

程佳佳,徐国强.郑州“7·20”极端暴雨过程中水汽和高低空急流作用机制的数值模拟[J].海洋气象学报,2022,42(3):57-68.
CHENG Jiajia, XU Guoqiang. Numerical simulation analysis on the influence mechanism of water vapor and upper-low-level jet during “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. Journal of Marine Meteorology, 2022, 42(3): 57-68. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.006. (in Chinese)

郑州“7·20”极端暴雨过程中水汽和高低空急流 作用机制的数值模拟

程佳佳^{1,2}, 徐国强²

(1.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081;2.中国气象局地球系统数值预报中心,北京 100081)

摘要: 针对郑州“7·20”特大暴雨过程,使用 CMA-MESO 区域模式对此次极端强降水过程中水汽与高低空急流的影响进行了数值试验分析。结果表明,此次暴雨过程较为成功地被中尺度模式模拟再现;暴雨过程中水汽来源主要为台风“烟花”北侧的东南急流携带的来自西太平洋与印度洋的水汽以及台风“查帕卡”北侧东南气流携带的来自南海的水汽;降水及水汽输送对水汽含量十分敏感,水汽含量微小的变化便会使郑州上空气流辐合区强度减弱,水汽累积减少,降水范围向河南北部缩小,降水强度大幅度减弱;低空急流对应的气流辐合区是郑州上空出现强垂直上升运动中心的主要机制,低空急流减弱后,水汽辐合减弱,降水减少,降水中心位置偏西南,高空急流对降水的影响与低空急流相比较小。

关键词: 暴雨; 水汽; 高低空急流; 数值模拟

中图分类号: P458.121.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2022)03-0057-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.03.006

Numerical simulation analysis on the influence mechanism of water vapor and upper-low-level jet during “7·20” extreme rainstorm in Zhengzhou

CHENG Jiajia^{1,2}, XU Guoqiang²

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. CMA Earth System Modeling and Prediction Centre (CEMC), Beijing 100081, China)

Abstract For the heavy rainstorm event in Zhengzhou on 20 July 2021, the influence of water vapor and upper-low-level jet in this extremely heavy precipitation process is analyzed by numerical experiments using the CMA-MESO regional model. The results show that the rainstorm process can be successfully simulated by mesoscale model. The main water vapor sources during the rainstorm are the water vapor from the western Pacific and Indian Ocean carried by the southeast jet on the north side of Typhoon In-fa and the water vapor from the South China Sea carried by the southeast jet on the north side of Typhoon Cempaka. Precipitation and water vapor transport are very sensitive to water vapor content, which shows that the slight change of water vapor content can weaken the intensity of airflow convergence zone over Zhengzhou, reduce the accumulation of water vapor, narrow the precipitation area to the north of Henan,

收稿日期:2022-05-09; 修订日期:2022-06-23

基金项目:国家自然科学基金项目(42175167);灾害天气国家重点实验室开放课题(2021LASW-A11);河南省重大科技专项(201400210800)

第一作者:程佳佳,女,硕士研究生,主要从事数值模式物理过程研究,chengjiacams@163.com。

通信作者:徐国强,男,博士,研究员,主要从事模式物理过程研究,xugq@cma.gov.cn。

and greatly weaken the precipitation intensity. The airflow convergence zone corresponding to the low-level jet is the main mechanism causing the strong vertical ascending motion center over Zhengzhou. The weakening of the low-level jet makes the convergence of water vapor decrease, which leads to the decrease of precipitation and the location of precipitation center to the southwest. The influence of upper-level jet on precipitation is less than that of low-level jet.

Key words rainstorm; water vapor; upper-low-level jet; numerical simulation

引言

我国暴雨洪水频发,除西北个别地区外,几乎都有暴雨出现。已有众多学者对暴雨的形成和机理进行过深入研究,暴雨形成的必要条件为:充足的水汽输送、强烈的上升运动及稳定的环流背景。水汽是暴雨形成的物质基础,暴雨降水量对水汽含量十分敏感^[1-3],整层大气内水汽辐合区对暴雨落区有重要的指示作用^[4-5],高低层水汽差异与位势不稳定层结的建立及重建有重要关系^[6]。王忠东等^[5]对比分析了2015年台风“苏迪罗”与“杜鹃”在相似路径情况下的暴雨成因,结果表明台风“苏迪罗”中充足的水汽输送是其产生降水的强度与范围强于“杜鹃”的重要原因之一。沈晓玲和桑明慧^[7]通过2018年台风“云雀”与“温比亚”的对比分析结果发现,水汽通量辐合高度是否到达对流中上层对暴雨中心雨量有明显的影响。

除水汽外,高低空急流对暴雨的发生发展也具有重要影响作用,暴雨落区经常出现在高空急流入口区右侧、出口区左侧或低空急流左侧^[8]。低空急流对暴雨形成过程中的水汽输送^[9-11]、位势不稳定^[6,12]建立及中尺度系统触发均有重要作用。陈博和李新峰^[13]对台风“温比亚”进行特征分析时发现,低空急流的长期维持使洋面至台风内部的水汽输送带稳定存在,为暴雨提供了充足的水汽与热量。高晓梅等^[14]通过对常规气象资料、雷达资料及再分析资料的综合比较,分析了台风“利奇马”对2019年8月山东极端暴雨的影响,提出低空急流向低空的快速扩展与短时强降水的开始有明显的对应关系,对短时临近预报十分重要。孙炜文等^[15]从急流角度分析了2014年5月江西中北部地区的暴雨过程,认为超低空、低空急流的加强为暴雨形成提供了能量与水汽条件,急流前端的辐合抬升作用加强了上升运动,超低空急流脉动对降水形成具有促进作用。而高空急流的增强与靠近是激发低空急流的重要机制^[16-18],其上升支对水汽具有明显抬升作用^[10]。众多研

究^[19-21]结果表明,高低空急流激发的次级环流耦合可以加强水汽、动量与热量的输送,是触发不稳定能量的重要机制,对天气系统发生发展及降水形成具有明显的增强作用。

上述研究表明,水汽条件、水汽源地和水汽通道的判定在暴雨预报中具有十分重要的意义,高低空急流不仅通过急流本身影响暴雨形成的水汽条件,同时急流耦合激发的次级环流对暴雨的发生发展也具有重要作用。暴雨是在各种尺度天气和环流系统共同作用下生成的,这种相互作用是非线性的^[6],在很大程度上造成了暴雨预报的困难。对于不同类型、不同下垫面及不同环流背景下的暴雨个例,水汽与高低空急流的影响与作用机制不尽相同,选取具有典型特征的暴雨过程进行细致的分析研究是十分有意义的。2021年7月18—22日,河南省郑州市突发了十分罕见的极端强降水过程,此次暴雨过程降雨量极大、降水极端性突出,为郑州市带来了灾难性的洪水灾害,造成严重的生命与财产损失。此次极端降水过程是西太平洋副热带高压、青藏高原、台风“烟花”与“查帕卡”等天气系统^[22]共同作用产生的。已有众多学者从不同角度对此次极端降水过程进行了细致的剖析,如利用MICAPS观测数据、ERA5再分析资料以及卫星数据综合分析此次“7.20”降水过程中的动、热力与水汽特征^[23],或通过FY-4A静止气象卫星成像仪和地基天气雷达遥感数据,使用光流法分析动力条件与水凝物的输送^[24],以及从数值预报方面分析ECMWF、GFS与PWAFS等多个模式的预报偏差与原因^[25]。此次特大暴雨过程中的水汽条件与高低空急流在降水形成过程中发挥的作用及其影响机制值得深入研究,然而目前使用数值模式进行水汽与急流相关试验的研究较少。本文将通过数值模拟,对此次极端强降水过程进行水汽与急流的敏感性试验,试图对暴雨过程中的水汽条件与高低空急流的影响机制有进一步的认知。

1 暴雨过程概述

1.1 暴雨过程

自2021年7月17日开始,河南省及其周边地区陆续出现持续性强降水,多处地区降水等级达到大暴雨甚至特大暴雨。根据气象站观测数据,河南省内600余个气象站24 h累计降水超过250 mm,最大降水量超过720 mm。此次大范围极端强降水中心位于河南省郑州市,7月20日16—17时1 h累计降水量达到201.9 mm,暴雨导致严重的城市内涝灾害,对人民群众的生命及财产安全造成了极大损害。

1.2 天气学成因分析

此次暴雨过程发生在我国夏季降水集中期,是东亚地区各种尺度天气系统共同作用的结果。在亚洲地区对流层上层(图略),沿海存在深厚低涡,南亚高压脊线向东伸展,其东西两侧的 105°E 与 125°E 位置处存在两个南北向的低槽,建立了“两槽一脊”流型^[23],高纬度冷空气得以南下深入中原腹地,河南省受西南风转西北风的反气旋环流控制,位于高空急流区南侧,郑州市及其周边地区上空的对流层上部形成了气流辐散区。在对流层中层(图略),西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)西伸北抬,强度偏强。副高与蒙古高压包围下的 α 尺度黄淮低涡缓慢地向东北方向移动,此过程中逐渐分裂,由此时大气高层位涡异常、低层有暖锋式切变且存在大范围的降水伴随的凝结潜热加热作用,产生的深厚稳定的 β 中尺度低涡是此次暴雨事件的主要参与者^[22]。在对流层低层(图1),台风“烟花”与西太平洋副高共同作用,在副高南侧形成明显的东南风急流,至郑州市上空与稳定的切变线相遇,同时在太行山、嵩山等地形的抬升强迫作用下形成气流辐合区。郑州市上空大气高层辐散、低层辐合,垂直上升运动条件良好,对流发展旺盛,十分有利于降水形成,天气系统稳定少动,有利于降水长时间维持。

此次极端降水过程是不同高度上的不同天气系统共同作用产生的,充足且稳定的水汽输送是造成过程降水量极大的主要原因之一。以2021年7月20日08时850 hPa高度层水汽通量与流场分布(图1)为例,分析此次暴雨过程中水汽源地与水汽通道。此次暴雨过程中副高南侧有台风“烟花”存在,同时台风“查帕卡”在华南地区登陆。台风“烟花”北侧的东南急流将来自西太平洋及印度洋的水

汽源源不断地输送至河南省及其周边地区。台风“查帕卡”北侧东南气流登陆后转为偏南气流,将来自南海洋面的水汽向内陆输送。偏南气流靠近郑州市上空时,转为西南气流,与台风“烟花”带来的东南气流汇合,即将来自西太平洋及印度洋的水汽汇集,在郑州市上空形成水汽辐合区,为暴雨形成提供了充足的水汽条件,使郑州地区低层的对流不稳定增强。为研究此次特大暴雨降水过程中水汽含量对水汽输送以及降水量的影响,设计了不同水汽含量的敏感性试验。通过对比不同试验结果,分析此次极端降水过程中水汽的作用及其影响机制。

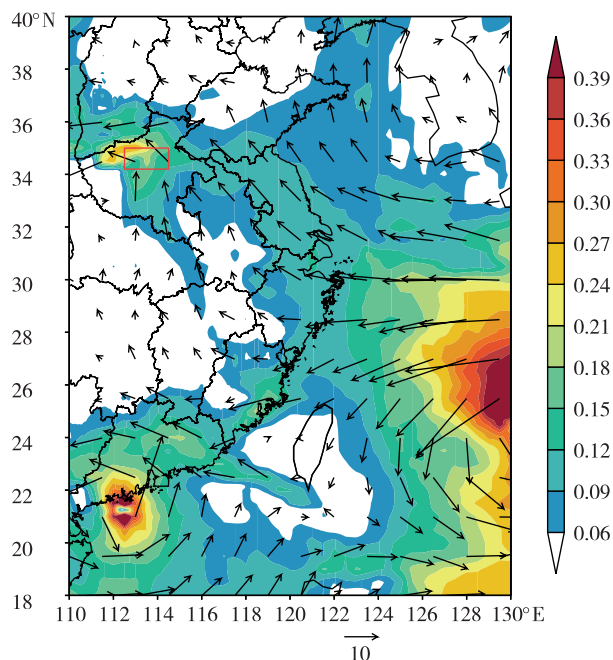


图1 2021年7月20日08时850 hPa高度层水汽通量(色阶,单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)与水平流场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;红色框线区域为郑州市,下同)

Fig.1 Water vapor flux (color scale, units: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) and horizontal flow field (wind vector, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 08:00 BST 20 July 2021 (the area in the red box is Zhengzhou, the same below)

2 水汽敏感性的数值模拟分析

2.1 数值模式

使用中国气象局中尺度天气数值预报系统(CMA-MESO)进行模拟试验,版本号为CMA-MESO 5.1。该系统使用半隐式-半拉格朗日差分方案及全可压非静力平衡格点动力框架,垂直方向上选用地形追随高度坐标及Charney-Philips垂直分层设计,水平方向上选用球面坐标及Arakawa-C跳点经纬度网格。该系统包含微物理、辐射、积云对流等

多种物理过程。数值预报模式试验模拟方案如表 1 所示。

表 1 郑州“7·20”暴雨模拟试验方案

Table 1 Simulation test scheme of “7·20” rainstorm in Zhengzhou

项目	使用方案
空间分辨率	水平格距为 0.03°, 网格点数 2 501×1 671, 垂直总层数 51 层
时间步长	30 s
预报区域	10.0°~60.1°N, 70°~145°E
积云参数化	不采用积云参数化方案
长波辐射	RRTM 方案
短波辐射	Dudhia 方案
边界层方案	新 MRF 方案
陆面过程	Noah 陆面过程方案
近地面层	Monin-Obukhov 方案
微物理过程	WSM6 类方案

CMA-MESO 5.1 模式使用的初始场与背景场源自 NCEP/GFS 0.05°×0.05°资料,模式包含云分析系统,所用红外辐射、总云量、雷达数据来自 FY-2G 黑体亮温 (black-body temperature, TBB)、FY-2G 总

云量产品 (cloud total amount, CTA) 以及国家雷达观测站观测资料。降水实况数据为国家气象信息中心提供的全国气象站点观测资料。

2.2 试验方案设计

为研究此次暴雨过程中水汽的影响,利用 CMA-MESO 模式设计 4 组水汽敏感性试验和 1 组控制试验。模式模拟时段为北京时间 7 月 20 日 08 时—21 日 08 时,此时段郑州市单小时降水量最大。4 组敏感性试验将整个预报区域内自地面至模式层顶范围内的比湿场分别乘以系数:0.1、0.5、0.7、0.9,分别命名为 Exp-0.1、Exp-0.5、Exp-0.7、Exp-0.9。控制试验中比湿场为实测值,用以研究数值模式模拟降水效果,简记为 Exp-CTRL。将各组试验结果分别与 Exp-CTRL 作对比,分析在其他场不变的情况下,水汽含量的变化对降水及水汽输送的影响。

2.3 试验结果

2.3.1 降水分析

图 2 与图 3 分别为 2021 年 7 月 20 日 14—20 时 6 h 累计降水与 20 日 08 时—21 日 08 时 24 h 累计降水的实测值、试验模拟值,可以看出,6 h 累

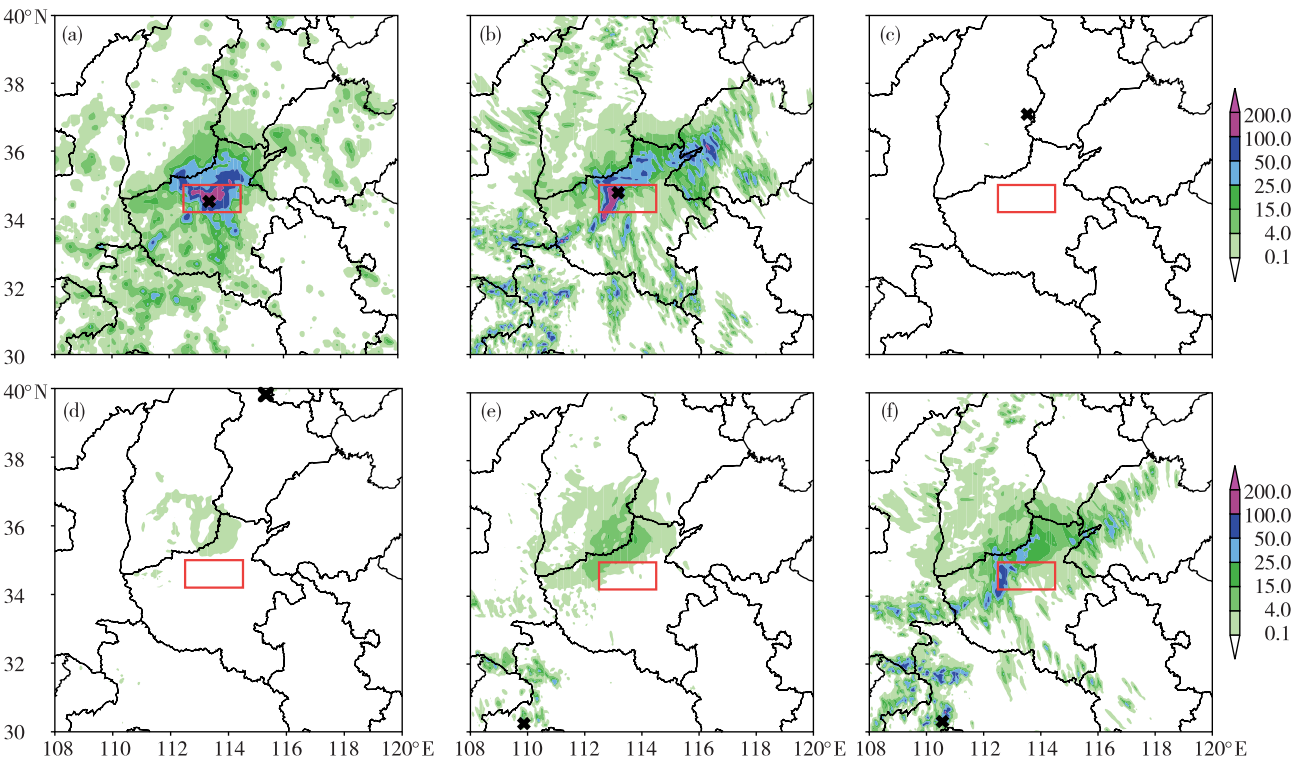


图 2 2021 年 7 月 20 日 14—20 时实测及预报的 6 h 累计降水量 (单位: mm; a. 实际降水, b. Exp-CTRL, c. Exp-0.1, d. Exp-0.5, e. Exp-0.7, f. Exp-0.9; 黑色“✕”标识位置为图示范围内降水最大值所在位置,下同)

Fig.2 6-h accumulated precipitation (units: mm) observed and forecast from 14:00 BST to 20:00 BST 20 July 2021 (a. observed precipitation, b. Exp-CTRL, c. Exp-0.1, d. Exp-0.5, e. Exp-0.7, f. Exp-0.9; black “✕” indicates location of maximum precipitation in the range shown in the figure, the same below)

计降水实测降水中心最大值为 227.4 mm, Exp-CTRL 中降水中心模拟最大值为 264.2 mm, 模拟降水中心最大值偏大; 24 h 累计降水实测降水中心最大值为 573.6 mm, Exp-CTRL 中降水中心模拟最大值为 550.6 mm, 模拟值较为贴近实测值。通过图 2a 与图 2b 的对比可知, 此次降水范围模拟效果较好, 模拟与实测降水均集中在河南省及其周边地区, 降水中心位于郑州市。24 h 累计降水雨带呈东南—西北走向, 降水集中在河南省中北部地区, 降水中心位于郑州市, 模拟降水中心略偏西, 但降水中心最大值位置与实测相差不大, 降水中心范围及强度模拟较为准确。综上所述, CMA-MESO 模式对此次极端暴雨过程的模拟效果较好, 基于此模式的水汽与高低空急流影响的敏感性试验对比分析结果对于研究其影响及机制是有意义的。

分别对比图 2b 与 2c、2d、2e、2f 可以得出: 当预报区域内整体水汽含量降为实际的 0.1 倍时, 河南省及其周边地区的降水几乎全部消失; 在 Exp-0.5 试验中, 仅河南省北部地区有降水, 降水量均在 4 mm 以下; 在 Exp-0.7 试验中, 河南省西北部及西南部存在降水, 其他区域降水消失, 降水中心位于河南省北部, 降水量均在 25 mm 以下, 郑州市内降水在 4 mm 以下; 在 Exp-0.9 试验中, 河南省及其周边地区 13 mm 以上各级降水范围明显缩小, 降水中心位于郑州市西侧, 最大值为 147.8 mm, 强度大大降低。随着水汽含量的减少, 河南省及其周边地区降水范围逐渐减小, 降水逐渐集中于河南省北部, 直至该时段内无降水。降水中心强度及位置对水汽响应十分敏感, 水汽含量发生微小变化时, 降水中心强度便会大幅度减小, 中心位置向西北移动。

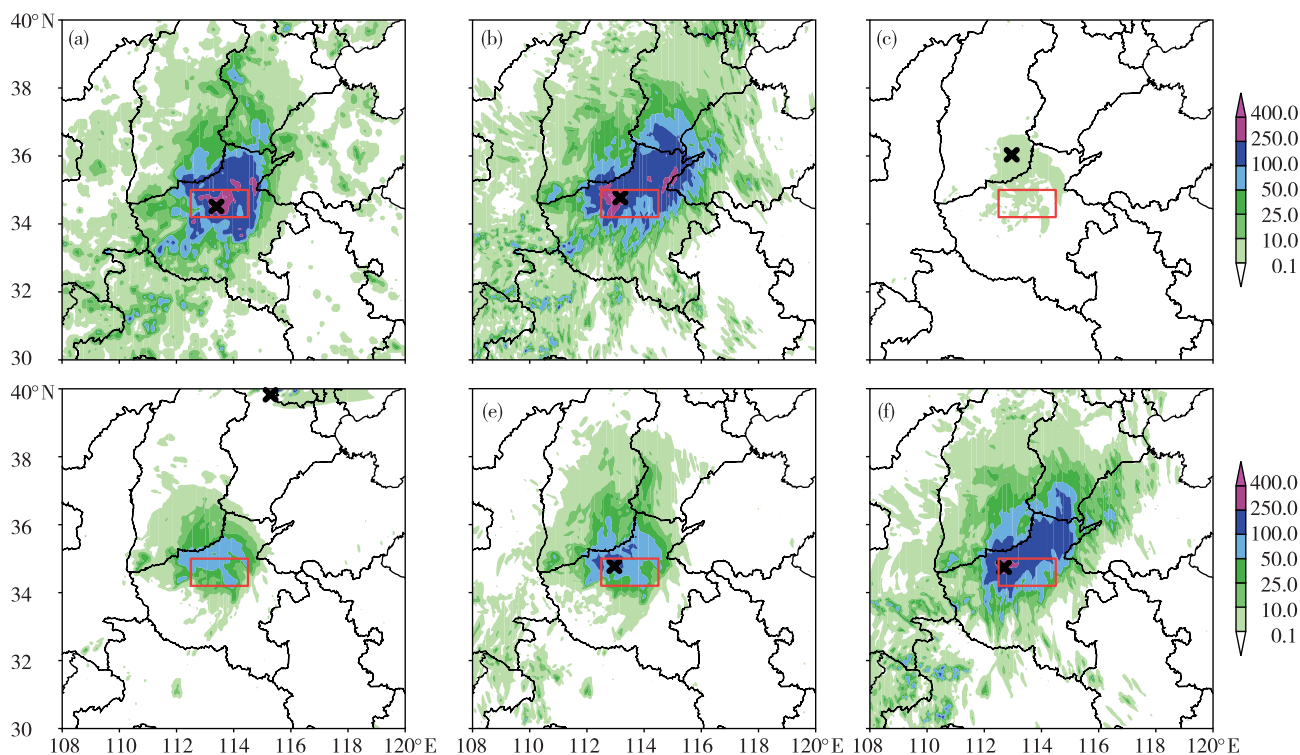


图3 2021年7月20日08时—21日08时实测及预报的24 h累计降水量(单位:mm;a.实际降水,b. Exp-CTRL, c. Exp-0.1, d. Exp-0.5, e. Exp-0.7, f. Exp-0.9)

Fig.3 The same as Fig.2, but for 24-h accumulated precipitation from 08:00 BST 20 to 08:00 BST 21 July 2021

当预报区域内整层大气水汽含量减小为实际的 0.1 倍时, 20 日 08 时—21 日 08 时 24 h 累计降水量(图 3c)均在 10 mm 以下, 远小于 Exp-CTRL 中同时段降水量, 降水中心移至河南省北部, 其他地区无降水。与 Exp-CTRL 相比, Exp-0.5 试验(图 3d)中, 仅河南省北部及其以北小部分地区存在降水,

其他地区无降水, 降水量均在 100 mm 以下, 降水集中在河南省北部; Exp-0.7 试验(图 3e)中, 河南省西南侧、北部及其以北较大范围地区存在降水, 降水中心位于郑州市西北部, 降水量均在 150 mm 以下, 降水中心最大值为 135.9 mm, 与 Exp-CTRL 相比强度大幅度减小; Exp-0.9 试验(图 3f)中, 100 mm 以

上降水范围明显减小,降水中心最大值为 325.0 mm,相比于 Exp-CTRL 减小了 41%,降水中心偏西北。

2.3.2 水汽输送分析

对于一次暴雨过程模拟,初始场的水汽含量对降水预报的影响不仅在水汽本身,水汽的输送及辐合辐散对降水范围和强度也有十分重要的影响。图 4 给出了 2021 年 7 月 20 日 17 时 850 hPa 高度上水汽通量与水平流场。由图 4a 可以看出,来自洋面的东南气流携带大量水汽向内陆输送,到达郑州市

后,由于地形的阻挡作用,东南气流北部的部分气流转为偏西气流,与东南气流以及来自印度洋的偏南气流形成气流辐合区,在郑州市上空累积了大量水汽。Exp-0.1 试验(图 4b)中,与 Exp-CTRL 相比,河南省及其周边地区水平风速减小,水汽输送明显减弱,郑州市上空水汽辐合区消失,水汽输送集中在河南省西北部山区之间。通过对比图 4a 与 4c、4d、4e 可以看出,当水汽含量减少时,河南省及其周边地区水汽输送强度减弱,郑州上空的水汽辐合区强度减小,位置无明显变化。

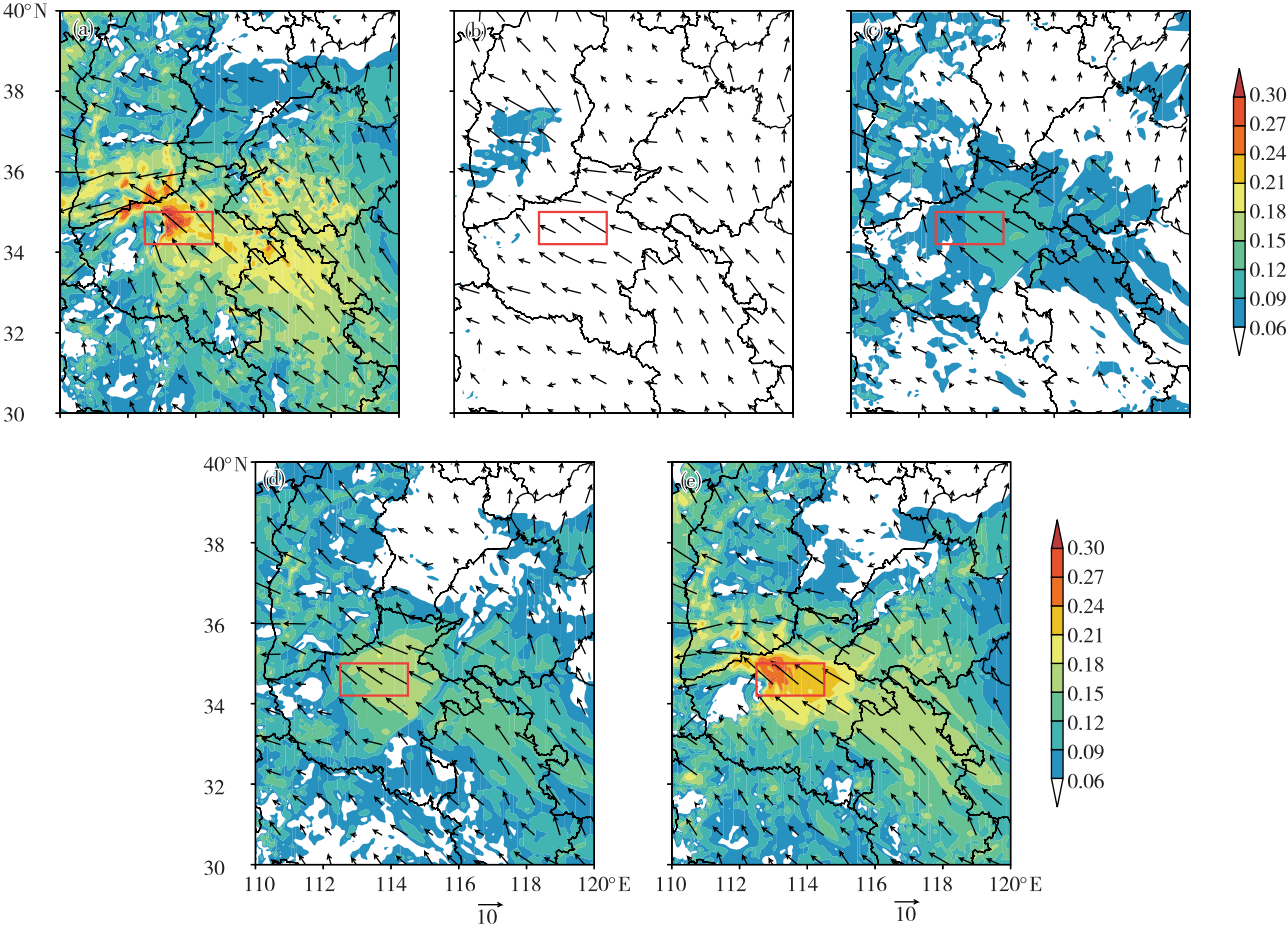


图 4 2021 年 7 月 20 日 17 时 850 hPa 高度层上水汽通量(色阶,单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$)与水平流场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; a. Exp-CTRL, b. Exp-0.1, c. Exp-0.5, d. Exp-0.7, e. Exp-0.9)

Fig.4 Simulated water vapor flux (color scale, units: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$) and horizontal flow field (wind vector, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 850 hPa at 17:00 BST 20 July 2021 (a. Exp-CTRL, b. Exp-0.1, c. Exp-0.5, d. Exp-0.7, e. Exp-0.9)

综上所述,降水量对于水汽含量十分敏感,随着水汽含量的减小,河南省及其周边地区降水范围及强度均减小,降水范围逐渐向河南省北部地区缩小,当水汽含量降为实际的 0.1 倍时,降水基本消失。由此可见,水汽含量的微小变化便能使降水中心最大值出现大幅度减小。此外,水汽含量的变化对水汽输送的影响十分明显,随着水汽含量的减

小,河南省及其周边地区水汽输送强度减弱,郑州市上空的气流辐合区强度减弱,累积水汽含量减小。

3 急流敏感性的试验模拟分析

由 1.2 节中对此次降水过程的环流形势分析可知,高低空急流对高空辐散区形成、北方冷空气南下、低层气流辐合与水汽输送都有影响。为研究高

空急流与低空急流对对流层高低层气流辐合辐散、对流及降水的影响,设计了减弱高低空急流的敏感性试验,通过分别减弱预报初始场中高空与低空急流区气流强度,分析其对降水、高低空气流以及垂直运动的影响。

3.1 试验方案设计

高低空急流对暴雨过程中降水的形成至关重要,使用 CMA-MESO 模式针对此次暴雨过程设计 3 组敏感性试验,所用模式及模拟时间与第 2 部分中相同。Exp-CTRL 中模式模拟区域内取真实大气的流场,不改变水平速度。敏感性试验中选取预报区域内低空急流或高空急流较为明显区域内的水平风场,使用 9 点平滑公式(公式(1))对水平风速进行平滑计算。保证在保留气流大致趋势的情况下,削弱低空急流或高空急流的强度,以研究高低空急流对暴雨的影响。

$$F_{i,j}^{x,y} = F_{i,j} + \frac{S}{2}(1 - S) \\ (F_{i+1,j} + F_{i,j+1} + F_{i-1,j} + F_{i,j-1} - 4F_{i,j}) + \\ \frac{S^2}{4}(F_{i+1,j+1} + F_{i-1,j+1} + F_{i-1,j-1} + F_{i+1,j-1} - 4F_{i,j}), \quad (1)$$

式中 F 表示被平滑的变量, $F_{i,j}$ 表示网格中第 (i,j) 个格点上 F 变量的值, $F_{i,j}^{x,y}$ 表示在 (x,y) 水平方向上经过 9 点平滑后第 (i,j) 个格点上 F 变量的值, S 为平滑系数,此次试验中平滑系数取 0.5。每组试验针对预报初始场中不同区域中不同高度的急流进行多次平滑。若平滑次数过低,高低空急流特征依旧存在,无法达到试验的要求;若平滑次数过多,则会消除修改范围内基本环流的特征,干扰对高低空急流影响的研究。经过多次试验对比评估,选择对修改范围内的风场进行 1 200 次平滑,得到减弱后的水平流场。

(1) 减弱低空急流(记为 Exp-LOW)。根据 2021 年 7 月 20 日 08 时实测水平流场,对 $110^\circ \sim 120^\circ\text{E}$, $31^\circ \sim 38^\circ\text{N}$, $1\ 000 \sim 650\ \text{hPa}$ 范围内的水平速度进行 9 点平滑,并将平滑后的流场代入数值模式进行模拟,用于研究低空急流对暴雨的影响。

(2) 减弱高空急流(记为 Exp-HIGH)。将 2021 年 7 月 20 日 08 时实测水平流场中 $110^\circ \sim 118^\circ\text{E}$, $32^\circ \sim 38^\circ\text{N}$, $350 \sim 100\ \text{hPa}$ 内的水平风速取出,进行 9 点平滑计算并以此作为初始场代入模式进行模拟,用以研究此次暴雨过程中高空急流的影响。

(3) 减弱高低空急流(记为 Exp-BOTH)。同时减弱高低空急流,范围与 Exp-LOW、Exp-HIGH 试验

中相同,并将平滑后的流场作为初始场进行数值模拟,用以研究高低空急流及其耦合作用对暴雨的影响。

图 5 为 2021 年 7 月 20 日 08 时(即预报初始场)200 hPa 和 850 hPa 高度上减弱高低空急流后与 Exp-CTRL 的对比情况。200 hPa 高度(图 5a)上, 113°E 以西地区为西风气流,至河南省中部气流增强达到急流强度,并出现气流分支,北支位于河南省北部,为偏西南急流,南支位于河南省东南部,为偏西北急流,郑州市上空对流层上部形成了气流辐散区。850 hPa 高度(图 5c)上,台风“烟花”与西太平洋副高共同作用,在副高南侧形成明显的东南风急流,至郑州市地区上空,与偏南气流、偏东气流形成气流辐合区。由图 5a 与图 5b 可以看出,经过平滑后的水平流场与 Exp-CTRL 相比有明显变化,气流切变线减弱,河南省北部的西南急流强度明显变小,郑州市对流层上层的气流辐散区强度大大减弱。850 hPa 高度(图 5c 与图 5d)上,河南省范围内偏东气流与偏南气流转为偏东南气流,郑州市上空对流层低层的气流辐合区消失,河南省西北部地区风速大大减小。综上所述,经过 9 点平滑后的水平流场变得更加均匀,急流处风速减小,气流的辐合辐散强度明显减弱,因此减弱高低空急流的试验具有可行性。

3.2 试验结果

3.2.1 降水分析

图 6 为试验中 2021 年 7 月 20 日 14—20 时 6 h 累计降水。减弱低空急流(图 6b)后,与 Exp-CTRL 相比降水中心最大值减少 42.9 mm,降水中心范围减小,降水最大值偏西南。减弱高空急流(图 6c)后,降水中心最大值比 Exp-CTRL 中降水中心最大值减少了 11.6 mm,与减弱低空急流对比,减弱高空急流对降水的位置、范围和强度影响不大。高低空急流均减弱后,降水中心最大值比 Exp-CTRL 减少 46.6 mm,降水中心范围缩小,最大值位置偏西南。因此,此次暴雨过程减弱高空急流对降水的强度、范围及位置的影响较小。低空急流对降水影响较为明显,低空急流减弱后,降水范围与强度均减小,降水中心位置向西南移动。高低空急流均减弱后对降水的影响与减弱低空急流后模拟结果类似,对降水的减弱效果更强。

3.2.2 高低空急流分析

为分析 Exp-CTRL 中高低空急流的变化,绘制了模拟开始 9 h 后,即 2021 年 7 月 20 日 17 时空

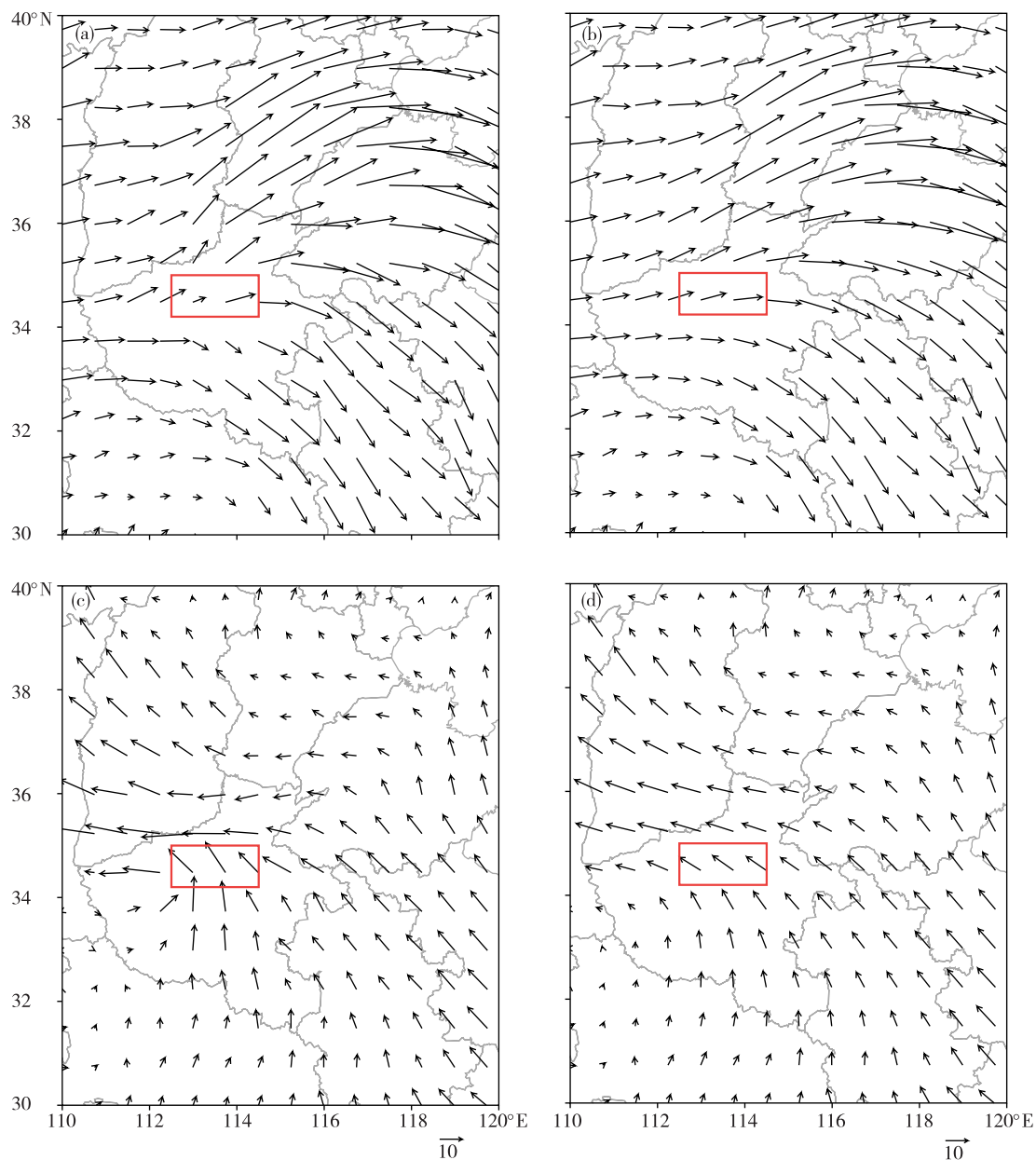


图5 2021年7月20日08时200 hPa(a. Exp-CTRL, b. Exp-BOTH)和850 hPa(c. Exp-CTRL, d. Exp-BOTH)水平风场(风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.5 Horizontal wind field (wind vector, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 200 hPa (a. Exp-CTRL, b. Exp-BOTH) and 850 hPa (c. Exp-CTRL, d. Exp-BOTH) at 08:00 BST 20 July 2021

(200 hPa)与低空(850 hPa)风场分布(图7a和图7d)。与200 hPa高度处的初始场(图5a)相比,模拟开始9 h后,河南省对流层高层的反气旋性显著增强,风速加大,河南省以北地区风速明显超过急流级别,39°N附近的风速甚至超过了 $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。郑州市位于脊线后部,受西南风控制。在200 hPa高度处的初始场(图5a)中,郑州市上空存在明显的气流辐散区,积分9 h后(图7a)气流辐散区不再明显。而850 hPa高度依旧存在明显的气流辐合区

(图7d),但与08时(图5c)相比,位置向北移动,主要集中于太行山南侧。

图7b(图7e)为在初始场中减弱高空(低空)急流试验中,模拟9 h后的河南省及其周边地区上空200 hPa(850 hPa)高度处风矢量与Exp-CTRL中相同时间、相同位置处风矢量的矢量差及其长度。图7c与图7f分别表示在同时减弱高低空急流试验中7月20日17时河南省及其周边地区上空200 hPa与850 hPa高度处与Exp-CTRL的风矢量差及其长

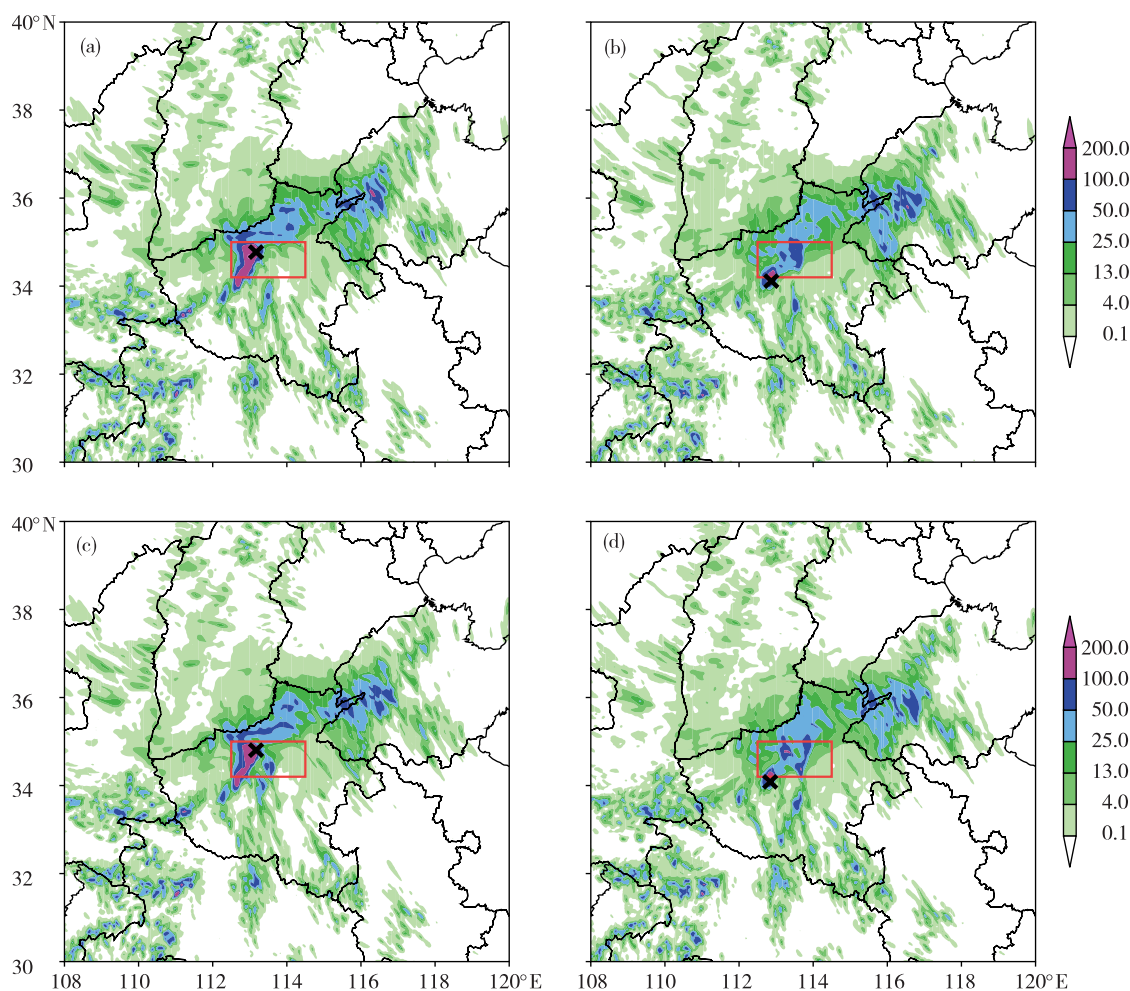


图6 2021年7月20日14—20时预报的6 h 累计降水量(单位:mm;a. Exp-CTRL, b. Exp-LOW, c. Exp-HIGH, d. Exp-BOTH)

Fig.6 6-h accumulated precipitation (units: mm) forecast from 14:00 BST to 20:00 BST 20 July 2021 (a. Exp-CTRL, b. Exp-LOW, c. Exp-HIGH, d. Exp-BOTH)

度。在风矢量差图(图7b、c和图7e、f)中,若某个格点处的矢量指向东北方,那么则说明相较于Exp-CTRL,该试验中相同格点处的南风与西风增大;若指向西南方向,则南风与西风减小;若指向西北方向,则南风增大,西风减小;若指向东南方向,则南风减小,西风增大,风矢量差长度可以综合衡量两试验中风向与风速变化程度。从图7b中可以看出,减弱高空急流后,风矢量差长度的变化主要集中于河南省的东部及其以东地区,变化小于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,郑州市上空变化不明显,对应降水形态(图6c)变化也较小。当同时减弱高低空急流后,200 hPa 高空急流(图7c)风矢量变化范围明显增大,主要变化区域位于河南省北部及其东北地区,最大值超过 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这将使高空辐散区向河南省的东北方向移动。由图7f可以分析低空急流的变化,郑州市中西部的风矢量差主要以偏西方向为

主,郑州市南部主要以偏北方向为主,说明郑州市低空的偏东风和偏南风减弱,而这将导致来自偏东风和偏南风的水汽输送减少;与高空急流的变化相适应,将导致降水量的减小和降水中心位置东移(图6d)。当单独减弱低空急流(图7e)时,郑州市西部地区上空有明显的西南向矢量差,说明此时该地区南风减弱,因此在Exp-LOW试验(图6b)中,郑州市西部的降水中心位置与Exp-CTRL相比显著偏南。郑州市东部地区风矢量差方向偏东,因此此时该地区东风明显减弱,降水中心由 112.5°E 向东移动至 113.5°E (图6b)。

3.2.3 垂直速度分析

强烈的上升运动是暴雨形成的基本条件之一,高低层急流的改变必会引起垂直速度发生变化,以2021年7月20日17时 113°E 的垂直速度剖面图(图8)为例分析高低空急流的变化对此次暴雨过程

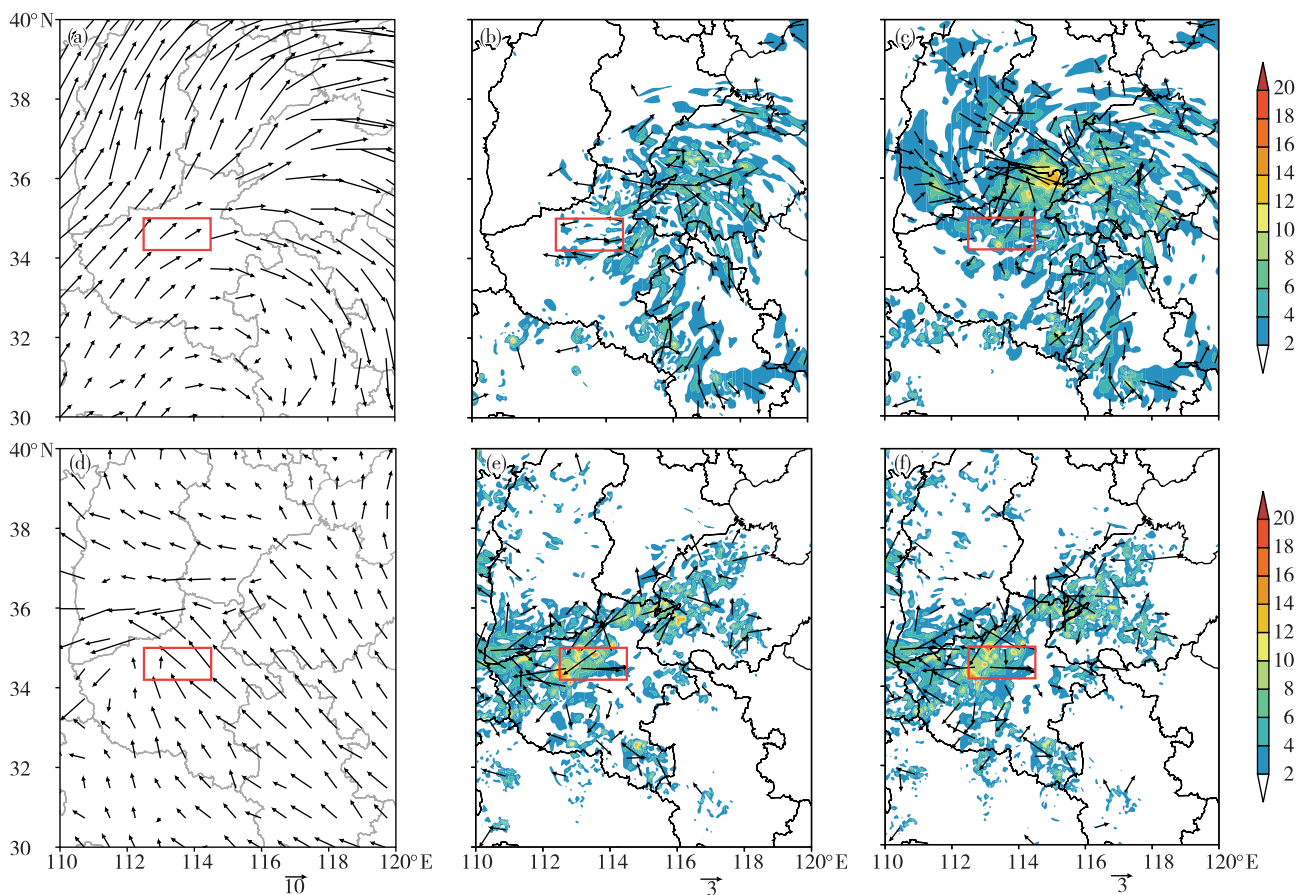


图7 2021年7月20日17时200 hPa(a,b,c)与850 hPa(d,e,f)的Exp-CTRL试验模拟的风场(a,d;风矢,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及敏感性试验模拟的风场之差(黑色箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,色阶表示箭头长度的大小;b. Exp-HIGH减去Exp-CTRL, c,f. Exp-BOTH减去Exp-CTRL, e. Exp-LOW减去Exp-CTRL)

Fig.7 Wind field (a/d; wind vector, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) simulated by Exp-CTRL test and the difference with the wind fields simulated by sensitivity tests (black arrow, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, color scale indicates the size of the arrow length; b. Exp-HIGH minus Exp-CTRL; c/f. Exp-BOTH minus Exp-CTRL; e. Exp-LOW minus Exp-CTRL) at 200 hPa (a/b/c) and 850 hPa (d/e/f) at 17:00 BST 20 July 2021

中垂直速度的影响。从图8b中可以看出,低空急流减弱后,Exp-CTRL(图8a)中郑州市上空存在的垂直上升中心强度大幅度减小,垂直厚度减小,垂直对流明显减弱。当高空急流减弱后(图8c),郑州市及其南北范围内的垂直速度变化并不明显。高低空急流均减弱后(图8d),垂直速度的变化与单独减弱低空急流的变化是同步的,但与单独减弱低空急流相比,郑州市上空对流减弱幅度更大。

4 结论与讨论

使用数值预报模式对2021年“7·20”郑州市特大暴雨过程进行数值模拟与水汽、高低空急流敏感性试验,讨论此次极端强降水过程中水汽和高低空急流的影响,分析结果如下:

(1)通过对比6 h和24 h累计降水的数值模拟

结果与实测值,可得CMA-MESO模式对此次极端强降水过程模拟效果较好。

(2)此次暴雨过程中水汽由东南气流与偏南气流输送并累积至郑州市上空。台风“烟花”北侧的东南急流将来自西太平洋与印度洋的水汽输送至河南省及其周边地区。台风“查帕卡”北侧东南气流携带南海面上的水汽,在登陆后转为偏南气流,到达郑州市上空后转为西南气流。西南气流与东南气流汇合,形成水汽辐合区,在郑州市上空累积大量水汽。

(3)降水和水汽输送对水汽含量十分敏感。随着水汽含量的减少,河南省及其周边地区风速减小,气流辐合区强度减弱,水汽累积减少,降水强度减小,降水中心逐渐北移至河南省北部,降水范围向河南省北部缩小。当水汽含量有微小的变化时,

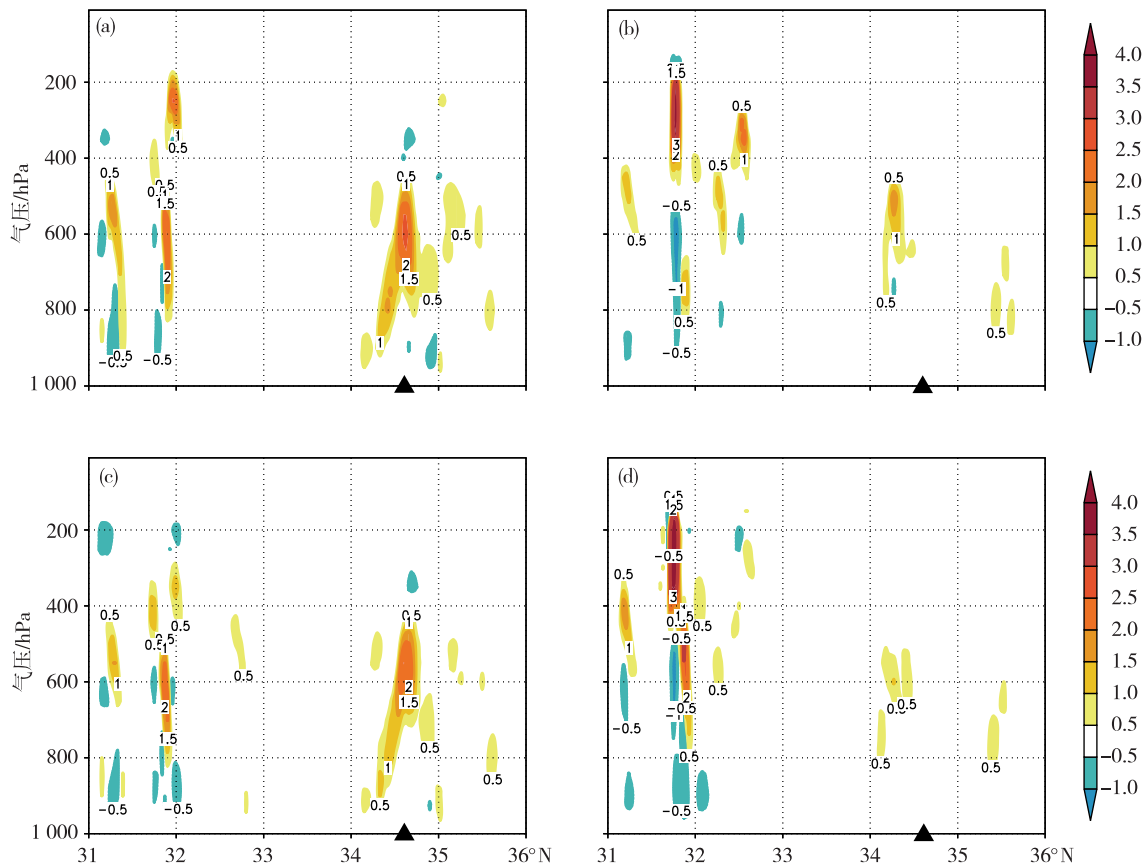


图8 2021年7月20日17时113°E的垂直速度(色阶,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)剖面图(a. Exp-CTRL, b. Exp-LOW, c. Exp-HIGH, d. Exp-BOTH;“▲”指示郑州市中心:34.7°N)

Fig.8 Simulated vertical velocity (color scale, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) profile along 113°E at 17:00 BST 20 July 2021 (a. Exp-CTRL, b. Exp-LOW, c. Exp-HIGH, d. Exp-BOTH; “▲” indicates that the latitude of the center of Zhengzhou is 34.7°N)

水汽输送强度、降水中心范围及最大值便会出现大幅度减小。

(4)此次极端强降水过程中主要是低空急流对降水产生影响,高空急流的影响与低空急流相比较小。低空东南风急流到达郑州市地区上空时,与偏南气流、偏东气流形成气流辐合区,在低层气流辐合的强迫下,高层出现辐散区,在郑州市上空形成强上升运动中心,为暴雨形成提供了良好的对流条件。低空急流减弱后,郑州市上空水汽输送减小,降水中心最大值减小,降水中心位置偏东南,郑州市上空的垂直上升运动中心强度大幅度减小。

郑州“7·20”极端暴雨过程是在稳定的天气背景、强烈的辐合上升运动、充沛的水汽输送及多尺度系统相互作用等多种条件共同影响下产生的。文中主要分析了水汽与高低空急流的作用机制,但此次特大暴雨事件仍旧存在众多未知因素,如低空急流的维持机制、极端降水关键云微物理过程及复杂地形下对流系统的触发与发展机制等。在实

际模拟的过程中,针对郑州“7·20”极端暴雨依旧存在强降水落区位置预报不准确、降水强度估计不足等问题,需要综合多源观测资料,使用诊断分析、数值模拟等多元手段对此次极端降水事件成因进行更加深入的细致剖析,为未来特大暴雨过程的准确定量预报提供理论依据。

参考文献:

- [1] 徐国强,张迎新.“96.8”暴雨的水汽来源及对水汽敏感性的模拟分析[J].气象,1999,25(7):13-17.
- [2] 王宇虹,徐国强,贾丽红,等.太行山对北京“7.21”特大暴雨的影响及水汽敏感性分析的数值研究[J].气象,2015,41(4):389-400.
- [3] 姜晓飞,熊秋芬,周雅蔓,等.新疆冬春季强降水过程的水汽来源及输送特征分析[J].海洋气象学报,2021,41(3):52-59.
- [4] 曹楚,王忠东,吴舒婷.台风“莫兰蒂”(1614)影响期间浙江暴雨成因分析[J].浙江气象,2019,40(2):25-31.
- [5] 王忠东,曹楚,程瀛.相似路径两台风(1513和1521)引

- 发浙江暴雨成因对比分析[J].浙江气象,2020,41(1):6-14,26.
- [6] 丁一汇.陶诗言先生在中国暴雨发生条件和机制研究中的贡献[J].大气科学,2014,38(4):616-626.
- [7] 沈晓玲,桑明慧.2018年登陆上海两个台风暴雨结构特征综合对比分析[J].气象科技,2020,48(2):274-283.
- [8] 陶诗言,丁一汇,周晓平.暴雨和强对流天气的研究[J].大气科学,1979,3(3):227-238.
- [9] 陈健康,赵玉春,陈赛,等.闽中南罕见冬季锋前暴雨个例特征分析[J].气象,2019,45(2):228-239.
- [10] 谭政华,巩远发.高低空急流的配置对2015年8月3日辽宁暴雨的影响机制[J].成都信息工程大学学报,2018,33(1):78-83.
- [11] 文萍,许映龙,柳龙生.台风“山竹”(1822)引发华南暴雨过程机制分析[J].海洋气象学报,2019,39(3):29-35.
- [12] 张芹,王恬茹,张秀珍,等.一次副热带高压边缘切变线暖区暴雨特征分析[J].海洋气象学报,2020,40(3):102-110.
- [13] 陈博,李新峰.2018年第18号台风“温比亚”引发大范围暴雨过程的诊断分析[J].民航学报,2019,3(4):28-34.
- [14] 高晓梅,李峰,王文波,等.台风“利奇马”引发山东极端暴雨的多尺度特征分析[J].海洋气象学报,2022,42(2):33-43.
- [15] 孙炜文,郭达烽,陈云辉.急流对江西省一次暴雨过程的作用以及模式预报检验分析[J].江西科学,2018,36(5):814-820.
- [16] 靳莉君,黄昌兴,朱春子,等.2017年6月湖南致洪暴雨的天气分析[J].水文,2018,38(5):91-96.
- [17] 刘蕾,周晶,付伟,等.安徽沿江一次连续性暴雨过程中急流特征分析[J].气象科学,2018,38(4):545-552.
- [18] 全美兰,于扬,吴春英,等.高低空急流在一次暴雨过程中的动力作用[J].中国农学通报,2014,30(35):220-226.
- [19] 蒋帅,周莉,尹依雯.湖南省两次副高控制下暴雨过程诊断分析[J].湖北农业科学,2020,59(15):28-36.
- [20] 任丽,赵柠,赵美玲,等.两次副热带高压北侧暖锋暴雨动力热力诊断[J].高原气象,2021,40(1):61-73.
- [21] 蒋帅,尹依雯.洞庭湖地区一次持续性暴雨特征诊断分析[J].气象科技进展,2020,10(3):99-106.
- [22] 张入财,田金华,陈超辉,等.郑州“7·20”特大暴雨极端性成因分析[J].气象与环境科学,2022,45(2):52-64.
- [23] 冉令坤,李舒文,周玉淑,等.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,2021,45(6):1366-1383.
- [24] 孙跃,肖辉,杨慧玲,等.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,2021,45(6):1384-1399.
- [25] 史文茹,李昕,曾明剑,等.“7·20”郑州特大暴雨的多模式对比及高分辨率区域模式预报分析[J].大气科学学报,2021,44(5):688-702.