

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.05.001

郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析

任宏昌¹,张恒德^{1,2}

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 中国气象局-河海大学水文气象研究联合实验室,北京 100081)

摘要:为研究 2021 年 7 月 20 日郑州地区历史罕见暴雨洪涝灾害的精细化特征及其成因,基于实况观测和再分析资料,采用合成分析、距平分析等统计方法对此次暴雨过程进行了分析。结果表明:郑州“7·20”暴雨过程具有突发性极强、短时雨量极强、降水极端性突出的特征;200 hPa 存在异常偏强且稳定的高空槽及高空冷涡,使暴雨区上空高层具备强的辐散条件;偏强偏北的副热带高压、台风“烟花”和“查帕卡”向暴雨区持续输送了大量水汽;郑州上空回波发展旺盛,且有对流性回波不断汇聚,呈现明显的“列车效应”;在地形作用下,郑州具备比周边更强烈的低层辐合及上升运动条件,对降水量的增幅起到了重要作用;高、中、低空极为有利的环流配置、极强的水汽条件,以及地形的增幅作用共同导致了此次致洪暴雨过程。

关键词:极端暴雨;洪涝灾害;水汽输送;列车效应;地形影响;郑州“7·20”暴雨

中图分类号:P458 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)05-0001-09

Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou

REN Hongchang¹,ZHANG Hengde^{1,2}

(1. National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;
2. CMA-HHU Joint Laboratory for Hydrometeorological studies, Beijing 100081, China)

Abstract:The torrential rain on July 20, 2021 in Zhengzhou was one of the heaviest disasters in history. By using the observation and re-analysis data, the characteristics and main causes of the torrential rain are analyzed via statistical methods, such as the composite analysis and anomaly analysis. The results show that this torrential rain event was characterized by the extremely strong sudden, short-time and heavy rainfall, and prominent extreme. For the atmospheric pressure of 200 hPa, there are abnormally strong and stable high-altitude troughs and high-altitude cold vortices, which make the upper layers above the rainstorm area have a strong divergence condition. Moreover, the western Pacific subtropical high was significantly strong and shifted northward. Under the joint effect of the Typhoon “In-Fa” and “Cempaka”, the moisture transport and its convergence were extremely strong over Zhengzhou. The echoes over Zhengzhou are developing vigorously, and convective echoes are continuously converging, showing an obvious “train effect”. Additionally, the topography of the Fu-niu Mountain and the Tai-hang Mountain also contributed to the low-level convergence and ascending motion over Zhengzhou, and played an important role in the increase of precipitation. Therefore, the general circulation and extremely strong water vapor conditions in high, medium and low airs as well as the amplification of local topography were all beneficial to the development of the heavy rain, leading to the occurrence of extreme flood-causing torrential rain event in Zhengzhou on July 20, 2021.

Key words: extreme torrential rain; flood disasters; moisture transport; train effect; influence of topography; “7·20” rainstorm in Zhengzhou

我国地处东亚季风区,汛期始于夏季风的爆发,夏季风自南向北推进过程会经历两次北跳和三次停滞,分别对应华南前汛期、江淮梅雨以及华北东北雨季。8 月中旬以后,夏季风逐渐南撤,直至退出我国,汛期也逐渐结束。在夏季风充沛的水汽供应下,我国汛期暴雨频发,具有季节性强、暴雨强度和持续时间长等特征。

基金项目:中国气象局创新发展专项(CXFZ2021Z009);中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A16);国家重点研发计划(2018YFC1508102);国家自然科学基金(41775111,41875131)

作者简介:任宏昌(1987—),男,高级工程师,博士,主要从事灾害性天气机理和预报技术研究。E-mail:renhc@cma.gov.cn

通信作者:张恒德(1977—),男,研究员级高级工程师,博士,主要从事灾害性天气研究。E-mail:zhanghengde1977@163.com

引用本文:任宏昌,张恒德.郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9.

REN Hongchang,ZHANG Hengde. Refined features and main causes of “7·20” rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(5):1-9.

已有研究表明,持续性的暴雨事件是造成城市内涝、洪水以及泥石流等自然灾害的最主要因素^[1-5]。近年来,城市洪涝的防灾减灾问题日益受到广泛关注和高度重视,针对汛期洪涝灾害的风险评估和防控,以及城市适应环境变化和应对自然灾害能力等研究也成为重要的前沿问题^[6-10]。

我国暴雨的空间分布差异较大,总体由东南向西北依次递减。其中,西南地区、江汉、江淮、江南以及华南是暴雨多发地区^[11]。近几十年来,我国城市化进程迅速,城市自然水文条件发生了明显改变。城市区域下垫面不透水比例增加,雨水汇流的水力效率更高,在城市排水设施不畅的影响下,遇到短时强降水,更容易引起城市内涝,甚至人员伤亡^[12]。此外,在全球变暖背景下,大城市的热岛效应、雨岛效应更加明显,降水也越来越向城区集中,许多大城市的观测站均出现了突破历史极值的暴雨事件^[13]。出现在大城市的致洪暴雨造成的灾害往往更严重,如2016年7月,我国南方大部地区遭遇特大暴雨洪涝事件,武汉遭受了损失最为严重的单次灾害^[14-15],南京主要河湖水位均超历史记录^[16-17],给流域居民生命财产等造成巨大的损失。

2021年7月17—22日,河南中部和北部发生特大致洪暴雨,其中19日14时至21日8时是强降水最集中的时段,郑州、许昌、洛阳、平顶山地区出现特大暴雨,21—22日强降水中心移到河南北部。此次极端暴雨天气过程具有持续时间长、累计雨量大、降水强度极端性强等特征,导致了极为严重的洪涝灾害。其中郑州出现了历史罕见的特大暴雨(郑州“7·20”暴雨),单日降水量和小时降水量均显著超过当地有记录以来的极值,给这座城区人口规模达到670余万人的现代特大城市带来极大损失,轨道、公路、电力及通讯等设施一度遭到中断,这场洪涝灾害也严重影响了南北铁路干线的正常运营。值得注意的是,此次造成严重城市洪涝灾害的暴雨,其高空环流特征与典型的黄淮暴雨形势^[18]有着显著差异,且没有明显的中层切变和地面气旋配合。因此,本文侧重于分析郑州“7·20”暴雨降水过程的极端性、大尺度环流特征以及地形对暴雨位置和强度的影响,以期能为极端降水事件、城市暴雨洪涝灾害的预报提供参考。

1 研究资料与方法

1.1 研究资料

本文采用的地面降水观测资料来自国家气象信息中心整编的2479个国家气象站观测资料,时间自1951年1月至2021年7月,包括逐日降水量(北京时间8时至次日8时)、逐小时降水量、逐分钟降水量等资料。上述资料均经过国家气象信息中心的质量控制和极值检验。雷达拼图数据来源于全国天气雷达台站上传的PUP产品数据,拼图水平分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$,时间分辨率为6 min。采用欧洲中期天气预报中心发布的第5代全球气候再分析资料数据集(the fifth global reanalysis, ERA-5)分析此次特大致洪暴雨的环流形式。该数据采用实时更新方式,提供1950年至今的高分辨率全球大气再分析数据,以全球网格形式发布,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为1 h。ERA-5再分析数据集的垂直方向上从1000 hPa到1 hPa,共37层。本文采用的主要物理量包括格点位势高度场、水平风场、散度场、比湿、垂直速度场、地表气压等。

1.2 研究方法

合成分析时,逐日再分析数据物理量场与降水量的合成存在一定差异。再分析物理量场的日值数据采用当日逐24 h数据平均值,包括位势高度场、水平风场、散度场、比湿、垂直速度场等,将北京时间7月20日8时至7月21日8时,作为7月20日数据,以此类推。在分析暴雨过程时,物理量场分析采用此次暴雨过程期间(2021年7月17—22日)逐日数据的平均值。此外,对于降水数据的合成则采用累加的方式,如7月20日16—17时降水量采用16时0分至16时59分的逐分钟降水量的累加值,7月20日降水量采用7月20日8时至7月21日8时期间逐小时降水量的累加值,暴雨过程降水量则采用暴雨过程期间(2021年7月17—22日)逐日降水量的累加值。

距平能够反映数据偏离平均值的状况。由于气象要素分布不均匀,年内不同时期差异巨大。因此在进行距平分析时,采用某时次的变量与该变量历史同期气候平均值 $\bar{x}$ (即气候态)之间的差作为该变量的距平。本文进行距平分析、标准化异常等计算时,气候态均采用1991—2020年的30 a平均数据,并选取与所分析的物理量相同的日期(月,日)。

标准化异常可有效比较不同变量的异常程度,可以更好地表示暴雨过程及环境条件的极端性,标准化异常度的表达式为

$$D = (F - \bar{x}) / \sigma \quad (1)$$

其中

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

式中: D 为标准化异常度; F 为所分析的特定时刻的变量 x (如 7 月 20 日的 500 hPa 位势高度) 的值; σ 为变量场 30 a (1991—2020 年) 的气候标准差。

D 表示变量场的异常是气候标准差的多少倍。文中以水汽通量及其散度来分析暴雨产生的水汽条件及来源,采用下式计算整层垂直积分的水汽通量矢量:

$$\boldsymbol{Q} = Q_{\lambda} \boldsymbol{i} + Q_{\varphi} \boldsymbol{j} \tag{2}$$

其中

$$Q_{\lambda} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q u d p \qquad Q_{\varphi} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q v d p$$

式中: g 为重力加速度; Q_{λ} 、 Q_{φ} 分别为水汽通量矢量 $\boldsymbol{Q}$ 在纬向和经向的水汽输送通量; p_s 为地表气压,用于消除地形的影响; u 、 v 为风矢量的纬向和经向分量; q 为比湿。

由于大气中的水汽主要集中于对流层低层,因此本文水汽通量的整层积分指从地表到 300 hPa 的垂直积分。

2 “7·20”暴雨特征分析

2.1 暴雨过程时空分布特征

郑州地跨黄河、淮河两大流域,是中国洪水灾害危险程度较重区域^[19]。研究^[20-21]表明,近年来郑州地区年最大降水量呈增加趋势,暴雨频率与暴雨雨强也呈现逐年上升趋势,暴雨历时则呈现逐年下降趋势,表明郑州地区暴雨的极端性逐渐增强。2021 年 7 月 17—22 日,河南省出现历史罕见的极端强降水事件,中部和北部地区出现暴雨或大暴雨。“7·20”暴雨降水过程持续时间长、累计雨量大。强降水中心主要位于郑州、新乡、鹤壁和安阳,有 6 个观测站累计降水量超过 700 mm (图 1(a))。此次降水过程的最强降水时段在 19—21 日。其中,7 月 20 日,位于暴雨中心的郑州市国家级气象观测站日降水量达到 624.1 mm,接近郑州全年降水量,超过郑州站原日降水最大值的 3 倍。郑州气象观测站最大小时降水量达 201.9 mm (图 1(b)),20 日 16—17 时),突破中国大陆小时降水量历史极值(198.5 mm,河南林庄,1975 年 8 月 5 日)。受本次强降水的影响,郑州地区出现严重的城市内涝、一些河流出现超警戒水位,个别水库溃坝,部分铁路停运、航班取消,造成重大人员伤亡和财产损失。

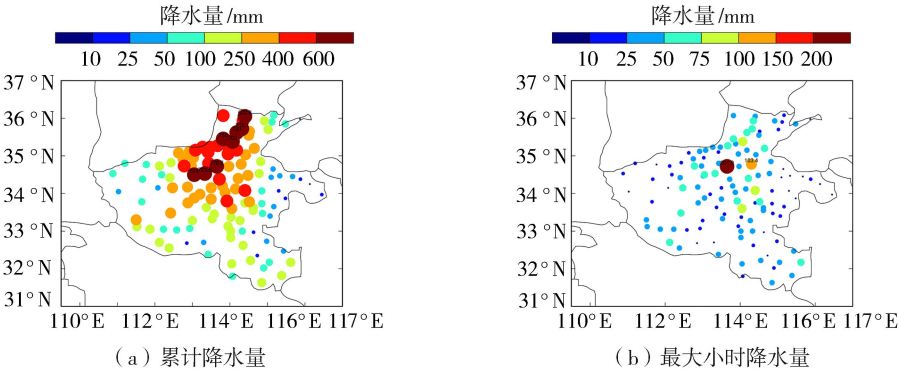


图 1 2021 年 7 月 17—22 日过程累计降水量和最大小时降水量

Fig. 1 Process cumulative precipitation and maximum hourly precipitation from 17 to 22 July, 2021

2.2 暴雨的极端性

此次暴雨过程的另一特征表现为突发性极强、短时雨量极强、降水极端性突出。河南全省有 7 个国家级气象站 1 h 降水量突破建站以来小时降水量极值。过程降水落区集中在太行山东南侧和伏牛山东北侧 (图 1(a)),而通过分析过程累计降水量超过 600 mm 观测站的 1 h 降水量时间序列 (图 2) 发现,河南中部伏牛山东北侧的强降水与河南北部太行山东南侧的强降水出现的时间不一致。河南北部的强降水主要集中于 7 月 21—22 日,最大小时降水量为 50 ~ 80 mm,且降水呈双峰或多峰形分布,短时强降水过程存在一定的间歇期。而河南中部降水时段为 7 月 19—20 日,强降水主要集中在郑州周边。郑州站的小时降水分布呈现显著的单

峰形分布,强降水时段极为集中,短时雨量极强。7月20日16—17时,郑州站1h降水量达到201.9mm,突破我国大陆国家级气象观测站有记录以来的小时降雨量历史极值。相较而言,此前郑州站的日降水量(24h)最大值也仅为184.1mm。此外,此次降水过程中郑州站小时雨强的极大值呈现显著的局地性,其相邻国家级观测站最大小时雨强为50~75mm,与郑州站的小时降水量存在显著差距。

从分钟降水情况看,7月20日清晨、上午以及午后,郑州已经间歇性出现中等强度降水,分钟降水量达到1mm以上,但持续时间较短,为10~15min。15时30分起,郑州地区降水量开始迅速增加,分钟降水量可达到3mm以上。16时起,分钟降水量始终维持在3mm以上,其中降水量极大值出现在16时38分,分钟降水量达到4.7mm。对于我国而言,3~4mm的降水量已经属于异常偏强的极端降水,持续时间也往往较短。而郑州最大分钟降水量可达4.7mm,且持续时间极长。如此高强度的降水得以维持如此长时间,是历史罕见的。

分析表明,无论是日降水、小时降水还是分钟降水量,此次暴雨过程均具有很强的极端性,尤其郑州暴雨突发性强、短时雨量极大,具有明显局地性特征。因此,本文将重点分析7月20日郑州极端致洪暴雨的中尺度特征及主要成因。

2.3 暴雨过程的中尺度对流特征

从20日白天起,受低涡影响,郑州地区及其东南部上空已经出现团状对流云团,并在向西北方向移动的过程中逐渐组织化,形成中尺度对流系统。此时郑州及其周边地区呈现强回波特征,最强回波强度达到45dBZ,降水强度开始逐渐增强。自20日12时起,郑州地区维持强回波特征的同时,在其西南方向的南阳、平顶山一带不断有新的对流单体触发,逐渐发展加强,并沿伏牛山脉向其东北方向的郑州移动。郑州上空雷达组合反射率逐渐增强,中心强度达到50dBZ以上,降水主要集中在郑州南部及其周边地区。20日15时起(图3(a)),郑州南部的驻马店、漯河一带亦开始有对流单体新生,并不断向北发展。而南阳一带的对流云团则向东北方向移动,与漯河、驻马店方向移来的对流云团合并后向郑州地区移动,伴随着降水强度逐渐增强。16—17时,合并后的

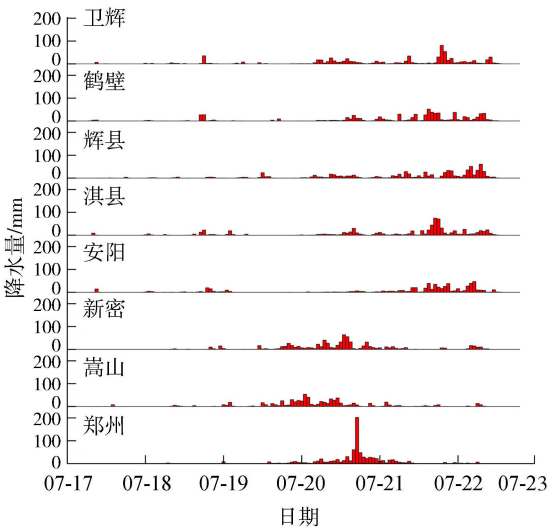


图2 2021年7月17—22日过程降水量大于600mm的国家级观测站逐小时降水量

Fig.2 Hourly precipitation at national observation stations with total precipitation greater than 600mm from 17 to 22 July, 2021

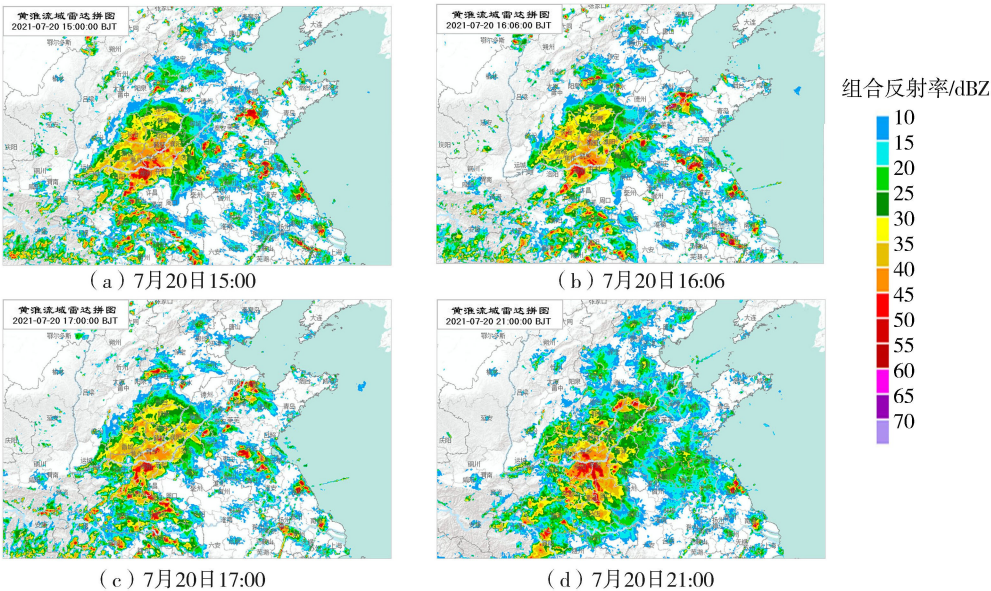


图3 7月20日黄淮流域大于或等于10dBZ雷达组合反射率因子拼图

Fig.3 Combined pictures of radar composite reflectivity factor for Huanghuai Basin on July 20th

对流云团发展进一步加强,其南部生成的对流系统不断沿山脉向河南中部移动,使得强降水核心区始终停留在郑州地区。强雷达回波(45~55 dBZ)在郑州地区上空维持长达 1 h,最高达到 55 dBZ 以上(图 3(b)(c))。长时间、强回波的对流系统也为当地带来了极强的降水,小时降水量高达 201.9 mm。在强盛的偏东、偏南暖湿气流影响下,对流系统不断触发新生,并沿山脉向郑州地区汇集。与此同时,新的对流单体在旧的单体后方不断生成,整个对流系统不断向北移动发展,呈现明显的列车效应。

20 日夜间起,郑州南部的驻马店、漯河一带新生的对流系统移动方向逐渐偏北,向开封方向移动。而平顶山一带的对流则逐渐减弱,不再向郑州地区补充新的对流系统。郑州地区对流结构亦逐渐松散,降水强度逐渐减弱(图 3(d))。

3 “7·20”暴雨成因分析

3.1 环流背景和主要影响系统

此次致洪暴雨过程中,高、中、低纬度的多尺度系统(包括副热带高压、大陆高压、低涡、台风、低空急流)的互相配合,为暴雨提供了非常有利的环流背景。从 7 月 20 日 200 hPa 位势高度场可以发现(图 4(a)),南亚高压呈现明显的偏强、东伸。在河套地区附近存在一个异常偏强、偏深的高空槽,河南北部呈现弱的高压脊。而在东部的黄海地区,19 日起一直存在一个高空冷涡,日本海则存在异常偏强的阻塞高压脊。通常情况下,200 hPa 位势高度场气流相对平直。然而此次降水过程呈现了少见的高空波列,且在强降水发生发展期间位相稳定少动。河南地区位于异常偏强的高空槽前,高空气流呈强辐散,其 200 hPa 散度的异常值超过气候平均标准差的 4 倍以上,为底层对流系统的发展提供了有利条件。对于 500 hPa 而言,此次降水过程前期,副热带高压异常偏强偏北,其脊线在 7 月 15 日突然北跳,并稳定维持在 37°N 以北,较常年平均偏北约 13 个纬距。7 月 20 日 500 hPa 高空图显示(图 4(b)),河南地区东北部为显著偏强的西太平洋副热带高压,在其南侧建立了偏东风水汽输送通道。值得注意的是,副热带高压的异常偏强偏北程度达到气候平均标准差的 2 倍以上。河南西北部则为异常偏强的大陆高压,在河南西部存在一个尺度较小的涡旋。与此同时,位

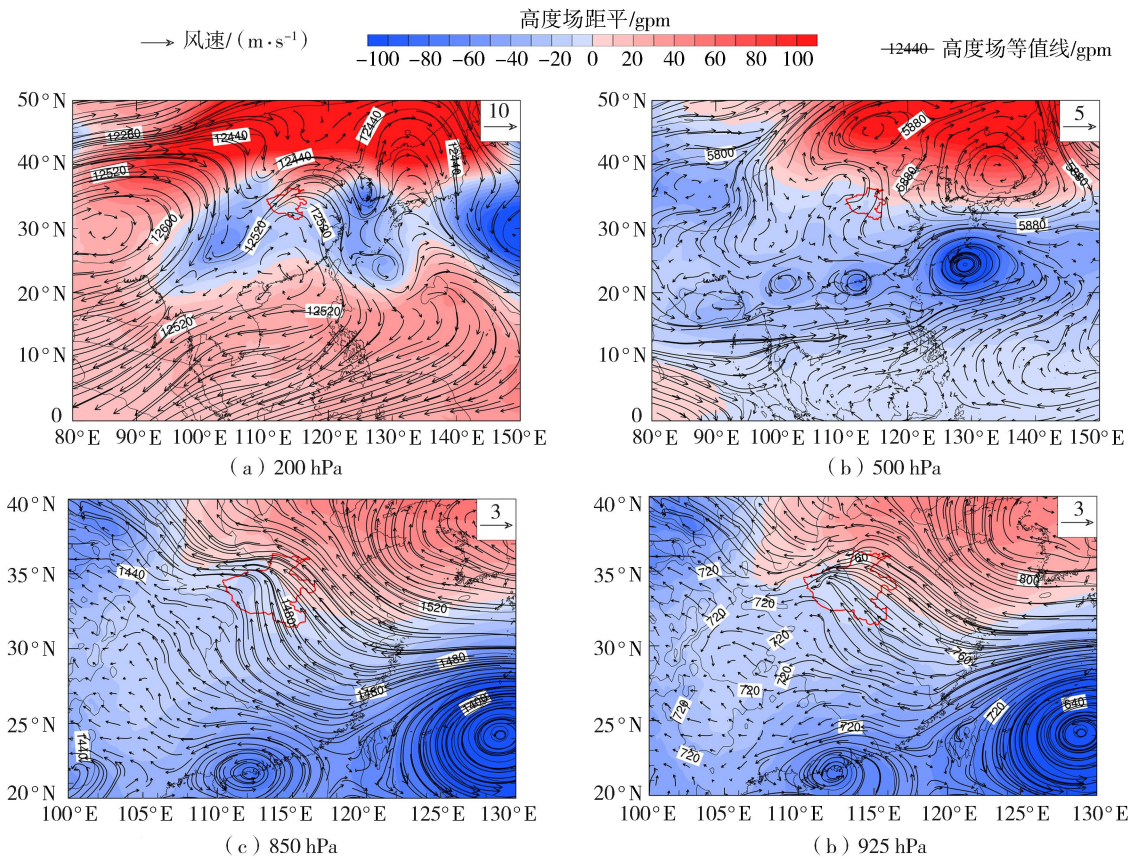


图 4 7 月 20 日不同位势高度的风场及高度场距平

Fig. 4 Wind field and height field anomalies at different geopotential heights on July 20th, 2021

于西北太平洋的2021年6号台风“烟花”则在不断北移加强,并于20日加强为台风级,其北部的偏东风气流同样得到加强,河南位于异常偏北偏强的副热带高压以及西北太平洋台风“烟花”之间,两者叠加的强气压梯度使得偏东风气流显著加强,为此次强降水过程提供了充沛的水汽来源。此外,位于我国南海的2021年7号台风“查帕卡”也于7月19日夜间接加强至台风级,并不断向北移动。低层的850 hPa上(图4(c)),河南西部开始出现明显的气旋性切变。值得注意的是,925 hPa的环流特征图上(图4(d)),河南中部存在3支气流向郑州地区汇集,分别为南部的东南气流、东部的偏东风气流、河南北部经太行山脉阻挡后转向南的偏东北风气流。3支携带大量水汽的气流汇集在郑州地区,是此次特大致洪暴雨过程发生的重要原因。

3.2 水汽条件

水汽对于极端强降水的发生起着至关重要的作用。造成城市洪涝的暴雨过程中,总可以观测到强水汽输送通道的存在。在有利的环流配置下,充沛的水汽沿通道被源源不断地输送到暴雨区,并在该地区辐合,使得暴雨降水强度大、持续时间长,导致城市洪涝的发生^[1,22]。从整层积分的水汽通量图(图5)可以看到,此次致洪暴雨过程有2条明显的水汽通道:来自西北太平洋一直延伸到河南地区的偏东水汽、从我国南海自南向北延伸到河南地区的偏南水汽。由于副热带高压偏强偏北,其南缘的偏东气流与台风“烟花”北侧的偏东气流相叠加,建立了一条非常强的自东向西水汽输送通道,将西北太平洋的水汽源源不断地输送到河南地区。此外,我国南海台风“查帕卡”加强至台风级,并不断向北逼近我国广东。在“查帕卡”和强而深厚的西南季风的共同作用下,一条自南向北的水汽通道亦建立起来,将南方的水汽持续向北输送至河南地区。2条水汽通道在河南地区辐合,使得河南中东部地区的水汽通量平均可达600 kg/(m·s)以上,偏离气候态超过3个标准差。作为对比,同期该地区水汽输送的气候态则仅为300 kg/(m·s)左右,表明在多个大尺度系统的共同影响下,郑州地区的水汽输送异常强盛,具备了极为有利的暴雨发生条件。

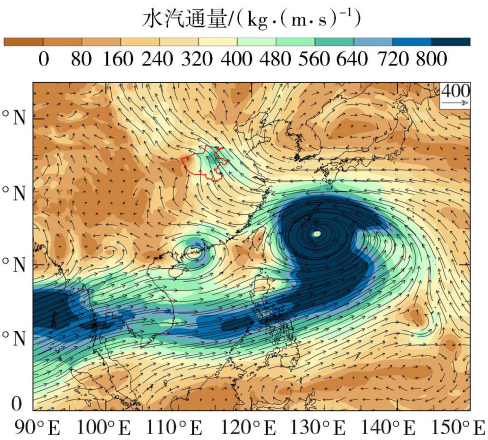


图5 7月20日水汽通量
Fig.5 Moisture flux on July 20th, 2021

从水汽通量及其散度的时间演变(图6)可以更清晰地看出,7月17—18日,已经有来自西北太平洋和

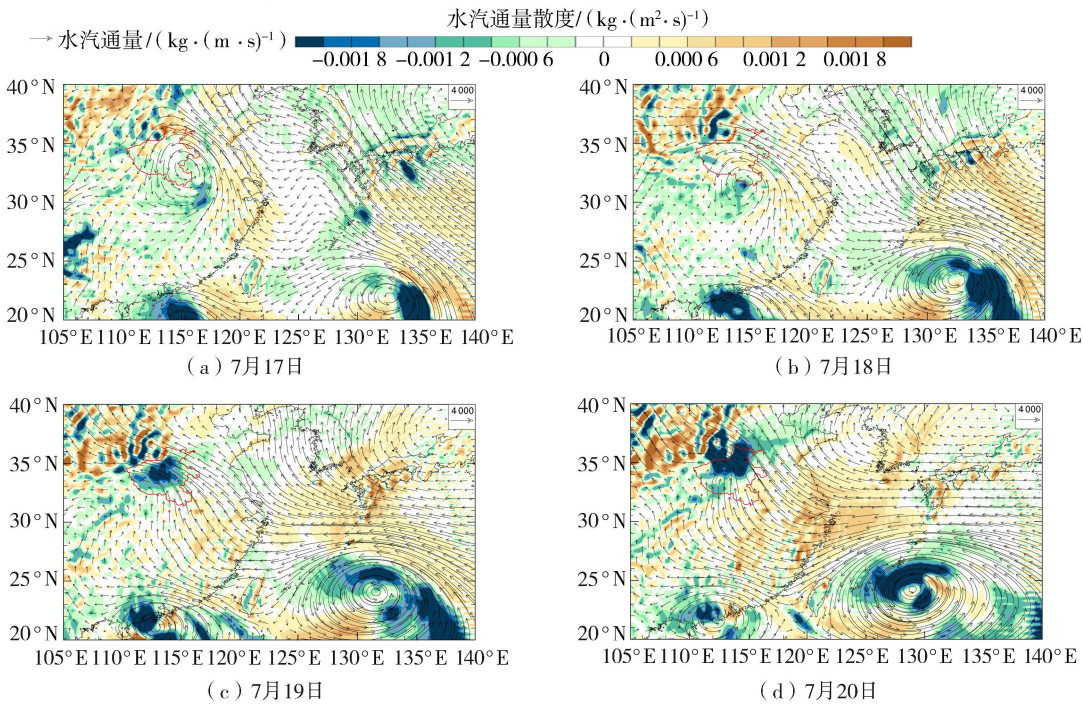


图6 7月17—20日水汽通量及其散度
Fig.6 Moisture flux and its divergence from 17 to 20 July, 2021

南海的水汽向河南东部输送。但由于台风“烟花”与“查帕卡”位置均偏南,水汽在河南东部呈自南向北输送,水汽通道并未完全建立,且不利于地形抬升。7 月 19—20 日,随着台风“烟花”与“查帕卡”的不断加强并北移,来自西太平洋和南海的水汽输送显著增强,建立起 2 条清晰的水汽通道,并在河南中部和北部形成强烈的水汽辐合,19 日起,郑州地区的水汽通量散度异常超过 3 个标准差,而 20 日更是达到 5 个标准差以上,水汽通量散度的极端性比水汽通量本身更强。此外,从环流形势上看,19—20 日台风“烟花”有着明显的西移,而“查帕卡”亦有向北的移动,在增强水汽输送的同时,也有利于对流系统长时间维持在同一地区。郑州地区长时间、高强度的水汽辐合,是此次强降水过程持续时间长、降水强度大的重要原因。

3.3 地形对致洪暴雨的增幅作用

 综上,大尺度环流背景非常有利于强降水的发生、发展,并且暴雨区具备极为充沛的水汽。然而,郑州地区的短时强降水呈现明显的局地性,小时降水量显著高于周边地区,这与地形的增幅作用有着密切关联。郑州地区地形地貌比较复杂,横跨我国第二级和第三级地貌台阶,由中山、低山、丘陵过渡到平原,山区丘陵与平原分界明显^[23]。已有研究表明,太行山脉等地形,对华北暴雨强度及中心位置有着显著的影响,且对垂直运动和水汽辐合有明显增幅作用^[24-25]。7 月 20 日强降水长时间维持在郑州城区上空,与郑州周边伏牛山脉、嵩山山脉、太行山山脉的叠加影响有着密切的关联。如图 7 所示,郑州地区位于伏牛山、嵩山的东北方向,太行山脉以南。河南东部存在一支强的偏东风急流,使得水汽向郑州地区不断汇集,最远到达郑州西部的嵩山山脉。而这支偏东风急流的北部在遇到太行山脉时,受地形的阻挡而向南偏转,仍然汇向郑州地区。与此同时,郑州南部也存在一支沿伏牛山脉北上偏南风气流。郑州地区南部、东部、北部均有显著的低空气流流入,而西部为山脉所阻挡,为暴雨区的上升运动、水汽辐合提供了非常有利的条件。

 由图 8(图中灰色为地形高度)可知,在暴雨区东侧,对流层中低层有着深厚的东风急流,垂直上升运动主要集中在 111°E~115°E 之间,山脉迎风坡上空对流层整层均维持强上升运动。并且,其东侧的平原地区也维持非常强的上升运动,一直延伸到约 115°E,郑州地区(113.39°E)处于上升运动最强烈的区域附近。从水平风场来看,郑州地区上空 850 hPa 以下呈现非常强的水平风场辐合,而在稳定的环流配置下,850 hPa 以上呈现强的水平辐散,为暴雨的发展提供了非常有利的条件。暴雨区南侧,925 hPa 以上直至对流层顶,均呈现持续稳定的偏南风。偏南风气流经过郑州南部迎风坡一定程度的地形抬升后(31°N 附近),南风分量和上升运动迅速加强。在接近暴雨区后,上升运动发展更为强烈,郑州(34.42°N)和嵩山山脉上空呈现强的上升运动 and 低层辐合。此外,高空 700 hPa 以上同样具备较好的辐散条件。在偏南气流到达更北部的太行山时,上升运动再次得到加强,出现另一个中低层的水平辐合中心。

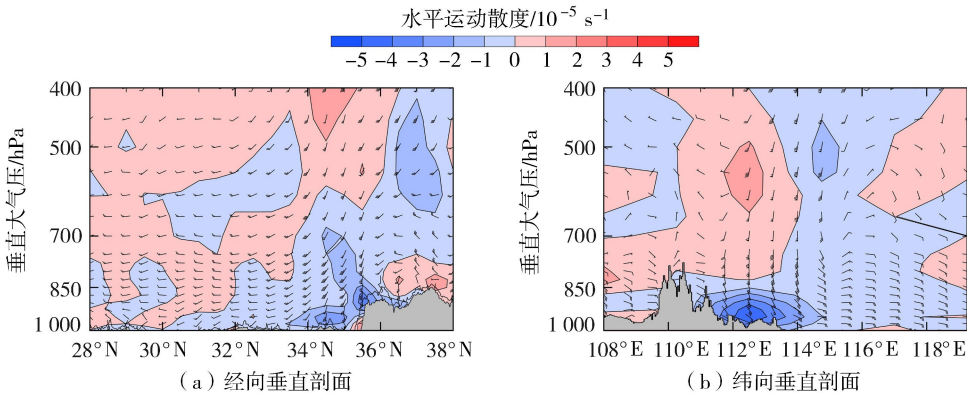


图 8 7 月 20 日郑州地区水平和垂直运动及水平运动散度

Fig. 8 Horizontal and vertical movements, and horizontal divergence of wind field in Zhengzhou area on July 20th, 2021

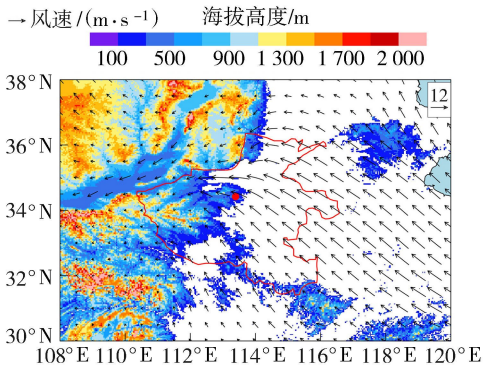


图 7 河南地区地形高度 150 m 以上区域及 7 月 20 日 925 hPa 高度风场
Fig. 7 Topography near Henan Province and wind field at 925 hPa on July 20th, 2021

综上所述,在稳定的环流形势下,携带大量水汽的偏东气流和偏南气流在河南中部交汇。暴雨的上升运动通常是中尺度的,而此次过程中,暴雨区附近较大范围地区出现强的上升运动,其中郑州地区北部、西部和南部地形起到了重要的阻挡和抬升作用,使得郑州处于上升运动和低层辐合最强烈的区域。低空 850 ~ 700 hPa 的垂直速度极端性显著,最大可偏离气候态 8 个标准差以上,表明动力抬升条件的极端性较水汽条件更加显著。在高层异常强的辐散条件配合下,最强暴雨出现在了这一区域,表明郑州地区北部、西部和南部的地形对于极端强降水的增幅起到了关键作用。

4 结 论

a. 郑州“7·20”暴雨过程,高层环流系统稳定少动,暴雨区位于高空槽前,上空呈强辐散,为低层的辐合上升提供了有利条件。中层副热带高压和台风“烟花”之间强的气压梯度增强了位于两者之间的偏东气流,与南海台风“查帕卡”和西南季风之间的偏南气流同时汇入郑州地区。在上述环流背景下,郑州上空回波发展旺盛,且有来自西南、东南方向的对流性回波不断向暴雨区汇聚而来,呈现明显的“列车效应”,使得强降水长时间维持在郑州上空。

b. 郑州“7·20”暴雨的直接原因之一是极端的水汽条件。在副热带高压、台风“烟花”以及台风“查帕卡”的共同作用下,暴雨区的整层水汽通量远超气候平均值,异常程度达 3 个标准差以上。而暴雨区的水汽通量散度异常程度更为显著,水汽辐合异常达到 5 个标准差以上,使得暴雨区具备极为充沛的水汽条件。

c. 地形对郑州“7·20”暴雨起到了重要增幅作用。在伏牛山、嵩山、太行山等地形的阻挡和抬升作用下,暴雨区具备强烈的低层水平风场的辐合和上升运动条件。郑州周边地形对暴雨位置的稳定维持,以及降水量的增幅起到了重要作用。

本文对郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因进行了分析。然而,仍需针对致洪暴雨的中尺度涡旋发生发展机制、短时强降水发生的云物理机制等进行深入研究。此外,复杂地形下对流系统是如何触发和发展的、不同地形高度对于降水增幅的物理机制和增幅程度等问题,也尚需进一步探索。

参考文献:

[1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社,1980.

[2] 王家祁. 中国暴雨[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

[3] 郝晓丽,穆杰,喻海军,等. 城市洪涝试验研究进展[J]. 水利水电科技进展,2021,41(1):80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021,41(1):80-86. (in Chinese))

[4] 丁一汇. 中国暴雨理论发展的历程与重要进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(5):395-406. (DING Yihui. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China[J]. Torrential Rain and Disasters, 2019,38(5):395-406. (in Chinese))

[5] 王磊之,胡庆芳,王银堂,等. 太湖流域 2016 年、1991 年大洪水对比分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(6):471-478. (WANG Leizhi, HU Qingfang, WANG Yintang, et al. Comparison of the two flood events occurred in 2016 and 1991 in the Taihu Lake Basin[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2018,46(6):471-478. (in Chinese))

[6] 李致家,朱跃龙,刘志雨,等. 中小河流洪水防控与应急管理关键技术的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):13-18. (LI Zhijia, ZHU Yuelong, LIU Zhiyu, et al. Thoughts on key technologies of flood prevention and emergency management in small and medium-sized rivers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(1):13-18. (in Chinese))

[7] 包红军,曹勇,曹爽,等. 基于短时临近降水集合预报的中小河流洪水预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):197-203. (BAO Hongjun, CAO Yong, CAO Shuang, et al. Flood forecasting of small and medium-sized rivers based on short-term nowcasting and ensemble precipitation forecasts[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2021,49(3):197-203. (in Chinese))

[8] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-17. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster[J]. Water Resources Protection, 2020,36(6):1-17. (in Chinese))

[9] 翟慧敏,程启先,李书覃,等. 海绵城市理念演变的知识图谱可视化分析[J]. 水资源保护,2020,36(2):34-40. (ZHAI

Huimin, CHENG Qixian, LI Shuqin, et al. Visual analysis of knowledge map of sponge city concept evolution [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 34-40. (in Chinese))

[10] 高玉琴, 陈佳慧, 王冬冬, 等. 海绵城市低影响开发措施综合效益评价体系及应用[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 13-19. (GAO Yuqin, CHEN Jiahui, WANG Dongdong, et al. Comprehensive benefits evaluation system and application of low impact development measures in sponge city[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 13-19. (in Chinese))

[11] 孔锋, 刘凡, 吕丽莉, 等. 1961~2010年中国大尺度区域暴雨时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 10. (KONG Feng, LIU Fan, LYU Lili, et al. Research on spatiotemporal pattern of large-scale regional heavy rainfall in China from 1961 to 2010[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(4): 10. (in Chinese))

[12] 张炜, 李思敏, 时真男. 我国城市暴雨内涝的成因及其应对策略[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(5): 5. (ZHANG Wei, LI Simin, SHI Zhennan. Formation causes and coping strategies of urban rainstorm water logging in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(5): 5. (in Chinese))

[13] 严昇. 我国大型城市暴雨特性及雨岛效应演变规律[D]. 上海: 东华大学, 2015.

[14] 张正涛, 李宁, 冯介玲, 等. 从重建资金与效率角度定量评估灾后经济恢复力的变化: 以武汉市“2016.07.06”暴雨洪涝灾害为例[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 211-216. (ZHANG Zhengtao, LI Ning, FENG Jieling, et al. Quantitative assessment of changes in post-disaster resilience from the perspective of rescue funds and rescue efficiency: a case study of a flood disaster in Wuhan City on July 6, 2016 [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 211-216. (in Chinese))

[15] 张正涛, 崔鹏, 李宁, 等. 武汉市“2016.07.06”暴雨洪涝灾害跨区域经济波及效应评估研究[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(4): 433-441. (ZHANG Zhengtao, CUI Peng, LI Ning, et al. Research on the assessment of the multi-regional economic ripple effect caused by disasters-a case study of a flood disaster in Wuhan City on July 6, 2016[J]. Climate Change Research, 2020, 16(4): 433-441. (in Chinese))

[16] 吴玉明, 杨红卫. 南京市2016年暴雨洪水分析与思考[J]. 江苏水利, 2016(12): 4. (WU Yuming, YANG Hongwei. Analysis and thoughts of storm and flood in 2016 in Nanjing[J]. Jiangsu Water Resources, 2016(12): 4. (in Chinese))

[17] 傅靖, 王义坤. 南京市“2016·7”特大暴雨水雨情分析[J]. 江苏水利, 2016(11): 39-41. (FU Jing, WANG Yikun. Analysis of water and rain information on “July 2016” torrential rain in Nanjing [J]. Jiangsu Water Resources, 2016(11): 39-41. (in Chinese))

[18] 张一平, 孙景兰, 牛淑贞, 等. 河南区域暴雨的若干雷达回波特征[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(3): 25-36. (ZHANG Yiping, SUN Jinglan, NIU Shuzhen, et al. Severe doppler radar echo features of regional rainstorm in Henan Province [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2015, 38(3): 25-36. (in Chinese))

[19] 刘建芬, 张行南, 唐增文. 中国洪水灾害危险程度空间分布研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 614-617. (LIU Jianfen, ZHANG Hangnan, TANG Zengwen. Spatial distribution of flood hazards in China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(6): 614-617. (in Chinese))

[20] 荣艳淑, 王文, 王鹏, 等. 淮河流域极端降水特征及不同重现期降水量估计[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 1-8. (RONG Yanshu, WANG Wen, WANG Peng, et al. Analysis of characteristics of extreme rainfall and estimate of rainfall during return periods in Huaihe Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 1-8. (in Chinese))

[21] 邓鹏, 李致家, 郭元, 等. 淮河上游地区降雨径流分析及模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(5): 377-381. (DENG Peng, LI Zhijia, GUO Yuan, et al. Rainfall-runoff analysis and simulation for upstream area of Huaihe River [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014, 42(5): 377-381. (in Chinese))

[22] 葛朝霞, 曹丽青. 2003年夏季江淮特大暴雨成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 11-13. (GE Zhaoxia, CAO Liqing. Causes of heavy rains in the Yangtze River-Huaihe River region in the summer of 2003 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2005, 33(1): 11-13. (in Chinese))

[23] 曹丽琴. 郑州市水文特性分析[J]. 河南水利, 2006(8): 29-30. (CAO Liqin. Analysis on hydrological characteristics of Zhengzhou [J]. Henan Water Resources, 2006(8): 29-30. (in Chinese))

[24] 徐国强, 胡欣, 苏华, 等. 太行山地形对“96.8”暴雨影响的数值试验研究[J]. 气象, 1999, 25(7): 3-7. (XU Guoqiang, HU Xin, SU Hua, et al. Simulation study of Taihang Mountain terrain effects on heavy rain in August 1996 [J]. Meteorological Monthly, 1999, 25(7): 3-7. (in Chinese))

[25] 王丛梅, 俞小鼎, 李芷霞, 等. 太行山地形影响下的极端短时强降水分析[J]. 气象, 2017(4): 425-433. (WANG Congmei, YU Xiaoding, LI Zhixia, et al. Investigation of Extreme Flash-Rain Events on the Impact of Taihang Mountain [J]. Meteorological Monthly, 2017(4): 425-433. (in Chinese))