

# 2020年7月4日豫西北大暴雨数值分析

冯浩鹏<sup>1</sup>, 牛广山<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>成都信息工程大学, 大气科学学院, 四川 成都

<sup>2</sup>河南省焦作市气象局, 河南 焦作

收稿日期: 2021年10月2日; 录用日期: 2021年11月2日; 发布日期: 2021年11月11日

## 摘要

为了研究2020年7月4日豫西北地区的一次大暴雨发展过程, 本文应用常规观测资料、欧洲气象中心ERA5再分析资料以及探空资料, 利用常规观测资料对豫西北地区此次降水的环流背景、影响系统进行天气学分析; 利用再分析资料以及探空资料对此次降水的水汽条件、动力条件和不稳定能量等方面进行数值分析。结果表明: 1) 此次大暴雨过程中高纬地区为“两槽一脊”的环流形势, 西槽后引导冷空气经新疆地区南压, 与暖湿空气交汇, 促进不稳定能量释放。豫西北地区上游短波槽发展, 有正的相对涡度平流, 使局地涡度增加。低层辐合, 高层辐散的高低空配置, 有利于垂直上升运动加强, 且强度超过0.8 Pa/s, 为大暴雨天气提供了动力条件。2) 此次降水过程水汽充足, 来自孟加拉湾以及我国南海的暖湿气流在华南地区汇合, 受副高脊线以及小高压影响, 不断向豫西北地区输送。3) 降水过程期间, 豫西北地区是假相当位温高值区, 河南省以南的高值区, 通过豫中地区向北输送不稳定能量。垂直剖面图上, 500 hPa为分界点, 且假相当位温分布密集。500 hPa以上, 假相当位温递增, 大气层结稳定; 500 hPa以下, 地面至600 hPa附近, 假相当位温递减, 且 $\Delta\theta_{se600-850}$ 达到了 $-36^{\circ}\text{C}$ , 不稳定能量较强。4) 探空资料中, 对流有效位能(Convective Available Potential Energy, CAPE)先增大而后减小, 对流抑制能量(Convective Inhibition, CIN)逐渐增大, 两个物理量的值在大暴雨过程前后变化明显, 表明了此次大暴雨过程中能量的积聚情况, 对暴雨的发生发展有一定的指示作用。

## 关键词

大暴雨, 水汽条件, 动力条件, 不稳定能量

# Numerical Analysis of a Cloudburst on July 4th 2020 in Northwest Henan

Haopeng Feng<sup>1</sup>, Guangshan Niu<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Jiaozuo Meteorological Service, Jiaozuo Henan

Received: Oct. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Nov. 2<sup>nd</sup>, 2021; published: Nov. 11<sup>th</sup>, 2021

\*通讯作者。

## Abstract

In order to study the development process of a cloudburst in northwest Henan province on July 4th, 2020, in this paper, the general observation data, the ERA5 reanalysis data of the European meteorological center and the sounding data were used. Synoptic analysis was made on the circulation background and influence system of the cloudburst in the northwest of Henan province by using general observation data; numerical analysis was made on the water vapor condition, dynamic condition and unstable energy of the process by using the reanalysis data and sounding data. The results showed that: 1) The circulation pattern of "Two troughs and one ridge" in the high latitude area, the cold air at the rear of the western trough would pass through the south of Xinjiang region and converged with the warm and humid air to promote the release of unstable energy. There was positive relative vorticity advection in the upper short-wave troughs in northwest Henan, which increased the local vorticity. The low level convergence and high level divergence were favorable for strengthening the vertical ascending motion, and the intensity was more than 0.8 Pa/s, which provided the dynamic condition for heavy rain. 2) The moisture was sufficient. The warm and humid air from Bay of Bengal and South China Sea converged in South China, and under the influence of the western Pacific subtropical high and the high-pressure system in northwest Henan, it continuously transported water vapor to northwest Henan. 3) In the process of precipitation, the northwest area of Henan province was the high value area of pseudo-equivalent potential temperature; south of Henan province was also a high-value region of pseudo-equivalent potential temperature, sending unstable energy northward through central Henan. On the vertical section, 500 hPa level was the boundary point, and the distribution of pseudo-equivalent potential temperature was dense. Above 500 hPa level, the pseudo-equivalent potential temperature increased and the atmospheric stratification was stable; below 500 hPa, ground to near 600 hPa, the pseudo-equivalent potential temperature decreased,  $\Delta\theta_{se600-850}$  reached  $-36^{\circ}\text{C}$ , and the unstable energy was strong. 4) In the sounding data, CAPE and CIN changed obviously before and after the process, which indicated the energy accumulation during the heavy rain process, which had indication for the occurrence and development of heavy rain.

## Keywords

Cloudburst, Water Vapor Condition, Dynamic Condition, Unstable Energy

Copyright © 2021 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

### 1.1. 研究背景

我国的自然灾害发生的频率较高、灾害种类也较多,影响范围广,持续时间长。对我国人民的生命财产和经济、国防建设等方面都造成了直接或间接地损害,是造成损失十分严重的少数几个国家之一。暴雨是中国最主要的气象灾害之一,而根据国家气象局颁布的降水强度等级划分标准,24小时的降水量达到100.0~249.9 mm的降水过程则被定义为一次大暴雨天气过程。而大暴雨的发生可能导致洪涝灾害,造成农作物的减产,还可能引发山洪、滑坡、泥石流等地质灾害甚至威胁到人身安全,而在城镇,降水过多超过城镇的排水能力时,会造成城市内涝,对交通、工业生产、人们的日常生活都会产生较大的影响。

根据应急管理部发布的2020年全国自然灾害基本情况统计,2020年,气候年景偏差,南方地区在主汛期经历了1998年以来最严重的汛情,此次汛情影响范围广,伴随预警以及救援技术提高,人员的伤

亡情况和近些年相比显著下降。2020年,全国一共有33次的大范围强降水过程,平均降水量达689.2 mm,相较于常年偏多11.2%。有关部门尽最大努力降低人员伤亡及灾害造成的损失,与近5年均值相比,2020年全国因灾死亡失踪人数下降了43%,其中因为洪涝灾害死亡失踪279人、下降53%,为历史新低。2020年由洪涝灾害导致的紧急转移安置人次、受灾人次以及灾害造成的直接经济损失相比较近5年均值分别上升62%、23%和59%,但是由于建筑防洪排涝能力提升以及救援及时等多种因素,因洪涝灾害导致死亡失踪人数、房屋倒塌数量下降至53%和47%,2020年由洪涝引发的受灾情况整体呈现为“三升两降”形势。而豫西北是强对流天气的多发地。在河南相应地区,暴雨所引发的洪涝灾害局部损失较为严重,且受灾的范围较广。汛期时伴随强度较大的降水,且时空分布不均匀,暴雨引发的洪涝灾害对当地的农作物的影响较大,相应基础设施也被损害,经济损失严重,对人们的生产生活都造成严重的影响。

## 1.2. 研究现状

大暴雨的形成过程较为复杂,我国很多暴雨天气过程都是在中高纬系统和低纬度系统相互作用的形势下形成的。近些年,科研人员对于暴雨的过程进行了大量研究。稳定且强盛的水汽供应是大暴雨发生发展的基础,且降水强度与水汽通量辐合中心的对应关系较好[1]。在涡度和散度场中,其高低空的中心可以很好地对应暴雨的落区,高低空急流分别可以指示暴雨位置和暴雨过程的降水量[2]。中高层负涡度、中低层正涡度的垂直结构,为暴雨过程的动力机制,同时高低空辐合辐散的抽吸作用有利于低层上升运动的发展加强;冷暖空气相持也是形成暴雨的主要条件之一[3]。黄楚惠等[4]和黄建和[5]认为暴雨发生时对流层底部会有较为显著的质量以及动量的辐合,从而引起较强的上升运动。王亚婷等[6]在对保定一次暴雨过程的分析中指出,在暴雨区的上空,上升运动强烈,水汽辐合,涡度、垂直速度等物理量在垂直方向上的分布也利于暴雨天气过程的发生。张文军等[7]认为低空辐合、高空辐散的流场形势利于强降水天气的发生,初始不稳定能量是引发暴雨天气过程的条件之一。漆梁波等[8]对豫北一次特大暴雨的短期预报分析中指出了预报失败的原因,高分辨率区域模式相较于全球模式有着更好的预报能力,而豫北地区2016年7月9日特大暴雨预报失败的主要原因是预报员过于依靠全球模式的预报结果。喻谦花等[9]对一次暴雨过程的水汽条件分析中认为,700 hPa的水汽通量(水汽通量大值中心、水汽通量等值线密集带)可以较好地指示暴雨区的位置。赵强等[10]对陕西中北部一次暴雨过程进行了研究结果表明:高原槽后的冷空气以及副高外围的暖空气使得相应地区形成了有利于暴雨天气过程发生发展的环流形势,且在暴雨发生前,低层对流不稳定,CAPE较大,弱冷空气使低层不稳定能量得到释放。文宝安[11]对水汽通量与水汽通量散度进行阐述,从数学角度看,某一个区域内的水汽通量散度是由该区域周围地区边界上的水汽通量决定的,和区域内部的水汽通量是没有关系的。胡淑兰等[12]对陕西中北部的一次大暴雨过程进行分析,研究结果表明,中尺度对流系统的发展会影响暴雨区,同时也是强降水天气过程形成和发展的直接影响系统。李兴良等[13]利用中尺度天气预报模式(The Weather Research and Forecasting Model, WRF)对两种不同坐标系中垂直速度的计算进行了模拟分析,结果表明两种坐标系计算垂直速度是存在差异的,如果分辨率提高,不同的垂直坐标系下对垂直结构的描述有更显著的区别。利用三维散度场来诊断降水,相较于二维散度场则更加完善不仅要考虑风场的辐合辐散,同时也不能忽略质量强迫的作用,是关于动力和质量的综合分析[14]。马月枝等[15]对新乡市一次大暴雨天气过程进行分析发现,在对流中低层西太平洋副热带高压的外围存在较强的西南气流,将海上的暖湿水汽向暴雨区输送,使暴雨区上空维持稳定的湿层。夏季,西太平洋热带气旋的活动对中国东部极端天气事件具有调节作用,间接导致长江中下游地区高温天气[16]。苟尚等[17]对一次暴雨过程进行了分析,在700 hPa高度上,在正涡度区的西北东南侧都存在一个负涡度区,表明这是垂直上升运动区四周的补偿下沉区,也有利于低层保持辐合。甘璐等[18]对北京“7.21”特大暴雨进行不稳定能量诊断分析时发现,在特大暴雨发生时,假相当位温与

等压面的垂直分布几乎垂直, 同时气块的抬升伴有凝结潜热释放, 加热了对流层中层, 加热作用甚至可能造成位势稳定的现象。Chunwei Guo 等[19]也对北京“7.21”特大暴雨进行了分析, 将此次降水过程分为两个过程, 且冷暖气团云微物理过程的相互作用是此次降水产生的原因。辐合辐散的结构随高度的增加呈倾斜状, 有利于上升运动发展加强。位势散度会影响大气稳定度进而影响到降水区, 位势散度高值区对降水高值区有着较好的指示作用, 700 hPa 高度上的位势散度对于降水落区有很好的对应关系[20]。

### 1.3. 研究意义

暴雨是我国夏季常见的一种灾害性的天气。台风进入内陆、各种天气尺度系统相互作用等等造成的暴雨, 洪水、滑坡、泥石流、雷电引起的森林火灾、草原火灾等的自然灾害都会对人类的生产生活造成影响, 甚至威胁人类生命。例如 1975 年 8 月的特大暴雨引发的洪水, 其暴雨中心降水强度极大, 部分地区 24 小时降水量达到了 1060.3 mm, 冲走和被水浸泡的粮食近 10 亿 kg, 1100 万人口、113.3 万  $\text{hm}^2$  耕地受到严重水灾的影响, 水库垮坝也给下游造成了非常严重的灾难[21]。科研人员也对暴雨进行了大量的研究, 但暴雨过程是十分复杂的。本文应用相关数值产品, 对 2020 年 7 月 4 日的大暴雨过程进行分析, 对本次天气过程进行诊断, 揭示此次大暴雨的物理机制, 提高该地区今后大暴雨天气过程的预报能力, 强化该地区的暴雨监测, 为该地区大暴雨天气过程的预警预报提供借鉴。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 研究区概况

河南省是我国的农业大省, 四季分明, 雨量充沛, 气候条件良好, 有利于农作物的生长, 同时地处南北不同气候的过渡带, 河南省大部分地区处于暖温带, 南部跨亚热带, 属北亚热带向暖温带过渡的大陆性季风气候, 冬季寒冷干燥, 夏季湿润多雨, 降水的年际变化和季节变化都很大; 而东西向则有由平原向丘陵山地气候过渡的特征。豫西北地区位于黄河北岸到太行山南麓, 涵盖了河南省焦作市和济源市, 又与横亘于黄河南岸的邙山相夹, 自西向东呈喇叭口状, 地形较为独特, 是强对流天气的多发地, 也是河南省强对流天气的重要源地之一, 山区一旦有暴雨天气, 很容易引发山洪、滑坡、泥石流等自然灾害[22]。

### 2.2. 资料概况及研究方法

本文应用常规观测资料以及 ERA5 再分析资料对此次天气过程进行分析。常规资料包括 2020 年 7 月 4 日高低空常规观测资料和郑州站的探空资料。ERA5 再分析资料包括不同高度层(925 hPa, 850 hPa, 600 hPa, 500 hPa)的比湿、散度、涡度、温度、垂直速度、水平风速等物理量, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间分辨率为 1 h。

本文从整体的环流形势背景下进一步找到影响此次降水的天气系统, 再应用欧洲气象中心的 ERA5 再分析资料从水汽条件、动力条件、不稳定条件三个方面分析此次大暴雨的比湿、水汽通量、水汽通量散度、假相当位温、K 指数、涡度、散度等物理量对此次大暴雨过程进行数值分析, 应用实况探空资料对此次降水过程进行分析, 并对相关数值产品进行诊断, 希望揭示此次大暴雨过程的物理机制, 为该地区今后大暴雨的预警预报提供参考。

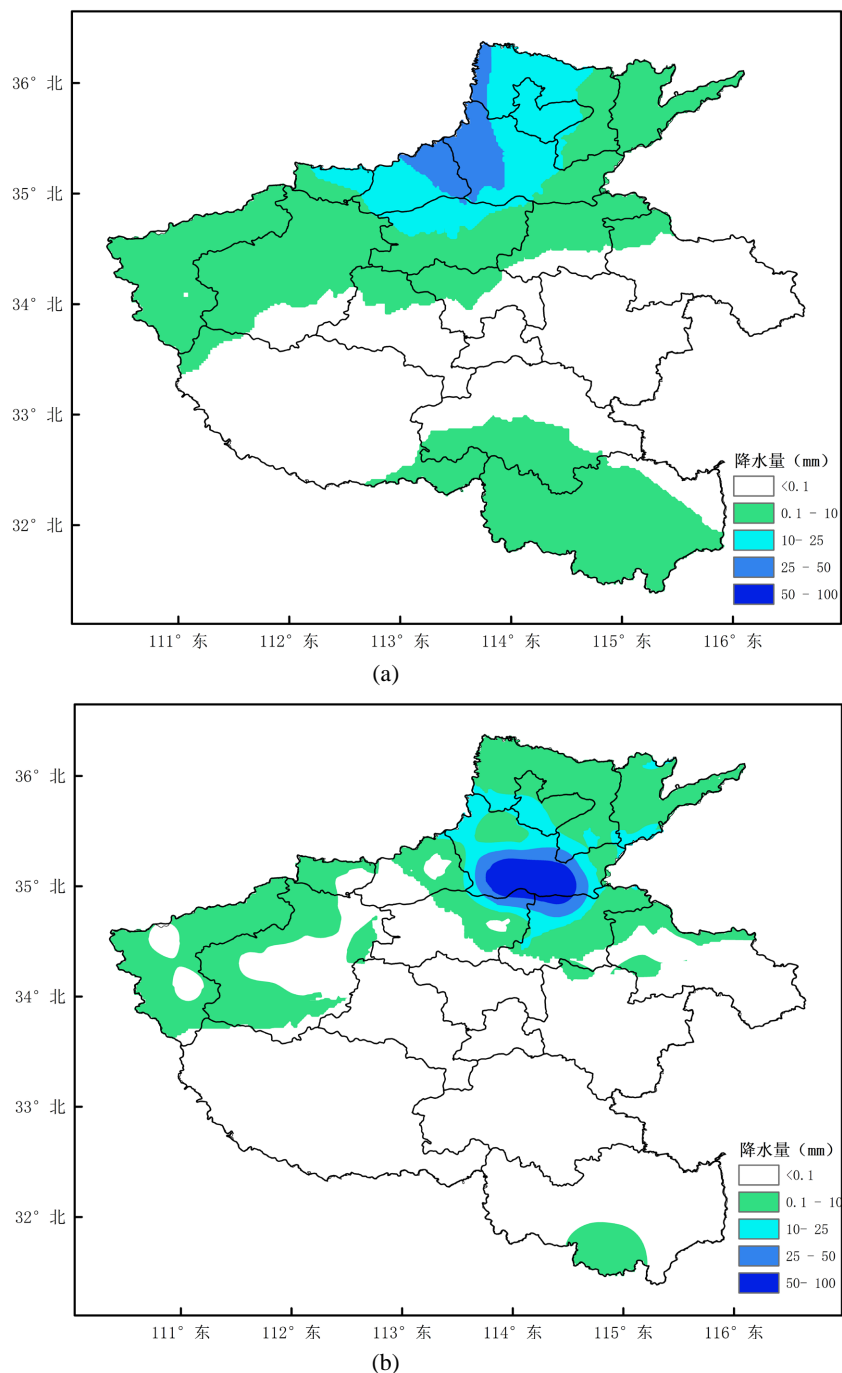
## 3. 结果与讨论

### 3.1. 天气实况

2020 年 7 月 4 日降水集中在焦作市中东部、新乡市中西部、郑州市部分地区。其中 6 个站点 24 小时降水量超过 50 mm, 焦作站单站 4 日 24 小时降水量达到了 109 mm, 已经达到大暴雨标准。5 日降水

集中在新乡市南部, 其中原阳、封丘两站 24 小时降水量达到了 90.6 mm 和 97.1 mm, 达到暴雨标准。

此次大暴雨过程降水主要集中在 4 日 18:00~5 日 06:00 (北京时, 下同)。图 1 为 7 月 4 日 17:00~5 日 05:00 的降水量, 强降水分布并不均匀, 且降水中心呈现出自西向东的移动趋势。4 日 18:00~19:00 焦作市中部以及东南部开始降水, 18:00~21:00 降水中心位于焦作市, 4 日 21:00~22:00 降水中心位于焦作市和新乡市交界地区, 其中焦作站 1 小时降水量达 52.8 mm, 4 日 22:00 之后降水中心进入新乡市, 并不断东移。



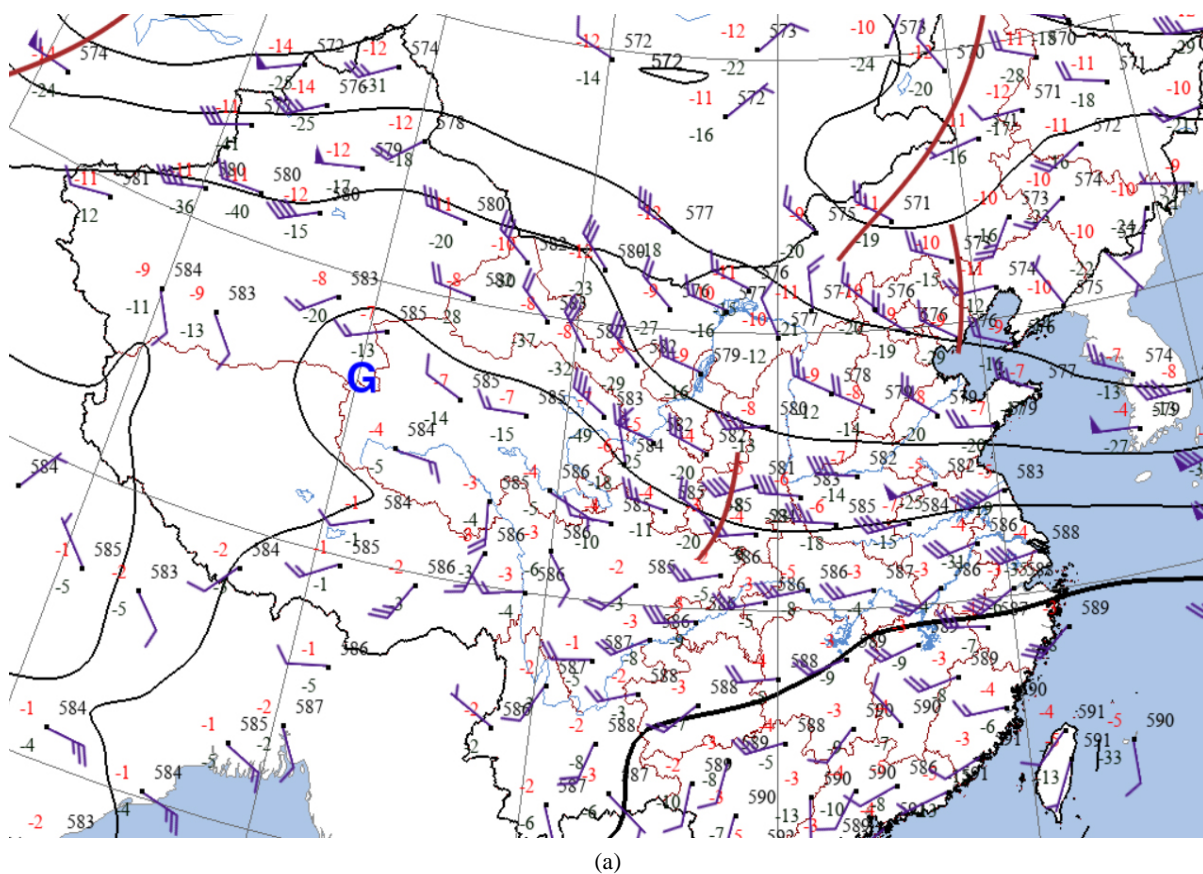
**Figure 1.** Precipitation from 17:00 to 23:00 (a) on July 4th 2020, 23:00 on the 4th to 05:00 on the 5th (b) (color filling, unit: mm)

**图 1.** 2020 年 7 月 4 日 17:00~23:00 (a)、4 日 23:00~5 日 05:00 (b) 降水量 (填色, 单位: mm)

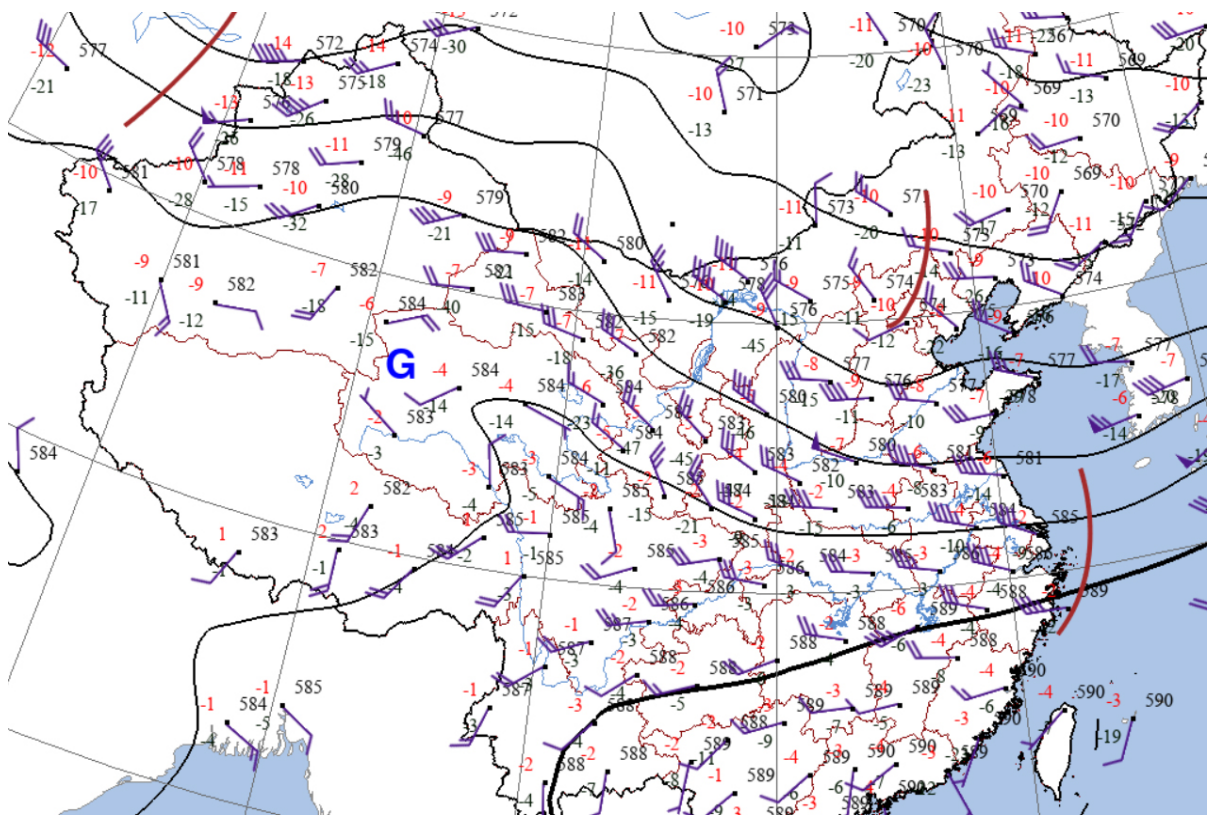
### 3.2. 天气形势分析

7月4日08:00 500 hPa天气图(图2(a))上, 亚欧大陆中高纬地区呈现出“两槽一脊”的环流形势, 巴尔克什湖北部存在一个低压系统, 西槽位于巴尔克什湖一带, 槽后偏北气流引导冷空气经新疆向南输送冷空气。而在贝加尔湖地区存在一个阻塞高压, 脊区已经延伸到中西伯利亚。东槽从东西伯利亚向南延伸至我国的内蒙、东北地区。贝加尔湖地区的暖舌向北延伸, 与高压系统重合。在中低纬度, 青海地区气流呈反气旋性, 在陕西南部存在短波槽, 且槽区有一暖舌, 槽前暖平流槽后冷平流。豫西北地区是在槽前的位置, 存在正的相对涡度平流, 低层气旋性涡度增大, 上升运动加强, 为大暴雨天气的形成提供良好的动力条件。西太平洋副热带高压(简称“副高”)呈带状分布, 受副高脊线的影响, 我国西南、华南地区盛行西南气流, 将暖湿水汽向北输送, 也为豫西北地区的暴雨提供了良好的水汽条件。北方南下的冷空气与暖湿水汽交汇, 有利于锋生并伴随降水。4日20:00(图2(b)), 陕西南部的短波槽东移, 进入河南地区。副高脊线稳定, 脊前西南气流持续引导暖湿空气向河南地区输送水汽, 使得大暴雨天气得以维持。在5日08:00, 槽线持续东移, 整个河南省位于槽后受西北气流控制, 槽后有负的相对涡度平流, 有利于低层反气旋性涡度增加, 垂直方向下沉运动为主, 暴雨过程结束。

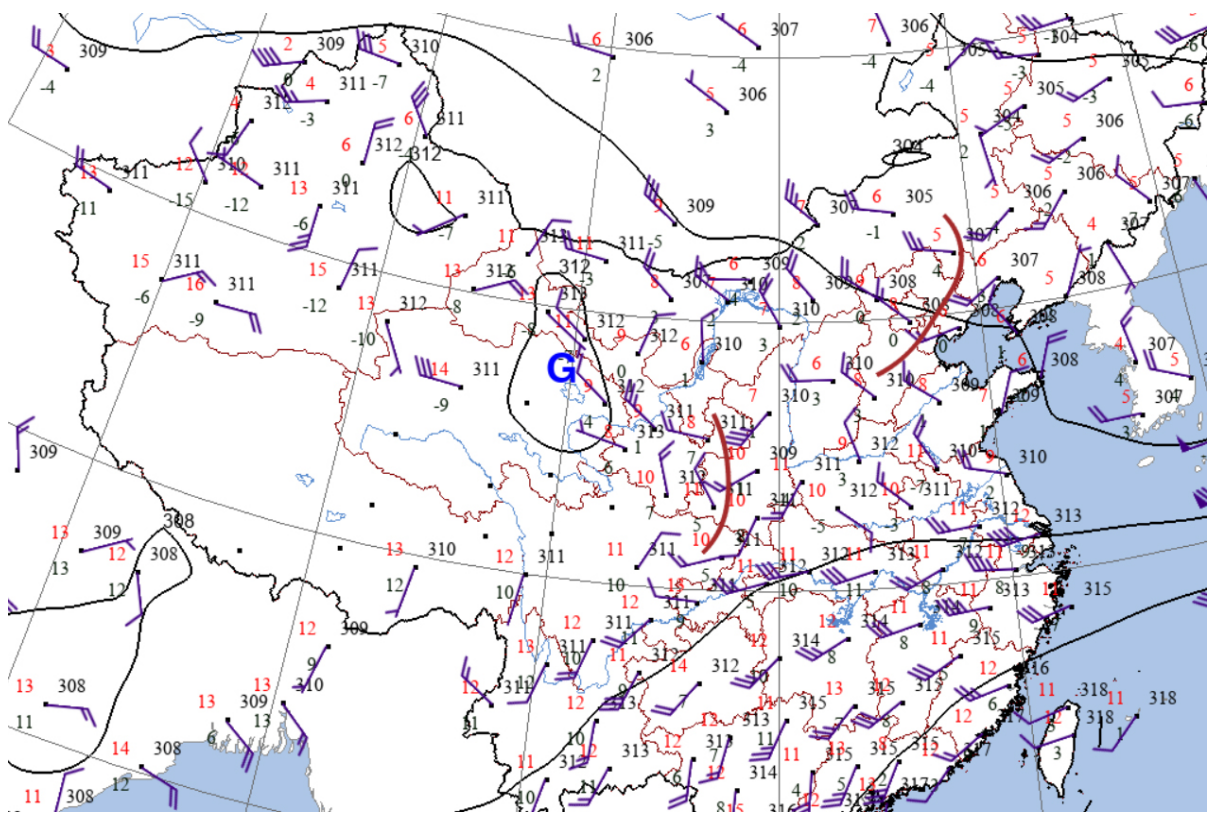
4日08:00 700 hPa天气图(图2(c))上, 陕西西部存在一槽线与500 hPa相对应, 河南存在反气旋性的环流。4日20:00槽线已经位于河南省中西部地区, 豫西、豫西北部分地区已经位于槽后, 伴随槽线过境, 豫西北地区的降水开始增强。850 hPa(图2(d))上, 在河南省中东部地区存在一个高压中心, 豫西北地区位于高压中心的西北部, 4日20:00郑州测站的温度露点差为 $2^{\circ}\text{C}$ , 大暴雨过程的发展有着良好的水汽条件。



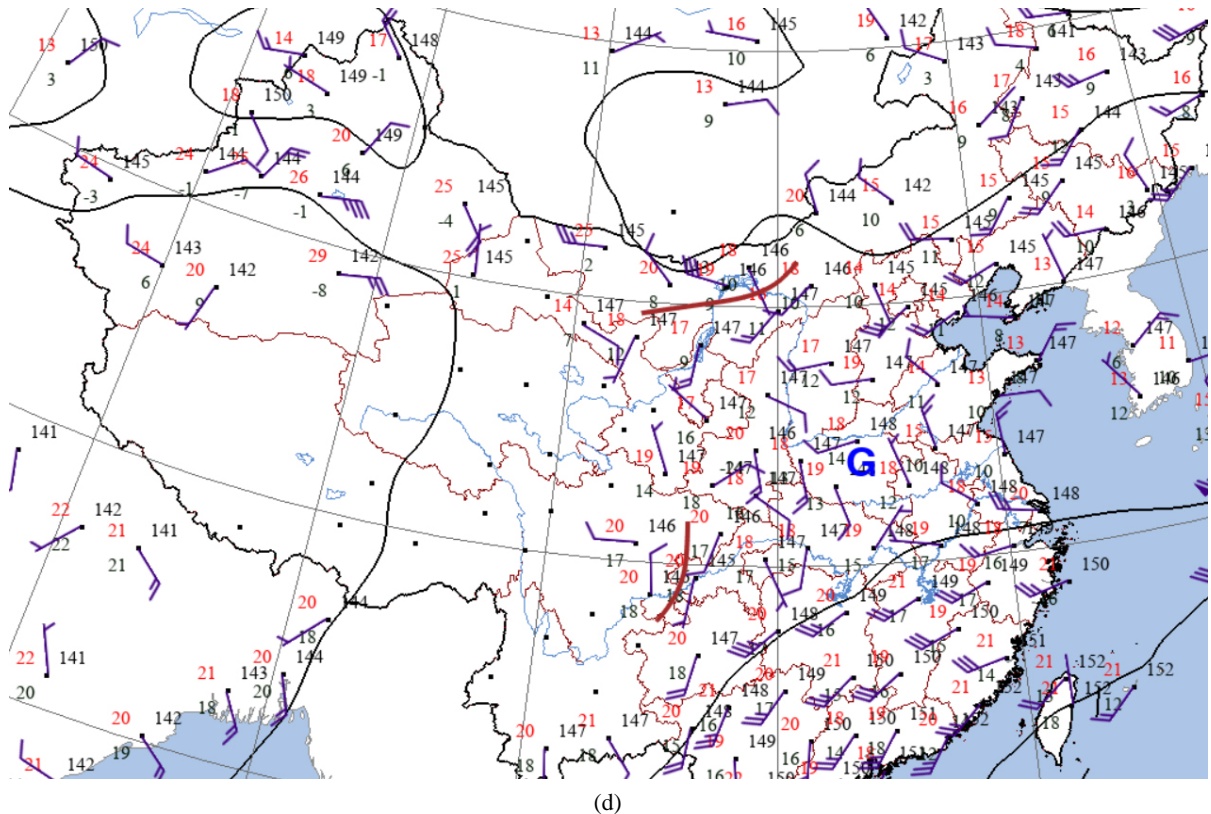
(a)



(b)



(c)



**Figure 2.** Circulation pattern of 500 hPa at 08:00 (a), 20:00 (b), 700 hPa at 08:00 (c), 850 hPa at 08:00 (d) on July 4th 2020  
**图 2.** 2020 年 7 月 4 日 08:00 500 hPa (a), 20:00 500 hPa (b), 4 日 08:00 700 hPa (c), 4 日 08:00 850 hPa (d) 环流形势

### 3.3. 水汽条件分析

#### 3.3.1. 比湿

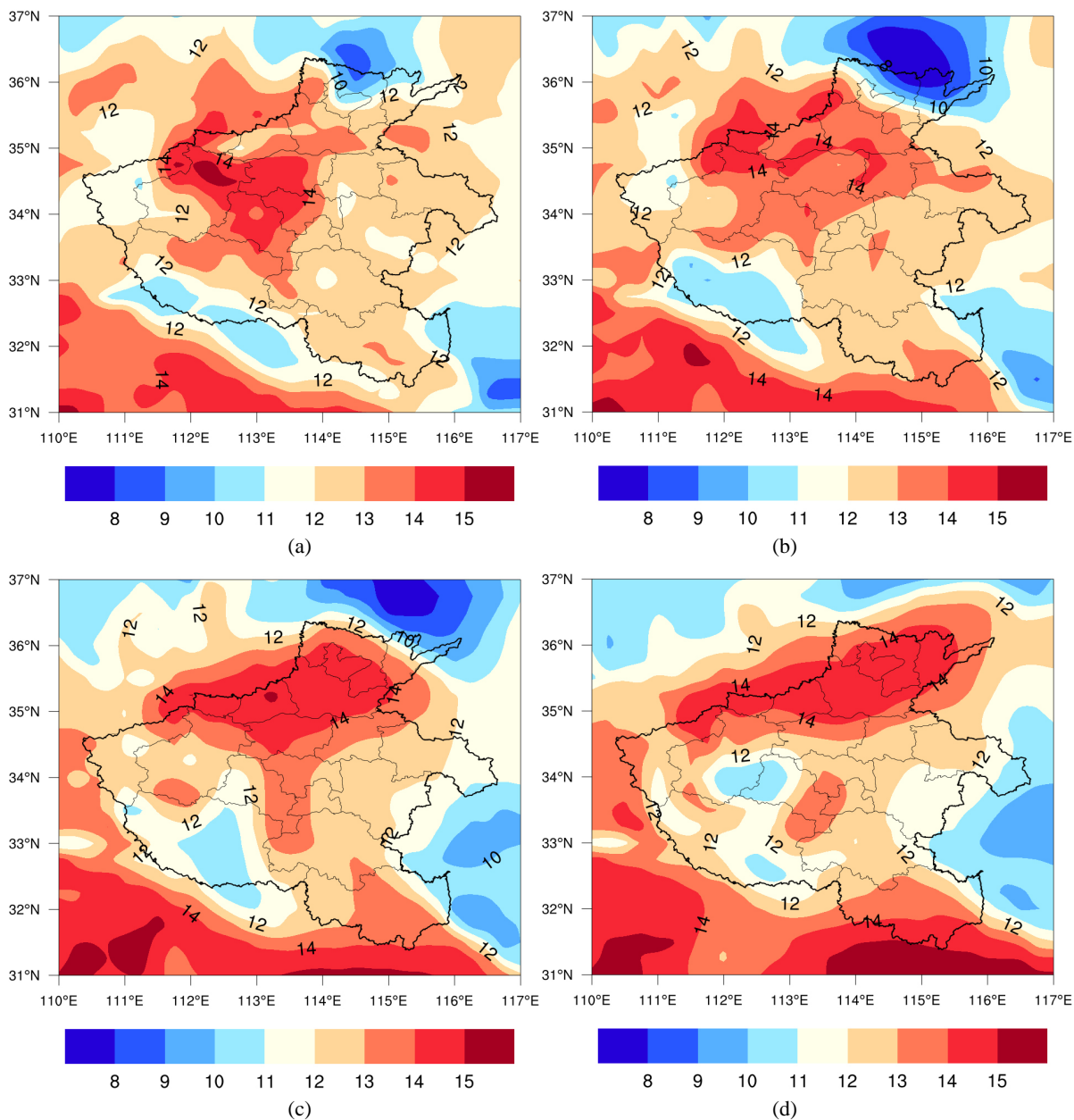
比湿是表征水汽含量的参数。比湿是湿空气中含有的水汽质量与湿空气总质量的比。郭艳君等[23]对 1958~2005 年中国高空大气比湿变化的研究表明, 中国地区水汽的垂直分布表现出: 90%的水汽集中在对流层的中低层, 400 hPa 高度以上的比湿仅仅为 850 hPa 的 10%, 且空间分布呈南高北低的特征。充沛的水汽是暴雨天气过程发生发展的必要条件。

比湿高值区可以很好的对应到降水落区, 同时比湿场的变化也可以对降水带的移动提供指示作用。此外, 比湿场也可以表明相关区域的降水强度, 降水强度表征单位时间内的单位面积上的降水量, 也是表征暴雨特征的一个重要指标, 比湿越高, 对应的降水强度越大, 降水越猛烈。

从 4 日 15:00 850 hPa 的比湿场(图 3(a))可以看到: 整个河南省的比湿值在 12 g/kg 以上。河南西部存在两个比湿高值区, 其高值中心的比湿已经达到了 15 g/kg, 豫中和豫西大部分地区的比湿值都达到了 13 g/kg, 在郑州市、洛阳市、三门峡市部分测站观测到少量降水。到 4 日 18:00 (图 3(b)), 比湿高值中心相较于 15:00 已经北抬, 豫西北部分地区的比湿值已经达到 14 g/kg。4 日 21:00 (图 3(c)), 豫西北整体位于比湿高值区内, 其中在焦作市部分地区的比湿值达到了 15 g/kg, 随后比湿高值区向西北方向移动, 5 日 06:00 之后豫西北地区的比湿值整体下降。

由此可见, 水汽的输送主要是由西南向东北方向, 暖湿水汽主要来自我国南海以及孟加拉湾地区, 受到副高脊线的影响呈现出西南 - 东北向。而在 700 hPa 比湿场上, 高值区域的移动滞后于 850 hPa; 而在 500 hPa 上则表现为较为干冷的空气西北 - 东南向移动。上层干冷, 下层暖湿, 有利于对流性降水天





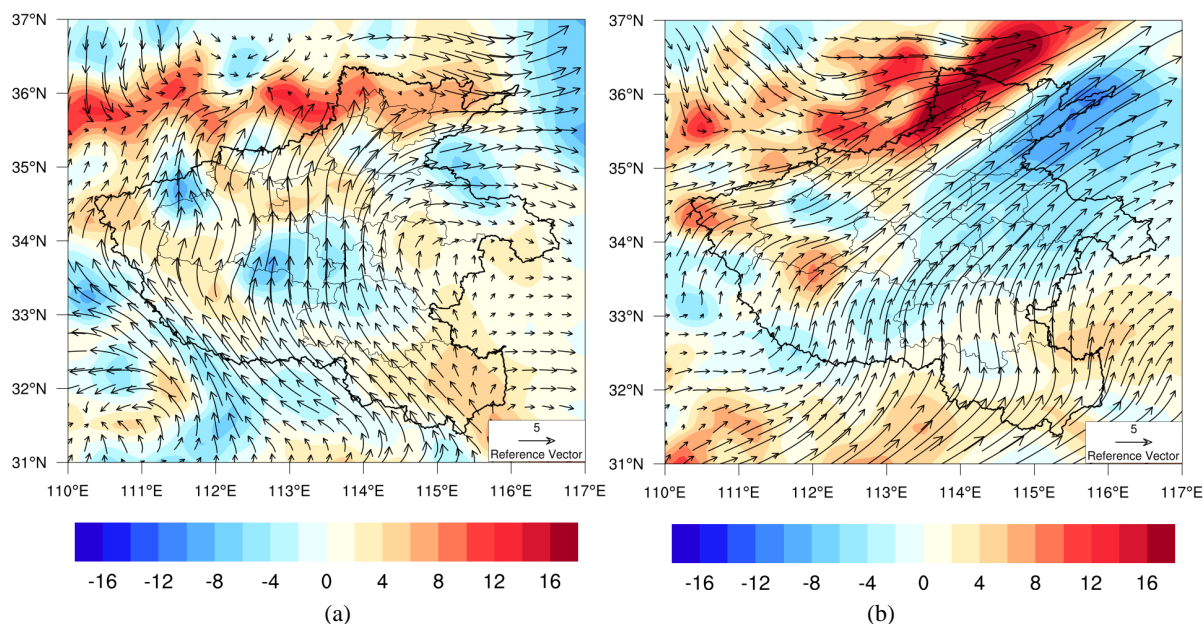
**Figure 3.** Specific humidity of 850 hPa at 15:00 (a), 18:00 (b), 21:00 (c) on July 4th 2020, 00:00 (d) on July 5th 2020 (color filling, unit: g/kg)

**图 3.** 2020 年 7 月 4 日 850hPa 15:00 (a)、18:00 (b)、21:00 (c)、5 日 00:00 (d) 比湿场(填色, 单位: g/kg)

气的发生。由此可见, 此次豫西北的降水过程的水汽条件良好, 比湿场和这次降水过程相对应。

### 3.3.2. 水汽通量和水汽通量散度

形成暴雨必须要有水汽向降水区不断输送, 源地的水汽通过平流输送到降水区, 水汽输送量的大小用水汽通量来表征, 单位时间通过单位面积输送的水汽量就是水汽通量。而当水汽输送到降水区时, 水汽在降水区水平辐合上升, 进而凝结冷却形成降水, 而在单位面积内水汽的辐合辐散程度则用水汽通量散度来表征。利用欧洲气象中心 2020 年 7 月 4 日 850 hPa 高度上风速的 U、V 分量以及比湿来计算 3 小时时间分辨率的水汽通量和水汽通量散度, 分析水汽的路径和积聚情况。



**Figure 4.** Vapor flux (arrow, unit:  $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ), moisture flux divergence (color filling, unit:  $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of 850 hPa at 15:00 to 18:00 (a) on July 4th 2020, 850 hPa at 00:00 to 03:00 (b) on July 5th 2020

**图 4.** 2020 年 7 月 4 日 850 hPa 15:00~18:00 (a)、5 日 00:00~03:00 (b) 水汽通量(箭头, 单位:  $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )以及水汽通量散度(填色, 单位:  $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

由 850 hPa 高度上的水汽通量可知, 同时结合 850 hPa 上的天气填图可以发现, 水汽主要来自孟加拉湾以及我国南海。来自孟加拉湾的水汽由西南向东北输送暖湿水汽, 与来自我国南海的偏南暖湿气流在华南沿海地区交汇, 经华南、华中向东北方向输送。而在河南的中南部存在一个闭合的高压系统, 豫西北处于闭合小高压的西北部, 而河南中南部的小高压有利于将汇合的暖湿水汽向豫西北地区输送, 为豫西北地区的大暴雨提供了必要的水汽条件。而由图 4 可知, 在 15:00~18:00 (图 4(a)), 河南大部分地区水汽输送呈反气旋式, 中心位于豫东地区, 而后不断东移。豫中地区的水汽通量数值较大, 单位时间通过单位面积的水汽量较多, 随着降水过程不断发展, 水汽通量值也逐渐增大, 4 日 23:00 达到了  $16 \times 10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , 之后水汽通量高值中心不断向东北方向移动, 在 5 日 02:00~04:00 最高值达到了  $20 \times 10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

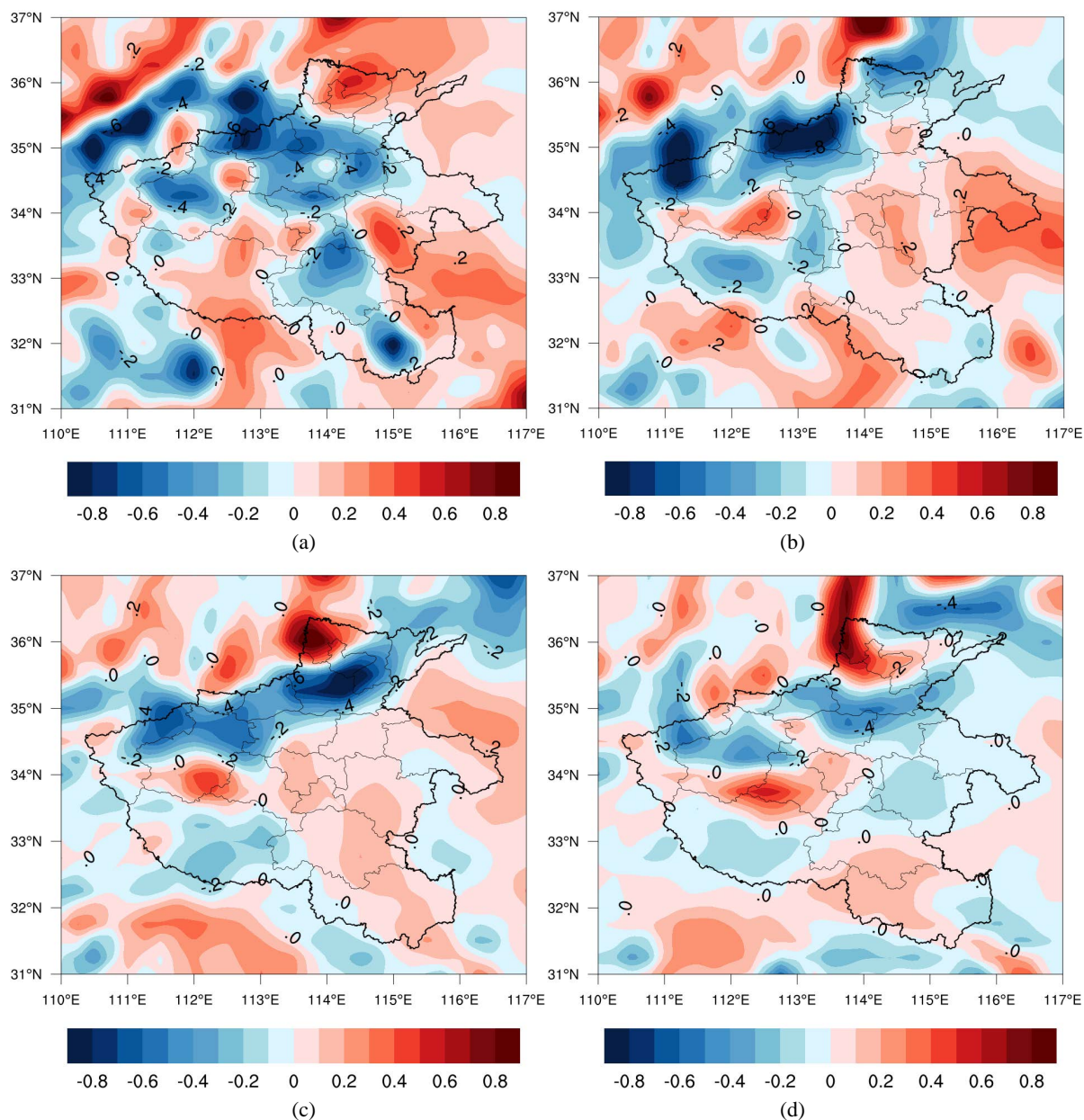
从 4 日 15:00~18:00 的水汽通量散度可以看出, 在三门峡市的东北部、平顶山市和南阳市的交界处存在辐合中心, 豫北有一条带状的辐散带, 信阳市、周口市的大部分地区水汽辐散。与实况进行对比发现, 15:00~18:00 降水多发生在辐合辐散的交界地区, 三门峡市部分地区的降水与实况对应关系较好。而在 5 日 00:00~03:00 (图 4(b)), 辐合带向东北方向移动, 此时的降水落区主要位于豫北地区。可见水汽通量以及水汽通量散度表征的水汽输送和积聚情况对降水的预报具有重要的指示作用。

### 3.4. 动力条件分析

#### 3.4.1. 垂直速度

强降水过程需要较强的抬升运动, 垂直上升运动可以使大气层结中的不稳定能量得到释放, 空气块在垂直上升运动中可以达到饱和状态, 促使大气中热量、动量等的多种物理量的输送, 有利于中小尺度天气的发生发展。图 5 为河南地区 850 hPa 高度上的垂直速度分析, 时间分辨率为 1 小时, 而垂直速度在图上则表示为负值的绝对值越大, 空气块的上升运动越强, 越有利于物理量的垂直输送从而造成不稳定天气的发生。

由4日18:00(图5(a))可以看到豫西北地区存在一个负值高值中心, 上升运动较强, 位于济源市和焦作市的边界。豫中的大部分地区都是垂直上升运动区, 豫南也有两个强上升运动区。而20:00(图5(b)), 豫西北地区的高值中心逐渐加强, 整个焦作市的上空垂直速度强度超过 $0.8\text{ Pa/s}$ , 上升运动较强。22:00(图5(c))高值中心已经东移出焦作市, 位于新乡市。此时的实况数据显示焦作市的降水已经减少, 降水中心已经位于新乡市内, 垂直速度与实况降水对应较好。5日00:00(图5(d))可以看到新乡市上空的垂直上升运动逐渐减弱, 此时上升区呈带状分布, 位于豫南部以及豫中北部。5日00:00~06:00, 850 hPa高度上逐渐由垂直上升运动转为下沉运动, 实况降水中心向新乡市的东南部逐渐移动, 而后移出河南地区。可以看到垂直运动与降水实况的对应关系较好, 是反应降水天气过程的一个重要的指示物理量。



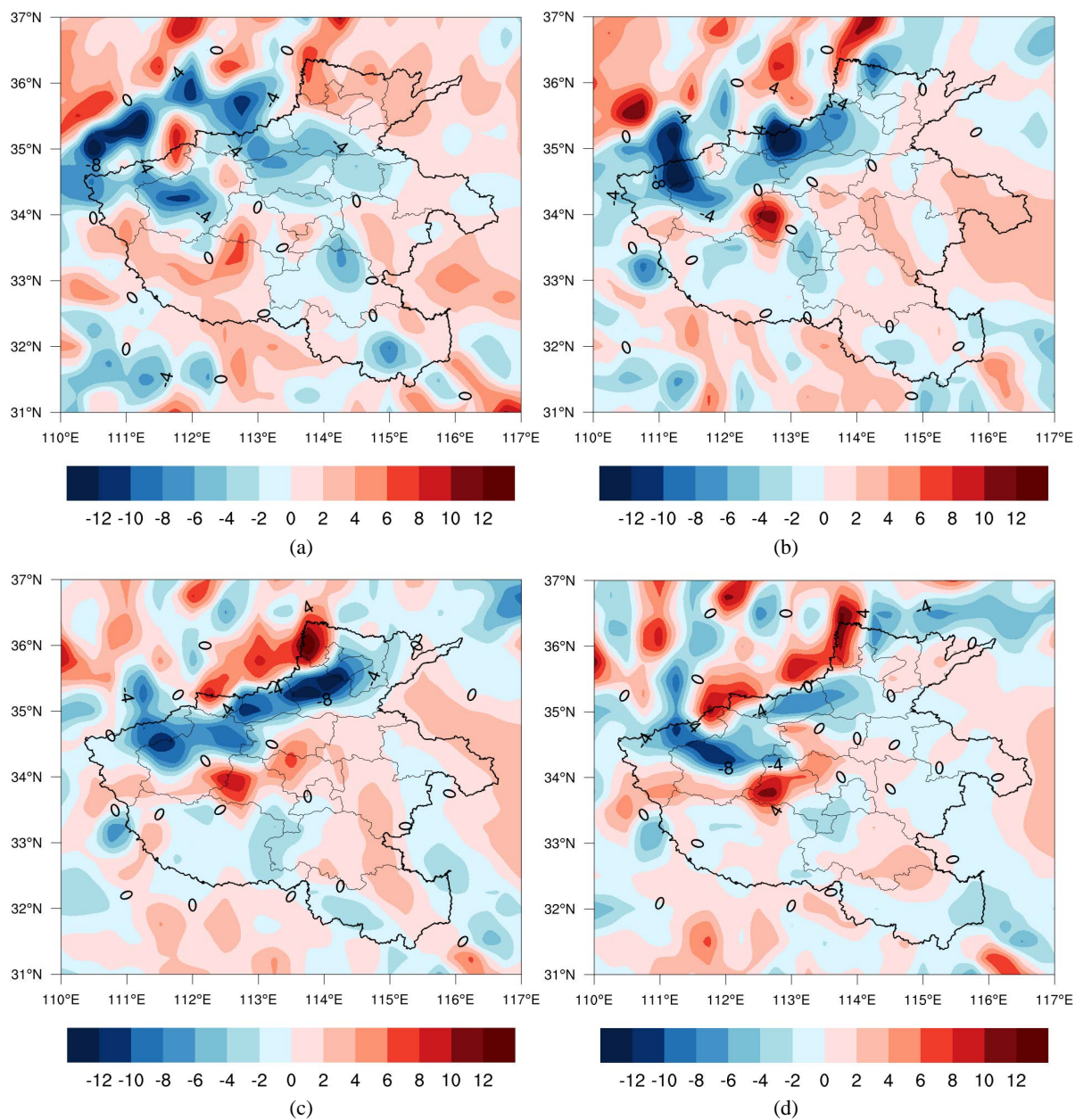
**Figure 5.** Vertical velocity of 850 hPa at 18:00 (a), 20:00 (b), 22:00 (c) on July 4th 2020, 00:00 (d) on July 5th 2020 (color filling, unit: Pa/s)

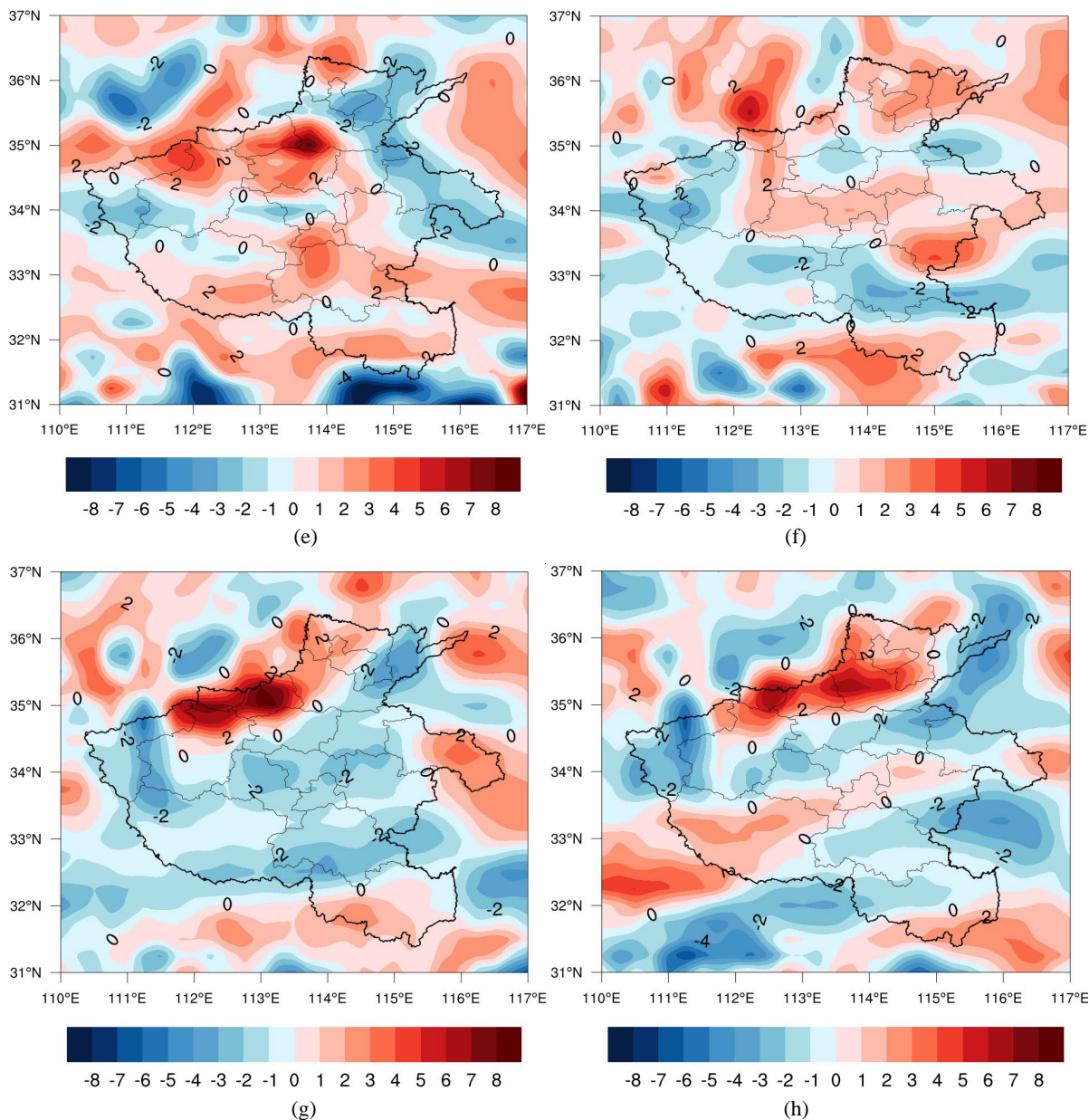
**图 5.** 2020 年 7 月 4 日 850 hPa 18:00 (a)、20:00 (b)、22:00 (c)、5 日 00:00 (d) 垂直速度(填色, 单位: Pa/s)

### 3.4.2. 散度

散度是描述速度场辐合辐散的物理量。而单层不可压大气水平方向上存在辐合辐散与垂直运动相联系，由于质量补偿，水平辐散会减弱大气的上升运动，水平辐合则相反。而低层辐合高层辐散的高低空配置是有利于降水天气过程及相应系统的发生发展，因此分别选取时间分辨率为 1 小时的 925 hPa 和 500 hPa 高度上的散度场，对河南地区上空的辐合辐散情况进行分析。

4 日 18:00 925 hPa 上的散度场(图 6(a))可以看到，河南西北部存在两个负的散度高值中心，洛阳市也有一个高值中心，其强度均超过  $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。北边的两个高值中心会逐渐南压分别影响到三门峡市和焦作市(图 6(b))。与之对应的 500 hPa 上，18:00 (图 6(e))存在两个辐散中心，分别位于焦作东南部以及三门峡和洛阳交界地带。低层辐合高层辐散的高低空配置利于降水的形成，焦作市相较于三门峡市其高低空对应关系更好，而 18:00 降水也主要位于焦作市内。20:00 925 hPa (图 6(b))上豫西北地区的散度高值中心位于焦作市，





**Figure 6.** Divergence of 925 hPa at 18:00 (a), 20:00 (b), 22:00 (c) on July 4th 2020, 00:00 (d) on July 5th 2020 and 500 hPa at 18:00 (e), 20:00 (f), 22:00 (g) on July 4th 2020, 00:00 (h) on July 5th 2020 (color filling, unit:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )

**图 6.** 2020 年 7 月 4 日 925 hPa 18:00 (a)、20:00 (b)、22:00 (c)、5 日 00:00 (d), 500 hPa 18:00 (e)、20:00 (f)、22:00 (g)、5 日 00:00 (h)散度场(填色, 单位:  $10^{-5}\text{s}^{-1}$ )

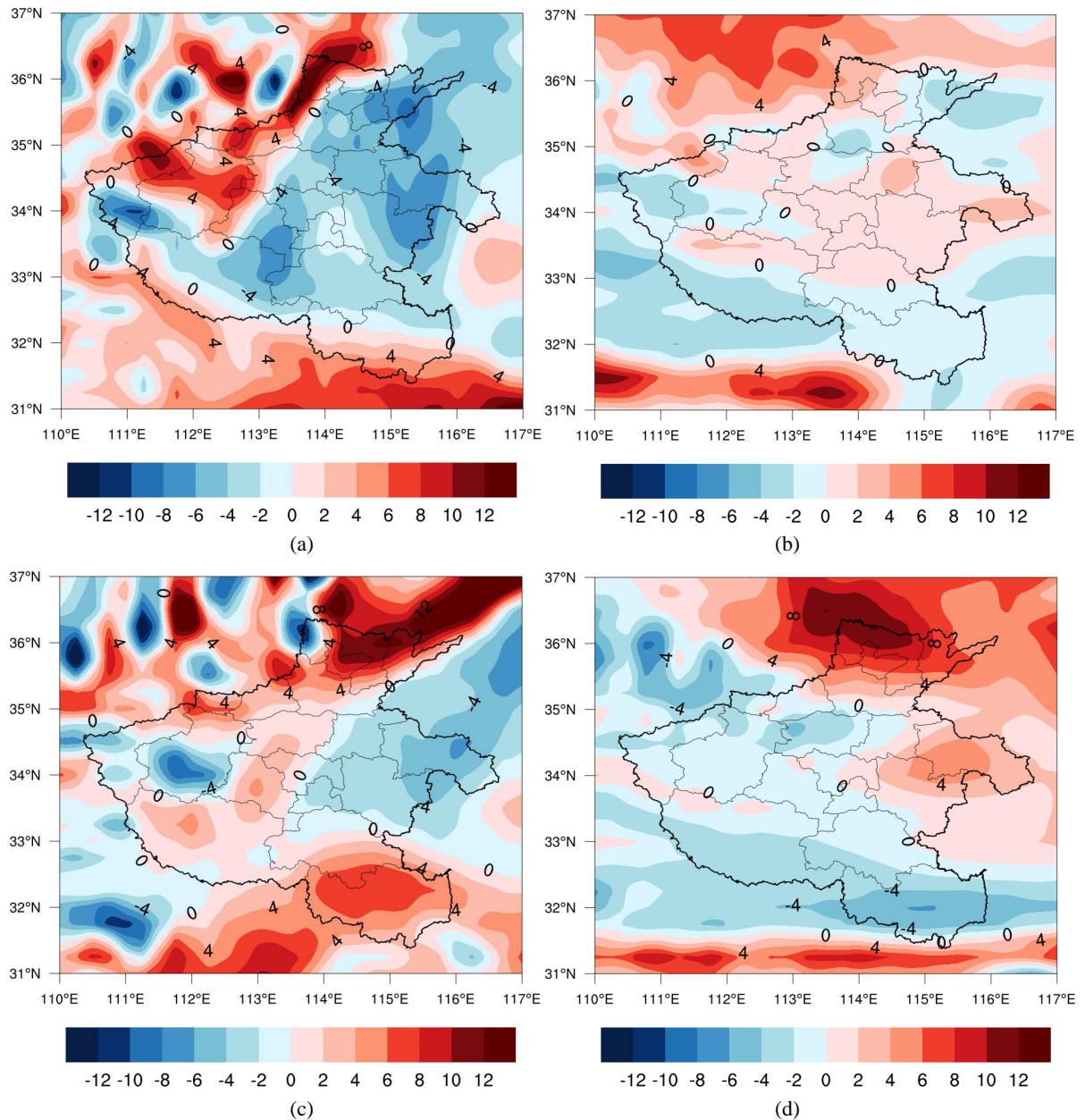
中心强度达到  $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 对应 500 hPa 20:00 (图 6(f)), 仍然是有利于上升运动和强降水的高低空配置。4 日 22:00 (图 6(c)), 低层 925 hPa 上, 负值中心进入新乡市; 中层 500 hPa 22:00 (图 6(g)), 豫西北地区为辐散高值区; 降水区位于新乡市的东部, 散度场与实况对应较好。5 日 00:00 之后, 925 hPa 上辐合减弱, 500 hPa 上中部的辐合带开始南压, 北方的辐散中心也开始控制并影响豫北地区。5 日 04:00 之后, 在 850 hPa 上新乡市东部以及豫北地区由辐散转为辐合, 强度较低, 降水强度也逐渐减弱东移, 直至移出河南。

### 3.4.3. 涡度

流场中某一质块的涡度被定义为质块速度的旋度[24], 表征流体质块的旋转程度和方向, 其演变过程

具有持续性。

涡度场结合散度场来分析, 由图 7 可知, 850 hPa 高度上, 22:00 (图 7(a)) 正涡度区主要位于河南省的西部以及以西北部, 有多个高值中心, 强度超过了  $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ; 而 500 hPa 高度上结合散度场, 22:00 (图 7(b)) 可以看到在豫西北部分地区仍是上升区, 涡度强度降低为  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。可以看到对流层中低层整层都是上升气流, 垂直上升运动较强, 有利于强降水天气的发生。5 日 850 hPa 正涡度区向东北方向移动, 影响豫北地区, 而后向东南向移动, 而 500 hPa 05:00 (图 7(d)) 豫西的大部分地区为负值区, 但是豫北地区仍然是正值区, 安阳市西北部存在强度为  $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的高值中心, 相应正值区气块呈气旋式旋转。



**Figure 7.** Vorticity of 850 hPa at 22:00 (a) on July 4th 2020 and 05:00 (c) on July 5th 2020, 500 hPa at 22:00 (b) on July 4th 2020 and 05:00 (d) on July 5th 2020 (color filling, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

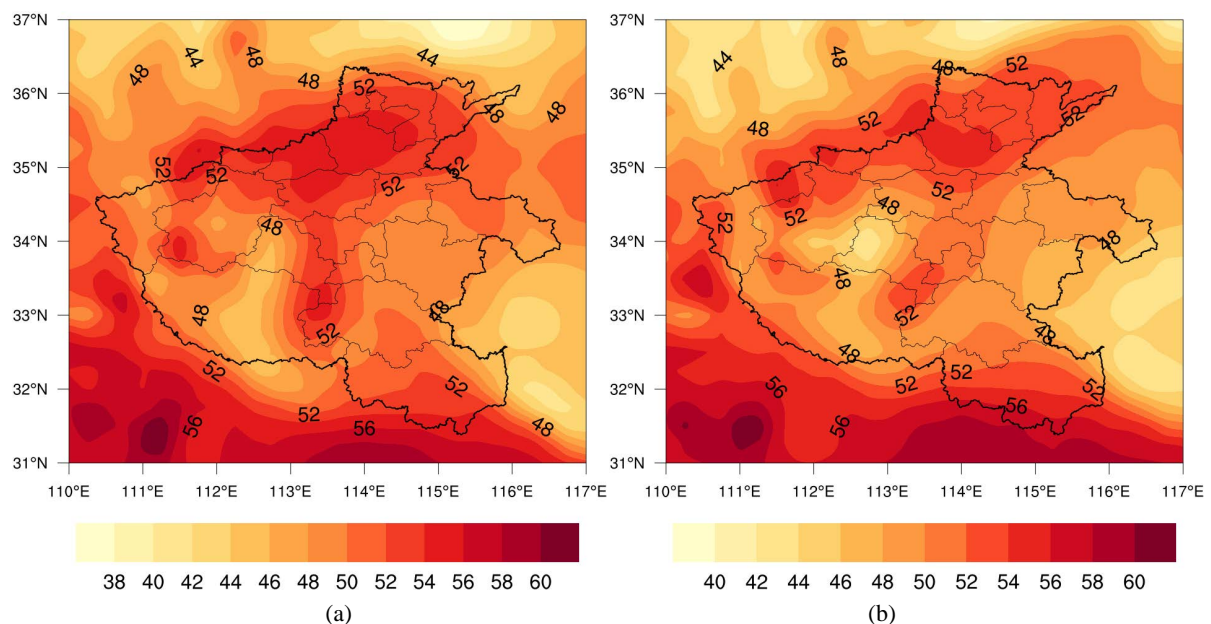
**图 7.** 2020 年 7 月 4 日 850 hPa 22:00 (a)、500 hPa 22:00 (b)、850 hPa 5 日 05:00 (c)、500 hPa 5 日 05:00 (d) 涡度场(填色, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

### 3.5. 不稳定条件分析

#### 3.5.1. 假相当位温

假相当位温是湿空气块先干绝热上升到抬升凝结高度再沿湿绝热上升,直到空气块中的水汽全部凝结,再按干绝热下沉到 1000 hPa 时的温度,同时这一过程称为假绝热过程。假相当位温是一个表征大气温湿状况的物理量,靳莉君等[25]对假相当位温的应用研究中表明,暴雨是多种因素共同作用的结果,假相当位温的高值中心的演变,与降水的落区以及降水的发展阶段相对应,有很好的指示意义。不稳定能量的储存、释放也是暴雨过程中的一个重要因素,不稳定能量的研究也有助于我们更进一步的认识暴雨过程,因此假相当位温也是我们对暴雨进行预报和分析的一个重要物理量。

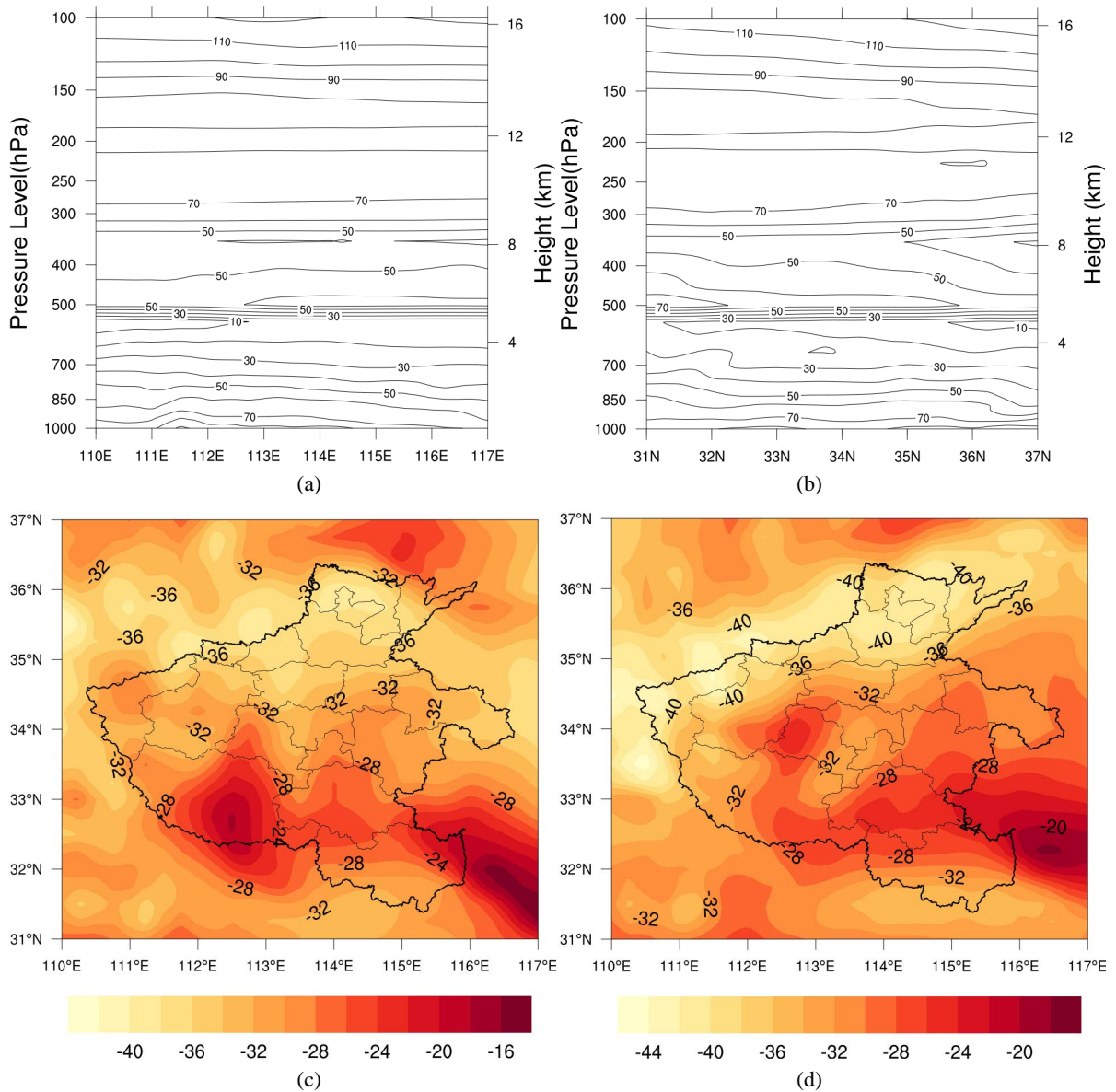
在 7 月 4 日 850 hPa (图 8)假相当位温分布图中,可以看到豫西北地区是假相当位温高值区,但假相当位温均在 80℃以下,但豫西北地区相较于周围仍是高温高湿区。5 日 01:00 (图 8(b))高值中心进入新乡市,在不断东移的过程中强度也不断减弱。假相当位温整体带状分布呈东北西南向,低纬地区水汽向降水区的输送也同时带来热量和动量,积累了不稳定能量。



**Figure 8.** Potential pseudo-equivalent temperature of 850 hPa at 22:00 (a) on July 4th 2020 and 01:00 (b) on July 5th 2020 (color filling, unit: °C)

**图 8.** 2020 年 7 月 4 日 850 hPa 22:00 (a)、5 日 01:00 (b)假相当位温(填色, 单位: °C)

假相当位温的大小也可以表征能量的积聚情况,同时假相当位温随高度的变化可以反应大气层结的稳定程度,假相当位温随高度升高时,为对流稳定,随高度降低时对流不稳定[12]。对流或位势不稳定,是稳定气层整层抬升到凝结高度上而变为不稳定层结的现象。图 9(a)和图 9(b)显示了 4 日 21:00 焦作站 (35.23°N, 113.26°E)上空纬向和经向的剖面图。可以看到在 500 hPa 附近存在假相当位温密集区,而在 500 hPa 高度以下,从地面到 600 hPa 附近假相当位温是逐渐降低的,已经达到了 10℃,可见不稳定能量是很强大的,一旦有触发机制,则会伴随强对流天气的发生。图 9(c)和图 9(d)为 4 日 21:00 和 5 日 01:00 的  $\Delta\theta_{se600-850}$ ,可以看到河南省地区都在 0℃以下,负值越大,表明层结越不稳定,说明河南省上空已经是不稳定层结,有很强不稳定能量。豫西北地区的  $\Delta\theta_{se600-850}$  值已经达到了 -36℃,随后负值区向东北方向移动,逐渐移出河南。



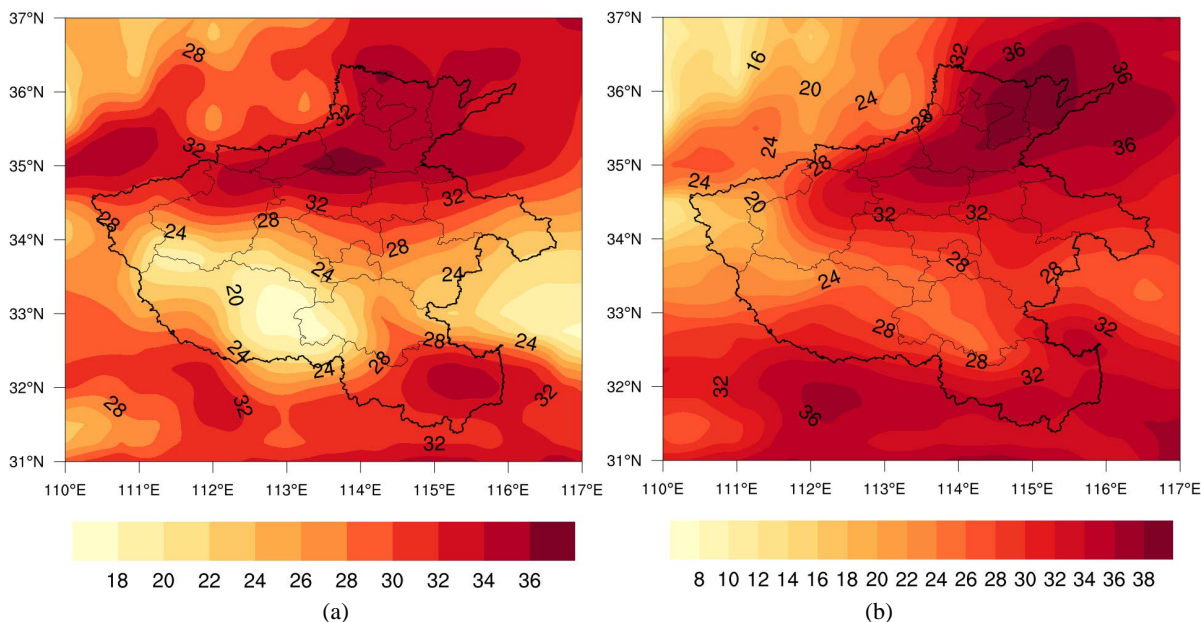
**Figure 9.** Zonal profile (a) and radial profile (b) of Potential pseudo-equivalent temperature in Jiaozuo station at 21:00 on July 4th 2020,  $\Delta\theta_{se600-850}$  at 21:00 (c) on July 4th 2020, 01:00 (d) on July 5th 2020 (color filling, unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

**图 9.** 2020 年 7 月 4 日 21:00 焦作站假相当位温纬向剖面图 (a)、经向剖面图 (b), 4 日 21:00 (c)、5 日 01:00 (d)  $\Delta\theta_{se600-850}$  (填色, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

### 3.5.2. K 指数

K 指数也被称为气团指数, 表征了大气中温度递减率、低层的水汽条件和饱和程度。K 指数越大, 表示大气越潮湿, 湿层的厚度也越大, 大气层结越不稳定, 可以反映出层结潜在能量。K 指数高值区不稳定层结有利于强降水天气的发生。K 指数也常用于雷暴天气的预报, K 值的大小也与雷暴的活动存在一定关系[26]。图 10 可以看出, 豫西北地区的 K 指数在  $30^{\circ}\text{C}$  以上, 高值区呈带状分布, 明显高于周围地区。21:00 (图 10(a))焦作市和新乡市的部分地区 K 指数已经达到了  $36^{\circ}\text{C}$  以上, 温湿度较大且大气层结不稳定, 利于强降水天气的发生。5 日 03:00 (图 10(b))高值中心逐渐向东北方向移动, 5 日 06:00 K 指数高值中心移出河南, 但其中心数值仍较大, 河南省境内 K 指数降低, 强降水过程结束。





**Figure 10.** K index at 21:00 (a) on July 4th 2020, 03:00 (b) on July 5th 2020 (color filling, unit: °C)

**图 10.** 2020 年 7 月 4 日 21:00 (a)、5 日 03:00 (b) K 指数(填色, 单位: °C)

### 3.6. 探空资料分析

K 指数表征中层大气的温湿程度, 在 3.5.2 中有具体分析, 这里不再赘述。整层比湿积分 IQ 表征地面到大气层顶整层大气的比湿积分, 其数值越大表明水汽越充足, 越有利于强降水天气过程的发生。抬升指数 LI 和沙氏指数 SI 的大小均可以判断大气的稳定程度。沙氏指数和抬升指数为负数时, 都可以表示大气层结是不稳定状态, 且负值越大, 大气层结越不稳定, 但是 SI 不能反映对流层底层的热力状况[27]。对流有效位能(CAPE)可以表征对流发展的情况, 其值越大, 表明对流发展旺盛, 大气不稳定程度增加。较大的对流抑制能量(CIN), 会阻碍上升运动, 表明大气处于相对稳定的状态。

**Table 1.** Sounding data in Zhengzhou station

**表 1.** 郑州站探空资料

	K/°C	IQ (g/kg)	LI/°C	SI/°C	CAPE (J·kg <sup>-1</sup> )	CIN (J·kg <sup>-1</sup> )
4 日 08:00	33	4438.9	-5.52	-0.83	1404.1	0.3
4 日 20:00	33.9	5070.1	-1.81	-3.64	3317	6.9
5 日 08:00	33.3	3624.1	0.6	2.44	41.4	96.2

由表 1, 4 日 08:00 整层比湿积分为 4438.9 g/kg, 抬升指数为-5.52°C, 沙氏指数为-0.83°C, 水汽充足, 大气层结不稳定。对流有效位能为 1404.1 J·kg<sup>-1</sup>, 对流抑制能量为 0.3 J·kg<sup>-1</sup>, 较高的 CAPE 和较低 CIN 表明上升运动强烈, 对流发展旺盛。而 4 日 20:00, 整层比湿积分达到 5070.1 J·kg<sup>-1</sup>, 抬升指数为-1.81°C, 沙氏指数为-3.64°C, CAPE 值已经达到 3317 J·kg<sup>-1</sup>, CIN 为 6.9 J·kg<sup>-1</sup>, 大气层结还是处于不稳定状态, 且相较于 08:00 不稳定程度加强, 对流发展达到最强。CAPE 值在暴雨前逐渐增加, 在降水过程中数值达到最大, 而后逐渐降低, CIN 值则表现为逐渐增大, 两个物理量的值在降水过程前后变化较为明显。5 日 08:00, 降水过程已经结束, 抬升指数和沙氏指数都已经变为正值, CAPE 已经降至 41.4 J·kg<sup>-1</sup>, CIN 为 96.2 J·kg<sup>-1</sup>, 大气状态已经趋于稳定, 不稳定能量已经得到释放, 降水过程结束。

## 4. 结果与讨论

### 4.1. 结论

1) 此次大暴雨过程的高纬地区“两槽一脊”的环流形势: 西槽位于巴尔克什湖一带, 槽后偏北气流引导冷空气经新疆向南输送冷空气; 上游青海地区气流呈反气旋式, 陕西南部短波槽发展, 豫西北地区位于槽前, 有正的相对涡度平流, 使局地涡度增大。北方南下的冷空气与暖湿空气交汇, 不稳定能量释放造成降水。

2) 暖湿水汽来自我国南海和孟加拉湾地区, 在华南沿海附近汇合, 暖湿水汽输送的过程中受到副高脊线以及小高压的影响, 利于其向暴雨区输送, 为此次降水过程提供了良好的水汽条件。上干下湿的垂直结构有利于对流性降水天气的发生, 低层水汽辐合, 垂直上升运动造成水汽凝结进而形成降水。水汽的输送以及积聚情况与实况对应关系比较好, 对于降水落区的预报具有一定的指示意义。

3) 豫西北地区降水过程中垂直上升运动较强; 高空辐散、低空辐合的高低空配置, 有利于垂直上升运动的发展加强; 500 hPa 豫西北地区位于槽前, 正涡度平流促使低层局地涡度增加, 低层暖湿水汽抬升, 为大暴雨的发生发展提供了动力条件。

4) 豫西北地区是假相当位温的高值区, 均在 80℃ 以下, 但相较于周围地区, 豫西北地区仍是高温高湿区。河南省以南是假相当位温的高值中心, 通过豫中地区向豫西北地区输送不稳定能量。地面到 600 hPa 的假相当位温垂直分布是逐渐递减的, 不稳定能量比较强。500 hPa 附近是假相当位温的密集区, 500 hPa 以上假相当位温递增, 大气层结稳定。K 指数的高值中心与实况对应关系较好, 豫西北地区温湿度高, 大气层结不稳定。降水前后, CAPE 值先增大而后减小, CIN 值逐渐增大, 两个物理量的值变化明显, 表征了不稳定能量的积聚和释放情况。

### 4.2. 不足与展望

1) 本论文只应用到了常规观测资料、气象站降水资料、ERA5 再分析资料以及探空资料。对豫西北地区的此次大暴雨过程并没有做过于深入的研究, 只从水汽、动力、不稳定条件等方面对此次过程进行了探讨, 后续可以使用卫星、雷达等资料对此次大暴雨过程进行更加深入地研究。

2) 在研究过程中, 忽略了地形作用对此次大暴雨过程的影响, 豫西北地区的地形复杂且独特, 本文只分析了一次降水过程, 在工作人员的预警预报过程中, 仍然需要结合以往的大暴雨天气过程的特点, 归纳总结出符合本地的方法以及相应的预报指标。

3) 在分析此次大暴雨天气过程中, 只对豫西北地区进行了分析, 没有从更大范围的角度对此次大暴雨进行较为全面的分析。且 ERA5 再分析资料的水汽通量散度以及涡度物理量与实况的对应关系较为一般。

## 参考文献

- [1] 汪小康, 廖移山. 2015 年 6 月 1 日江汉平原大暴雨过程诊断分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 184-190.
- [2] 钱鹏, 蒋薇, 孔启亮, 等. 一次持续大范围暴雨过程诊断分析[J]. 气象科学, 2012, 32(2): 188-193.
- [3] 孙仲毅, 李继华, 岳超. 河南省中北部一次区域性暴雨天气诊断分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16839-16842.
- [4] 黄楚惠, 顾清源, 李国平, 等. 一次高原低涡东移引发四川盆地暴雨的机制分析[J]. 高原气象, 2010, 29(04): 832-839.
- [5] 黄建和. 鄂托克前旗 2019 年 8 月 2-3 日暴雨成因诊断个例分析[J]. 科学技术创新, 2021(9): 25-26.
- [6] 王亚婷, 高万泉, 王志超, 等. 2018 年 8 月 5 日保定一次暴雨过程诊断分析[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(5): 65-67.

- [7] 张文军, 李健. 对甘肃酒泉一次暴雨的数值模拟和诊断分析[J]. 干旱气象, 2012, 30(1): 100-106.
- [8] 漆梁波, 徐珺. 豫北“7·9”特大暴雨的短期预报分析和反思[J]. 气象, 2018, 44(1): 1-14.
- [9] 喻谦花, 姜东东, 康暑雨. 河南省 2011 年 8 月 1-2 日暴雨过程水汽条件与垂直螺旋度分析[J]. 气象与环境科学, 2012, 35(2): 56-60.
- [10] 赵强, 王楠, 陈小婷, 等. “8·21”陕西中北部暴雨成因对比及预报偏差分析[J]. 干旱气象, 2020, 38(4): 559-568.
- [11] 文宝安. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽通量与水汽通量散度[J]. 气象, 1980(6): 34-36.
- [12] 胡淑兰, 李社宏, 武麦凤, 等. 陕西中北部一次大暴雨天气过程分析[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 287-293.
- [13] 李兴良, 陈德辉, 沈学顺. 不同垂直坐标系对垂直速度计算的影响[J]. 热带气象学报, 2005, 21(3): 265-276.
- [14] 杨帅, 高守亨. 三维散度方程及其对暴雨系统的诊断分析[J]. 大气科学, 2007, 31(1): 167-179.
- [15] 马月枝, 钟兴华, 宋培玲, 等. 2010 年 7 月 19 日新乡大暴雨天气分析[J]. 气象与环境科学, 2011, 34(1): 49-55.
- [16] Zhong, Z., Chen, X., Yang, X.-Q. and Ha, Y. and Sun, Y. (2019) The Relationship of Frequent Tropical Cyclone Activities over the Western North Pacific and Hot Summer Days in Central-Eastern China. *Theoretical and Applied Climatology*, **138**, 1395-1404. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.01.007>
- [17] 苟尚, 杨瑞鸿, 吴文辉, 等. 2013 年 7 月 21 日甘肃河东大暴雨过程分析[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(19): 147-150+159.
- [18] 甘璐, 邓长菊, 李津. 北京地区“7·21”特大暴雨不稳定能量诊断分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(4): 1-6.
- [19] Guo, C., Xiao, H., Yang, H. and Tang, Q. (2015) Observation and Modeling Analyses of the Macro- and Microphysical Characteristics of a Heavy Rain Storm in Beijing. *Atmospheric Research*, **156**, 125-141. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02908-7>
- [20] 张景, 周玉淑, 沈新勇, 等. 2016 年“7·19”京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析[J]. 大气科学, 2019, 43(4): 930-942.
- [21] 杨罗. “75·8”特大暴雨洪水情况及主要经验教训探讨[J]. 治淮, 2005(8): 13-14.
- [22] 司福意, 赵海清, 李社宗. 西风槽影响下豫西北两类强对流天气流型和物理量特征分析[J]. 气象与环境科学, 2018, 41(3): 57-63.
- [23] 郭艳君, 丁一汇. 1958-2005 年中国高空大气比湿变化[J]. 大气科学, 2014, 38(1): 1-12.
- [24] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000.
- [25] 靳莉君, 任伟, 周丹丹. 假相当位温在黄河“7·21”雨洪分析中的应用[J]. 人民黄河, 2013, 35(6): 25-26.
- [26] 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.
- [27] 康红勋. 信阳市对流性强降水的物理量特征分析[J]. 河南科技, 2020, 39(25): 149-151.