等[5]认为西南涡的生成过程包含高原的耦合诱发,西南涡的生成、发展与干位涡向对流层低层扰动下传有关。向朔育等[6]发现西南低涡发展有利于受其影响的对流云团发展为深厚对流云,西南低涡发展和成熟阶段低涡中心与强对流中心均不一致,强对流中心位于低涡中心以南,西南低涡不同发展阶段对流云团发展均符合“撒播-供水”机制。

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[7]-[12]。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[13]。

由于西南涡东移造成的暴雨往往会带来巨大的经济损失和人员伤亡,因此,有必要对西南涡暴雨过程进行深入研究。2016年6月29日~7月2日长江中下游地区出现了一次由西南涡东移发展造成的暴雨天气过程,本文采用湿 $Q$ 矢量和 $z$ -螺旋度等统计诊断方法,对本次西南涡暴雨过程进行了分析,以期对西南涡致洪暴雨预报预警提供参考。

## 2. 资料和方法

### 2.1. 资料

采用美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的一日四次的 FNL 全球大气环流场再分析数据集, 其空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ , 以及中国气象数据共享网提供的逐小时的中国自动气象站与 CMORPH 降水融合格点数据集, 空间分辨率为  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。本文所用资料时段均为 2016 年 6 月 29 日~7 月 2 日。

### 2.2. 方法

采用非地转湿  $Q$  矢量( $Q^*$ )和  $z$ -螺旋度对暴雨过程进行诊断分析。非地转湿  $Q$  矢量( $Q^*$ )经完善发展后在  $P$  坐标系中的表达式如下[14]:

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

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

其中,  $h = \frac{R}{P} \left( \frac{P}{1000} \right)^{R/C_p}$ ,  $H = -\frac{L}{C_p} \left( \frac{1000}{p} \right)^{R/C_p} \omega \frac{\partial Q_s}{\partial p}$ ,  $Q_x^*$  和  $Q_y^*$  分别表示在  $x$  和  $y$  方向上的湿  $Q$  分量,

即

$Q^* = Q_x i + Q_y j$ , 以非地转湿  $Q$  矢量散度为强迫项的非地转  $\omega$  方程可统一表示为:

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

当  $\omega$  场具有波状特征时, 则有  $\nabla_h \cdot Q$  正比于  $\omega$ , 即当  $\nabla_h \cdot Q < 0$  时, 为上升运动( $\omega < 0$ ), 表现为辐合区; 当  $\nabla_h \cdot Q > 0$  时, 为下沉运动( $\omega > 0$ ), 表现为辐散区。

$z$ -螺旋度作为一个描述环境风场气流沿运动方向旋转程度和运动强弱的物理量, 能够很好的反映大气运动的性质和特征[15]。近年来, 螺旋度被广泛应用于各种中小尺度系统、台风系统和强对流天气活动下的暴雨预报, 对暴雨的落区与强度有较好的指示意义。其中,  $z$ -螺旋度作为垂直速度和垂直涡度的乘积, 在暴雨产生前后的数量级差可达  $10^3$ , 该物理量不仅能反映天气现象的剧烈程度, 还能反映天气系统的维持状况。 $P$  坐标下展开  $z$ -螺旋度的计算方法:

$$H_p = -\omega\varepsilon \quad (4)$$

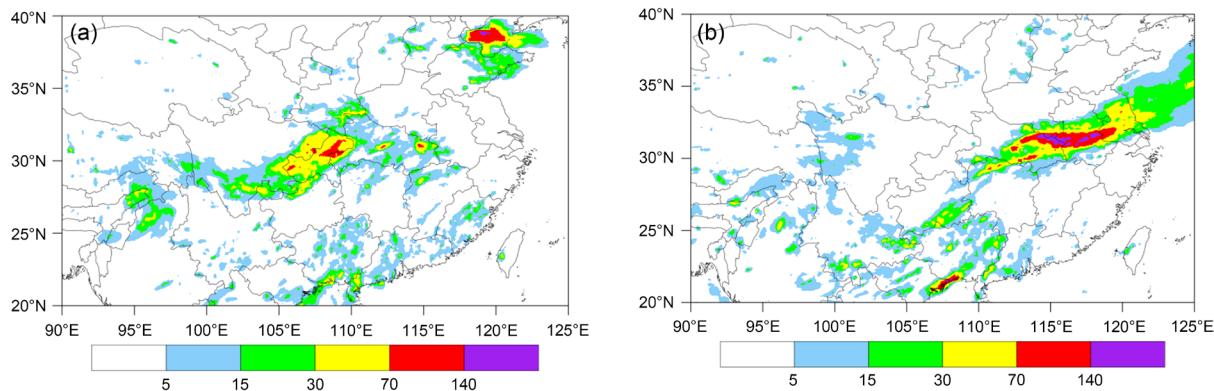
式中,  $\varepsilon$  为相对涡度的垂直分量,  $\omega$  为垂直速度,  $H_p$  为  $z$ -螺旋度, 单位为  $\text{hPa}\cdot\text{s}^{-2}$ 。当有上空运动( $\omega < 0$ )时, 若涡度为正( $\varepsilon > 0$ ), 则  $z$ -螺旋度为正值; 若涡度为负( $\varepsilon < 0$ ), 则  $z$ -螺旋度为负值。

## 3. 研究结果

### 3.1. 降水实况

图 1 给出了 6 月 30 日 12 时~7 月 1 日 12 时由西南涡暴雨逐 12 h 累计降水分布。由图中可以发现, 受西南地东移路径影响, 本次降水过程主要分布于长江中下游地区。6 月 30 日 12 时(图 1(a)), 低值系统东移至重庆上空, 低涡开始向高层发展, 强度随之增大, 与之同时降水也伴随增强, 雨区范围增大。由图 1(a)可进一步发现, 12 h 累计降水量范围覆盖整个重庆与川东接壤处, 其中渝北(重庆云阳、万州、奉

节等地)、渝南和川东边界均出现大暴雨中心,暴雨中心值高达 70 mm 以上,暴雨雨区主要位于西南涡的偏东侧。7 月 1 日 12 时(图 1(b)),西南涡移动至鄂皖交界地区,暴雨中心主要位于低涡中心以西和以东地区,雨带整体呈东西走向,湖北东部和安徽中部出现特大暴雨区。西南涡东移过程中,重庆北、鄂中、鄂东、皖中也相继出现大暴雨中心,其中鄂东、皖中一带暴雨持续时间长,强度大,影响范围广,天气状况较为恶劣。



**Figure 1.** The 12 h accumulated precipitation (shaded) from 12:00 on 30<sup>th</sup> June to 12:00 on 1<sup>st</sup> July (The bar presents the accumulated precipitation)

**图 1.** 6 月 30 日 12 时~7 月 1 日 12 时 12 h 累计降水量(阴影)(色标代表累积降水)

### 3.2. 假相当位温

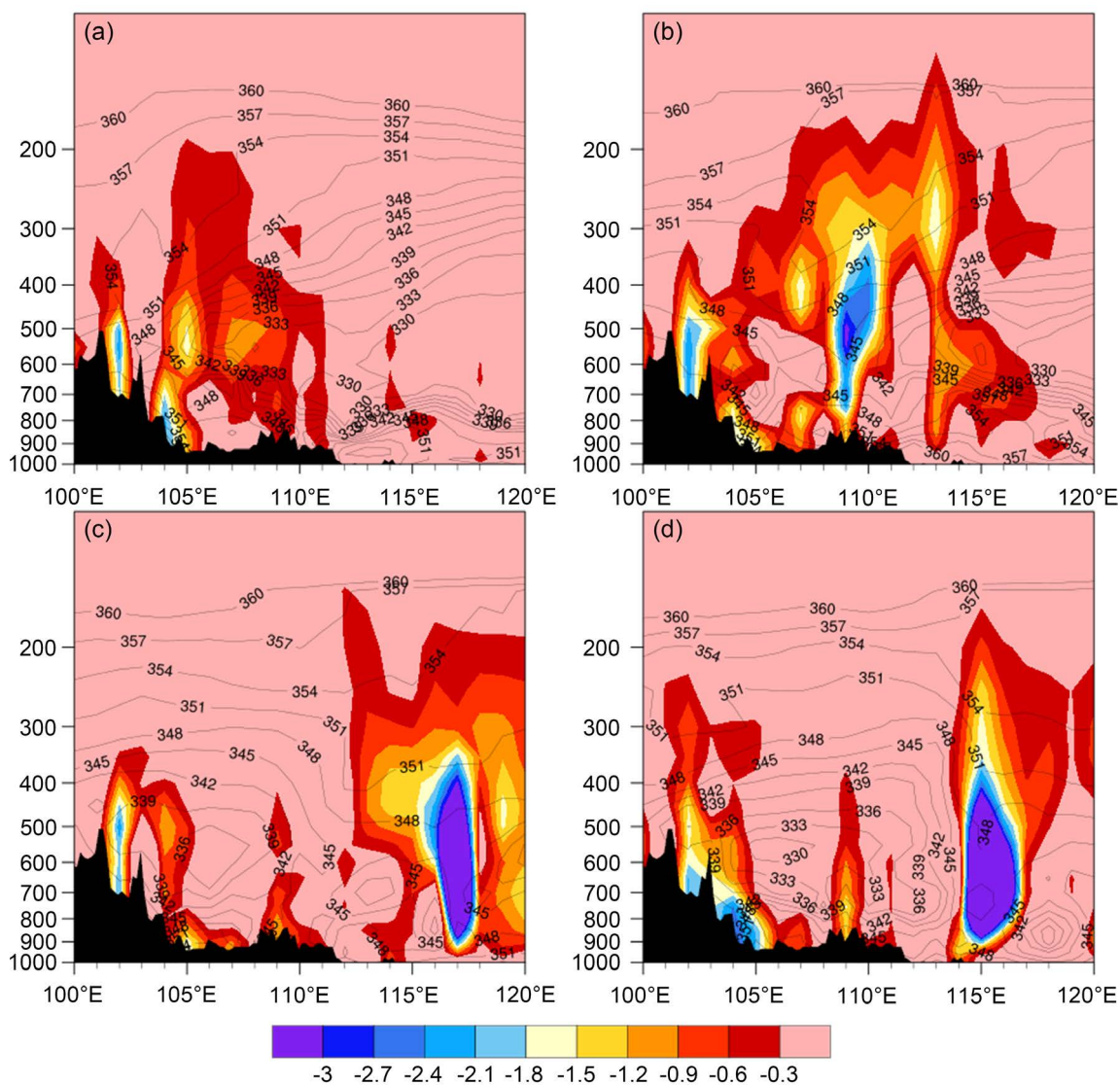
假相当位温是表征大气温度、湿度与压力的综合性物理量,其值分布可反应大气湿静力能量的分布。场等值线密集区为能量锋区,即暴雨的发生条件。因此,对 2016 年 6 月 29 日~7 月 1 日西南涡发生发展过程中假相当位温变化特征进行分析(图 2)。6 月 29 日 18 时(图 2(a)),西南涡初生阶段,低涡附近无较强上升活动,四川东部上空 550 hPa 上有低值中心,强度为 330 K,中低层等值线密集,表明其梯度较大,存在大量不稳定能量,为川东和重庆一带的暴雨发生提供了有利条件。6 月 30 日 06 时(图 2(b)),西南涡迅速东移发展,重庆上空出现较为明显的上升运动,垂直速度负值中心附近的假相当位温为 342 K,表明此时大气层结极其不稳定。6 月 30 日 18 时(图 2(c)),西南涡持续东移发展并进入强盛阶段,垂直速度中心可达 400 hPa,表明存在强烈上升运动。由 7 月 1 日 06 时假相当位温垂直剖面图(图 2(d))上可见,西南涡在鄂皖接壤处稳定少动,垂直速度中心柱所处位置基本不变,但影响范围扩大,对流运动仍旧剧烈发展,低涡强度并无减弱趋势。116°E 附近低空存在明显能量锋区,与暴雨落区相对应。

对 6 月 30 日~7 月 1 日逐 6 小时假相当位温垂直剖面图(图略)可知,6 月 30 日 18 时~7 月 1 日 12 时为西南涡发展强盛阶段,该时段内低涡系统在湖北和安徽省交界处停滞少动,同时受高空两槽合并和西南急流强烈发展影响,水汽输送增强,上升运动剧烈,使暴雨天气得以持续发展。7 月 1 日 18 时,西南涡已东移至江苏地区,之后逐渐消失。

### 3.3. 湿 $Q$ 矢量散度

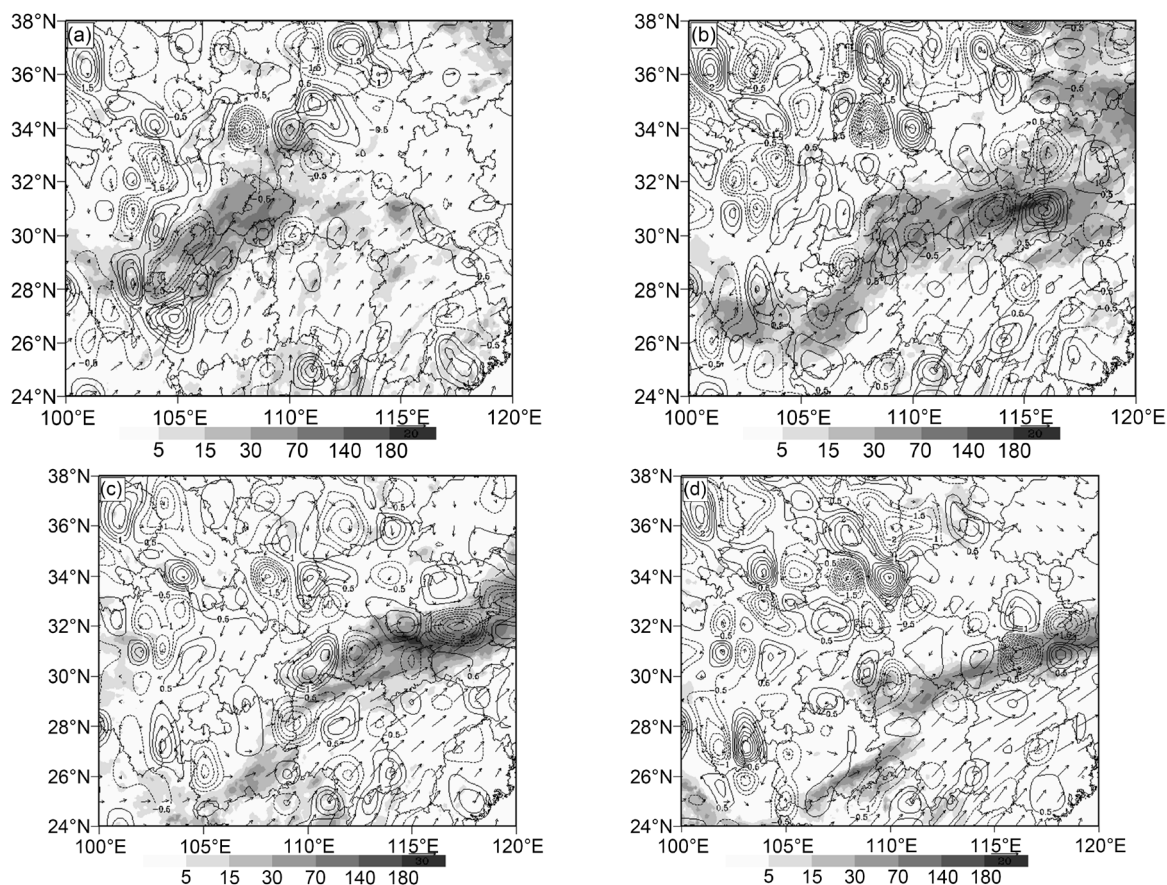
湿  $Q$  矢量锋生函数对暴雨强度及落区预报有一定指示作用,尤其对于 700 hPa 高度上的暴雨,利用湿  $Q$  矢量锋生函数进行诊断分析具有较大优势[16]。进一步对比各时刻的 700 hPa 风场和非地转湿  $Q$  矢量散度分布以严谨非地转湿  $Q$  矢量散度负值区的移动、流场辐合区的强度变化与未来 12 h 强降水落区及降水强度的对应关系(图 3)。2016 年 6 月 30 日 00 时(图 3(a)),四川东部地区表现有明显的湿  $Q$  辐合特征,

辐合带呈东北-西南走向,四川与重庆交界区为未来12小时累计降水主要区域(阴影处),位于辐合带偏东北侧,暴雨中心与辐合中心相距约两个经度,暴雨区面积广,表明后期西南涡发展较为剧烈。6月30日12时(图3(b)),湿 $Q$ 辐合区位于湖北地区,其右侧有同等强度的湿 $Q$ 辐散区,未来12小时降水落区处于湿 $Q$ 辐合区以东地区,暴雨带的东西走向与散度正负值中心分布基本一致。7月1日00时(图3(c)),鄂中和皖中地区各存在一个较强的辐合中心,其中皖中地区辐合强度较大,湿 $Q$ 矢量散度负值中心值可达,辐合带近乎呈现偏东西走向,东西两侧和北侧存在较弱辐散区,暴雨中心位置基本处于辐合带较强一侧,即辐合中心的偏东侧。7月1日12时(图3(d)),安徽东西部各有一个辐合中心,湿 $Q$ 辐合区位置基本不变,辐合带仍呈偏东北-西南走向,其北侧和南侧的辐散强度较前一时段明显增强,降水强度有所减弱。



**Figure 2.** Vertical velocity (shaded) and pseudo-equivalent potential temperature (contour) along 32°N at (a) 18:00 on 29<sup>th</sup> June, (b) 06:00 on 30<sup>th</sup> June, (c) 18:00 on 30<sup>th</sup> June and (d) 06:00 on 1<sup>st</sup> July (The y-coordinate presents the geopotential height and the bar presents the vertical velocity)

**图 2.** (a) 6月29日18时, (b) 6月30日06时, (c) 6月30日18时和 (d) 7月1日06时沿纬线32°N垂直速度(阴影)和假相当位温(等值线)剖面图(纵坐标代表位势高度, 色标代表垂直速度)

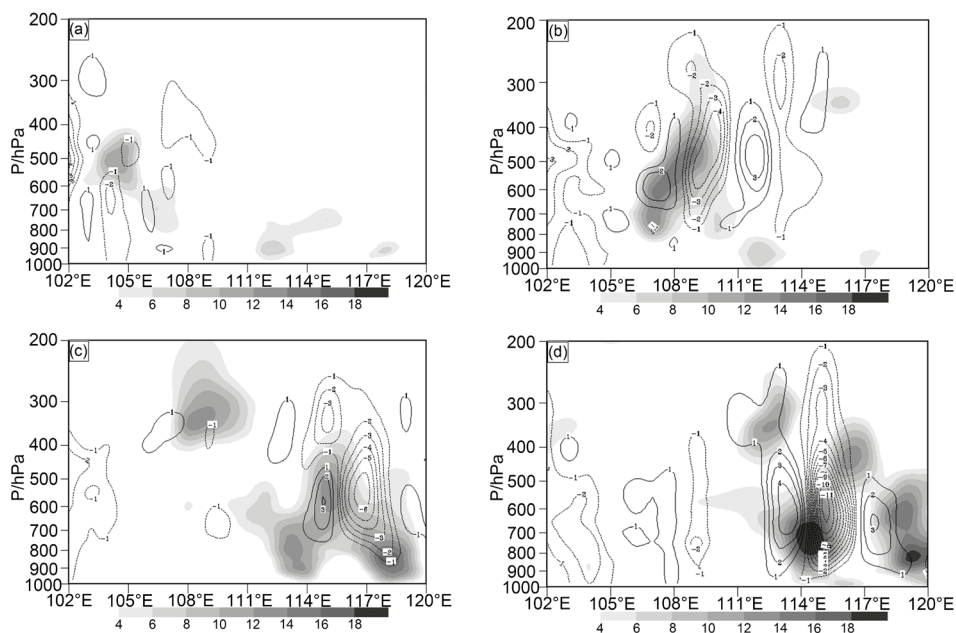


**Figure 3.** Wet  $Q$ -vector divergence (contour), wind (vector) and accumulated precipitation in next 12 h (shaded) of 700 hPa along 32°N at (a) 00:00 on 30<sup>th</sup> June, (b) 12:00 on 30<sup>th</sup> June, (c) 00:00 on 1<sup>st</sup> July and (d) 12:00 on 1<sup>st</sup> July (The bar presents the accumulated precipitation)

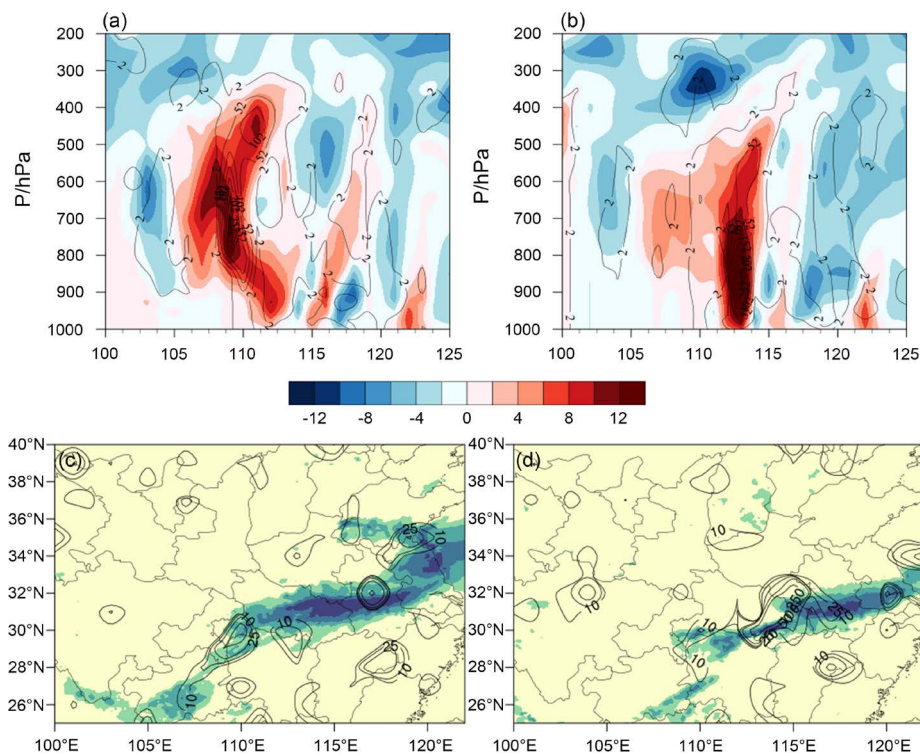
**图 3.** (a) 6月30日00时, (b) 6月30日12时, (c) 7月1日00时和(d) 7月1日12时700 hPa非地转湿  $Q$  矢量散度(等值线)和风场(矢量)和未来12 h累积降水(阴影)分布(色标代表累积降水)

非地转湿  $Q$  矢量散度表示产生垂直运动的强迫机制的强弱, 对流层中低层(800~600 hPa)湿  $Q$  矢量散度辐合区通常是上升运动激发区, 强烈的上升运动有利于暴雨的发展。由于降水主要发生在低涡附近, 且湿  $Q$  矢量散度与低涡有较好的对应关系, 进一步对6月30日~7月1日涡度和非地转湿  $Q$  矢量散度垂直分布(图4)进行分析。

由图4(a)可见, 6月30日00时低涡东移至四川东部并进入重庆地区时, 其上空400 hPa以下主要为湿  $Q$  辐合区, 且在105°E以西湿  $Q$  辐合呈条状分布明显, 相邻湿  $Q$  正值区小, 辐散强度弱。6月30日06时(图4(b)), 西南涡明显东移发展, 强度增强, 在108°E以东800~200 hPa之间存在湿  $Q$  负值区, 即湿  $Q$  辐合区, 108°E以西和111°E以东有较弱的湿  $Q$  辐散, 12 h降水落区与湿  $Q$  辐合区相对应, 降水强度较强。7月1日00时(图4(c)), 西南涡东移至湖北中部, 与此同时, 湖北东部上空550 hPa有较强涡旋存在, 117°E附近存在一个强辐合中心, 辐合区以西中层600 hPa存在弱的湿  $Q$  辐散, 此时暴雨区上空(800~300 hPa)辐合剧烈, 存在强烈上升运动, 结合12 h累计降水图可知, 低层800 hPa湿  $Q$  辐合区与未来12 h暴雨中心(117°E)有较好的对应关系。7月1日06时(图4(d)), 西南涡强度达到最强, 湿  $Q$  矢量散度负值区位于114°E到117°E之间, 负值区整体呈带状分布, 负值高度柱可达200 hPa, 115°E附近上空垂直上升运动较强, 有利于暴雨的产生, 负值区东西两侧均存在湿  $Q$  辐散, 且辐散强度相较前一时段增强, 结合降水实况可知, 未来12 h降水强度有减弱趋势。



**Figure 4.** The vertical profile intensity of vortex (contour) and wet  $Q$ -vector divergence (contour) at (a) 00:00 on 30<sup>th</sup> June, (b) 06:00 on 30<sup>th</sup> June, (c) 00:00 on 1<sup>st</sup> July and (d) 06:00 on 1<sup>st</sup> July (The bar presents the intensity of vortex )  
**图 4.** (a) 6月30日 00时, (b) 6月30日 06时, (c) 7月1日 00时和(d) 7月1日 06时低涡中心强度(阴影)和非地转湿  $Q$  矢量散度(等值线)垂直剖面(色标代表低涡强度)



**Figure 5.** The relative vorticity (shaded) and  $z$ -helicity (contour) along 30°N at (a) 18:00 on 30<sup>th</sup> June and (b) 06:00 on 1<sup>st</sup> July and  $z$ -helicity (contour) and 12 h accumulated precipitation (shaded) at (c) 18:00 on 30<sup>th</sup> June and (d) 06:00 on 1<sup>st</sup> July (The bar presents the intensity of vortex )  
**图 5.** (a) 6月30日 18时和(b) 7月1日 06时沿 30°N 相对涡度(阴影)和  $z$ -螺旋度(等值线)以及(c) 6月30日 18时和(d) 7月1日 06时 850 hPa 上  $z$ -螺旋度(等值线)和 12 h 累积降水(阴影)分布(色标代表低涡强度)

### 3.4. $z$ -螺旋度

相对涡度和垂直速度而言,  $z$ -螺旋度可更为准确的强天气过程进行诊断和分析。图 5 为 6 月 30 日 18 时和 7 月 1 日 6 时 850 hPa 相对涡度沿 30°N 的垂直剖面 and  $z$ -螺旋度空间分布。6 月 30 日 18 时, 109 附近低空正  $z$ -螺旋度向上伸展到 400 hPa 左右, 且存在两个中心值, 700 hPa 附近螺旋度等值线相当密集, 中心值最大可达到(图 5(a))。7 月 1 日 06 时(图 5(b)),  $z$ -螺旋度正值柱主要处于 1000~700 hPa 的中低高度层, 正值  $z$ -螺旋度中心明显下移至 850 hPa 高度附近, 强度变化不大。 $z$ -螺旋度正值区与西南涡正涡度垂直区基本重合, 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。分析 6 月 30 日 18 时 850 hPa  $z$ -螺旋度分布(图 5(c))可知, 降水区域主要位于  $z$ -螺旋度正值中心以东约五个经距地区, 这可能与西南涡移速过快有关, 西南涡在 12 小时之内由重庆向东快速以至湖北东部地区, 且低涡强度进一步增强。7 月 1 日 06 时(图 5(d)),  $z$ -螺旋度中心强度偏强, 降水区域与正值区基本重合, 西南涡在湖北与江苏交界处滞留发展。可见,  $z$ -螺旋度对未来 12 小时降水落区和强度有较好的指导意义, 当西南涡移速过快, 降水落区一般位于正螺旋度中心偏东一侧。

## 4. 结论

采用美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)提供的一日 4 次的 FNL 资料和中国气象局自动站与 CMORPH 融合降水资料, 采用非地转湿  $Q$  矢量和  $z$ -螺旋度等方法对 2016 年 6 月 29 日~7 月 2 日发生的一次西南涡东移引发的长江中下游地区暴雨过程进行了诊断分析, 得到以下初步结论:

1) 西南涡暴雨产生之前, 大气层结不稳定, 高层辐散抽吸作用强大, 低层辐合, 对流上升运动发展剧烈, 不稳定能量大量释放, 是暴雨天气产生的有利条件。

2) 非地转湿  $Q$  矢量散度对未来 12 h 降水落区有较好的指示意义, 对流层中低层湿  $Q$  辐合区对应降雨落区, 暴雨中心与辐合中心基本重合。非地转湿  $Q$  矢量的辐合强弱可直接影响上升运动的剧烈程度, 湿  $Q$  辐合越强, 降雨强度越强, 所持续时间较长, 湿  $Q$  矢量是诊断分析降雨落区的重要工具。

3)  $z$ -螺旋度强度越大, 降水强度越大。在有利的高空槽脊形势和低涡剧烈发展下, 主要降水区一般位于  $z$ -螺旋度正值中心偏东附近。

## 基金项目

四川省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] 陈志恺, 张福元. 对 1963 年 8 月上旬海河流域特大暴雨的初步分析[J]. 水利水电技术, 1964(5): 23-27.
- [2] 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(1): 55-61.
- [3] 李佳颖, 翟丽萍, 覃月凤, 等. 广西一次大范围西南涡暴雨过程多尺度特征分析[J]. 气象研究与应用, 2018, 39(3): 7-10.
- [4] 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[J]. 应用气象学报, 1998, 9(3): 273-282.
- [5] 王新敏, 张霞, 孙景兰, 等. 2008 年 7 月黄淮暴雨过程中西南涡结构特征分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(1): 54-63.
- [6] 向朔育, 李跃清, 闵文彬, 等. 基于 CloudSat 探测的西南低涡对流云垂直结构特征[J]. 高原山地气象研究, 2019(3).
- [7] 刘国忠, 丁治英, 贾显锋. 影响华南地区西南低涡以及致洪低涡活动的统计研究[J]. 气象研究与应用, 2007(S1): 53-59.
- [8] 李爽, 高清源, 田璐, 等. 鞍山地区一次暴雨过程的垂直螺旋度分析[J]. 现代农业科技, 2015(4): 231-233.
- [9] 慕建利, 赵琳娜, 杜继稳. 湿  $Q$  矢量在陕西大暴雨过程中的应用研究[J]. 陕西气象, 2007(6): 1-5.



- 
- [10] 孙婕, 李国平. 西南低涡东移引发重庆暴雨的综合诊断[J]. 高原山地气象研究, 2013, 33(2): 10-17.
- [11] 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(1): 2-16.
- [12] 吴瑞姣, 罗艳, 余金龙. 移出型西南涡与我国中东部降水的关系[J]. 气象科学, 2019, 39(6): 818-826.
- [13] 刘红武, 李国平. 近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(2): 68-73.
- [14] 吴星霖, 张云瑾, 郭荣芬, 等. 湿  $Q$  矢量分析法在台风“圣帕”暴雨过程中的应用[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2008(S2): 311-317.
- [15] 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(4): 50-58.
- [16] 赵桂香, 程麟生, 李新生.  $Q$  矢量和湿  $Q$  矢量在暴雨诊断中的应用比较[J]. 气象, 2006(6): 25-30.