

# 2021 年河南省一次罕见暴雨过程的降水特征及成因分析

汤彬<sup>1,2</sup>, 王宗明<sup>3</sup>, 胡文婷<sup>1,2\*</sup>, 段安民<sup>1,2,4</sup>

1 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG), 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100029

3 河南省气象服务中心, 河南郑州 450003

4 近海海洋环境科学国家重点实验室, 海洋与地球学院, 厦门大学, 福建厦门 361102

**摘要** 基于河南省 119 个国家自动站逐小时降水观测资料、欧洲中期天气预报中心逐小时大气再分析资料(ERA-5)、美国国家环境预报中心(NCEP)再分析资料及美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的海温资料对“21·7”河南罕见特大暴雨的降水特征、大气环流和物理量场进行了较为详细的分析, 并对比了河南历史上三次暴雨过程。结果表明: (1) “21·7”极端强降水过程在一小时最大降水量、三小时最大降水量、六小时最大降水量、一天最大降水量、三天最大降水量和过程累积降水量方面均表现出显著极端性。(2) 高层南亚高压与东海附近低涡稳定共存, 中层副高稳定偏北偏强, 与大陆高压形成对峙, 使得天气形势稳定, 为河南地区极端强降水的发生提供了背景条件。低层西太副高南侧东风气流与台风“烟花”北侧的东风气流相叠加, 使得西太平洋到河南地区形成深厚的水汽通道, 继而为河南地区极端强降水提供了充沛的水汽。(3) 在“21·7”极端强降水期间, 河南地区水汽通量散度值为负且大部分地区的整层可降水量可达 100mm, 整层水汽十分充沛。涡度和垂直速度场的大值区主要出现在太行山东麓临近地区, 与降水大值区相对应。(4) 与河南历史上两次暴雨过程“75·8”和“12·8”相比, 其相似之处在于台风在北移过程中受到副热带高压的阻挡而停滞少动, 从而将源源不断的水汽输送至河南, 造成极端降水事件的发生。(5) “21·7”暴雨期间西北太平洋副热带高压能够稳定维持在台风北侧是多种因素综合影响的结果, 包括中高纬度环流配置、西太暖池异常偏暖造成 Hadley 下沉支加强, 以及增强的越赤道气流。这是造成“21·7”暴雨过程累积降水量量级大于“12·8”暴雨且最终降水量超过 500mm 的可能原因之一。

**关键词** 极端强降水 河南 环流形势 物理量场 副热带高压

文章编号 2021251A

中图分类号

文献标识码 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.22092251

收稿日期 2022-01-25; 网络预出版日期

作者简介 汤彬, 女, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事极端降水事件研究。E-mail: tangbin@mail.iap.ac.cn

通讯作者 胡文婷, E-mail: hwt@lasg.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发项目 2021YFC3000802, 国家自然科学基金项目 41875076

Funded by National Key Research and Development Program of China (2021YFC3000802), National Natural Science Foundation of China (41875076)

# **Analysis of precipitation characteristics and causes of a rare rainfall process in Henan province in 2021**

Bin Tang<sup>1,2</sup>, Zongming Wang<sup>3</sup>, Wenting Hu<sup>1,2\*</sup>, Anmin Duan<sup>1,2,4</sup>

<sup>1</sup>*State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG),*

*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

<sup>2</sup>*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*

<sup>3</sup>*Henan Meteorological Service Center, Zhengzhou 450003, China*

<sup>4</sup>*State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen*

*University, Xiamen 361102, China*

\*Corresponding author: Wenting Hu, Email: hwt@lasg.iap.ac.cn

**Abstract** Based on the hourly precipitation data of 119 national automatic stations in Henan, the atmospheric reanalysis data ERA-5, the atmospheric reanalysis data NCEP and sea surface temperature provided by NOAA, a detailed analysis of the precipitation characteristics, atmospheric circulation and environmental physical quantities was carried out. We also compared three extreme precipitation processes in Henan. The results show that: (1) The "21 • 7" extreme rainfall is significantly extreme in terms of maximum precipitation in one hour, three hours, six hours, one day, three days, and cumulative precipitation in the process. (2) In 200hpa, South Asian high and the low vortex near the East China Sea coexist steadily. In 500hpa, the subtropical high is stable and northward, and confronts with the continental high. This makes the atmospheric circulation stable and provides background for the occurrence of extreme rainfall in Henan. In 850 hpa, the superimposition of the easterly airflow on the south side of Pacific Subtropical High and on the north side of Typhoon created a deep water vapor channel from the Western Pacific to Henan, providing abundant water vapor. (3) During the "21 • 7" extreme rainfall period, the water vapor flux divergence was negative and the precipitable water in most region of Henan could

reach 100 mm, which means the water vapor was abundant. The large value areas of vorticity and vertical velocity appear near the eastern foot of Taihang Mountains, corresponding to the large value areas of precipitation. (4) Compared with two heavy rainfall processes ("75 • 8" and "12 • 8") in Henan, the similarity is that the typhoon was blocked by the Subtropical high when move northward and stopped. One possible reason why the "21 • 7" extreme precipitation is greater is due to that the subtropical high is stronger and able to stably exist on the north side of the typhoon. (5) The stable maintenance of the subtropical high in the Northwest Pacific on the north side of the typhoon during the "21.7" heavy rain is the result of the combined effects of various factors, including the distribution of the mid-to-high latitude circulation, the strengthening of the sinking branch of the Hadley circulation caused by the abnormal warmer West Pacific Warm Pool, and the strengthening of the Cross-equatorial flow. This is one of the possible reasons why the cumulative precipitation of the "21.7" heavy rainfall is greater than the "12.8" heavy rainfall and final exceeds 500 mm.

**Key words** extreme precipitation; Henan; atmospheric circulation; environmental physical quantities; Subtropical High

# 1 引言

自工业革命以来,全球变暖使得极端气象水文事件的发生频率和强度都显著增加。我国地处东亚地区,自然条件相对复杂,不同地区的气候差异较大。东部地区由于受到季风气候和热带气旋的影响,近 2/3 的地区都受到了不同类型和危害程度的洪涝灾害影响(张辉等,2011)。新中国成立以后,我国几乎每年都在遭受不同程度的水灾。平均下来,每年因为洪涝灾害引起的农作物受灾和成灾面积分别占了耕地面积的 10%和 5%,洪涝灾害也因此成为制约我国经济社会发展的重要因素之一(胡俊锋等,2014)。Zhai et al. (2005) 和田国珍等(2006) 的研究表明,由全球变暖引发的极端降水频率和强度的增加,以及东亚和南亚季风的突变是我国降水量波动性增大的主要原因之一,而降水量波动性的增加进一步导致了我国洪涝灾害的发生变得更加频繁和严重。

2021 年 7 月 17—22 日,河南省发生了一次历史罕见的极端强降水事件(简称“21·7”罕见特大暴雨)。此次暴雨强度大,且险情、灾情发展迅速。据统计,截至 8 月 1 日 18 时,此次暴雨过程导致 103 个水库超汛限,市政道路损毁 2730 处,干线公路损毁 1190 处,农村道路损毁 6415 处,倒塌房屋 5.28 万间,农作物受损  $11.15 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 、绝收  $2.90 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,受灾人口 188.49 万人,遇难 292 人、失踪 47 人,直接经济损失达 532 亿元(苏爱芳等,2021)。河南省地处我国中纬度南北气候过渡带,西部为连绵的丘陵山地,东部则为广阔的豫东平原,地形复杂,暴雨灾害频发。河南降雨量具有季节性和区域性特征,暴雨强度大、突发性强、次生灾害严重(张霞等,2021)。精细的暴雨过程分析及准确的暴雨预报对于河南省的防灾减灾具有非常重要的现实意义(程锦霞,2013)。因此,研究河南“21·7”罕见特大暴雨的降水特征及其成因不仅有其科学性,更具有应用价值。

近年来,我国气象工作者对河南省多次极端强降水事件也开展了较为深入的研究工作。丁一汇等(1978)从多尺度相互作用的观点分析了 1975 年 8 月上旬发生在河南的一次极端强降水事件(简称“75·8”暴雨过程),发现天气尺度条件为此次极端强降水事件的发生提供有利条件,而中尺度系统和地形条件则对触发暴雨起着重要作用。王新敏等(2002)的研究则表明台风低压和台风倒槽是造成河南大暴雨、特大暴雨以及连续性暴雨的主要影响系统。程锦霞(2013)分析了 2010 年 9 月发生在河南地区的一场秋季暴雨,指出中低空的低槽、低涡、切变线是造成此次暴雨的直接影响系统,中低空急流也起了一定作用。马月枝等(2017)就 2016 年河南两次极端强降水事件进行分析发现,太行山地形的动力抬升以及山前中尺度

地形辐合线的发展和维持对河南地区大暴雨的形成十分有利。王君（2019）对 2016 年发生在豫北的两次暴雨过程进行了诊断分析，结果表明两次特大暴雨过程均有分别来自热带和副热带的西南和东南水汽输送，暴雨过程中豫北地区的整层水汽条件较好。冀翠华和李姝霞（2021）则对开封市“7·19”大暴雨过程的环流背景及水汽、动力等环境因子进行分析发现，西太平洋副热带高压稳定加强和高空低槽的东移加深是触发此次大暴雨天气发生的主导因素。

已有的研究中，主要聚焦于“21·7”暴雨的多尺度环流特点、地形影响、中尺度过程及高降水效率等（冉令坤等，2021；苏爱芳等，2021；孙悦等，2021；张霞等，2021）。然而造成河南地区极端强降水事件的环流背景场有何共同点？河南地区过程降水超过 500 mm 的关键因素是什么？目前仍不明确。本文旨在回答以下三个问题：（1）“21·7”河南罕见特大暴雨具有哪些基本特征？（2）是什么原因导致了此次大暴雨的发生？（3）和以往河南地区的暴雨事件相比，为何此次暴雨过程中出现破纪录的累积降水量？围绕上述三个问题，本文使用河南省逐小时站点降水资料对此次极端强降水事件进行分析，探讨其对应的环流背景和物理量场，然后与历史上河南其他两次极端强降水事件进行对比分析，从而找出造成“21·7”河南罕见特大暴雨的关键因素。本文的剩余部分组织如下：第 2 节描述了数据和研究方法。第 3 节报告研究结果。第 4 节进行讨论，第 5 节对结果进行总结。

## 2 资料和方法

### 2.1 研究区域

在本研究中聚焦的地区为河南省，主要包括 17 个省辖市（也即：郑州市、开封市、洛阳市、平顶山市、焦作市、鹤壁市、新乡市、安阳市、濮阳市、许昌市、漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市），1 个省直管市济源市。其中郑州市已发展为人口超千万、GDP 过万亿的大型城市。河南省地处丘陵到平原地貌过渡地带(图 1)，复杂的天气系统以及地形均有可能对河南地区的降水造成较为明显的影响。

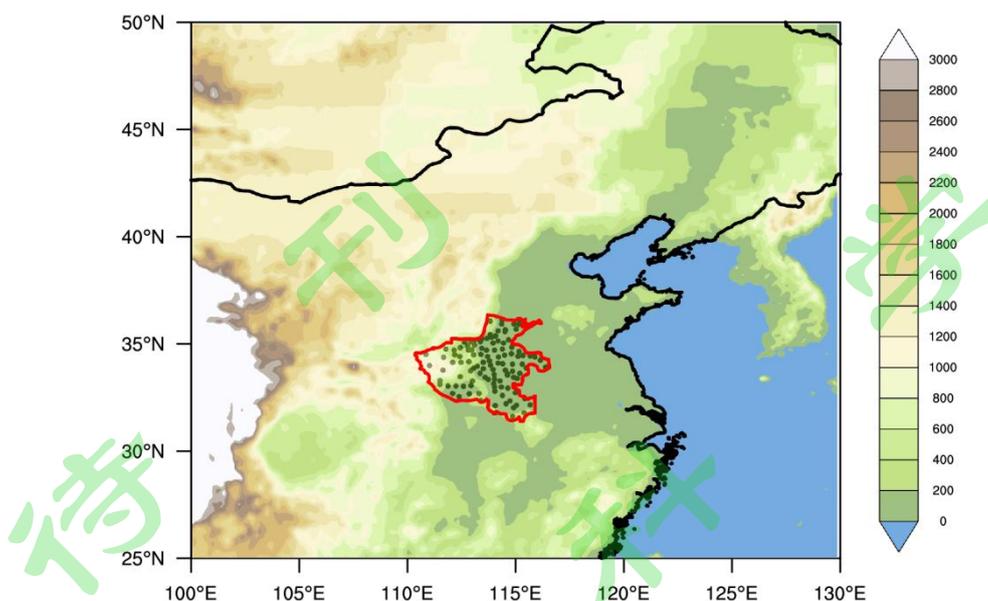


图 1 研究区域（红色框范围）及河南省 119 个国家自动站的空间分布。填色代表海拔高度（单位：m）。

Fig.1 Map showing the location of 119 stations in Henan province and altitudes (shading; m) of the Henan region (red lines).

## 2.2 资料

本文所用资料为河南省 1975 年 8 月 4—8 日人工观测记录的逐小时降水数据以及 2010 年 9 月 5—7 日、2012 年 8 月 4—5 日、2013 年 5 月 25—26 日、2016 年 7 月 18—20 日和 2021 年 7 月 17—22 日 119 个国家自动站逐小时降水资料。需要说明的是，6 次降水过程时段的选择源于已有的文献记录（丁一汇等，1978；程锦霞，2013；张启绍，2013；喻谦花等，2014；栗晗等，2018；苏爱芳等，2021）。除此之外，还使用了同期欧洲中期天气预报中心（ECMWF）提供的第五代大气再分析全球气候数据（ERA5；Hersbach et al., 2020），可通过 ECMWF 运营的哥白尼气候变化服务网（<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset&text=ERA5/>）下载，时间分辨率为 1 小时，空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，要素场包括风场（u 和 v 分量），比湿场（q），垂直速度场（w），位势场（z），700 hPa 涡度场（vo）和地表气压（sp）。对于逐日资料，采用了美国国家环境预报中心（NCEP）再分析资料提供的位势高度场（hgt）、风场（u 和 v 分量）、垂直速度场（omega）的逐日再分析资料，空间分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，可以通过 <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html> 进行下载。海温资料则采用了美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的逐日海温资料，空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，可以通过 <ftp://ftp2.psl.noaa.gov/Datasets/noaa.oisst.v2.highres/> 进行下载。需要说明的是，本文中所采用的资料均已统一到北京时。

## 2.3 方法

### 2.3.1 大气可降水量的计算

$$W = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^P q dp \quad (1)$$

$W$  为大气可降水量, 单位为 mm;  $g$  为重力加速度, 单位为  $m \cdot s^{-2}$ ;  $q$  为比湿, 单位为  $kg \cdot kg^{-1}$ ;  $P_s$  为地面气压, 一般取 1000 hPa,  $P$  为大气层顶气压, 一般取 300 hPa.

### 2.3.2 水汽通量的计算

$$Q = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^P \vec{V} q dp, \quad (2)$$

其中包括纬向和经向水汽通量:

$$\begin{cases} qu = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^P u q dp \\ qv = -\frac{1}{g} \int_{P_s}^P v q dp \end{cases} \quad (3)$$

$Q$  为水汽通量, 单位为  $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ .

### 2.3.3 水汽通量散度的计算

$$Q_{div} = \frac{1}{g} \int_{P_s}^P \vec{V} \cdot \nabla q dp + \frac{1}{g} \int_{P_s}^P q (\nabla \cdot \vec{V}) dp, \quad (4)$$

$Q_{div}$  为水汽通量散度, 单位为  $g \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ ;  $\vec{V}$  为风矢量, 单位为  $m \cdot s^{-1}$ . 在上面的公式中, 第一项为平流项, 第二项为散度项。

### 2.3.4 200hPa 西风急流

根据况雪源和张耀存 (2006) 文中的定义, 本文 200hPa 高空西风急流区取纬向风速大于等于 30m/s 的区域。

### 3 结果

#### 3.1 极端性分析

图 2 给出了 2021 年 7 月 16—24 日河南省逐日降雨量的空间分布情况。根据整个时间段内河南省降水空间分布的变化，可以将此次降水过程分为四个阶段：（1）7 月 16—18 日：在这段时间内，暴雨点（日降水量大于 50mm 的站点）较分散，且 16—17 日主要集中在河南的南部，但是 18 日，豫北地区开始出现暴雨点。该阶段尽管有站点日降水量超过 50mm，但是并没有出现日降水量超过 100mm 的气象站；（2）7 月 19—20 日：在该阶段中，降水的大值中心主要集中在河南中北部地区，河南省内淮河以北的大部地区都出现了暴雨。19 日，河南北部开始出现日降水量超过 100mm 的气象站，且嵩山站的日降水量超过了 200mm。20 日，豫中地区有 15 个站点都出现了日降水量超过 200mm 的特大暴雨；（3）7 月 21—22 日：降水的大值中心开始逐渐向河南北部地区转移，中部地区的降水强度减弱。21 日，河南中部地区仅有 3 个站点的日降水量超过了 200mm，其他日降水量超过 200mm 的站点均出现在河南北部地区。到 22 日，日降水量超过 50mm 的气象站几乎都出现在豫北地区，降水强度大大降低。分散性的暴雨和大暴雨点主要分布于太行山东侧沿山一带和伏牛山区；（4）7 月 23 日以后：整个河南地区没有出现日降水量超过 50mm 的气象站，整个降水过程趋于结束。

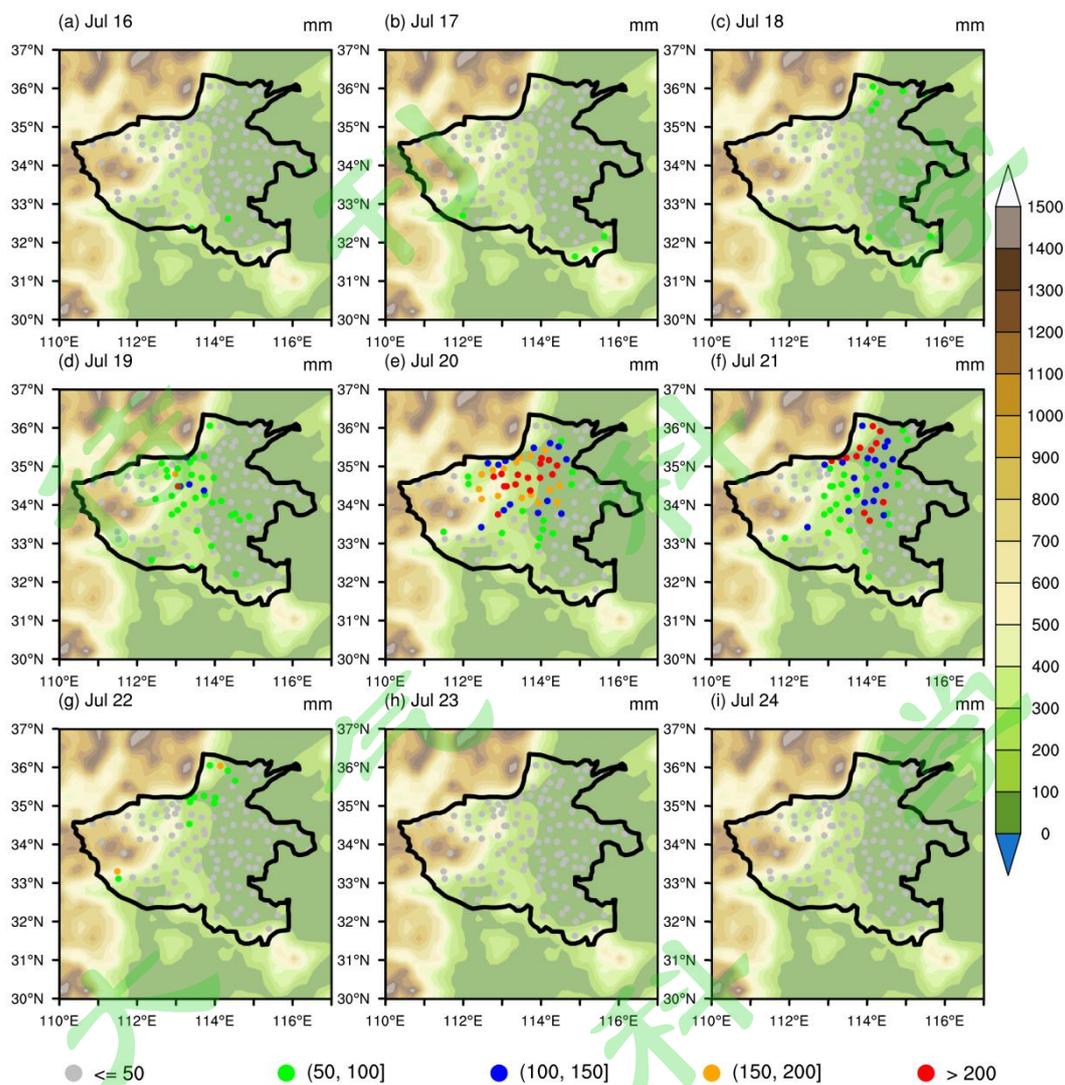


图 2 2021 年 7 月 16—24 日河南省逐日降雨量（单位：mm）。填色代表海拔高度（单位：m）。

Fig.2 A map of rainfall (unit: mm) in Henan Province during July 16—24, 2021. The shading represents the altitudes (unit: m).

根据 7 月 16—24 日降水空间分布的变化，我们将“21·7”罕见特大暴雨发生的开始时间定为首次有大于 5 个国家站日降水量超过 50mm 的那一天，也即 7 月 18 日。而将首次有小于 5 个国家站日降水量超过 50mm 的前一天定为降水结束的时间，也即 7 月 22 日。也就是说，“21·7”罕见特大暴雨主要集中在 7 月 18—22 日。同时，我们注意到，虽然暴雨过程发生在 7 月 18—22 日，但是特大暴雨（日降水量大于 100mm）主要发生在 7 月 19—21 日。

接下来我们针对 7 月 18—22 日和 7 月 19—21 日这两个时间段对此次暴雨过程进行分析。图三给出了暴雨过程（7 月 18—22 日）中的累积降水量，单日最大降水量，以及过程累积

降水量超过 500mm 且单日最大降水量超过 300mm 的特定气象站的过程累计降水和 7 月 19—21 日降水的逐小时变化。需要说明的是，符合过程累积降水量超过 500mm 且单日最大降水量超过 300mm 的气象站一共有 9 个，分别是：安阳、淇县、辉县、汤阴、卫辉、信阳、郑州、嵩山，新密（以下简称为“9 个特定气象站”）。

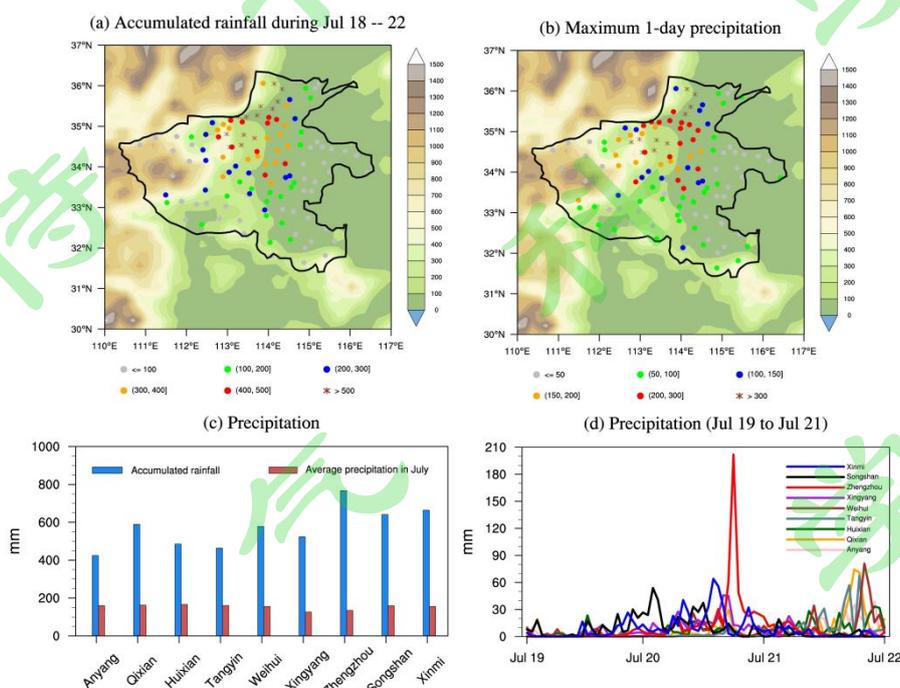


图 3 (a) 7 月 18—22 日累积降水量的空间分布；(b) 单日最大降水量的空间分布；(c) 9 个特定气象站 7 月 18—22 日累积降水量（蓝色柱子）和气候态 7 月平均累计降水（红色柱子）；(d) 9 个特定气象站 7 月 19—21 日降水的逐小时变化。

Fig.3 (a) map of the accumulated precipitation amount in Henan province during 18th July to 22th July 2021 (unit: mm); (b) map of the maximum 1-day precipitation in Henan province during 18th July to 22th July (unit: mm); (c) the accumulated precipitation amount during 18th July to 22th July (blue bars) and average precipitation in July (red bars) at nine specific national stations; (d) the hourly rainfall amount in nine specific national stations during 00:00 on 19th July to 23:00 on 22th July (unit:mm).

从图 3 中可以看出，过程累积降水大值区主要集中在太行山东麓临近地区，有 13 个国家气象站的过程累积降水都超过了 500mm，这说明河南地区的暴雨和太行山地形之间关系密切。栗晗等（2018）对 2016 年“7·19”特大暴雨过程与地形的关系进行了详细分析，结果发现大于 500mm 的极端强降水中心站点海拔均大于 300m。而对于“21·7”罕见特大暴雨，过程累积降水大于 500mm 的极端强降水中心站点的海拔高度也普遍大于 300m（图 3a）。张

霞等（2021）就地形与豫北大暴雨的关系进行了更为细致的分析，结果表明豫北暴雨有山前迎风坡一侧降水量远超其东侧平原地区的分布特征。就单日最大降水量而言，其与地形之间的关系与过程累积降水类似，大值区（单日最大降水量超过 300mm）也主要集中在太行山东麓临近地区（图 3b）。同时可以发现的是，不论是过程累积降水还是单日最大降水，相对于河南南部地区，河南北部地区的站点都普遍呈现出了更极端的情况。

对 9 个特定气象站进行分析发现，9 个特定气象站的过程累积降水都远超气候态 7 月平均累积降水，其中郑州国家站过程累积降水达 767.2mm，但是气候态七月平均降水仅为 134.4mm。也就是说，在“21·7”罕见特大暴雨过程中，郑州 5 天内的累积降水量达到了七月平均降水量近 6 倍（图 3c），最大日降雨量达 624.1mm，是有记录以来郑州站最大日降雨量的 3 倍左右。逐小时降水分析表明，7 月 20 日后，嵩山、新密、和郑州站开始出现 1 小时降水超过 30mm 的情况，也即开始出现短时强降水。7 月 21 日，短时强降水则主要出现在淇县、汤阴、卫辉站。7 月 19—21 日期间，郑州站 1 小时降水量高达 201.9mm（出现在 20 日 16—17 时，图 3d），也因此刷新了郑州站建站以来的历史记录，且成了 1951 年以来我国气象数据（不含港澳台地区）中 1h 降雨量的第一位。

表 1 给出了“21·7”过程与河南省历史上几次强降水过程对比。需要说明的是，我们主要关注 2010 年及以后发生的暴雨过程，但是考虑到“75·8”暴雨过程的显著极端性，也将其加入对比行列。从表中可以看出，无论是一小时最大降水量、三小时最大降水量、六小时最大降水量、一天最大降水量、三天最大降水量还是过程累积降水量，“21·7”罕见特大暴雨均超过了“75·8”等极端强降水过程，表现出了显著的极端性。

表 1 “21·7”罕见特大暴雨过程与河南省历史上几次强降水过程对比

Table 1 Comparison between “21·7” and historical extreme precipitation events in Henan

降水时段	一小时最大 降水量	三小时最大 降水量	六小时最大 降水量	一天最大降 水量	三天最大降 水量	过程累积降 水量
1975 年 8 月 4 ~ 8 日	82.5mm	191.3mm	232.1mm	343.6mm	486.3mm	532.4mm
2010 年 9 月 5 ~ 7 日	65.9mm	146.6mm	147.1mm	163.4mm	218.4mm	219.7mm
2012 年 8 月 4 ~ 5 日	76.5mm	112.3mm	130.7mm	197.1mm	197.2mm	197.2mm
2013 年 5 月 25 ~ 26 日	34.5mm	59.1mm	98.2mm	142.7mm	192.9mm	192.9mm
2016 年 7 月 18 ~ 20 日	70.2mm	142.5mm	186.3mm	210.8mm	292.6mm	292.6mm
2021 年 7 月 17 ~ 22 日	201.9mm	310.8mm	389.7mm	627.4mm	775.4mm	789.3mm

### 3.2 环流特征分析

由于此次极端强降水事件主要集中在7月19—21日，因此接下来的环流和物理量场分析将聚焦于7月19—21日。

首先对200 hPa的天气形势演变进行分析。7月17日（图略），乌拉尔山东部地区有一低槽，南亚高压稳定在青藏高原的上空，我国东海附近上空有一低涡，中心强度约为1228dagpm。到7月19日20时（图4a），乌拉尔山东部的大槽逐渐收缩东移，南亚高压开始东伸北抬，沿海低涡开始逐步西移靠近我国。值得注意的是，当东海附近的低涡于7月20日20时接近我国东部地区后（图4c），东边（125E°附近）又出现了新的低涡系统。这表明，沿海地区低值系统发展旺盛，但是在向西移动的过程中受到一定的阻碍。那么为什么沿海低涡系统向西移动会受阻呢？从7月20日08时（图4b）的天气形势可以看出，在南亚高压在20日08时已东伸至100E°附近，而其阻挡作用在一定程度上限制了沿海低涡系统的西移。同时，从从19日20时到20日20时（图4a—c），黄淮地区的高压脊也在不断发展，脊上分流辐散不断加强，有利于低空辐合系统的发展。从200hpa急流的发展情况来看，在河南西北部地区高空一直存在一支较强的西南急流。从19日20时到20日20时（图4a—c），西南急流逐渐加强。而河南省的北部地区则刚好位于该急流轴入口区的右侧，即对应高空槽前辐散区，这也有利于低空辐合系统的发展。21日08时（图4d），随着南亚高压东伸北抬，控制黄淮中西部的高压脊及对应的强辐散区也随之北抬，继而影响豫北和华北地区。

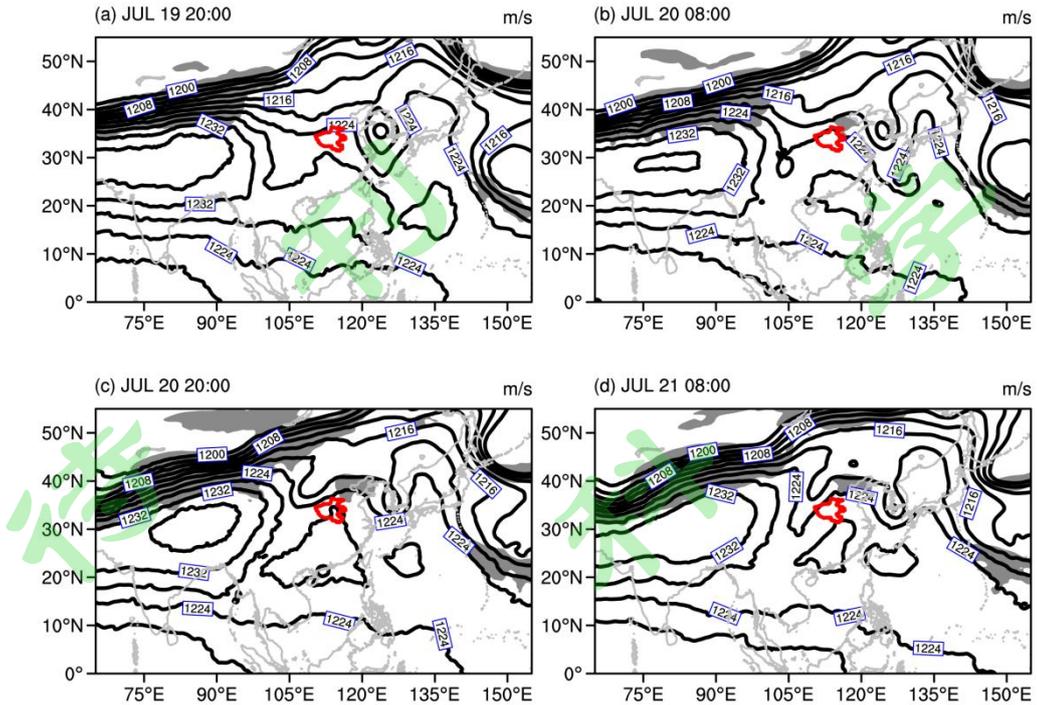


图4 (a) 2021年7月19日20:00; (b) 2021年7月20日08:00; (c) 2021年7月20日20:00; (d) 2021年7月21日08:00的200 hPa高空急流区(灰色阴影, 高空急流区为200hPa纬向风速大于等于30m/s的区域; m/s)和位势高度(等值线; dagpm)。

Fig.4 The distribution of 200 hPa westerly jet (gray shading where the zonal wind speed is greater than or equal to 30m/s; m/s) and 200hpa geopotential height (contours; dagpm) at (a) 20:00 on 19th July; (b) 08:00 on 20th July; (c) 20:00 on 20th July and (d) 08:00 on 21th July.

接下来我们对500 hPa的天气形势演变进行分析。我国西部的大陆高压东伸到我国西北地区的东部, 日本高压较强盛。相对于气候态平均(图5红色实线)而言, 7月19—21日西太平洋副热带高压(以下简称为西太副高)整体偏北且偏强(图5蓝色实线)。和200 hPa天气形势图上的东海低涡相对应, 500 hPa天气形势图上, 西太副高南侧则存在台风。这说明, 东海低涡系统深厚, 而偏北偏强的西太副高与深厚的东海低涡系统有利于天气形势维持稳定, 河南省位于“两高”之间的低压区。详细来看, 从7月19日20时(图5a)到7月20日20时(图5c), 大陆高压西退并减弱。然而, 对于西太副高而言, 从7月19日20时到7月20日08时, 稳定偏西但是强度稍有减弱(图5a—b)。但是在7月20日08时后, 西太副高稳定维持并且强度逐渐增强, 到7月20日20时稳定维持在台风“烟花”的北部地区, 阻挡台风“烟花”向北部移动(图5c)。7月20日20时后, 西太副高稍有东退(图

5c)。受较为稳定的天气形势影响，我国东部内陆地区的低涡在暴雨过程中的活动范围均在黄淮中西部地区，有利于河南地区形成持续性暴雨。

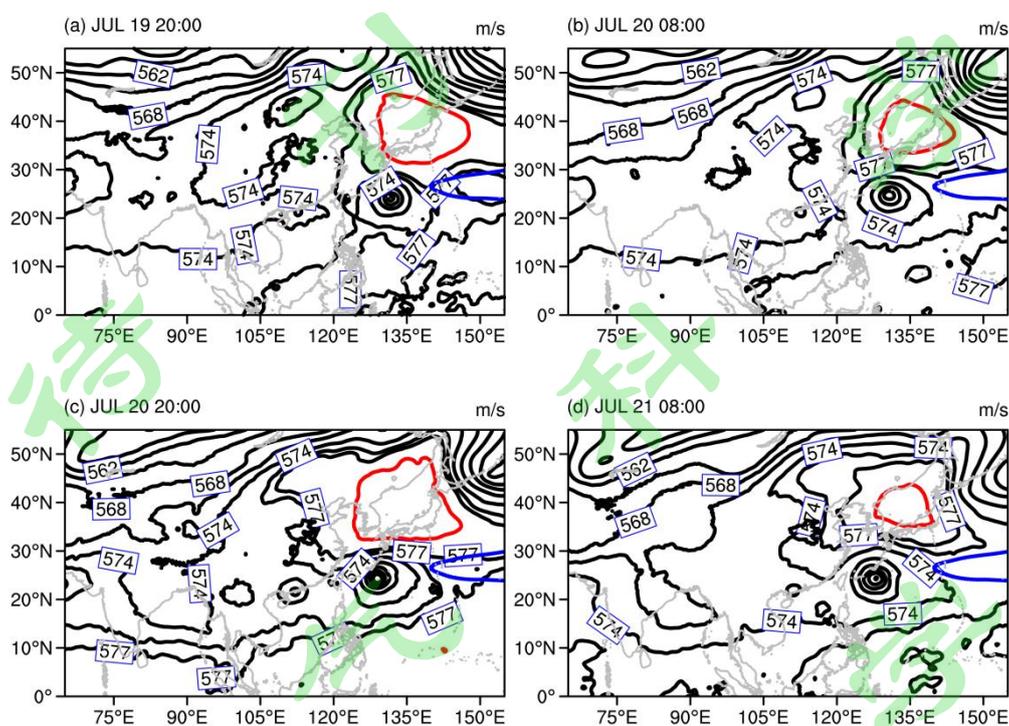


图5 (a) 2021年7月19日20:00; (b) 2021年7月20日08:00; (c) 2021年7月20日20:00; (d) 2021年7月21日08:00 500 hPa 的位势高度(等值线; dagpm)。蓝色的等值线代表气候态的7月西太副高位置, 红色等值线代表实时的西太副高位置。

Fig.5 The distribution of 500 hPa geopotential height (contours; dagpm) at (a) 20:00 on 19th July; (b) 08:00 on 20th July; (c) 20:00 on 20th July and (d) 08:00 on 21th July. The blue contour represents the position of the climatic western Pacific subtropical high in July, and the red contour represents the real-time position of the western Pacific subtropical high.

850 hPa 上, 台风“烟花”位于西太副高的南部。西太副高南侧的东风气流与台风“烟花”北侧的东风气流相叠加在一起, 进而使得河南地区有强盛的东南风, 为河南源源不断地输送水汽。同时, 台风“查帕卡”东侧的南风气流也为河南地区贡献了一部分水汽输送。7月19日20时, 河南地区的东南风开始增强(图6a)。到7月20日08时, 河南部分地区东风风速甚至超过18m/s(图6b)。从7月20日08时到21日08时, 河南地区的东南风量持续维持, 继而形成一条源于海上的连续的东南气流水汽输送带(图6b—d)。此深厚的东南气流不仅可以为河南省的极端强降水提供充足的水汽, 还可能是导致郑州东风或东南风加强、形成急流的重要原因(苏爱芳等, 2021)。

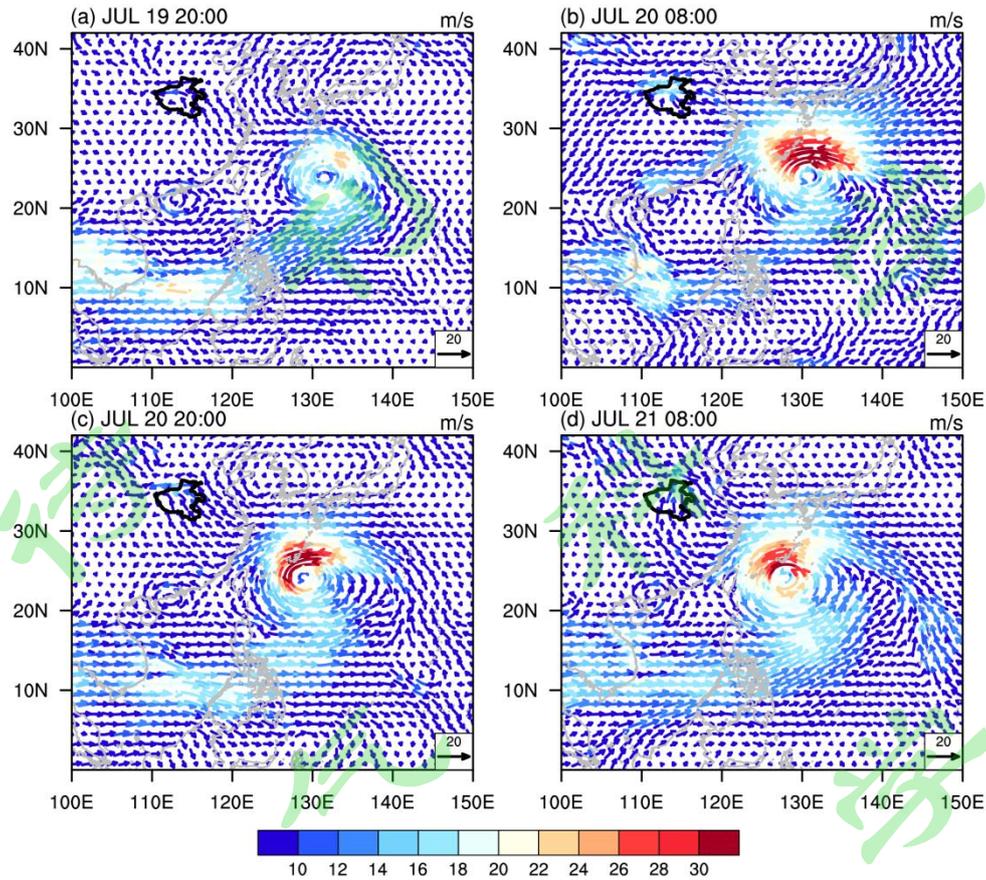


图 6 (a) 2021 年 7 月 19 日 20:00; (b) 2021 年 7 月 20 日 08:00; (c) 2021 年 7 月 20 日 20:00; (d) 2021 年 7 月 21 日 08:00 850 hPa 上的风场。

Fig.5 The distribution of 850 hPa wind field (vectors; m/s) at (a) 20:00 on 19th July; (b) 08:00 on 20th July; (c) 20:00 on 20th July and (d) 08:00 on 21th July.

综上，高层南亚高压与东海附近低涡稳定共存，中层副高稳定偏北偏强，与大陆高压形成对峙，使得天气形势稳定，为河南地区极端强降水的发生提供了背景条件。低层西太副高南侧东风气流与台风“烟花”北侧的东风气流相叠加，使得西太平洋到河南地区形成深厚的水汽通道，继而为河南地区极端强降水提供了充沛的水汽。

### 3.3 物理量场分析

前面我们对“21·7”罕见特大暴雨过程中的大气环流进行了分析，接下来分析与环流对应的物理量场。鉴于整个过程中物理量场的空间分布比较相似，加上 7 月 20 日是暴雨发生的主要时间，因此本文仅给出了 7 月 20 日 20 时对应的物理量场（图 7）。从图中可以看

出，850 hPa 上，河南地区水汽通量散度值为负（图 7a），表明从西太平洋输送过来的水汽在河南地区辐合。同时，河南省大部分地区的整层可降水量可达 100mm，说明该区域整层的水汽十分充沛（图 7b）。而在 700 hPa 上，涡度大值区主要出现在河南北部太行山附近（图 7c），垂直速度场也有着相似的分布情况（图 7d），这可能与地形作用有关（栗晗等，2018）。与此同时，已有大量研究表明，太行山和伏牛山的地形会给河南省的降水带来显著的影响（张宁和苏爱芳，2017；栗晗等，2018；苏爱芳等，2021），但是嵩山对于河南降水的影响目前研究尚不充分。本研究不针对地形对“21·7”罕见特大暴雨的影响进行详细分析。

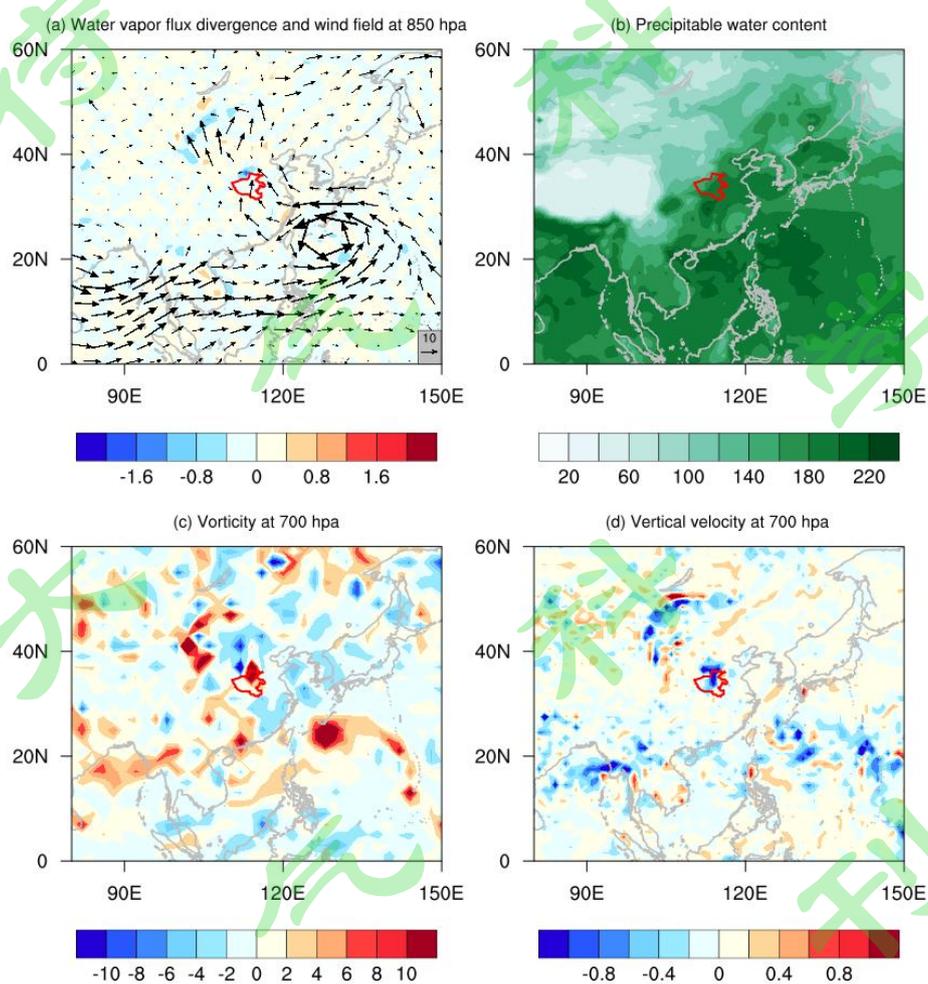


图 7 2021 年 7 月 20 日 20 时 (a) 850 hPa 水汽通量散度（单位： $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）和风场（单位： $\text{m s}^{-1}$ ）；(b) 整层大气可降水量（单位： $\text{mm}$ ）；(c) 700 hPa 涡度（单位： $10^{-5}$ ）；(d) 700 hPa 垂直速度（单位： $10^{-1} \text{pa/s}$ ）。

Fig.7 (a) The water vapor flux divergence (units:  $\text{g cm}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$ ) and wind field (units:  $\text{m s}^{-1}$ ) at 850 hPa; (b) precipitable water (units:  $\text{mm}$ ); (c) vorticity at 700 hPa (units:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ ); (d) vertical velocity at 700 hPa (units:  $10^{-1} \text{pa/s}$ ) at 20:00 on 20th July 2021.

### 3.4 与“75·8”、“12·8”两次暴雨过程的对比分析

表 1 列出了“21·7”罕见特大暴雨过程与河南省历史上几次强降水过程的对比。该小节将对其中的三场暴雨过程（也即“75·8”、“12·8”和“21·7”暴雨过程）进行对比分析，以探究三场暴雨存在的共性和差异。

图 8 给出了 1975 年 8 月 7—8 日 500 hPa 位势高度场的空间分布。在整个过程中，深入内陆的 7503 号台风（热低压）北部有一个稳定的高压坝存在，该高压坝阻挡了台风向北推进，继而使得台风持久维持。台风北侧偏东风将水汽源源不断地从海洋上输送到河南地区，使得河南省出现极端强降水。

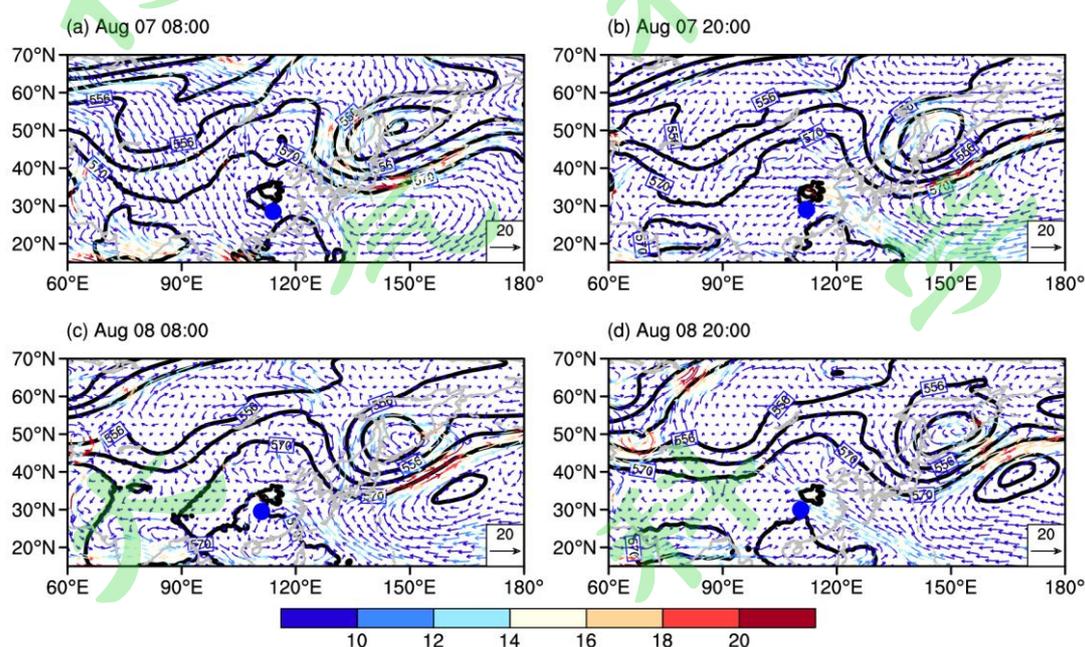


图 8 (a) 1975 年 8 月 7 日 08:00; (b) 1975 年 8 月 7 日 20:00; (c) 1975 年 8 月 8 日 08:00; (d) 1975 年 8 月 8 日 20:00 的 500 hPa 位势高度（等值线；dagpm）和风场（风矢量；m/s）。蓝色圆圈代表台风中心的位置。

Fig. 8 The distribution of 500 hPa geopotential height (contours; dagpm) and wind field (vector; m/s) at (a) 08:00 on 7th August; (b) 20:00 on 7th August; (c) 08:00 on 8th August and (d) 20:00 on 8th August. The blue circle represents the location of the center of the typhoon.

对 2012 年 8 月 4—5 日河南地区的一场暴雨进行分析发现，2012 年暴雨期间的西太副高较气候态的也偏北偏强。而由于受西太副高的阻挡作用，台风“达维”北上移速缓慢，台

风北侧偏东气流与西太副高南侧的偏东气流合并加强且长期维持，叠加上台风“苏拉”外围偏的东气流，为 8 月 4—5 日河南大暴雨天气提供了充足的水汽条件。

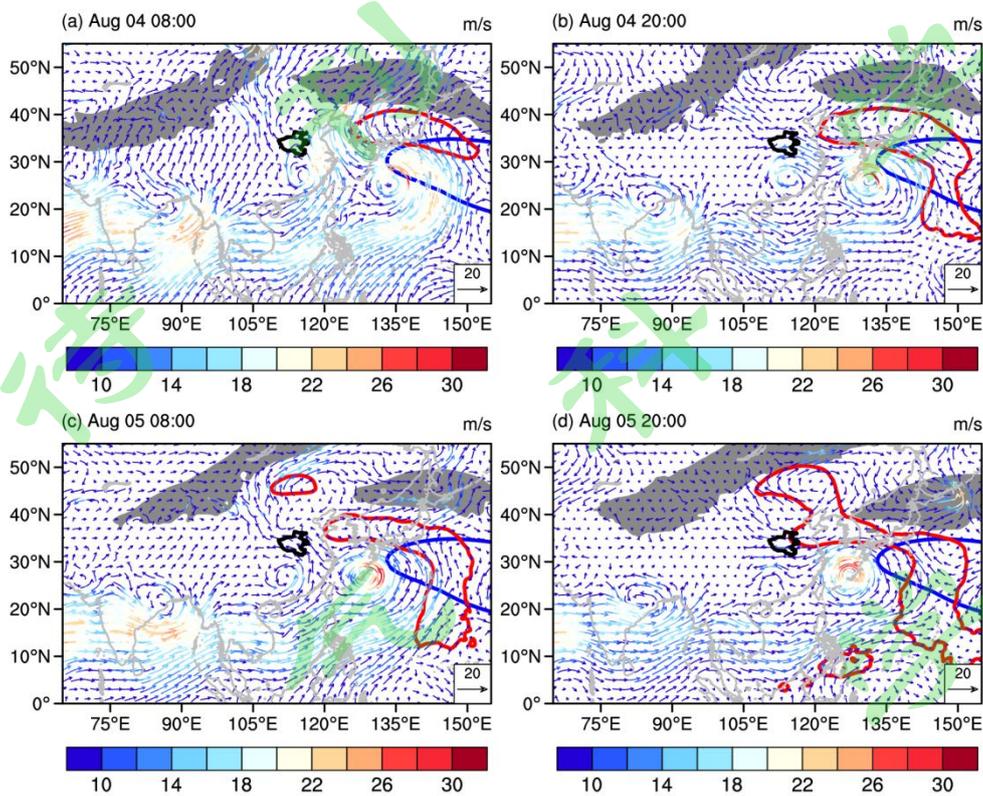


图 9 (a) 2012 年 8 月 4 日 08:00; (b) 2012 年 8 月 4 日 20:00; (c) 2012 年 8 月 5 日 08:00; (d) 2012 年 8 月 5 日 20:00 200 hPa 的急流(灰色阴影, 高空急流区为 200hPa 纬向风速大于等于 30m/s 的区域; m/s) 和 850 hPa 的风场(风矢量; m/s)。蓝色的等值线代表气候态的 8 月西太副高位置, 红色等值线代表实时的西太副高位置。

Fig.9 The distribution of 200 hPa westerly jet (gray shading where the zonal wind speed is greater than or equal to 30m/s; m/s) and 850 hPa wind field (vector; m/s) at (a) 08:00 on 4th August; (b) 20:00 on 4th August; (c) 08:00 on 5th August and (d) 20:00 on 5th August. The blue contour represents the position of the climatic western Pacific subtropical high in August, and the red contour represents the real-time position of the western Pacific subtropical high.

从以上分析可以看出, 2012 年 8 月 4—5 日的大气环流形势与 2021 年 7 月 20—21 日非常相似(图 6 VS 图 9), 但是为何 2012 年 8 月 4—5 日没有出现和 2021 年 7 月 20—21 日一样强度的暴雨? 过程累积降水也远不及 2021 年 7 月 20—21 日的暴雨? 这可能是因为受台风“达维”的北上的影响, 副热带高压逐渐被切断为两部分, 西侧的副热带高压与位于内蒙

古地区的高压脊合并，在朝鲜半岛-中国东北地区形成一个新的高压，而东侧的副热带高压则东退至日本东南洋面上。而当副热带高压被切断为两部分后，台风开始北移，继而无法稳定维持在一个区域，为河南地区持续稳定地输送水汽。

综上，“75·8”、“12·8”和“21·7”暴雨过程的相似之处在于台风在北移的过程中由于受到北部高压系统的阻挡而停滞少动，为暴雨区源源不断地输送水汽，从而使得暴雨强度维持不消。而“12·8”暴雨过程累积降水量没有达到“75·8”和“21·7”暴雨过程强度的原因之一可能是因为“12·8”暴雨过程中西太副高没有一直稳定存在于台风北侧，而是有断裂和西退。

### 3.5 “21·7”暴雨期间西太副高压稳定维持的可能原因

图 10 给出了 2021 年 7 月 1—6 候逐候平均的 200 hPa 纬向风 ( $u$ ) 及其距平。从图中可以看出，相较于气候平均态，整个 7 月期间中纬度西风急流 ( $u \geq 30\text{m/s}$ ) 的范围都更大，强度偏强且位置更加偏北，这在 7 月第 3—4 候期间尤为明显 (图 10c, d)。这表明，在 2021 年 7 月 3—4 候期间西风带北推，纬向环流较气候态更强，这使得西风带中的气旋性扰动不易对副热带地区造成影响，从而使得副高在“21·7”暴雨过程中能够稳定维持在台风北侧。

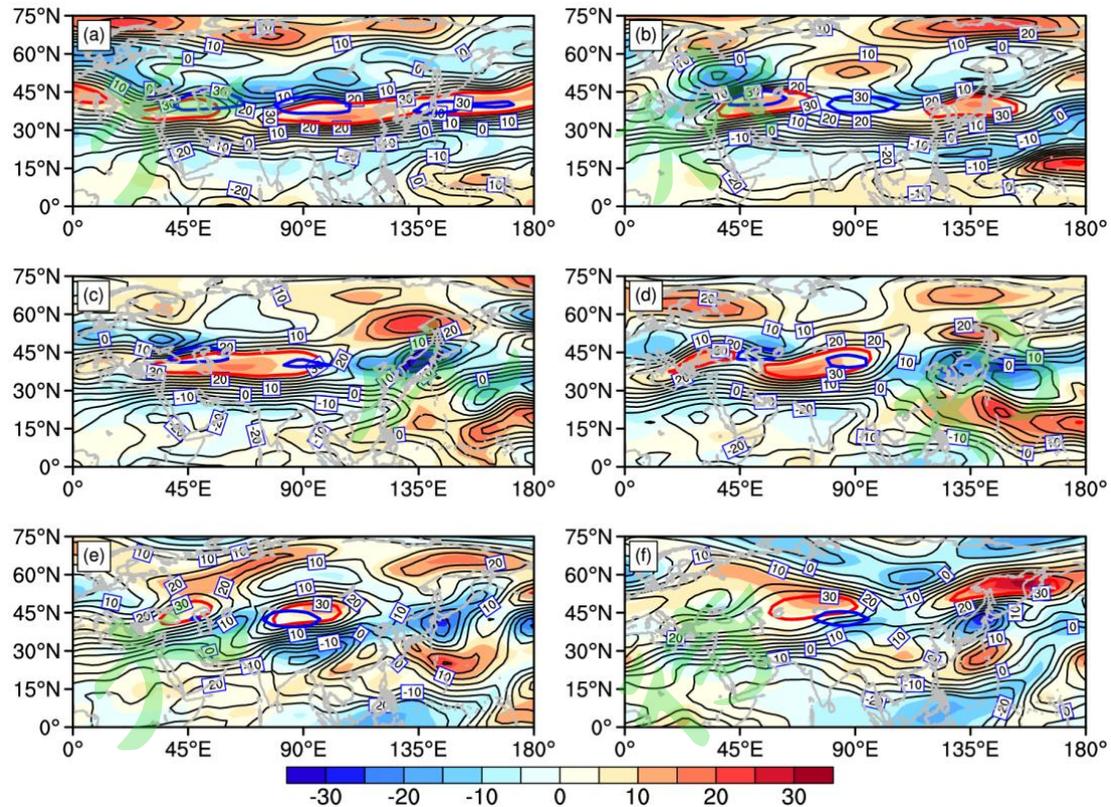


图 10 2021 年 7 月第一候—第六候 (a-f) 200 hPa 逐候平均纬向风场 (等值线; m/s) 及距平 (填色; m/s)。红线表示 2021 年每一候 30 m/s 线; 蓝线表示气候平均的 30 m/s 线。

Fig.10 The mean (contour; m/s) and anomalous (shading; m/s) field of u component of 200 hPa wind from the first pentad to the six pentad of July, 2021. The red contour represents the position of the 30m/s velocity line, and blue contour represents the position of the climatological 30m/s velocity line .

而从 2021 年 7 月 1—6 候北半球逐候平均的 500 hPa 环流形势 (图 11) 来看, 在 7 月的第 2 候, 蒙古上空出现一个高压脊 (图 11b)。随着时间的推移, 该高压脊逐渐发展并且东移。在 7 月第 3 候的时候, 高压脊与副高相结合, 使得副高加强 (图 11c), 继而使得副高在“21·7”暴雨过程中能够稳定维持在台风北侧。

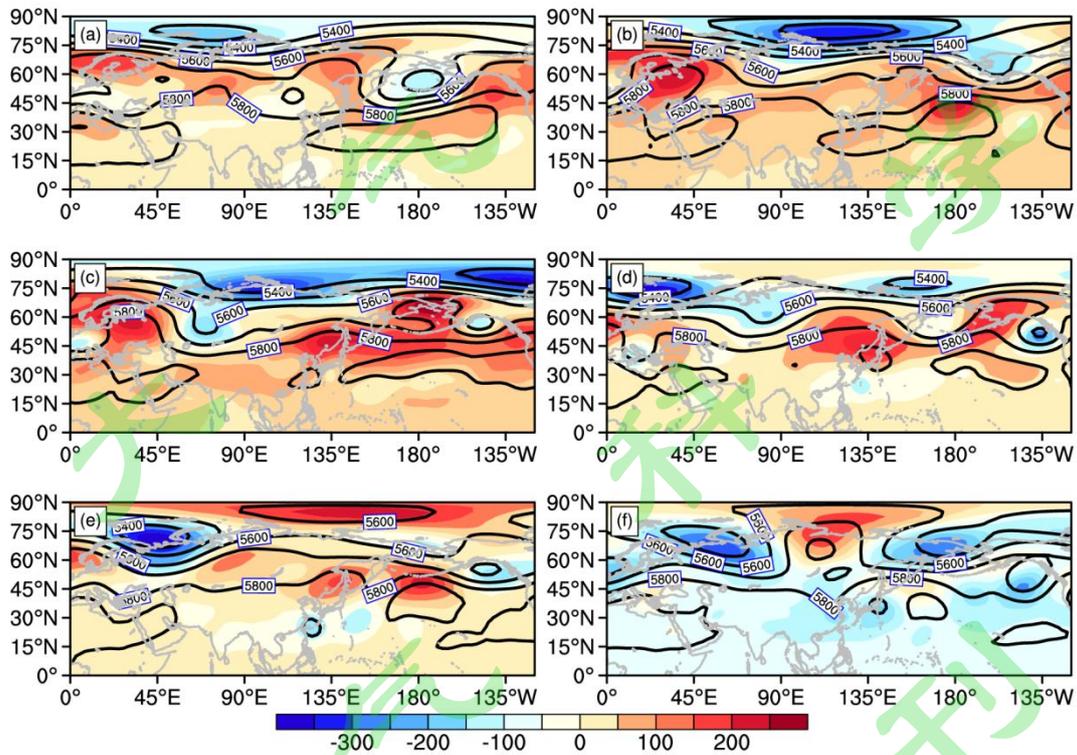


图 11 2021 年 7 月第一候—第六候 (a—f) 逐候平均的 500 hPa 位势高度场 (等值线; gpm) 及距平 (填色; gpm)。

Fig.11 The mean (contour; gpm) and anomalous (shading; gpm) field of geopotential height of 500 hPa wind from the first pentad to the six pentad of July, 2021.

海温作为重要影响因子, 其与副高活动有着密切联系 (吴国雄等, 2000; He et al., 2015; 钱代丽和管兆勇, 2018; 唐颢苏等, 2019)。图 12 给出了 2021 年 7 月 1—6 候海温异常的

空间分布。从图中可以看出，相较于气候态，西太暖池在 7 月 3—4 候期间都表现出了暖异常（图 12c, d）。

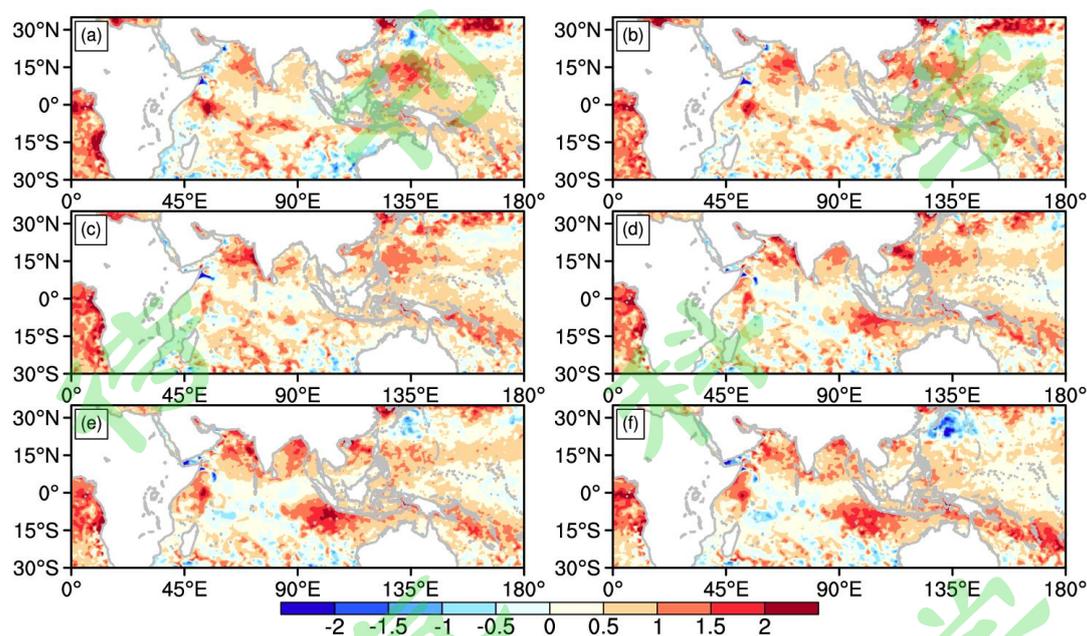


图 12 2021 年 7 月第一候—第六候逐候平均的海温异常的空间分布（单位：°C）。

Fig.12 The distribution of sea surface temperature anomaly from the first pentad to the six pentad of July, 2021 (units: °C).

而当西太暖池偏暖后，菲律宾及南海上空的对流活动随之偏强，进一步使得位于热带西太平洋的热源增强，从而造成 Hadley 环流增强，且其下沉区偏北偏强，这在七月第四、五候的时候尤为明显（图 13d, e）。而副高的成因主要是 Hadley 环流下沉支的作用，因此“21·7”暴雨过程中西太副高压相较于气候态偏北偏强。

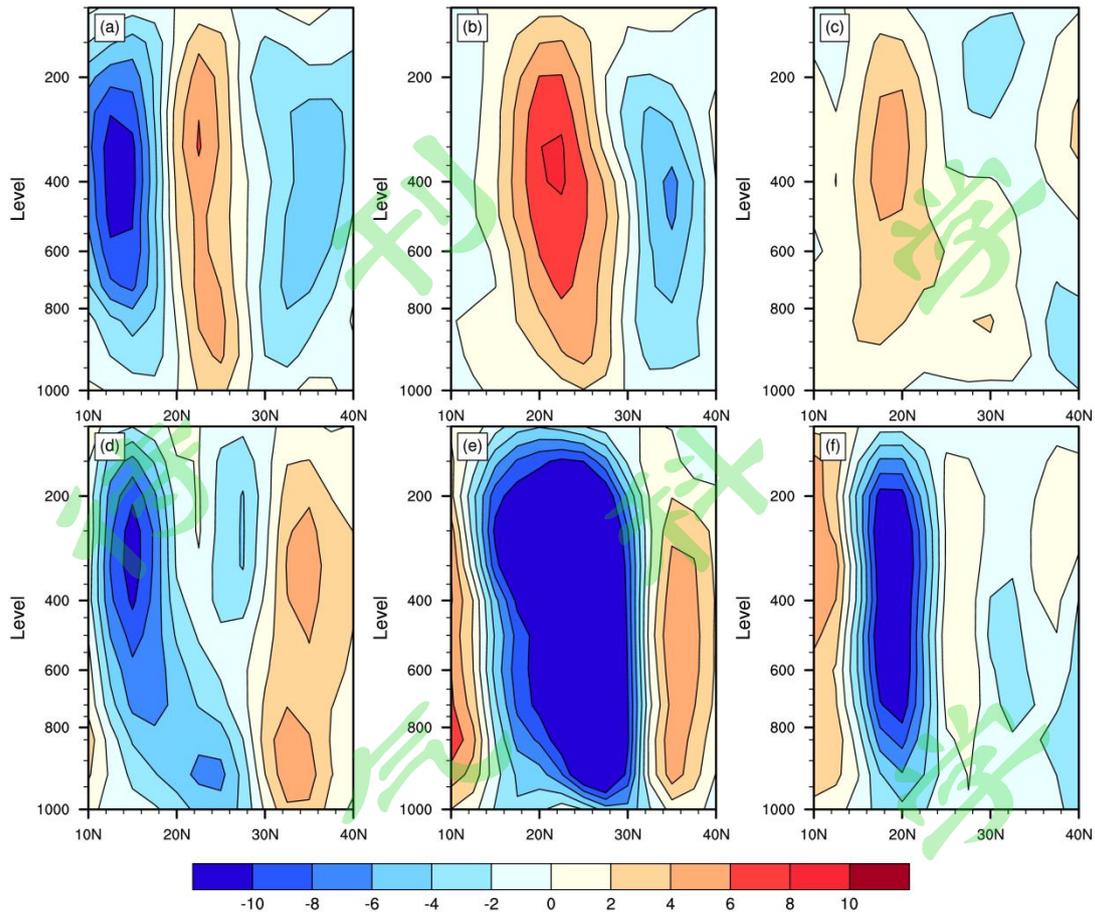


图 13 2021 年 7 月第一候—第六候 120°—130°E 经度平均的垂直速度场异常 ( $\omega$ ) 的纬度—高度图 (单位:  $10^{-2}\text{Pa s}^{-1}$ )。

Fig.13 Latitude-height profile of the vertical velocity ( $\omega$ ) anomaly for the average of 120°—130°E from the first pentad to the six pentad of July, 2021 (units:  $10^{-2}\text{Pa s}^{-1}$ ).

南半球的冷空气主要通过越赤道气流对北半球造成影响。从南半球 500 hPa 的环流形势来看，从 7 月第 3 候开始 (图 14a)，澳大利亚南侧开始出现负的位势高度异常，且逐步扩展到整个澳大利亚。与之相对应，7 月第 4—5 候期间在 70°—130°E 大部分范围内经向风分量为正异常，其中赤道附近的越赤道气流正异常更为明显 (图 14e—f)。一方面，加强的越赤道气流会使得赤道辐合带 (ITCZ) 北移，进而使得副高北移；另一方面，当越赤道气流加强之后，来自印度洋—南海区域低空气流所携带的暖湿空气会通过第二级热力适应过程使得副高偏强 (吴国雄等，2000)。

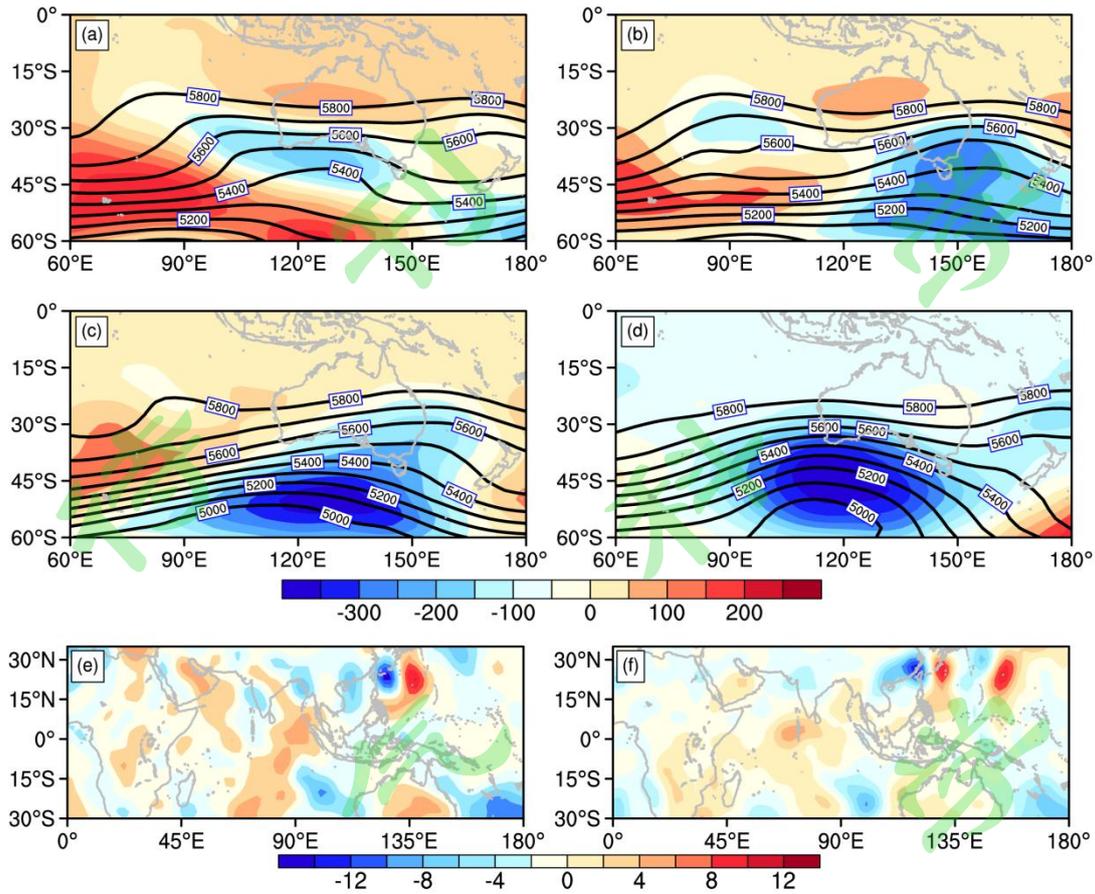


图 14 (a-d) 2021 年 7 月第三候—第六候 500 hPa 位势高度场 (等值线; gpm) 及距平 (填色; gpm) 以及 (e-f) 2021 年 7 月第三候—第四候 200 hPa 平均经向风距平 (单位: m/s)。

Fig.14 (a-d) The mean (contour; gpm) and anomalous (shading; gpm) field of geopotential height of 500 hPa wind from the third pentad to the six pentad of July, 2021 and (e-f) anomalous field of v component of 200 hPa wind from the third pentad to the four pentad of July, 2021 (unit: m/s).

综上所述, “21·7”暴雨期间西北太平洋副热带高压能够稳定维持在台风北侧是多种因素综合影响的结果。首先, 中高纬度环流的配置给西太副高的偏强偏北提供了十分有利的条件。2021 年整个 7 月, 中纬度西风带偏北且整体上呈较平直的纬向气流, 这为西太副高北推和稳定创造了有利的环流背景。其次, 在 7 月的第 2 候, 蒙古上空 500 hPa 出现一个高压脊。该高压脊发展且东移, 与副高相结合, 进而使得“21·7”暴雨期间副高偏强。此外, 7 月 3-4 候西太暖池表现出了明显的暖异常, 从菲律宾周围经南海到中印半岛上空的对流活动随之偏强, 进一步使得位于热带西太平洋的热源增强, 造成 Hadley 环流增强, 从而使得其下沉支加强。而副高的成因主要是 Hadley 环流下沉支的作用, 因此“21·7”暴雨期间西太

平副热带高压相较于气候态偏北偏强。最后，7月第4—5候期间南半球冷空气活动增强，导致向北的越赤道气流增强。加强的越赤道气流一方面通过影响ITCZ使得副高北移，另一方面通过第二级热力适应过程使得副高增强。

需要说明的是，本文只对影响西太副高的部分因素进行了探讨。影响西太副高的因素有很多，如不同强度的厄尔尼诺对副高的强度、面积和东西位置都有不同程度的影响。各因素对西太副高的位置和强度是否存在联合影响以及影响程度大小如何仍值得深入研究。

## 5 结论

本文聚焦于2021年7月发生在河南的一次罕见特大暴雨，首先分析了其基本特征，然后对此次暴雨的环流特征和物理量场进行了分析，最后对比了河南历史上三次伴有较强短时强降水天气的暴雨过程，得到主要结论如下：

(1) “21·7”极端强降水过程在一小时最大降水量、三小时最大降水量、六小时最大降水量、一天最大降水量、三天最大降水量和过程累积降水量方面均表现出显著极端性。尤其是一小时最大降水量，郑州站1小时降水量高达201.9mm（出现在20日16—17时），刷新了郑州站建站以来的历史记录，且成了1951年以来我国气象数据（不含港澳台地区）中1h降雨量的第一位。过程累计降水量和最大单日降水的大值区主要分布在太行山东麓临近地区，与地形关系十分密切。

(2) 关于此次罕见特大暴雨发生的环流背景条件，高层南亚高压与东海附近低涡稳定共存，中层副高稳定偏北偏强，与大陆高压形成对峙，使得天气形势稳定，为河南地区极端强降水的发生提供了背景条件。而低层西太副高南侧东风气流与台风“烟花”北侧的东风气流相叠加，使得西太平洋到河南地区形成深厚的水汽通道，继而为河南地区极端强降水提供了充沛的水汽。

(3) 就物理量场而言，在“21·7”特大暴雨期间，河南地区水汽通量散度值为负且大部分地区的整层可降水量可达100mm，表明整层水汽十分充沛。涡度和垂直速度场的大值区主要出现在太行山东麓临近地区，与降水的大值区相对应。

(4) 与河南历史上两次暴雨过程“75·8”和“12·8”相比，其相似之处在于台风在北移过程中受到副热带高压的阻挡而停滞少动，从而将源源不断的水汽输送至河南，造成极端降水事件的发生。

(5) “21·7”暴雨期间西北太平洋副热带高压能够稳定维持在台风北侧是多种因素综合影响的结果,包括中高纬度环流配置、西太暖池异常偏暖造成 Hadley 下沉支加强,以及增强的越赤道气流。这是造成“21·7”暴雨过程累积降水量量级大于“12·8”暴雨且最终降水量超过 500mm 的可能原因之一。

本文对“21·7”罕见大暴雨的过程特征、大气环流和物理场进行了分析。对极端降水个例从物理机制上进行相关的原因分析,可以为实际天气预报,尤其是中长期预报,提供一定的参考。此外,也有助于提高极端降水事件的预报效果,服务于我国的防灾减灾工作。然而仍存在的问题值得进一步研究。例如:除了台风在移动过程中受到阻碍外,河南地区历史上的超强极端强降水事件中还存在哪些共性?为何仅有郑州站的 1 小时降水量能够刷新历史记录?多因子对副高的联合作用是怎样的?这些问题都值得深入研究。而利用模式对上述问题开展深入研究,给出定量的研究结果,也能够在一定程度上为此类极端天气事件的预报预警提供一些参考。

#### 参考文献

- [1] 程锦霞, 2013. 河南 2010 年 9 月 5~7 日连续性暴雨过程分析[J]. 安徽农业科学, 2013,41(35). Cheng Jingxia. 2013. Continuous Heavy Rain Analysis in Henan Province between September 5-7, 2010[J]. Journal of Anhui Agri. Sci (in Chinese), 41(35).
- [2] 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 Yihui, Cai Zeyi, Li Jishun, 1978. A Study on the extraordinarily heavy rainfall in Henan in the first ten-day of August 1975. Trans Atmos Sci (in Chinese), 2(4): 276-289.
- [3] 胡俊锋, 杨月巧, 杨佩国. 2014. 基于减灾能力评价的洪涝灾害综合风险研究[J]. 资源科学, 36(01):94-102. Hu Junfeng, Yang Yueqiao, Yang Peiguo. 2014. Comprehensive flood disaster risk research based on disaster reduction capability evaluation [J]. Resources Science (in Chinese), 36(01): 94-102.
- [4] 冀翠华, 李姝霞. 2021. 开封“7·19”大暴雨天气过程的极端性分析 [J]. 气象与环境科学, 44(4): 53-62. Ji Cuihua, Li Shuxia. 2021. Analysis on Extremity of the “7·19” Severe Rainstorm Process in Kaifeng [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 44(4): 53-62.
- [5] 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流季节变化特征及其热力影响机制探讨[J]. 气象学报, 2006(05):564-575. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun 2006. Discussion on the seasonal variation characteristics of the subtropical westerly jet stream in East Asia and its thermal impact mechanism [J] Journal of Meteorology (in Chinese), 2006 (05): 564-575.
- [6] 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(09):1136-1147. Li Han, Wang Xinmin, Zhang Xia, et al. 2018. Analysis on the characteristics and extremes of the “July 19” rare heavy rain in northern Henan [J]

- Meteorology (in Chinese), 44 (09): 1136-1147.
- [7] 马月枝,张霞,胡燕平,2017. 2016年7月9日新乡暖区特大暴雨成因分析[J].暴雨灾害, 36(6):557-565. Ma Y Z, Zhang X, Hu Y P, 2017. Cause analysis of a warm-sector excessive heavy rainfall event in Xinxiang on 9 July 2016[J]. Torrential Rain Disasters (in Chinese), 36(6):557-565. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2017.06.009.
- [8] 钱代丽, 管兆勇. 2018. 超强与普通厄尔尼诺海-气特征差异及对西太平洋副热带高压的不同影响[J]. 气象学报, 2018, 76 (3):395-407. Qian Daili, Guan Zhaoyong. 2018. Differences in sea-atmosphere characteristics between super strong and ordinary El Nino and their different effects on the western Pacific subtropical high[J]. Acta. Meteorol. Sin. (in Chinese), 76(3) :395-407.
- [9] 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 lingkun, LI Shuwen, ZHOU Yushu, 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(6): 1366-1383.
- [10] 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 Aifang, LÜ Xiaona, CUI Liman, et al. 2021. Prediction and test of optimal integrated precipitation based on similar spatial distribution of precipitation [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 40(5): 445-454.
- [11] 苏爱芳, 施东雷, 葛旭阳. 2019. 下垫面对郑州城市强降水的影响: 城市化及地形影响的数值模拟研究[J]. 大气科学学报, 42(3):434-446. Su Aifang, Shi Donglei, Ge Xuyang. 2019. The Impact of the Underlying Surface on the Heavy Rainfall in Zhengzhou City: A Numerical Simulation Study of the Impact of Urbanization and Terrain[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3):434-446.
- [12] 唐颢苏, 胡开明, 黄刚. 2019. El Niño 衰退年夏季西北太平洋异常反气旋季节内演变特征及其机制 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 525-536. Tang Haosu, Hu Kaiming, Huang Gang. 2019. Characteristics and mechanisms of sub-seasonal evolution of Northwest Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 525-536.
- [13] 田国珍, 刘新立, 王平, 等. 2006. 中国洪水灾害风险区划及其成因分析[J]. 灾害学, (02):1-6. Tian Guozhen, Liu Xinli, Wang Ping, et al. 2006. China flood disaster risk zoning and its cause analysis[J]. Journal of Catastrophe (in Chinese), (02):1-6.
- [14] 王君. 2019. 豫北两次特大暴雨事件的物理量极端性和中尺度特征 [J]. 干旱气象, 37(3): 419-429. WANG Jun. 2019. Analysis of Extremity and Mesoscale Characteristic on Two Torrential Rain Processes in North Henan Province [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 37(3): 419-429.
- [15] 王新敏, 赵培娟, 李保生, 等. 2002. 影响河南的登陆台风分析[J]. 河南气象, (02):14-16. Wang Xinmin, Zhao Peijuan, Li Baosheng, et al. 2002. Analysis of Landing Typhoons Affecting Henan[J]. Henan Meteorology (in Chinese), (02):14-16.
- [16] 吴国雄, 刘平, 刘屹岷, 等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应[J]. 气象学

- 报,(05):513-522. Wu Guoxiong, Liu Ping, Liu Yimin, et al. 2000. The influence of the Indian Ocean sea temperature anomaly on the western Pacific subtropical high: Two-stage thermal adaptation in the atmosphere[J]. Acta. Meteorologica Sinica (in Chinese), (05): 513-522.
- [17] 喻谦花,李姝霞,刘莹莹. 2014. 2013 年初夏河南一次区域性暴雨天气过程的分析[J].河南科学, 32(02):230-234. Yu Qianhua, Li Shuxia, Liu Yingying. 2014. Analysis of a regional rainstorm weather process in Henan in early summer of 2013 [J] Henan Science (in Chinese), 32 (02): 230-234.
- [18] 张辉,许新宜,张磊,等. 2011. 2000~2010 年我国洪涝灾害损失综合评估及其成因分析[J].水利经济,29(05):5-9. Zhang Hui, Xu Xinyi, Zhang Lei, et al. 2011. Comprehensive assessment of my country's flood disaster loss from 2000 to 2010 and its cause analysis[J].Water Conservancy Economics (in Chinese), 29(05):5-9.
- [19] 张宁,苏爱芳.2014.豫西地形对一次强降水过程的影响分析[J].气象与环境学报,30(6):16-24. Zhang Ning, Su Aifang. 2014. Analysis of the influence of the topography of western Henan on a heavy precipitation process[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30(6):16-24.
- [20] 张启绍. 2013. 2012 年 8 月河南一次暴雨、大暴雨天气过程分析[J]. 河南科学, 31(10):1714-1719. Zhang Qishao. 2013. Analysis of a rainstorm and heavy rainfall process in Henan in August 2012[J].Henan Science (in Chinese), 31(10):1714-1719.
- [21] 张霞,杨慧,王新敏,等. 2021. “21·7” 河南极端强降水特征及环流异常性分析[J]. 大气科学学报, 44(05):672-687.Zhang Xia, Yang Hui, Wang Xinmin, et al. 2021. "21 · 7" Henan Extreme Heavy Rainfall Characteristics and Circulation Anomaly Analysis[J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(05):672-687.
- [22] He C, Zhou T J, Wu B. 2015. The Key Oceanic Regions Responsible for the Interannual Variability of the Western North Pacific Subtropical High and Associated Mechanisms[J]. Acta. Meteorol Sin., 2015(4):562-575.
- [23] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999–2049.
- [24] Zhai P, and Coauthors, 2005: Trend in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J climate, 18(7): 1096-1108.