

从气候学角度理解“21.7”河南特大暴雨的形成机理

张智煜^①,黄安宁^{①②*},黄丹青^{①**},赵大军^③,张艳^④,顾春雷^①,陈爽^①

① 南京大学 大气科学学院,江苏 南京 210023;

② 中国科学院 青海湖综合观测研究站,青海 刚察 812300;

③ 中国气象科学研究院 灾害天气国家重点实验室,北京 100081;

④ 国家卫星气象中心,北京 100081

* 联系人, E-mail: anhuang@nju.edu.cn

** 联系人, E-mail: huangdq@nju.edu.cn

2024-05-15 收稿, 2024-06-17 接受

国家自然科学基金项目(U2342207;42075020);灾害性天气国家重点实验室开放资助项目(2021LASW-A12);南京大学关键地球物质循环前沿科学中心研究基金中央高校基本科研业务费(020914380103;020914380104);江苏省气候变化协同创新中心资助项目

摘要 2021年7月19—22日,河南省遭遇历史罕见特大暴雨,破纪录降水引发了严重的洪涝灾害。目前,“21.7”河南特大暴雨的研究大多针对降水个例,引发极端降水的气候学机制仍不明确。本文基于谱聚类方法,利用中国气象局多年历史站点降水资料和NCEP/NCAR再分析数据研究了1960—2021年华北地区夏季区域性极端降水事件的主控环流天气型,系统揭示了“21.7”河南特大暴雨的发生过程。结果表明,“21.7”河南特大暴雨发生在罕见天气型下,即西太平洋上空增强的远距离台风配合异常偏西北的西太平洋副热带高压与异常偏东北的南亚高压。该天气型虽然仅贡献了华北地区夏季区域性极端降水事件的5.97%,却易导致更强的极端降水事件。台风和副高之间的盛行东南风将水汽从西太平洋输送到河南,对流层高低层强烈的风切变引发的垂直上升运动导致了“21.7”河南暴雨的发生。河南及周边地区对流层低层更加强烈的上升运动与非绝热加热之间的正反馈效应使得“21.7”河南暴雨相对同一天气型下的其他特大暴雨事件的极端性更强。本研究为理解和准确预测类似“21.7”河南暴雨的破纪录区域性极端降水提供了全新的气候学视角。

关键词

“21.7”河南特大暴雨;
区域性极端降水事件;
天气分型;
谱聚类

随着全球变暖的影响不断加剧,极端天气气候事件频繁发生,给社会、经济、生态和人身安全造成越来越大的威胁(Douville et al., 2021)。其中,极端降水事件因其短时间内降水强度大、影响范围集中、易发生次生灾害等特点,对人类社会和生态系统造成了严重影响(袁冯等, 2020; Qin et al., 2021; 孙思远, 2021)。IPCC第六次科学报告内容称,极端降水事件在全球范围内显著增加,且在人类活动导致全球变暖的影响下,大气不稳定性持续增强,未来此类事件还将进一步加剧(Seneviratne et al., 2021)。华北地区夏季受季风影响较大,对环境和气候变化具

有高敏感性,极端降水影响显著(Luo et al., 2016; Wu et al., 2016; 方浩和乔云亭, 2019; 汤彬等, 2023)。此外,华北地区独特的地形与复杂的地表条件使得当地夏季更易发生区域性极端降水,尤其是在7月和8月(Li et al., 2015; Sun et al., 2019)。

“21.7”河南特大暴雨发生在2021年7月19—22日,是一场史无前例的区域性极端强降水事件(Yu et al., 2022; Sun et al., 2023),也是河南省自1960年以来发生的第二大暴雨(Xu H X et al., 2022b)。此次降水事件在华北地区造成了大范围的极端降水和严重的洪涝灾害,具有历史罕见、持续时间长、影响范围广

引用格式:张智煜,黄安宁,黄丹青,等,2024.从气候学角度理解“21.7”河南特大暴雨的形成机理[J].大气科学学报,47(5):681-700.

Zhang Z Y, Huang A N, Huang D Q, et al., 2024. Understanding the formation mechanism of the “21.7” extreme heavy rainfall event in Henan, China from a climatic perspective [J]. Trans Atmos Sci, 47(5): 681-700. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240515001. (in Chinese).

等特征。“21.7”河南特大暴雨发生期间,郑州站最大日降水量达624.1 mm,超过历史最大日降水量的3倍(Cheng et al.,2022;Li C J et al.,2022)。此外,郑州站小时降水量高达201.9 mm,打破了中国内陆地区小时降水纪录(Li W et al.,2022;齐道日娜等,2022)。短时间内降水量巨大的“21.7”河南特大暴雨事件给当地政府和居民造成了严重的经济损失和安全威胁,导致300多人死亡和约1 000亿元人民币的直接经济损失(Huang et al.,2022)。

许多研究表明,“21.7”河南特大暴雨是由不同层次环流系统之间复杂的多尺度相互作用引起的(梁旭东等,2022;Zhu Z et al.,2022)。异常偏西偏北的500 hPa西太平洋副热带高压、异常偏东偏北的100 hPa南亚高压、位于西北太平洋上空的台风“烟花”和南海上空的台风“查帕卡”以及黄淮低涡相互作用,为河南暴雨事件的形成提供了丰富的水汽和能量(Li C et al.,2022;Ma Y et al.,2022;汪小康等,2022)。特定的多尺度对流系统,如中尺度涡旋(Si et al.,2021;Li W L et al.,2022;Sun et al.,2023)、低空急流(汪小康等,2022)和平流层位涡(Zhu et al.,2022),为此次事件创造了有利的环流背景。中尺度系统如双台风(Deng et al.,2022)和大尺度系统如西太平洋副热带高压(Huang et al.,2022)之间的相互作用也对此次降水事件产生了重要影响。基于卫星数据的“21.7”河南特大暴雨期间降水微物理过程的检验评估结果表明,风切变对流系统对导致更高降水极值的大尺度强迫更加敏感(Chen et al.,2022;Qin et al.,2022)。关于地形和城市化影响的数值模拟研究也强调了地表的增强作用对“21.7”河南特大暴雨的影响(Du et al.,2022;Luo et al.,2023)。然而,这些集中在“21.7”河南特大暴雨影响因素的个例研究无法从气候学角度给出总体环流特征,特别是对于罕见的异常降水极端情况。

天气型是指给定天气尺度区域内的某一特定环流类型,其特征区别于同一区域内的其他天气型,且每天都会发生变化(Luo et al.,2016;Neal et al.,2020)。区别于传统的分类方法(Huang et al.,2018;Ma Q R et al.,2022;Xu J et al.,2022b),基于机器学习算法的聚类方法,如K-means聚类算法、层次聚类算法和自组织映射神经网络(self-organizing map,SOM)等(Hu et al.,2019;Ohba and Sugimoto,2019;Tuel and Martius,2022)已被广泛应用于天气型识别。已有研究表明,华北地区夏季极端降水的主控环流天气型主要以增强的东亚夏季风

和异常偏西北的西太平洋副热带高压为特征(Sun et al.,2015;Zhao et al.,2019;Tang et al.,2021)。部分研究分类总结了“21.7”河南特大暴雨主控环流天气型的一般特征,发现河南省北部的西太平洋副热带高压正异常与南部的低涡负异常共同导致的东南风水汽通道输送是该次事件的主导环流因素(Xu J et al.,2022a;Zhang et al.,2022)。一些研究还比较了同一天气型下的特定极端强降雨事件个例,如“21.7”河南特大暴雨和“75.8”河南特大暴雨(Liu Y et al.,2021;Li Z et al.,2022)。然而,这些研究的结果均未能完全概括造成“21.7”河南特大暴雨罕见主控环流天气型的多层次一般特征与代表性天气系统。这种罕见天气型发生频次很低,但在华北地区夏季区域性极端降水中具有显著的极端特征。这可能是由于大多数涉及主控环流天气型的研究都是以某一特定高度层的环流场作为天气型分类对象(Hu et al.,2019;Xu J et al.,2022a;Wu et al.,2023),未考虑大尺度环流形成的三维空间配置。此外,大多数研究直接使用了华北地区指定经纬度范围内站点的极端降水记录进行聚类,而忽视了极端降水的区域连续性与特征环流天气型之间的相关关系。仅考虑单个站点极端降水记录可能会错误地将小规模的不连续极端降水事件归并到区域性极端降水分类中,从而高估区域性极端降水事件发生的频次(Tu et al.,2011;Ren et al.,2012)。

本研究将基于谱聚类方法(Neal et al.,2020)确定1960—2021年华北地区夏季区域性极端降水事件的主控环流天气型,进一步研究“21.7”河南特大暴雨对应的天气型特征,揭示此类区域性极端降水的形成机制。我们将回答以下3个问题:1)华北地区与“21.7”河南特大暴雨对应的典型环流天气型是什么?2)在这种天气型下,“21.7”河南特大暴雨是如何发生的?3)在相同的天气模式下,“21.7”河南特大暴雨和其他特大暴雨事件有什么异同?

1 资料和方法

1.1 资料与插值方法

1)中国气象局国家气象信息中心提供的1960—2021年夏季6—8月逐12 h的站点观测降水数据。该数据分为夜间和日间两个时间段进行降水观测值记录,其中夜间定义为北京时间前一日20:00到当日08:00,日间定义为北京时间当日08:00到当日20:00。使用Python Scipy库中的二维线性插值函数,将站点记录插值为网格记录,以获得与再分析数据分布匹配

的降水数据(Virtanen et al.,2020)。

2)美国国家环境预测中心、美国国家大气研究中心(NCEP/NCAR)1960—2021年夏季逐6h再分析数据,水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、垂直方向层数17层(<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>),包含了位势高度、水平风、垂直风速、气温、绝对湿度、相对湿度、可降水量等物理参数(Kalnay,1996)。本研究将逐6h数据处理为每日00:00—12:00、12:00—24:00(世界时)两个时间间隔的平均值(对应北京时间08:00—20:00、20:00—次日08:00),以匹配每12h观测降水时间序列,以便后续对华北地区夏季区域性极端降水的环流天气型进行讨论研究(Ma Y et al.,2022;Zhu C et al.,2022)。

1.2 区域性极端降水、南亚高压和西太平洋副热带高压定义

百分位数法是用于定义极端降水阈值的常见方法(Bonsal et al.,2001;Li et al.,2017)。本研究中,我们使用95百分位法定义了单站的极端降水和区域性极端降水。基于1960—2021年62个夏季的逐12h降水量数据,计算了选定区域内每个站点强度 $\geq 0.1 \text{ mm} \cdot (12 \text{ h})^{-1}$ 的所有历史降水记录的第95个百分位阈值。当降水记录在给定时间和给定的每个站点超过第95百分位阈值时,即为一次极端降水。在单站极端降水的基础上,我们综合Xie et al.(2018)和Tang et al.(2021)的方法,进一步定义了区域性极端降水,即首先统计选定区域内1960—2021年62个夏季每12h同时出现极端降水的站点数量,继而将同时出现极端降水的站点数(≥ 1)按从小到大排序,进而取第95个百分位数的站点数作为判定该地区是否发生区域性极端降水事件的阈值,当同时发生极端降水的站点数超过这一阈值时则发生了一次区域性极端降水事件。本研究选定了华北平原及其周边地区($110^{\circ} \sim 122.5^{\circ} \text{ E}$, $30^{\circ} \sim 42.5^{\circ} \text{ N}$,简称“华北地区”)作为区域性极端降水研究关键区(Xu J et al.,2022a)。在1960—2021年62个夏季逐12h时间序列中,华北地区(862个雨量站)区域性极端降水的站点数阈值为50,并以此阈值检测到469个区域性极端降水事件。

本研究中,南亚高压(South Asia high,SAH)的边界线由100 hPa高度层上16760 gpm等位势高度线表示(谭晶等,2005),西太平洋副热带高压(western Pacific subtropical high,WPSH)的边界线由500 hPa高度层上5880 gpm等位势高度线表示(Wei et al.,2014)。

1.3 机器学习谱聚类算法

谱聚类方法(spectral clustering)是一种无监督的机器学习聚类算法,现已广泛应用于识别复杂数据中具有相似模式的组(von Luxburg,2007;Nascimento et al.,2011)。与K-means方法等传统聚类算法相比,谱聚类往往聚类效果表现更佳,因为它计算量小,可以收敛到全局最优,且能适应任意形状的样本空间(Jia et al.,2014)。在本研究中,我们使用了Python Scikit-learn机器学习库中的函数(Pedregosa et al.,2011),将谱聚类方法应用于1960—2021年62个夏季华北地区469个区域性极端降水事件发生期间不同高度层(925、850、750、500和200 hPa)水平风场的天气型分析。首先,对每个网格的水平 u 和 v 分量的时间序列进行归一化,并将三个空间维度(纬度、经度和垂直层数)展平为一维数组。然后,通过把 v 数组直接连接在 u 数组之后的方式,将 u 和 v 的两个一维数组(时间和空间)合并在一起,形成用于谱聚类的输入数据(Tang et al.,2021)。在设置聚类组数时,通过Calinski-Harabasz评分比较不同聚类组数的聚类效果,确定了最优聚类组数为3组。最后,通过多轮调试,得到了聚类时间序列结果,以及与时间序列相对应的3个天气型合成结果,以此作为华北地区区域性极端降水事件的主控环流天气型。测试结果表明,对华北地区范围划分的微小调整不会对聚类结果造成显著差异。

1.4 对流有效位能定义

对流有效位能(convective available potential energy,CAPE)是大气参考气块在给定环境上升过程中正浮力获得的能量的垂直积分,是可能发生深层对流的环境中最密切相关的量(Doswell and Rasmussen,1994)。本研究中使用Python MetPy库中的函数(May et al.,2022),采用自由对流高度(level of free convection,LFC)和平衡高度(equilibrium level,EL)之间的给定高空剖面 and 气体元路径进行计算(Wallace and Hobbs,2006),计算公式可以写成:

$$E_{\text{CAP}} = -R_d \int_{h_{\text{LFC}}}^{h_{\text{EL}}} (T_{\text{v,parcel}} - T_{\text{v,env}}) d \ln p. \quad (1)$$

其中: R_d 是干空气气体常数 $287.04 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$; $T_{\text{v,parcel}}$ 是气体元虚温; $T_{\text{v,env}}$ 是环境虚温。

1.5 准地转垂直运动诊断

准地转垂直运动诊断方程是大尺度环流天气型垂直运动诊断和动力学机制量化的基本方法。它可以写成(Bluestein,1992):

$$\left(\nabla_p^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right) \omega = \omega_{\text{vor}} + \omega_{\text{temp}} + \omega_{\text{dia}} \quad (2)$$

其中: $\nabla_p^2 = \frac{\partial_p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial_p^2}{\partial y^2}$, 下标 p 表示该过程基于等压面;

静力稳定性参数 $\sigma = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{Pa}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}$, 科里奥利参数设定在典型天气的 f_0 值为 10^{-4} s^{-1} 。在方程(2)的右边, 三个主要强迫项 ω_{vor} 、 ω_{temp} 和 ω_{dia} 分别表示涡度平流项、温度平流项和非绝热加热项。此三项可以进一步表示为 (Zhou et al., 2011):

$$\omega_{\text{vor}} = \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} [\mathbf{V}_g \cdot \nabla_p (\zeta_g + f)], \quad (3)$$

$$\omega_{\text{temp}} = \frac{R_d}{\sigma p} \nabla_p^2 [\mathbf{V}_g \cdot \nabla_p T], \quad (4)$$

$$\omega_{\text{dia}} = -\frac{R_d}{\sigma c_p p} \nabla_p^2 \frac{dQ}{dt} \quad (5)$$

其中: $\nabla_p = \left(\frac{\partial_p}{\partial x} \right) \mathbf{i} + \left(\frac{\partial_p}{\partial y} \right) \mathbf{j}$, 矢量 \mathbf{i} 和 \mathbf{j} 分别表示纬向和经向计算的基本方向。干空气的气体常数 $R_d = 287.04 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 干空气的比定压热容 $c_p = 1004 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, 绝对涡度在垂直方向上可拆分为相对涡度 ζ_g 和地转涡度 f 。

根据 Yanai et al. (1973) 的研究, 表观热源 Q_1 可以表示为:

$$Q_1 = c_p \frac{\partial T}{\partial t} - c_p (\omega \sigma_p - \mathbf{V}_g \cdot \nabla_p T) \quad (6)$$

其中: 静力稳定度可表示为 $\sigma_p = \frac{RT}{c_p p} \frac{\partial T}{\partial p}$; 非绝热加热速率 $\frac{dQ}{dt} = Q_1$ (Strahl et al., 2001; Hsu and Li, 2011; Zhang J et al., 2023)。

2 “21.7”河南特大暴雨的降水和环流背景

“21.7”河南特大暴雨以 624.1 mm 的日最大降水量打破了历史纪录 (Liu C et al., 2021)。如图 1a 所示, 2021 年 7 月, 日平均降水中心位于河南省西北部。而“21.7”河南特大暴雨期间, 在河南省北部出现了日平均降水量超过 $200 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的降水中心 (栗晗等, 2022; 刘侃等, 2023), 且降水中心均位于太行山与伏牛山东侧迎风坡 (图 1b)。河南省及华北地区东南部一带 2021 年 7 月降水量较气候平均值偏大 160% (图 1c); “21.7”河南特大暴雨期间 3 d 累计降水量对 2021 年 7 月河南省及周边地区总降水量的贡献率在 30%~60% 之间, 超过 60% 的高贡

献率中心主要位于河南省中北部 (图 1d)。因此, 2021 年 7 月河南省降水量远超气候平均值, 而“21.7”河南特大暴雨仅 3 d 降水量就占 2021 年 7 月降水总量的 60% 以上, 降水量极端性突出。

图 2 给出了“21.7”河南特大暴雨期间 3 d 平均环流配置。河南省上空稳定东伸的 100 hPa 南亚高压和东侧不断西伸北抬的 500 hPa 西太平洋副热带高压 (图 2a) 为“21.7”河南特大暴雨的发生提供了有利的中高层环流背景 (王倩等, 2019)。与此同时, 不断发展的远距离台风“烟花”和“查帕卡”相互作用, 引导台风北缘对流层低层的东南气流, 将水汽从西太平洋输送到华北地区 (图 2b), 为河南省极端降水的发生提供了充足的水汽条件 (Xu H X et al., 2022b)。河南省东侧不断西伸北抬的西太平洋副热带高压、高空稳定控制的南亚高压和低层强度不断增大的远距离双台风的大尺度环流配置, 在河南省上空引发了对流层高低层强烈的垂直风切变, 使得 850 和 200 hPa 高度层之间的风散度差出现显著负异常 (图 2c), 进一步引发了垂直方向一直延续到中高层的强烈的上升运动 (图 2d)。“21.7”河南特大暴雨稳定的高低层环流配置引发持续的水汽输送与强烈的上升运动, 有利于郑州上空极端降水的形成和发展。远距离台风、异常偏西的西太平洋副热带高压和异常偏东北的南亚高压的大尺度环流配置引发了有利的环流、水汽和动力条件, 对“21.7”河南特大暴雨的产生具有较大贡献。

图 3 进一步分析了“21.7”河南特大暴雨期间每 12 h 同时出现极端降水的站点分布, 以及西太平洋副热带高压、南亚高压、台风“烟花”和“查帕卡” (Xu H X et al., 2022a)、850 hPa 高度水平风场等的演变情况。7 月 19 日 08:00—22 日 08:00, 在“21.7”河南特大暴雨持续的 3 d 降水过程中, 连续 60 h 出现了 5 次区域性极端降水 (图 3b—f)。在“21.7”河南特大暴雨的第一阶段 (7 月 19 日 08:00—20:00), 副高强度较弱、西伸不明显, 南亚高压偏东偏北, 双台风强度与距离均较大, 此时同时出现极端降水的站点数未达区域性极端降水事件阈值。第二阶段 (7 月 19 日 20:00—21 日 08:00), 西太平洋副热带高压西伸北抬、强度增大, 南亚高压继续东伸, 影响范围扩大, 台风“烟花”向浙闽西部沿海靠近、强度增大, 并与“查帕卡”形成相互作用, 华北地区上空盛行东南风显著增强, 此阶段均为区域性极端降水事件, 且同时出现极端降水的站点数不断增加。其中, 7 月 20 日 20:00—21 日 08:00, 同时

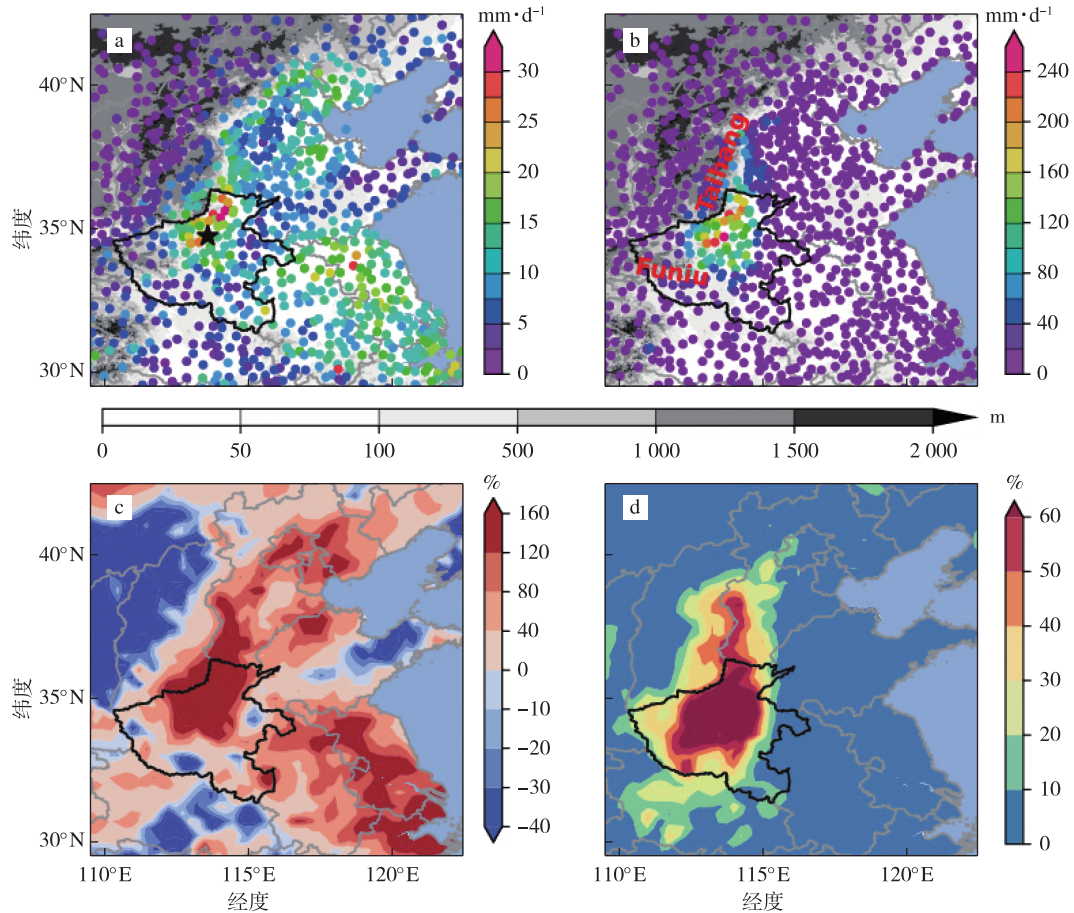


图1 2021年7月(a)和7月19日08:00—22日08:00期间(b)华北地区平均降水量的空间分布(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)。(a)和(b)中的彩色圆点(右侧颜色条)和灰色阴影(下方颜色条)分别表示降水量和地形高度。(c)和(d)分别显示了2021年7月降水相对于1960—2021年气候平均值的异常百分比空间分布以及“21.7”河南特大暴雨期间3 d累计降水量对2021年7月总降水量的贡献(单位:%)。(a)中黑色星星代表郑州市的位置,(b)中红色“Taihang”和“Funiu”分别表示太行山和伏牛山的位置。所有子图中黑色边界线均代表河南省的位置(下同)

Fig.1 Spatial distribution of mean precipitation (a) in July 2021 and (b) during 08:00 BST on July 19 to 08:00 BST on July 22, 2021 over North China Plain (units: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$). The colorful dots (right color bar) and black shadings (bottom color bar) in (a) and (b) show the precipitation amount and terrain height, respectively. Spatial distribution of precipitation anomaly percentage in July 2021 relative to the climatic mean of 1960—2021 and the contribution of the 3 d accumulated precipitation during the “21.7” EHRE(extreme heavy rainfall event) to the total rainfall in July 2021 are shown in (c) and (d), respectively (units: %). Black star in (a) represents Zhengzhou city, red characters of “Taihang” and “Funiu” in (b) indicate the location of Taihang Mountain and Funiu Mountain, and black boundary contours in all subplots highlight the Henan Province, China (same as below)

出现极端降水站点数最多达92个(图3d),此时段郑州站逐12 h降水超过 $150 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,达到降水次峰值。第三阶段(7月21日08:00—22日08:00),副高略微东退,南亚高压略微西退,双台风相互作用不断增强,盛行东南风略微减弱,并有转为南风趋势,此阶段仍均为区域性极端降水事件,但同时出现极端降水的站点数有所减少,且站点分布有向北移动的趋势。在“21.7”河南特大暴雨的3 d降水过程中,副高西伸北抬配合加强的双台风相互作用,导致华北地区上空的盛行东南风前期强度增加、后期小

角度转向,这是使得极端降水站点数增加、雨带北移的重要原因(梁旭东等,2022)。

3 华北地区夏季区域性极端降水主导环流天气型和“21.7”河南特大暴雨对应的天气型特征

大尺度环流背景对触发“21.7”河南特大暴雨至关重要(冉令坤等,2021; Jin et al., 2022; Yin et al., 2022; Zhu et al., 2022)。为了确定造成历史上类似于“21.7”河南特大暴雨的区域性极端降水事件的主导

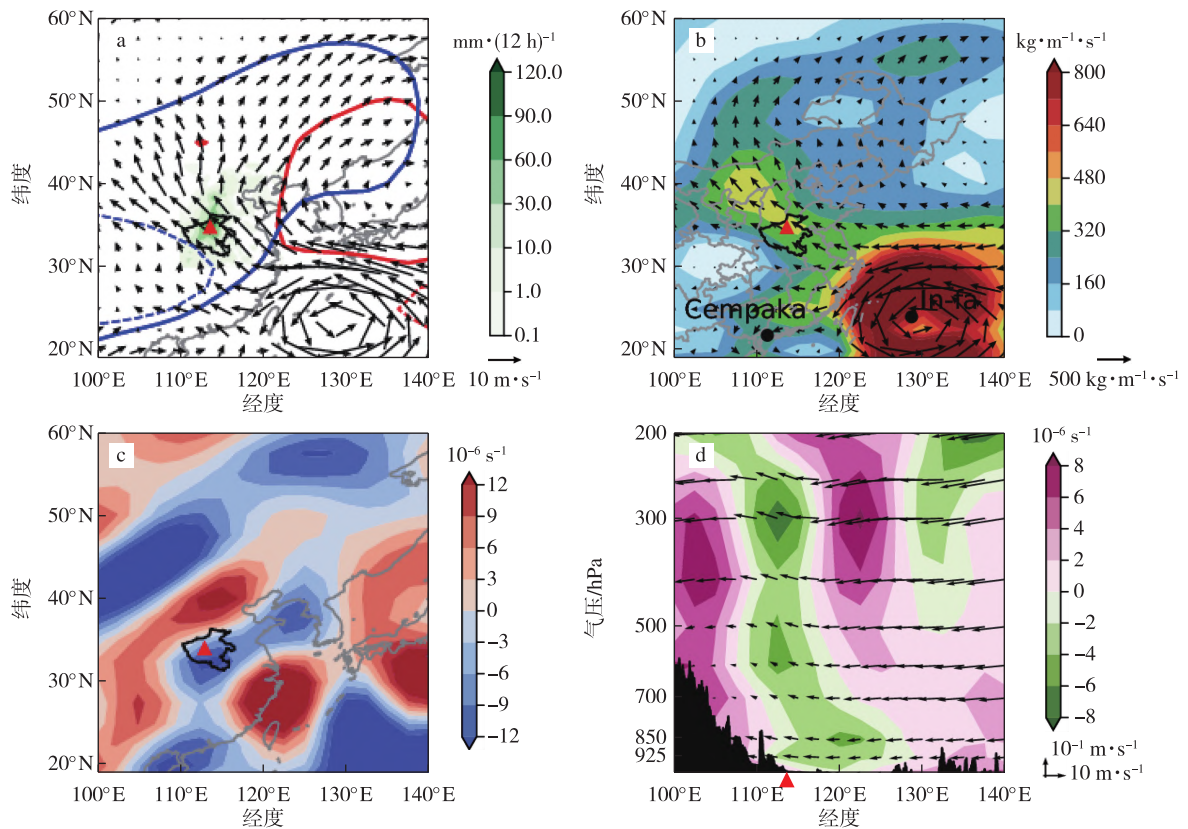


图2 (a)“21.7”河南特大暴雨期间 850 hPa 平均水平风(箭矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、平均降水量(阴影,单位: $\text{mm} \cdot (12 \text{h})^{-1}$)、西太平洋副热带高压(红色实线)和南亚高压(蓝色实线)的环流配置,红色和蓝色虚线分别表示 1960—2021 年夏季气候平均的西太平洋副热带高压和南亚高压。(b)从地表到 300 hPa 的整层水汽通量距平积分(箭矢和阴影,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。(c)850 和 200 hPa 高度层间的水平风散度差距平(单位: 10^{-6}s^{-1})。(d)沿 34.8°N 纬向环流(箭矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;垂直速度放大 100 倍)和风散度(填充,单位: 10^{-6}s^{-1})距平高度剖面。(b)中黑色点分别代表台风“烟花”和“查帕卡”的中心位置,(d)中红色三角形和黑色阴影分别表示郑州市的位置(113.65°E,34.8°N)和地形剖面

Fig.2 (a) The configuration of mean horizontal wind at 850 hPa (vectors, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), mean precipitation (shadings, units: $\text{mm} \cdot (12 \text{h})^{-1}$), WPSH (red solid line) and SAH (blue solid line) during the “21.7” EHRE. The red and blue dash lines in (a) indicate the climatic mean WPSH and SAH of 1960—2021, respectively. (b) Anomalies of the water vapor flux integrated from surface to 300 hPa (vectors and shadings, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). (c) The difference in horizontal wind divergence between 850 and 200 hPa (units: 10^{-6}s^{-1}). (d) The pressure-longitude cross-section of zonal circulation (vectors, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; the vertical velocity is enlarged by 100 times) and wind divergence (shadings, units: 10^{-6}s^{-1}) along 34.8°N relative to the climatology of 1960—2021. The black dots in (b) indicate the center locations of Typhoon In-fa and Cempaka, respectively. The red triangles and black shadings in (d) indicate the location of Zhengzhou city (113.65°E,34.8°N; same as below) and the topography, respectively

环流天气型,需要进一步分析华北地区区域性极端降水在气候尺度上的一般天气特征。因此,本研究通过机器学习谱聚类方法,将华北地区 1960—2021 年夏季区域性极端降水事件通过高低层水平风场客观分类,得到了 3 类主控环流天气型(图 4a—c):季风型(第一型,P1)、低涡型(第二型,P2)和伴有异常偏西北的西太平洋副热带高压与异常偏东北的南亚高压的远距离台风型(第三型,P3)。其中,季风型包含了 391 个区域性极端降水事件,占比最高(83.37%);低

涡型占比第二(50 个区域性极端降水事件,占比为 10.66%);远距离台风型仅包含 28 个区域性极端降水事件,占比最低(5.97%)。

季风型(P1)是华北地区上空以西南风为主的季风环流天气型(图 4a),此时西太平洋副热带高压西伸和南亚高压东伸,共同控制华北地区东南部上空的环流配置,有利于对流的发展(Zhao et al., 2019; Tang et al., 2021)。华北地区上空较宽的垂直风切变区域(图 4d)以及孟加拉湾和南海向华北地

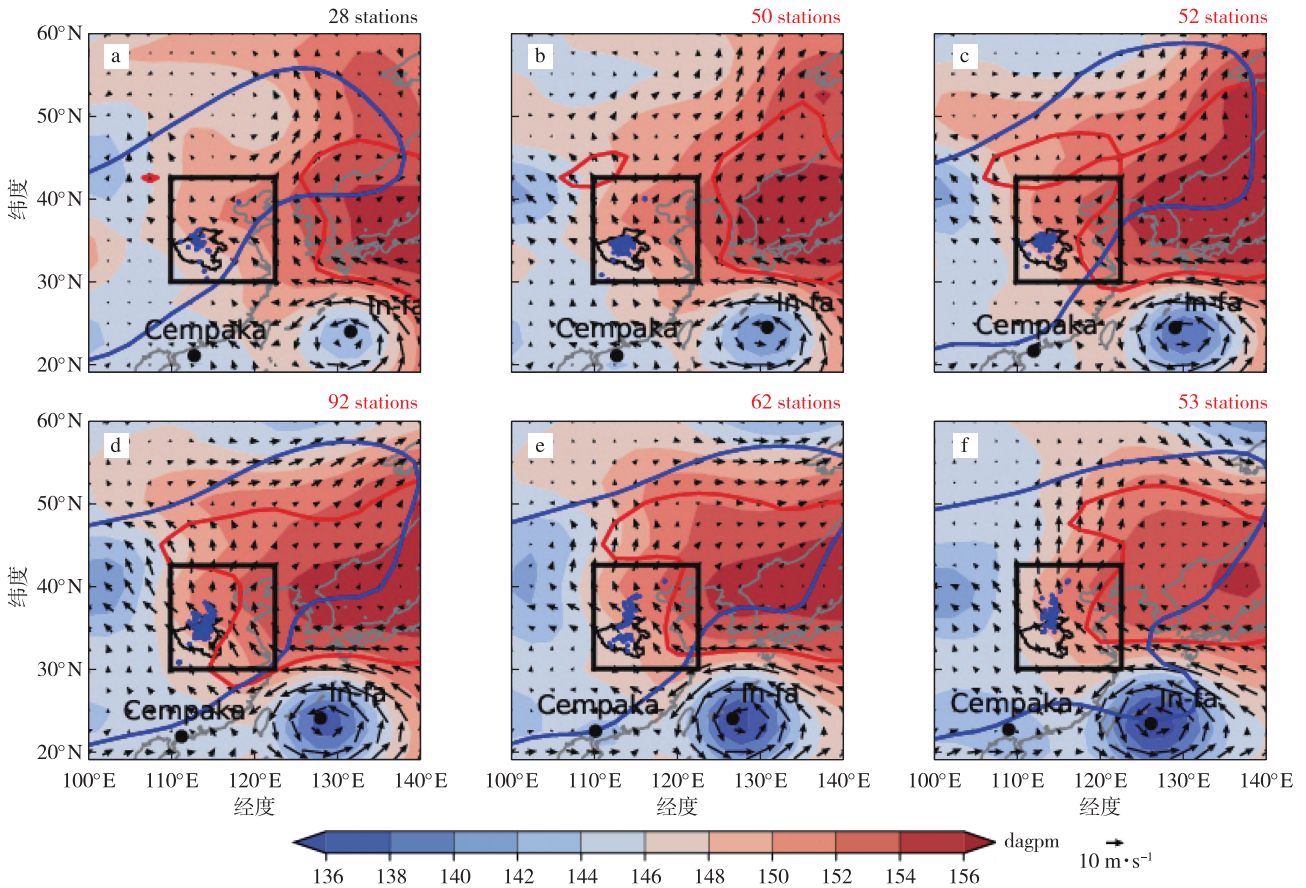


图3 2021年7月19日08:00—22日08:00期间(a.19日08:00—20:00;b.19日20:00—20日08:00;c.20日08:00—20:00;d.20日20:00—21日08:00;e.21日08:00—20:00;f.21日20:00—22日08:00),发生极端降水事件的站点(蓝点)、西太平洋副热带高压(红色等值线)、南亚高压(蓝色等值线)、位势高度(填充,单位:dagpm)和850 hPa水平风(箭头,单位:m/s)的逐12 h分布变化。每个子图右上角的数字表示该时间段内出现极端降水事件的站点数,其中红色数字表示该时间段内出现区域性极端降水事件。华北地区(110°~122.5°E,30°~42.5°N;下同)在每个子图中用黑框表示,子图上的黑色点分别代表台风“烟花”和“查帕卡”的中心位置

Fig.3 Evolution of the distribution of the stations where the precipitation extreme occurs (blue dots), WPSH (red contour), SAH (blue contour), geopotential height (shaded, units: dagpm) and horizontal wind (vectors, units: m/s) at 850 hPa during 08:00 BST on July 19 to 08:00 BST on July 22, 2021 with every 12-hour interval (a.08:00 BST—20:00 BST on July 19; b.20:00 BST on July 19—08:00 BST on July 20; c.08:00 BST—20:00 BST on July 20; d.20:00 BST on July 20—08:00 BST on July 21; e.08:00 BST—20:00 BST on July 21; f.20:00 BST on July 21—08:00 BST on July 22). The number at the right top corner of each subplot shows the number of stations with precipitation extreme and the red (black) number indicates the occurrence (absence) of REPE (regional extreme precipitation event) over NCP (North China Plain), which is indicated by the black box (110°—122.5°E, 30°—42.5°N; same as below) in each subplot. The black dots indicate the center locations of Typhoon In-fa and Cempaka, respectively

区的水汽输送(图4g)也证实了这一点。低涡型(P2)的环流特征是位于华北地区南部的明显低涡和位于华北地区以东的高压中心(图4b)。随着南亚高压进一步东伸,大量水汽被主导东南风输送到华北地区上空,并伴随着对流层高低层之间强烈的垂直风切变(图4e、h)。远距离台风型(P3)的特点是西北太平洋上空的远距离台风,伴随着南亚高压异常偏向东北,以及华北地区以东显著的高压中心(图4c)。两条主导风场路径分别源于夏季风环流

和西北太平洋上空的远距离台风。异常东北延伸的南亚高压和远距离强台风的配置也导致了华北地区对流层高低层之间强烈的风散度差(图4f)。正是来自西北太平洋上空、远距离台风北侧的偏东风,将大部分水汽从西北太平洋输送到华北地区,进一步导致了区域性极端降水事件的发生(图4i)。

极端降水发生概率的定义是,给定环流天气型下,每个站点出现极端降水的总次数与该天气型发生的总次数之比(Tang et al., 2021)。本研究中将

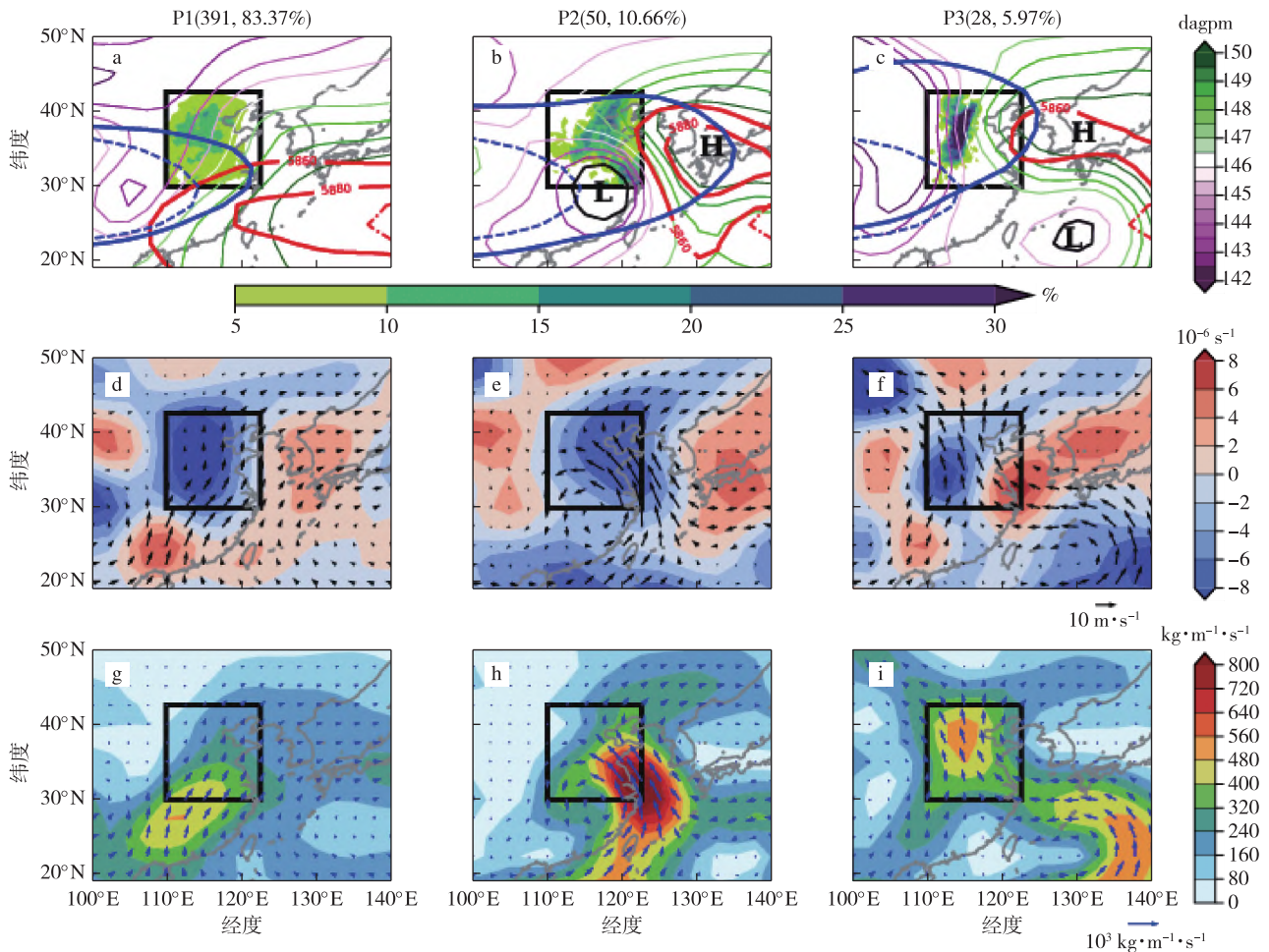


图4 华北地区夏季发生区域性极端降水事件的每种天气型下850 hPa位势高度(a—c;等值线,右侧颜色条,单位:dagpm;小标题显示了区域性极端降水出现的次数和每种天气型占区域性极端降水出现总数的比例;填充表示每种天气型下极端降水事件的发生概率(下方颜色条);蓝色实线(虚线)表示每种天气型下南亚高压的平均位置(1960—2021年的气候平均值);红色实线表示各环流天气型下500 hPa上5 860和5 880 gpm等值线,红色虚线则表示1960—2021年的气候平均值;(b)和(c)中的黑线和黑色字母“L”(黑色字母“H”)表示850 hPa的低涡(高压中心)。(d—f)是各天气型下850 hPa的水平风场(箭头,单位: $m \cdot s^{-1}$)和850与200 hPa的水平风散度差(填充,单位: $10^{-6} s^{-1}$)。(g—i)是从地表到300 hPa的整层水汽通量积分(箭头和填充,单位: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$)

Fig.4 (a—c) The geopotential height (contours, right color bar, units: dagpm) at 850 hPa under each synoptic pattern responsible for the REPE over NCP in summer. The occurrence times of REPE and proportion of each synoptic pattern to the total occurrence of REPE are shown in the subtitle of (a—c). Shadings in (a—c) indicate the occurrence probability of precipitation extreme (bottom color bar) which is defined as the ratio of total precipitation extreme occurrences at a given site under a given synoptic pattern to the total occurrences of this synoptic pattern. The blue solid (dash) lines in (a—c) indicate the mean position of SAH under each synoptic pattern (climatic mean of 1960—2021). The red dash lines indicate the climatic mean position of WPSH over 1960—2021, and red solid lines denote 5 860 and 5 880 gpm contours under each synoptic pattern. Black lines and black letters of “L” (black letters of “H”) in (b) and (c) show the low vortexes (high pressure centers) at 850 hPa. (d—f) The horizontal wind at 850 hPa (vectors, units: $m \cdot s^{-1}$) and difference of horizontal wind divergence between 850 hPa and 200 hPa (shadings; units: $10^{-6} s^{-1}$) under each synoptic pattern. (g—i) The water vapor flux (shadings and vectors, units: $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$) vertically integrated from surface to 300 hPa

区域性极端降水事件下的高低层环流用于天气型聚类分析,故极端降水发生概率越高,说明极端降水在该天气型下更容易出现。图4a—c还进一步给出了

各环流天气型下极端降水发生概率的空间分布情况。通过图4a可以看出,在P1天气型下,极端降水发生概率在华北地区的分布相当均匀,且均小于

15%。在 P2 天气型下,极端降水发生概率主要在东南风通道的出口和低涡的东北部有两个大值中心,此二者的极端降水发生概率在 20%~25%之间(图 4b)。作为“21.7”河南特大暴雨主导环流天气型的 P3 只占 1960—2021 年夏季华北地区区域性极端降水事发生总次数的 5.97%,但 P3 天气型下的极端降水发生概率大值区高度集中,主要分布在河南省北部和河北省西南部、太行山东缘一带,沿地形呈西南-东北向走势明显,且发生概率超过 25%(图 4c)。同时,极端降水发生概率大值区与水汽输送大值区、

上升运动剧烈的区域也较为吻合,说明各天气型下夏季极端降水多发区域均存在充沛的水汽、较好的对流条件(Zou and Ren, 2015)。

图 5 进一步显示了 P3 下区域性极端降水事件发生前 36、24、12 和 0 h 的大气环流演变情况。如图 5a—d 所示,西太平洋上空的远距离台风范围逐渐扩大,伴随着华北地区上空降水量的增加。在此期间,降水区域上空的 CAPE 值达到 $1\ 000\ \text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,并在华北地区以西持续增加,为极端降水提供了充足的不稳定能量(Chen et al., 2020; Huang et al.,

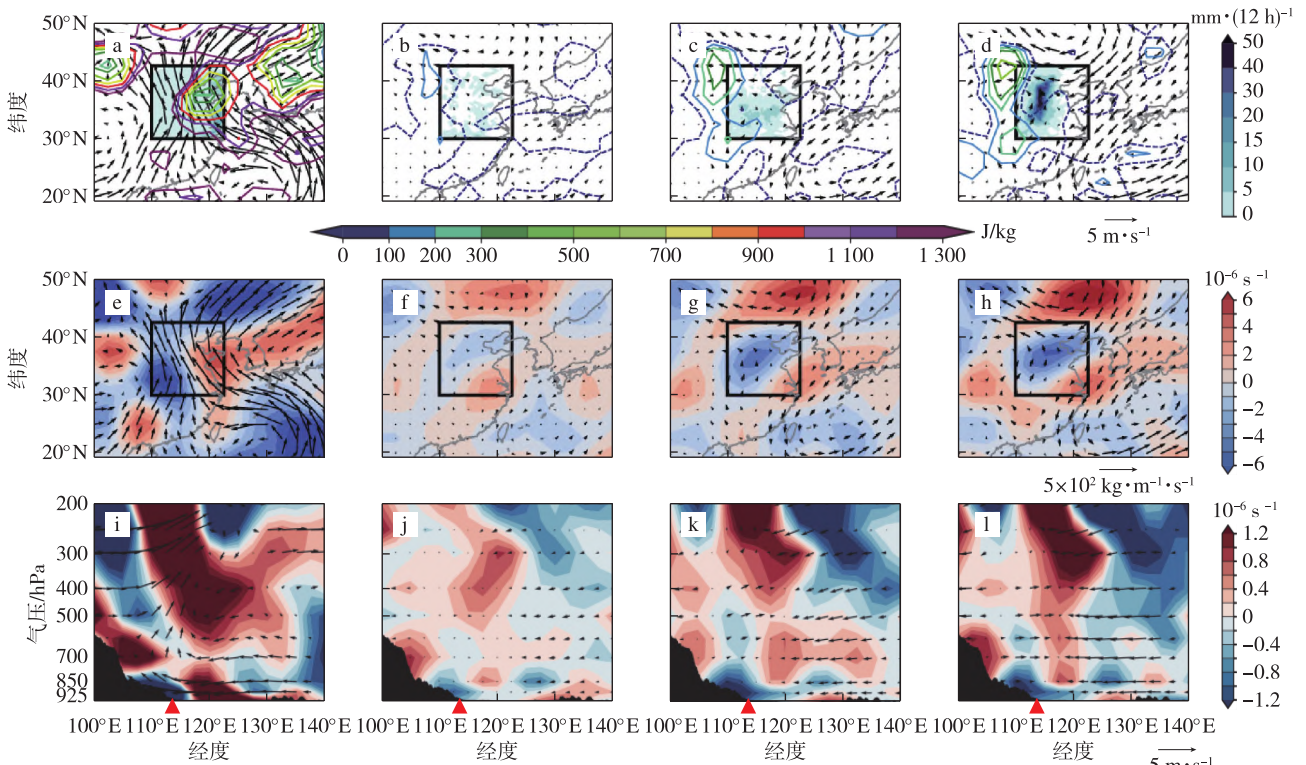


图 5 P3 下区域性极端降水事件发生前 36 h 850 hPa 合成水平风场(箭矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、CAPE 值(等值线,底部颜色条,单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)和降水量(阴影,右侧颜色条,单位: $\text{mm}\cdot(12\ \text{h})^{-1}$)(a);从地面到 300 hPa 的水汽输送积分(箭矢,单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)以及 850 与 200 hPa 水平风散度差(阴影,单位: $10^{-6}\ \text{s}^{-1}$)(e);纬向环流(箭矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;垂直速度放大 100 倍)和沿 $32.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 平均的水平散度(阴影,单位: $10^{-6}\ \text{s}^{-1}$)的高度剖面(i)。 (b—d)、(f—h)、(j—l) 分别同(a)、(e)、(i),但分别为 P3 下区域性极端降水事件发生前 24、12、0 h 物理量场相对于发生前 36 h 的差值。(i—l)中的红色三角形和黑色阴影分别表示郑州市的位置和地形剖面

Fig.5 The composite mean winds (vectors, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa, CAPE (contours, bottom color bar, units: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) and the precipitation (shadings, right color bar, units: $\text{mm}\cdot(12\ \text{h})^{-1}$) shown in (a), the moisture transport integrated from surface to 300 hPa (vectors, units: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) and the difference in horizontal wind divergence (shadings, units: $10^{-6}\ \text{s}^{-1}$) between 850 and 200 hPa shown in (e), and the pressure-longitude cross-section of zonal circulation (vectors, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, the vertical velocity is enlarged by 100 times) and horizontal divergence (shadings, units: $10^{-6}\ \text{s}^{-1}$) averaged along $32.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ shown in (i) at 36 h ahead the REPE under P3. (b—d), (f—h), and (j—l) are the same as (a), (e), and (i), respectively, but they are the relative physical field differences of the 24, 12, and 0 h before the occurrence of the regional extreme precipitation event under P3 compared to the 36 h before the occurrence. The red triangle and black shading in (i—l) indicate location of Zhengzhou city and the topography, respectively

2021; Zhang J H et al., 2023)。由图 5e 可知,位于中国东南部上空的西南风和位于西太平洋上空远距离台风北缘的东南风将水汽从海洋上空输送到华北地区。在 P3 下的区域性极端降水发生前 24 至 0 h,虽然由于远距离台风的扩张,对应西南风和东南风相对于前 36 h 风速降低,导致水汽输送略有减弱(图 5f—h),但是由于华北地区高低层水平风散度负距平增大,使得上升运动不断加强(图 5f—h 和图 5j—l)。因此,区域性极端降水事件的发生更多是上升运动增强的结果(Qin et al., 2022)。郑州市区及周边山区的上升运动的不断增强(图 5j—l),使得 850 hPa 附近低层对流辐合强烈,500 hPa 以上高层对流辐散。因此,极端降水发生概率的最大值集中在太行山和伏牛山东缘一带,且随着时间的推移逐渐增强。总体而言,台风在西太平洋上空的扩张和南亚高压在东北方向的延伸体现了环流的配置演变,这一演变共同引发了强垂直风切变和强烈的上升运动,进一步导致了 P3 下华北地区区域性极端降水事件的发生。

4 同一天气型下“21.7”河南特大暴雨事件与其他特大暴雨事件的比较

在造成华北地区夏季区域性极端降水的 3 种环流天气型中,P3 对区域性极端降水发生次数的贡献最小,但该天气型下极端降水发生概率最高。本研究根据区域性极端降水事件发生的时间连续性,将 P3 下的 28 个区域性极端降水事件归类为表 1 中所示的 9 个特大暴雨事件。图 6 显示了每个特大暴雨事件的平均降水量与环流合成场。P3 下的 9 次特大暴雨事件中均存在热带气旋天气系统(底层中心最大平均风速 $\geq 10.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),而 23 次区域性极端降水事件存在台风(底层中心最大平均风速 ≥ 32.7

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),占比 82.1%。在多数特大暴雨事件期间,西太平洋上空远距离台风北缘的盛行东南风将充足的水汽从西太平洋输送到华北地区东南部。西太平洋副热带高压和南亚高压在对流层中高层的控制范围大小影响了降水分布,使得降水最为集中的区域出现在西太平洋副热带高压和南亚高压的大范围控制重合区域的西部(图 6a、c、e、g 和 i)。同时,在几乎所有事件中,降水区上空都有强烈的上升运动(图 6a—i)。从图 6i 可以看出,“21.7”特大暴雨事件既受异常偏西北的西太平洋副热带高压和异常偏东北的南亚高压共同控制,也受西太平洋上空远距离台风北缘的东南风向华北地区输送大量水汽的影响,此三者共同形成了有利于极端降水的大尺度环流配置。

我们进一步从 P3 下的特大暴雨事件中选取了区域性极端降水事件持续时长和平均降水强度相对较高、极端性较强的“21.7”特大暴雨事件和“63.8”特大暴雨事件(鲍名, 2007)进行详细比较(图 6b、i)。这里的平均降水强度定义为区域平均的极端降水量除以极端降水发生的 12 h 极端降水发生的次数(王志福和钱永甫, 2009)。由表 1 可以看出,与 P3 下的其他特大暴雨事件相比,“63.8”特大暴雨事件的持续时间最长,为 120 h;“21.7”特大暴雨事件的持续时间以 60 h 紧随其后,同时“21.7”特大暴雨事件的平均降水强度最大。这表明类似的区域性极端降水事件更有可能在 P3 下发生。从降水位置上看,“21.7”特大暴雨事件的降水大值区位于南部,而“63.8”特大暴雨事件的降水大值区位于北部。从环流结构上看,尽管两次事件期间的南亚高压都有向东北延伸的趋势,在“21.7”特大暴雨事件期间,位于西北部的西太平洋副热带高压异常西伸程度较大,同时显著影响了华北地区上空水平风的方

表 1 1960—2021 年 P3 下 9 个区域性极端降水事件发生时间、持续时间和平均降水强度

Table 1 Occurring time, duration, and mean precipitation intensity of 9 EHREs under P3 during 1960—2021

特大暴雨事件	发生时间(北京时)	持续时长/h	平均降水强度/($\text{mm} \cdot (12 \text{ h})^{-1}$)
“60.7”	1960年7月27日20时至28日08时	12	16.84
“63.8”	1963年8月4日08时至9日08时	120	16.51
“64.8”	1964年8月12日20时至13日08时	12	22.64
“75.8”	1975年8月6日08时至7日08时	24	15.37
“88.7”	1988年7月30日08时至30日20时	12	12.14
“89.7”	1989年7月30日20时至31日08时	12	15.85
“96.8”	1996年8月3日20时至5日08时	36	21.71
“00.7”	2000年7月3日20时至5日20时	48	20.60
“21.7”	2021年7月19日20时至22日08时	60	24.36

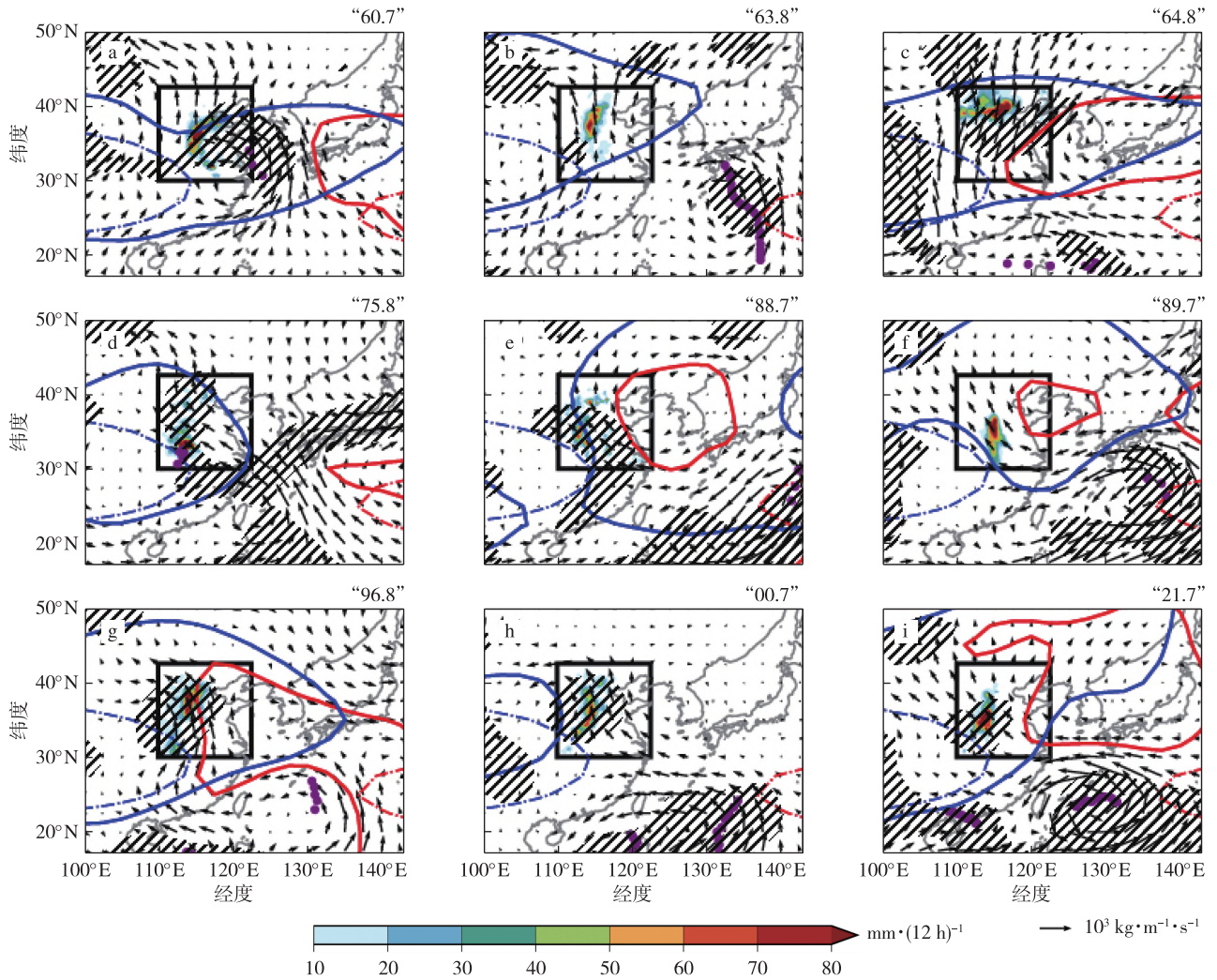


图6 P3下每个特大暴雨事件南亚高压(蓝色等值线)和西太平洋副热带高压(红色等值线)的位置,以及从地表到300 hPa的水汽通量垂直积分(箭矢,单位: $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。红色和蓝色实线(虚线)分别表示每个特大暴雨事件下西太平洋副热带高压和南亚高压的平均位置(1960—2021年的气候平均值)。黑色斜线表示700 hPa高度层垂直上升速度超过 $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域。每个特大暴雨事件期间平均降水量和台风中心位置分别用填色(底部色条)和紫色点表示

Fig.6 The positions of SAH (blue contours) and WPSH (red contours) and water vapor flux vertically integrated from surface to 300 hPa (vectors, units: $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) for each REPE under P3. The red and blue solid (dash) lines indicate the mean position of WPSH and SAH under each REPE (climatic mean of 1960—2021), respectively. Black slashes indicate where the ascent speed is more than $1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ at 700 hPa. The averaged 12-hourly precipitation amount and the position of typhoon center during each historic precipitation extreme is demonstrated by shadings (bottom color bar) and purple dots, respectively

向;而“63.7”特大暴雨事件期间的西太平洋副热带高压要弱得多,且位于更远的东部。此外,在复杂的远距离双台风条件影响下,“21.7”特大暴雨事件的台风强度对降水极值的影响显著大于“63.8”特大暴雨事件。

图7和图8揭示了“21.7”特大暴雨事件期间环流场与P3下环流合成场之间的区别。可降水量的分布(图7a)、对流层高低层水平风散度差(图7b)和水汽输送(图7c)体现了P3下区域性极端降水事件发生的充足水汽和垂直风切变条件,这也与降水中心的

分布区域相对应。与P3下的区域性极端降水相比,“21.7”特大暴雨事件中降水大值区更偏向于河南省北部,这与可降水量正异常中心相对应(图7d)。从图7b和图7e中可以看出,与P3相比,“21.7”特大暴雨事件中河南省上空850和200 hPa之间的水平风散度差的绝对值更大,这有利于强烈的上升运动和对流的形成。在P3下,东南风和西南风分别输送来自东海和孟加拉湾的两个水汽源至华北地区,其中前者所占比例较大(图7c),而相对于P3下的环流情况,“21.7”河南特大暴雨事件中的远距离双台风作用显

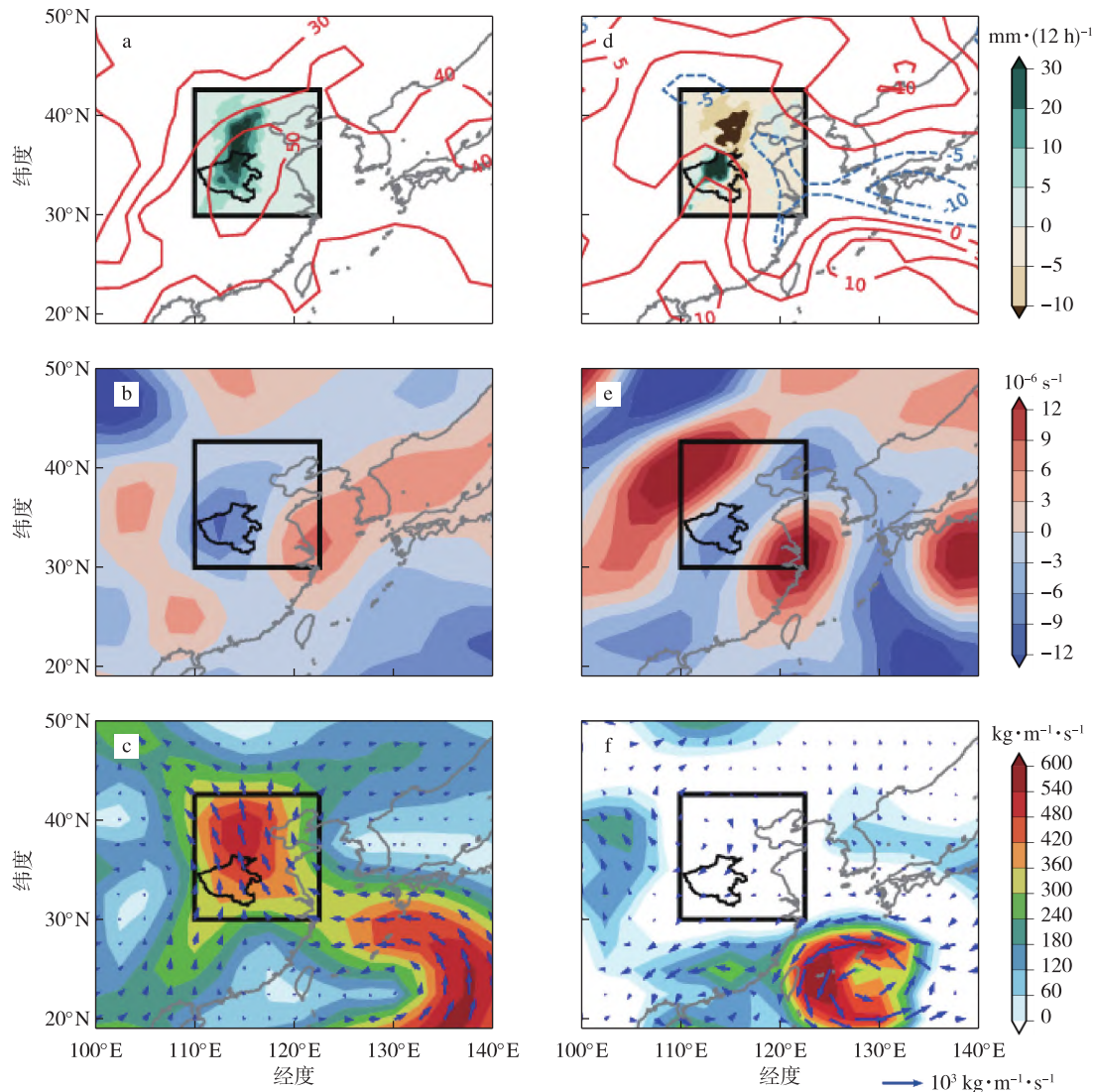


图7 P3 下可降水量(等值线,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)和实际降水量(阴影;单位: $\text{mm} \cdot (12 \text{ h})^{-1}$)的合成场(a),850和200 hPa 之间水平风散度差(b;单位: 10^{-6} s^{-1}),以及水汽通量从地表到300 hPa的垂直积分(箭头和阴影,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (c)。(d—f)同(a—c),但为“21.7”特大暴雨事件相对P3合成场的差值

Fig.7 (a) Configuration of the composite mean precipitable water content (contours,units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$) and precipitation (shadings, units: $\text{mm} \cdot (12 \text{ h})^{-1}$), (b) the differences in horizontal wind divergence between 850 and 200 hPa (units: 10^{-6} s^{-1}), and (c) the water vapor flux vertically integrated from surface to 300 hPa under P3 (shadings and vectors, units: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). Their differences between the “21.7” EHRE and the composite mean of P3 are shown in (d—f), respectively

著提升了海上水汽通量强度,但华北地区的水汽传输略弱(图7f)。总体来说,尽管与P3相比“21.7”特大暴雨事件期间的水汽输送略弱,但河南北部地区的降雨量更多,主要是由于河南上空高低层水平散度差更显著,导致上升运动更强。

在P3下,相对湿度(图8a)、垂直速度和水平散度(图8b)的分布都与降水分布有很好的对应关系(图8c)。在郑州市及其南部地区,“21.7”特大暴雨事件与P3之间的相对湿度距平在700至400 hPa之间存在一个超过20%的大值中心(图8d)。

“21.7”特大暴雨事件和P3之间的假相当位温距平(图8d)表明,郑州上空的大气条件以温暖潮湿为主,其在700 hPa以下从高到低的下降体现了低层大气的对流不稳定特征(Wang et al., 2022),这也与相对湿度的分布有很好的对应关系。此外,郑州市及其南部地区在300 hPa以上的高度也出现了一个强度大于 $1.6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 的风散度负中心(图8e)。同时,水平风速在300 hPa左右出现了从南风向北风的转变,配合垂直风速的增加,体现了高层上升运动和对流的增强。从图8d、e和f中可以看出,“21.7”

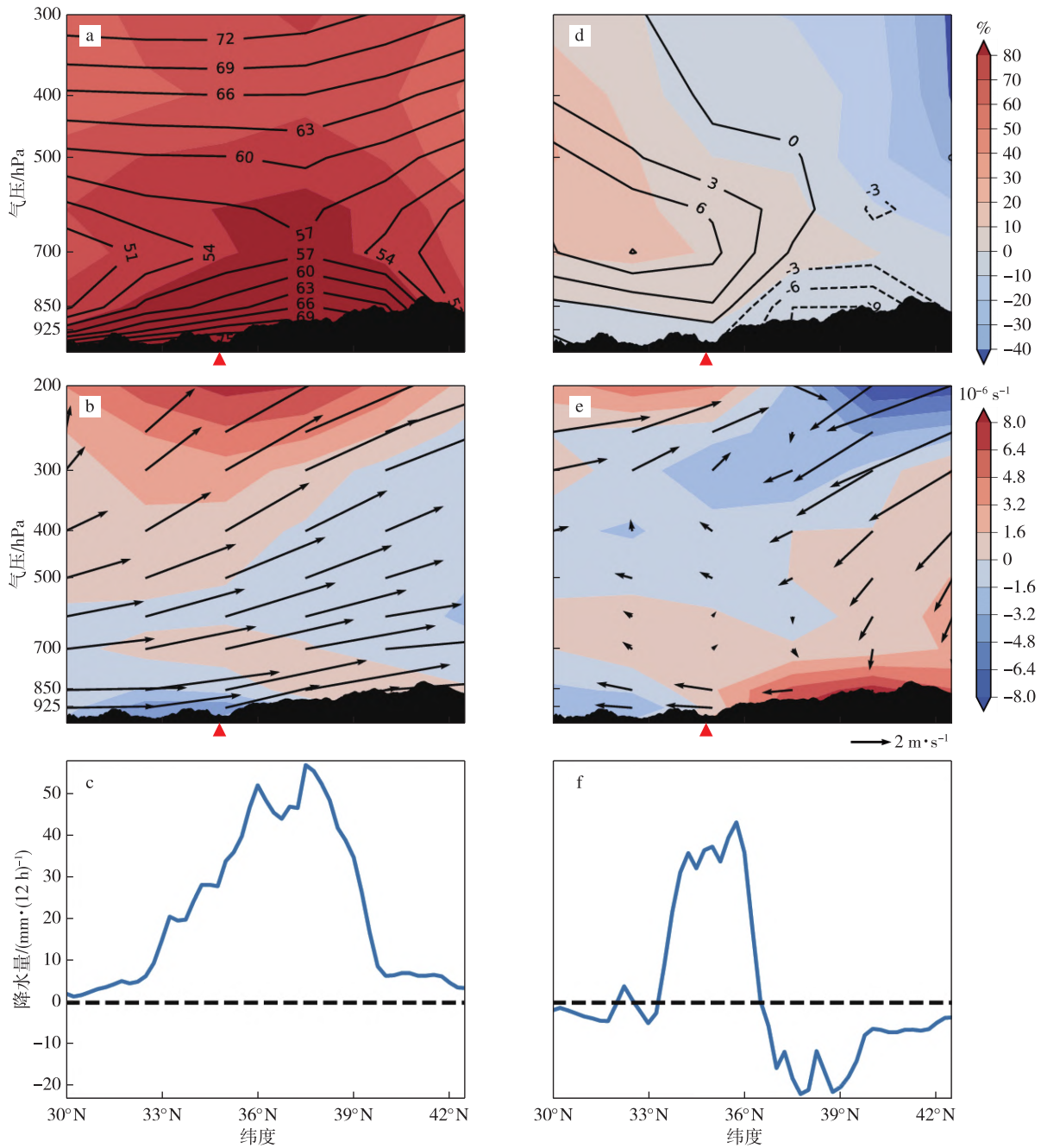


图8 P3 下沿 110°~115°E 纬向平均的相对湿度(阴影,单位:%)和假相当位温(等值线,单位:°C)的高度剖面(a),水平风散度(阴影,单位: $10^{-6} s^{-1}$)和经向环流(箭矢,单位: $m \cdot s^{-1}$;垂直速度放大 100 倍)的高度剖面(b),以及降水量平均值(c;单位: $mm \cdot (12 h)^{-1}$)。(d—f)同(a—c),但为“21.7”特大暴雨事件相对 P3 合成场的差值。(a、b、d、e)中的红色三角形和黑色阴影分别为郑州市的位置和地形剖面

Fig.8 The pressure-latitude cross-section of composite mean (a) relative humidity (shadings, units: %) and pseudo-equivalent potential temperature (contours, units: °C), (b) horizontal wind divergence (shadings, units: $10^{-6} s^{-1}$) and longitudinal circulation (vectors, units: $m \cdot s^{-1}$; the vertical velocity enlarged by 100 times), and (c) precipitation (units: $mm \cdot (12 h)^{-1}$) averaged along 110°—115°E under P3. Their differences between the “21.7” EHRE and the composite mean of P3 are shown in (d—f), respectively. The red triangle and black shading in (a, b, d, e) indicate the location of Zhengzhou city and the topography, respectively

特大暴雨事件相对于 P3 的环流异常场,更强烈的上升运动和更高的相对湿度能够较好地对应郑州市及

其南部地区的显著降雨分布。同时,与华北地区的高 CAPE 值相对应(图 5a—d),强烈的上升运动对

降水产生了更大的贡献。总之,“21.7”特大暴雨事件相对于P3下的环流异常场,水汽传输相对较弱,因此中高层的更显著的相对湿度分布主要是由强烈的大气层结不稳定引起的。

为了研究与P3相比“21.7”特大暴雨事件中强烈垂直风切变产生的原因,我们利用准地转垂直运动方程对华北地区环流场进行了诊断分析。如方程

(2)–(5)所示, ω_{vor} 表明了涡度平流随着气压降低的变化, ω_{temp} 显示了温度平流在特定高度层之间的移动,而 ω_{dia} 体现了所有非绝热加热的影响,包括辐射、潜热和表面热通量(Hsu and Li, 2011)。其中,非绝热加热项对上升运动的贡献最大,几乎是涡度平流和温度平流贡献的10倍(图9和图10)。

图9展示了华北地区 ω_{vor} 、 ω_{temp} 和 ω_{dia} 从地表到

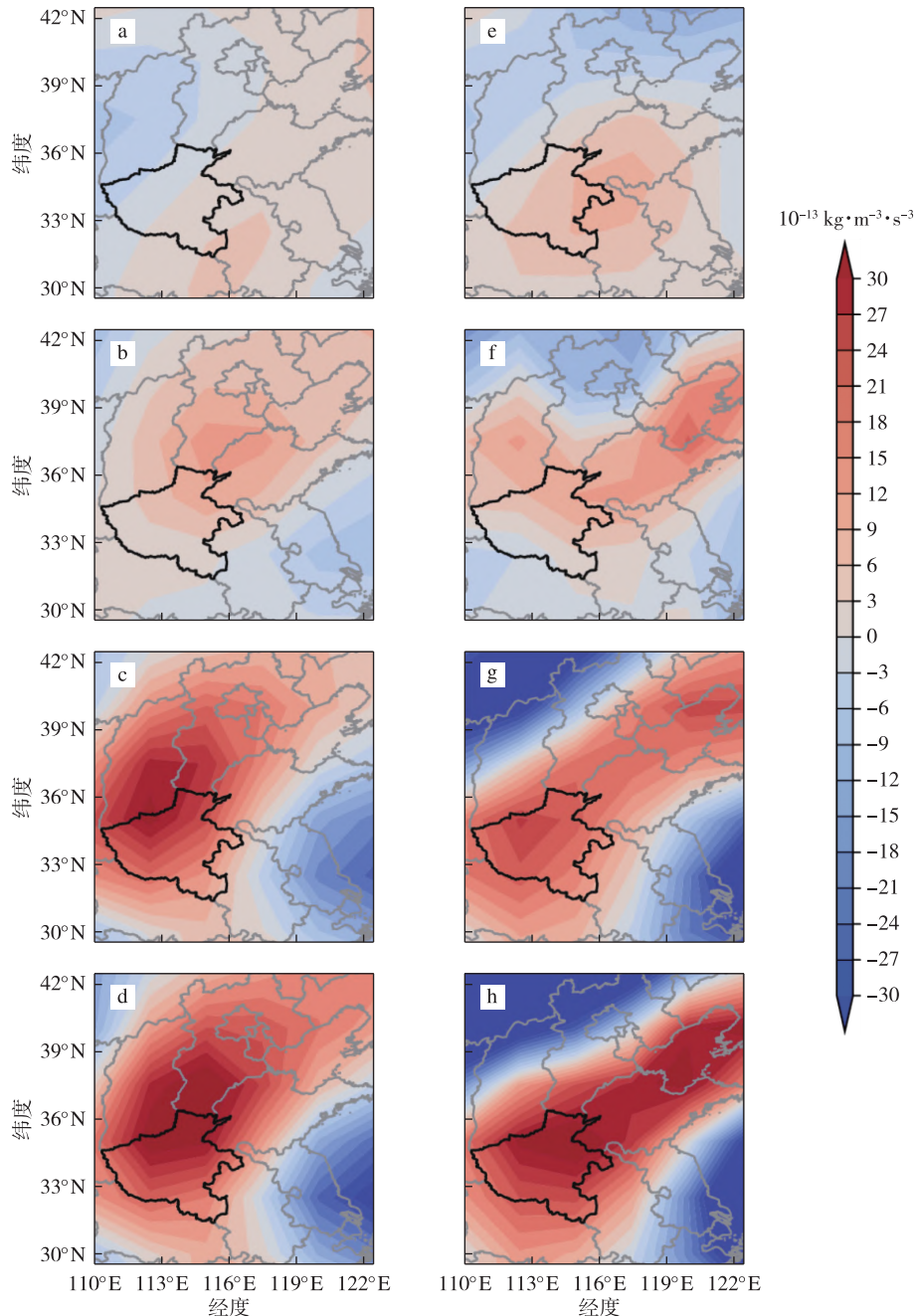


图9 华北地区P3下 ω_{vor} (a)、 ω_{temp} (b)、 ω_{dia} (c)及三项之和(d)从地表到200 hPa垂直平均空间分布(单位: $10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-3}$)。(e—h)同(a—d),但为“21.7”特大暴雨事件相对P3合成场的差值

Fig.9 The spatial distribution of (a) ω_{vor} , (b) ω_{temp} , (c) ω_{dia} and (d) their combination vertically averaged from surface to 200 hPa under P3 over NCP (units: $10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-3}$). Their differences between the “21.7” EHRE and the composite mean of P3 are shown in (e—h), respectively

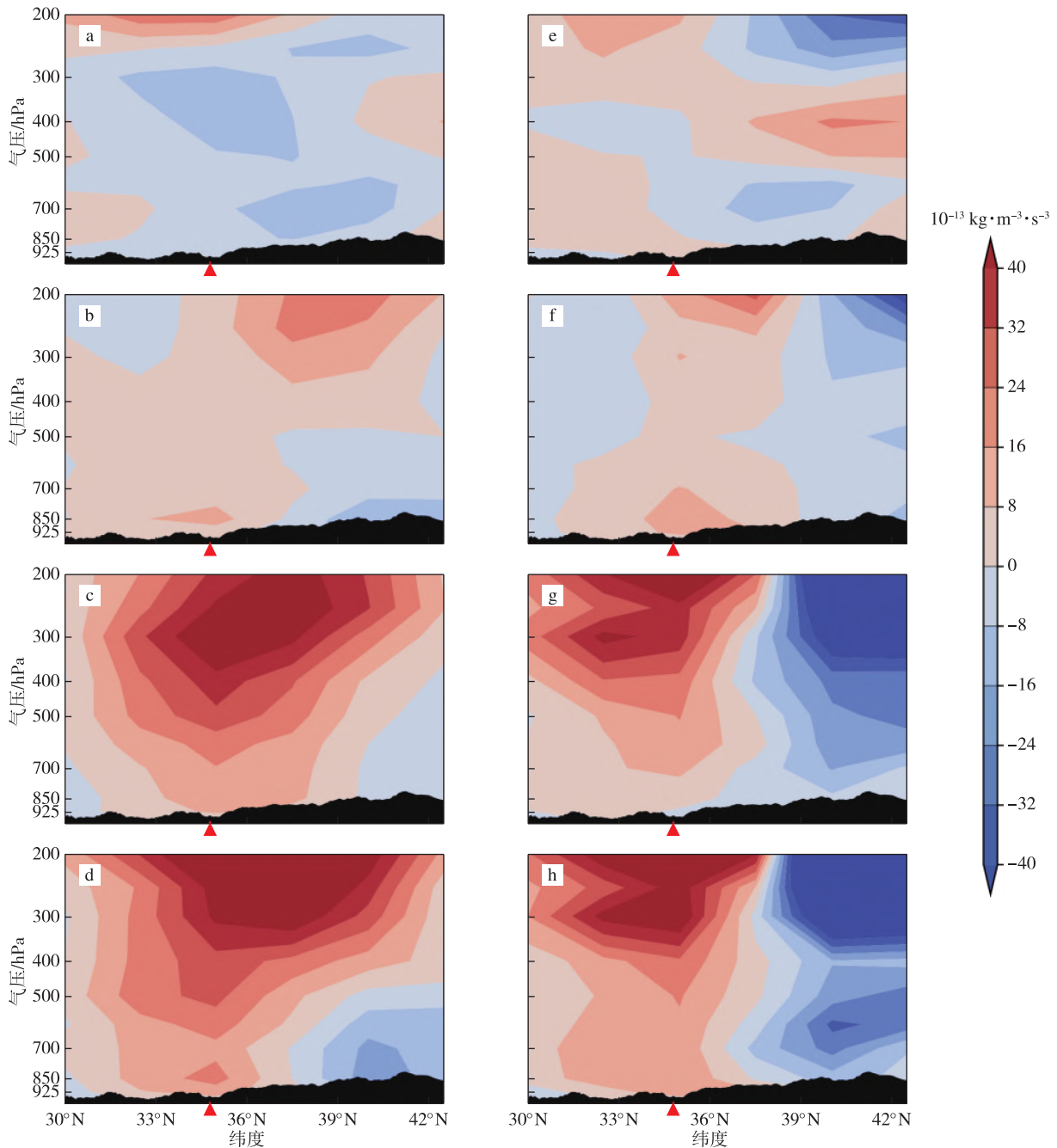


图 10 同图 9,但为沿 110°~115°E 纬向平均的 ω_{vor} 、 ω_{temp} 和 ω_{dia} 及三项之和的高度剖面(单位: $10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-3}$)

Fig.10 Same as Fig.9, but for the pressure-latitude cross-section of ω_{vor} , ω_{temp} , ω_{dia} and their combination averaged along 110°—115°E (units: $10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-3}$)

200 hPa 高度垂直方向平均值的空间分布。对 P3 (图 9a—d)而言,与 ω_{vor} 、 ω_{temp} 相比较, ω_{dia} 对垂直速度的贡献最大,尤其是在华北地区的中部,这也与可降水量、水平风散度和水汽通量的大值区相对应(图 9a—c)。相对贡献较少的 ω_{vor} 和 ω_{temp} 的大值区主要位于华北地区北部。三项的共同作用有利于华北地区中北部产生相对较强的垂直运动。

“21.7”特大暴雨事件与 P3 相比(图 9g), ω_{dia} 项

的正异常中心与华北地区上空低层垂直风切变负值区(图 7e)具有很好的对应关系,表明受非绝热加热影响,“21.7”特大暴雨事件期间,850 和 200 hPa 之间的水平风散度相对 P3 要更加显著。此外,真实降水有更加明显的东北-西南方向分布,这表明了地形阻挡对降水分布的影响。与 P3 相比,“21.7”特大暴雨事件中垂直涡度项正值区的东北-西南分布倾向更加清晰(图 9e—h),这也与“21.7”特大暴雨事件中异常

西北延伸的西太平洋副热带高压和远距离台风的配置所引起的更强烈的东南风的影响相对应。

图 10 显示了垂直方程中各项沿 $110^{\circ} \sim 115^{\circ} \text{E}$ 纬向平均的高度剖面。如图 10a—d 所示,在 P3 下, ω_{dia} 在 850 hPa 及更高层中贡献最大。850 hPa 上 ω_{temp} 大值中心对郑州及周边地区对流层低层的上升运动有正贡献,850 hPa 以下高度的 ω_{temp} 项对该地区的涡度项仅有轻微的负贡献。由图 10e—h 可以看出,与 P3 相比, ω_{dia} 对“21.7”特大暴雨事件中郑州市及其以南地区高层上升运动的增强作用更为重要。暖温度平流在 850 hPa 以下的低层对垂直速度的影响更大,涡度平流则在 200 hPa 附近的高层对垂直速度的影响更大。 ω_{dia} 在高低层都增强了影响效果。与温度平流和涡度平流项相比,“21.7”特大暴雨事件与 P3 的距平场中非绝热加热项的强烈增加,对郑州市及其以南地区的上升运动和垂直风切变的增强贡献最大,尤其是在 850 hPa 以下和 500 hPa 以上两个高度层中,从而导致这些地区的降水更强(图 10e—h)。

5 结论和讨论

本研究探讨了华北地区特征环流天气型的形成机制,从气候学角度揭示了河南“21.7”特大暴雨事件的形成原因。结果表明,“21.7”特大暴雨事件属于一种罕见的特征环流天气型(P3),这一天气型仅占华北地区夏季区域性极端降水总发生次数的 5.97%。然而,在造成华北地区夏季区域性极端降水发生的 3 种环流天气型中,以异常东北延伸的南亚高压与西北太平洋上空增强的远距离台风相互作用为特征的 P3 下降水极值的发生概率反而最高。

P3 型下的大气环流时间演变结果表明,高层异常向东北延伸的南亚高压、异常西伸北抬的西太平

洋副热带高压和低层不断扩张的远距离强台风的配置是华北地区上空强烈的上升运动和水汽输送条件形成的主要原因。太行山和伏牛山东缘的地形抬升作用也促进了对流层低层的辐合运动。与 P3 型下环流合成场相比,尽管“21.7”特大暴雨事件相对于 P3 下的水汽输送略有减少,但更加强烈的上升运动大大提高了河南省的降水量。这表明“21.7”特大暴雨事件中增强的双台风和异常东北延伸的西太平洋副热带高压对辐合生成和不稳定条件的贡献大于对水汽供应的贡献,尤其是在河南省北部。与 P3 相比,在“21.7”特大暴雨事件中,850 和 200 hPa 之间更大的高低层水平风散度差和更强烈的上升运动对极端降水的产生起着更重要的作用。

基于准地转垂直运动方程的诊断分析表明,与 P3 型下的环流合成场相比,“21.7”特大暴雨事件期间上升运动更强,进一步导致高低层之间更加剧烈的散度差和风切变。其中,非绝热加热项在“21.7”特大暴雨事件高低层风切变和强烈的上升运动中发挥了更重要的作用。在相同的特征环流天气型下,强烈上升运动通过与非绝热加热之间的正反馈作用增强了降水的极端性,将“21.7”特大暴雨事件与其他特大暴雨事件区分开来。

本研究探究了“21.7”河南特大暴雨事件的主导大尺度环流天气型,从气候学角度探讨了极为罕见的区域性极端降水事件类型的形成机制。该研究将区域性极端降水事件的产生和分布与环流天气型相联系,为表征和预测华北地区未来的极端降水提供了一个新的视角。未来的研究中,我们将应用具有精细时空分辨率的数据和数值模型来进一步讨论这个问题。

致谢:感谢南京大学高性能计算中心为本研究提供了计算资源。

参考文献(References)

- 鲍名,2007.近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景[J].大气科学,31(5):779-792. Bao M,2007.The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation[J].Chin J Atmos Sci,31(5):779-792.(in Chinese).
- Bluestein H B,1992.Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes:principles of kinematics and dynamics[M].Oxford:Oxford University Press.
- Bonsal B R,Zhang X,Vincent L A,et al.,2001.Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada[J].J Climate,14(9):1959-1976.doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1959:codaet>2.0.co;2.
- Chen G,Zhao K,Lu Y H,et al.,2022.Variability of microphysical characteristics in the “21.7” Henan extremely heavy rainfall event[J].Sci China:Earth Sci,65(10):1861-1878.doi:10.1007/s11430-022-9972-9.
- Chen J,Dai A G,Zhang Y C,et al.,2020.Changes in convective available potential energy and convective inhibition under global warming[J].J Climate,33(6):2025-2050.doi:10.1175/JCLI-D-19-0461.1.
- Cheng J B,Zhao Y H,Zhi R,et al.,2022.Analysis of the July 2021 extreme precipitation in Henan using the novel moisture budget equation[J].Theor

- Appl Climatol, 149(1):15-24. doi:10.1007/s00704-022-04022-7.
- Deng L, Feng J N, Zhao Y, et al., 2022. The remote effect of binary typhoon In-Fa and Cempaka on the “21.7” heavy rainfall in Henan Province, China [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 127(16):e2021jd036260. doi:10.1029/2021jd036260.
- Doswell C A, Rasmussen E N, 1994. The effect of neglecting the virtual temperature correction on CAPE calculations [J]. *Wea Forecasting*, 9(4):625-629. doi:10.1175/1520-0434(1994)09090625:TEONTV>2.0.CO;2.
- Douville H, Raghavan K, Renwick J, et al., 2021. Water cycle changes [R]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 1055-1210.
- Du H B, Donat M G, Zong S W, et al., 2022. Extreme precipitation on consecutive days occurs more often in a warming climate [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 103(4):E1130-E1145. doi:10.1175/bams-d-21-0140.1.
- 方浩, 乔云亭, 2019. 中国东部夏季极端降水时空分布及环流背景 [J]. *热带气象学报*, 35(4):517-527. Fang H, Qiao Y T, 2019. Temporal and spatial distribution of summer extreme precipitation and circulation background over eastern China [J]. *J Trop Meteor*, 35(4):517-527. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.047. (in Chinese).
- Hsu P C, Li T, 2011. Interactions between boreal summer intraseasonal oscillations and synoptic-scale disturbances over the western North Pacific. Part II: apparent heat and moisture sources and eddy momentum transport [J]. *J Climate*, 24(3):942-961. doi:10.1175/2010jcli3834.1.
- Hu Y, Deng Y, Zhou Z M, et al., 2019. A synoptic assessment of the summer extreme rainfall over the middle reaches of Yangtze River in CMIP5 models [J]. *Clim Dyn*, 53(3):2133-2146. doi:10.1007/s00382-019-04803-3.
- Huang D Q, Zhu J, Xiao X C, et al., 2021. Understanding the sensitivity of hourly precipitation extremes to the warming climate over eastern China [J]. *Environ Res Commun*, 3(8):081002. doi:10.1088/2515-7620/ac17e1.
- Huang L, Luo Y L, Zhang D L, 2018. The relationship between anomalous presummer extreme rainfall over South China and synoptic disturbances [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 123(7):3395-3413. doi:10.1002/2017JD028106.
- Huang Q J, Ge X Y, Melinda P, et al., 2022. Sensitivity analysis of the super heavy rainfall event in Henan on 20 July (2021) using ECMWF ensemble forecasts [J]. *J Trop Meteor*, 28(3):308-325. doi:10.46267/j.1006-8775.2022.024.
- Jia H J, Ding S F, Xu X Z, et al., 2014. The latest research progress on spectral clustering [J]. *Neural Comput Appl*, 24(7):1477-1486. doi:10.1007/s00521-013-1439-2.
- Jin B, Lu A, Zhang P, et al., 2022. Cause analysis of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan [J]. *Meteor Environ Sci*, 45(2):65-74.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2.
- Li C J, Lu T, Fu B J, et al., 2022. Sustainable city development challenged by extreme weather in a warming world [J]. *Geogr Sustain*, 3(2):114-118. doi:10.1016/j.geosus.2022.04.001.
- 粟哈, 王新敏, 朱枫, 2022. “21.7”河南极端暴雨多模式预报性能综合评估 [J]. *大气科学学报*, 45(4):573-590. Li H, Wang X M, Zhu F, 2022. Comprehensive evaluations of multi-model forecast performance for “21.7” Henan extreme rainstorm [J]. *Trans Atmos Sci*, 45(4):573-590. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20211019002. (in Chinese).
- Li H Q, Cui X P, Zhang D L, 2017. A statistical analysis of hourly heavy rainfall events over the Beijing metropolitan region during the warm seasons of 2007—2014 [J]. *Int J Climatol*, 37(11):4027-4042. doi:10.1002/joc.4983.
- Li W, Zhao S S, Chen Y, et al., 2022. State of China’s climate in 2021 [J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 15(4):100211. doi:10.1016/j.aosl.2022.100211.
- Li W L, Ma H, Fu R, et al., 2022. Development and maintenance mechanisms of a long-lived mesoscale vortex which governed the earlier stage of the “21.7” Henan torrential rainfall event [J]. *Front Earth Sci*, 10:909662. doi:10.3389/feart.2022.909662.
- Li Z, Yan Z W, Tu K, et al., 2015. Changes of precipitation and extremes and the possible effect of urbanization in the Beijing metropolitan region during 1960—2012 based on homogenized observations [J]. *Adv Atmos Sci*, 32(9):1173-1185. doi:10.1007/s00376-015-4257-x.
- Li Z, Chen Y, Wang X, et al., 2022. Thinking of extreme rainstorms from the August 1975 event to the July 2021 event [J]. *Meteor Environ Sci*, 45(2):1-13.
- 梁旭东, 夏茹娣, 宝兴华, 等, 2022. 2021年7月河南极端暴雨过程概况及多尺度特征初探 [J]. *科学通报*, 67(10):997-1011. Liang X D, Xia R D, Bao X H, et al., 2022. Preliminary investigation on the extreme rainfall event during July 2021 in Henan Province and its multi-scale processes [J]. *Chin Sci Bull*, 67(10):997-1011. (in Chinese).
- Liu C, Lü J, Zhai X, et al., 2021. Risk simulation and comparative analysis of “21.7” heavy rainfall and flood in Henan Province [J]. *Express Water Resour & Hydropower Inf*, 42(9):8-14.
- 刘侃, 陈超辉, 何宏让, 等, 2023. 基于局地增长模培育法的对流可分辨尺度 WRF 模式对河南“21.7”特大暴雨的预报评估 [J]. *大气科学学报*, 46(5):725-737. Liu K, Chen C H, He H R, et al., 2023. Assessment of the convection-allowing scale WRF model using LBGM theory: a case study of severe torrential rain in Henan Province, July 2021 [J]. *Trans Atmos Sci*, 46(5):725-737. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220830001. (in Chinese).
- Liu Y B, Zhang C, Tang Q H, et al., 2021. Moisture source variations for summer rainfall in different intensity classes over Huaihe River valley, China [J]. *Clim Dyn*, 57(3):1121-1133. doi:10.1007/s00382-021-05762-4.

- Luo Y L, Wu M W, Ren F M, et al., 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. *J Climate*, 29(24): 8703-8719. doi: 10.1175/jcli-d-16-0057.1.
- Luo Y L, Zhang J H, Yu M, et al., 2023. On the influences of urbanization on the extreme rainfall over Zhengzhou on 20 July 2021: a convection-permitting ensemble modeling study [J]. *Adv Atmos Sci*, 40(3): 393-409. doi: 10.1007/s00376-022-2048-8.
- Ma Q R, Hu R, Wu Y P, et al., 2022. Variations in July extreme precipitation in Henan Province and the related mechanisms [J]. *Int J Climatol*, 42(16): 9115-9130. doi: 10.1002/joc.7805.
- Ma Y, Zhang J, Li L, et al., 2022. Maintenance mechanism of the extremely severe torrential rain process in Henan Province in July 2021 [J]. *Meteor Environ Sci*, 45(4): 1-12.
- May R M, Goebbert K H, Thielen J E, et al., 2022. MetPy: a meteorological python library for data analysis and visualization [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 103(10): E2273-E2284. doi: 10.1175/BAMS-D-21-0125.1.
- Nascimento M C V, de Carvalho A C P L F, 2011. Spectral methods for graph clustering: a survey [J]. *Eur J Oper Res*, 211(2): 221-231. doi: 10.1016/j.ejor.2010.08.012.
- Neal R, Robbins J, Dankers R, et al., 2020. Deriving optimal weather pattern definitions for the representation of precipitation variability over India [J]. *Int J Climatol*, 40(1): 342-360. doi: 10.1002/joc.6215.
- Ohba M, Sugimoto S, 2019. Differences in climate change impacts between weather patterns: possible effects on spatial heterogeneous changes in future extreme rainfall [J]. *Clim Dyn*, 52(7/8): 4177-4191. doi: 10.1007/s00382-018-4374-1.
- Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al., 2011. Scikit-learn: machine learning in Python [J]. *J Mach Learn Res*, 12: 2825-2830.
- 齐道日娜, 何立富, 王秀明, 等, 2022. “7.20” 河南极端暴雨精细观测及热动力成因 [J]. *应用气象学报*, 33(1): 1-15. Chyi D, He L F, Wang X M, et al., 2022. Fine observation characteristics and thermodynamic mechanisms of extreme heavy rainfall in Henan on 20 July 2021 [J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(1): 1-15. doi: 10.11898/1001-7313.20220101. (in Chinese).
- Qin H, Yuan W, Wang J, et al., 2022. Climate change attribution of the 2021 Henan extreme precipitation: impacts of convective organization [J]. *Sci China: Earth Sci*, 65(10): 1837-1846. doi: 10.1007/s11430-022-9953-0.
- Qin P H, Xie Z H, Zou J, et al., 2021. Future precipitation extremes in China under climate change and their physical quantification based on a regional climate model and CMIP5 model simulations [J]. *Adv Atmos Sci*, 38(3): 460-479. doi: 10.1007/s00376-020-0141-4.
- 冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等, 2021. 2021年河南“7.20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析 [J]. *大气科学*, 45(6): 1366-1383. Ran L K, Li S W, Zhou Y S, et al., 2021. Observational analysis of the dynamic, thermal, and water vapor characteristics of the “7.20” extreme rainstorm event in Henan Province, 2021 [J]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6): 1366-1383. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160. (in Chinese).
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al., 2012. An objective identification technique for regional extreme events [J]. *J Climate*, 25(20): 7015-7027. doi: 10.1175/jcli-d-11-00489.1.
- Seneviratne S I, Zhang X, Adnan M, et al., 2021. Weather and climate extreme events in a changing climate [R]//Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. *Climate change 2021: the physical science basis*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press: 1513-1766.
- Si F, Zhang Y, Zhao H, et al., 2021. Analysis on formation and extremity of the 9 July extreme torrential rain in the north of Henan province [J]. *Meteor Environ Sci*, 44(1): 65-73.
- Strahl J L S, Smith P J, 2001. A diagnostic study of an explosively developing extratropical cyclone and an associated 500 hPa trough merger [J]. *Mon Wea Rev*, 129(9): 2310-2328. doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<2310:adsoae>2.0.co;2.
- Sun J H, Zhang Y C, Liu R X, et al., 2019. A review of research on warm-sector heavy rainfall in China [J]. *Adv Atmos Sci*, 36(12): 1299-1307. doi: 10.1007/s00376-019-9021-1.
- Sun J H, Fu S M, Wang H J, et al., 2023. Primary characteristics of the extreme heavy rainfall event over Henan in July 2021 [J]. *Atmos Sci Lett*, 24(1): e1131. doi: 10.1002/asl.1131.
- 孙思远, 2021. 夏季中国东部区域性极端降水事件与对流层上层斜压 Rossby 波包活动的联系 [D]. 南京: 南京信息工程大学. Sun S Y, 2021. Relationship between regional extreme precipitation events in eastern China in summer and baroclinic Rossby wave packet activities in the upper troposphere [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. (in Chinese).
- Sun W, Li J, Yu R C, et al., 2015. Two major circulation structures leading to heavy summer rainfall over central North China [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 120(10): 4466-4482. doi: 10.1002/2014JD022853.
- 谭晶, 杨辉, 孙淑清, 等, 2005. 夏季南亚高压东西振荡特征研究 [J]. *南京气象学院学报*, 28(4): 452-460. Tan J, Yang H, Sun S Q, et al., 2005. Characteristics of the longitudinal oscillation of South Asia high during summer [J]. *J Nanjing Inst Meteor*, 28(4): 452-460. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.2005.04.003. (in Chinese).
- 汤彬, 王宗明, 胡文婷, 等, 2023. 2021年河南省一次罕见暴雨过程的降水特征及成因 [J]. *大气科学*, 47(2): 517-533. Tang B, Wang Z M, Hu W T, et al., 2023. Characteristics and causes of precipitation for a rare rainstorm process in Henan Province in 2021 [J]. *Chin J Atmos Sci*, 47(2): 517-533. (in Chinese).
- Tang Y, Huang A N, Wu P L, et al., 2021. Drivers of summer extreme precipitation events over East China [J]. *Geophys Res Lett*, 48(11). doi:

10. 1029/2021gl093670.
- Tu K, Yan Z W, Wang Y, 2011. A spatial cluster analysis of heavy rains in China [J]. *Atmos Ocean Sci Lett*, 4 (1): 36-40. doi: 10.1080/16742834.2011.11446897.
- Tuel A, Martius O, 2022. Subseasonal temporal clustering of extreme precipitation in the Northern Hemisphere: regionalization and physical drivers [J]. *J Climate*, 35 (11): 3537-3555. doi: 10.1175/jcli-d-21-0562.1.
- Virtanen P, Gommers R, Oliphant T E, et al., 2020. SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python [J]. *Nat Methods*, 17 (3): 261-272. doi: 10.1038/s41592-019-0686-2.
- von Luxburg U, 2007. A tutorial on spectral clustering [J]. *Stat Comput*, 17 (4): 395-416. doi: 10.1007/s11222-007-9033-z.
- Wallace J M, Hobbs P V, 2006. *Atmospheric science: an introductory survey* [M]. 2nd ed. Forest Hills, NY: Callisto Reference: 488.
- 王倩, 翟盘茂, 余荣, 2019. 2018年7月北半球极端天气气候事件及环流特征分析 [J]. *大气科学学报*, 42 (1): 28-35. Wang Q, Zhai P, Yu R, 2019. Analysis of extreme weather and climate events and circulation characteristics in the Northern Hemisphere in July 2018 [J]. *Trans Atmos Sci*, 42 (1): 28-35. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20181129001. (in Chinese).
- 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. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.122902. (in Chinese).
- 王志福, 钱永甫, 2009. 中国极端降水事件的频数和强度特征 [J]. *水科学进展*, 20 (1): 1-9. Wang Z F, Qian Y F, 2009. Frequency and intensity of extreme precipitation events in China [J]. *Adv Water Sci*, 20 (1): 1-9. (in Chinese).
- Wei W, Zhang R H, Wen M, et al., 2014. Impact of Indian summer monsoon on the South Asian high and its influence on summer rainfall over China [J]. *Clim Dyn*, 43 (5): 1257-1269. doi: 10.1007/s00382-013-1938-y.
- Wu P L, Clark R, Furtado K, et al., 2023. A case study of the July 2021 Henan extreme rainfall event: from weather forecast to climate risks [J]. *Wea Clim Extrem*, 40: 100571. doi: 10.1016/j.wace.2023.100571.
- Wu Y J, Wu S Y, Wen J H, et al., 2016. Changing characteristics of precipitation in China during 1960—2012 [J]. *Int J Climatol*, 36 (3): 1387-1402. doi: 10.1002/joc.4432.
- Xie Z Q, Du Y, Zeng Y, et al., 2018. Classification of yearly extreme precipitation events and associated flood risk in the Yangtze-Huaihe River valley [J]. *Sci China: Earth Sci*, 61 (9): 1341-1356. doi: 10.1007/s11430-017-9212-8.
- Xu H X, Duan Y H, Xu X D, 2022a. Indirect effects of binary typhoons on an extreme rainfall event in Henan Province, China from 19 to 21 July 2021: 1. ensemble-based analysis [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 127 (10): e2021jd036265. doi: 10.1029/2021jd036265.
- Xu H X, Duan Y H, Li Y, et al., 2022b. Indirect effects of binary typhoons on an extreme rainfall event in Henan Province, China from 19 to 21 July 2021: 2. numerical study [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 127 (15): e2021jd036083. doi: 10.1029/2021jd036083.
- Xu J, Li R M, Zhang Q H, et al., 2022a. Extreme large-scale atmospheric circulation associated with the “21.7” Henan flood [J]. *Sci China: Earth Sci*, 65 (10): 1847-1860. doi: 10.1007/s11430-022-9975-0.
- Xu J, Zhang Q H, Bi B G, et al., 2022b. Spring extreme precipitation days in North China and their reliance on atmospheric circulation patterns during 1979—2019 [J]. *J Climate*, 35 (7): 2253-2267. doi: 10.1175/jcli-d-21-0268.1.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H, 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. *J Atmos Sci*, 30 (4): 611-627. doi: 10.1175/1520-0469(1973)030<0611:DOBPOT>2.0.CO;2.
- Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al., 2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou city on 20 July 2021 [J]. *J Meteor Res*, 36 (1): 6-25. doi: 10.1007/s13351-022-1166-7.
- Yu Y, Gao T, Xie L, et al., 2022. Tropical cyclone over the western Pacific triggers the record-breaking ‘21/7’ extreme rainfall in Henan, central-eastern China [J]. *Environ Res Lett*, 17 (12): 124003. doi: 10.1088/1748-9326/aca2c4.
- 袁冯, 张君枝, 王冀, 等, 2020. 气候变化背景下北京市短历时暴雨的强度及雨型变化特征 [J]. *大气科学学报*, 43 (5): 802-809. Yuan F, Zhang J Z, Wang J, et al., 2020. Variation characteristics of intensity and pattern of short duration rainstorm in Beijing under the background of climate change [J]. *Trans Atmos Sci*, 43 (5): 802-809. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20191129001. (in Chinese).
- Zhang J, Tang X, Peng J, 2023. Characteristics of apparent heat source and apparent moisture sink of “8.11” rainstorm in Sichuan [J]. *Plateau Mt Meteor Res*, 01 (43): 43-53.
- Zhang J H, Yang L, Yu M, et al., 2023. Response of extreme rainfall to atmospheric warming and wetting: implications for hydrologic designs under a changing climate [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 128 (12): e2022jd038430. doi: 10.1029/2022jd038430.
- Zhang S H, Chen Y, Luo Y L, et al., 2022. Revealing the circulation pattern most conducive to precipitation extremes in Henan Province of North China [J]. *Geophys Res Lett*, 49 (7): e98034. doi: 10.1029/2022GL098034.
- Zhao Y, Xu X D, Li J, et al., 2019. The large-scale circulation patterns responsible for extreme precipitation over the North China Plain in midsummer [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 124 (23): 12794-12809. doi: 10.1029/2019JD030583.
- Zhou X, Liu S, Wang X, et al., 2011. Further study of the \mathbf{Q} -vector based on the quasi-geostrophic omega equation [J]. *Chin J Geophysics*, 54 (5): 660-669. doi: 10.1002/cjg2.1649.

- Zhu C, Chen Z, Li Y, et al., 2022. Effects of stratospheric high PV intrusion on the July 2021 extremely severe torrential rain in Henan Province [J]. *Meteor Environ Sci*, 45(2): 27-37.
- Zhu Z, Liu X, Lu R, et al., 2022. Unprecedented extreme rainfall over East Asia in July and August 2021 [C] // Blunden J, Boyer T. State of the climate in 2021. *Bull Amer Meteor Soc*; S423-S444.
- Zou X K, Ren F M, 2015. Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961—2012 [J]. *Adv Atmos Sci*, 32(5): 704-714. doi: 10.1007/s00376-014-4127-y.

· ARTICLE ·

Understanding the formation mechanism of the “21.7” extreme heavy rainfall event in Henan, China from a climatic perspective

ZHANG Zhiyu¹, HUANG Anning^{1,2}, HUANG Danqing¹, ZHAO Dajun³, ZHANG Yan⁴, GU Chunlei¹, CHEN Shuang¹

¹School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

²Qinghai Lake Comprehensive Observation Research Station, Chinese Academy of Sciences, Gangcha 812300, China;

³State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;

⁴National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China

Abstract An extraordinary extreme heavy rainfall event during 19—22 July 2021 (“21.7” EHRE) attacked Henan Province of North China Plain (NCP) and led to tremendous catastrophes due to the record-breaking rainfall. Previous studies mainly focus on the individual case study of the “21.7” EHRE, which cannot give a general view of circulation characteristic from the climatic perspective, particularly for the extraordinary precipitation extremes with a rare occurrence. Based on 12-hourly observed precipitation data from rain gauge stations during 1960—2021 from CMA (China Meteorological Administration) and NCEP/NCAR reanalysis data, this study investigated the typical synoptic patterns responsible for the summer regional extreme precipitation events (REPEs) over NCP during 1960—2021 via the spectral clustering method and systematically revealed how the “21.7” EHRE occurred. Results show that the “21.7” EHRE occurred under a rare synoptic pattern featured by a distant typhoon over western Pacific accompanied by the farther northwestward extended western Pacific subtropic high (WPSH) and northeastward extended South Asia high (SAH). This synoptic pattern only contributes 5.97% of the total summer REPE occurrences over NCP but can lead to much stronger precipitation extremes. The water vapor transported by the strong southeasterly winds between the Typhoon In-Fa and WPSH from the western Pacific to Henan, and the intense ascending motion caused by wind shear between lower and upper troposphere over Henan Province led to the occurrence of the “21.7” EHRE. In addition, diagnosis analysis based on quasi-geostrophic omega equation indicates that the positive feedback on intense ascending motion and diabatic heating at lower troposphere over Henan province and surrounding areas distinguishes the “21.7” EHRE from the others under the same synoptic pattern. This study investigates the dominant large-scale synoptic pattern of the “21.7” EHRE in Henan to figure out the formation mechanism of the rarest REPEs in a climatic aspect. Findings of this study provide a novel perspective on characterizing and predicting future precipitation extremes in NCP by linking the occurrence and distribution of REPEs with the synoptic patterns.

Keywords “21.7” extraordinary extreme precipitation event in Henan; regional extreme precipitation event; synoptic pattern; spectral clustering

doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240515001

(责任编辑:张福颖)