

# A Study of Precipitation under the Interaction between Upper Level Jet Stream and Low Level Vortex

Lei Chen<sup>1</sup>, Lei Wang<sup>1</sup>, Kuo Zhou<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

<sup>2</sup>Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: chenleih@163.com

Received: Jun. 25<sup>th</sup>, 2018; accepted: Jul. 5<sup>th</sup>, 2018; published: Jul. 12<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

Based on hourly merged precipitation grid dataset from the national automatic weather stations and CMORPH (Climate Precipitation Center Morphing) product and NCEP Final Operational Global Analysis (NCEP-FNL), the primary synoptic conditions and dynamic genesis of heavy rainfall happening in northern Henan and south of Hebei province during 18-21 July 2016 was analyzed with weather dynamic diagnosis methods. The results showed that heavy rainfall occurred under the favorable weather patterns of high pressure to the east and low pressure to the east. Upper-level jet stream strengthened at 200 hPa, in right side entrance region of which stronger divergence appeared. Southwest vortex at 700 hPa strengthened and moved eastward in the lower level, leading to the convergent motion in its northeast side. Along with the divergence in higher level and convergence in lower level, an obvious secondary circulation occurred over Henan and Hebei province. Rainstorm area was under the ascending motion side, which was abnormally enhanced because of the interaction between the upper level jet stream and low level vortex. The vertical motion caused by the interaction between them had an important dynamic force effect on the generation and development of the heavy rainfall. Precipitation intensity was enhanced, following the development of the upper-level jet stream and low level vortex. Atmospheric structure of convective instability existed over the northern area of Henan province when the heavy rainfall happened. And moisture coming from Bay of Bengal, South China Sea and East China Sea gathered here. All of these were favorable for the generation of the heavy rainfall.

## Keywords

Upper Level Jet Stream, Low Level Vortex, Secondary Circulation, Precipitation

---

# 高空急流以及低空低涡作用下的一次降水研究

陈 蕾<sup>1</sup>, 王 磊<sup>1</sup>, 周 括<sup>2</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学, 四川 成都

<sup>2</sup>中国科学院大气物理研究所, 北京  
Email: chenleibr@163.com

收稿日期: 2018年6月25日; 录用日期: 2018年7月5日; 发布日期: 2018年7月12日

## 摘要

文章采用中国自动站与CMORPH降水产品融合的逐时降水量网格数据资料及NCEP-FNL再分析资料, 运用天气动力学诊断方法对2016年7月18~21日发生在豫北与河北南部一带的暴雨主要天气形势和动力成因进行了分析。结果表明, 暴雨发生在“东高西低”的有利环流形势下。200 hPa高空急流发展增强, 高空急流入口区右侧出现较强辐散。低空700 hPa有西南低涡发展并加强东移, 造成其东北侧的辐合运动。伴随这种高层辐散, 底层辐合的运动, 一支明显的次级环流出现在河南河北一带。暴雨区落在次级环流的上升支一侧, 上升气流由于高空急流和低空低涡的相互作用异常增强。这种二者之间的相互作用而产生的垂直运动对暴雨的发生发展起到了重要的动力强迫作用。降水强度则随着高空急流和低空低涡的发展增强而增强。暴雨发生时, 豫北地区上空存在对流不稳定的层结构, 来自孟加拉湾、南海和东海的水汽在此处聚集, 这些都为暴雨的发生提供了有利的条件。

## 关键词

高空急流, 低空低涡, 次级环流, 降水

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

暴雨是影响我国夏季的主要气象灾害[1], 能够造成洪涝, 泥石流等灾害, 给人们的生命财产带来极大的威胁, 它的形成受各种尺度天气系统的相互作用的影响。大尺度环流为暴雨的发展演变提供有利的背景环境, 但不能直接引发暴雨[2]。陆尔和丁一汇[3]的研究表明, 东移南压的西北冷空气与副热带高压西侧北上的暖湿空气相互作用容易引起降水。在暴雨形成过程中, 高空急流对暴雨的发生可以起到重要的动力作用[4]。王黎娟等[5]分析淮河流域一次暴雨过程得出, 淮河流域位于高压北侧高空西风急流入口区南侧的上升运动区, 有利于淮河流域强降水的发生和维持。Chen [6]的研究表明, 如果在高空急流入口区满足重力惯性波不稳定的条件, 则会在高空急流入口区激发强热力直接环流。由于风速在水平方向上分布不均匀, 在高空急流出口区出现向南的地转偏差, 使得急流轴出口区的左侧产生辐散上升运动, 右侧则产生辐合下沉运动[7]。高空急流区的辐合辐散中心与相应的次级环流对暴雨的形成发展有重要的影响[4] [8]。同时, 高空急流通过其造成次级环流还可以对底层气旋的形成发展起到一定的作用, 如 Hassan 等[9]通过一个个例探讨了高空急流在地中海中部深厚气旋形成中的作用。程正泉等[10]发现, 热带气旋海马变性加强过程中, 与高空西风槽前急流发生耦合形成半冷半热的结构。

中尺度对流系统是暴雨的直接制造者, 降水区对流层中低层常常存在中尺度切变线, 中尺度辐合线, 中尺度低压和中尺度低涡等[2]。西南低涡在形成暴雨的中尺度系统中占有相当重要的地位, 就西南低涡所造成的暴雨天气的强度、频数和范围而言, 仅次于台风[11]。西南低涡在发展过程中伴随着底层辐合、上

升运动以及水汽通量辐合的加强[12]。当西南涡滞留在源地会引发川渝地区的暴雨[13][14][15][16]，移出源地后也能给中国东部地区造成大范围降水[1][17][18][19][20]。

2016年7月18~21日，一场特大暴雨突袭河南北部地区，暴雨中心位于安阳林州市、安阳县和新乡市等地，此次暴雨具有历时短，强度大，区域集中，雨情汛情超长等特点。那么此次特大暴雨的环流背景是怎么样的，高低空的存在着怎样的系统，这些系统之间是否存在着某种联系，这些联系又对此次暴雨的形成发展有什么样的影响，这就是本文研究的主要内容。

## 2. 资料和方法

降水资料：选用中国自动气象站与CMORPH融合的逐时降水量 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 网格数据集。

大气环流资料：选自NCEP-FNL(National Center for Environmental Prediction, Final Operational Global Analysis)全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料，其时间分辨率为6 h。气象要素场包括位势高度场，相对湿度，水平风速及垂直速度场等。文中所用时间均为世界时。

文中主要使用了天气动力学诊断等方法。其中整层大气水汽输送通量计算公式为：

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} v \cdot q dp \quad (1)$$

式中， $g$ 是重力加速度， $p_t$ 是大气层顶气压， $p_s$ 是地面气压， $V$ 是水平运动速度， $q$ 是比湿。由于大气层300 hPa以上水汽极其稀薄，所以在分析中 $p_t$ 选为300 hPa。

所以纬向和经向水汽输送通量 $Q_\lambda$ 、 $Q_\varphi$ 公式[21][22]为：

$$Q_\lambda = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} u \cdot q dp \quad (2)$$

$$Q_\varphi = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} v \cdot q dp \quad (3)$$

水汽通量散度则为：

$$c = \nabla \cdot Q = \frac{\partial Q_\lambda}{\partial x} + \frac{\partial Q_\varphi}{\partial y} \quad (4)$$

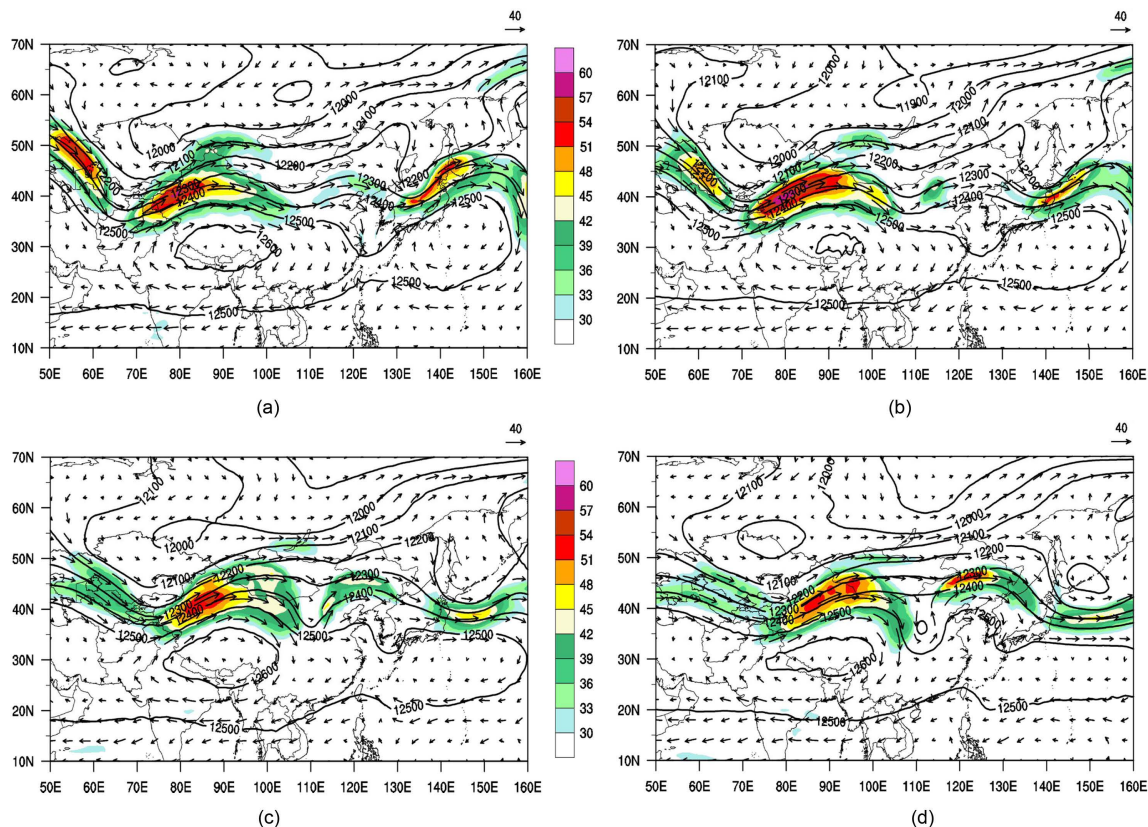
## 3. 结果分析

### 3.1. 豫北暴雨的环流形势和影响系统

暴雨发生过程中，对流层高层200 hPa南亚高压中心始终位于青藏高原上空(图1)。其北侧有明显的西风急流存在。中国大陆上空存在两个急流核，其中一个位于我国新疆西北部，另一个则位于华北及东北上空。随着长波槽脊的移动，急流核逐渐向东移动。

而在对流层中层500 hPa环流经向度很大(图2)。新疆西北部咸海一带维持一个深厚的低压槽。新疆至贝加尔湖以西有高压维持，脊前的槽不断发展加深(图2(b))。此时，豫北地区处于槽前的位置，这种环流型有利于槽后冷空气向暴雨区输送。随着槽的继续加深，19日12时在豫北及华北上空形成切断低压(图2(c))。至20日00时，低压系统继续发展增强(图2(d))。整个过程中，西太平洋副热带高压始终稳定少动，与其西侧的低值系统相互对峙，形成“东高西低”的环流形势。副高东南侧的暖湿气流与槽后的干冷空气在豫北地区汇合，有利于降水的发生。

图3给出了700 hPa环流形势叠加降水空间分布图。18日12时(图3(a))，降水的落区主要集中在四川西部和陕西中南部，范围较小。在四川西部已经有西南低涡生成，与此同时，甘肃北部也有一个气旋



**Figure 1.** Composite geopotential height field (contours, units: gpm) and wind field (vectors, units: m/s) at 200 hPa ((a) 1200UTC 18 Jul; (b) 0000UTC 19 Jul; (c) 1200UTC 19 Jul; (d) 0000UTC 20 Jul 2016; The shaded area denotes wind speed over 30 m/s)

**图 1.** 200 hPa 位势高度场(等值线, 单位: gpm), 风场(箭头, 单位: m/s) ((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时; 其中填色表示风速大于等于 30 m/s)

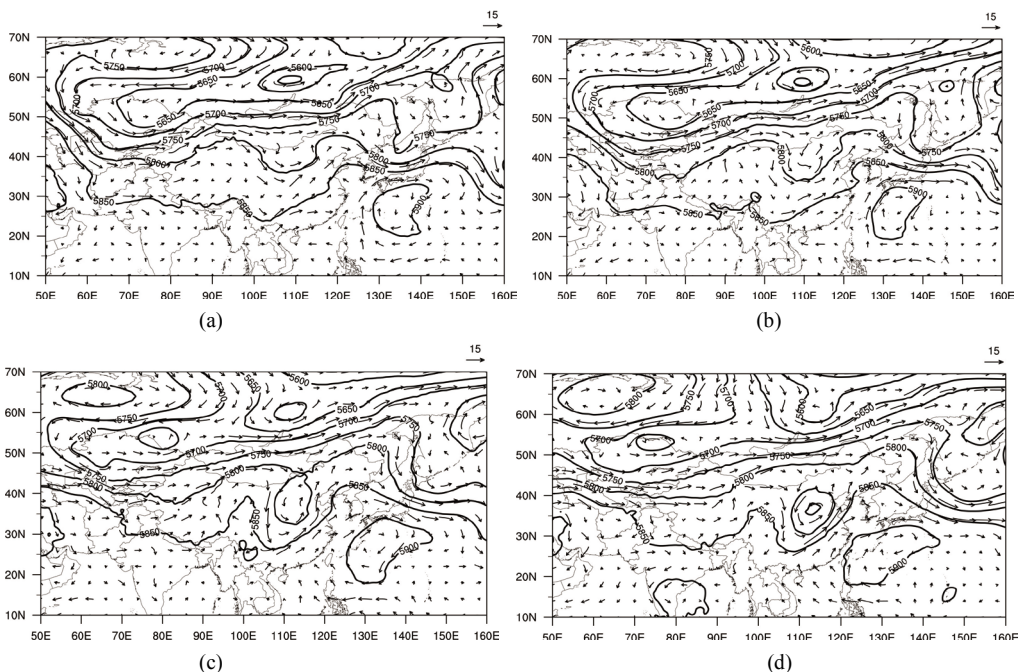
性低值系统形成。19 日 00 时(图 3(b)), 西南涡向其东北向移动, 而甘肃北部形成的低涡则移至陕西山西一带, 强度增强。两个低涡共同包裹在 3070 gpm 等高线内, 构成一个范围更广的低涡。该结构与 Zhou 等[23]揭示的一种位于西南低涡切变线上的双核结构十分类似, 暴雨则已经蔓延到了低涡东北部的豫北及河北一带。至 19 日 12 时(图 3(c)), 双核结构已经消失, 两个低值中心合并为一个中心, 位于 114°E, 35°N, 强度进一步增强。主要降水中心位于低涡中心及其东北部。伴随低涡继续增强并向东北方向移动, 降水中心也向河北东北方向移动(图 3(d))。此后, 低涡逐渐减弱, 豫北降水也随之减弱(图略)。

### 3.2. 高空急流和低空低涡的相互作用

由上分析可知, 此次暴雨发生在“东高西低”的有利环流形势下, 而且 200 hPa 高空急流和 700 hPa 低涡也发展加强。那么高空急流和低空低涡之间是否存在着某种联系, 而这种联系对此次豫北暴雨的形成发展又有什么样的作用, 则是这一节着重讨论的内容。

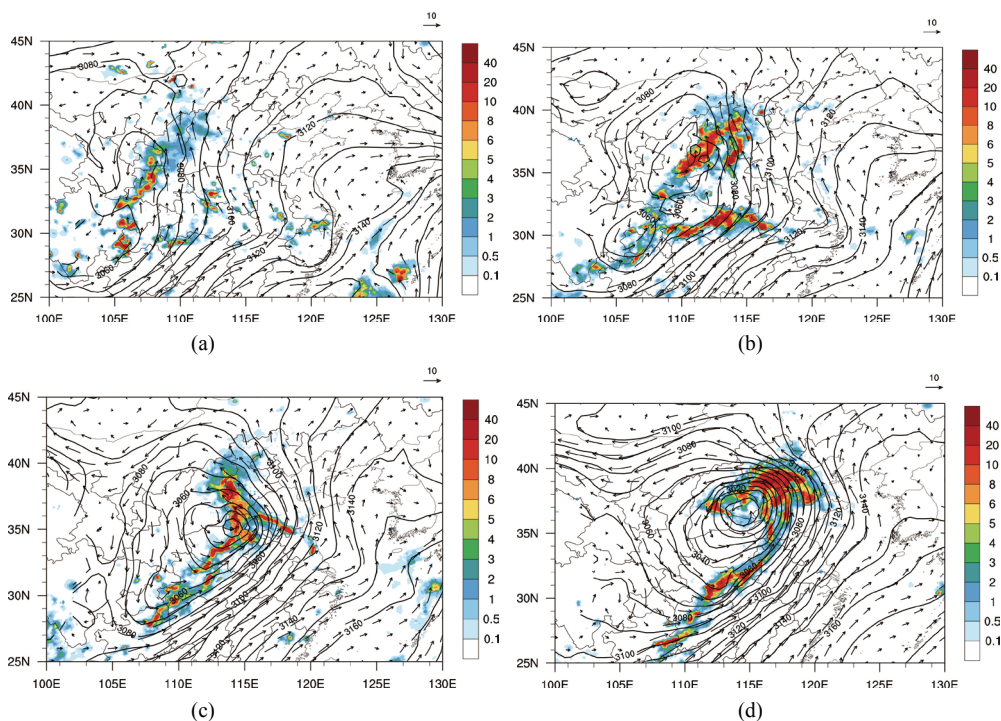
在豫北降水发生前, 其上方对流层高层急流风速较弱(图 4(a))。辐散运动主要集中在急流入口区的南侧, 强度也较弱。随着高空急流的增强(图 4(b)), 急流入口区南侧的辐散运动增强, 辐散区出现在山西及河北南部一带。由于大气质量的调整, 会引发其下方出现垂直运动, 进而强迫降水的发生。此后, 高空急流不断向东北方向移动, 辐散区也由豫北移向河北北部辽宁一带, 导致豫北降水减弱。

由前面分析可知, 在高空急流发展的同时, 对流层底层 700 hPa 西南低涡也不断发展壮大并移出源



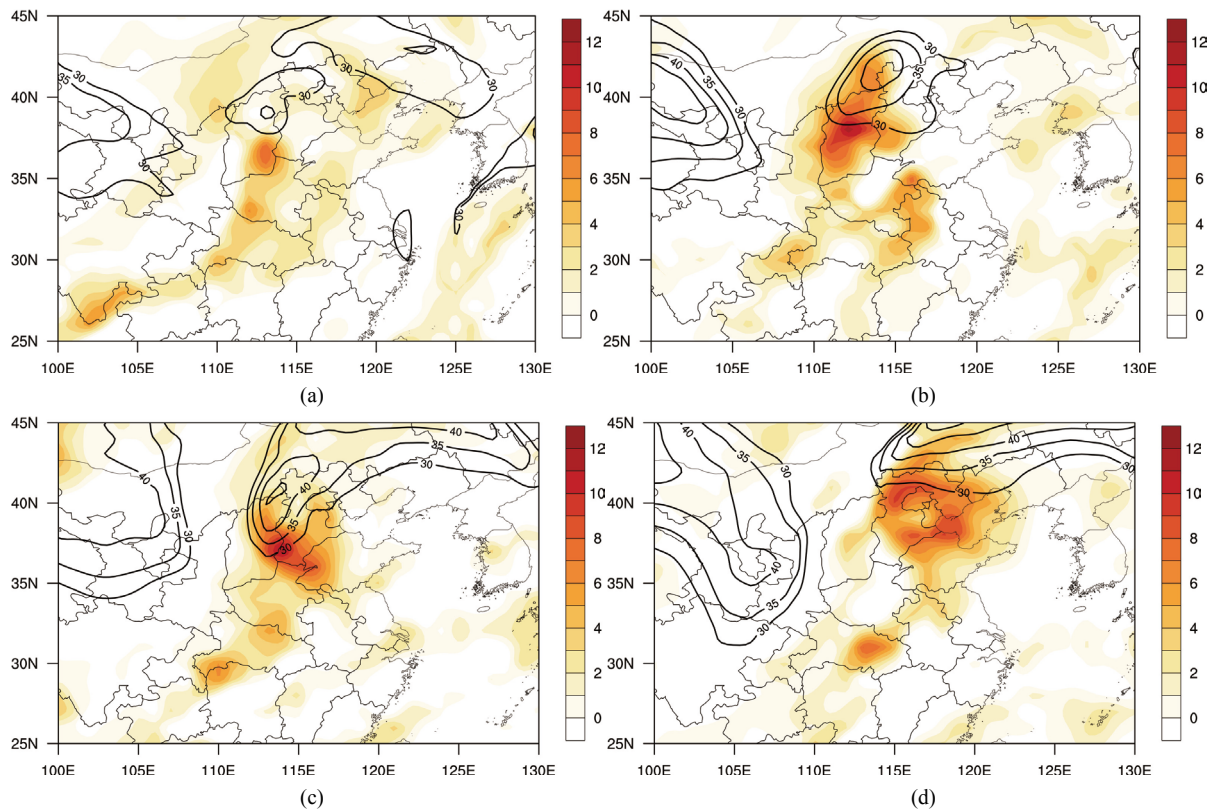
**Figure 2.** Composite geopotential height field (contours, units: gpm) and wind field (vectors, units: m/s) at 500 hPa ((a) 1200 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 19 Jul; (c) 1200 UTC 19 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul 2016)

**图 2.** 500 hPa 位势高度场(等值线, 单位: gpm), 风场(箭头, 单位: m/s) ((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时)



**Figure 3.** Composite geopotential height field (contours, units: gpm), wind field (vectors, units: m/s) and precipitation (shadings, units: mm) for 1 h ending at ((a) 1200 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 19 Jul; (c) 1200 UTC 19 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul 2016)

**图 3.** 700 hPa 位势高度场(等值线, 单位: gpm), 风场(箭头, 单位: m/s)及过去一小时降水(填色, 单位: mm) ((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时)



**Figure 4.** Composite wind field (contours, units: m/s) and divergence (shadings, units:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 200 hPa ((a) 1200 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 19 Jul; (c) 1200 UTC 19 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul 2016)

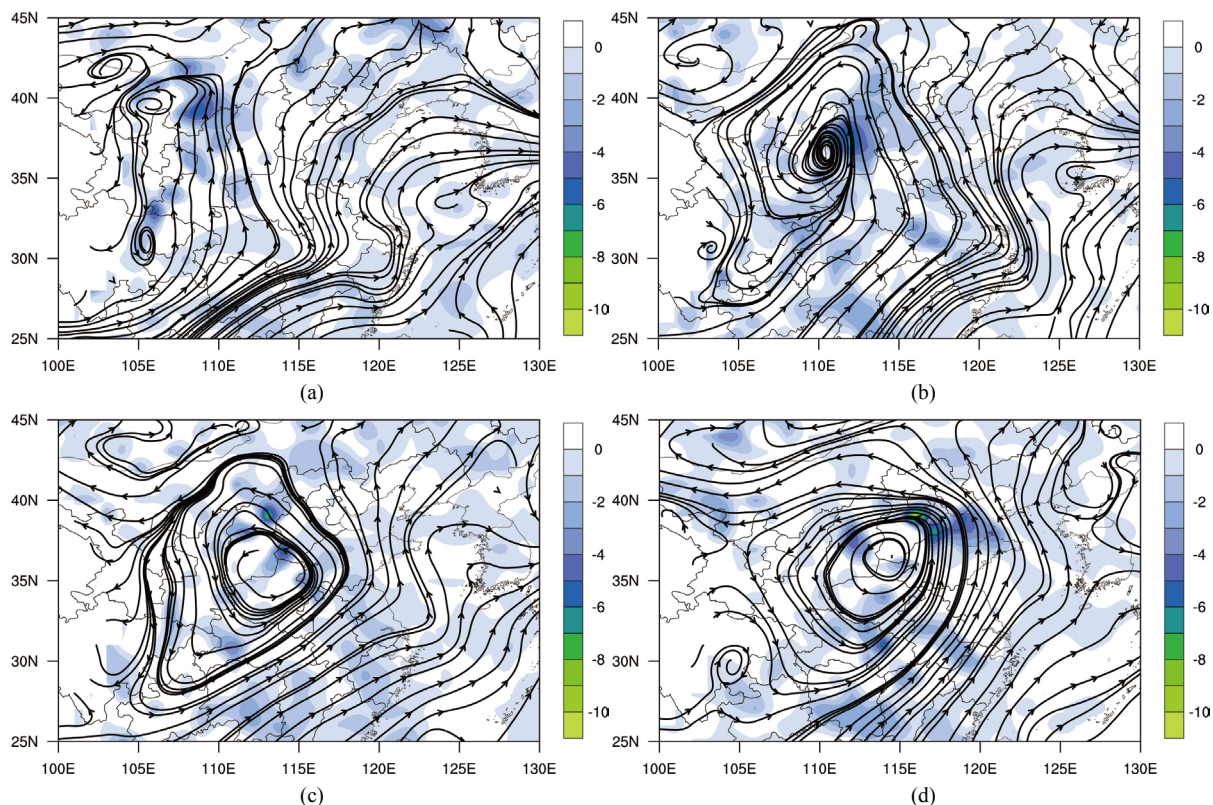
**图 4.** 200 hPa 风场(等值线, 单位: m/s), 散度场(填色, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) ((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时)

地。图 5 给出了暴雨发生发展过程中 700 hPa 流场和散度分布情况。由图可见, 两个低涡合并以后, 在其移动方向造成了较强的辐合运动(图 5(b))。辐合中心与高空急流入口区右侧辐散中心对应较好。低涡所造成的辐合运动会进一步加强高空急流辐散区所形成的上升气流, 导致暴雨出现在豫北地区。

图 6 给出了沿  $113^{\circ}\text{E}$  的风速垂直剖面图。在高空急流和低空低涡的相互作用下, 一支南北向的次级环流叠加在了豫北地区上空。降水发生前, 上升运动并不明显(图 6(a))。伴随急流和低涡的发展, 一支强烈的上升气流出现在  $38^{\circ}\text{N}$  附近, 在对流层中上层不断向北偏折, 并于  $48^{\circ}\text{N}$  附近下沉。高空急流入口区的右侧由于高层辐散和底层辐合的叠加作用, 上升运动十分明显, 相比之下, 下沉气流则比较弱。随后, 上升支气流继续增强, 下沉支则南移至  $45^{\circ}\text{N}$  附近, 强度依然弱于上升支。可见, 这种高空急流和低空低涡的相互作用, 导致次级环流的上升支异常增强, 进而强迫豫北暴雨的发生发展。

### 3.3. 暴雨发生的水汽条件

大型降水的形成离不开充足的水汽供应[24]。由相对湿度的纬向剖面可知(图 7), 此次暴雨过程中, 暴雨区始终维持较好的水汽条件, 相对湿度数值达 90%以上。从假相当位温的垂直分布来看,  $\frac{\theta_{se}}{Z} < 0$ , 表明暴雨区处在一个对流不稳定的状态。整层水汽通量显示, 暴雨区处在一个水汽通量的大值中心(图 8)。从水汽的来源上看, 豫北暴雨水汽主要来源有三支, 第一支于孟加拉湾经中南半岛抵达我国内陆、第二支自南海经东南沿海到达暴雨区和第三支则来自于东海。相应的水汽通量散度图中(图 9), 水汽辐合大值中心落在豫北及河北南部。源源不断的水汽输送为此次暴雨的形成提供了条件。



**Figure 5.** Composite flow field and divergence (shadings, units:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 700 hPa ((a) 1200 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 19 Jul; (c) 1200 UTC 19 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul 2016)

**图 5.** 700 hPa 流场, 散度场(填色, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) ((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时)

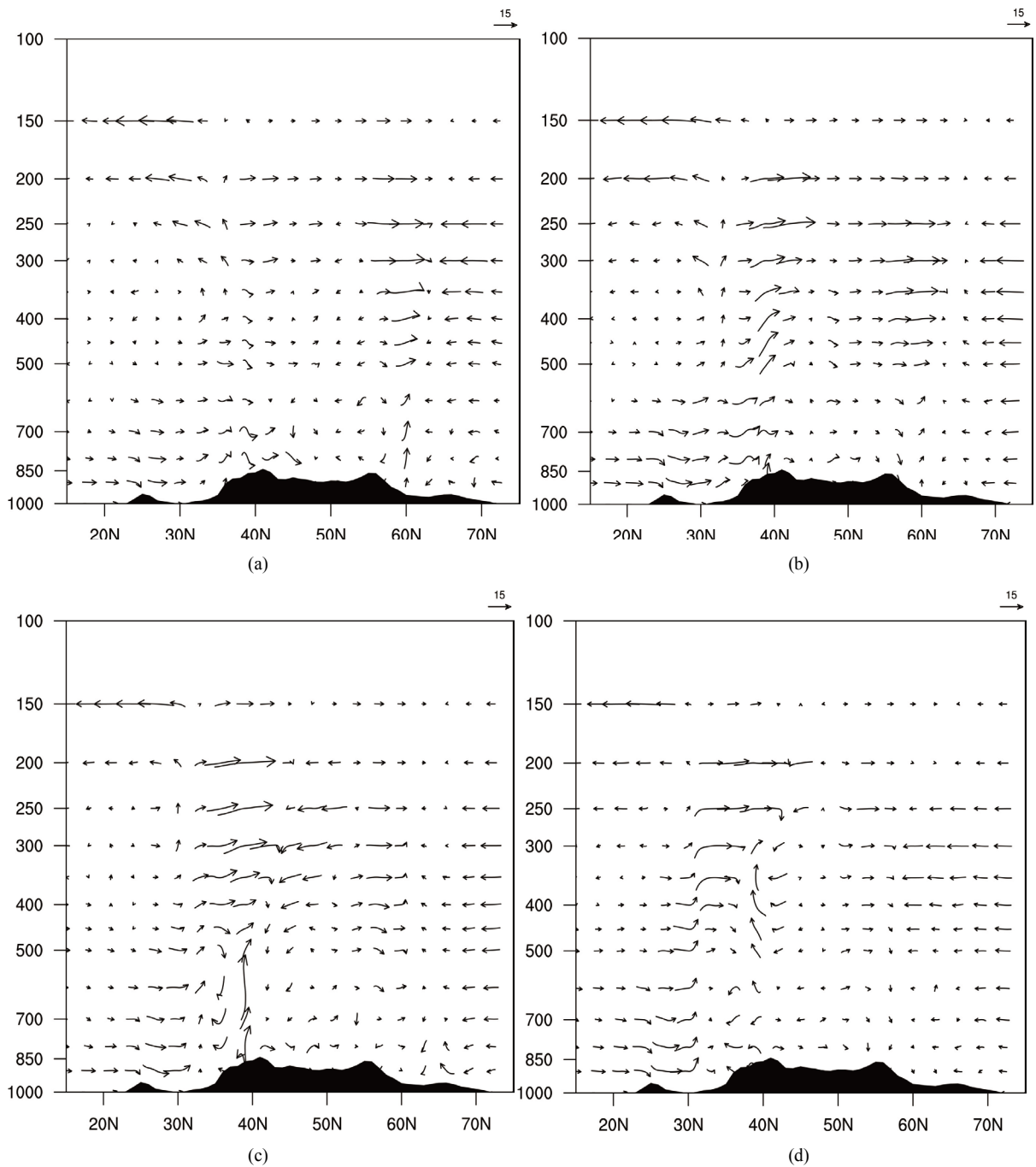
#### 4. 结论和讨论

利用 NCEP-FNL 再分析资料及中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水资料, 通过天气动力学方法对 2016 年 7 月 18~20 日发生在豫北与河北南部一带的暴雨主要天气形势和动力成因进行了分析诊断, 得到如下结论:

1) 豫北降水过程中, 对流层高层, 南亚高压中心稳定在青藏高原上空。西风急流在中国大陆上空存在两个急流核, 其中一个位于我国新疆西北部, 另一个位于华北及东北上空。急流核逐渐向东移动。对流层中层, 长波槽不断向南加深, 其北部与冷空气的联系被切断而形成切断低压, 并维持在暴雨区上空。暴雨东侧西太平洋副热带高压十分稳定, 构成“东高西低”的形势场, 有利于暴雨的形成和维持。低层 700 hPa, 西南涡在高原东侧形成的同时, 另有一个低涡在甘肃北部形成。两个低涡共同处在一个较大的低值系统中, 并逐渐和合并为一个低涡向东北方向移动。降水发生在低涡东北侧, 降水强度也随着低涡的变化而变化。

2) 豫北地区上空 200 hPa, 高空急流强度不断变强, 急流入口区右侧的辐散运动也不断增强。一支南北向的次级环流叠加在河南河北上空, 暴雨区则落在环流上升支附近。700 hPa, 低涡在向东北方向移动过程中, 其造成的辐合运动出现在移向的前部, 强度增强。低空低涡与高空急流通过这种低层辐合高层辐散的运动相互作用在一起, 增强了次级环流上升支的强度。这种动力强迫作用造成豫北暴雨的发生发展。

3) 暴雨过程中, 豫北地区始终维持较高的空气湿度, 来自孟加拉湾、南海和东海的水汽在此处呈辐



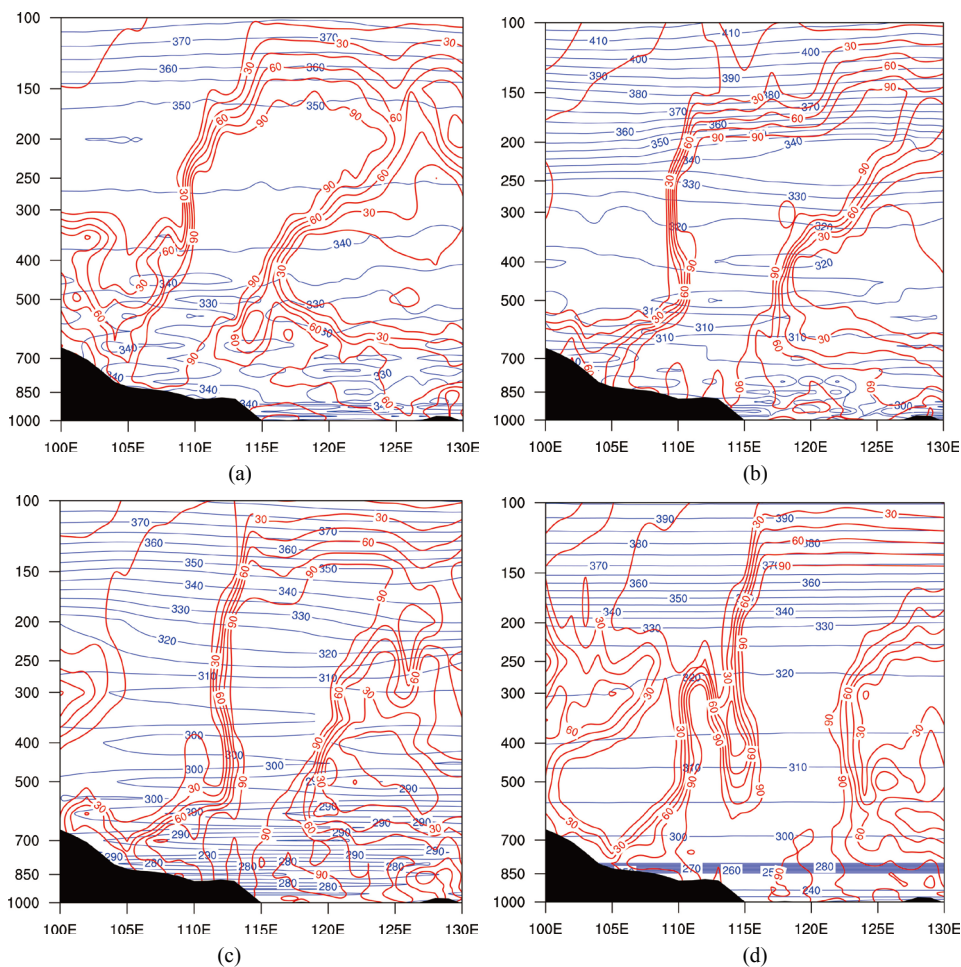
**Figure 6.** Vertical cross section of vector wind (vectors, combination of  $\omega \times 10$  and  $v$ , units:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along  $113^\circ\text{E}$  ((a) 1200 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 19 Jul; (c) 1200 UTC 19 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul 2016; The shaded area denotes topography)

**图 6.** 沿  $113^\circ\text{E}$  矢量风(箭头,  $\omega \times 10$  与  $v$  合成, 单位:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )的垂直剖面图((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时; 黑色阴影代表地形)

合状态, 这些都为暴雨的发生提供了有利的条件。

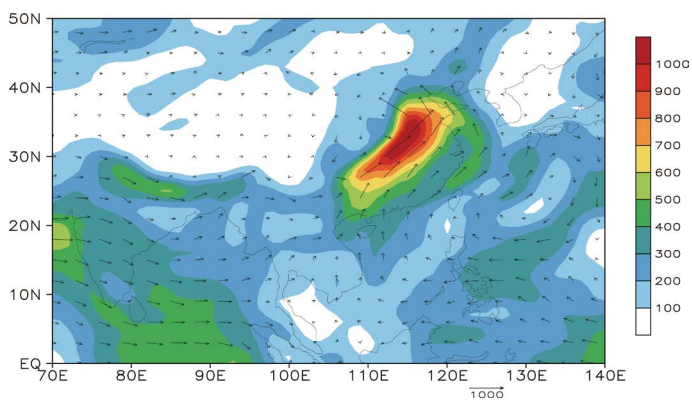
需要指出的是, 本文仅从低空低涡和高空急流相互作用方面对此次降水进行了诊断, 并未对影响降水的系统进行细致的分析, 比如 700 hPa 低涡的结构、两个低涡的形成机制、造成二者合并的原因及移





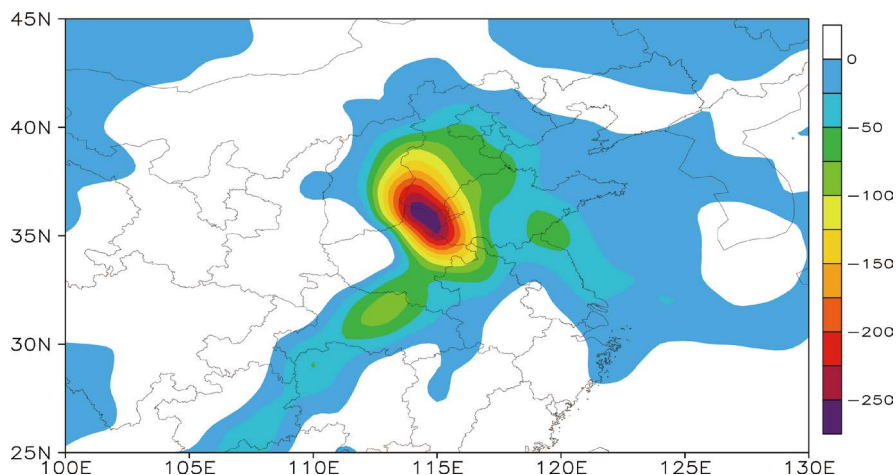
**Figure 7.** Vertical cross section of potential pseudo-equivalent temperature (blue contours, units: K) and relative humidity (red contours, units: %) along 113°E ((a) 1200 UTC 18 Jul; (b) 0000 UTC 19 Jul; (c) 1200 UTC 19 Jul; (d) 0000 UTC 20 Jul 2016; The shaded area denotes topography)

**图 7.** 沿 113°E 假相当位温(蓝色等值线, 单位: K), 相对湿度(红色等值线, 单位: %)的垂直剖面图((a) 2016 年 7 月 18 日 12 时; (b) 2016 年 7 月 19 日 00 时; (c) 2016 年 7 月 19 日 12 时; (d) 2016 年 7 月 20 日 00 时; 黑色阴影代表地形)



**Figure 8.** Vertically integrated water vapor flux (shadings, vectors, units:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 1200 UTC 19 Jul 2016

**图 8.** 2016 年 7 月 19 日 12 时整层积分水汽通量(填色、矢量箭头, 单位:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )



**Figure 9.** Vertically integrated water vapor flux divergence (shadings, vectors, units:  $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 1200UTC 19 Jul 2016

**图9.** 2016年7月19日12时整层积分水汽通量散度(填色, 单位:  $10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

出的原因等等。这也将是下一步研究的主要工作。

## 参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 83-100.
- [3] 陆尔, 丁一汇. 1991年江淮持续性特大暴雨的夏季风活动分析[J]. 应用气象学报, 1997(3): 316-324.
- [4] 全美兰, 刘海文, 朱玉祥, 等. 高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用[J]. 气象学报, 2013(6): 1012-1019.
- [5] 王黎娟, 管兆勇, 何金海. 2003年淮河流域致洪暴雨的环流背景及其与大气热源的关系[J]. 气象科学, 2008, 28(1): 1-7.
- [6] Chen, Q. (1982) The Instability of the Gravity-Inertia Wave and Its Relation to Low-Level Jet and Heavy Rainfall. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **60**, 1041-1057.
- [7] Uccellini, L.W. (1979) The Coupling of Upper and Lower Tropospheric Jet Streaks and Implications for the Development of Severe Convective Storms. *Monthly Weather Review*, **107**, No. 4. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107<0682:TCOUAL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107<0682:TCOUAL>2.0.CO;2)
- [8] 廖移山, 冯新, 石燕, 等. 2008年“7.22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J]. 气象学报, 2011, 69(6): 945-955.
- [9] Hassan, E.M., Azadi, M., Meshkatee, A.H., et al. (2011) The Role of the Subtropical Jet Stream in Cyclogenesis over the Central Mediterranean Sea: A case study of February 1974. *Machine Translation*, **12**, 29-34.
- [10] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆热带气旋海马(0421)变性加强的诊断研究[J]. 气象学报, 2012, 70(4): 628-641.
- [11] 何光碧. 西南低涡研究综述[J]. 气象, 2012, 38(2): 155-163.
- [12] 赵平, 梁海河. 西南低涡结构及潜热加热分析[J]. 成都信息工程学院学报, 1991(2): 16-21.
- [13] Kuo, Y.H., Cheng, L. and Anthes, R.A. (2009) Mesoscale Analyses of the Sichuan Flood Catastrophe, 11-15 July 1981. *Monthly Weather Review*, **114**, 1984. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<1984:MAOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<1984:MAOTSF>2.0.CO;2)
- [14] Kuo, Y.H., Cheng, L. and Bao, J.W. (1988) Numerical Simulation of the 1981 Sichuan Flood. Part I: Evolution of a Mesoscale Southwest Vortex. *Monthly Weather Review*, **116**, 2481. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116<2481:NSOTSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116<2481:NSOTSF>2.0.CO;2)
- [15] 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): 3-19.
- [16] 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[J]. 气象, 2008, 34(4): 39-47.
- [17] 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998年7月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究[J]. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 81-94.

- [18] 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.
- [19] 杜倩, 覃丹宇, 张鹏. 一次西南低涡造成华南暴雨过程的 FY-2 卫星观测分析[J]. 气象, 2013, 39(7): 821-831.
- [20] 卢萍, 李跃清, 郑伟鹏, 等. 影响华南持续性强降水的西南涡分析和数值模拟[J]. 高原气象, 2014, 33(6): 1457-1467.
- [21] Trenberth, K.E. (1991) Climate Diagnostics from Global Analyses: Conservation of Mass in ECMWF Analyses. *Journal of Climate*, **4**, 707-722. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0707:CDFGAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0707:CDFGAC>2.0.CO;2)
- [22] Feng, L. and Zhou, T. (2012) Water Vapor Transport for Summer Precipitation over the Tibetan Plateau: Multidata Set Analysis. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **117**, 20114. <https://doi.org/10.1029/2011JD017012>
- [23] Zhou, K., Liu, H., Zhao, L., et al. (2017) Binary Mesovortex Structure Associated with Southwest Vortex. *Atmospheric Science Letters*, **18**, 246-252. <https://doi.org/10.1002/asl.749>
- [24] 林元弼. 天气学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1988: 337.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2168-5711, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [ccrl@hanspub.org](mailto:ccrl@hanspub.org)