# 近海台风对"21·7"河南极端暴雨过程水汽 通量和动、热力条件影响的模拟研究

饶晨泓1,3 毕鑫鑫2 陈光华1 喻自凤4

- 1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室,北京 100029
- 2 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报 预警与评估协同创新中心,南京 210044

3 中国科学院大学,北京 100049

4 中国气象局上海台风研究所, 上海 200032

**摘 要**本文利用 WRF 模式对近海台风"烟花"及"查帕卡"影响 2021 年 7 月 19 日至 21 日河南极端暴雨的过程进行数值模拟。控制试验(CTL)对台风路径和强度,大尺度环流形 势,以及河南暴雨的强度和空间分布型等均给出合理的模拟,基本再现了本次河南极端暴雨 的发展过程。此外,敏感性试验表明,在移除台风"烟花"后,副高系统显著南压并在南侧 形成东南风急流,河南地区的南风分量减弱、东风增强,东西方向的水汽输送占主导,有利 于降水分布型由 CTL 试验的南-北向转变为东-西向;另一方面,由于低层东南风急流相较 于移除"烟花"前的东风急流偏弱,河南降雨区的局地辐合减弱,水汽通量净流入值较 CTL 试验降低 5.81%,且中纬度冷气团西移减慢,引起局地相当位温梯度减弱,最终导致 NOINFA 试验的降雨强度偏弱。移除台风"查帕卡"后,大尺度环流形势几乎未受影响,河南南侧的 水汽输送略有减弱,因此强降水分布基本与 CTL 试验类似,降雨强度略有减小。与台风"烟 花"相比,"查帕卡"对河南暴雨的影响较弱。

关键词 河南暴雨 台风"烟花" 台风"查帕卡" 数值模拟
文章编号 中图分类号 P458.1+24 文献标识码 A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000







收稿日期 2021-12-27; 网络预出版日期 作者简介 饶晨泓,女, 1998 年出生,博士研究生,主要从事热带气旋研究。E-mail: raochenhong@mail.iap.ac.cn 通讯作者 陈光华, E-mail: cgh@mail.iap.ac.cn 资助项目 国家自然科学基金项目 42175073、41975071 **Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grants 42175073, 41975071)

# A Numerical Study on the Impacts of the Offshore Typhoons on Water Vapor Flux and Dynamic and Thermal Conditions of the "21·7" Extreme Rainstorm Event in Henan Province RAO Chenhong<sup>1, 3</sup>, BI Xinxin<sup>2</sup>, CHEN Guanghua<sup>1</sup>, YU Zifeng<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

3 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049

4 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200032

Abstract: This study uses the WRF model to numerically simulate the influence of the offshore Typhoon In-Fa and Typhoon Cempaka on the extreme rainstorm process in Henan from July 19 to 21, 2021. The control experiment (CTL) reasonably captures the tracks and intensities of the two typhoons, the large-scale circulation pattern, the intensity and spatial distribution pattern of the rainstorm event in Henan, which basically reproduce the extreme rainstorm process in Henan. In addition, the sensitivity experiments indicate that after the removal of the Typhoon In-Fa, the subtropical high extends southward and forms the southeast wind jet in the south, causing the south (east) wind component to get weakened (strengthened) around Henan. The water vapor transport in the zonal direction gets dominant, which is conducive to the transition of the rainfall distribution from the south-north orientation in the CTL to the east-west orientation. On the other hand, due to the southeast wind at the low level is weaker than the easterly jet before the removal of the Typhoon In-Fa, the local convergence at Henan rainfall area is weakened, and the net water vapor flux is reduced by 5.81% compared to the CTL experiment. The slowdown in westward movement of the mid-latitude cold air causes the reduction of the local equivalent potential temperature gradient. Therefore, the rainfall intensity in the NOINFA is relatively weaker than that in the CTL. After the removal of Typhoon Cempaka, the large-scale circulation characteristics are almost unaffected, and the water vapor transport on the south side of Henan is slightly weakened. Therefore, the distribution of heavy rainfall is basically similar to that in the CTL, with a slight decrease in rainfall peak. Compared to Typhoon In-Fa, Typhoon Cempaka has less effect on the rainstorm event in Henan.

Keywords Henan rainstorm, Typhoon In-Fa, Typhoon Cempaka, Numerical simulation

#### 1 引言

暴雨是影响我国主要的气象灾害之一,通常会给当地造成严重的经济损失和人员伤亡。 陶诗言(1980)系统地阐述了中国暴雨的特点、多尺度系统与暴雨的关系及暴雨发生时的大 尺度环流背景等关键性问题。近年来随着观测技术的提高和数值模式的发展,众多学者对暴 雨发生的物理机制和中小尺度动力过程有了更深入的了解(丁一汇,1994;高守亭等,2003; 赵思雄和孙建华,2013)。

台风是我国暴雨形成的强烈天气系统,主要体现在直接影响和间接影响两个方面。台风 眼墙和内外雨带通常会造成强烈的降水,即台风自身的降水可直接导致暴雨(Takahashi and Kawano, 1998; Lonfat et al., 2007)。另外, 台风能够与其它天气系统相互作用, 在距离台风 中心较远的地方产生间接降水(Bosart and Carr, 1978; Ross and Kurihara, 1995)。例如, Wang et al. (2009)通过数值模拟试验证明,台风 Songda (0419)外围环流中水汽的向北输送是 日本产生强降水的主要原因; 孙建华等(2005)将 20 世纪 90 年代华北夏季大暴雨分为 5 类,对这5类大暴雨发生的天气形势的分析强调了热带气旋(即台风)和低涡是重要的影响 系统,并指出台风与中纬度系统相互作用对暴雨的增幅具有重要的作用。副热带高压(简称, 副高)是重要的中纬度系统之一,已有研究表明,当台风与北部的副高接近时,台风与副高 之间的气压梯度迅速增加,将形成一支很强的东风气流或低空急流,有利于向暴雨区输送水 汽(陶诗言, 1980; Schumacher et al., 2011, 2012)。任素玲等(2007)发现西行台风在移动 过程中会在其西北方向激发出正变高, 使副高加强西伸, 从而改变内陆水汽分布。Wen et al. (2015)通过数值模拟结果显示台风"Vincent"(1208)强度增强时,副高明显东移,有利 于东南水汽通道向北延伸,为北京暴雨区带来更多的水汽;而当台风强度减弱或移除时,副 高西伸,不利于水汽通道向北延伸。陈淑琴等(2021)的研究表明,台风"山竹"(1822) 与副高之间形成的偏南低空急流是造成我国长三角地区强降水的主要原因。

河南省的地理位置特殊,周围影响系统和地形条件均比较复杂,历史上发生过多次严重的极端暴雨事件("58.7"暴雨研究组,1987;"75.8"暴雨会战组,1997a,1997b;李泽椿,2015;赵培娟等,2019)。丁一汇(2015)在对河南"75.8"暴雨的研究回顾总结中指出,"7503" 号台风深入内陆后停滞少动,强度维持不消直接造成了极端暴雨的发生。2021年7月河南 省再次经历了一次超历史记录的暴雨过程(简称, "21·7"河南极端暴雨),目前已有研究从 动力、热力、水汽和大气环流的角度对本次极端暴雨事件进行分析,研究结果初步表明,大 气环流形势稳定、水汽和能量供给充足、地形作用明显以及对流系统不断向降水区积聚、合 并及停滞是此次暴雨的基本成因(冉令坤,2021;苏爱芳,2021;张霞等,2021;Zhang et al., 2022)。位于西太平洋(简称,西太)的台风"烟花"和南海台风"查帕卡"同时存在于极 端降水爆发的时段,它们对大尺度环流结构配置和低纬水汽输送具有怎样的贡献?这将是本 研究的关注点。

考虑到以往对河南极端强降水的研究大多数停留在观测和诊断分析层面,或涉及的多是 造成直接影响的登陆台风案例。因此,本文将通过开展数值试验深入探究两个台风对河南极 端暴雨的影响,对比移除台风的敏感性试验结果,并分别阐释台风"烟花"和"查帕卡"在 此次"21·7"河南极端暴雨过程中水汽、动力和热力条件方面的贡献。期望本研究能加深对 此次极端降水事件的认识,同时为未来此类极端天气的研究和预报工作提供一定的参考。

## 2 数值模拟方案及效果

#### 2.1 资料介绍



#### 2.2 模式方案简介

本文使用 WRF (the Weather Research and Forecasting, Version 3.6.1)模式来模拟台风"烟花"和台风"查帕卡"的移动发展过程,以及"21·7"河南极端暴雨演变过程,并使用逐小时的 ERA 再分析资料形成模式初始场和边界条件。该模拟使用 2 层双向嵌套网格(图 4b),分辨率为 27 和 9 km,格点数分别为 316×256 和 502×388,垂直积分 45 层,最高到 10 hPa。同时,模拟采用了 WSM 6 类冰雹微物理方案,YSU (Yonsei University)边界层参数化方案,RRTM 长波辐射方案,Dudhia 短波辐射方案,Monin-Obukhov 近地面层方案和热量扩散陆面过程方案等,在模式最外层网格采用了 Betts-Miller-Janjic 积云参数化方案。并且添加风分

量的 nudging 方案使得控制试验(CTL)与再分析资料的初始场更为接近,此 nudging 过程 在敏感性试验中未开启。模式从 2021 年 7 月 19 日 08 时(北京时,BTC,下同)启动,至 21 日 20 时结束,共积分 60 个小时。由于 ERA 资料中台风"烟花"的中心位置与 CMA 提 供的业务观测中心存在一定偏差,并且在初始场中强度较弱,因此首先对模式初始时刻的台 风强度进行了 Bogus 增强,然后以 CMA 观测的台风中心为准进行了重定位。

#### 2.3 试验设计及方法介绍

为了深入研究台风"烟花"和"查帕卡"对"21.7"河南极端暴雨事件的贡献,除 CTL 试验外,本文还设计了3组敏感性试验分别讨论移除台风"烟花"(NOINFA),移除台风"查 帕卡"(NOCEM)和同时移除两个台风环流(NO2TCs)之后对暴雨发展过程的改变及影响 机制的差异。与以往研究类似(Sun and Barros, 2012; McFarquhar et al., 2012; Chen, 2013), 主要通过 Kurihara et at. (1993, 1995) 提出的从大尺度环流场中分解并移除掉台风相关非对 称环流分量的方法,对模式初始时刻的风场、温度场、位势高度场、气压场以及湿度场进行 相应的修改。该方法的基本步骤如下:(1)采用平滑算法将原始场分解为基本场(h<sub>B</sub>)和扰 动场  $(h_D)$ 。(2) 根据低层扰动风在各径向上切向分量的大小确定台风半径 $r_f(\theta)$ , 然后对  $h_D$ 做柱形滤波分离出台风涡旋环流(hav),剩余场即为非台风分量场(hD-hav)。(3)将扰动场 中的非台风分量场叠加上基本场即可得到去除台风涡旋后的环境场(h<sub>E</sub>=h<sub>B</sub>+(h<sub>D</sub>-h<sub>av</sub>))。通 过此方法能有效地从大尺度环境场中识别出台风的非对称性环流结构,从而达到滤除台风系 统贡献的目的。然而, Arakane and Hsu(2020)研究提及该方法也存在两方面的局限:(1) 在识别和分离时未精确考量到台风倾斜的垂直结构特性:(2)未单独考虑移除的台风环流场 和剩余场的动力平衡问题。图 1 分别给出了三组敏感性试验初始环流场修改前后的变化情 况。不难发现,与台风"烟花"和"查帕卡"相关的非对称风场和位势高度场均有效地从大 尺度环流中被识别出并移除,且模式初始场的动、热力和水汽分布都进行了相应的调整。

5





图 1 三组敏感性试验的初始时刻(19日08时)850 hPa 位势高度场(等值线,单位:gpm)和风场(矢量, 单位:m s<sup>-1</sup>)在(a)台风移除前、(b、d、f)移除后以及(c、e、g)被移除的台风自身环境场。(b、c) 对应 NOINFA 试验,(d、e)对应 NOCEM 试验,(f、g)对应 NO2TCs 试验

Fig. 1 The 850 hPa geopotential height (contour, units: gpm) and wind fields (vector, units:  $m s^{-1}$ ) of three sensitivity experiments (a) before, (b, d, f) after the TC-removal procedure and (c, e, g) the corresponding TC components on the initial time of 0800 BTC 19. The results of NOINFA experiment are shown in (b, c), the results of NOCEM experiment are shown in (d, e), and the results of NO2TCs experiment are shown in (f, g)

3 天气过程概况



2021年7月17日-22日,河南出现历史罕见的极端暴雨,过程最大累计降水量达1122.6 mm,此期间郑州气象站最大小时降雨量高达201.9 mm,突破中国大陆小时降雨量历史峰值。

19 日至 21 日是本次强降水过程最为集中的时间段,7月 19日 08 时至 20日 08 时,强降水 主要分布在以郑州为中心的豫中地区;20日 08 时至 21日 08 时,强降水仍主要分布在豫中 地区,但强度和范围相比于前 24 h 明显增加;21日 08 时之后,豫中强降水趋于减弱,强降 水中心移至豫北。

本文选取的研究时段为 2021 年 7 月 19 日 08 时至 21 日 20 时,即为"21·7"河南极端降 水事件爆发并伴随着两个近海台风活跃的阶段。期间,台风"烟花"的移动路径以偏西行为 主,西移过程中强度不断增加,于 21 日 11 时达到强台风级别,至 21 日 20 时一直维持强台 风级别,中心最低气压为 955 hPa,中心附近最大风速达 14 级 (42 m s<sup>-1</sup>)。同时,台风"烟 花"在研究时段内移速缓慢,19 日 11 时至 20 日 02 时期间稳定少动。另一个南海台风"查 帕卡"在 19 日 08 时升级为热带风暴并维持西北向移动,于 20 日 21 时 50 分在广东江阳登 陆,登陆时强度达到台风级别,中心附近最大风力达 12 级 (33 m s<sup>-1</sup>),中心最低气压为 978 hPa。登陆后继续西北行进入我国广西省。

从环流形势的气候态距平场来看(图 2),2021 年 7 月 19 日 08 时至 21 日 20 时河南暴 雨期间,西太副高的平均位置异常偏西偏北,洋面上存在两个显著的气旋性低压环流距平, 分别对应西太台风"烟花"和较弱的南海台风"查帕卡"。台风"烟花"和北侧副高之间的 等高线密集,受气压梯度力影响,两者之间偏东风距平增强。结合 925 hPa 水汽通量距平可 见,有明显强于气候态的水汽输送至内陆地区,东南风水汽通量距平沿台风"烟花"和副高 之间的急流区一直向西延伸至河南,并在有利的地形条件配合下导致大量水汽在局地累积, 为极端暴雨的爆发和维持提供了有利条件。

7



图 2 2021 年 7 月 19 日 08 时-21 日 20 时平均的 500 hPa 高度场 (等值线,单位: gpm) 和距平场 (阴影, 单位: gpm)、925 hPa 水汽通量距平 (矢量,单位: 20 g s<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup>);参考气候态为 1981 年-2010 年 7 月均值;深蓝色多边形表示河南省省界,黑色圆点表示郑州,红色和橙色台风标志表示此时段内台风"烟 花"和"查帕卡"中心的平均位置

Fig. 2 The 500-hPa mean geopotential height (contour, units: gpm), climatological anomaly (shaded, units: gpm) and the 925 hPa moisture flux anomaly (vector, units:  $20 \text{ g s}^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ hPa}^{-1}$ ) from 0800 BTC 19 July 2021 to 2000 BTC 21. The reference climate state is the mean at July from 1981 to 2010. The navy polygon and dot represent the province boundary of Henan and the position of Zhengzhou station. The red and orange typhoon symbols represent the averaged center position for Typhoon In-Fa and Cempaka, respectively

#### 4 控制试验结果验证

#### 4.1 路径强度对比

图 3 给出台风"烟花"在实况和 CTL 试验中路径、中心附近最低气压和最大风速的对 比情况。CTL 试验模拟的中心位置、移向和移速总体上与实况比较接近(图 3a)。台风"烟 花"在前 30 h 模拟和观测的路径基本吻合;移向变化也得到很好的模拟,台风中心在 20 日 14 时呈现出向西偏折,与实况移动特征一致;移速在模拟后期较实况偏快,路径因此也偏 西偏北 1°左右。强度模拟方面,CTL 试验的台风中心附近最大风速和最低气压的变化趋势 均与实况大致吻合(图 3b),整个过程的平均误差在 4 m s<sup>-1</sup>和 5 hPa 左右。南海台风"查帕 卡"本身环流较弱、移动不明显,模拟的强度和路径与实况基本吻合(图略)。此外,由于 模拟前 6 小时模式经历 spin up 过程,且 CTL 试验的路径在最后 12 小时偏西偏北较多,后 续研究仅关注 2021 年 7 月 19 日 14 时至 21 日 08 时段,也对应河南极端降水发生时段。





Fig. 3 (a) The track and (b) intensity of the observed (black line) and simulated (red lines for CTL and blue lines for NOCEM) results for Typhoon In-Fa. The minimum SLP (maximum wind) represents the TC intensity plotted by solid (dashed) line

#### 4.2 环流形势对比

通过对比不同时刻模拟区域内再分析数据和 CTL 试验的大尺度环流场及湿度场可知, 20日 08时(图 4a、b),再分析场的西太副高边缘(以 5880 gpm 为准)与台风"烟花"外 围环流相接; CTL 试验显示副高西侧边缘位于 118°E 左右,相对于观测略有西伸;位势高 度大值区范围也较观测稍有扩大。20日 20时(图 4c、d),再分析场的副高西伸增强,CTL 试验也有类似的特征,但模拟的副高系统在"烟花"西侧有小部分环流南落。此外,CTL 试验对于低纬的西南季风、台风"烟花"和副高之间的强东风气流、台风"查帕卡"的外围 环流以及大尺度的低层比湿分布给出了合理的模拟效果。



图 4 D01 区域(a、c)再分析数据和(b、d) CTL 试验的 850 hPa 风场(矢量,单位:ms<sup>-1</sup>)、比湿场(阴影,单位:g kg<sup>-1</sup>)和 500 hPa 位势高度场(等值线,单位:gpm)分布对比;红色和橙色台风标志表示台风"烟花"和"查帕卡"的中心位置;深蓝色多边形表示河南省省界;(a、b):20 日 08 时,(c、d):20 日 20 时;(b) 中深蓝色矩形表示 D02 模拟区域

Fig. 4 The 850 hPa winds (vector, units: m s<sup>-1</sup>), specific humidity (shaded, units: g kg<sup>-1</sup>) and 500 hPa geopotential height (contour, units: gpm) in (a, c) the reanalysis data and (b, d) the CTL experiment results over the domain 01. The red and orange typhoon symbols represent the averaged center position for Typhoon In-Fa and Cempaka, respectively. In-Fa The navy polygon represents the province boundary of Henan. (a, b): 0800 BTC 20, (c, d): 2000 BTC 20. And the region of the domain 02 is represented by the navy rectangle in (b)

#### 4.3 降水分布对比

图 5a 和 5b 分别给出实况和 CTL 试验在 19 日 14 时至 21 日 08 时累计降水分布情况。 实况和 CTL 试验的主要降水落区都位于河南中部及北部,呈现出南-北向降水分布型;累计 降水极大值出现在郑州站西侧,实况在此时段内的降水极值为 798 mm,模拟较实况仅偏强 5.6 mm。此外,实况显示累计降水超过 400 mm 的强降水区集中分布于省会郑州市在 CTL 试验中该强降水区不仅分布于郑州市,还分布于平顶山市的北部。结合河南强降水区逐三小 时累计降水的时间演变来看(图 5c),CTL 试验和实况降雨率的变化趋势基本一致,但降雨 量整体偏小。综上所述,CTL 试验对研究时段内台风的移动路径和强度、大尺度环流配置 和湿度场的演变、河南暴雨的强度和空间分布型特征都作出了较为合理的模拟,为进一步的敏感性试验分析奠定可靠的基础。



图 5 19 日 14 时至 21 日 08 时河南地区(a)实况和(b) CTL 试验累计降水分布,黑色三角形代表郑州站, 黑色点线矩形代表强降水区(111℃-115℃,33℃N-37℃N);(c)实况(黑色)和 CTL 试验(红色)河南强降 水区区域平均的逐三小时累计降水时间演变

Fig. 5 The accumulated precipitation distribution of (a) the observed and (b) CTL experiment from 1400 BTC 19 to 0800 UTC 21 over Henan, the black triangles represent the location of Zhengzhou station, the black dotted rectangle represents heavy rainfall area (111°E-115°E, 33°N-37°N); (c) the time series of the observed (black bar and line) and CTL experiment (red bar and line) for the every 3-hour accumulated precipitation averaged over heavy rainfall area of Henan

#### 5 敏感性试验结果分析

# 5.1 降水分布对比



水区研究时段内的区域平均累计降水强度由 CTL 试验的 108.14mm 降为 105.35mm; 原本位 于郑州市的强降水区明显减弱东移。其次, NOCEM (图 6b)与 CTL 试验结果相比,降水 分布型仍为南-北型,但平顶山市(太行山脉东麓迎风坡一侧)的降水强度下降(增强),总 体降水强度变化不大。最后,同时移除两个台风环流后(图 6c),主要降水落区集中在太行 山脉东麓,降水极值和平均降水强度都较 CTL 试验有所减弱。

经过后续对 NO2TCs 试验的大尺度环流场、水汽条件以及动、热力条件的多方面分析 发现(图略),在初始时刻同时移除两个台风后,河南地区主要受到副高、西南季风等大尺 度环流系统的影响。结合前人研究(苏爱芳等,2021;张霞等,2021),该组试验显示的河 南降水可能与地形条件及大尺度环流系统密切相关,而非单独移除两个台风后影响机制的线 性叠加,这与本研究所关心的台风对极端暴雨过程的影响机制不同。因此,接下来只针对单 独移除台风"烟花"和"查帕卡"的情况进行分析和讨论。



图 6 (a) NOINFA 试验、(b) NOCEM 试验和 (c) NO2TCs 试验的河南地区 42 小时累计降水分布图;累 计时间范围为 19 日 14 时至 21 日 08 时,黑色三角标志处为郑州站 Fig. 6 The simulated 42-h accumulated precipitation from (a) NOINFA experiment, (b) NOCEM experiment and (c) NO2TCs experiment over Henan. The time period ranges from 1400 BTC 19 to 0800 BTC 21. The black triangle symbols give the location of Zhengzhou station

#### 5.2 天气形势调整

如图 7 所示,相对于 CTL 试验(图 7a、b)而言,移除不同的台风自身环境场后,大 尺度环流场及其演变有不同程度的调整。在 NOINFA 试验中,20 日 08 时(图 7c),副高明 显南压(参考"烟花"北侧的 5880 gpm),台风"烟花"和北侧副高之间伸向河南的低空东 风急流被偏弱的东南风气流取代;同时,位于副高南侧的干冷气团向西移动减缓。20 日 20 时(图 7d),副高环流在 25°N 左右逐渐西伸,在河南东南侧表现为一条广阔的东南风急流 带,而河南南侧受南压副高的影响,偏南风减弱。由于台风"查帕卡"的环流尺度较小,因 此移除"查帕卡"后,一方面对大尺度环流形势的影响较小;另一方面对台风"烟花"的强 度和路径影响较小(图3蓝线),导致低纬西南季风和"烟花"外围环流的发展得以维持, 低空东风急流基本与 CTL 试验类似(图7e)。20日20时(图7f),副高和"烟花"共同向 西发展,两者之间的东风急流带依旧延伸进河南东部,但在河南南侧由于缺少"查帕卡"外 围环流的配合,偏南风气流较 CTL 试验略有减弱。整个过程中副高南侧的干冷空气几乎未 受影响。总之,移除台风"烟花"对河南降水区的天气形势产生了较大的影响,而移除台风 "查帕卡"对其产生的影响则较小。



图 7 (a, b) CTL 试验、(c, d) NOINFA 试验和 (e, f) NOCEM 试验的 850 hPa 风场 (矢量,单位: m s<sup>-1</sup>) 和相当位温场 (阴影,单位: K), 500 hPa 位势高度场 (等值线,单位: gpm); 绿色风矢量表示风速大于 9 m s<sup>-1</sup>; 深蓝色多边形和圆点表示河南省省界和郑州站位置; 左列; 20 日 08 时; 右列: 20 日 20 时 Fig. 7 The horizonal distribution of the 850 hPa wind fields (vector, units: m s<sup>-1</sup>), the equivalent potential temperature (shaded, units: K) and the 500 hPa geopotential height (contour, units: gpm) of the (a, b) CTL experiment, (c, d) NOINFA experiment and (e, f) NOCEM experiment. The green vectors give the wind speed large than 9 m s<sup>-1</sup>. The navy polygon and dot represent the province boundary lines of Henan and the position of Zhengzhou station. The left panel is for 0800 BTC 20 and the right panel is for 2000 BTC 20

#### 5.3 水汽输送条件

以往众多研究指出,海上台风在有利的环流形势发展下往往会通过持续的水汽输送给内陆地区带来显著的暴雨增幅(丁一汇等,1978,2015;孙建华等,2006;Wang et al.,2009)。 由前文的初步分析可知,移除台风环流后,与水汽输送密切相关的环流形势发生了不同程度的调整(图7),河南的降水分布和降水量相应地也有较大的改变(图5b和图6)。因此,本 小节将深入探讨移除台风环流之后,河南周围水汽通量输送的不同特征以及对降水强度和分 布造成的影响。

首先,通过 CTL 试验整层 (1000-450 hPa) 水汽通量积分、低层水汽通量散度可知(图 8),20日 08时,在低纬西南季风、南海台风"查帕卡"、西太台风"烟花"和副高系统的 共同引导下,河南东侧和南侧的水汽入流为河南地区提供了源源不断的水汽,加之局地辐合 条件的配合,有利于河南地区产生降雨(图 8a)。20日 20时(图 8b),随着"烟花"和副 高西移增强,它们之间的东风急流一部分向河南东侧输送水汽,另一部分沿副高西南边界转 为南风急流后向河南南侧输送水汽。此外,台风"查帕卡"的近海登陆也有利于河南南侧水 汽入流的增强。

移除"烟花"环流之后(图 8c),副高明显南压,南侧边界至 25°N 附近,低纬西南季 风和副高南侧的弱东南风继续为河南地区提供可观的水汽供应。随着副高西伸(图 8d),河 南东侧的水汽输送继续增强,在郑州南侧及太行山脉东侧有强烈的低层水汽通量辐合,有利 于 NOINFA 试验里河南强降水区呈东-西向分布的形成(图 6a)。移除环流尺度较小的台风 "查帕卡"之后(图 8e、f),对整体的环流场影响较小,在"烟花"和北侧副高系统的稳定 配合下,降水分布型与 CTL 试验相似。但是河南南侧的水汽流入略有减弱,因此 NOCEM 试验的累计降水量略小于 CTL 试验。





图 8 (a、b) CTL 试验、(c、d) NOINFA 试验和 (e、f) NOCEM 试验的整层 (1000-450 hPa) 水汽通量矢 量和大小 (矢量和阴影, 单位: 10<sup>2</sup> kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), 河南地区 800 hPa 水汽辐合 (粉色等值线; 从-40×10<sup>-7</sup> kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup>开始, 每 20×10<sup>-7</sup> kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup>递增) 以及副高位置 (5880 gpm 黑色等值线); 深蓝色多边形和圆 点表示河南省省界和郑州站位置; 左列: 20 日 08 时; 右列: 20 日 20 时; (a) 图中深蓝色虚线框 (ABCD 和 AEFG) 分别为下文研究所指的纬向和经向剖面区域

Fig. 8 The horizonal distribution of the deep-layer averaged (1000-450 hPa) water vapor flux vector and magnitude (vector and shaded, units:  $10^2$  kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), the position of subtropical high (black contours represent 5880 gpm) and the 800 hPa water vapor flux convergence zone at Henan (pink contours increase from  $-40 \times 10^{-7}$  kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup> with spacing of  $20 \times 10^{-7}$  kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup>) of the (a, b) CTL experiment, (c, d) NOINFA experiment and (e, f) NOCEM experiment. The left panel is for 0800 BTC 20 and the right panel is for 2000 BTC 20. The navy polygon and dot represent the province boundary lines of Henan and the position of Zhengzhou station. The navy dash boxes (ABCD and AEFG) in the (a) give the after-mentioned cross sections

接下来选取图 8a 中纬向(ABCD)和经向(AEFG)的水汽输送通道作为剖面,进一步 探讨台风"烟花"和"查帕卡"对河南强降水区水汽输送的贡献。由 CTL 试验的纬向剖面 可知,20日 08时(图 9a),水汽在深厚的偏东风气流的引导下自东向西输送,至125°E 左 右转为东南气流后向河南地区输送。河南强降水区呈现出强烈的辐合,促进上升运动的发展 和大气不稳定能量的聚集,加之水汽条件充沛,有利于降水的产生。20日 20时(图 9d), 河南强降水区低层的水汽通量值明显增加,配合上升运动的发展,维持着有利于降水产生的 条件。相较于 CTL 试验而言,移除"烟花"环流后(图 9b、e),副高西伸南压,河南强降水 区东侧上空主要为东南气流,且强度减弱。差值场(图 9c、f)的结果显示,河南强降水区 东侧的水汽通量值有所增加,这是因为虽然台风"烟花"被移除,但是来自热带的暖湿水汽 仍会受南压副高的影响向河南强降水区补给水汽,部分地弥补了因移除"烟花"而减少的水 汽输送,所以 NOINFA 试验中河南降水总量虽有减弱但并不十分显著。此外,降雨区范围 内存在一定程度的散度正异常和北风、东风异常相配合,一方面表征着 NOINFA 试验低层 辐合有所削弱,从而造成降水强度不及 CTL 试验;另一方面表征河南地区 700 hPa 以下的 南风分量减小、东风分量增强,有利于降水分布型由南-北向转变为东-西向。

由 CTL 试验的经向剖面可知 (图 9g、j),大量水汽主要是通过低层偏南风气流和偏东 风气流向河南强降水区输送,并在 35°N 附近产生强辐合并在对流层中低层堆积,这是造成 以郑州市为中心持续性暴雨发生的原因之一。移除"烟花"环流后 (图 9h、k),河南强降 水区及其南侧南风分量减弱、东风分量增强,差值场 (图 9i、1)更加明显地反映了以上的 变化特征。总的来说,移除"烟花"环流后,纬向和经向水汽输送通道都会对河南强降水区 产生影响,主要表现为南风分量减弱,东风分量增强,降水分布由南-北向转变为东-西向。 差值场 (图 9i、1)显示河南强降水区北部的的水汽通量存在明显的正差值,这与这两个时 刻受到较强的来自热带地区的暖湿水汽的补给有关,但是正的水汽通量差值区基本对应着辐 合减弱,因此这些区域并不十分利于强降水的发生发展。

移除"查帕卡"环流之后,NOCEM 试验纬向剖面(图 10a、c)的水汽通量值和 CTL 试验(图 9a、d)基本一致;河南强降水区的南风和低层辐合略有减弱(图 10b、d),但不 及 NOINFA 试验(图 9c、f)带来的影响,对降水强度和分布的影响较小。NOCEM 试验的 经向剖面(图 10e、g)的特征主要表现为河南强降水区水汽通量值减弱和南风分量减弱。 总的来说,台风"查帕卡"主要通过向河南强降水区南侧输送水汽从而对本次暴雨过程产生 影响,但是影响程度较弱,且对降水分布型影响不大。







图 9 垂直水汽通量值(阴影,单位:g s<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>hPa<sup>-1</sup>)和散度(红色等值线表示辐散,从2×10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>开始,每4×10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>递增;蓝色等值线表示辐合,从-2×10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>开始,每4×10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>递减)的高度-纬向/经向分布;(a-f)表示对ABCD面进行经向平均后得到的纬向剖面;(a-c):20日08时,(d-f):20日20时;(a、d)为CTL试验,(b、e)为NOINFA试验,(c、f)为NOINFA试验与CTL试验的差值场。(g-1)类似于(a-f),但是为对AEFG面进行纬向平均后得到的高度-经向分布;风矢量表示水平风场随高度的分布(单位:m s<sup>-1</sup>),绿色矩形表示河南强降水区(111°E-115°E, 33°N-37°N)

Fig.9 Height-zonal/meridional distribution of vertical water vapor flux magnitude (shaded, units: g s<sup>-1</sup>cm<sup>-1</sup>hPa<sup>-1</sup>), divergence (the red contours represent divergence, which increase from  $2 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> with spacing of  $4 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>; the blue contours represent convergence, which decrease from  $-2 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup> with spacing of  $4 \times 10^{-5}$  s<sup>-1</sup>; (a-f) represent the zonal profile after meridional averaging of ABCD, (a-c): 0800 BTC 20, (d-f): 2000 BTC 20, (a, d) represent CTL experiment, (b, e) represent NOINFA experiment, (c, f) represent the difference between NOINFA experiment and CTL experiment; (g-l) are the same as (a-f), but for the height-meridional distribution after zonal averaging of

AEFG. The wind vectors represent the distribution of horizontal winds with height (units: m s<sup>-1</sup>), the green rectangles represent the heavy rainfull area of Henan (111°E-115°E, 33°N-37°N)



为了进一步定量比较不同试验中到达河南强降水区各侧面的水汽收支情况,图 11 分别给出了河南东、南、西、北四个侧面平均的整层水汽通量值以及净水汽收支的时间演变。其

中,东面和南面为河南强降水区的水汽流入的通道,两者的水汽输送大部分时间维持在较强的 10×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>~20×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup> (图 11 a、b)。对于 NOINFA 试验而言,20 日 12 时之前从河 南地区南侧流入的水汽通量值始终比 CTL 少 1×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>~3×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>,这与移除"烟花"后,河南强降水区南风减弱有关;20 日 12 时左右,NOINFA 试验的河南强降水区东侧水汽入流 超过 CTL 试验,东面入流的增强与主要水汽输送通道及强降水区呈东-西向分布的特征相对 应。NOCEM 试验的结果显示,来自东面和南面的平均水汽通量值都略小于 CTL 试验,这 说明移除"查帕卡"环流对河南强降水区的水汽供应变化影响较小,与前文的累计降水分布 特征 (图 6b)保持一致。

相反地,河南强降水区的西面和北面则为水汽的流出边界(图11 c、d),两侧的平均水 汽通量值呈现出不同的时间演变特征。20日 20时之前以降水区西面流出为主,基本保持 10<sup>8</sup> kg s<sup>-1</sup>以上的水汽流出,最大的平均水汽通量值约-18×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup>,北面的水汽输送贡献在该 阶段较西面偏弱 50%左右。此后,强降水区北面的水汽流出显著增强,而西边界的贡献逐 渐减弱。

最后,结合河南强降水区净水汽通量差值的演变来看(图 11e),NOINFA 试验和 NOCEM 试验相对于 CTL 试验而言水汽通量值都有所减弱,但是 NOINFA 试验水汽通量值的减弱量 相对于 NOCEM 试验更大一些,Nie and Sun (2022)的研究表明副高和台风"烟花"之间的水 汽输送对本次降水过程具有重要影响,这与本文的研究结果相符。。在本次极端暴雨事件小时降水极值发生(20日17时)之前,NOINFA 试验和 NOCEM 试验的水汽净流入量相对于 CTL 试验而言平均每小时低 2×10<sup>7</sup> kg s<sup>-1</sup> 左右,这不利于局地水汽含量的快速累积,这说明 最强降水时段的降水强度与近海台风环流有一定的联系。









Fig.11 The time series of 1000-450 hPa vertical integral of water vapor flux magnitude for Henan from (a) east side, (b) south side, (c) west side, (d) north side and (e) net water vapor flux difference magnitude

图 12 进一步展示了三组试验中河南强降水地区四个侧面在研究时段内时间平均的水汽 收支情况。首先,从净水汽通量值来看,相较于 CTL 试验,NOINFA 试验的净水汽通量值 减少了 5.81%,而 NOCEM 试验仅减少了 3.23%。其次,相较于 CTL 试验而言,当移除"烟 花"后,主要表现为南、西(北、东)面的水汽流入减弱(增强),上述特征的差异较好地 解释了 NOINFA 试验中河南地区累计降水分布型呈东-西向延伸的情况。NOCEM 试验的结 果显示,移除"查帕卡"环流后,河南强降水区南面和北面水汽通量的流入和流出量均减少, 这与南风分量的减弱有关(图 8e、f),但是四个侧面的水汽通量值较小,且净水汽通量值变 化较小,因此 NOCEM 试验降水分布和强度的变化也较小。



图 12 河南强降水区 1000-450 hPa 四面水汽通量值垂直积分的时间平均;黑色矩形代表强降水区 (111°E-115°E, 33°N-37°N);时段为 19 日 14 时至 21 日 08 时;黑色、蓝色和红色箭头分别表示 CTL 试验、 NOINFA 试验和 NOCEM 试验

Fig.12 The time average of 1000-450 hPa vertical integral of water vapor flux magnitude for Henan; the black rectangle represents heavy rainfall area (111°E-115°E, 33°N-37°N); the time from 1400 BTC 19 to 0800 BTC 21; black, blue and red arrows represent CTL experiment, NOINFA experiment and NOCEM experiment

## 5.4 热力条件

姚秀萍和于玉斌(2005)的研究指出,干冷空气和暖湿空气在江淮流域的对峙导致了局 地的持续性暴雨。孙建华等(2006)的工作主要讨论"9608"号台风因受高压阻挡停滞,从 而引起弱冷空气入侵,为局地中尺度对流系统的建立提供有利条件,最终对北方特大暴雨过 程产生重要影响。在本次河南极端暴雨过程中,同样存在冷暖气团在低层风场的引导下随时 间移动形成对峙的现象,一定程度上增强了河南强降水区对流不稳定条件。

前文的分析显示台风"烟花"与北侧副高系统在 30°N 附近形成了强烈的偏东风急流, 该东风急流对副高南侧低层干冷气团的西移有重要贡献(图 7)。因此,本文对研究时段内 图 8a 所示的 ABCD 面范围内的相当位温和水平风场进行经向平均,从而得到相应的时间-纬向分布特征。如图 13a 所示, CTL 试验中干冷气团沿着该东风气流向河南强降水区输送, 至河南强降水区附近转为偏南气流并与该区域的暖湿空气形成对峙。20 日 00 时之后,河南 强降水区的冷暖气团出现对峙,且河南相当位温梯度逐渐增强,有利于局地的热力不稳定性 的维持和加强进一步有利于强降水的发生发展。当移除台风"烟花"环流后(图 13b),东 风分量减弱,冷气团西移减慢。20日17时左右河南强降水区才开始出现较明显的冷暖气团 对峙现象,且冷暖气团的强度和相当位温梯度均弱于 CTL 试验,局地不稳定条件较差,不 利于强降水的形成,从而导致 NOINFA 试验中河南地区降雨强度减弱。从相当位温的垂直 分布来看,CTL 试验在河南地区相当位温的垂直梯度大于 NOINFA 试验,进一步说明了 CTL 试验中河南强降水区的对流不稳定性更强,有利于强降水的发生(图略)。移除台风"查帕 卡"后干冷气团的移动几乎不受影响,河南强降水区的局地热力条件也未发生明显变化(图



图 13 (a) CTL 试验和 (b) NOINFA 试验 850 hPa 相当位温(阴影,单位: K) 和风场(矢量,单位: m s<sup>-1</sup>) 的时间-纬向演变;对 ABCD 面进行经向平均后得到的纬向分布,绿色矩形表示河南强降水区(111°E-115°E, 33°N-37°N)

Fig.13 Time-zonal evolution of equivalent potential temperature (shaded, units: K) and wind (vector, units: m s<sup>-1</sup>) for (a) CTL experiment and (b) NOINFA experiment at 850 hPa; the zonal distribution after meridional averaging of ABCD, the green rectangles represent the heavy rainfull area of Henan (111°E-115°E, 33°N-37°N)

## 6 结论与讨论

本文利用 WRF (V3.6.1) 模式,对近海台风"烟花"及"查帕卡"影响 2021 年 7 月 19 日 08 时至 21 日 20 时河南极端暴雨的过程进行数值模拟。分别设计了移除台风"烟花"和 "查帕卡"的敏感性试验来探讨它们在"21·7"河南极端暴雨事件中对水汽输送以及热、动 力条件方面的贡献,从而揭示近海台风对极端暴雨发生发展的影响机制。

CTL 试验对研究时段内台风"烟花"的移动路径和强度、大尺度环流配置和湿度场的 演变、河南暴雨的强度和空间分布型特征都作出了较为合理的模拟,基本再现了本次河南极 端暴雨过程。本次暴雨过程的概念模型如图 14 所示, 19 日 14 时-21 日 08 时,伴随着西太 台风"烟花"缓慢西移增强、副高环流西伸以及南海台风"查帕卡"近海登陆,低纬的暖湿 水汽在低层东风急流和偏南风急流的共同作用下持续地向河南地区输送,大量水汽堆积并伴 随着强烈的低层水汽通量辐合;同时,河南东侧不断有干冷气团入侵,水平位温梯度增大, 大气不稳定能量增强,在上述有利的大气环流背景下,河南中部及北部经历了连续的强降水 过程,并呈现南-北向分布特征。



图 14 "21·7"河南极端暴雨事件过程概念模型; "SH"表示西太平洋副热带高压,两个台风标志分别表示 台风"烟花"(In-Fa)和台风"查帕卡"(Cempaka),浅蓝色箭头表示水汽通量,蓝色和红色的云团分别代 表冷气团和暖气团,多边形表示河南省省界,深蓝色的向上箭头代表上升运动

移除台风"烟花"后,西太副高西伸南压,东南风急流沿副高南侧输送水汽至河南地区, 与 CTL 试验相比,河南强降水区的南风减弱、东风增强,东西方向的水汽通量流入流出占 主导,有利于降水分布型由南-北向转变为东-西向。另一方面,由于东南风急流相较于移除 "烟花"前减弱,河南强降水区局地辐合减弱;副高南侧的冷气团西移减慢,局地相当位温 梯度减弱;净水汽通量流入较 CTL 试验降低了 5.81%,降雨强度减弱。但西伸南压的副高 仍可以将暖湿水汽向河南强降水区输送,部分地弥补了因移除"烟花"而减少的水汽输送, 所以 NOINFA 试验中河南降水总量虽有减弱但并不十分显著。 移除环流尺度较小的台风"查帕卡"后,低层偏南风急流略有减弱,而对于西太副高和 台风"烟花"等大尺度环流系统几乎未受影响,水汽输送和低层水汽辐合特征都与 CTL 试 验类似。因此,河南累计降水量略有降低,降水分布型基本不变。与台风"烟花"相比,"查 帕卡"对本次"21.7"河南极端暴雨事件的影响偏弱。

本文的研究结果表明,当海上台风与副高之间产生强烈的相互作用,形成明显的水汽输送通道后,可能会导致内陆地区产生强降水。此外,低空急流的走向对降水的空间分布具有 一定的指示作用。应该指出,本次"21.7"河南极端暴雨事件是多尺度天气系统共同作用的 结果,而本文仅从近海台风环流的角度进行模拟分析,其它系统的影响有待未来进一步研究。

# 参考文献(References)

- Arakane S and Hsu H H. 2020. A tropical cyclone removal technique based on potential vorticity inversion to better quantify tropical cyclone contribution to the background circulation [J]. Climate Dyn., 54(5-6): 3201-3226. doi:10.1007/s00382-020-05165-x.
- Bosart L F and Carr F H. 1978. A case study of excessive rainfall centered around Wellsville, New York, 20-21June1972[J].Mon.Wea.Rev.,106(3):348-362.https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106<0348:ACSOER>2.0.CO;2
- Chen, G H. 2013. A numerical study on the effect of an extratropical cyclone on the evolution of a midlatitude front [J]. Adv. Atmo. Sci., 30(5): 1433-1448. doi: 10.1007/s00376-012-2191-8.
- 陈淑琴, 李英, 范悦敏, 等. 2021. 台风"山竹" (2018) 远距离暴雨的成因分析 [J]. 大气科学, 45(3): 573-587. Chen Shuqin, Li Ying, Fan Yuemin, et al. 2021. Analysis of Long-Distance Heavy Rainfall Caused by Typhoon Mangosteen (2018) [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 573-587. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.20126.
- 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 case study on the excessively severe rainstrom in Henan Province, early in August, 1975 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2(4): 276-289. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1978.04.02
- 丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题 [J]. 气象学报, 52(3): 274-284. Ding Yihui. 1994. Some aspects of rainstorm and mesoscale meteorology [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52(3): 274-284. doi:10.11676/qxxb1994.036
- 丁一汇. 2015. 论河南"75.8"特大暴雨的研究: 回顾与评述 [J]. 气象学报, 73(3): 411-424. Ding Yihui. 2015. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4-8 August 1975: Review and assessment [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(3): 411-424. doi:10.11676/qxxb2015.067
- 高守亭,赵思雄,周晓平,等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展 [J]. 大气科学, 27(4): 618-627. Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al., 2003. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(4): 618-627. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2003.04.13.
- Kurihara Y, Bender M A and Ross R J. 1993. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification

   [J].
   Mon.
   Wea.
   Rev.,
   121(7):
   2030-2045.

   https://doi.org/10.1175/1520-0493(1993)121<2030:AISOHM>2.0.CO;2

- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E. 1995. Improvements in the GFDL hurricane prediction system [J]. Mon. Wea. Rev., 123(9): 2791-2801. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<2791:IITGHP>2.0.CO;2
- 李泽椿, 谌芸, 张芳华, 等. 2015. 由河南"75.8"特大暴雨引发的思考 [J]. 气象与环境科学, 38(3): 1-12. Li Zechun, Chen Yun, Zhang Fanghua, et al. 2015. Consideration by "75.8" extreme heavy rainfall event in Henan [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 38(3): 1-12. doi:10.3969/j.issn.1673-7148.2015.03.001
- Lonfat M, Rogers R, Marchok T and Marks F D Jr. 2007. A Parametric Model for Predicting Hurricane Rainfall [J]. Mon. Wea. Rev., 135(9): 3086-3097. https://doi.org/10.1175/MWR3433.1.
- McFarquhar, Greg M, Jewett. 2012. Vertical Velocity and Microphysical Distributions Related to Rapid Intensification in a Simulation of Hurricane Dennis (2005) [J]. J. Atmos. Sci., 69(12): 1520-0469. https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-016.1
- Nie Y B and Sun J Q. 2022. Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021. Geophys. Res. Lett., 49(4), e2021GL097446. https://doi.org/10.1029/2021GL09744
- 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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160
- 任素玲, 刘屹岷, 吴国雄. 2007. 西太平洋副热带高压和台风相互作用的数值试验研究 [J]. 气象学报, 65(3): 329-340. Ren Suling, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2007. Interactions between typhoon and subtropical anticyclone over western pacific revealed by numerical experiments. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65(3): 329-340. doi:10.11676/qxxb2007.032.
- Ross R J and Kurihara Y. 1995. A numerical study on influences of Hurricane Gloria (1985) on the environment [J]. Mon. Wea. Rev., 123(2): 332–346. https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<0332:ANSOIO>2.0.CO;2
- Schumacher R S, Galarneau T J Jr, and Bosart L F. 2011. Distant effects of a recurving tropical cyclone on rainfall in a midlatitude convective system: A high-impact predecessor rain event [J]. Mon. Wea. Rev., 139(2): 650–667. https://doi.org/10.1175/2010MWR3453.1
- Schumacher R S, Thomas J, Galarneau Jr. 2012. Moisture transport into midlatitudes ahead of recurving tropical cyclones and its relevance in two predecessor rain events [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (6): 1810-1827. https://doi.org/10.1175/MWR-D-11-00307.1
- 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, Lv 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. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.001
- 孙建华,齐琳琳,赵思雄. 2006. "9608"号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究 [J]. 气象 学报, 64 (1): 57-71. Sun Jian hua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2006. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by "9608" typhoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (1): 57-71. doi: 10. 3321/j. issn: 0577-6619. 2006. 01. 006.
- 孙建华,张小玲,卫捷,等. 2005. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10(3): 492-506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research, (in Chinese), 10(3): 492-506. doi:10.3969/j.issn.1006- 9585.2005.03.020.

- Sun X and Barros A P. 2012. The impact of forcing dataset on the high resolution simulation of tropical storm Ivan (2004) in the southern Appalachians [J]. Mon. Wea. Rev., 140(10): 3300-3326, doi:10.1175/MWR-D-11-00345.1.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 225.
- Takahashi T and Kawano T. 1998. Numerical sensitivity study of rainband precipitation and evolution [J]. J. Atmo. Sci., 55(1): 57–87. https://doi.org/10.1175/1520-0469(1998)055<0057:NSSORP>2.0.CO;2
- Wang Y Q, Wang Y Q, Hironori Fudeyasu. 2009. The role of typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan [J]. Mon. Wea. Rev., 137(11): 3699-3716. https://doi.org/10.1175/2009MWR2933.1
- Wen Y R, Xue L, Li Y, Wei N, and Lu A M. 2015. Interaction between typhoon Vicente (1208) and the Western Pacific subtropical high during the Beijing extreme rainfall of 21 July 2012 [J]. J. Meteor. Res., 29(2): 293-304. doi: 10.1007/s13351-015-4097-8.
- 姚秀萍, 于玉斌. 2005. 2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用 [J]. 大气科学, 29(6): 973-985. Yao Xiuping, Yu Yubin. 2005. Activity of dry cold air and its impacts on Meiyu rain during 2003 Meiyu period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29(6): 973-985. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.06.13
- 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. Zhang Xia, Yang Hui, Wang Xinmin, et al. 2021. Analysis on characteristic and abnormality of atmospheric circulations of the July 2021 extreme precipitation in Henan [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 672-687. doi: 10.13878 /j.cnki.dqkxxb.20210907001.
- Zhang S H, Chen Y R X, Luo Y L, et al. 2022. Revealing the circulation pattern most conducive to precipitation extremes in Henan Province of North China. Geophys. Res. Lett., 49(7), e2022GL098034. https://doi.org/10.1029/2022GL098034
- 赵培娟, 邵宇翔, 张霞. 2019. 相似路径台风"摩羯""温比亚"登陆后环境场对比分析 [J]. 气象与环境科学, 42(3): 17-28. Zhao Peijuan, Shao Yuxiang, Zhang Xia. 2019. Comparative analysis of the after landed environmental field of the similar track typhoons yagi and rumbia [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 42(3): 17-28. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.03.003.
- 赵思雄, 孙建华. 2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 297-312. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2013. Study on the mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 297-312, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12317
- "58.7"暴雨研究组. 1987. 黄河中游"58.7"大暴雨成因的天气学分析 [J]. 大气科学, 11(1): 100-107. Research Group of "58.7" Heavy Rainfall. 1987. A synoptic study of the "58.7" persistent rainstorm over the middle Huanghe (yellow) River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 11(1): 100-107. doi: CNKI:SUN:DQXK.0.1987-01-010
- "75.8"暴雨会战组. 1977a. 河南"75.8"特大暴雨成因的初步分析(一)[J]. 气象, 3(7): 3-5. "75.8" Rainstorm Battle Group, 1977a. Preliminary analysis on the formation of "75.8" torrential rain in Henan(I) [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 3(7): 3-5. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.1977.7.002
- "75.8"暴雨会战组, 1977b. 河南"75.8"特大暴雨成因的初步分析(二)[J]. 气象, 3(7): 6-8. "75.8" Rainstorm Battle Group, 1977b. Preliminary analysis on the formation of "75.8" torrential rain in Henan(II)[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 3(7): 6-8. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.1977.7.003