

汪小康,崔春光,王婧羽,等,2022.“21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J].气象,48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):533-544(in Chinese).

“21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析^{*}

汪小康 崔春光 王婧羽 杨浩 周文

中国气象局武汉暴雨研究所 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

提 要: 2021 年 7 月中下旬在河南省发生了一场极端强降水过程, 暴雨持续时间长, 累计降水量大, 落区集中, 造成了严重的人员伤亡。基于自动站雨量数据和 ERA5 再分析数据探讨了多尺度系统、急流和地形对水汽的输送和辐合及降水形成的重要作用 and 影响机制。结果发现: 暴雨发生在远距离台风影响的有利环流背景之下, 大量来自西太平洋的水汽从边界层和对流层低层进入河南东侧, 来自南海的水汽从南侧对流层中低层进入降水区, 在低涡、切变线和辐合线的共同作用下, 引发强降水。低空急流与边界层急流的耦合形成低层水汽辐合上升中心, 地形起到了动力阻挡抬升和热力抬升作用, 并与急流综合作用, 使强降水呈带状出现在山前, 且 20 日位于豫中, 21 日在豫北。

关键词: 河南特大暴雨, 水汽输送和辐合, 低空急流耦合, 地形作用

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.122902

Diagnostic Analysis on Water Vapor and Jet Characteristics of the July 2021 Severe Torrential Rain in Henan Province

WANG Xiaokang CUI Chunguang WANG Jingyu YANG Hao ZHOU Wen

Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: In mid-late July 2021, an extreme heavy rainfall process with the characteristics of long duration, large accumulated rainfall amount, and concentrated precipitation area occurred in Henan Province, causing serious casualties. Based on automatic station rainfall data and ERA5 reanalysis data, the important functions and influence mechanisms of multiscale system, jet and topography on the transport and convergence of water vapor and the formation of precipitation are discussed in this paper. It is found that the severe torrential rain occurred in the favorable circulation conditions with long-distance typhoon (In-fa). A large amount of water vapor coming from the western Pacific penetrated the east border of Henan Province from lower layer, while the water vapor from the South China Sea entered Henan Province from the south side mainly in the middle-low layers of troposphere, resulting in the extreme heavy rainfall under the joint influence of cyclonic vortex, shear line and convergence line. The centers of water vapor convergence and ascending motion in lower layers were caused by the coupling impact of low-level jet and boundary layer jet. In addition, the terrain here played the roles of dynamically blocking and lifting, and thermodynamically lifting at the same time. Besides, combined with the jet, topography made the severe precipitation

^{*} 国家自然科学基金国际合作项目(41620104009)、国家自然科学基金青年项目(41705019)、湖北省气象局科技课题重点项目(2020Z05)、湖北省气象局科技发展基金(2020Y04)和气象灾害教育部重点实验室 & 气象灾害预报预警与评估协同创新中心联合开放课题(KLME202106)共同资助

2021 年 10 月 15 日收稿; 2021 年 12 月 10 日收修定稿

第一作者: 汪小康, 主要从事强降水机理分析研究. E-mail: wxk816@163.com

通讯作者: 崔春光, 主要从事强天气机理分析与数值预报研究. E-mail: cgcui@whihr.com.cn

present as a band shape in front of the mountain, and located in the central part on the 20th July and in the northern part of Henan Province on 21 July 2021.

Key words: severe torrential rain in Henan Province, transport and convergence of water vapor, coupling of low-level jet, topographic effect

引 言

河南省地处黄淮西部地貌过渡区,既有太行山脉、伏牛山脉、桐柏山-大别山脉,又有南阳盆地和黄淮海平原,自北向南从暖温带半湿润区向北亚热带气候过渡,自西向东由丘陵山地向平原气候过渡,天气影响系统复杂,降水时空分布不均匀(栗晗等,2018;张建忠,2015;侯春梅等,2008)。河南省暴雨具有鲜明的季节性和地域性特征,全省夏季(6、7、8月)年均暴雨日为 1.72 d,暴雨量为 139.4 mm,占全年暴雨量的 75%,贡献了夏季总降水量的 36%。空间分布来看,暴雨日数和暴雨量总体从东向西、从南向北递减。但是,豫北地区为相对大值地区,尤其是持续 2 天的暴雨,豫北和郑州地区是高频中心(汪小康等,2018)。与暴雨分布有所不同,黄河以北的太行山东侧(新乡、安阳、鹤壁地区)是河南省短时强降水的频发区之一,其中 7 月频次最高,部分地区可达年均 1 次。针对这个区域内短时强降水的日变化分析发现,小时降水量呈明显的双峰型结构,其中下午峰值出现在 17—21 时(王婧羽等,2019)。

造成河南省日极值降水最重要的系统是台风,河南省的台风暴雨既可以发生在台风登陆阶段也可能发生在台风还远在海面上的阶段。登陆台风的典型影响个例如“75·8”暴雨,1975 年 8 月 7503 号台风妮娜深入内陆,受豫西山地形影响,在河南省移动受阻停滞且持续不消,在伏牛山的迎风面造成了过程降水量 1 631 mm(8 月 4—8 日)和日降水 1 060.3 mm(河南泌阳县林庄)的强降水(丁一汇,2015;谭燕和陈德辉,2008)。2018 年 18 号台风温比亚深入内陆以后,其北侧螺旋雨带持续发展,造成河南商丘睢县和拓城县 8 月 16—21 日累计降水量分别达到 544 mm 和 522 mm(高拴柱,2020)。丛春华等(2012)将台风远距离降水定义为:(1)降水发生在台风范围之外;(2)该降水与台风存在着内在的物理联系。远距离台风影响的个例有:2000 年 7 月 5 日河南新乡延津县日降水量达 492.2 mm,是受台风启德的偏东气流影响,此时台风还远在菲律宾和

我国南海上空。今年 7 月河南特大暴雨发生时,台风烟花还在西北太平洋上,属于远距离台风影响。

稳定的水汽输送是台风暴雨产生的重要条件(Lee et al,2011),这样的水汽输送往往与低空急流有关。对于台风远距离暴雨,台风外围环流向暴雨区输送能量和水汽更是降水强度的关键因素(丛春华等,2011)。孙建华等(2005)研究发现,台风与低槽(低涡)远距离作用型台风暴雨约占华北暴雨个例总数的 32.2%;此类远距离台风的作用主要是为台风东侧东南低空急流提供水汽输送。

地形对台风暴雨具有显著的增幅作用。“75·8”暴雨过程中地形对水汽可能起到两方面的作用,即强迫抬升和辐合作用,小地形雨强增幅约为 23 mm·h⁻¹,相当于总降水的 1/4~1/3(“75·8”暴雨会战北京组,1979;丁一汇等,1978)。对 0908 号台风莫拉克的研究表明,台湾西南部陡峭地形直接导致了台风莫拉克降水增幅(Fang et al,2011),地形坡度、水平风强度、西南上坡气流内对流层中低层水汽含量是影响降水落区及强度的主要因素(Xie and Zhang,2012)。

历史上我国出现过多次非常严重的极端降水过程,如河南“75·8”大暴雨,死亡人数超过 2.6 万,直接经济损失近百亿元(丁一汇,2015)。气象工作者从天气学和动力学等方向研究了此次致灾暴雨,总结了暴雨的天气学模型(丁一汇,2015);揭示了不同尺度环流和天气系统的相互作用(丁一汇,2014);发现了不同尺度的地形对暴雨的增幅作用,诊断了潜热反馈对强上升运动的重要作用等(丁一汇等,1978)。2012 年 7 月 21 日,北京出现了 24 h 降水量 460 mm 的特大暴雨,造成了严重的人员伤亡和经济损失。针对“7·21”暴雨的深入研究,揭示了不同层次系统之间的耦合对降水强度的重要作用(谌芸等,2012;孙军等,2012),以及局部地形和水汽条件对降水落区和强度的显著影响(王宁等,2014;王宇虹等,2015)。2016 年 7 月 18—20 日,河南省发生了一次大范围强降水过程,豫北地区最大过程降水量达到 732 mm。相关研究发现强降水与低涡发展的正反馈过程是降水维持的重要机制(雷蕾等,

2017), 高低空系统的耦合以及中低纬度系统的相互作用是过程累计降水量大的主要原因(赵思雄等, 2018)。这些针对极端降水过程的研究工作大大推动了中国暴雨机理研究和预报模式研发的进展。

2021 年 7 月中下旬在河南省的中部、西部和北部发生了一场极端强降水过程(以下简称“21·7”河南暴雨), 即使与历史上的极端降水过程相比, 河南此次特大暴雨的极端性仍非常显著, 持续时间长, 累计雨量大, 暴雨落区集中, 最大过程降水量出现在鹤壁科创中心, 6 天累计降水量达到 1122.6 mm, 最大日降水也出现在科创中心, 为 777.5 mm, 最大小时雨强为 201.9 mm·h⁻¹, 于 20 日 17 时出现在郑州国家站, 仅仅小时极值雨量就远超过历史平均河南省 7 月总降水量(约 175 mm), 日极值降水量更是超过河南省年均总降水量(约 750 mm), 多站次破历史纪录, 暴雨和洪涝造成了多人死亡和失踪(苏爱芳等, 2021; 2022; 杨浩等, 2022)。本文从降水多尺度影响系统、急流和地形对水汽来源、输送和辐合的影响角度, 分析此次强降水的极端性和落区集中的

原因, 以期能够对极端暴雨的成因研究和预报技术研发产生一定的启发作用。

1 资料和方法

本文所用资料包括: (1) 降水资料: 全国范围内国家站及自动站日降水量和小时降水量, 由国家气象信息中心提供; (2) ERA5 再分析资料(水平分辨率为 0.25°×0.25°, 时间分辨率为 1 h, 垂直方向为 25 层), 网址 <https://cds.climate.copernicus.eu/>, 包含温压湿风等气象要素。资料时段均为 2021 年 7 月 17 日 08 时至 23 日 08 时(北京时, 下同)。表 1 给出了主要降水时段(19 日 08 时至 21 日 20 时)、降水范围内、不同高度上的探空观测数据与 ERA5 再分析数据的温度、位势高度、风场和湿度场。对比结果可以清晰地看出, 如将最近站点上的探空资料作为真值, ERA5 再分析数据比较准确地再现了此次强降水过程大气的温压湿风信息, 能够作为研究降水机制的可靠数据。

表 1 探空观测数据与 ERA5 再分析资料对比

Table 1 The comparison between sounding data and ERA5 reanalysis data

高度/hPa	温度/°C		位势高度/gpm		U 风/(m·s ⁻¹)		V 风/(m·s ⁻¹)		比湿/(g·kg ⁻¹)	
	探空	ERA5	探空	ERA5	探空	ERA5	探空	ERA5	探空	ERA5
925	22.6	22.7	747	750	-5.6	-5.5	2.2	2.7	15.4	15.7
850	18.5	18.6	1480	1483	-5.1	-5	4.0	4.4	13.2	13.1
700	10.2	10.3	3125	3129	-2	-2.7	5.0	5.4	8.9	8.8
500	-4.0	-4.1	5856	5859	1.2	1.4	3.6	3.9	4.0	4.4
200	-50.5	-50.6	12502	12502	10.5	10.4	3.5	3.6	0.1	0.1

注: 表中的“探空”为河南郑州、南阳、卢氏、河北邢台、山东济南(章丘)、江苏徐州和安徽阜阳 7 个探空站点平均; “ERA5”为距离每一个观测站点最近的 ERA5 格点数据

Note: The “sounding” in the table is the average data from seven radiosonde stations in Zhengzhou (Henan), Nanyang (Henan), Lushi (Henan), Xingtai (Hebei), Jinan (Shandong), Xuzhou (Jiangsu) and Fuyang (Anhui); “ERA5” means the ERA5 data averaged at the closest grid to each radiosonde station

水汽输送特征分析中用到了水汽后向分析方法, 所用水汽后向追踪公式为:

$$Q_s = \frac{\sum_{i=1}^m q_{\text{last}}}{\sum_{i=1}^n q_{\text{last}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q_s 表示通道水汽贡献率, q_{last} 表示通道上最终位置的比湿, m 表示通道所包含轨迹条数, n 表示轨迹总数。目标区域为暴雨落区(“21·7”河南暴雨为 33°~36°N、112°~115°E, “75·8”暴雨为 32°~35°N、112°~115°E), 后向水汽追踪 5 d, 表征水汽来源地。

2 降水实况和环流形势背景

2.1 降水极端性

“21·7”河南暴雨区域性强降水从 17 日开始, 持续到 22 日, 全省 2647 个站 6 天累计降水量平均达到 224.1 mm, 累计过程降水量大于 250 mm 的面积达到全省 1/3, 超过“75·8”暴雨, 有 179 个站超过 600 mm, 800 mm 以上站点达到 30 个(图 1a)。强降水落区集中在太行山东南侧、伏牛山东北侧的郑州、新乡、鹤壁和安阳地区, 地市平均降水量前三

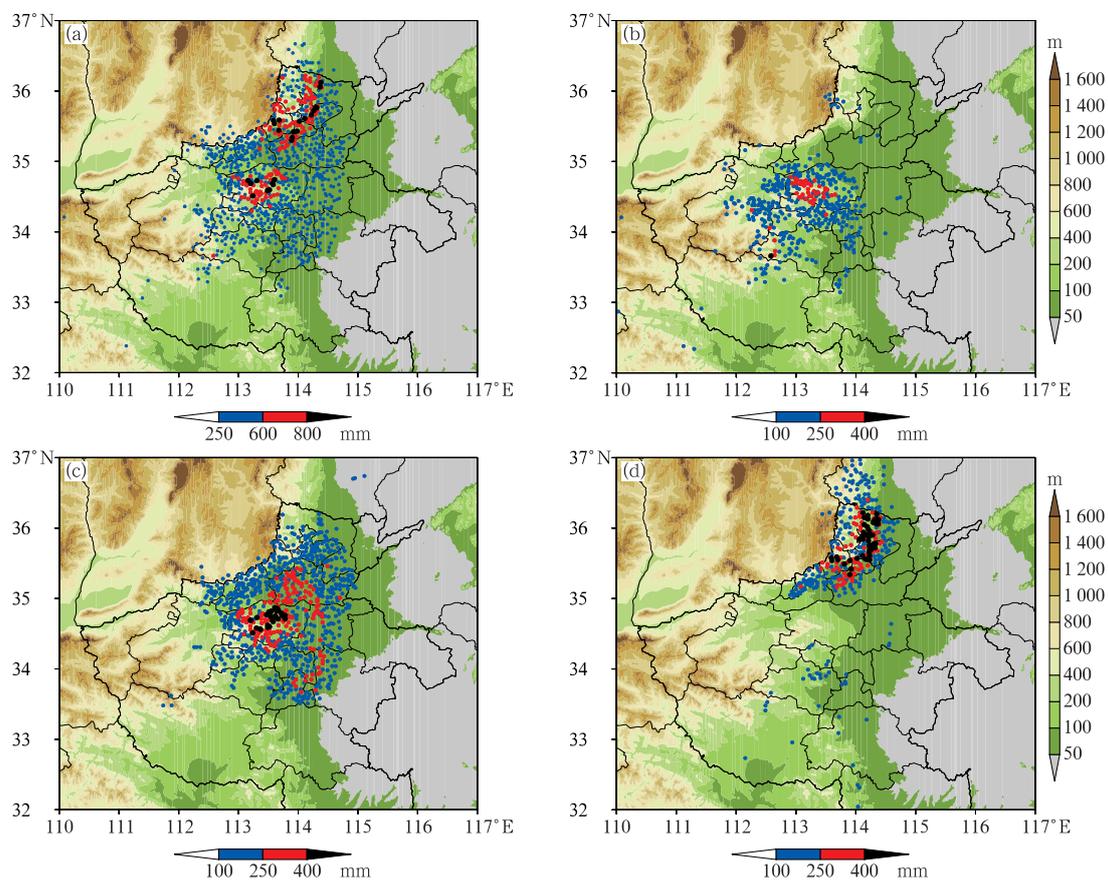


图 1 2021 年 7 月 (a) 17—22 日 6 天累计降水量; (b) 19 日, (c) 20 日, (d) 21 日降水量
(棕色和绿色阴影为地形高度)

Fig. 1 (a) Accumulated rainfall from 17 to 22 July and (b, c, d) the daily precipitation on (b) 19, (c) 20, (d) 21 July 2021
(Brown and green shadow means topographic height)

位为:鹤壁(588.1 mm)、郑州(532.3 mm)和新乡(467.4 mm)。

“21·7”河南暴雨最强降水时段出现在 19—21 日,19 日(图 1b)大暴雨(日降水超过 100 mm)集中在郑州及其周边地区,特大暴雨(日降水超过 250 mm)主要发生在郑州市区西侧和南侧的荥阳市、巩义市和新密市。20 日(图 1c)降水范围与 19 日基本一致,但降水强度明显增强,特大暴雨覆盖了郑州大部 and 新乡中西部,400 mm 以上的超强降水主要集中在郑州市区及其西侧的荥阳市和巩义市。21 日(图 1d)雨带明显北移,强降水范围转移到焦作、新乡、鹤壁和安阳,其中 400 mm 以上的超强降水区面积超过 20 日。

2.2 降水环流形势

针对河南省暴雨过程环流背景开展的统计研究发现,台风和西风槽是最重要的影响系统,2005—2016 年,12 年中河南省共发生暴雨 241 d,台风影响

占到了 102 d,这其中远距离台风影响有 74 d,远超登陆台风(28 d)。根据对流层中层的环流特征,远距离台风影响河南暴雨可以分为三种类型,其中高压型合成的环流形势(图 2a)为:贝加尔湖地区受高压控制,中纬度表现为多波动的西风气流,河南省西部为西风槽,东侧受副热带高压(以下简称副高)外围环流控制。此时,台风一般位于菲律宾以东洋面上,沿副高外围移动的台风北侧绕流是暴雨的重要水汽通道,另一条水汽来源于印度洋、孟加拉湾,穿越中南半岛到达我国中部地区。

“七下八上”是传统的北方主汛期。2021 年受北美洲“热穹顶”事件的上下游效应影响,7 月 13 日西太平洋副高提前大幅北抬,控制了东北、日本海上空;17—22 日(极端降水发生期间,图 2b)平均副高脊线位置位于 38°N,较常年平均偏北 12~14 个纬距;与此同时,蒙古高原长时间维持的高压中心又阻挡了上游系统东移,导致西风带低值系统在华北、黄淮地区长时间维持。河南暴雨发生时,台风烟花远

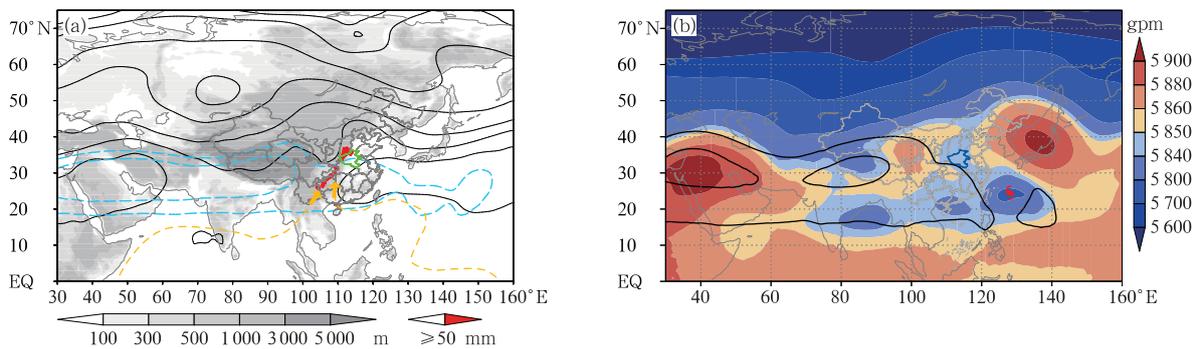


图 2 (a)2005—2016 年远距离台风高压型合成环流形势, (b)2021 年 7 月 17—22 日平均环流形势

(图 2a 中, 黑线为 500 hPa 高度场, 蓝虚线为 200 hPa 南亚高压范围, 灰色阴影为地形高度;

红色为暴雨范围, 单位: mm; 黄虚线为水汽输送通道, 绿线为河南省界。

图 2b 中, 填色为 500 hPa 高度场, 黑线为 200 hPa 南亚高压范围, 蓝线为河南省界)

Fig. 2 (a) The synthetic circulation situation of long-distance typhoon high pressure type from 2005 to 2016, (b) averaged circulation situation from 17 to 22 July 2021

(In Fig. 2a, black line is geopotential height at 500 hPa; blue dashed line represents the 200 hPa South Asia high;

gray shadow means topographic height; red shadow depicts the range of torrential rain;

yellow dashed line shows the transport path of water vapor and green line marks out the boundary of Henan Province.

In Fig. 2b, colored represents 500 hPa geopotential field; black line depicts

the range of 200 hPa South Asia high, and blue line is the boundary of Henan Province)

在西北太平洋上, 属于远距离台风影响。

将 2021 年“21·7”河南暴雨发生时的槽脊和环流形势场与远距离台风影响高压型的合成环流形势相对比发现, 两者非常相似, 降水主要发生在河南省的西部和北部。暴雨期间, 对流层中层中高纬贝加尔湖附近为高压脊, 巴尔喀什湖附近为低压槽, 中低纬在 40°E 和 140°E 分别有高压中心, 河南为低压中心, 其西侧还有一个高压脊, 河南位于两高之间 (图 2b)。环流形势上看 (图 3), 对流层中层河南位于东西两个高压反气旋环流之间, 受中尺度的低压气旋环流影响, 对流层低层 19—20 日气旋性切变中心在河南中西部和中北部; 20—21 日河南北部为西南、偏南、东南气流辐合区。异常偏北且稳定维持的副高南侧建立了稳定的水汽输送通道, 加之切变线和辐合线的水汽集中作用, 使得低层 700 hPa 上, 河南中部、西部和北部始终维持接近饱和的相对湿度, 引发强降水。

“21·7”河南暴雨时, 台风本体并未登陆, 远距离台风对强降水的主要作用是强盛稳定的台风外围环流对水汽的巨大输送能力, 这次极端降水过程巨量的水汽来源于何处, 如何被输送至中原大地, 又是为何降水中心 20 日在郑州、21 日在豫北? 本文从引发强降水的直接原因——大量的水汽辐合的影响因素出发, 研究急流如何加强水汽的输送和辐合, 以

及地形对水汽辐合的影响, 初步诊断此次降水的成因。

3 水汽输送特征

3.1 水汽后向追踪特征

远距离台风影响高压型的合成环流形势显示, 暴雨有两条重要的水汽路径, 除了沿副高外围移动的台风北侧的绕流水汽输送以外, 还有一条来自印度洋、孟加拉湾, 穿越中南半岛到达我国中部的水汽通道 (图 2a)。我们对著名的“75·8”暴雨和 2021 年的“21·7”河南暴雨进行了水汽后向追踪 (图 4), 结果发现, “75·8”暴雨过程 (图 4b) 出现了 3 条水汽路径, 但来自孟湾和南海地区的南侧路径水汽输送占到一半, 来自西太平洋地区的经由黄海和东海进入的水汽贡献了另外一半, 这与合成水汽路径类似。“21·7”河南暴雨 (图 4a) 则与两者差异显著, 虽然同为 3 条主要水汽输送路径, 但其中两条来自西太平洋的水汽输送通道贡献了 82% 的水汽 (东南向通道 2 和偏东向通道 3), 占比则明显偏大; 南侧水汽输送通道仅贡献了 18% (南向通道 1), 且追踪 5 天时水汽来源主要为南海, 与“75·8”过程比明显偏短, 显示南侧水汽源地贡献小, 水汽输送速度慢。

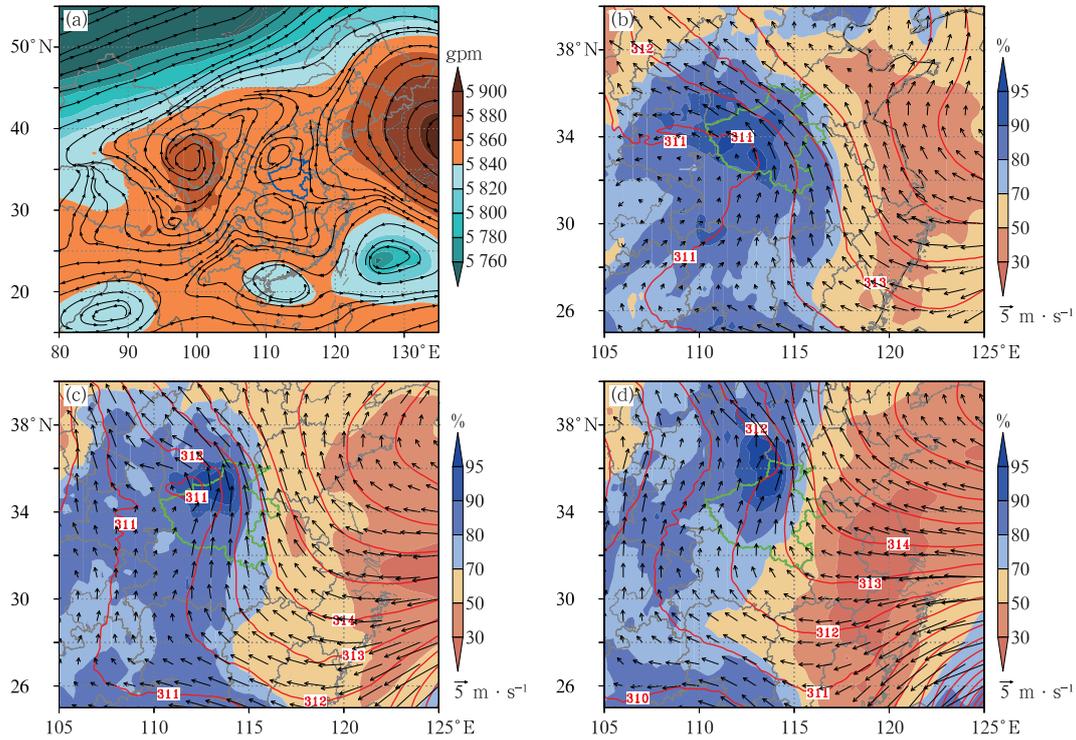


图 3 2021 年 7 月 (a) 17—22 日平均的 500 hPa 高度场 (填色) 和流场; (b) 19 日, (c) 20 日, (d) 21 日的 700 hPa 相对湿度 (填色), 相当位温 (红线, 单位: K) 和水平风场 (矢量箭头) (绿线为河南省界)

Fig. 3 (a) Averaged 500 hPa geopotential field (colored) and flow field from 17 to 22, (b, c, d) the 700 hPa relative humidity (colored), equivalent potential temperature (red line, unit: K), and horizontal wind field (vector arrow, unit: $m \cdot s^{-1}$) on (b) 19, (c) 20, and (d) 21 July 2021 (Green line marks out the boundary of Henan Province)

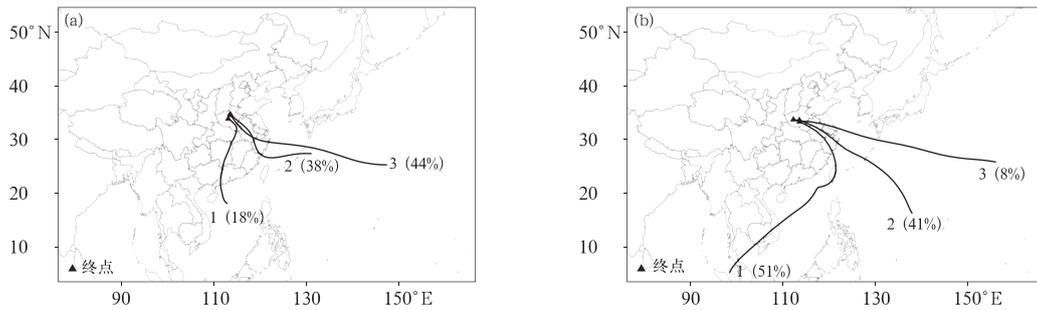


图 4 (a) “21·7”河南暴雨, (b) “75·8”暴雨水汽后向追踪路径 (1, 2, 3 分别表示南向、东南向、偏东向水汽输送通道)

Fig. 4 Backward tracking paths of water vapor in (a) the July 2021 and (b) the August 1975 severe torrential rain in Henan Province (1, 2, 3 represent south, southeast, eastern paths of water vapor, respectively)

3.2 不同边界水汽通量特征

水汽后向追踪的结果显示暴雨水汽的主要来源是西太平洋, 南海地区也有贡献, 我们进一步研究这

些水汽在到达河南省时的主要入流边界和入流高度层。图 5a 给出了包含河南省降水范围 ($32^{\circ} \sim 37^{\circ}N$ 、 $110^{\circ} \sim 116^{\circ}E$) 的东、西、南、北四个边界的整层平均的水汽通量时间演变特征, 由图可见, 东边界和南边界为

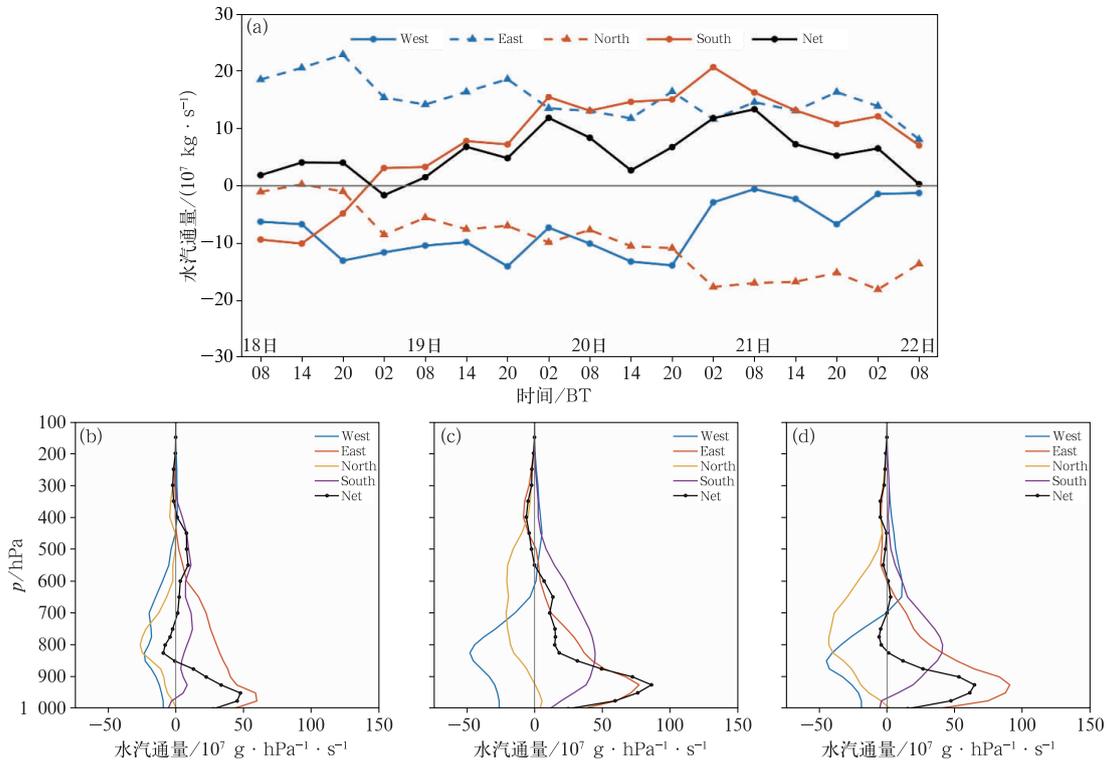


图 5 2021 年 7 月 (a) 18 日 08 时至 22 日 08 时不同方向边界整层累计的水汽通量的时间演变；
 (b) 19 日 08 时, (c) 20 日 16 时和 (d) 21 日 20 时不同方向边界累计的水汽通量垂直分布
 Fig. 5 (a) The time evolution of the vertical accumulated water vapor flux on different boundaries from 08:00 BT 18 to 08:00 BT 22 July; (b, c, d) vertical distribution of water vapor flux accumulated on different boundaries at (b) 08:00 BT 19, (c) 16:00 BT 20, and (d) 20:00 BT 21 July 2021

主要水汽输入边界,北边界和西边界始终维持水汽流出。18—19 日东边界的水汽输入占主导,19 日 02 时南边界水汽由负转正,且迅速增强,由于北边界和西边界的流出大致抵消了东边界的流入,所以南边界的水汽增强引发了总水汽流入的增加,水汽显著入流的时段出现在 19—21 日,与强降水时段一致,22 日之后,南边界和东边界水汽输入均明显减弱,强降水随着减弱。

图 5b~5d 给出了强降水开始时刻(19 日 08 时)、豫中降水最强时刻(20 日 16 时)和豫北降水最强时刻(21 日 20 时)各个边界水汽通量的垂直分布特征。研究发现东边界和南边界水汽输入集中度和高度明显不同,东边界(橘色线)水汽输入中心位于边界层内的 950 hPa 层附近,峰值从强降水开始的 $55 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐渐增加到接近 $100 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,但水汽入流始终仅出现在 600 hPa 以下,集中在边界层和对流层低层;而南边界(紫色线)峰值小于东边界,量值从 $15 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 逐

渐增加到接近 $50 \times 10^7 \text{ g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,但高度更高,厚度更大,对流层中低层均有水汽流入,中心在 700~850 hPa。

3.3 不同高度水汽输送特征

图 6 显示了不同高度层上的水汽输送特征,对比图 4a 可见,降水的 3 条水汽路径位于不同的高度,其中 1 号南侧水汽输送路径高度最高,受“烟花”西侧气流和“查帕卡”东侧气流共同影响,缓慢运动到“查帕卡”北侧后,经由偏南气流从河南南部进入强降水区,产生辐合。2 号和 3 号均为东侧水汽输送路径,2 号水汽路径为对流层低层内的“烟花”西北侧水汽从东南方向进入强降水区,3 号则为“烟花”北侧和副高南侧强的水汽通量由边界层内从偏东方向进入强降水区。

研究发现“21·7”河南暴雨主要水汽来源是西太平洋,受台风烟花西侧和北侧气流及副高南侧的偏东气流影响,另一个重要水汽源地是南海,受台风

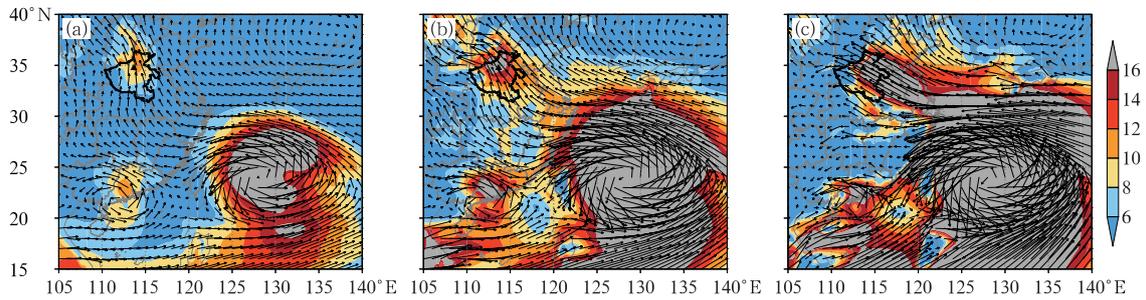


图 6 2021 年 7 月 19—21 日平均(a)700 hPa,(b)850 hPa,(c)925 hPa 层水汽通量(矢量箭头)及量值(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

Fig. 6 Water vapor flux (vector arrow) and value (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) at (a) 700 hPa, (b) 850 hPa, and (c) 925 hPa averaged from 19 to 21 July 2021

烟花和查帕卡的共同作用。输送至中原地区的水汽,一部分从东侧边界层和对流层低层内进入强降水区,另一部分从南侧对流层中低层进入强降水区。充沛的水汽供应和显著的水汽流入为强降水的发生奠定了基础。

4 低空急流和地形作用

在充沛的水汽输送背景下,降水发生在何时,又落在哪里,常与低空急流密切相关,低空急流尤其是边界层急流又常与地形密切相关。如图 1 中填色所示,河南省地处黄淮西部地貌过渡区,整体来看西高东低,其北部西邻太行山,西部有海拔约 1000 m 左右、西北—东南走向的伏牛山,而东部为黄淮海平原。

4.1 急流耦合对降水的影响

18 日河南中北部开始出现 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东

南气流;19 日(图 7a)在太行山南侧,伏牛山东北侧出现 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的偏东风低空急流;20 日(图 7b)急流范围向北扩大,强度增加,东侧向海面扩展,与“烟花”西侧气流相连接,打通水汽通道;21 日(图 7c)急流位置向北移动,范围收缩至豫北和河北南部,但强度再次增强,出现超过 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东南风急流中心。

图 8 给出了最强两天降水(20 日和 21 日)的急流分布特征,与低空急流(红色箭头)的分布和演变类似,边界层内也存在一支生成于山前,并逐渐加强同时向北扩展的急流(黑色箭头),与低空急流不同的是,边界层内的急流偏东风分量更大。Du and Chen(2019)利用高分辨率数值模拟了华南地区双低空急流过程,结果发现两个急流之间存在耦合作用,边界层急流出口区存在低层辐合,而低空急流导致中层辐散,从而引发两急流高度层之间的强烈上升运动。此次暴雨过程中,受西侧山地地形的阻挡,辐合和上升运动中心同样出现在边界层急流的

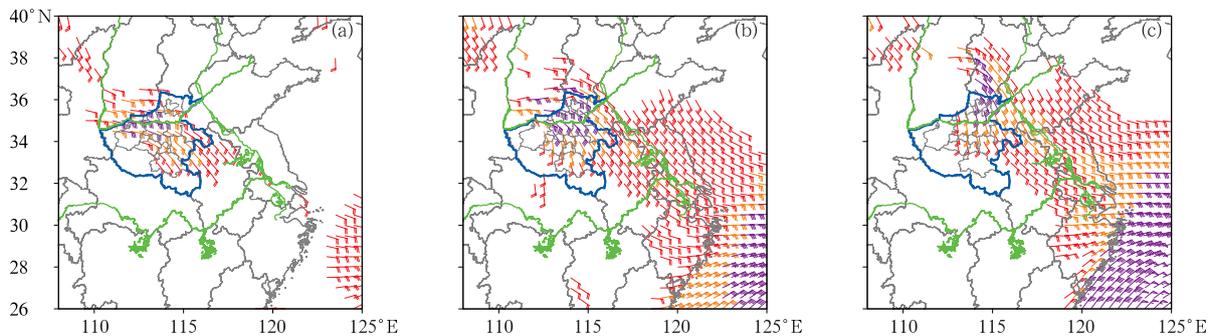


图 7 2021 年 7 月(a)19 日,(b)20 日,(c)21 日 850 hPa 低空急流分布

(红色风向杆: $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平风;橙色风向杆: $12 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平风;紫色风向杆: $> 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水平风)

Fig. 7 Distribution of low level jet at 850 hPa on (a) 19, (b) 20, and (c) 21 July 2021

(red barb: $< 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; orange barb: $12 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, purple barb: $> 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

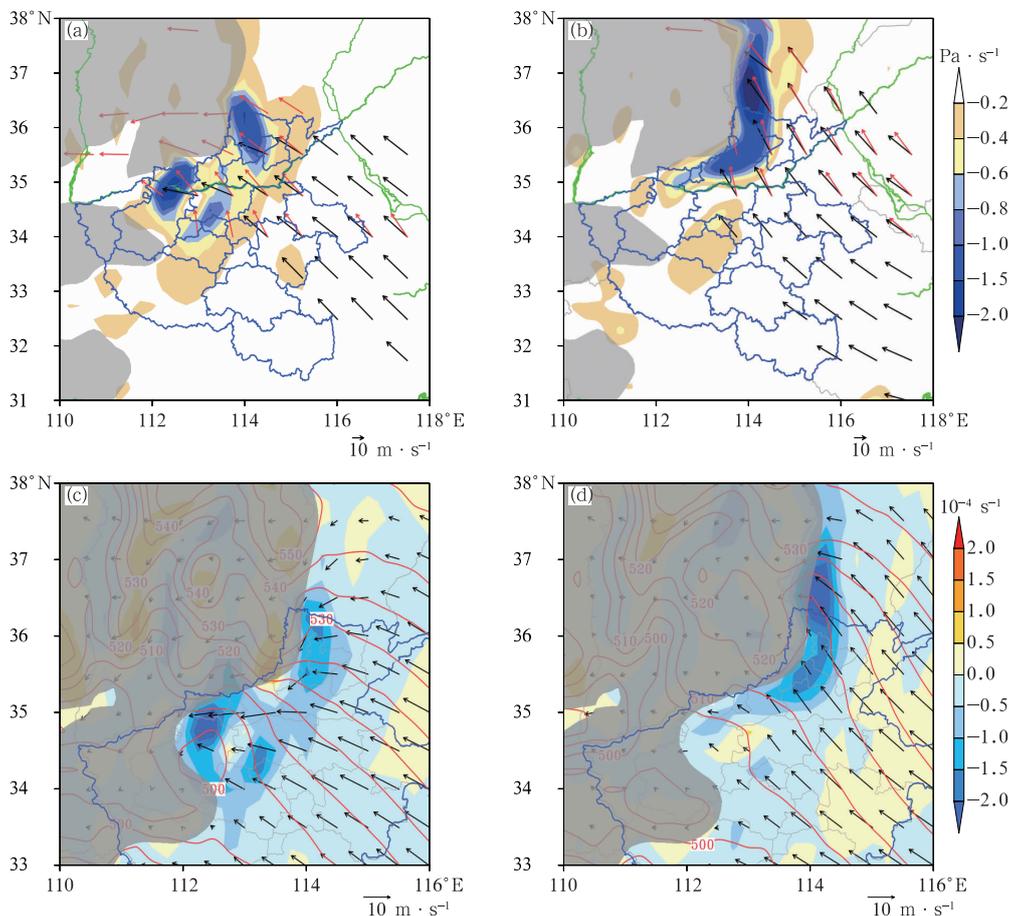


图 8 2021 年 7 月 (a,c)20 日, (b,d)21 日 (a,b)900 hPa 垂直速度(填色,负值为上升), 850 hPa 低空急流(红色矢量箭头)和 925 hPa 边界层急流(黑色矢量箭头); (c,d)950 hPa 层水平散度(填色,负值为辐合),高度场(红线,单位:gpm)和水平风(矢量箭头) (灰色阴影在图 8a,8b 中为 750 m 及以上、在图 8c,8d 中为 500 m 及以上的地形高度覆盖范围)
 Fig. 8 (a, b) Vertical velocity at 900 hPa (colored, negative value means rising), low level jet at 850 hPa (red vector arrow), and boundary level jet at 925 hPa (black vector arrow), (c, d) horizontal divergence (colored, negative value: convergence), geopotential height (red line, unit: gpm) and horizontal wind (vector arrow) on (a, c) 20 and (b, d) 21 July 2021 (Grey shadow marks out the area with topographic height at 750 m in Figs. 8a, 8b and 500 m in Figs. 8c, 8d)

出口区,两支急流重合的地方对应两高度层之间的垂直上升运动(填色),且两者速度越大,上升运动越强。对比图 8a 和 8b 中低空急流和图 1c 和 1d 中强降水的位置,可以发现两者位置有很好的对应关系。这显示低空急流与边界层急流的耦合及其产生的上升运动是“21·7”河南暴雨过程局地强降水形成的直接原因,但是虽然急流辐合区和强降水都发生山前,具体位置却不同,20 日位于豫中,21 日则出现在豫北。

4.2 地形降水作用机制

结合低空急流与河南省及周边地区的地形分布(图 8)可以发现,20 日急流尤其是边界层急流偏东风为主,于是在太行山和伏牛山东坡及两山之间形成了急流辐合区和上升运动大值区;21 日急流转为东南向,与地形相关联的辐合和上升运动更多地发生在豫北地区的太行山东坡。这就一定程度上解释了局地降水中心的成因,为何两天强降水中心的具体位置有显著差异。

“21·7”河南暴雨过程中地形对气流和降水的影响有动力和热力两个方面。热力抬升作用方面(图 9),降水区东侧和南侧边界层和对流层低层内空气非常温暖湿润,气流在向西和向北输送的过程中,被西侧和北侧的山地阻挡上升,使得暖湿空气在山前堆积,山前相当位温增大,形成一个高温高湿的近中性的层结,这里非常有利于大暴雨的形成(伍红雨和杨康权,2011;孙军等,2012;陈元昭等,2016;陈传雷等,2017)。动力抬升机制方面(图 10),由于太

行山和豫西山地高度都较高(主体在 500 m 以上,图 8c 和 8d 中灰色阴影所示),且范围很大,对气流起到明显的阻挡作用(图 10a 和 10d),迫使气流在山前辐合上升(图 10b~10f),甚至可以在垂直风向上形成次级环流(图 10c),并且这种阻挡抬升作用同时表现在偏东气流(图 10a~10c)和偏南气流(图 10d~10f)两个方面。在大地形热力抬升和动力阻挡抬升的共同作用下,强降水最终呈现沿地形在迎风坡一侧出现带状分布的特征。

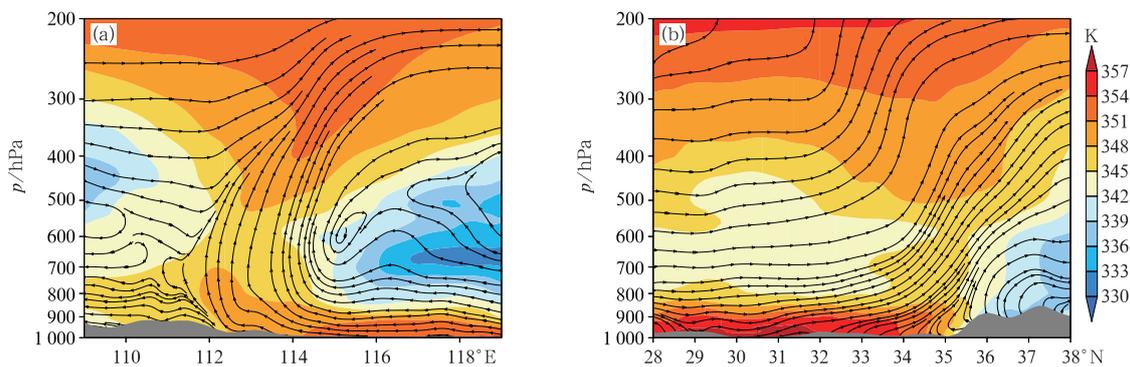


图 9 2021 年 7 月 20 日(a)沿 34.75°N 和(b)沿 113.65°E 的相当位温(填色)和垂直流场(垂直速度扩大 10 倍显示)

Fig. 9 Equivalent potential temperature (colored) and vertical flow field (vertical velocity multiplied by 10) along (a) 34.75°N and (b) 113.65°E on 20 July 2021

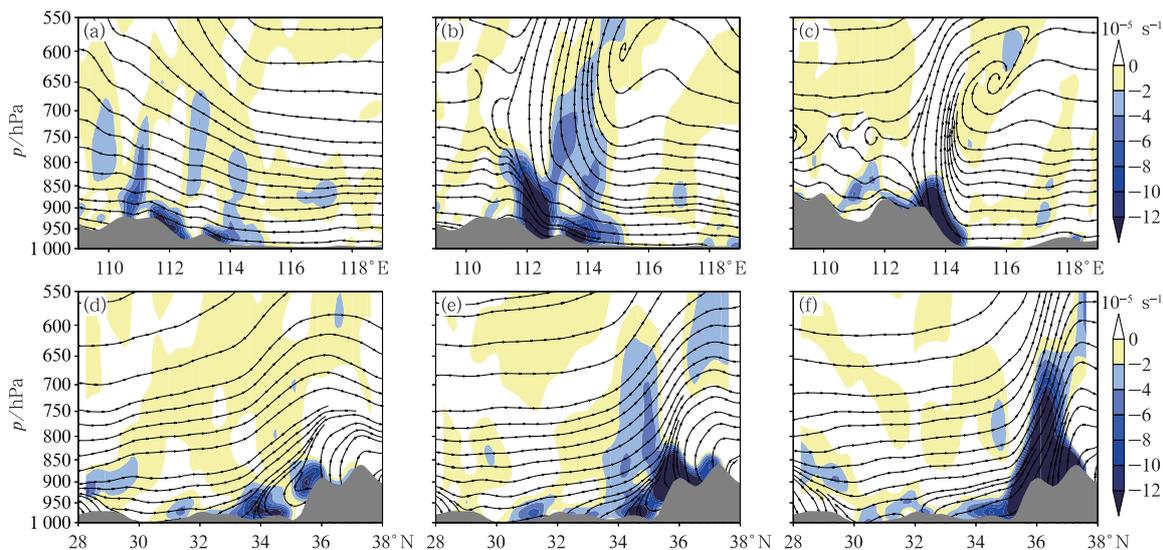


图 10 2021 年 7 月(a)19 日、(b)20 日沿 34.75°N, (c) 21 日沿 35.5°N, (d)19 日、(e)20 日和(f)21 日沿 113.65°E 的水平散度场(填色,负值为辐合)及垂直流场(垂直速度扩大 10 倍显示)

Fig. 10 Horizontal divergence (colored, negative value: convergence) and vertical flow field (vertical velocity multiplied by 10) along 34.75°N on (a) 19 and (b) 20 July, along (c) 35.5°N on 21 July, along 113.65°E on (d) 19, (e) 20 and (f) 21 July 2021

5 结论与讨论

2021年7月中下旬河南中部、西部和北部的大范围地区发生了持续性极端强降水过程,造成了严重的人员伤亡和财产损失。文章重点关注直接引发降水的水汽,研究了水汽从何而来,系统如何影响水汽的输送,急流如何加强水汽的输送和辐合,以及地形对水汽辐合的影响。主要结论如下:

(1)“21·7”河南暴雨极端性体现在持续时间长、累计降水量大、暴雨落区集中等方面,最强降水20日出现在豫中,21日位于豫北。强降水发生在远距离台风高压型环流背景条件下,中纬度槽脊形势稳定,副高明显偏北,副高南侧台风烟花北侧建立起了稳定的水汽输送通道,受中尺度的低压气旋环流影响,配合切变线和辐合线的水汽集中作用,河南中部、西部和北部始终维持接近饱和的相对湿度。

(2)暴雨水汽主要来自西太平洋,台风烟花西侧和北侧及副高南侧水汽路径贡献了82%,南海也是重要水汽源地。强降水区东边界的水汽供应稳定,但高度较低,主要集中在边界层和对流层低层内,南边界的水汽流入量与区域水汽总流入量和降水量相关性更高,其量值小于东边界,但高度较高,厚度更大,出现在对流层中低层和边界层内。

(3)在充沛的水汽供应和显著的水汽流入的条件下,低空急流与边界层急流的耦合形成低层水汽辐合中心和上升中心;大地形对山前的暖湿空气起到了动力阻挡抬升和热力抬升作用,并与急流综合作用,使得强降水呈带状出现在山前,且20日位于豫中,21日在豫北地区。

贺晓露等(2020)研究发生在鄂东北一次暴雨过程发现,桐柏山、大洪山和大别山地形使得鄂东北近地面和边界层内的气流发生了绕流和爬升,在山后形成局地辐合,导致对流系统和降水的生成与发展。而“21·7”河南暴雨过程的研究却发现,这里的地形对气流起到阻挡抬升的作用,迫使大范围强降水出现在山前。对比两者地形发现,鄂东北地形范围较小,且高度在500 m以下,而河南西北的太行山和豫西山地主体高度都在500 m以上,且范围很大,那么这种地形条件的差异在降水位置差异的形成中占据了多大的贡献?我们未来计划通过更多相关个例的研究回答这个问题。

参考文献

“75·8”暴雨会战北京组,1979.“75·8”河南特大暴雨的动力学分析

[J]. 气象学报,37(4):45-55. Beijing Group,“75·8” Heavy Rain Cooperative Research,1979. A diagnostic analysis about the “75.8” heavy rain in Henan[J]. Acta Meteor Sin,37(4):45-55(in Chinese).

陈传雷,管兆勇,王赛帆,等,2017. 辽宁长历时强降水的环境特征分析[J]. 大气科学学报,40(3):321-332. Chen C L, Guan Z Y, Wang S D, et al,2017. Characteristics of environmental circulations of long duration heavy precipitation in Liaoning Province [J]. Trans Atmos Sci,40(3):321-332(in Chinese).

陈元昭,俞小鼎,陈训来,2016. 珠江三角洲地区重大短时强降水的基本流型与环境参量特征[J]. 气象,42(2):144-155. Chen Y Z, Yu X D, Chen X L,2016. Characteristics of short-time severe rainfall events based on weather flow and key environmental parameters in Pearl River Delta[J]. Meteor Mon,42(2):144-155(in Chinese).

湛芸,孙军,徐珺,等,2012. 北京721特大暴雨极端性分析及思考(一):观测分析及思考[J]. 气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al,2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon,38(10):1255-1266(in Chinese).

丛春华,陈联寿,雷小途,等,2011. 台风远距离暴雨的研究进展[J]. 热带气象学报,27(2):264-270. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al,2011. An overview on the study of tropical cyclone remote rainfall[J]. J Trop Meteor,27(2):264-270(in Chinese).

丛春华,陈联寿,雷小途,等,2012. 热带气旋远距离暴雨的研究[J]. 气象学报,70(4):717-727. Cong C H, Chen L S, Lei X T, et al,2012. A study on the mechanism of the tropical cyclone remote precipitation[J]. Acta Meteor Sin,70(4):717-727(in Chinese).

丁一汇,2014. 陶诗言先生在中国暴雨发生条件和机制研究中的贡献[J]. 大气科学,38(4):616-626. Ding Y H,2014. Contributions of Prof. Shiyan Tao to the study of formation conditions and mechanisms of heavy rainfall in China[J]. Chin J Atmos Sci,38(4):616-626(in Chinese).

丁一汇,2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究:回顾与评述[J]. 气象学报,73(3):411-424. Ding Y H,2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975: Review and assessment[J]. Acta Meteor Sin,73(3):411-424(in Chinese).

丁一汇,蔡则怡,李吉顺,1978. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究[J]. 大气科学,2(4):276-289. Ding Y H, Cai Z Y, Li J S,1978. A case study on the excessively severe rainstorm in Henan Province, early in August,1975[J]. Chin J Atmos Sci,2(4):276-289(in Chinese).

高拴柱,2020. 2018年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象,46(6):792-800. Gao S Z,2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon,46(6):792-800(in Chinese).

贺晓露,汪小康,郝元甲,等,2020. 复杂地形影响下鄂东北梅雨锋大暴雨MCS的触发和演变[J]. 暴雨灾害,39(6):611-619. He X L, Wang X K, Hao Y J, et al,2020. Initiation and evolution of MCS of Meiyu frontal heavy rain event in the complex terrain of northeast Hubei[J]. Torr Rain Dis,39(6):611-619(in

- Chinese).
- 侯春梅,陈忠民,康雯瑛,等,2008.河南汛期暴雨时空分布特征及成因分析[J].气象与环境科学,31(2):39-42. Hou C M, Chen Z M, Kang W Y, et al, 2008. Distribution and cause analysis of the flood season rainstorm in Henan Province[J]. Meteor Environ Sci, 31(2):39-42(in Chinese).
- 雷蕾,孙继松,何娜,等,2017.“7.20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J].气象学报,75(5):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. Acta Meteor Sin, 75(5):685-699(in Chinese).
- 栗晗,王新敏,张霞,等,2018.河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the north of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9):1136-1147(in Chinese).
- 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等,2021.郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害,40(5):445-454. Su A F, Lü X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7.20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Torr Rain Dis, 40(5):445-454(in Chinese).
- 苏爱芳,席乐,吕晓娜,等,2022.豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J].气象,48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Preliminary analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. Meteor Mon, 48(5):556-570(in Chinese).
- 孙建华,张小玲,卫捷,等,2005.20世纪90年代华北大暴雨过程特征的分析研究[J].气候与环境研究,10(3):492-506. Sun J H, Zhang X L, Wei J, et al, 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s[J]. Climatic Environ Res, 10(3):492-506(in Chinese).
- 孙军,湛芸,杨舒楠,等,2012.北京721特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J].气象,38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 谭燕,陈德辉,2008.河南“75.8”大暴雨的中尺度集合预报试验[J].气象,34(9):10-21. Tan Y, Chen D H, 2008. Mesoscale ensemble forecasts on “75.8” heavy rain in Henan[J]. Meteor Mon, 34(9):10-21(in Chinese).
- 王婧羽,李哲,汪小康,等,2019.河南省雨季短时强降水时空分布特征[J].暴雨灾害,38(2):152-160. Wang J Y, Li Z, Wang X K, et al, 2019. Temporal and spatial distribution characteristics of flash heavy rain in Henan during rainy season[J]. Torr Rain Dis, 38(2):152-160(in Chinese).
- 王宁,张立凤,彭军,等,2014.局部地形对北京“7.21”特大暴雨影响的数值研究[J].暴雨灾害,33(1):10-18. Wang N, Zhang L F, Peng J, et al, 2014. Numerical study of the effects of local terrain on “7.21” extreme torrential rain in Beijing[J]. Torr Rain Dis, 33(1):10-18(in Chinese).
- 王宇虹,徐国强,贾丽红,等,2015.太行山对北京“7.21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J].气象,41(4):389-400. Wang Y H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2015. Numerical simulation analysis on impact of Taihang Mountain and vapor sensitivity on the 21 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing[J]. Meteor Mon, 41(4):389-400(in Chinese).
- 汪小康,李哲,杨浩,等,2018.河南强降水分布特征及其电网灾害风险区划研究[J].暴雨灾害,37(6):534-542. Wang X K, Li Z, Yang H, et al, 2018. Study on the spatial-temporal characteristics of heavy rain and the disaster risk zoning on Henan power grid[J]. Torr Rain Dis, 37(6):534-542(in Chinese).
- 伍红雨,杨康权,2011.应用新型散度方程诊断暴雨的触发和增幅机理[J].气象学报,69(2):234-248. Wu H Y, Yang K Q, 2011. A diagnostic study of the triggering of torrential rains and the mechanism for their amplification using a new type of divergence equation[J]. Acta Meteor Sin, 69(2):234-248(in Chinese).
- 杨浩,周文,汪小康,等,2022.“21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,48(5):571-579. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(5):571-579(in Chinese).
- 张建忠,2015.河南重大暴雨灾害的孕灾风险研究[J].气象与环境科学,38(3):19-24. Zhang J Z, 2015. Study on catastrophic rainstorm disaster risk in Henan[J]. Meteor Environ Sci, 38(3):19-24(in Chinese).
- 赵思雄,孙建华,鲁蓉,等,2018.“7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J].气象,44(3):351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. Meteor Mon, 44(3):351-360(in Chinese).
- Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: convection initiation [J]. Mon Wea Rev, 147(2):543-565.
- Fang X Q, Kuo Y H, Wang A Y, 2011. The impacts of Taiwan topography on the predictability of Typhoon Morakot's record-breaking rainfall: a high-resolution ensemble simulation [J]. Wea Forecasting, 26(5):613-633.
- Lee C S, Wu C C, Wang T C C, et al, 2011. Advances in understanding the “perfect monsoon-influenced typhoon”: summary from international conference on Typhoon Morakot (2009) [J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 47(3):213-222.
- Xie B G, Zhang F Q, 2012. Impacts of typhoon track and island topography on the heavy rainfalls in Taiwan associated with Morakot (2009)[J]. Mon Wea Rev, 140(10):3379-3394.

(本文责编:俞卫平)