

2021 年夏季河南极端降雨水汽来源分析 与西太平洋副热带高压的可能作用*

孙其明^{1, 2, 3} 胡石建^{2, 3, 4} 赵义军¹

(1. 山东科技大学 山东青岛 266590; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室 中国科学院海洋研究所 山东青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 山东青岛 266237)

摘要 为研究西太平洋海域在河南“7·20”极端降雨事件中的作用, 利用海表面温度、海平面气压、位势高度和风场等再分析数据与降水观测数据, 分析了 2021 年夏季河南极端降雨事件的水汽输送来源及其与西太平洋副热带高压多尺度变化特征的关系。数据显示, 2021 年夏季河南极端降雨期间, 西太平洋副热带高压偏强偏北, 河南地区以东至西北太平洋中低空出现显著的东风异常和西向水汽输送。结果表明, 2021 年夏季河南暴雨区中高空相对涡度、位势高度和垂直上升运动存在显著异常, 从西北太平洋海域通过中低空异常东风输送的水汽是主要来源。经验模态分解结果显示, 副热带高压强度指数的第二模态(intrinsic mode functions of west Pacific subtropical high, IMF_{WPSH})与河南地区降雨第二模态存在统计显著关系并在此次极端降雨事件中扮演重要角色。诊断分析发现, 在 IMF_{WPSH} 正位相期间, 副热带西太平洋存在异常增强的上升运动并在中低空产生异常东风, 河南地区上升气流异常增强, 因此, IMF_{WPSH} 可为河南地区降雨提供重要条件。

关键词 河南; 极端降雨; 西太平洋副热带高压; 台风

中图分类号 P466 **doi:** 10.11693/hyhz20220500121

极端降雨事件对社会经济、生产和生活具有极其重要的影响, 其形成过程和机制是一个被广泛关注的研究热点。在全球变暖的大背景下, 极端降雨等极端天气事件的发生更加频繁、影响更加显著(Zhai *et al.*, 2005; IPCC, 2019), 对极端降雨过程和物理机制的研究具有重要意义。

我国极端降雨事件的发生受印太海温变化、热带气旋、副热带高压移动和局地陆面过程等多种复杂因素的影响。研究表明, 北印度洋和赤道中东太平洋海温异常对我国极端降雨事件的发生频次有影响, 当前者冬季海温异常偏暖时, 我国华南地区夏季极端降雨次数会偏少, 而在长江流域及其以北地区极端降雨次数会偏多(Yang, 2009; 范苏丹, 2010)。北半球冬季印度洋海温由于自身长期记忆, 会向太平洋激

发出斜压开尔文波, 同时南海局部海气相互作用下向西太平洋发展, 从而对东亚大气环流和降雨产生影响(He, 2015)。Studholme 等(2022)指出, 由于气候变化的影响, 飓风和台风正在不断扩大其纬度活动范围, 对我国降雨将产生重要影响。中国东部夏季降雨异常与大尺度海温和环流异常有关(Dong, 2016), 中纬度中太平洋夏季海温异常可引起中国东部地区同期降雨异常(Yu *et al.*, 2007), 热带印度洋和太平洋海温与副高存在相关关系, 热带印太海温异常会通过调节副高的位置、面积和强度变动, 进而影响中国中东部地区降雨的变化(Cai *et al.*, 2010; 钱代丽, 2019; Chen *et al.*, 2020)。黄樱等(2011)利用小波分析方法, 指出除了海温外, 南亚高压的位置变化也会对淮河流域极端降雨产生重要影响。Chen 等(2014a, 2014b)

* 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDB42010403 号; 国家自然科学基金项目, 42022040 号; 山东省自然科学基金资助项目, ZR2020JQ18 号; 中国科学院创新交叉团队项目, JCTD-2020-12 号。孙其明, 硕士研究生, E-mail: sunqiming@qdio.ac.cn

通信作者: 胡石建, 研究员, 博士生导师, E-mail: sjhu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2022-05-07, 收修改稿日期: 2022-09-09

分析指出中国中东部持续性极端降雨事件具有双阻塞高压型和单阻塞高压型两种特征环流类型,但在对流层上部,南亚高压东伸能够促进这两种环流模式辐散。此外,地形也会为极端降雨的发生起到“催化剂”的作用(Flesch *et al.*, 2012; Ntwali *et al.*, 2016),比如华北中部夏季强降雨存在两种类型——持续山地降雨和山地平原降雨(Sun *et al.*, 2018),太行山和伏牛山系的高山形成的喇叭口地形被认为是河南“7·20”极端降雨事件产生的一个重要因素(冉令坤等, 2021; 张霞等, 2021; 梁旭东等, 2022)。

近年来,我国长江中下游地区和华北中原地区的夏季降雨异常偏高(柯丹等, 2014; Luo *et al.*, 2016; Bai *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2021),极端降雨发生的概率增加(Wei *et al.*, 2010)。2020 年 6~7 月,长江中下游流域发生超强梅雨(刘芸芸等, 2020; 郭媛媛等, 2021),产生的严重的洪涝导致 150 亿美元以上的经济损失和 279 人死亡(翟建青等, 2021)。研究表明,2020 年超强梅雨的主要原因是热带印度洋海温异常增暖导致西太平洋反气旋加强,西太平洋副热带高压偏强、西伸、脊线偏北,南亚高压偏强东伸,异常反气旋西北侧引起西南风异常将南海和孟加拉湾大量的水汽输送到长江中下游地区(Fang *et al.*, 2021; 郭媛媛等, 2021; Cai *et al.*, 2022),印度洋海温异常变暖与长江中下游地区极端降雨密切相关(Tang *et al.*, 2021),梅雨期降雨具有非常显著的年际变化(Xia *et al.*, 2021)。Zheng 等(2021)还指出,2020 年的极端梅雨事件与印度洋、太平洋和大西洋三大洋都有关系,但大西洋的海温异常起到主要作用。持续极端降雨和短时极端降雨期间,水汽散度的变化与季节内变化和天气风场异常有关,湿度场变化作用较小(Li *et al.*, 2015)。

河南省位于中国的中部、华北平原的黄河中下游地区。历史上,1975 年 8 月河南就发生过特大暴雨事件(简称“75·8”大暴雨事件)。丁一汇(2015)总结了河南“75·8”大暴雨事件的发生机制,指出源自东海和黄海且挟带大量水汽的热低压系统与南下的强冷空气相遇,辐合作用剧烈、垂直上升运动加强,且受“喇叭口”地形的抬升作用,导致在驻马店一带引发历史罕见的强对流性暴雨(丁一汇等, 1978)。2016 年 7 月河南豫北连续发生“7·09”和“7·19”两次特大暴雨事件,水汽均来自热带和副热带的暖湿气流,“7·09”事件的整层可降水量更具有极端性,“7·19”事件垂向速度异常更显著(王君, 2019),栗晗等(2018)指出豫北“7·19”暴雨事件在太行山地形和低涡气旋大尺度环流

背景下,中尺度地面辐合线的发展和维持是造成局部极端降雨的主要原因。

2021 年 7 月 20 日至 21 日,河南极端降雨事件再次发生。此次事件的灾害中心是郑州,具有持久性、累积性、范围广和极端性等特点(苏爱芳等, 2021),7 月 20 日每小时最大降水量达到 201.9 mm,郑州国家站日累计降水量高达 624.1 mm(陈刚等, 2022; 梁旭东等, 2022; 齐道日娜等, 2022; 杨浩等, 2022)。据新华社(2022)报道,此次河南省极端降雨共造成 1 478.6 万人受灾,398 人死亡失踪,造成直接经济损失 1 200.6 亿元(http://www.gov.cn/xinwen/2022-01/21/content_5669723.htm)。

河南“7·20”极端降雨事件受南亚高压东扩、大陆高压、副高西伸北抬偏强和黄淮地区低涡或切变线以及台风“烟花”和“查帕卡”远距离水汽输送等多尺度天气系统共同影响(冉令坤等, 2021; 张霞等, 2021; 王军等, 2022; 祝传栋等, 2022)。西南季风将南海的水汽输送至西北太平洋,通过台风“烟花”作用向北输送,西北太平洋的水汽在台风“烟花”北部的异常偏东气流和维持在日本上空副高的异常东南气流共同作用下,持续不断地向河南地区输送水汽(梁旭东等, 2022)。研究表明从华南到河南存在一个“西南-东北”水汽输送带(孙跃等, 2021),布和朝鲁等(2022)通过水汽通量分析和 LAGRANTO (Lagrangian Analysis Tool) 模式轨迹分析发现在“7·20”极端降雨事件期间河南南侧的经向水汽输送急剧增强,但 Nie 等(2022)运用拉格朗日方法指出此次极端降雨事件中水汽主要来源是中国南方和西北太平洋地区,其贡献率分别为 38.1%和 30.0%,而南海贡献率仅为 4.2%,而且西北太平洋海域的水汽来源可以追溯到 180°E。Cheng 等(2022)使用全球大气环流的水分收支方程和三模式分解方法,发现与经向环流相比,纬向环流在该异常降水事件中占主导作用。

综上所述,2021 年河南“7·20”极端降雨事件的成因与历史上发生的极端事件似乎有所不同,目前对“7·20”极端降雨事件水汽来源的结论尚有分歧。尽管前人研究已经证明西太平洋副热带高压对我国降雨具有重要影响,但是副热带高压与河南降雨之间是否以及存在何种联系也不太清楚。因此,本文在前人的大量深入研究基础上,分析 2021 年 7 月河南极端降雨的海洋大气特征和水汽来源,探索副热带高压和河南降雨之间的关系和机制。第 1 节将介绍所用的数据和方法,第 2 节将展示主要分析结果,包括河南

降雨的基本特征、“7.20”事件的水汽来源和西太平洋副热带高压的作用等。第 3 节将简要总结结论并对本文存在的问题进行讨论。

1 数据和方法

1.1 数据

本文使用的降雨数据包括: (1) 美国国家海洋大气管理局气候预测中心(National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Prediction Center, NOAA/CPC)逐日降水资料, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; (2) 美国国家海洋大气管理局 (Precipitation Reconstruction over Land, PREC/L)降水资料, 分辨率是 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间范围为 1979~2021 年; (3) 中国 2 479 个台站的逐日降水资料, 从中选取河南省 121 个台站的逐日降水观测资料, 时间范围为 1979~2019 年(朱雪妍等, 2018)。

大气场资料使用的是国家环境预测中心(National Center for Environmental Prediction, NCEP)/国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)再分析数据集 I, 包括海平面气压(sea level pressure, SLP)、位势高度(geopotential height, GPH)、风场、比湿和地表气压, 空间分辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 所选用的时间段都是 1979~2021 年。

海表面温度(sea surface temperature, SST)数据使用的是美国国家海洋大气局(NOAA)提供的逐月延长重建海表面温度(extended reconstructed sea surface temperature, ERSST) V5 版本数据, 分辨率是 $2^\circ \times 2^\circ$, 时间段是 1979~2021 年。海表面蒸发数据采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)数据, 分辨率是 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间段为 1979~2021 年。

此外, 为了研究西太平洋副热带高压的作用, 本文还采用了国家气候中心发布的 1979~2021 年逐月西太副高指数(刘芸芸等, 2012)。

1.2 方法

利用风场、比湿和地表气压数据, 可计算整层水汽通量和整层水汽通量散度(Sun *et al*, 2011; Nie *et al*, 2022; 布和朝鲁等, 2022), 其中, 整层水汽通量 Q_H 为

$$Q_H = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} qV dp, \quad (1)$$

式中, V 指风速矢量, q 指比湿, p 指气压, p_t 指上边界气压, p_s 指地表气压, g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 , 单位为 $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

整层水汽通量可以写成纬向 Q_u 和经向 Q_v 分量的形式:

$$Q_u = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} qu dp, \quad (2)$$

$$Q_v = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} qv dp, \quad (3)$$

式中, u 指纬向风, v 指经向风。

由于水汽通量和风速都属于向量, 且方向相同, 所以水汽通量散度可由水平散度得出:

$$\nabla \cdot \left(\frac{qV}{g} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{qu}{g} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{qv}{g} \right), \quad (4)$$

式中, ∇ 指水平散度项。

垂直积分水平水汽通量散度可以表示:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \nabla \cdot qV dp &= -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \frac{\partial qu}{\partial x} dp - \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \frac{\partial qv}{\partial y} dp \\ &= \frac{\partial Q_u}{\partial x} + \frac{\partial Q_v}{\partial y} \end{aligned} \quad (5)$$

为研究西太副高和河南降雨的变化特征, 我们对西太副高强度指数和河南降雨时间序列开展了集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD) (Wu 等, 2009), 并对 EEMD 分解得到的本征模函数(intrinsic mode functions, IMF)进行分析, 研究对河南降雨影响最主要的 IMF 模态。

2 结果

2.1 河南降雨的基本特征

图 1a 和图 1b 分别给出了 2021 年 7 月 18~21 日降水分布和 2021 年 7 月平均的降水异常(相对于 1979~2020 年气候态平均), 结果可见, 华北地区和华东部分地区在 2021 年 7 月具有很强的降水正异常, 其中 7 月 18~21 日的降雨主要集中在河南郑州地区。

为便于分析, 本文将河南地区($110.5^\circ \sim 116.5^\circ \text{E}$, $31.5^\circ \sim 36.5^\circ \text{N}$)的平均降水定义为河南降水指数。如图 1c 所示, 2021 年 7 月河南降水指数是 1979 年以来的最高纪录。去除长期线性趋势后, 2021 年 7 月的河南降水指数仍是 1979 年以来的最高值(图 1d)。

根据图 1c 和 1d 所示, 河南 7 月降水最强的三年分别是 2007 年、2020 年和 2021 年。在 1979~2019 年期间气候态的河南 7 月累积降雨量约为 150 mm, 但这三年的 7 月累积降雨量均超过了 250 mm, 在 2021 年达到了历年最高的 300 mm 以上, 其中在 7 月 20 日之前的一周多时间内, 集中降雨量很大、短期内超过了 100 多毫米(图 2)。

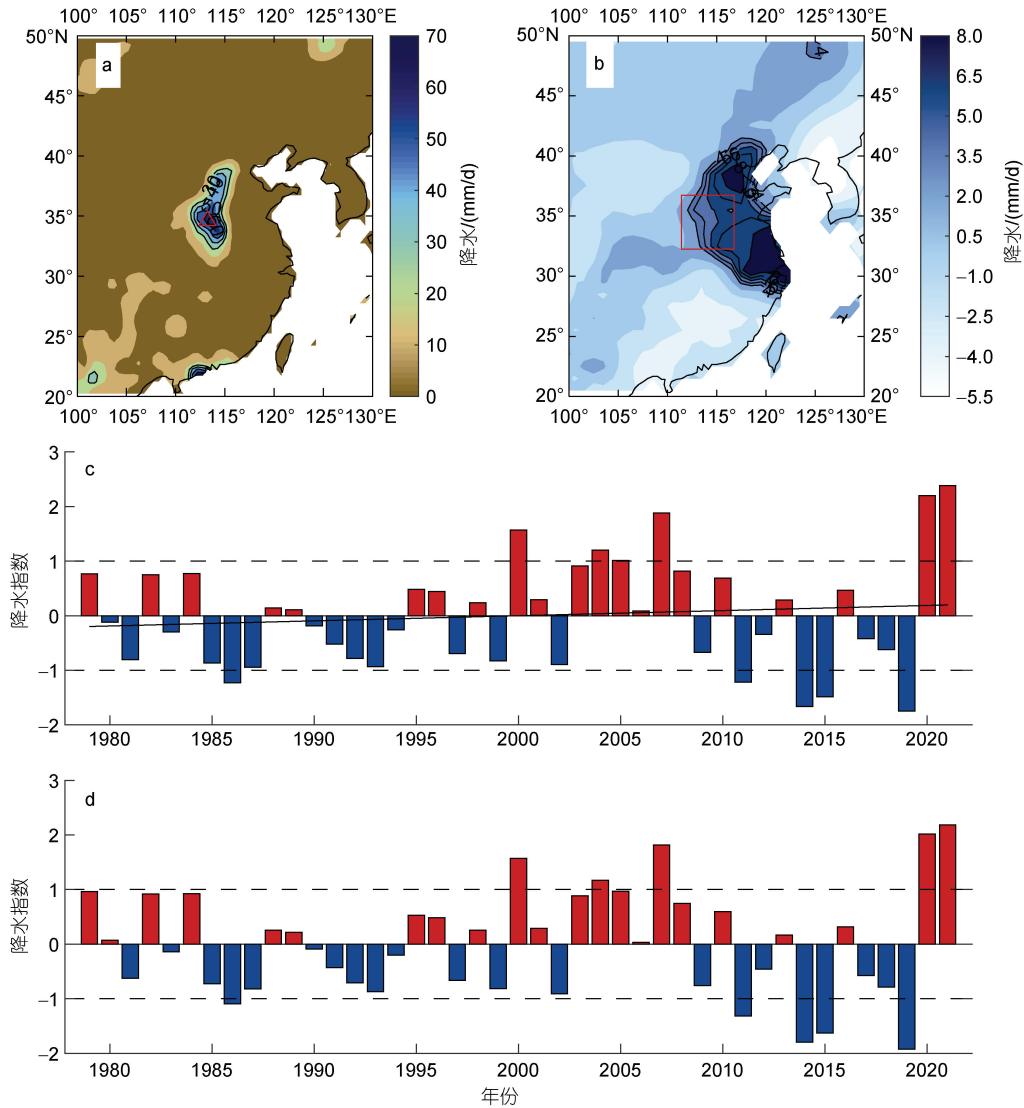


图 1 2021 年 7 月河南降水异常

Fig.1 Precipitation anomaly in Henan Province in July 2021

注: a: 基于 CPC GLOBAL PRCP V1.0 降水数据 2021 年 7 月 18~21 日河南的降水分布, 图中红色三角符号代表郑州位置; b: 基于 PREC/L 数据计算的 2021 年 7 月河南降水异常, 图中红色方框表示河南区域(110.5°~116.5°E, 31.5°~36.5°N); c: 基于站点观测数据和 PREC/L 数据计算的河南降水指数的标准化时间序列(柱状图), 黑实线为降水指数时间序列的线性趋势; d: 去除线性趋势后的河南降水指数的时间序列

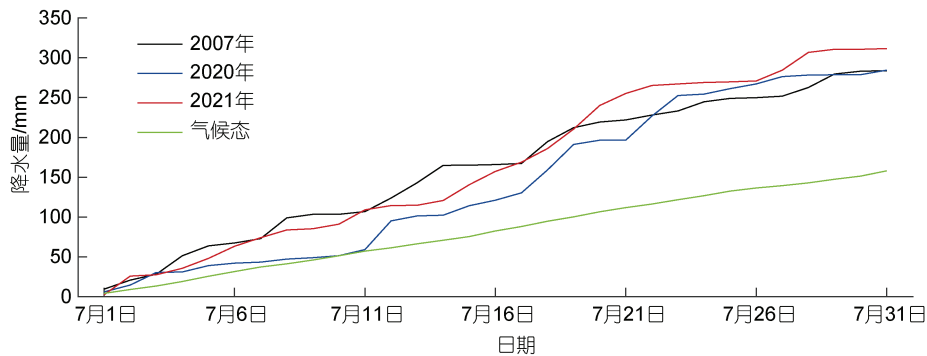


图 2 7 月 1~31 日河南逐日累加降水量

Fig.2 Daily accumulated precipitation in Henan from July 1 to 31

注: 基于 CPC 数据和河南省 121 个气象站地面降水观测数据计算的 7 月 1~31 日累加降水量

2.2 河南“7·20”极端降雨的水汽来源

图 3 展示了 2021 年 7 月以河南为中心的亚印太区域在不同高度的大气环流异常和水汽输运异常。在 500 和 850 hPa 等压面上, 副热带西北太平洋存在两个异常反气旋(图 3a、3b), 同时在我国台湾以东海域存在一个大范围的异常气旋(图 3a、3b)。在这些气旋和反气旋的作用下, 在 30°~40°N 存在着显著的东风异常和西向水汽输运异常, 且延伸至河南地区(图 3d), 河南地区呈现上升气流。结合前人研究表明, 在此期间副热带西北太平洋的异常反气旋, 可能与副高偏强、偏北且维持在日本附近海域有关系(王旭栋, 2021), 而我国台湾以东海域的异常气旋主要是由台风“烟花”引起的。在 500 hPa 等压面上, 异常气旋的纬向影响范围相较于 850 hPa 等压面更大、更强且向北扩展(图 3a、3b)。

图 3f 给出了 500 hPa 等压面上气候态和 2021 年

7 月的西太平洋副热带高压范围和脊线。通过和气候态对比可知, 2021 年 7 月西太副高比往年偏强、位置偏东, 脊线变化不大, 但西太副高的北边界偏北, 其中 2021 年 7 月 20~21 日平均西太副高范围偏强、偏北, 维持在 30°N 附近西太平洋海域(图 3f)。在 200 hPa 等压面上, 河南地区上空为不太显著的位势高度负异常, 而且 2021 年 7 月南亚高压范围和脊线与气候态进行比较, 可以看出南亚高压偏强东伸, 脊线在东海地区开始偏南, 呈现出阶段性演变特征, 其中 2021 年 7 月 20~21 日平均南亚高压偏强东伸, 北边界北移(图 3c)。同时, 在 500 hPa 等压面上, 台风“查帕卡”和“烟花”双台风的影响下导致显著的垂向速度负异常, 而在日本西部和南部海域垂向速度正异常, 在河南地区出现显著的垂向速度负异常, 即存在显著的垂直上升运动, 为极端降雨形成营造了一个重要天气尺度条件(图 3e)。大气环流的上述变化特征与水汽

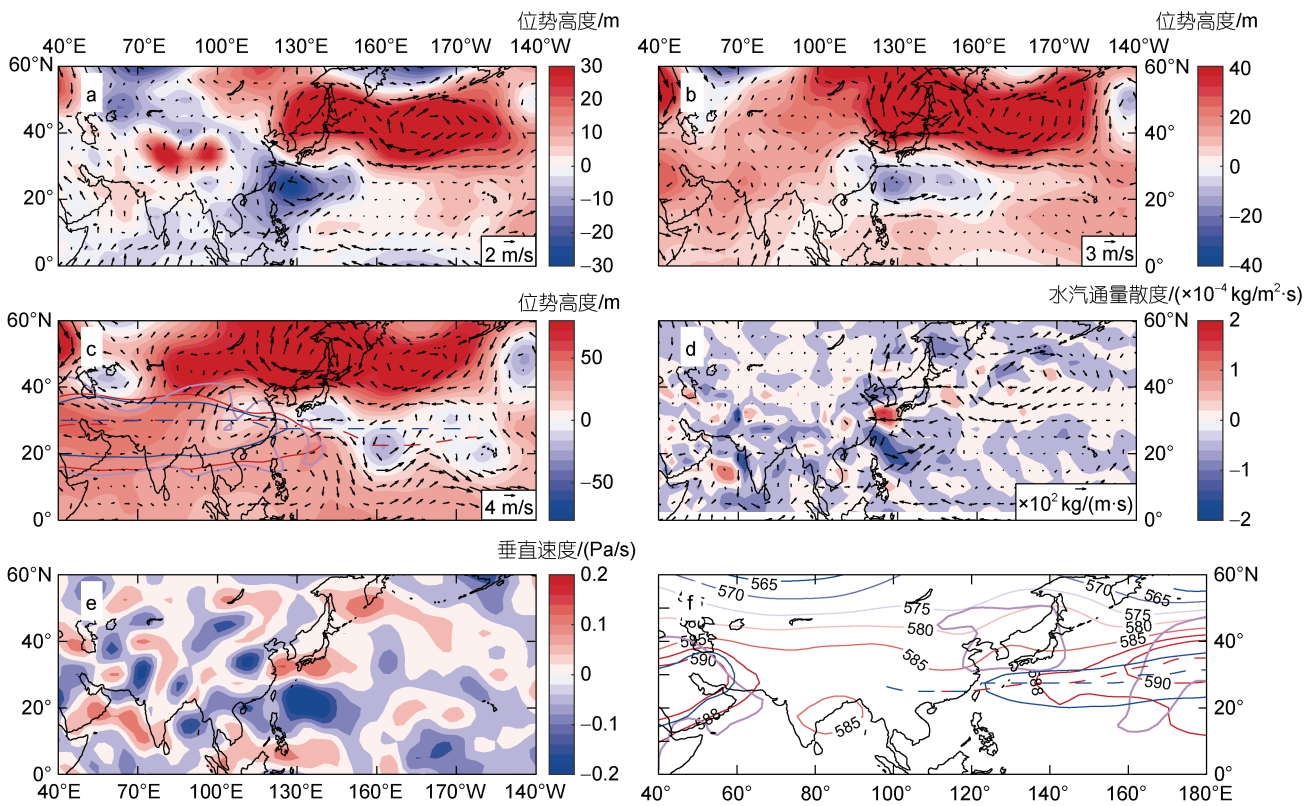


图 3 2021 年 7 月的大气环流异常

Fig.3 Atmospheric circulation anomaly in July 2021

注: a: 2021 年 7 月的 850 hPa 位势高度异常和风场异常(矢量); b: 500 hPa 等压面上, 位势高度和风场异常(矢量); c: 200 hPa 等压面上, 位势高度和风场异常(矢量), 实线(12520 线)和虚线分别是南亚高压的范围和脊线, 其中红(蓝)线表示 2021 年 7 月(气候态 7 月)南亚高压的范围及脊线, 紫线表示 2021 年 7 月 20~21 日平均南亚高压的范围; d: 2021 年 7 月整层水汽通量异常(矢量)及其整层水汽通量散度的异常(负值代表水汽的辐合); e: 2021 年 7 月 20 日的 700~850 hPa 垂向平均的垂向速度异常(负值代表向上运动); f: 500 hPa 等压面的西太副高范围(黑色粗实线, 5880 线)及脊线(虚线), 其中红粗(蓝粗)线表示 2021 年 7 月(气候态 7 月)西太副高范围及脊线, 紫粗线表示 2021 年 7 月 20~21 日平均西太副高范围, 细线表示位势高度

运输的空间特征基本一致, 即水汽从副热带西太平洋运输至河南等华东地区(图 3d)。因此, 从图 3 可见, 在 2021 年 7 月, 西北太平洋的异常气旋和反气旋相关的东风异常和源自副热带西北太平洋的强烈水汽输送为产生极端降雨建立了大尺度条件。

冷暖空气相遇是产生局部极端降雨的重要因素(刘芸芸等, 2020), 前人研究表明, 在 2021 年 7 月, 副热带高压和大陆高压异常偏强, “两高对峙”阻碍了中高纬度南下的冷空气(梁旭东等, 2022)。由图 4 可见, 在 500 hPa 位势高度上, 7 月 20~21 日期间河南受冷空气的影响不大, 直到 7 月底, 河南才重新被强冷空气控制(图 4)。

前人研究表明, 西太平洋副热带高压的相对强度与相对涡度有很好的相关性(聂俊等, 2021)。图 5 给出了 2021 年 7 月的相对涡度异常。在 850 hPa 等压面上, 日本附近地区出现相对涡度负异常, 与图 3a 中的异常反气旋对应, 而在我国台湾以东出现相对涡度正异常, 正好对应着图 3a 中的异常气旋, 而河南地区位于正涡度异常的边缘处(图 5a)。在 500 hPa 和 200 hPa 等压面上, 相对涡度的正异常和负异常位置分别与图 3b 和图 3c 中异常气旋和异常反气旋相一致(图 5b 和图 5c)。在河南地区纬度带(27.5°~35°N)上, 河南地区主要受相对涡度正异常控制, 而在同纬度西太平洋(大约 150°E 以东)则主要受相对涡度负异

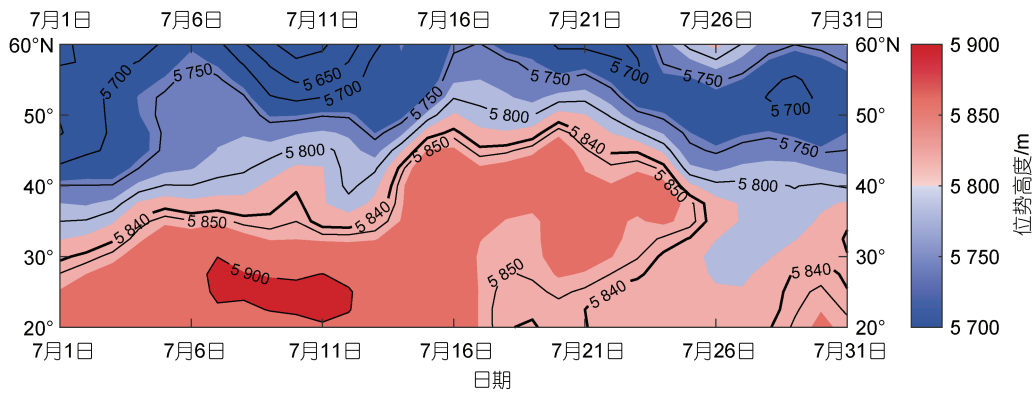


图 4 100°~120°E 平均的 500 hPa 位势高度在 2021 年 7 月的逐日演变(填色)

Fig.4 Daily evolution of 500 hPa geopotential height on average in 100°~120°E
注: 位势高度 5 840 m 等值线(黑粗线)可指示北方冷空气所能到达的纬度位置

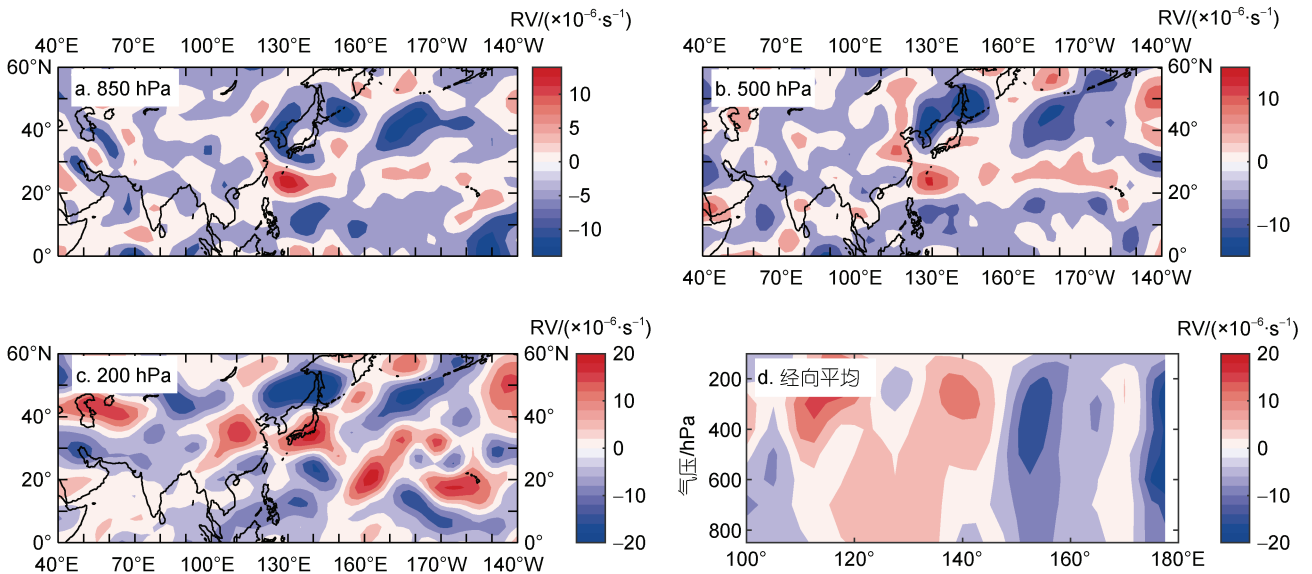


图 5 2021 年 7 月的相对涡度异常

Fig.5 Relative vorticity anomaly in July 2021

注: a~c 分别指 2021 年 7 月 850, 500 和 200 hPa 的相对涡度(relative vorticity, RV)异常; d: 2021 年 7 月 27.5°~35°N 纬度带上经向平均的相对涡度异常

常影响(图 5d), 这与前文图 3 所见的垂向速度异常相吻合, 表明在此期间河南地区中低空的异常垂向上升气流进一步促进了极端降雨的发生。

通过图 3 可知水汽主要受异常东风和垂直运动的影响, 来自于河南以东方向的西太平洋海域。为了进一步研究河南极端暴雨水汽输送的具体来源, 我们在图 6 中展示了 30°~35°N 经向平均的风场(u, w)和水汽通量随等压面和经度的分布和演变。气候态平均场(1979~2020 年)显示在该纬度带上西太平洋中低空主要盛行西风, 其中在河南地区虽然垂向速度下沉明显, 但主要为西风(图 6a)。但是, 与气候态大气

环流相比, 2021 年 7 月的(u, w)异常截然不同。对比图 6a 和 6b 可见, 2021 年 7 月在河南至西太平洋的大范围内由气候态的盛行西风转为东风异常, 同时在 125°~145°E、160°E~170°W 的中西太平洋海域出现显著的下沉气流, 而在河南地区出现显著的异常上升气流。如图 6c 所示, 在河南以东的中西太平洋大范围内存在显著的西向水汽输送。综合起来看, 这些西向水汽输送从中西太平洋一直延伸到大约 115°E, 并与河南地区异常强的上升气流共同作用下, 对 2021 年 7 月河南地区的极端降雨的发生产生重要影响, 这与前人提出的水汽来源有显著差异(王新伟等, 2018)。

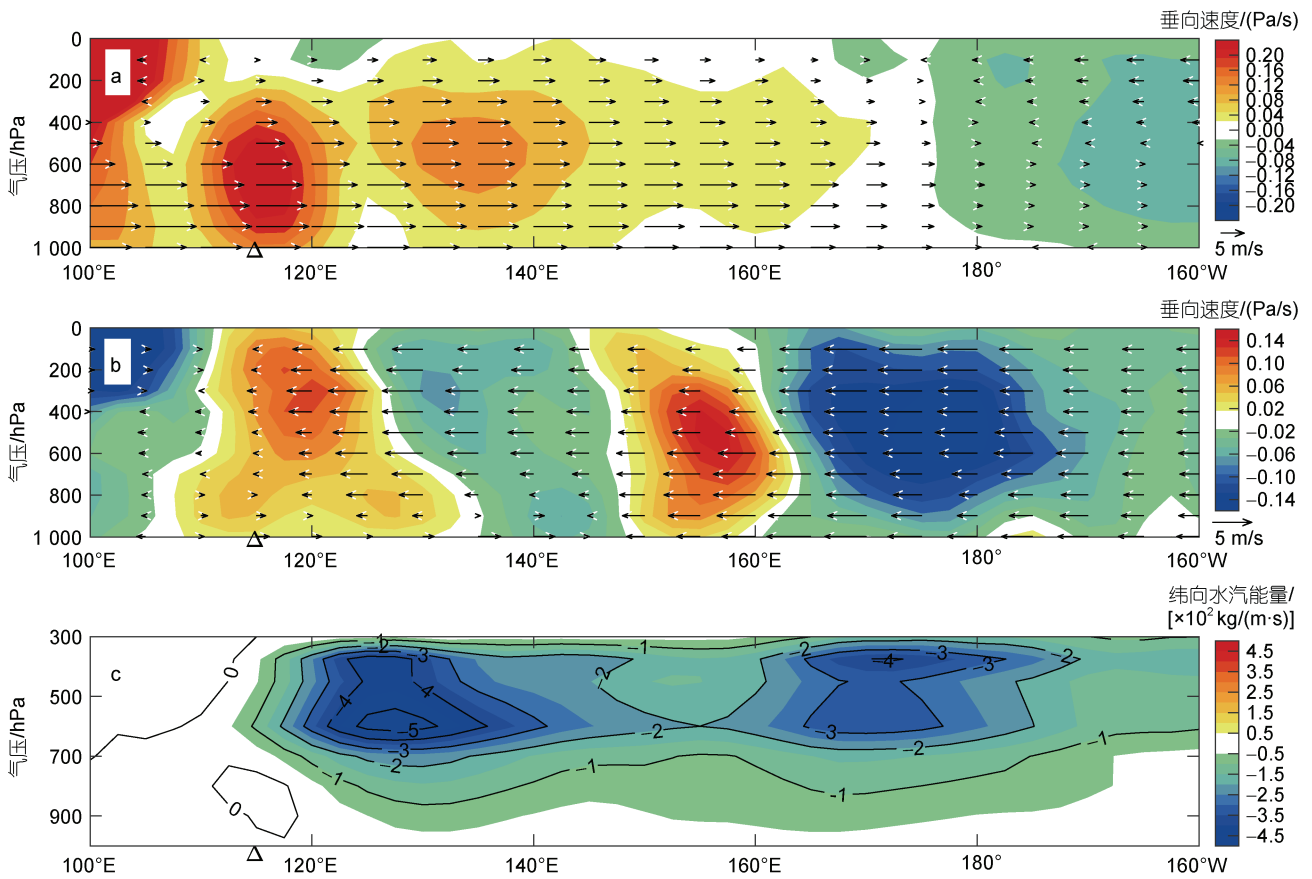


图 6 经向平均(30°~35°N)的(u, w)和水汽通量异常

Fig.6 Meridional average (30°~35°N) of (u, w) and water vapor flux anomaly

注: a: 30°~35°N 经向平均的 7 月气候态平均(1979~2020 年)垂向速度(填色, 正值表示上升运动)和纬向风场(箭头); b: 30°~35°N 经向平均的 2021 年 7 月垂向速度异常和纬向风异常场; c: 30°~35°N 经向平均的 2021 年 7 月纬向水汽通量异常(填色); 黑色三角表示郑州位置

2.3 西太平洋副热带高压的作用

从上节中对“7·20”极端降雨的水汽来源和过程分析可知, 西太平洋副热带高压可能具有重要的作用。比如, Yang 等(2022)指出西太平洋副热带高压的异常加强会增加热带到东亚的水汽输送, 导致夏季极端降雨事件的发生, 未来与西太平洋副热带高

压异常相关的极端气候会变得更加频繁和严重。当夏季副热带高压主体北部 SLP 正异常, 而主体南部 SLP 负异常, 对应的副高位置就会偏北(何敏等, 1991)。图 7a 展示了 2021 年 7 月 SLP 异常和 500 hPa 风场异常。可以看出, 在西太平洋附近, 由高纬度到低纬度, 海平面气压异常分布呈现“-+”结构, 中纬度的副热带

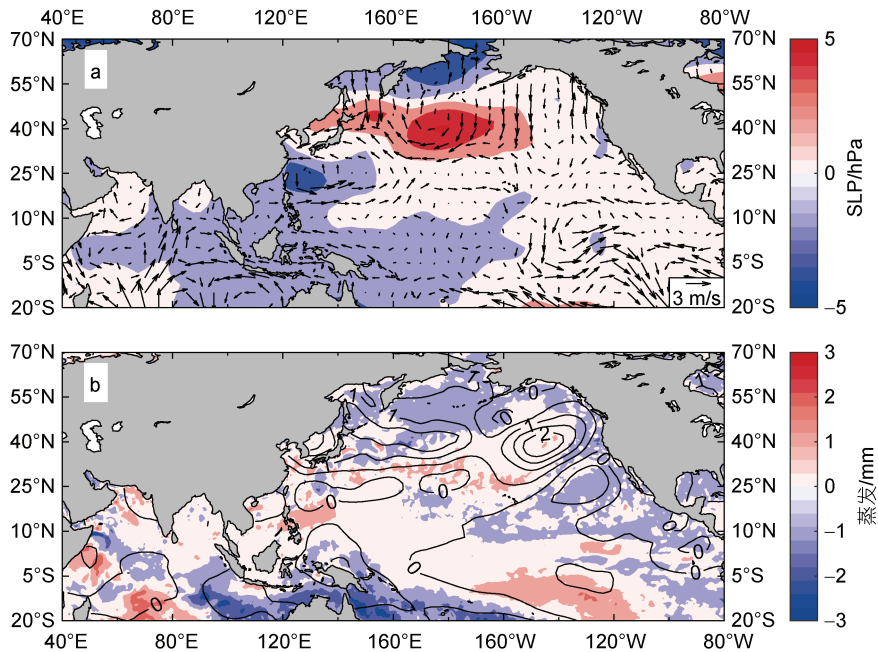


图 7 2021 年 7 月的海平面气压(SLP)和 500 hPa 风场异常以及海表面温度(SST)和蒸发异常

Fig.7 The sea level pressure (SLP) and 500 hPa wind field anomalies (a), and sea surface temperature (SST) and evaporation anomalies (b) in July 2021

注: a: 2021 年 7 月 SLP (填色)和 500 hPa 风场(箭头)异常; b: 2021 年 7 月 SST (等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)和蒸发(填色, 正值表示蒸发, 负值表示冷凝)异常

西太平洋海平面气压异常升高, 而在我国台湾东部和日本南部的西太平洋地区海平面气压异常降低, 表明在此期间副高位置偏北, 而在异常高压和异常低压之间的纬度上, 亦即河南地区纬度上, 产生显著的东风异常(图 7a)。

前人研究表明, 北太平洋海温异常与西太平洋副热带高压强度联系紧密, 对华北地区强降水的发生有重要影响(Li *et al.*, 2017); 西北太平洋夏季海温异常偏高可能会通过东亚上空东亚-太平洋遥相关型异常大气环流影响中国东部的降水异常(Zhang *et al.*, 2013)。2021 年 7 月热带印度洋和热带太平洋的海表面温度异常不太明显, 但是在以大约 40°N 为核心的中纬度北太平洋地区海表面温度显著异常偏高(图 7b)、副高强度增强。2021 年 7 月蒸发异常主要位于西太平洋纬向 $25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 和菲律宾东部海域($120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$), 其中在纬向带($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$)西太平洋海域, SST 异常偏高, 蒸发异常偏高, 有助于增强西太平洋作为水汽来源的能力。因此, 西太平洋副热带高压在 2021 年 7 月河南极端降水中可能起到非常重要的作用。

为了进一步研究副热带高压和河南地区降雨之

间的关系, 我们在图 8a 中给出 1979~2021 年的河南逐月降水和副热带高压强度指数的标准化时间序列。对比发现, 河南逐月降水和副热带高压强度指数之间存在统计显著的相关性, 但其相关系数仅为 0.267 (副热带高压的其他指数, 如面积、脊线和西伸脊点等, 与河南降水的相关系数不如强度高), 在 2020 年和 2021 年, 西太平洋副热带高压强度为正异常(图 8a)。

西太平洋副热带高压自身存在多个时间尺度的变化(如吴国雄等, 2003)。我们对河南降水和副高强度时间序列进行了 EEMD 模态分解, 并分别对比了河南降水和副高强度的各个模态之间的关系。结果发现第一模态 IMF1 相对高频, 且相关性较低, 而河南降水和副高强度的第二模态 IMF2 存在显著的统计相关性, 各正负位相可较好地一一对应起来, 二者相关系数达到 0.5 左右, 其中 2021 年河南大暴雨期间的副高强度 IMF2 模态为显著正异常, 与河南降水 IMF2 在 2021 年的显著正异常吻合(图 8b)。从图 9 可以看出, IMF1 为高频变化项, 周期大致为显著的 0.34 a, 而 IMF2 为较低频变化项, 其主周期为显著的 0.99 a 和 1.43 a。

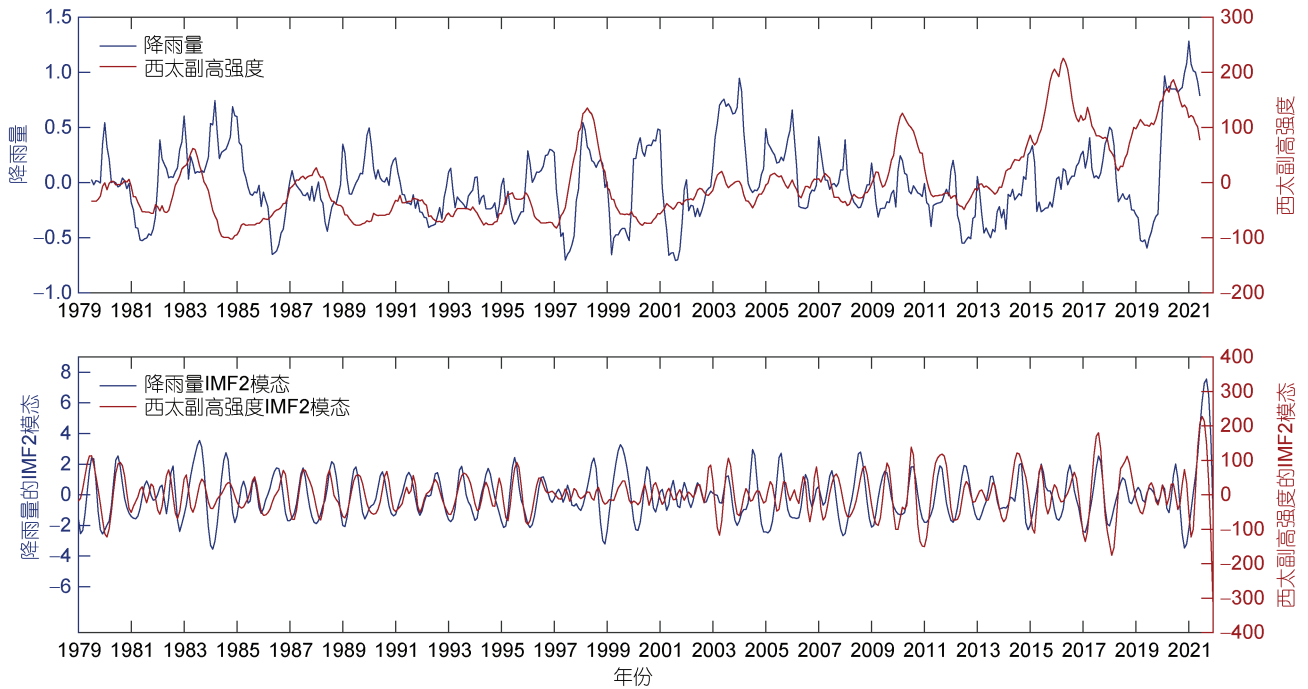


图 8 1979~2021 年逐月河南降雨数据与西太副高(west Pacific subtropical high, WPSH)强度指数的时间序列及其本征模函数第二模态(the second mode of intrinsic mode functions, IMF2)的时间序列

Fig.8 Time series of monthly rainfall data in Henan Province and west Pacific subtropical high (WPSH) intensity index and its IMF2 from 1979 to 2021

注: 河南降雨逐月数据和 WPSH 强度指数均进行了 13 个月的滑动平均和标准化处理, 蓝线指降雨, 红线指 WPSH 强度

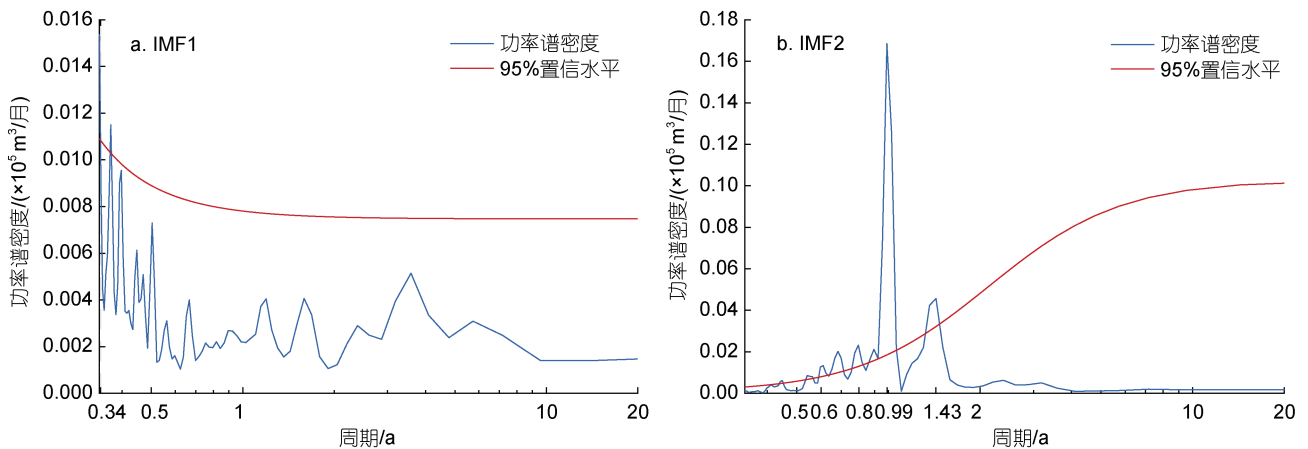


图 9 副高强度第一模态和第二模态的功率谱

Fig.9 Power spectrum of IMF1 and IMF2 of the subtropical high intensity

为研究副高强度指数 IMF2 模态对河南降雨的影响, 我们对副高强度指数 IMF2 大于其 1 倍标准差的年份(7月)的 SST、SLP、蒸发、风场和垂向速度场进行了合成分析。结果显示, 在副高强度指数 IMF2 正位相期间, 副热带西北太平洋海面高度异常增强、SST 显著升高、海面蒸发增强、下沉气流运动增强, 而河南地区的垂向上升运动增强, 从副热带西太平洋到华东地区的中低空出现强烈的东风异常(图 10)。副

高强度指数 IMF2 正位相期间的大气环流形态是有助于为河南地区降雨提供水汽来源和垂向上升气流条件的, 也与前文分析的 2021 年 7 月河南极端降雨期间的形态非常吻合, 说明副高强度指数的第二模态对河南降雨具有重要的意义。此外, Li 等(2020)研究表明, 西北太平洋(大约 20°~50°N, 150°~180°E)的海表温度冷异常和热带太平洋的海表温度暖异常有助于导致副热带高压向西扩展。从图 10a 展示的 SST

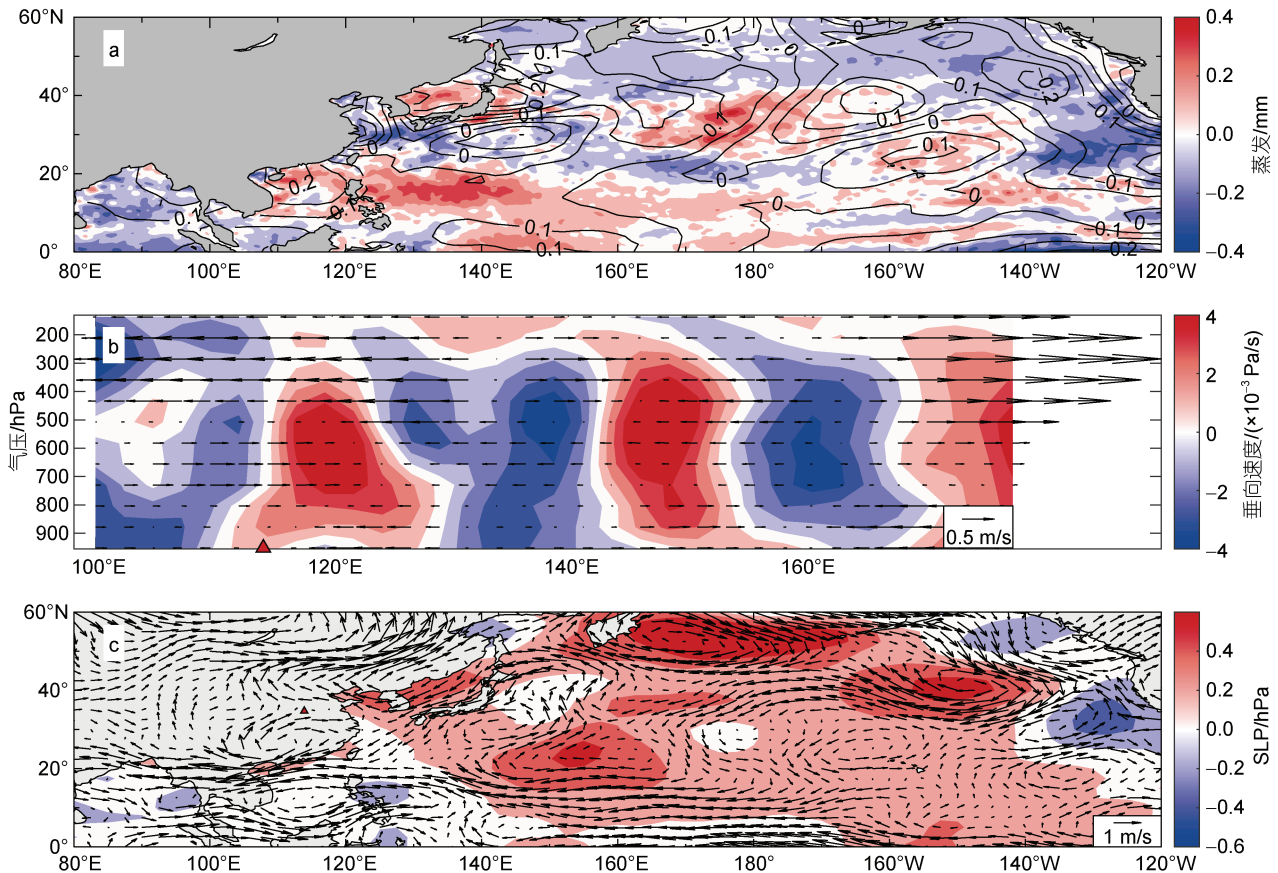


图 10 合成的 IMF2 正位相的相关物理场分布

Fig.10 Physical field distribution of the positive phase of the combined IMF2

注: 取 WPSH 强度 IMF2 序列中超过标准差 57.61 的月份, 对相关物理量进行合成分析. a: SST (等值线)和蒸发(填色, 正值表示蒸发, 负值表示冷凝); b: 垂向速度(填色, 正值表示上升运动)和纬向风(箭头); c: SLP (填色)和 850~700 hPa 平均风场(矢量). 红色实心三角表示郑州位置

异常场可见, 在 IMF2 期间西北太平洋海温偏冷而热带太平洋偏暖, 这或许有助于副热带高压西伸, 对河南等东部地区降雨产生影响。

总体来说, 副高强度指数的第二模态在河南降雨变化中有着非常重要的意义, 副高强度第二模态在 2021 年的极端高值可能对 2021 年河南极端降雨事件产生了重要影响。

3 结论和讨论

极端降雨事件直接关系到人民的生命安全和财产安全, 2021 年 7 月河南极端降雨给河南地区带来了严重的旱涝灾害, 造成了不可估计的损失。本文利用站点数据、再分析数据等数据和 EEMD 方法, 研究了河南地区 2021 年 7 月份极端降雨的基本特征、水汽来源以及西太平洋副热带高压的作用, 特别地分析了副热带高压强度变化主要模态与河南降雨的关系。

主要结论如下:

(1) 副热带西太平洋是 2021 年 7 月河南地区极端降雨的主要水汽来源, 期间河南地区强烈的异常上升运动具有重要作用。在此次事件期间, 西太平洋副热带高压显著偏强、偏北, 在与此相关的异常反气旋和台风“烟花”相关气旋共同影响下, 副热带西太平洋到河南地区的大范围内产生显著的东风异常, 导致大量的水汽通过中低空从西太平洋海域输送到河南地区, 并在河南地区的异常强烈的低空上升气流作用下, 形成极端降雨(图 11)。

(2) 河南地区降水时间序列与副热带高压强度指数之间存在统计显著的相关关系, 其中副热带高压的第二模态 IMF2 与河南地区降水时间序列的第二模态存在非常显著的关系。在副热带高压的第二模态 IMF2 正位相期间, 副高强度增强、SST 异常偏高、蒸发异常偏强, 中低空大气出现显著的东风异常, 从

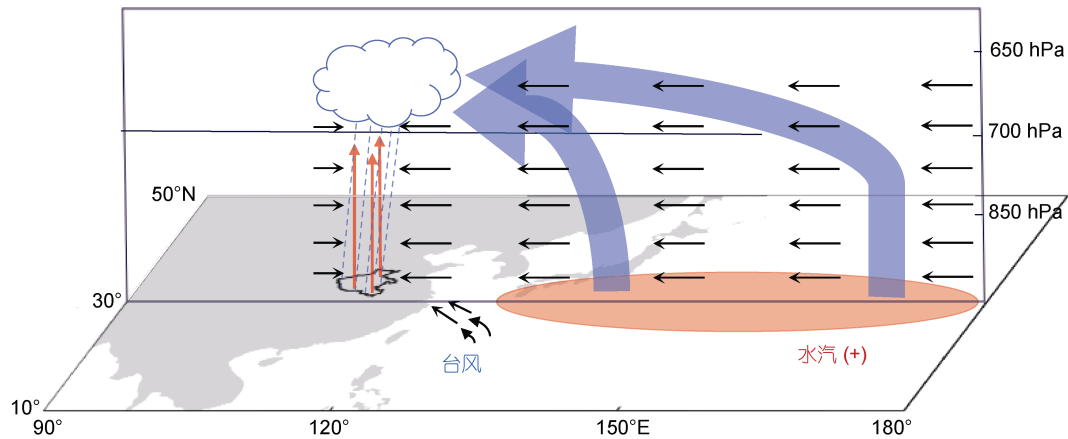


图 11 2021 年 7 月河南极端降雨水汽来源示意图

Fig. 11 Schematic representations of water vapor source of extreme rainfall in Henan in July 2021

注: 红色箭头表示异常上升气流; 黑色箭头表示异常矢量风; 蓝色箭头代表水汽输送路径; “+”表示水汽上升运动增强

而对河南地区降雨产生重要影响。在 2021 年 7 月, 副热带高压的第二模态 IMF2 位于极端峰值, 相关海洋和大气环流过程更加显著, 对此期间河南地区极端降雨可能具有非常重要的作用。

本项研究尚存在许多不足之处。一方面, 本文对于关于河南极端降雨的形成原因缺乏深入细致的分析。大气环流背景场的变化和水汽来源的变化仅仅是极端降雨的必要条件而非充分条件, 只有对除了大尺度环流背景外的其他因素——比如中小尺度天气动力过程等, 进行了充分的研究后才能对此次极端事件的形成原因有一个完整的理解。另一方面, 尽管本文试图从副热带高压多尺度变化模态方面研究其对河南降雨的影响, 揭示了副高强度第二模态可能的重要作用, 但是副高为何存在这种模态、以及其影响河南地区降雨的具体演变过程, 本文尚未研究, 则需要未来开展相关的工作。此外, 以往研究表明印度洋的暖异常在中国降雨过程中也扮演着非常重要的作用(Zhou *et al*, 2021), 印度洋的热力变化是否以及如何 在 2021 年 7 月河南极端降雨事件中发挥作用亦不清楚, 需要进一步研究。

致谢 感谢国家海洋环境预报中心冯立成研究员、宋春阳博士为我们提供了降雨的站点观测数据和指导, 感谢中国气象科学研究院刘伯奇研究员、复旦大学周震强博士为本文提出的富有启发性的意见和建议, 非常感谢两位匿名审稿人提出的极具建设性的重要意见和建议。

参 考 文 献

丁一汇, 2015. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述[J].

气象学报, 73(3): 411-424, doi: 10.11676/qxxb2015.067.

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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1978.04.02.

王旭栋, 2021. 夏季西北太平洋异常反气旋的季节内至年际尺度变化特征与机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学: 47-60, doi: 10.27248/d.cnki.gnjqc.2021.000017.

王军, 吴迪, 王超杰, 等, 2022. “21-7”河南极端降水的远距离台风作用分析[J]. 气象与环境科学, 45(2): 75-85, doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2022.02.008.

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, doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-03-0419.

王新伟, 平凡, 姬兴杰, 等, 2018. 近 40a 河南省夏季降水变化特征分析[J]. 暴雨灾害, 37(3): 219-229, doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2018.03.004.

布和朝鲁, 诸葛安然, 谢作威, 等, 2022. 2021 年“7.20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学, 46(3): 725-744, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21226.

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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160.

朱雪妍, 黄安宁, 2018. 不同分辨率 BCC_CSM 气候系统模式对中国夏季极端降水事件模拟能力评估[C] // 第 35 届中国气象学会年会 S25 研究生论坛. 合肥: 中国气象学会: 256-263.

刘芸芸, 丁一汇, 2020. 2020 年超强梅雨特征及其成因分析[J]. 气象, 46(11): 1393-1404, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.11.001.

刘芸芸, 李维京, 艾秀, 等, 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J]. 应用气象学报, 23(4): 414-423.

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, doi: 10.11898/1001-7313.20220101.

孙跃, 肖辉, 杨慧玲, 等, 2021. 基于遥感数据光流场的 2021 年郑州“7-20”特大暴雨动力条件和水凝物输送特征分析[J]. 大气科学, 45(6): 1384-1399, doi: 10.3878/j.issn.1006-

- 9895.2109.21155.
- 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, doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.001.
- 杨浩, 周文, 汪小康, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 48(5): 571-579, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.111201.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等, 2003. 副热带高压研究进展及展望[J]. 大气科学, 27(4): 503-517.
- 何敏, 董守玉, 刘引鸽, 1991. 夏季 500hPa 西太平洋副高与海平面气压的关系[J]. 气象, 17(2): 12-17, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.1991.02.003.
- 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(5): 672-687, doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210907001.
- 陈刚, 赵坤, 吕迎辉, 等, 2022. 河南“21·7”特大暴雨过程微物理特征变化分析[J]. 中国科学: 地球科学, 52(10): 1887-1904, zdoi: 10.1360/N072022-0029.
- 范苏丹, 2010. 中国极端降水变化的季节性差异及其与海温异常的可能联系[D]. 南京: 南京信息工程大学: 26-30, doi: 10.7666/d.y1694863.
- 柯丹, 管兆勇, 2014. 华中地区夏季区域性极端日降水事件变化特征及环流异常[J]. 气象学报, 72(3): 478-493, doi: 10.11676/qxxb2014.037.
- 祝传栋, 陈正洪, 李亚飞, 等, 2022. 平流层高位涡侵入对河南“21·7”极端暴雨的影响[J]. 气象与环境科学, 45(2): 27-37, doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2022.02.004.
- 聂俊, 刘鹏, 赵灿, 2021. 西北太平洋副热带高压的不同指数及其与中国东部夏季降水关系的探讨[J]. 大气科学, 45(4): 833-850, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20160.
- 栗晗, 王新敏, 张霞, 等, 2018. 河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象, 44(9): 1136-1147, doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.09.002.
- 钱代丽, 2019. 印度洋-太平洋热带区域异常热力强迫对夏季西太平洋副热带高压变化的影响机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学: 13-24.
- 郭媛媛, 张芮洁, 温之平, 等, 2021. 热带西印度洋年代际增暖对 2020 年超强梅雨的可能贡献[J]. 中国科学: 地球科学, 51(10): 1624-1636.
- 黄樱, 钱永甫, 黄丹青, 等, 2011. 全球变暖背景下淮河流域极端降水的演变规律[C] // 第 28 届中国气象学会年会——S3 天气预报灾害天气研究与预报. 厦门: 中国气象学会: 1239-1250.
- 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, doi: 10.1360/TB-2021-0827.
- 新华社, 2022. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告公布[J]. 中国防汛抗旱, 32(2): 5.
- 翟建青, 代潭龙, 王国复, 2021. 2020 年全球气候特征及重大天气气候事件[J]. 气象, 47(4): 471-477, doi: 10.7519/j.issn.000-0526.2021.04.008.
- BAI S Y, GAO J X, XUE Y, *et al*, 2021. Spatial and temporal characteristics of rainfall anomalies in 1961-2010 in the Yangtze River Basin, China [J]. Atmosphere, 12(8): 960, doi: 10.3390/atmos12080960.
- CAI Y N, CHEN Z S, DU Y, 2022. The role of Indian ocean warming on extreme rainfall in central China during early summer 2020: without El Niño influence [J]. Climate Dynamics, 59: 951-960, doi: 10.21203/rs.3.rs-748847/v1.
- CAI Y J, TAN L X, CHENG H, *et al*, 2010. The variation of summer monsoon precipitation in central China since the last deglaciation [J]. Earth and Planetary Science Letters, 291(1/2/3/4): 21-31, doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.039.
- CHEN Y, ZHAI P M, 2014a. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in Central-Eastern China [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 140(682): 1467-1478, doi: 10.1002/qj.2231.
- CHEN Y, ZHAI P M, 2014b. Precursor circulation features for persistent extreme precipitation in central-eastern China [J]. Weather and Forecasting, 29(2): 226-240, doi: 10.1175/WAF-D-13-00065.1.
- CHEN Z H, ZHANG J, 2020. The characteristics of late summer extreme precipitation in northern China and associated large-scale circulations [J]. International Journal of Climatology, 40(12): 5170-5187, doi: 10.1002/joc.6512.
- 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]. Theoretical and Applied Climatology, 149(1): 15-24, doi: 10.1007/s00704-022-04022-7.
- DONG X, 2016. Influences of the Pacific Decadal Oscillation on the East Asian Summer Monsoon in non-ENSO years [J]. Atmospheric Science Letters, 17(1): 115-120, doi: 10.1002/asl.634.
- FANG C X, LIU Y, CAI Q F, *et al*, 2021. Why does extreme rainfall occur in Central China during the summer of 2020 after a weak El Niño? [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 38(12): 2067-2081, doi: 10.1007/s00376-021-1009-y.
- FLESCHE T K, REUTER G W, 2012. WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography [J]. Journal of Hydrometeorology, 13(2): 695-708, doi: 10.1175/jhm-d-11-035.1.
- HE S P, 2015. Potential connection between the Australian summer monsoon circulation and summer precipitation over Central China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 8(3): 120-126, doi: 10.3878/AOSL20140091.
- IPCC, 2019. Summary for policymakers [C] // PÖRTNER H O, ROBERTS D C, MASSON-DELMOTTE V *et al*. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge: Cambridge University Press.
- LI H X, CHEN H P, WANG H J, 2017. Influence of North Pacific SST on heavy precipitation events in Autumn over North China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 10(1): 21-28, doi: 10.1080/16742834.2017.1237256.
- LI H, XU F H, LIN Y L, 2020. The impact of SST on the zonal variability of the western Pacific subtropical high in boreal summer [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(11): e2019JD031720, doi: 10.1029/2019JD031720.
- LI R C Y, ZHOU W, 2015. Multiscale control of summertime persistent heavy precipitation events over South China in

- association with synoptic, intraseasonal, and low-frequency background [J]. *Climate Dynamics*, 45(3/4): 1043-1057, doi: 10.1007/s00382-014-2347-6.
- LUO Y L, WU M W, REN F M, *et al*, 2016. Synoptic situations of extreme hourly precipitation over China [J]. *Journal of Climate*, 29(24): 8703-8719, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0057.1.
- NIE Y B, SUN J Q, 2022. Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021 [J]. *Geophysical Research Letters*, 49(4): e2021GL097446, doi: 10.1029/2021GL097446.
- NTWALI D, OGWANG B A, ONGOMA V, 2016. The impacts of topography on spatial and temporal rainfall distribution over Rwanda based on WRF Model [J]. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6(2): 145-157, doi: 10.4236/acs.2016.62013.
- STUDHOLME J, FEDOROV A, GULEV S K, *et al*, 2022. Poleward expansion of tropical cyclone latitudes in warming climates [J]. *Nature Geoscience*, 15(1): 14-28, doi: 10.1038/s41561-021-00859-1.
- SUN W, LI J, YU R C, *et al*, 2018. Circulation structures leading to propagating and non-propagating heavy summer rainfall in central North China [J]. *Climate Dynamics*, 51(9/10): 3447-3465, doi: 10.1007/s00382-018-4090-x.
- SUN B, ZHU Y L, WANG H J, 2011. The recent interdecadal and interannual variation of water vapor transport over Eastern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28(5): 1039-1048, doi: 10.1007/s00376-0100093-1.
- TANG S L, LUO J J, HE J Y, *et al*, 2021. Toward understanding the extreme floods over Yangtze River Valley in June–July 2020: role of Tropical Oceans [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(12): 2023-2039, doi: 10.1007/s00376-021-1036-8.
- WEI F Y, ZHANG T, 2010. Oscillation characteristics of summer precipitation in the Huaihe River valley and relevant climate background [J]. *Science China Earth Sciences*, 53(2): 301-316, doi: 10.1007/s11430-009-0151-7.
- WU Z H, HUANG N E, 2009. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method [J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1): 1-41, doi: 10.1142/S1793536909000047.
- XIA Y C, HUANG Q, YAO S X, *et al*, 2021. Multiscale causes of persistent heavy rainfall in the Meiyu Period over the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Frontiers in Earth Science*, 9: 700878, doi: 10.3389/feart.2021.700878.
- YANG J H, 2009. Relationship of Pacific SSTA to summer extreme precipitation events over Eastern China [C] // 2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Beijing: IEEE: 1-6, doi: 10.1109/ICBBE.2009.5163299.
- YANG K, CAI W J, HUANG G, *et al*, 2022. Increased variability of the western Pacific subtropical high under greenhouse warming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(23): e2120335119, doi: 10.1073/pnas.2120335119.
- YU Z T, SUN Z B, NI D H, *et al*, 2007. Effects of Pacific SSTA on summer precipitation over eastern China, part II: numerical simulations [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 13(2): 113-119.
- YU R, ZHAI P M, 2021. Changes in summer persistent precipitation over the middle-lower reaches of the Yangtze River and associated atmospheric circulation patterns [J]. *Journal of Meteorological Research*, 35(3): 393-401, doi: 10.1007/s13351-021-0186-z.
- ZHAI P M, ZHANG X B, WAN H, *et al*, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate*, 18(7): 1096-1108, doi: 10.1175/JCLI-3318.1.
- ZHENG J Y, WANG C Z, 2021. Influences of three oceans on record-breaking rainfall over the Yangtze River Valley in June 2020 [J]. *Science China Earth Sciences*, 64(10): 1607-1618.
- ZHANG R H, WU B Y, HAN J P, *et al*, 2013. Effects on summer monsoon and rainfall change over China duo to Eurasian snow cover and ocean thermal conditions [M]. In: Singh B R. *Climate Change-Realities, Impacts over Ice Cap, Sea Level and Risks*. Rijeka: InTech: 227-250, doi: 10.5772/54831.
- ZHOU Z Q, XIE S P, ZHANG R H, 2021. Historic Yangtze flooding of 2020 tied to extreme Indian Ocean conditions [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(12): e2022255118, doi: 10.1073/pnas.2022255118.

MOISTURE SOURCE OF EXTREME RAINFALL IN HENAN IN SUMMER 2021 AND THE POSSIBLE ROLE OF THE WESTERN PACIFIC SUBTROPICAL HIGH

SUN Qi-Ming^{1, 2, 3}, HU Shi-Jian^{2, 3, 4}, ZHAO Yi-Jun¹

(1. *Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China*; 2. *CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of Oceanology, Qingdao 266071, China*; 3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 4. *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China*)

Abstract In order to study the role of the Western Pacific Ocean in the “7.20” extreme rainfall event in Henan Province, water vapor transportation, origination, and relationship with multiscale variation of the western Pacific subtropical high during extreme rainfall events in Henan Province, central China in summer 2021 were analyzed using reanalysis data of sea surface temperature, sea surface pressure, potential height, and wind field, and observational data of precipitation. Results show that during the extreme rainfall in Henan in summer 2021, the western Pacific subtropical high was relatively stronger and more northerly, and significant east wind anomalies and westward water vapor transport occurred in the middle and low altitude from the east of Henan to the northwest Pacific Ocean. Significant anomalies in relative vorticity, potential height, and vertical upward movement at upper level existed in the summer of 2021 in Henan rainstorm area, and the water vapor transported from the northwest Pacific Ocean via abnormal easterly winds at the middle and lower levels was the main water source. In addition, analysis with an Empirical Mode Decomposition method revealed a statistically significant relationship between the second mode of subtropical high intensity index ($IMF2_{WPSH}$) and the second mode of rainfall in Henan Province, and the $IMF2_{WPSH}$ plays an important role in this extreme rainfall event. During the positive phase of the $IMF2_{WPSH}$, there was an abnormally enhanced upward movement in the subtropical western Pacific and an abnormal east wind in the low-middle altitude, by which updraft was abnormally enhanced. The $IMF2_{WPSH}$ could be used to predict extreme rainfall event in Henan and the neighboring regions.

Key words Henan; extreme rainfall; western Pacific subtropical high; typhoon