

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.002

模拟启动时间和双台风对“21.7”河南极端暴雨事件的影响研究

张心怡¹, 张 熠^{1*}, 刘昊炎², 王其伟¹, 王 迪³

(1. 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210093;

2. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 河海大学海洋学院, 南京, 210098;

3. 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点实验室, 河南省气象台, 郑州, 450003)

摘 要: 对发生在 2021 年 7 月 18 日至 21 日的河南极端暴雨事件(“21.7”河南暴雨)进行集合模拟数值试验, 旨在探究模拟启动时间以及台风“烟花”和“查帕卡”对此暴雨事件的影响。不同模拟启动时间的试验组分析表明, 在降水峰值发生前 24 h 启动的一组试验能够最准确地模拟双台风的路径和强度演变特征, 其再现了“21.7”河南暴雨中心位置、强度及时间演变特征, 这主要是由于该试验很好地再现了低层东南风急流及其动力辐合特征, 基于此最优试验移除台风环流后, 副热带高压西伸南压且水汽输送路径随之发生调整。通过定量分析降水关键区的整层水汽通量发现, 在降水最大峰值出现的时段内, 台风“烟花”和“查帕卡”分别削弱了东南风和偏南风的水汽输送, 表明台风的存在对降水的影响存在不确定性, 某些时段内反而减缓了河南地区的极端降水。

关键词: “21.7”河南暴雨, 水汽输送, 台风“烟花”(2021), 模拟启动时间

中图分类号: P445

文献标志码: A

Study on the impacts of simulation start time and binary typhoons on the "21.7" Henan extreme rainfall event

Zhang Xinyi¹, Zhang Yi^{1*}, Liu Haoyan², Wang Qiwei¹, Wang Di³

(1. Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather of Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences,

Nanjing University, Nanjing, 210093, China; 2. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting,

Ministry of Natural Resources, College of Oceanography, Hohai University, Nanjing, 210098, China;

3. Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou, 450003, China)

Abstract: This study utilized the WRF model to conduct ensemble experiments on the Henan record-breaking rainfall event that occurred from July 18th to 21st, 2021 ("21.7" Henan rainfall event), aiming to explore the impact of the simulation start time and typhoons "In-fa" and "Cempaka" on this precipitation event. Analysis of different experimental groups with varying simulated initial times showed that the experiment initiated 24 hours before the peak precipitation occurred could most accurately simulate the path and intensity evolution characteristics of the two typhoons, as well as reproduce the center position, intensity, and temporal evolution characteristics of the "21.7" Henan rainfall event. This is mainly because this experiment well reproduced the low-level southeasterly jet and its dynamic convergence characteristics. Based on this optimal experiment, after removing the typhoon circulation, the subtropical high extended westward and southward, with the water

基金项目: 国家自然科学基金(42192555, 41775057)

收稿日期: 2024-02-01

* 通讯联系人, E-mail: yizhang@nju.edu.cn

vapor transport path adjusting accordingly. Through quantitative analysis of the vertically integrated water vapor transport in the key precipitation area, it was found that during the time period when the maximum peak of precipitation occurred, typhoons "In-fa" and "Cempaka" weakened the water vapor transport of southeasterly and southerly flows, indicating that the existence of the two typhoons had an uncertain impact on precipitation, and in certain periods, they even reduced the extreme precipitation in Henan region.

Key words: "21.7" Henan rainfall event, water vapor transport, typhoon "In-fa" (2021), simulation start time

每年夏季,西太平洋副热带高压(简称副高)的北跳使华北地区成为中国暴雨集中分布区之一。河南省呈西高东低地势,下垫面地形种类包含盆地、山地、丘陵等,暴雨的形成机理非常复杂,可能同时涉及中尺度系统的活动、地形抬升以及中低纬天气尺度系统的相互作用^[1-3]。2021年7月17日至22日,河南省经历了一场罕见的极端强降水事件(简称“21.7”河南暴雨),特别是在7月20日,郑州市记录了624.1 mm的日降水量,接近该市640.8 mm的年降水量^[4]。这场暴雨的突发性、极端性以及现有数值模式在模拟和预报极端降水事件方面的局限性,都极大地增加了预测的难度^[5]。因此,深入理解河南极端暴雨的成因,对于提高我国华北地区天气预报的准确性及加强灾害防控措施具有重大意义。

“21.7”河南暴雨发生后引起极大关注,研究者从不同的角度分别对此过程开展了研究^[4]。研究指出,这一特殊且极端的强降水事件涉及多个中低纬度天气系统,包括中尺度低压、高空和低空急流、双台风以及副高等,这些因素与河南地形特征相互作用共同促成了暴雨的发生^[4-6],多尺度系统间复杂的相互作用导致此次事件的可预报性较低^[7]。最大降雨中心的强度和位置则与中尺度天气系统紧密相关,郑州市创纪录的极端小时降水源于两次对流系统的合并,并在市区上空停留超过两小时^[8]。中尺度低压东侧的南风、郑州北部太行山的阻挡急流和下坡重力流三者共同作用导致暴雨发生区域稳定少动。此外,城市化导致郑州降水减少,这主要是由于郑州市上游城市的蒸发有限和建筑物屏风效应,减少了河南省南部和东部的水汽入流^[9]。

关于双台风“烟花”和“查帕卡”对此次暴雨过程的影响研究表明,台风“烟花”北侧的东南风和“查帕卡”东侧的偏南风分别将西北太平洋和南海

中丰富的水汽输送至河南降水区^[10-11],这些水汽和能量的持续供应是导致此次重大降水事件发生的关键因素之一^[12]。Deng et al^[10]的试验结果显示,去除这两个台风会导致目标区域水汽通量的辐合减少,从而减少累积降水量。Yu et al^[13]的研究表明,台风“烟花”的存在使东南风将大量水汽输送至河南地区,且河南地区的水汽平流量是本地水汽供应的九倍,水汽有效转化为云并增强了降水。Rao et al^[14]通过增强或减弱副高和台风“烟花”强度的敏感性试验,发现“烟花”对降水的作用更关键。Tang et al^[15]也认为,台风“烟花”主导了主要的水汽输送,并直接影响了当地的水汽供给。然而,Liu et al^[16]研究认为,台风“查帕卡”作为低压系统,减少了它与降水区之间的气压梯度,从而减弱了西南气流和降水,而台风“烟花”对降水的具体影响尚不明确。Xu et al^[17]的研究发现,台风“烟花”和“查帕卡”的相互作用导致东北气流增强,导致南风减弱和降水量下降。以上研究表明,双台风在“21.7”河南暴雨事件中的作用仍没有定论。

极端天气的发生是小概率事件,其发生发展存在很大的不确定性^[18-21],用数值模式对其进行单一初值的确定性预报客观上缺乏合理性,也无法达到预期的预报效果。此外,极端天气具有样本少和不连续的特点,对此类天气事件进行机理分析时缺乏高质量、高时空分辨率的长序列资料^[19]。为此,基于集合的模拟试验能够提高对极端信息进行提取和检验的可能性。目前关于“21.7”河南暴雨极端天气事件的部分研究工作也开展了集合预报试验,具体做法包括多物理模型、多初值扰动、多边界条件、多参数化方案等,但以上工作较少关注模拟启动时间对于预报结果的影响,由于大气的混沌特性,模拟启动的初始时间也是影响预报结果的重要原因,不同启动时间代

表不同的初始气象条件,这可能导致模型在预测天气事件的时间、位置和强度方面出现差异。

综上,尽管对于“21.7”河南暴雨事件已有大量研究,但当此类极端天气事件再次出现时,是否能对其作出准确预报目前仍然存在很多未知之处,可将此次极端强降水事件作为试验场,通过开展大量的集合预报试验对其继续开展深入研究,加深对该过程的认识。本文运用中尺度数值模式 WRF (Weather Research and Forecasting model) 对“21.7”河南暴雨过程进行集合预报试验,分别针对模拟启动时间如何影响模拟降水以及双台风“烟花”和“查帕卡”如何传输水汽影响降水过程开展敏感性试验和机理分析。

1 数据、方法和试验设计

1.1 数据集和降水检验方法 本研究主要使用三种类型的数据。首先,诊断分析所用数据来源为欧洲中期天气预报中心的第五代大气再分析资料 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis V5, ERA5), 该资料具有 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平分辨率,时间分辨率为每小时一次,垂直方向包括 37 层。其次,观测降水数据采用 CMORPH (CPC MORPHing Technique) 融合小时降水数据集,分辨率为 0.05° ,该数据用以评估数值模拟的降水准确性。台风“烟花”和“查帕卡”的观测数据来自中国气象局热带气旋资料中心^[22-23]提供的台风最佳路径资料。

在验证数值模式模拟降水的准确性时,本研究采用风险评分 (Threat Score, TS)^[24] 作为评价指标。利用线性插值技术,将观测的降水数据插值至模拟结果中计算 TS 评分,计算公式为:

$$TS = \frac{TP}{TP + FP + TN}$$

TS 评分范围在 0 到 1 之间,分值越高表示模拟效果越好。以 50 mm 的降水阈值为例,式中 TP (True Positive) 表示在模拟和观测中降水量均大于 50 mm 的格点数,FP (False Positive) 表示仅在模拟中成功预测降水量大于 50 mm 的格点数,而 TN (True Negative) 表示仅在观测中降水量大于 50 mm 的格点数。

1.2 模拟试验设计 本研究使用 Liu et al^[16] 集合

模拟部分试验的结果。该模拟采用 WRF 模式 V3.8.1 版本^[25],模拟时段为 2021 年 7 月 18 日 00 时至 21 日 00 时。模拟采用双层嵌套网格,其中,外层网格 (D01) 的分辨率为 9 km,覆盖了与“21.7”河南暴雨相关的主要大尺度系统发展区域 (图 1a),对应格点数为 861×601 ;内层网格 (D02) 的分辨率为 3 km,以河南省为中心,面积约为河南省的九倍,对应格点数为 451×451 。模型在垂直方向上设置 50 个层次,最高层达到 30 hPa,且有 11 层位于 3 km 以下。模拟采用的参数化方案包括 Thompson graupel 微物理方案^[26]、RRTMG 长短波方案^[27]、ACM2 边界层方案^[28]、Pleim-Xiu 陆面过程^[29]和近地面方案^[30-31]。此外,Kain-Fritsch 积云参数化方案^[32]仅在 D01 中应用。每三小时利用 ERA5 数据将所有试验的边界条件更新一次,海面温度从 ERA5 数据中插值得到,并在所有试验中保持固定。

试验的具体设置详见表 1,模拟方案的设计围绕模拟启动时间的影响和双台风的影响两大组开展。控制试验 (Control Experiment, 记为 CTL) 从 2021 年 7 月 18 日 00 时 (命名为 1800) 启动,模拟结束于 2021 年 7 月 21 日 00 时。为了分析模拟启动时间的影响,针对 CTL 进行 1806, 1812, 1818, 1900 启动的敏感试验。为了分析台风“烟花”和“查帕卡”对降水的影响,以模拟启动试验组模拟降水结果最好的试验为控制试验,在初始条件中分别人为去除了台风“烟花” (记为 RM_IN-FA)、“查帕卡” (记为 RM_CEM) 以及同时去除“烟花”和“查帕卡” (记为 RM_BTC) 中心半径 900 km 范围内的涡旋成分,包括风、气压、温度和水汽。涡旋的去除方法参见 Liu et al^[16] 的研究。本文利用以上八个试验的结果进行分析。

图 1 展示了 CTL 在不同时刻启动模拟得到的台风“烟花”和“查帕卡”的轨迹以及最低海平面气压的演变。由图 1a 可见,模拟的“烟花”和“查帕卡”轨迹总体上略偏北,但所有试验中台风向西北方向行进的趋势与观测一致,模式启动时刻为 19 日 00 时 (记为 CTL1900) 的模拟中台风“烟花”的模拟路径与观测路径变化趋势最接近,二者之间的偏差约为 50 km,台风“查帕卡”模拟路径几乎与观测路径一致,仅在登陆前后偏差增大。图 1b

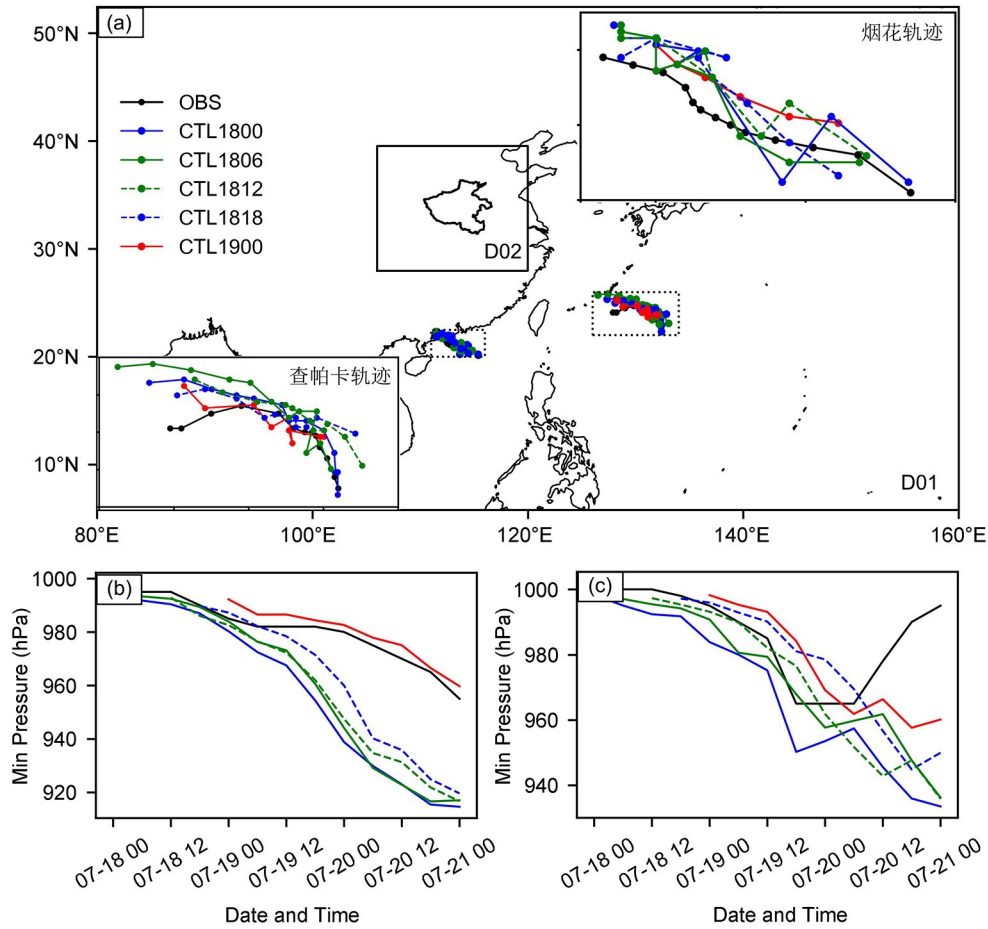


图1 (a)模拟试验区域,图中同时放大展示了台风“烟花”和“查帕卡”的路径轨迹,黑色点线为2021年7月18日00时至21日00时观测的台风路径,其他颜色的点线分别对应于CTL不同模式启动时刻的轨迹,相应的最低海平面气压(单位:hPa)演变分别显示在(b)“烟花”和(c)“查帕卡”

Fig. 1 Domains for numerical simulations,the map also magnifies to show the paths of Typhoons "In-Fa" and "Cempaka"; The black lines represent the observed typhoon paths from 00:00 UTC 18 July to 00:00 UTC 21 July, 2021, while the lines in other colors correspond to the trajectories at different starting times of the CTL experiments; The evolution of the lowest sea-level pressure (unit: hPa) for (b) Typhoon "In-Fa" and (c) Typhoon "Cempaka"

表1 数值模式试验方案

Table 1 Lists of experiments

台风试验组	CTL	对ERA5数据插值得到初始条件
	RM_IN-FA	同CTL,但移除台风“烟花”
	RM_CEM	同CTL,但移除台风“查帕卡”
	RM_BTC	同CTL,但同时移除台风“烟花”和“查帕卡”
模拟启动时间	1800	2021年7月18日00时(UTC)
	1806	2021年7月18日06时(UTC)
	1812	2021年7月18日12时(UTC)
	1818	2021年7月18日18时(UTC)
	1900	2021年7月19日00时(UTC)

和图1c以最低海平面气压为指标,分别比较了观测和CTL试验台风“烟花”和“查帕卡”的强度演变. 总体上,CTL各时次启动都能较合理地模拟双台风强度的演变. 其中,在CTL1900中,台风“烟花”的强度与观测最接近. 相比之下,在其他模拟中,“烟花”强度较观测更强,并且随着时间的推移,强度偏差逐渐扩大,直至21日00时达到约40 hPa. 台风“查帕卡”的模拟结果显示,在20日06时之前各试验均成功模拟了强度持续增强的现象,但观测强度在20日00时后逐渐减弱的过程未能在模拟中还原,其中,CTL1900模拟的“查

帕卡”增强幅度最小,仍为模拟效果最佳的试验.综合以上关于双台风路径和强度的分析考虑,本文的试验设计能够较好地再现“21.7”暴雨期间台风的路径和强度发展特征,且各敏感试验的结果也具有一定的发散度,可用于后文进行不同试验间的对比分析.此外,CTL1900模拟的双台风路径和强度均表现最佳.

2 模拟启动时间对降水预报结果的影响

2.1 降水特征 考虑到“21.7”河南暴雨过程的关键特征和预报难点在于准确预测强降水的发生时间、位置和强度,本研究采用降水预报结果的空间分布特征结合TS评分来评估模式启动时间试验组的模拟效果.

图2所示为不同模式启动时间对预报降水的影响集合试验,除模拟启动时间不同外,其余模式设置均一致,图中所示为2021年7月20日00时至21日00时24h累积降水量,该时段涵盖了“21.7”河南暴雨事件中小时雨量最强的时段.本研究根据各组试验中降水的发生范围选取 $33^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$, $111^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 的矩形区域作为关键区域,并对该区域的平均24h累积降水量、50mm阈值的TS评分(图3a)以及关键区平均小时降水量演变(图3b)进行了比较分析.

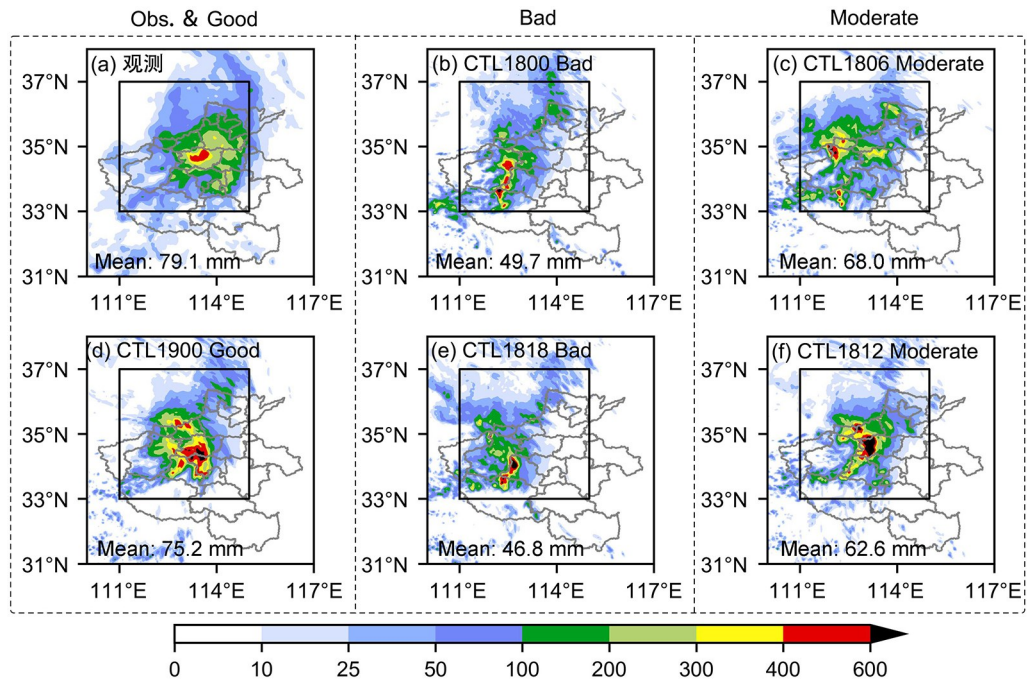
与观测结果(图2a)相比,模拟的24h累积降水空间分布(图2b~f)显示,相关的五组CTL均能模拟出24h累积降水量超过400mm的极端暴雨特征,但中心区域的分布特征存在显著差异.结合图3a中所给出的TS评分,可将五个试验分为三组.第一组(Bad)包括CTL1800(图2b)和CTL1818(图2e),TS评分低于0.35,强降水区域相比观测结果偏西南,且20日关键区域平均累积降水量低于观测值约30mm(图3b),试验效果较差.第二组(Moderate)包括CTL1806(图2c)和CTL1812(图2f),强降水落区相比观测结果偏西,20日关键区域平均累积降水量低于观测值约15mm,试验效果中等.第三组(Good)为CTL1900(图2d),20日关键区域平均累积降水量与观测结果的偏差仅为3.9mm,试验效果最佳,

该模拟在河南关键区50mm阈值的TS评分中获得最高分(图3a),其区域平均小时降水量的演变趋势与观测结果最为吻合(图3b),并在7月20日的00时和18时左右显示出明显的降水峰值. CTL1900模拟的降水中心虽然比观测略偏南,雨量也偏大,但该试验同时模拟出了降水中心东北侧的雨带,从降水的分布形态看是各组试验中最好的.这些结果表明,模拟启动时间对预报降水的影响是显著的,降水的分布和雨量大小都出现较大差别,启动时间为19日00时的模拟最能准确捕捉河南降水的整体雨区分布与雨量特征.结合图1的分析可知,CTL1900无论台风的路径、强度演变和降水特征都是各组试验中最优的.

2.2 水汽输送和动力抬升条件 为了研究不同模拟启动时间对降水和水汽传输的影响,模拟效果最优的CTL1900与其他组试验进行对比分析.

充足的水汽供应是强降水发生的必要条件^[2].图4展示了2021年7月20日00时至21日00时24h平均的整层水汽通量,同时用588dagpm等高线来界定副热带高压的范围.图中各组试验(图4b~f)均显示,西南季风在台风“烟花”和“查帕卡”的引导下向河南地区输送了丰富的水汽.这两个台风的气旋性环流改变了热带西南季风中部分水汽的移动方向,将西太平洋和南海的水汽通过东南风和南风输送至河南^[10],造成该区域的水汽通量超过 $400\text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$,特别是副高与台风“烟花”之间的东南至西北向的水汽输送带非常显著,成为“21.7”河南暴雨的主要水汽来源.从24h平均的副热带高压范围来看,模拟的副高控制范围相比于再分析资料(图4a)的结果普遍西伸,特别在CTL1900(图4b)中副高的影响范围最广.从河南中北部局地的水汽通量量级来看,CTL1900中可达 $800\text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$,CTL1812(图4f)中也出现 $600\text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$ 的中心,而且极值中心的位置也与实况一致,这两个试验的TS评分也最高. Bad组两个试验(图4c和图4d)的整层水汽通量均比再分析资料所示的数值小,且CTL1818(图4d)中心位置偏西.

图5所示为2021年7月20日至21日24h平均的950hPa散度场、200hPa散度场,并标注了24h累积降水量超200mm的区域以及CTL1900



The first, second and third columns correspond to the experimental groups with good, moderate and bad precipitation simulation, respectively.

图2 2021年7月20日00时至21日00时24 h (a)观测, (b) CTL1800, (c) CTL1806, (d) CTL1900, (e) CTL1818, (f) CTL1812的累积降水量(单位:mm), 黑色矩形框为关键区 (33°~37°N, 111°~115°E)

Fig. 2 The spatial distribution of the 24 h accumulative precipitation (unit: mm) in (a) observation, (b) CTL1800, (c) CTL1806, (d) CTL1900, (e) CTL1818 and (f) CTL1812 from 00:00 UTC 20 July to 00:00 UTC 21 July, 2021, where the black boxes represent the key area (33°~37°N, 111°~115°E)

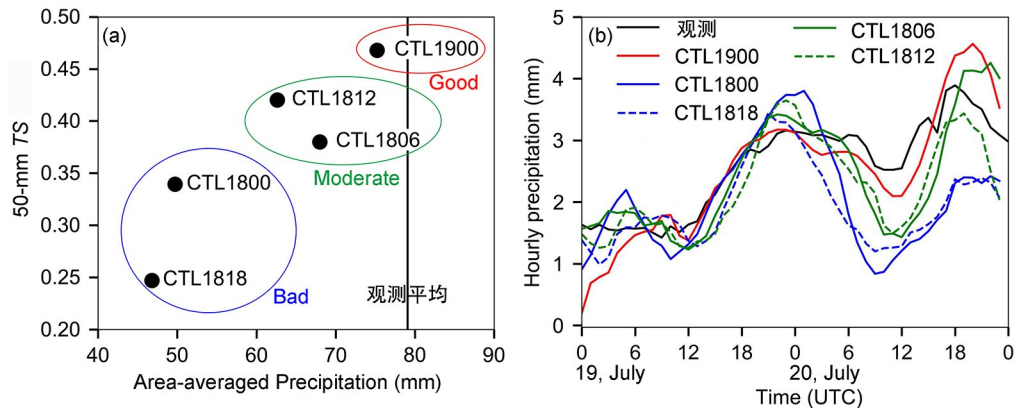


图3 (a) 7月20日关键区平均的24 h累积降水量的TS评分(阈值为50 mm), 黑色竖线代表观测的24 h累积降水量, (b) 7月19日00时至21日00时观测和模拟的关键区平均小时降水量时间演变(单位:mm)

Fig. 3 (a) The area-averaged simulated 24 h accumulative precipitation (unit: mm) versus TS score for the threshold of 50 mm on 20 July (The black vertical line represents the observed 24 h accumulative precipitation.); (b) The evolution of area-averaged hourly precipitation in the key area from 00:00 UTC 19 July to 00:00 UTC 21 July in observation and simulation (unit: mm)

与其他各组敏感性试验的950 hPa的水平风矢量差. 可见各试验均表现出沿着太行山、嵩山和伏

牛山一线山前低层辐合、高层辐散的特征,降水均主要发生在山前,说明地形与低空急流相互配合

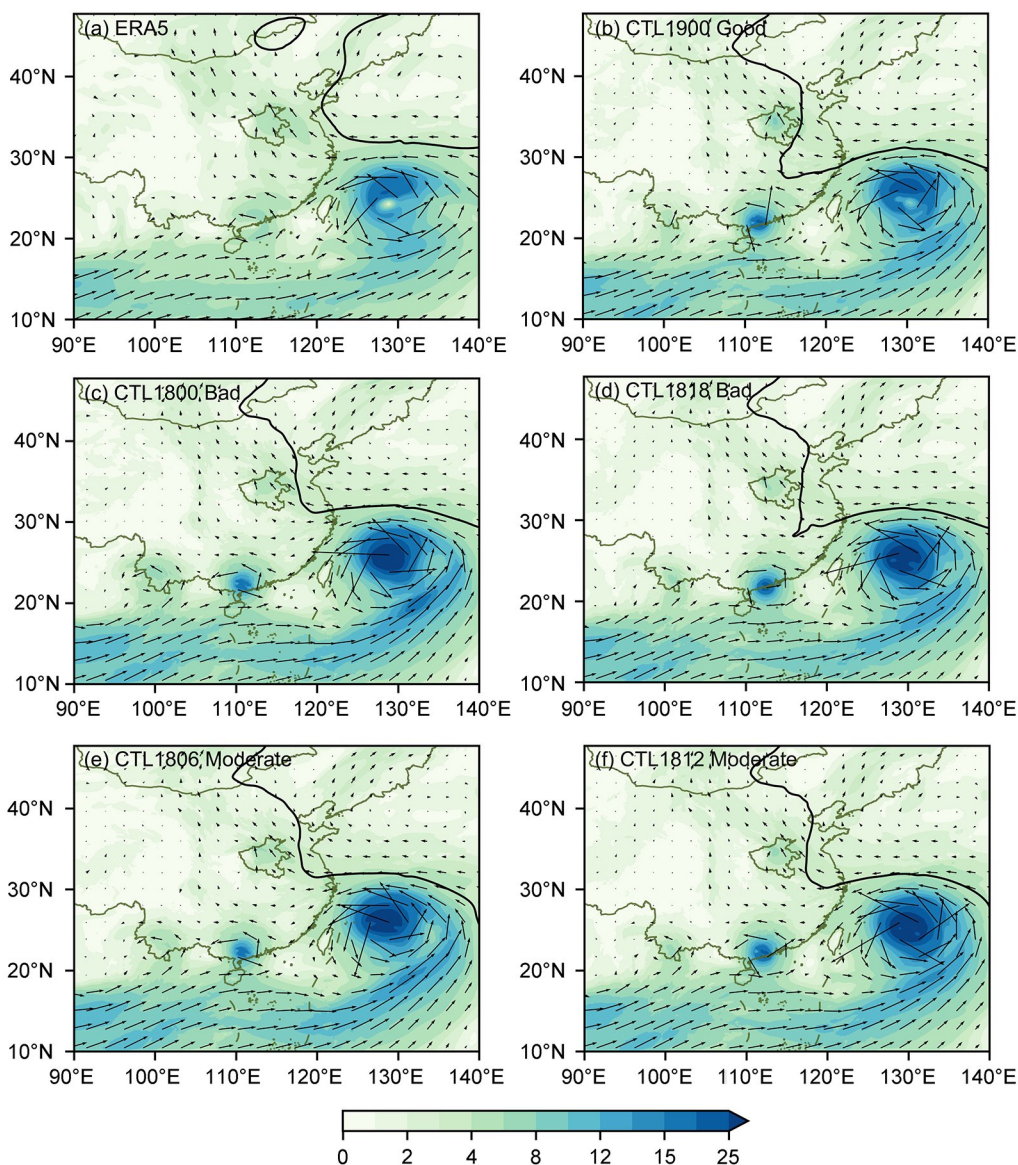


图 4 2021 年 7 月 20 日 00 时至 21 日 00 时 24 h 平均的 500 hPa 位势高度(588 dagpm 等值线)、整层水汽通量矢量(箭头)及其大小(填色,单位: $100 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$): (a) ERA5, (b) CTL1900, (c) CTL1800, (d) CTL1818, (e) CTL1806, (f) CTL1812

Fig. 4 24 h-averaged 500 hPa geopotential height (588 dagpm contour line), the vertically integrated water vapor flux (vectors) and its magnitude (shaded, unit: $100 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) from 00:00 UTC 20 July to 00:00 UTC 21 July 2021:

(a) ERA5, (b) CTL1900, (c) CTL1800, (d) CTL1818, (e) CTL1806 and (f) CTL1812

对降水的发生具有重要的作用. 在所有模拟中, CTL1900(图 5a)与其他各组试验的差异性显著. 首先, CTL1900 中 950 hPa 辐合中心和 200 hPa 辐散中心最强, 范围最大, 且 950 hPa 辐合中心位于嵩山东侧, 东西向跨度也在各组试验中最大. 而 Bad 组(CTL1800 和 CTL1818, 图 5b 和图 5c)两试验低层辐合区几乎沿着山地走向呈现南北分布, 相应的降水中心也偏移到了嵩山西侧和伏牛山东

南侧. 而在降水模拟效果较好的 Moderate 组中(CTL1806 和 CTL1812, 图 5d 和图 5e), 950 hPa 的辐合中心主要位于嵩山西侧或北侧, 与 CTL1900 相比, 位置略偏西, 且辐合中心强度较弱, 因而模拟的降水中心位置略向西偏移, 强度也相对较小. 其次, CTL1900 高层辐散中心与低层辐合中心的位置呈现垂直耦合的特征, 这有利于对流系统的快速发展增强, 对强降水的增强发展

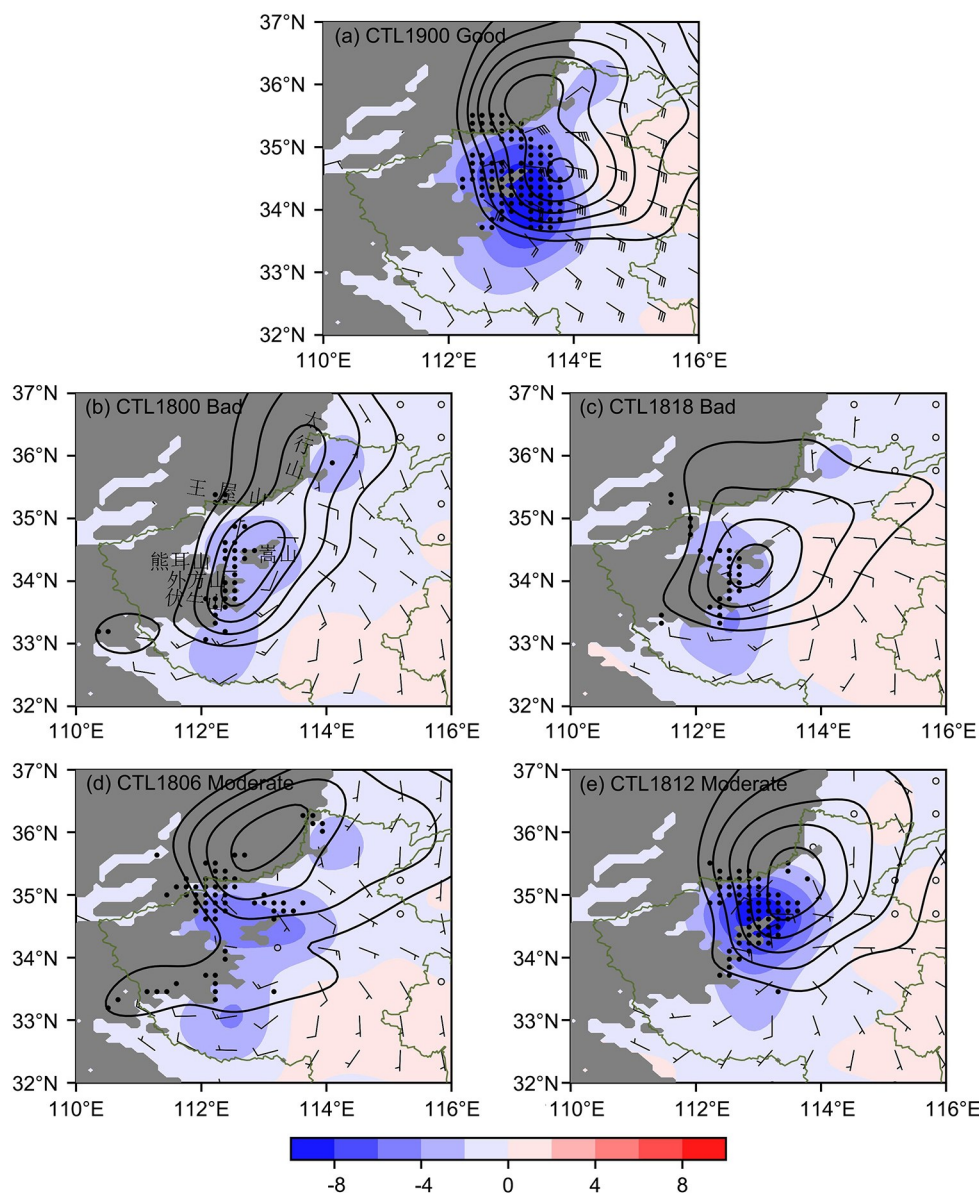


图5 2021年7月20日00时至21日00时24 h平均的950 hPa散度场(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})、200 hPa散度场(等值线,从 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 起始,每 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 递减)、24 h累积降水量超过200 mm的位置(点),(a)中风羽矢为CTL1900的950 hPa水平风场(全长对应 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),(b~e)中风羽矢为CTL1900与各敏感试验950 hPa水平风场的差异

Fig. 5 24 h-averaged 950 hPa divergence field (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1}), 200 hPa divergence field (contours starting at $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ with intervals of $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ decreasing), locations where 24 h accumulated precipitation over 200 mm (dots) from 00:00 UTC 20 July to 00:00 UTC 21 July 2021; The wind barbs in (a) represent the horizontal wind fields at 950 hPa for CTL1900 (full bar corresponds to $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), while the wind barbs in (b~e) represent the differences in the 950 hPa horizontal wind field between CTL1900 and each sensitivity experiment

至关重要.第三,CTL1900中河南中部主要受东南风和偏东风控制,东南风急流中心风速可达 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.由CTL1900与各组试验950 hPa水平风矢量的差值可知,Bad组中,950 hPa急流中心偏南,

表现为风矢量差在伏牛山以南区域为西南走向,导致降水中心位置向西南偏移.

通过以上分析可以看出,模拟启动时间对模拟降水效果有较大影响,本次过程中最大降水峰

值发生前 24 h 启动模拟取得了最优模拟结果. 其主要原因是该模拟能准确模拟低空东南风急流的风向和强度, 且高(低)层辐散(辐合)中心的位置也能准确表现利于该地区对流系统的发展, 同时水汽向河南中部地区不断输送形成整层水汽辐合中心, 为极端降水发生提供了水汽条件.

3 双台风对模拟降水的影响

由前文的分析可知, 以 19 日 00 时为启动时间的控制试验 (CTL1900) 在捕捉双台风特征和“21.7”河南暴雨演变方面表现得最准确, 因此, 本节以 CTL1900 为控制试验, 单独或同时去除台风“烟花”“查帕卡”的试验作为敏感性试验开展分析. 由于这两个台风中心距离河南较远, 因此对此次暴雨的影响主要是通过影响大气环流及水汽输送产生的, 已有研究表明双台风及副高在

“21.7”河南暴雨事件中的重要作用^[4,10,12,14]. 副高与台风“烟花”间的强气压梯度稳定驱动东南气流, 为河南输送大量水汽, 此外, 南海上的规模较小且弱的台风“查帕卡”通过其东侧偏南风将水汽从对流层中低层输送至降水区, 图 4 也表明了这一特点. Xu et al^[33]指出, 与单纯来自西南季风的水汽相比, 台风能够作为“桥梁”, 通过东南气流将更多水汽输送到华北目标降水区. 考虑到以上研究指出的双台风“烟花”和“查帕卡”对本次降水事件中水汽输送的影响, 下面将对降水中心附近水汽收支特征进行详细分析.

图 6 展示了移除台风“烟花”(RM_IN-FA1900)、移除台风“查帕卡”(RM_CEM1900)以及两者同时移除(RM_BTC1900)的三组敏感试验中 7 月 20 日 00 时至 21 日 00 时的 24 h 平均整层水汽通量和 500 hPa 位势高度场的变化情况. 与

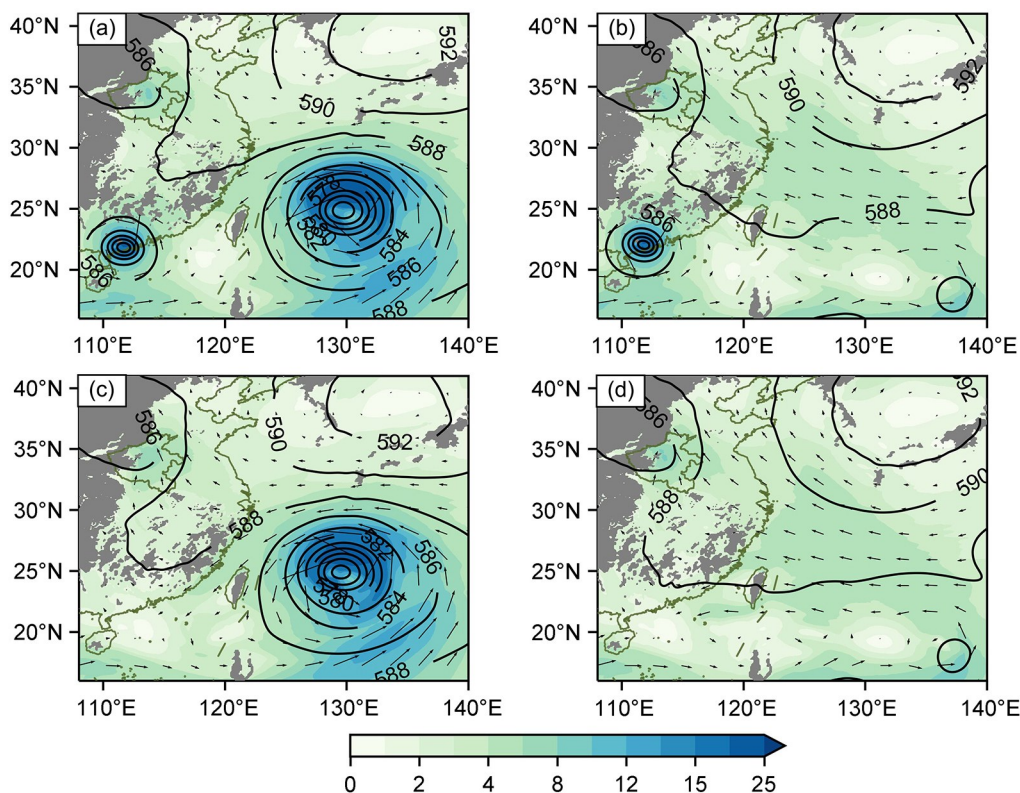


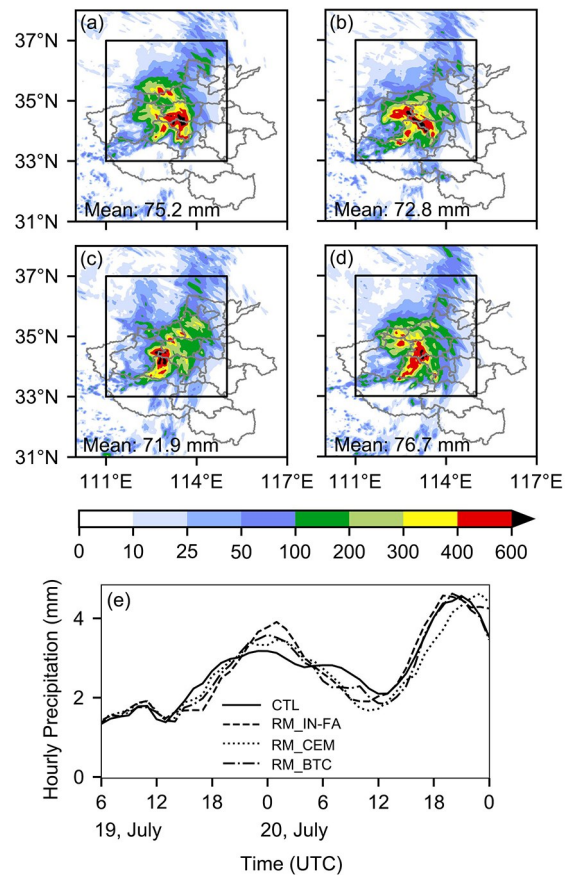
图 6 2021 年 7 月 20 日 00 时至 21 日 00 时 500 hPa 位势高度(等值线, 单位: dagpm)、整层水汽通量矢量(箭头)及其大小(填色, 单位: $100 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$): (a) CTL1900, (b) RM_IN-FA1900, (c) RM_CEM1900, (d) RM_BTC1900

Fig. 6 500 hPa geopotential height (contour lines, unit: dagpm), the vertically integrated water vapor flux (vectors) and its magnitude (shaded, unit: $100 \text{ kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$) from 00:00 UTC 20 July to 00:00 UTC 21 July 2021:

(a) CTL1900, (b) RM_IN-FA1900, (c) RM_CEM1900 and (d) RM_BTC1900

CTL1900(图 6a)相比,移除台风环流后,副高范围及水汽输送路径发生了显著的调整. 对比四个试验的结果可知,由于水汽传输主要发生在大气低层,当台风“烟花”存在时,在其气旋性环流引导下低层水汽难以沿着低层东南风直接由台湾以东洋面输送至河南地区,而移除“烟花”后的RM_IN-FA1900和RM_BTC1900试验中(见图 6b和图 6d),副高脊线南压至 25°N 附近,且形成了一条宽广的东南风水汽输送带,水汽通量超过 $400\text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$,并延伸至河南地区. 相比之下,台风“查帕卡”环流尺度较小(图 6a和图 6c),在其气旋性环流引导下,沿着 588 线外围建立了一条向河南地区的水汽通道,且“查帕卡”台风中心以东的南风抵消了“烟花”台风中心以西的北风,因而在CTL1900中两个台风之间的台湾海峡区域水汽通量极小. 当台风“查帕卡”被移除后(见图 6c),副高在中国东南沿海地区轻微南扩,向河南地区的水汽输送减弱. 整体而言,移除台风“烟花”在“21.7”河南暴雨事件对副高及其南侧的大尺度水汽传输产生了显著影响,而台风“查帕卡”的影响相对较小.

图 7所示为7月20日00时至21日00时24 h累积降水量. 在CTL1900(图 7a)中,降水量大于 400 mm 的区域主要分布在郑州市的中南部,而在三组移除台风的敏感性试验(图 7b~d)中,降水量大于 400 mm 的中心主要分布在郑州市的西南方向,区域平均的降水量值也略小. 值得注意的是,图 7d中区域平均的降水量数值为 76.7 mm ,超过了控制试验中 75.2 mm 的结果. 在图 7e区域平均的降水量随时间演变图中可以观察得更加清楚,移除台风的三个试验与控制试验相比,降水第一个峰值(20日00,UTC)出现的时间相近,但移除台风后峰值降水量均增大了;第二个降水峰值在各试验中数值相近(20日19时,UTC),但移除“查帕卡”的试验中峰值出现时间推迟. 以上分析表明,在本研究分析的1900启动的系列试验中,即便移除“烟花”和“查帕卡”两个台风,“21.7”河南暴雨事件仍可发生,且由于少了两个台风的气旋性环流对水汽向南的引导,大气低层的东南气流可直抵河南暴雨区,引发了更大的降水. 因此,台风“烟花”和“查帕卡”对河南极端降



The black boxes in Fig. 7a~d represent the key areas for calculating the average evolution of area in (e) and Fig. 8.

图 7 2021 年 7 月 20 日 00 时至 21 日 00 时 24 h 累积降水量 (单位: mm): (a) CTL1900, (b) RM_IN-FA1900, (c) RM_CEM1900, (d) RM_BTC1900 以及关键区面积平均的小时降水量演变(e)

Fig. 7 The spatial distribution of the 24 h accumulative precipitation (unit: mm) on 20 July 2021: (a) CTL1900, (b) RM_IN-FA1900, (c) RM_CEM1900, (d) RM_BTC1900, and (e) the area-averaged hourly precipitation in the key area

水事件所起的作用有待进一步讨论.

为了更加深入比较不同试验中水汽输送对“21.7”河南暴雨的影响,图 8展示了降水关键区四个边界上水汽通量及净水汽通量的时间演变. 结果显示,净水汽通量的变化趋势(图 8a)与区域平均小时降水量的时间变化趋势(图 7e)高度一致,表明降水量的变化与水汽输送量高度相关. 东侧(图 8b)与南侧(图 8c)的水汽通量为正值,而西侧(图 8d)和北侧(图 8e)的水汽通量则为负值,

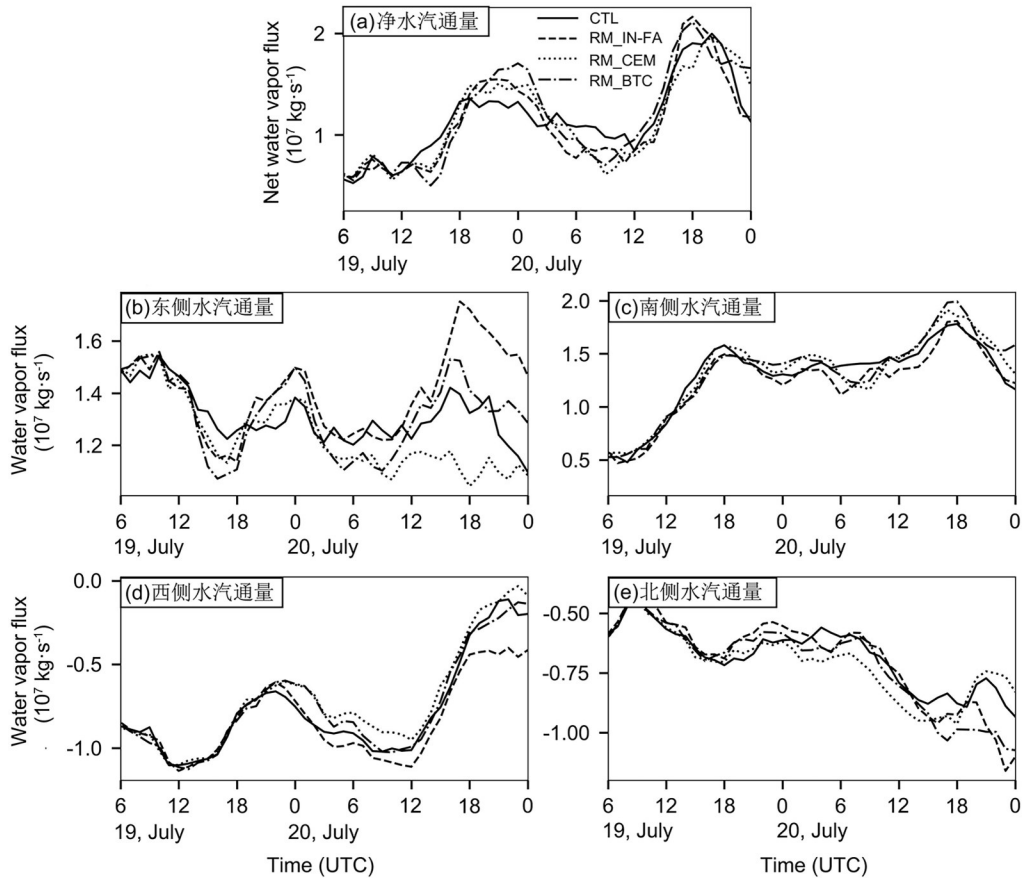


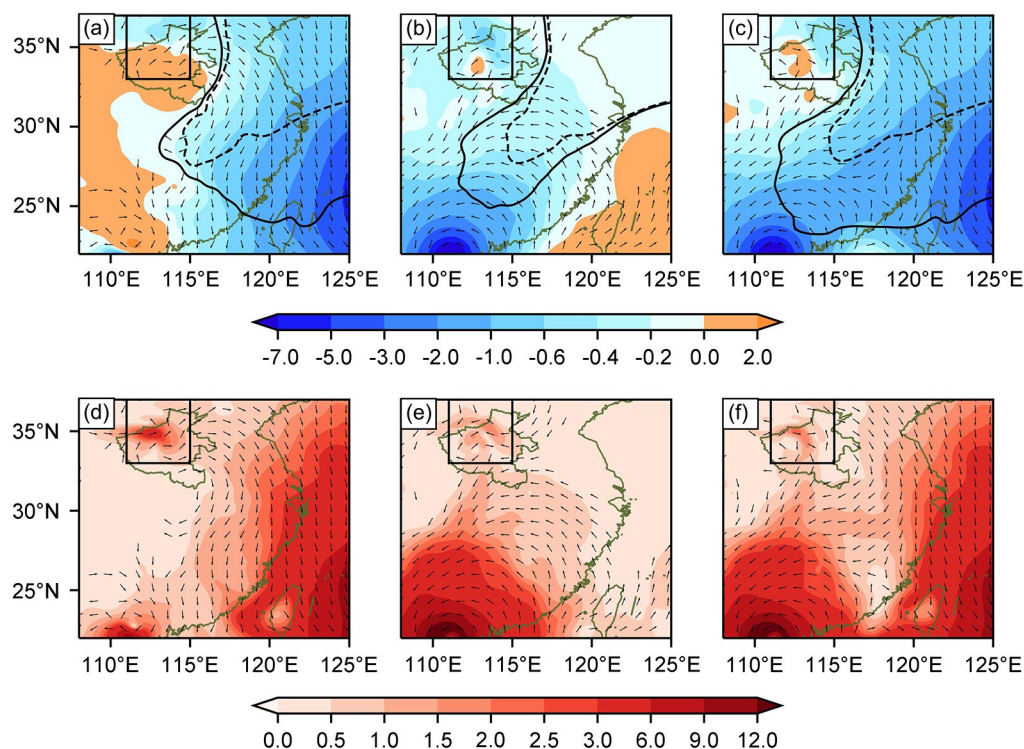
图 8 2021 年 7 月 19 日 06 时至 21 日 00 时降水关键区四个边界上整层水汽通量及净水汽通量的时间演变(单位: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 8 The temporal evolution of the vertically integrated water vapor flux and net water vapor flux (unit: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) at the four boundaries of the key precipitation area from 06:00 UTC 19 July to 00:00 UTC 21 July 2021

表明水汽通过关键区的东侧和南侧进入,并通过西侧和北侧离开.对比CTL和移除台风的三组敏感性试验可见,几组试验的差异随着时间增强,其中由东侧进入关键区的水汽通量差别最大(图8b),单独移除台风“烟花”的RM_IN-FA试验进入关键区的水汽通量最高,而RM_CEM试验中由东侧进入的水汽通量较低.四个方向的净水汽通量在两个时段达到高峰:7月19日20时至20日06时和7月20日15时至21日00时.鉴于第二个高峰期的净水汽通量更大且四个试验之间的差异性较大,本研究重点对此时段进行深入分析.

图9显示了CTL1900与三个敏感性试验之间的差值,绘制的是第二个水汽通量高峰期(7月20日15时至21日00时)9 h平均的500 hPa位势高度场、整层水汽通量的数值及其方向,即CTL1900的物理量减掉三个敏感性试验中相应

物理量的值.同时,用588 dagpm等高线来界定各试验中副热带高压的范围.移除台风后,副高控制范围西伸南压,因此副高控制区表现为负的气压差.但河南中部地区在图9a~c中均为正的气压差,即在单独或同时移除台风的情况下,河南中部500 hPa的位势高度均减小,结合图7a~d分析原因可知,与控制试验相比,敏感性试验中大于400 mm的强降水区域向郑州市的西南方向偏移,该区域中更强的降水活动产生了更强的凝结潜热,使得对流层中高层的位势高度偏低.从图9d~f中CTL1900与三个敏感性试验之间整层水汽通量的差来看,CTL1900与移除台风“烟花”的RM_IN-FA1900和RM_BTC1900之间的水汽通量差在河南省的东南侧均为偏北方向,这说明移除台风“烟花”后进入河南地区的东南向的气流加强了,再次验证了图6与图7的结论.CTL1900与



The black boxes represent the key region ($33^{\circ}\sim 37^{\circ}\text{N}$, $111^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$) used in Table 2. The dashed and solid lines in (a~c) correspond to the 588 dagpm contour lines in the control experiment and sensitivity experiment, respectively.

图9 2021年7月20日15时至21日00时9 h平均的控制试验与移除台风的敏感性试验的差异:(a) CTL1900-RM_IN-FA1900, (b) CTL1900-RM_CEM1900, (c) CTL1900-RM_BTC1900 500 hPa位势高度(填色,单位: dagpm)和整层水汽通量(箭头, $>0.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)的差异;(d) CTL1900-RM_IN-FA1900, (e) CTL1900-RM_CEM1900, (f) CTL1900-RM_BTC1900 整层水汽通量(箭头, $>0.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)及其大小(填色,单位: $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$)的差异

Fig. 9 The differences between CTL1900 and sensitivity experiments from 15:00 UTC 20 July to 00:00 UTC 21 July 2021: 9 h averaged vertically integrated water vapor flux (vectors, $>0.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$) and 500 hPa geopotential height (shaded, unit: dagpm) between (a) CTL1900-RM_IN-FA1900, (b) CTL1900-RM_CEM1900, (c) CTL1900-RM_BTC1900; The 9 h-averaged vertically integrated water vapor flux (vectors, $>0.3 \text{ kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$) and its magnitude (shaded, unit: $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$) between (d) CTL1900-RM_IN-FA1900, (e) CTL1900-RM_CEM1900, (f) CTL1900-RM_BTC1900

移除台风“查帕卡”的RM_CEM1900和RM_BTC1900试验之间的水汽通量差在河南省以南地区主要为偏南方向,即原本由河南以南方向进入降水区的水汽通量在移除“查帕卡”后得到了加强,对比图9b和图9c中副高控制范围可知,这主要是因为移除“查帕卡”后副热带高压控制区向西南扩展,使得 115°E 以西区域的偏南风增强。

表2进一步定量对比分析了CTL与三个敏感性试验在关键区四个边界上整层水汽通量差值的9 h平均值,表中给出的是CTL1900减去移除台风试验的数值,若数值为正则表示移除台风后

水汽入流减少(或出流增加),为负值则表示移除台风后水汽入流增加(或出流减少)。台风“烟花”移除造成关键区东侧边界水汽入流增加了 $31.4 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,但南侧边界水汽入流减少,西侧和北侧水汽出流增加。这表明,台风“烟花”的存在不利于水汽由东边界进入降水关键区,再次定量证明了本文图6~9的结论。但由于移除台风“烟花”后流入和流出的水汽均增强,就净水汽通量值来看移除“烟花”造成的该区域净水汽通量增加仅0.13%。台风“查帕卡”被移除后,对关键区各边界水汽通量的影响与移除“烟花”的效果相反,由

表 2 2021 年 7 月 20 日 15 时至 21 日 00 时 9 h 平均的控制试验与三个敏感性试验在关键区四个边界上整层水汽通量差值(单位: $10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 2 The difference in vertically integrated water vapor flux (unit: $10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) at the four boundaries of the key area between the control experiment and three sensitivity experiments, averaged over 9 h from 15:00 UTC 20 July to 00:00 UTC 21 July 2021

	CTL1900-RM_ IN-FA1900	CTL1900-RM_ CEM1900	CTL1900-RM_ BTC1900
东	-31.4	18.3	-10.0
南	2.3	-13.1	-17.2
西	17.2	-8.3	-0.9
北	12.1	-0.4	15.1
净	0.2	-3.4	-13.8

东侧边界流入关键区的水汽减少了 $18.3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 但从南侧边界进入关键区的水汽通量增加了 $13.1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 由西侧和北侧流出的水汽量也相应减少. 从净水汽通量来看, 关键区净获得的水汽减少约 2.06%, 说明台风“查帕卡”的存在有利于降水区获得更多水汽量. 当两个台风同时移除时, 南侧边界可获得更多水汽, 主要由北侧边界流出, 扣除双台风的协同作用导致净水汽通量增加了 8.23%, 超过了单个台风的影响.

4 结论

本研究采用 WRF 模式对 2021 年 7 月发生在河南的极端暴雨事件(即“21.7”河南暴雨)进行了集合模拟数值试验, 模拟时段涵盖了 2021 年 7 月 18 日 00 时至 21 日 00 时降水发生的主要时段. 控制试验的模拟结果较好地再现了双台风的路径和强度演变特征以及降水分布特征. 本文深入分析了模拟启动时间和双台风对此次河南暴雨事件模拟的影响及相关机制.

本文的集合模拟试验发现, 模拟启动时间对模拟降水效果有较大影响, 在本次过程中, 最大降水峰值发生前 24 h 启动模拟取得了最优模拟结果. 其主要原因是, 该模拟对低空东南风急流的风向和强度能够准确模拟, 低空急流汇交于河南中西部山脉地形附近形成低(高)层辐合(辐散)中心, 模拟中对于辐合(散)中心的位置能够准确表

现, 利于该地区对流系统的发展, 同时低空急流向河南中部地区不断输送水汽形成水汽辐合中心, 为极端降水发生提供了水汽条件. 而在模拟效果较差的试验组中, 低空急流轴和辐合中心呈现出偏西和偏西南的趋势, 降水落区也相应出现在偏西和偏西南位置.

在降水峰值来临前的 24 h 移除台风环流后, 考察降水峰值发生期间(20 日 00 时至 21 日 00 时) 24 h 累积降水量的分布特征发现, 中心降水量大于 200 mm 的区域的分布范围和中心位置有变化, 区域平均降水量值在将双台风都移除后不降反增. 分析原因发现, 移除台风后副高范围及水汽输送路径发生了显著的调整. 主要表现为副高范围西伸南压, 当台风“烟花”被移除后形成一条宽广的东南风水汽输送带, 将水汽由台湾以东洋面输送至河南地区; 当台风“查帕卡”被移除后, 河南省以南地区的南风加强, 有利于建立一条由华南沿海向河南地区的水汽输送带. 分析表明, 在本文分析的降水最大峰值出现的时段内, 双台风被移除后净输送进入降水关键区的水汽通量将增加 8.23%. 这一分析表明台风的存在对降水的影响存在不确定性, 某些时段内反而可能减缓河南地区的极端降水.

本文的分析结果仍有待进一步研究和讨论. 首先, 本文在降水峰值来临前 24 h 移除台风的试验, 虽然台风环流被移除, 但台风对其他区域大气环流的影响依然存在, 在 24 h 的模拟中这种间接的影响效应难以去除. 其次, 本文分析结果表明台风“烟花”影响了东南向水汽通道输送水汽的强度, 而台风“查帕卡”则影响了南方通道的水汽输送, 但这些结果可能与台风所处的位置有关, 在本文分析时段内, 台风与副热带高压之间必然产生较大的气压梯度力加强了东南风急流, 但由于此时“烟花”已经处于台湾以东洋面的副高南侧, 故这支加强的东南风急流的部分分支沿着副高边缘向西传输, 而后向北传输到达河南, 而移除“烟花”后反而有利于东南风急流“长驱直入”抵达河南. 但若台风“烟花”处于更偏东的位置, 或处于副高的西南侧, 水汽传输路径将发生变化, 本文对于水汽辐合通量的计算结果是否仍然成立需要进一步计算分析. 此外, 本文没有对控制试验准确再现

降水量级和中心位置中的各种动力、热力过程开展进一步的分析,如东南风急流的动力热力作用、持续降水造成的局地潜热释放对降水的增幅作用、高中低层涡旋系统耦合的发展特征等,这些内容都将在后续工作中进行细致分析。

参考文献

- [1] 丁一汇. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 395—406. (Ding Y H. The major advances and development process of the theory of heavy rainfalls in China. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(5): 395—406.)
- [2] 丁一汇. 论河南“75.8”特大暴雨的研究: 回顾与评述. 气象学报, 2015, 73(3): 411—424. (Ding Y H. On the study of the unprecedented heavy rainfall in Henan Province during 4—8 August 1975: Review and assessment. *Acta Meteorologica Sinica*, 2015, 73(3): 411—424.)
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980, 225.
- [4] Zhang Q H, Li R M, Sun J Z, et al. A review of research on the record-breaking precipitation event in Henan Province, China, July 2021. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(8): 1485—1500.
- [5] 孟智勇, 唐晓静, 岳健, 等. 地面和探空资料的 EnKF 同化对北京“7.21”极端暴雨模拟的影响. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 237—245. (Meng Z Y, Tang X J, Yue J, et al. Impact of EnKF surface and rawinsonde data assimilation on the simulation of the extremely heavy rainfall in Beijing on July 21, 2012. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 237—245.)
- [6] 马长健, 李艳, 徐邦琪. 双低空急流对“21.7”河南极端暴雨的影响. 大气科学, 2023, 47(5): 1611—1625. (Ma C J, Li Y, Xu B Q. Impact of double low-level jets on the extreme rainstorm in Henan Province in July 2021. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2023, 47(5): 1611—1625.)
- [7] Zhang Y J, Yu H Z, Zhang M R, et al. Uncertainties and error growth in forecasting the record-breaking rainfall in Zhengzhou, Henan on 19—20 July 2021. *Science China Earth Sciences*, 2022, 65(10): 1903—1920.
- [8] Sun J Z, Li R M, Zhang Q H, et al. Mesoscale factors contributing to the extreme rainstorm on 20 July 2021 in Zhengzhou, China, as revealed by rapid update 4DVar analysis. *Monthly Weather Review*, 2023, 151(8): 2153—2176.
- [9] Luo Y L, Zhang J H, Yu M, et al. On the influences of urbanization on the extreme rainfall over Zhengzhou on 20 July 2021: A convection-permitting ensemble modeling study. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, 40(3): 393—409.
- [10] Deng L, Feng J N, Zhao Y, et al. The remote effect of binary Typhoon Infa and Cempaka on the “21.7” heavy rainfall in Henan Province, China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(16): e2021JD036260.
- [11] Sun J H, Fu S M, Wang H J, et al. Primary characteristics of the extreme heavy rainfall event over Henan in July 2021. *Atmospheric Science Letters*, 2023, 24(1): e1131.
- [12] Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021. *Journal of Meteorological Research*, 2022, 36(1): 6—25.
- [13] Yu Y, Gao T, Xie L, et al. Tropical cyclone over the western Pacific triggers the record-breaking ‘21/7’ extreme rainfall in Henan, Central-Eastern China. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(12): 124003.
- [14] Rao C H, Chen G H, Ran L K. Effects of Typhoon In-Fa (2021) and the Western Pacific subtropical high on an extreme heavy rainfall event in central China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(7): e2022JD037924.
- [15] Tang J H, Xu X D, Zhang S J, et al. Response of remote water vapor transport to large topographic effects and the multi-scale system during the “7.20” rainstorm event in Henan Province, China. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1106990.
- [16] Liu H Y, Gu J F, Wang Y Q, et al. What controlled the low-level moisture transport during the extreme precipitation in Henan Province of China in July 2021? *Monthly Weather Review*, 2023, 151(6): 1347—1365.
- [17] Xu H X, Duan Y H, Li Y, et al. Indirect effects of binary typhoons on an extreme rainfall event in Henan province, China from 19 to 21 July 2021: 2. Numerical study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, 127(15): e2021JD036083.

- [18] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20(2): 130—141.
- [19] 高丽, 陈静, 郑嘉雯, 等. 极端天气的数值模式集合预报研究进展. *地球科学进展*, 2019, 34(7): 706—716. (Gao L, Chen J, Zheng J W, et al. Progress in researches on ensemble forecasting of extreme weather based on numerical models. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(7): 706—716.)
- [20] Lei L L, Ge Y J X, Tan Z M, et al. Evaluation of a regional ensemble data assimilation system for typhoon prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(11): 1816—1832.
- [21] Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525 (7567): 47—55.
- [22] Lu X Q, Yu H, Ying M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690—699.
- [23] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287—301.
- [24] Gilbert G K. Finley's tornado predictions. *American Meteorological Journal*, 1884, 1(5): 166—172.
- [25] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. Boulder: NCAR, 2008: 113.
- [26] Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(12): 5095—5115.
- [27] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13103.
- [28] Pleim J E. A combined local and nonlocal closure model for the atmospheric boundary layer. Part I: Model description and testing. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2007, 46(9): 1383—1395.
- [29] Pleim J E. A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(2): 341—347.
- [30] Pleim J E, Xiu A J. Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1995, 34(1): 16—32.
- [31] Xiu A J, Pleim J E. Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2001, 40(2): 192—209.
- [32] Kain J S, Michael Fritsch J. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(23): 2784—2802.
- [33] 徐洪雄, 徐祥德, 张胜军, 等. 台风韦森特对季风水汽流的“转运”效应及其对北京“7.21”暴雨的影响. *大气科学*, 2014, 38(3): 537—550. (Xu H X, Xu X D, Zhang S J, et al. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 38(3): 537—550.)

(责任编辑 杨贞)