

“7·20 郑州暴雨”水汽输送过程的诊断分析

刘和远 赵 苏 袁秀忠

黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004

[摘要]文章采用拉格朗日轨迹追踪模式结合欧拉法, 深入探讨 2021 年 7 月 20 日河南省郑州暴雨的水汽来源及其形成机制。我们研究了此次暴雨期间水汽的输送路径和大气环流情况, 以系统揭示其背后的成因。研究表明, 郑州在 2021 年 7 月 20 日遭遇的强降雨, 其关键水汽主要来自西太平洋和南海区域。此次暴雨的水汽输送主要路径为西太平洋的湿气, 它先在浙江或江苏登陆, 然后穿过安徽进入河南。在 500m 和 1000m 高度上, 这条路径的水汽贡献分别达到了 100% 和 89.8%。根据环流的天气特征, 受台风“烟花”影响, 印度洋和太平洋的湿气汇集为这次暴雨提供了充足的湿度条件; 在河南省, 太行山独特的地势对东南气流产生了强烈的辐合上升, 与强劲的东风急流和持续的低涡切变相结合, 导致了郑州等地出现了长时间的强降雨。

[关键词]郑州暴雨; 水汽源地; 水汽输送; 拉格朗日轨迹模式; 天气形势

DOI: 10.33142/hst.v8i9.17703

中图分类号: P458

文献标识码: A

Diagnostic Analysis of Water Vapor Transport Process of "July 20 Zhengzhou Rainstorm"

LIU Heyuan, ZHAO Su, YUAN Xiuzhong

Hydrological Bureau of Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, He'nan, 450004, China

Abstract: Using Lagrange trajectory tracking model and Euler method, this paper deeply discusses the water vapor source and formation mechanism of Zhengzhou Rainstorm on July 20, 2021 in He'nan. We studied the water vapor transport path and atmospheric circulation during the rainstorm to systematically reveal the causes behind it. Research has shown that the heavy rainfall that Zhengzhou experienced on July 20, 2021, was mainly caused by water vapor from the western Pacific and South China Sea regions. The main path of water vapor transport of this rainstorm is the moisture in the western Pacific Ocean, which first lands in Zhejiang or Jiangsu, and then enters He'nan through Anhui. At heights of 500m and 1000m, the water vapor contribution of this path reached 100% and 89.8%, respectively. According to the weather characteristics of the circulation, affected by the typhoon "Yanhua", the moisture concentration in the Indian Ocean and the Pacific Ocean provided sufficient humidity conditions for the rainstorm; In He'nan Province, the unique terrain of Taihang Mountains has caused strong convergence and upward movement of the southeast airflow, combined with strong easterly jet streams and sustained low eddies, resulting in prolonged heavy rainfall in Zhengzhou and other areas.

Keywords: rainstorm in Zhengzhou; water vapor source area; water vapor transport; Lagrange trajectory mode; weather situation

引言

2021 年 7 月 20 日, 河南省郑州及邻近地区出现了极端强降水天气, 郑州市当天的降水量刷新了历史记录。极端降水导致的洪灾已对我国经济和社会安全构成重大威胁, 且这种极端天气事件在未来将更为频繁^[1]。

暴雨的形成是多种天气和气流系统互动的结果, 其出现与周围环境息息相关。根据陶诗言等^[2]的研究, 产生暴雨的要求包括: 大气层的位势不稳定性、水汽在低层汇聚、位势不稳定释放机制, 以及低空或高空急流的存在。连续的强降水现象需要特定的大尺度环流条件。在研究大尺度环流时, 陶诗言^[3]着重指出低纬度环流系统的关键作用, 并表示我国的许多暴雨事件与热带环流系统密切相关。热带辐合带显得格外活跃时, 其北方暖湿气流可带来丰富水汽抵达华北地区, 遇到来自北方的冷空气时, 有可能产生不稳定层结, 并持续提供水汽供给。当大尺度环流保持稳定时, 可能导致长时间的暴雨天气。例如 1963 年的“63.8”华北持续性暴雨和 2012 年北京的“7·21”大暴雨^[4]。1998 年, 仇永炎^[5]进行了关于北方夏季台风暴雨的专项研究,

提出一种台风与西风槽相互影响的类型。他指出, 华北等北方地区出现强降雨的条件包括来自热带的持续水汽补给, 或台风向北移动并直接与西风槽互动。

由于强降水本身需要有充足的水汽输送, 越来越多研究开始着眼于与降水相关的水循环过程, 包括水汽源头、水汽输送路径以及降水终点。基于拉格朗日的轨迹追踪方法可以更直观清晰地表示水汽的运动轨迹, 并量化不同水汽源地对目标区降水的贡献^[6], 并得到气块在输送过程中的空间位置和物理属性随时间的变化规律。在这方面, HYSPLIT 模式较其他模式具有更好的性能^[7]。Rapolaki 等研究了非洲 Limpopo 流域 36 年夏季强降水的水汽来源, 副热带南印度洋对强降水贡献更多。Li 等根据环流形势将中国东南暴雨分为副热带高压西伸型、热带风暴型和强冷空气活动型等, 并详细分析了三种类型暴雨的水汽输送轨迹和水汽来源。江志红采用基于拉格朗日方法的轨迹模式 (HYSPLIT) 先后分析了 2007 年淮河流域强降水以及 1998 年长江流域特大洪水期的水汽来源和水汽输送特征, 并提出了水汽贡献率的计算方法。

结合上述研究,本文利用 NCEP 再分析资料,基于拉格朗日轨迹追踪模式,分析研究 2021 年 7 月 20 日河南省郑州暴雨的水汽来源、水汽输送轨迹和主要水汽通道,并在此基础上量化不同水汽源对降水输送的贡献率;同时运用 ERA5 再分析数据,采用欧拉方法探讨这次暴雨的气象环流状况。将上述两种方法所得结果相互对比、验证和补充,从而系统性地找出主导 720 郑州暴雨事件的水汽源及其贡献,深入分析此次暴雨形成的原因,以及台风对此次暴雨的影响,以为台风暴雨预报业务提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料

本文采用 2021 年 7 月 19 日~22 日 ERA5 大气环流再分析资料,用于郑州暴雨发生前后水汽通量场、风场和位势高度场等环流形势诊断,其时间分辨率为 6h,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$; 及 2021 年 7 月 NCEP GDAS 全球数据,用于驱动 MeteoInfo TrajStat 拉格朗日轨迹模式,模拟郑州暴雨的水汽输送状况,其时间分辨率为 6h,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$; 以及全国基本站逐小时降水资料,分析河南省暴雨的时空分布,河南省地形和测站分布如图 1 所示。

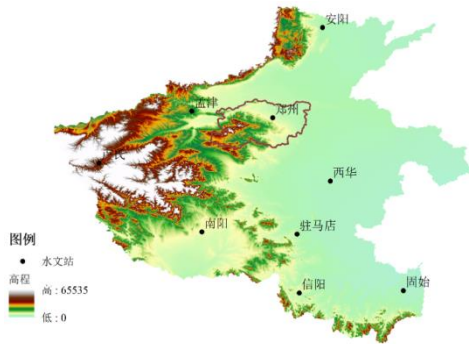


图 1 河南省和郑州地形图

1.2 方法

1.2.1 后向轨迹模式

MeteoInfo TrajStat 软件是基于 GIS 技术,利用 NOAA 开发的拉格朗日混合单粒子轨迹模式 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, HYSPLIT) 来计算气块运动轨迹。其中, HYSPLIT 是由美国国家海洋大气局 (NOAA) 等机构联合开发,该模式采用拉格朗日方法计算平流和扩散,模式采用 σ 地形坐标,可变时间步长 (本文取 $\Delta t = 1h$),垂直方向为 28 层,可用于处理输送、扩散、沉降过程的模式系统。

1.2.2 TSV 聚类方法

为了更清晰地展示不同路径,使用聚类分析法将众多轨迹进行分类。此方法的理念是根据轨迹之间的最大相似度,将多条轨迹整合并分类。空间方差指的是每条轨迹与其组内平均轨迹在各个点上的距离平方之和,而总空间方差 (Total Spatial Variance, TSV) 则是所有组空间方差之总和。在最佳聚类的情形下,总空间方差的增长率降到最低。

1.2.3 水汽通道贡献率计算公式

估算不同水汽输送通道对暴雨区的水汽贡献率,式如下:

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

式中, Q_s 表示某水汽源地的水汽贡献率, q_{last} 表示通道上最终位置处的比湿, m 是通道包含的轨迹数目, n 是轨迹总数。

1.2.4 水汽收支方程

整层水汽通量公式:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u d p \quad (2)$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v d p \quad (3)$$

水汽收支方程:

$$Q_{EW} = \int_{\lambda_s}^{\lambda_N} Q_u R d \lambda \quad (4)$$

$$Q_{SN} = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_v R \cos \varphi d \lambda \quad (5)$$

式中, u 为纬向风, v 为经向风, q 为比湿, λ_s 为南边界纬度, λ_N 为北边界纬度, λ_E 为东边界经度, λ_W 为西边界经度, R 为地球半径, Q_{EW} 和 Q_{SN} 分别表示通过东西和南北边界的水汽通量。

2 郑州暴雨降水特性及水汽收支

台风“烟花”在西太平洋于 7 月 18 日形成,在 7 月 21 日增强为强台风并达到其最高强度。此时,其中心位置处于西太平洋,距离浙江省温岭市东南约 720 公里。到 7 月 23 日,台风“烟花”已减弱为热带风暴。由于台风侵袭,河南省自 7 月 18 日起陆续出现降雨现象。至 7 月 20 日至 21 日,多个地区遭遇暴雨、强降雨以及极端暴雨。根据图 2 显示,7 月 19 日至 22 日期间,河南省降水量的分布表现出明显的特大暴雨带,主要集中在郑州和安阳地区,这些区域的地形梯度较大。降雨最集中的中心位于郑州。7 月 19 日~22 日郑州、安阳和西华累计降水量达 815.2mm、582.4mm 和 267.1mm (图 3 (a)),7 月 20 日 16:00 郑州一小时降水量达 201.9mm (图 3 (b)),为有记录以来最大值。此次郑州市的暴雨事件持续时间长,累计降雨量大,强降雨影响范围广,且在特定时间段内降雨集中。

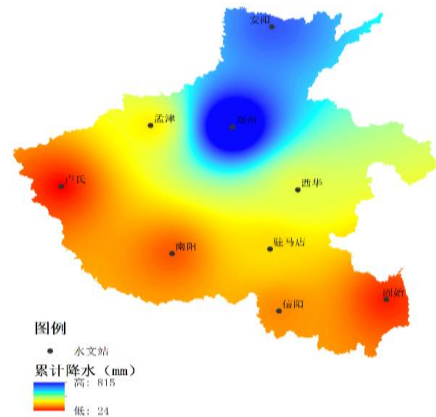
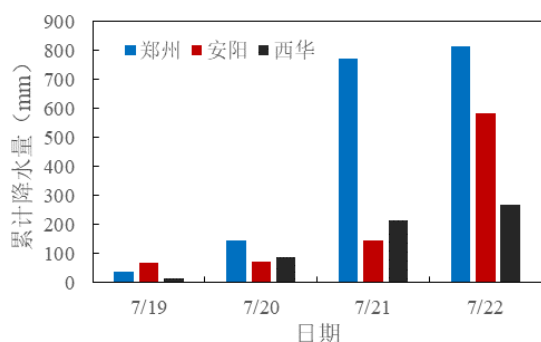
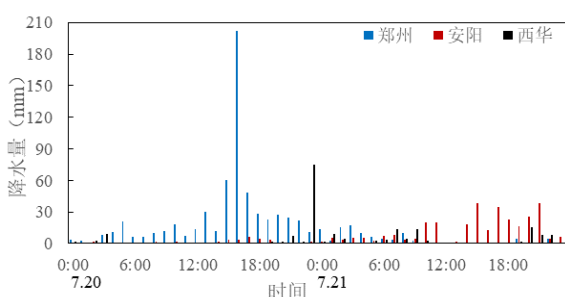


图 2 2021 年 7 月 19 日~22 日河南省累计降水量空间分布



(a) 7月19~22日累计降水



(b) 7月20~21日逐小时降水

图3 郑州、安阳和西华累计降水量和逐小时降水量

请详细使用水汽收支方程来分析郑州地区 ($112.5^{\circ} \sim 114.0^{\circ} \text{E}$, $34.0^{\circ} \sim 34.5^{\circ} \text{N}$) 暴雨发生前后的各边界水汽的收支状况 (如图4所示)。鉴于在 300hPa 以上高空区域存在较少的水汽, 本文选择从地表面积分计算到 300hPa 高度的水汽通量。根据图4的信息, 7月19日之前 (暴雨发生前), 水汽的流动主要是通过北部界限进入, 并从南部界限排出。自7月19日起, 南部边界的水汽输入迅速增多, 并成为主要来源。到7月20日, 其流量达到了峰值, 为 $92.3 \times 10^6 \text{ kg/s}$, 同时仍有少量水汽从东部边界进入; 北部边界角色迅速转变, 从提供水汽到成为主要的水汽输出区域。因此可以推断, 这次河南省郑州的暴雨得到了南部和东部边界丰沛的水汽供给, 对降水发挥了显著作用。水汽主要从西部和北部输送。

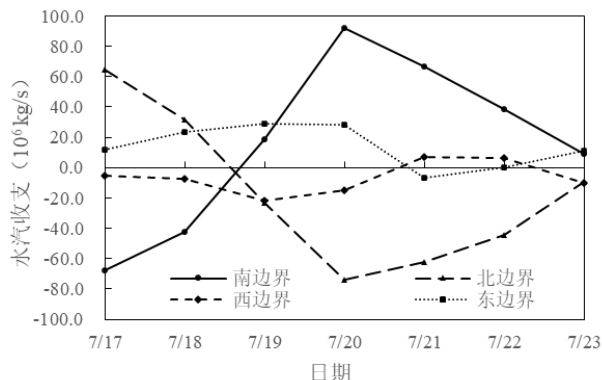


图4 2021年7月17日~23日郑州各边界水汽收支时间序列

上述内容分析了河南省郑州市的暴雨特性以及暴雨

地区的水汽收支情况, 显然, 外部水汽的输送为这次降水提供了适当的水汽条件。因此, 将利用后向轨迹模式来识别进入郑州地区的水汽输送路径, 并评估各路径对该区域水汽的贡献程度。

3 郑州暴雨水汽输送路径

3.1 后向轨迹模式模拟方案

选取郑州市内区域 ($34.4^{\circ} \sim 34.9^{\circ} \text{N}$, $113.1^{\circ} \sim 114.1^{\circ} \text{E}$), 运用 HYSPLIT 模式对 2021 年 7 月 19 日~7 月 22 日气块每一小时向后追踪 9d (水汽在大气中大约停留 9 天), 得到气块的三维运动轨迹。轨迹起始点的水平精度设定为 $0.25^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 垂直方向选择 500m, 1500m 和 3000m 作为初始高度, 这在表征水汽运送时效果更佳。总计模拟区域内有 36 个初始轨迹点。在 500m、1500m 和 3000m 这三个高度上, 每个高度分别获取了 864 条轨迹。同时, 通过插值法计算这些轨迹在相应位置的气块比湿值。根据 Malin 的研究, 在不出现相变时, 气块的比湿不会随周围温度和压力变化。因此, 可以使用轨迹中气块的比湿状况来表征水汽传输。通过使用聚类分析技术对各种路径进行分组, 有助于更加清晰地观察路径的分布特征。

3.2 水汽输送路径

图5展示了7月19日~22日郑州暴雨的水汽通道, 从 500m 到 3000m 输送的水汽依次减少, 不同高度各水汽通道贡献见表1。其中, 500m 高度的轨迹聚类后得到 5 条轨迹簇 (图5(a)), 均来自西太平洋并从浙江或江苏登陆, 经过安徽进入河南, 这是此次暴雨 500m 高度最主要的水汽通道。通道1和4均携带了西太平洋水汽且经过日本后进入中国大陆, 其水汽贡献较高, 分别为 35.7% 和 22.0%。通道3发源于东海附近, 可能受台风气旋的影响气流发生逆时针旋转, 到日本后继续深入中国大陆, 其水汽贡献率为 19.4%。

在 1500 米的高度进行轨迹聚类分析后, 结果显示形成了 7 个轨迹簇 (见图5(b)), 与 500m 高度的轨迹类似, 这些路径均源自西太平洋地区。主要水汽通道 (除通道1) 仍然是从浙江或江苏登陆后经过安徽进入河南, 此部分水汽比例约占 89.8%。通道1较为特殊, 通过台湾在福建登陆, 经过江西、湖北进入河南, 此部分水汽所占比例较少, 约为 10.2%。

3000m 高度的轨迹聚类后得到 3 条轨迹簇 (图5(c)), 通道1和3来源于西太平洋从福建和浙江登陆, 经过广西、湖北进入河南, 此部分水汽所占比例约为 51.5%。通道2由中国南海向北输送的气流聚类而成, 从广东登陆, 经过湖南、湖北进入河南, 此部分水汽约占 48.5%。

总的来说, 郑州特大暴雨的水汽通道可以分为两类: 其一是连接到台风气旋的水汽路径, 来源于西太平洋, 是这次暴雨的主要水汽来源; 一条从南海出发的水汽轨迹与南海的夏季风紧密相连。这项研究清晰地指出, 水汽的主要来源可分类为来自南部和东部的两条路径。

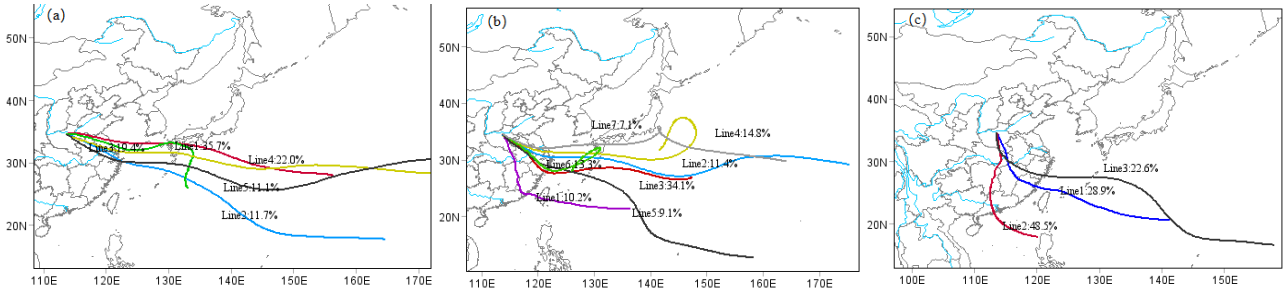


图5 2021年7月19~22日郑州暴雨水汽输送路径(216h)空间分布及水汽贡献(a)500m(b)1500m(c)3000m

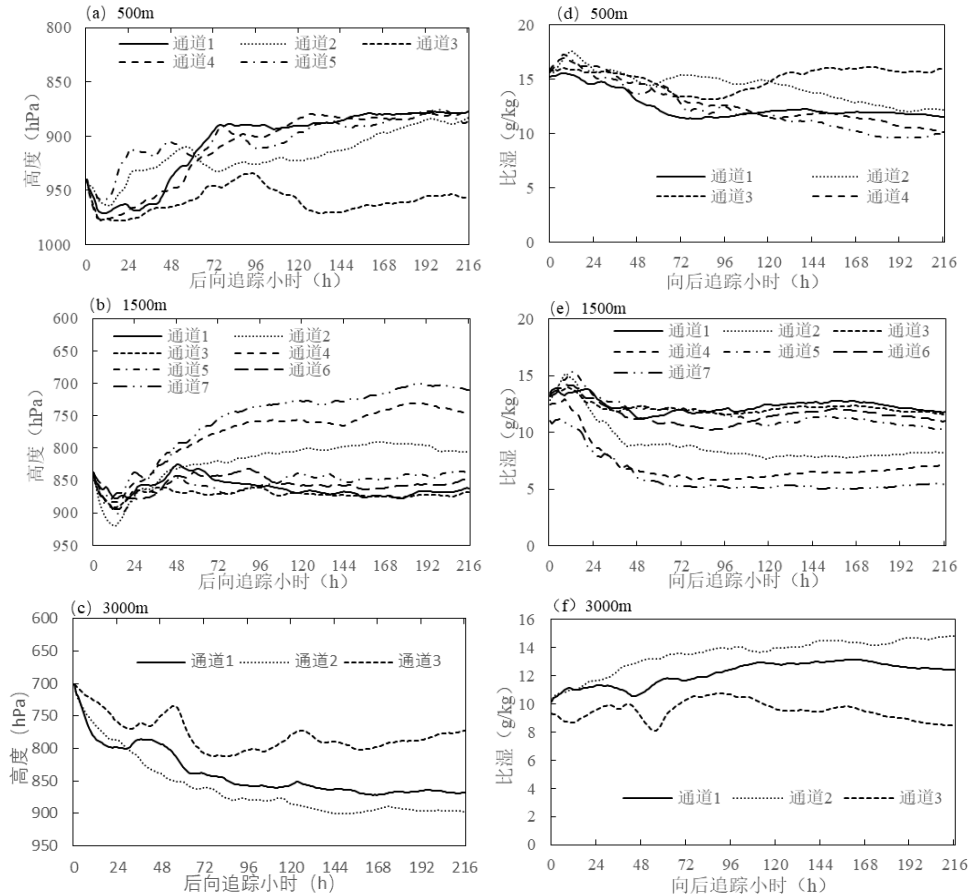


图6 水汽输送过程中通道的高度(a-c)和比湿(d-f)随时间的变化

表1 三个高度层各通道的水汽贡献

高度层	水汽贡献率(%)						
	通道1	通道2	通道3	通道4	通道5	通道6	通道7
500m	35.7%	11.7%	19.4%	22.0%	11.1%	/	/
1500m	10.2%	11.4%	34.1%	14.8%	9.1%	13.3%	7.1%
3000m	28.9%	48.5%	22.6%	/	/	/	/

图6显示了水汽传输过程中,各个通道内气块高度和比湿随时间改变的状况。不同高度层的初始值一般介于700~950hPa之间,且大部分通道初始高度约在900hPa,其初始比湿范围为5~16g/kg。在降水的前一天,位于500m和1500m高空的气块先下沉后再上升,此过程导致比湿值先减少后增加。在海拔3000m时,降水前一天,

空气团上升时其比湿度会减少。

4 环流形势

为了更全面地研究暴雨为何在郑州发生并持续数日,以及探讨与台风“烟花”的联系,我们进一步应用ERA5再分析数据来研究7月19日至22日的气候环流情况。

暴雨发生和持续的条件之一是要有源源不断的水汽输送和水汽辐合,仅靠当地已有的水汽是无法形成暴雨的,因此分析水汽通量及水汽通量散度是非常有必要的。图7展示了7月19日~22日整层水汽输送通量及整层水汽通量辐合(MFC),台风“烟花”增强后,与西南水汽强烈相互作用,南亚季风和东亚季风汇合从低纬吹向高纬,携带了大量的水汽并且辐合上升,为暴雨产生创造了充足的水汽条件。台风“烟花”的涡轮助推,印度洋、太平洋的

水汽合流,源源不断的水汽输送造成了此次特殊的天气形势。7月21日和22日,东南风逐渐转为南风,水汽继续北上,河南省郑州等区域暴雨逐渐减弱。

2021年7月19~22日期间的500hPa位势高度场和850hPa风场的合成图见图8。由该图可以推断出,西太平洋副热带高压显著向北抬升,并稳固地位于日本海。这一状况阻挡了上游系统的移动,使得西风带中的低压系统在华北和黄淮地区持续存在。由于强劲的东风急流和稳定的低涡切变的影响,加上河南的太行山和伏牛山特殊地形(见图1)对东南气流的强烈辐合和上升作用,导致强降雨中心主要稳定在河南西部和西北部沿山区。这些因素造成了郑州等地长时间的降水天气。

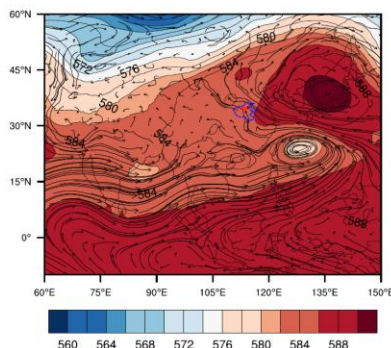


图8 2021年7月19~22日500hPa位势高度场(dagpm)和850hPa风场(m/s)合成

图9展示了2021年7月19~22日郑州上空纬向风和垂直速度合成的气压-纬度垂直剖面图,当东南风携带大量的水汽进入河南省郑州并发生下沉运动,由于受到太行山和伏牛山等地形阻挡,垂直方向上水汽被迫抬升,上升

气团绝热冷却达到露点温度,空气中水汽达到饱和而凝结成云,从而造成了在郑州形成持续多天的暴雨。

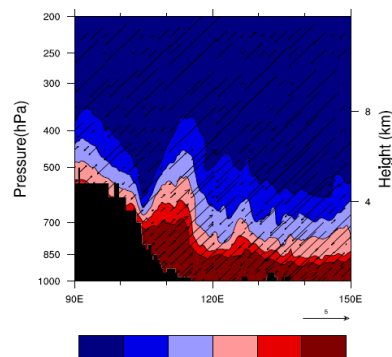


图9 2021年7月19~22日郑州上空纬向风和垂直速度合成的气压-纬度垂直剖面图

5 结论

本文基于拉格朗日法的后向轨迹模式(HYSPLIT),模拟了2021年7月20日河南省郑州暴雨的水汽输送轨迹,明确了水汽源地和水汽贡献,并结合欧拉法分析暴雨发生期间的环流形势,两者相互验证、补充,深刻揭示了河南省郑州暴雨形成的原因。主要结论如下:

(1) 由于台风“烟花”的影响,河南省普遍出现了暴雨和大暴雨现象。2021年7月19日~22日郑州累计降水量达815.2mm,其中在7月20日16时,郑州一小时内的降水量高达201.9mm,突破历史极值。在郑州暴雨期间,主要有大量外部水汽从南部和东部边界渗入,然后通过北部和西部边界排出。

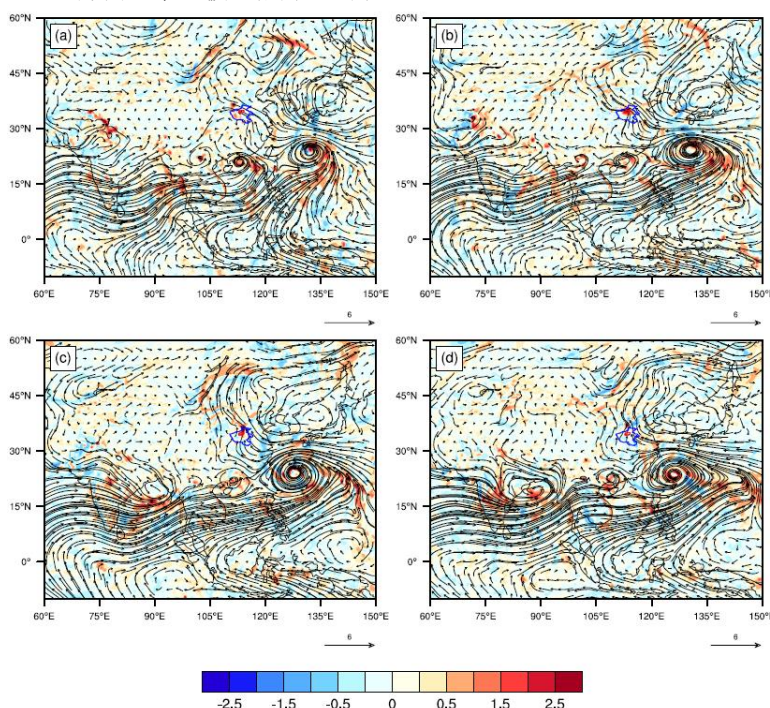


图7 整层水汽输送通量($10^5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)及水汽通量辐合($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (a) 2021年7月19日 (b) 20日 (c) 21日 (d) 22日

(2)2021年7月20日,河南省郑州遭受暴雨袭击,其水汽来源地主要包括两个区域:西太平洋和南海。其中500m和1500m高度的水汽主要由西太平洋提供,从浙江或江苏登陆,经过安徽进入河南,水汽贡献分别为100%和89.8%。3000m高度的水汽有两类,一类源于西太平洋从福建和浙江登陆,经过广西、湖北进入河南,水汽贡献约为51.5%;一类由中国南海向北输送的气流聚类而成,从广东登陆,经过湖南、湖北进入河南,水汽贡献约为48.5%。

(3)大部分轨迹初始高度约在900hPa,初始比湿在5~16g/kg。在500m和1500m高度上,降水发生前1日,气块均经历了下沉后又上升,对应比湿值也随之降低和升高;3000m高度上,降水发生前1日,气块上升,比湿降低。

(4)台风“烟花”像涡轮一样助推,汇集印度洋和太平洋的水汽,持续不断地输送水汽,为这次暴雨带来了丰富的水汽供给。由于强劲的东风急流和稳固的低涡切变作用,再加上河南省太行山和伏牛山的特殊地形对东风气流的强烈聚合和抬升作用,为此次暴雨创造了有利的动力环境。西太平洋副热带高压异常向北移动并稳固驻留在日本海,阻挡上游气候系统的移动,结果是西风带低压系统在华北和黄淮地区停留过久,使得强降水中心集中在河南

省西部和西北部沿山区域几乎没有变动。这导致河南郑州经历了一连几天的暴雨。

[参考文献]

- [1]陶诗言.有关暴雨分析预报的一些问题[J].大气科学,1977,1(1):64-72.
 - [2]陶诗言.中国之暴雨[D].北京:科学出版社,1980.
 - [3]柳艳菊,丁一汇,张颖娴,等.季风暖湿输送带与北方冷空气对“7·21”暴雨的作用[J].热带气象学报,2015,31(6):721-732.
 - [4]仇永炎.北方盛夏台风暴雨的一些问题[M].北京:气象出版社,1998.
 - [5]王佳津,王春学,陈朝平,等.基于HYSPLIT4的一次四川盆地夏季暴雨水汽路径和源地分析[J].气象,2015,41(11):1315-1327.
 - [6]江志红,梁卓然,刘征宇,等.2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析[J].大气科学,2011,35(2):361-372.
 - [7]江志红.1998年长江流域特大洪涝期水汽输送过程的诊断分析[J].大气科学学报,2017,40(3):289-298.
- 作者简介:刘和远(1984.10—),单位名称:黄河水利委员会水文局,毕业学校和专业:河海大学,水利工程。