

李超,崔春光,徐慧燕,等,2022. 河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象, 48(12):1497-1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al, 2022. Characteristics associated with the transport, budget, conversion of water vapor and their impact on localized precipitation during the Henan severe torrential rain event on 20 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(12):1497-1511(in Chinese).

河南“21·7”特大暴雨水汽输送、收支和转化特征 对局地强降水的影响机制研究*

李 超^{1,2} 崔春光¹ 徐慧燕³ 王晓芳¹ 李 艳² 汪小康¹ 许发雷² 高 媛¹

1 中国气象局武汉暴雨研究所,暴雨监测预警湖北省重点实验室,武汉 430205

2 兰州大学大气科学学院,兰州 730000

3 杭州师范大学信息科学与技术学院,杭州 311121

提 要: 针对河南“21·7”特大暴雨的极端降水天气过程,利用 FNL 大气再分析资料、国家基准站降水观测数据和高分辨率的数值模拟结果,开展了暴雨多尺度系统协同作用下水汽输送、收支及转化特征对极端降水的影响机制研究。结果表明:通过强盛稳定的台风烟花与中高纬稳定的大气环流形势共同影响下建立的远距离水汽输送通道,使海上的水汽源源不断地被输送到内陆极端降水区。在局地中尺度低值系统产生的动力辐合和迎风坡地形的阻挡作用的共同影响下,远距离输送到极端降水区附近的水汽被有效地汇聚在极端降水区附近,并且依靠低层水汽动力辐合机制,使局地汇聚的水汽被进一步输送至对流层中高层,以此促进对流的发展。在对流上升运动和迎风坡地形抬升作用的共同影响下,通过增强气流的垂直上升运动,使更多的水汽被输送到对流层中高层,促使水汽向云冰粒子和雹粒子的凝华转换过程增强,最终导致降水效率得到显著提升,降水效率在地形迎风坡处显著增强表征的水汽向雨水的高效转化,对极端降水的演变起到了极好的指示作用。上述研究不仅系统性揭示了暴雨多尺度系统影响下极端降水区内局地水汽的主要来源与消耗过程,而且从水汽诊断的角度加深了对极端降水发生机理的认识。

关键词: 河南特大暴雨,多尺度系统,水汽输送,区域水汽收支,降水效率

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.072701

Characteristics Associated with the Transport, Budget, Conversion of Water Vapor and Their Impact on Localized Precipitation During the Henan Severe Torrential Rain Event on 20 July 2021

LI Chao^{1,2} CUI Chunguang¹ XU Huiyan³ WANG Xiaofang¹ LI Yan²

WANG Xiaokang¹ XU Falei² GAO Yuan¹

1 Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Wuhan Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

2 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 School of Information Science and Technology, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121

Abstract: Targeting the severe torrential rain process in Henan Province on 20 July 2021, this paper focuses on revealing the features of the water vapor transport, the budget of water vapor flux and the transformation

* 国家自然科学基金面上项目(41975058)、国家自然科学基金青年基金项目(42105010、41705019、42105012)、国家自然科学基金气象联合基金项目(U2142202)和浙江省自然科学基金项目(LQ20D050001)共同资助

2022 年 3 月 24 日收稿; 2022 年 7 月 27 日收修定稿

第一作者:李超,主要从事中尺度气象学和大气动力学研究. E-mail:276385240@qq.com

通讯作者:崔春光,主要从事中尺度暴雨机理和资料同化研究. E-mail:cgcui@whhr.com.cn

of water vapor as well as the associated impact on the variation of local precipitation based on FNL reanalysis data, gauge precipitation data and high-resolution simulation results. The results show that the water vapor over the ocean was continuously transported to the severe precipitation area by the water vapor channel built by the synergistic effect between the powerful and quasi-stationary Typhoon In-Fa over the East Sea and the stable atmospheric circulation pattern in the middle and high latitude zone. Then the local water vapor constrained within the extreme precipitation area was further transported from the low level to the middle and high level depending on the dynamical convergence mechanism in the low-level troposphere, which was dominated by the mesoscale synoptic system and the blocking effect of the windward slope. The vertical transport of the water vapor was indeed favorable for the reinforcement of the convection in the extreme precipitation area. Finally, under the synergistic effect of the convective ascending motion and the orographic lifting mechanism of the windward slope, more water vapor was vertically transported to the middle and higher troposphere by the reinforced vertical airflow, which stimulated the desublimation process between the water vapor and the ice-phase particles, resulting in the remarkable increase of the precipitation efficiency. The remarkable increase of the precipitation efficiency within the windward slope region was directly responsible for the occurrence of the severe torrential rain in the perspective of micro-physical processes. This paper not only comprehensively reveals the main source and the consumption process of the local water vapor dominated by the multi-scale synoptic system in the extreme precipitation event, but also advances the understanding to the occurrence mechanism of the extreme precipitation.

Key words: severe torrential rain in Henan Province, multi-scale synoptic system, water vapor transport, water vapor regional budget, precipitation efficiency

引 言

河南省境内下垫面地形复杂,每年在强盛的亚洲夏季风、东移西风带天气系统以及局地天气系统的共同影响下,极易诱发致灾性极强的降水天气过程。2021年7月20日的河南省区域性特大暴雨过程(简称“21·7”特大暴雨)就是在上述背景条件下发生的,此次降水过程的实况降水数据统计显示,此次暴雨过程共导致600余个站降水超过250 mm,7月20日郑州市6 h累计降水达到382 mm,24 h累计降水高达624.1 mm,最大小时雨强甚至达到 $201.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,该单小时降水量数值刷新了中国大陆区域内的小时累计降水的观测记录(蔡芩宁等,2021;杨浩等,2021)。因此,无论就降水强度而言,还是就达到特大暴雨标准的区域范围而言,均表明此次特大暴雨过程具有显著的极端性降水特征(冉令坤等,2021;Yin et al,2022;苏爱芳等,2021;苏爱芳等,2022;张霞等,2021;汪小康等,2022;孔期等,2022)。

卢萍等(2009)指出水汽条件对于暴雨的发生发展有重要影响,暴雨的强度、最大降水发生时间极大

地依赖于初始水汽场条件,冉令坤等(2021)、Yin et al(2022)、张霞等(2021)围绕此次极端暴雨过程的大量初步研究结果证实,极端降水的发生发展与水汽的输送、收支及转化之间存在密切的联系。根据实况卫星监测结果发现,此次极端暴雨持续期间,发展强盛的台风烟花一直在东海海面稳定维持,而Stohl et al(2008)、徐洪雄等(2014)、单磊等(2014)、王婧羽等(2014)围绕台风远距离诱发暴雨的研究结果证实,海面稳定维持的台风产生的远距离水汽输送有利于局地强降水的发生发展。此外水汽在极端降水区域内净收支的演变,以及水汽的局地变化、垂直输送以及辐合辐散作用也被证实对局地降水的演变会产生重要的影响(王婧羽等,2014;李启华等,2018;陈红专等,2019)。此外,中尺度地形作用被证实同样对水汽的局地分布和演变有重要影响,迎风坡地形产生的阻挡作用有利于迎风坡前的对流层低层产生水汽辐合(徐国强等,1999;王宇虹等,2015),继而有利于局地强降水的出现和增强。而此次极端降水落区主要位于河南省西部的山地向平原过渡的区域,由此可以预见河南省西部的中尺度地形对于局地降水的增幅也会产生重要的影响。被汇聚在极端降水区内的水汽通过相应的水汽凝结或凝华过

程,最后转化为雨水下落至地面,上述水汽转化成雨水的过程可以通过降水效率这一物理量进行量化的诊断,例如崔晓鹏(2009)通过热带西太平洋地区降水效率的诊断结果,发现水汽辐合是对流降水最主要的水汽源,而局地大气变干则是层状降水最主要的水汽源。而 Shen et al(2021)通过降水效率方程(Sui et al,2007)的量化诊断结果,发现水汽的蒸发、水汽的局地变化以及水汽的辐合辐散作用在降水的不同阶段对降水的贡献作用存在显著差异。上述降水效率的相关研究表明通过降水效率的诊断有助于进一步揭示水汽的消耗和转化过程。

已有的研究从多个方面证实了有利的水汽条件对于局地强降水的出现和维持有着重要的影响,然而过去的研究主要关注水汽输送、水汽区域收支和水汽动力辐合等局地水汽的产生过程,尤其对暴雨发生时的水汽来源过程和水汽在强降水区有效汇聚的动力过程有了较为全面的认识,但对于水汽转化和水汽消耗过程的研究较少,导致对局地水汽影响降水演变机制的认识仍然存在许多不足之处。针对上述不足之处,本文在充分揭示水汽输送、水汽收支和水汽动力辐合等过程对局地降水影响的基础上,通过降水效率的诊断分析,进一步揭示了水汽的转

化和消耗过程对局地降水演变的影响机制。本文针对此次河南“21·7”特大暴雨过程,从水汽的来源、输送和消耗等各个过程开展水汽诊断研究,试图更加系统深入地揭示水汽影响极端降水演变的机理。

1 资料和方法

1.1 原始数据

本文所用原始资料主要包括:时间分辨率为 6 h,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向为 41 层的 FNL 大气再分析资料,河南省及其周边省份的国家标准气象站和区域自动加密站的逐小时降水观测资料。

1.2 中尺度数值模式参数设置

由于 FNL 再分析资料时空分辨率的限制,本文在开展中尺度水汽收支以及云微尺度的降水效率的诊断分析时需要依赖更高时空分辨率的资料。因此利用 FNL 再分析资料,开展了从 2021 年 7 月 19 日 00 时(世界时)至 2021 年 7 月 21 日 00 时(世界时)降水过程的高分辨率 WRF 数值模拟,其中开展 WRF 数值模拟时设置的主要参数如表 1 所示。

表 1 开展 WRF 模拟的相关参数

Table 1 Related parameters for WRF simulation

嵌套层数	水平分辨率	输出时间间隔	垂直层数	格点数	云微物理方案	长波辐射方案	短波辐射方案	近地层方案	陆面方案	边界层方案
单层	9 km	60 min	33 层	630×400	MY 2-moment 方案	RRTM 方案	Dudhia 方案	Revised MM5 Monin-Obukhov 方案	Unified Noah 方案	YSU 方案

1.3 水汽输送、水汽区域收支及降水效率的具体计算方法

此外,本文主要研究河南“21·7”特大暴雨过程中多尺度系统协同作用下的水汽输送、收支及转化特征。在研究不同尺度系统对水汽的作用时采取的研究方法存在一定差异,详细研究方法分别如下:

在研究大尺度环流系统对水汽的影响时,主要关注大尺度环流系统对水汽的远距离输送作用,通过水汽通量的分布来反映水汽的远距离输送作用,具体计算方法如下:

单层水汽通量的计算方法为

$$Q = q \times V \tag{1}$$

式中: q 代表比湿, V 代表各个气压层的风速矢量。

整层水汽通量的计算方法为

$$Q_{all} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{100} q \times V dp \tag{2}$$

式中: p_s 代表地面气压, g 代表重力加速度。

在研究中尺度低值系统和局地中尺度地形对水汽的作用时,主要通过研究水汽的区域收支特征反映上述系统的作用,具体计算方法如下(丁一汇,2005):

边界积分的水汽输送表示为

$$F_u = \int_{lat2}^{lat1} Q_u dy \tag{3}$$

$$F_v = \int_{lon2}^{lon1} Q_v dx \tag{4}$$

式中: $lat1$ 、 $lat2$ 分别代表北边界、南边界所在的纬度, $lon1$ 、 $lon2$ 分别代表西边界与东边界所在的经

度, Q_u 、 Q_v 分别代表纬向水汽通量矢量与经向水汽通量矢量, F_u 代表穿过东边界与西边界的水汽通量, F_v 代表穿过南边界与北边界的水汽通量。

区域内的净水汽收支表示为

$$D_s = \sum (F_u, F_v) = F_1 - F_0 \quad (5)$$

式中: F_1 代表水汽输入, F_0 代表水汽输出。

在研究水汽通过相关云微物理过程转化为雨水时, 试图通过降水效率来定量化刻画水汽向与雨水转化的效率, 降水效率的具体计算方法如下 (Sui et al, 2007; Xu et al, 2017):

基于云微物理过程的降水效率表示为

$$CMPE = \frac{P_r}{Q_{WVOUT} + H(Q_{CM})Q_{CM}} \quad (6)$$

其中

$$Q_{WVOUT} = H(P_{LADJ})P_{LADJ} + H(P_{IADJ})P_{IADJ} + H(P_{SDEP})P_{SDEP} + H(P_{GDEP})P_{GDEP} \quad (7)$$

$$Q_{CM} = Q_{CMC} + Q_{CMR} + Q_{CMI} + Q_{CMG} + Q_{CMS} \quad (8)$$

式中: P_r 代表单位时段内的降水率, Q_{WVOUT} 代表水汽凝华或凝结过程导致的单位时段内水汽含量的变化, Q_{CM} 代表总水凝物含量在单位时段内的变化; Q_{CMC} 、 Q_{CMR} 、 Q_{CMI} 、 Q_{CMG} 、 Q_{CMS} 分别代表云水粒子、雨滴粒子、云冰粒子、霰粒子、雪粒子单位时段内含量的局地变化。 P_{LADJ} 、 P_{IADJ} 、 P_{SDEP} 、 P_{GDEP} 分别代表水汽凝结成云水粒子过程, 水汽凝华成云冰粒子过程, 水汽凝华成雪粒子过程, 水汽凝华成霰粒子过程。 $H(e)$ 代表 Heaviside 函数, 当 $e > 0$ 时, $H(e) = 1$, 当 $e \leq 0$ 时, $H(e) = 0$ 。

2 观测与数值模拟结果评估

2.1 实况背景环流场特征分析

通过分析河南“21·7”特大暴雨发生主要时段内的大尺度环流形势场 (图 1c, 1d) 发现, 由于东海海面上发展旺盛的台风烟花以及副热带高压北抬发展等因子的共同作用, 导致中高纬度带地区出现并维持“西低东高”的阻塞环流形势。上述深厚且稳定维持的阻塞环流形势, 使得中高纬度带内处于上游地区的长波槽无法继续向东移动发展, 这对于整个中高纬度带内大气环流形势的稳定维持起到了重要的推动作用。

进一步分析河南“21·7”特大暴雨发生主要时

段内的中尺度环流场特征 (图 1e, 1h) 发现, 极端降水区附近上空的对流层低层 850 hPa 等压面的低值系统最初以风场气旋式切变形式 (图 1e) 出现, 之后逐渐发展加强, 直至转变为闭合的低涡环流形式 (图 1f), 并且上述中尺度低值系统在稳定的大尺度环流背景形势影响下, 在河南省中西部附近地区维持稳定少动的状态。此外, 由于河南省西部地形迎风坡对偏东气流的阻挡作用, 使得处于地形迎风坡一侧极端降水区内的对流层低层 925 hPa 风场出现显著辐合特征 (图 1g, 1h)。不难看出, 上述呈现阻塞形势的大尺度环流条件以及迎风坡地形阻挡作用, 为中尺度低值系统在极端降水区附近的发展加强和稳定维持提供了十分有利的环境场条件。

2.2 模拟结果评估

鉴于此次河南“21·7”特大降水过程具有显著的局地极端降水特征 (Yin et al, 2022; 冉令坤等, 2021; 苏爱芳等, 2021a; 2021b; 张霞等, 2021; 汪小康等, 2021), 仅依靠再分析资料无法有效揭示降水系统的中小尺度结构演变特征, 因此需要进一步开展更高时空分辨率的数值模拟, 而在利用数值模拟结果开展降水机制诊断前, 有必要首先对模拟结果进行简单评估, 以证实数值模拟结果的可靠性。数值模拟效果评估分别围绕最强降水时段内逐小时累计降水和局地水平风场两个方面进行。

图 2 选取了最强降水时段内 20 日 16 时和 19 时 (北京时, 下同) 的逐小时降水分布的实况和模拟结果, 通过对比可以发现, 降水的实况和模拟保持了较好地一致性, 模拟与实况的局地强降水中心均位于河南省郑州市附近, 而且模拟的强降水中心位置相较于实况降水也呈现出稳定少动的特征, 有利于郑州市区域内过程累计降水量的持续增加。图 3 选取了 2021 年 7 月 20 日 00 时至 21 日 00 时强降水主要落区范围内 (图 2a, 2b 中虚线方框所示区域) 的区域面积平均降水强度随时间演变的实况 (图 3a) 和模拟 (图 3b) 结果, 通过对比可以发现, 就区域平均降水强度随时间演变特征而言, 模拟出的区域平均的最强降水强度相较于实况偏小 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右, 此外模拟的最强降水出现时刻由实况中的 16—17 时向后推迟至 18—19 时。

图 4 选取了最强降水时段内 20 日 14 时与 20 时对流层低层 850 hPa 等压面上局地水平风场的实

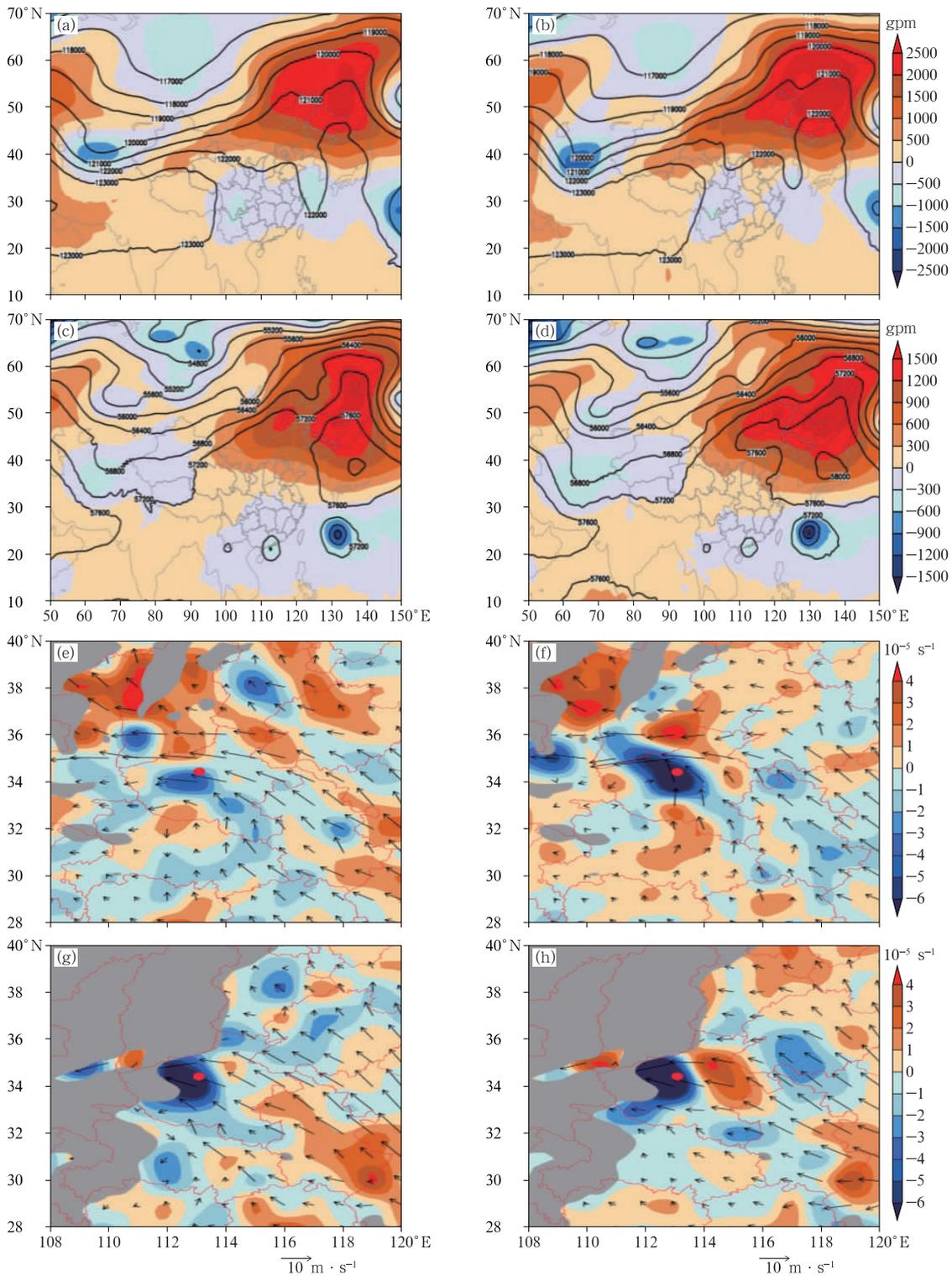


图 1 2021 年 7 月 20 日 (a, c, e, g) 02 时与 (b, d, f, h) 14 时 (a, b) 200 hPa、(c, d) 500 hPa 等压面大尺度环流形势场 (等值线: 位势高度, 单位: 0.1 gpm; 填色: 实际位势高度与 2001—2020 年 7 月同期的 20 年月平均位势高度之间的距平), 以及 (e, f) 850 hPa、(g, h) 925 hPa 等压面中尺度环流形势场 (风矢: 风场; 红色等值线: 位势高度, 单位: gpm; 阴影: 地形遮挡; 填色: 风场散度; 红色实心圆点: 郑州观测站所处位置)

Fig. 1 The observation of the large scale background atmospheric circulation at (a, b) 200 hPa and (c, d) 500 hPa (black contour: geopotential height, unit: 0.1 gpm; colored: anomaly between observation and annual average geopotential height of every July during the recent twenty years from 2001 to 2020), and the mesoscale background atmospheric circulation at (e, f) 850 hPa and (g, h) 925 hPa (vector: horizontal wind; red contour: geopotential height, unit: gpm; shaded: topographical coverage; colored: wind of divergence; red dot: location of Zhengzhou Station) at (a, c, e, g) 02:00 BT and (b, d, f, h) 14:00 BT 20 July 2021

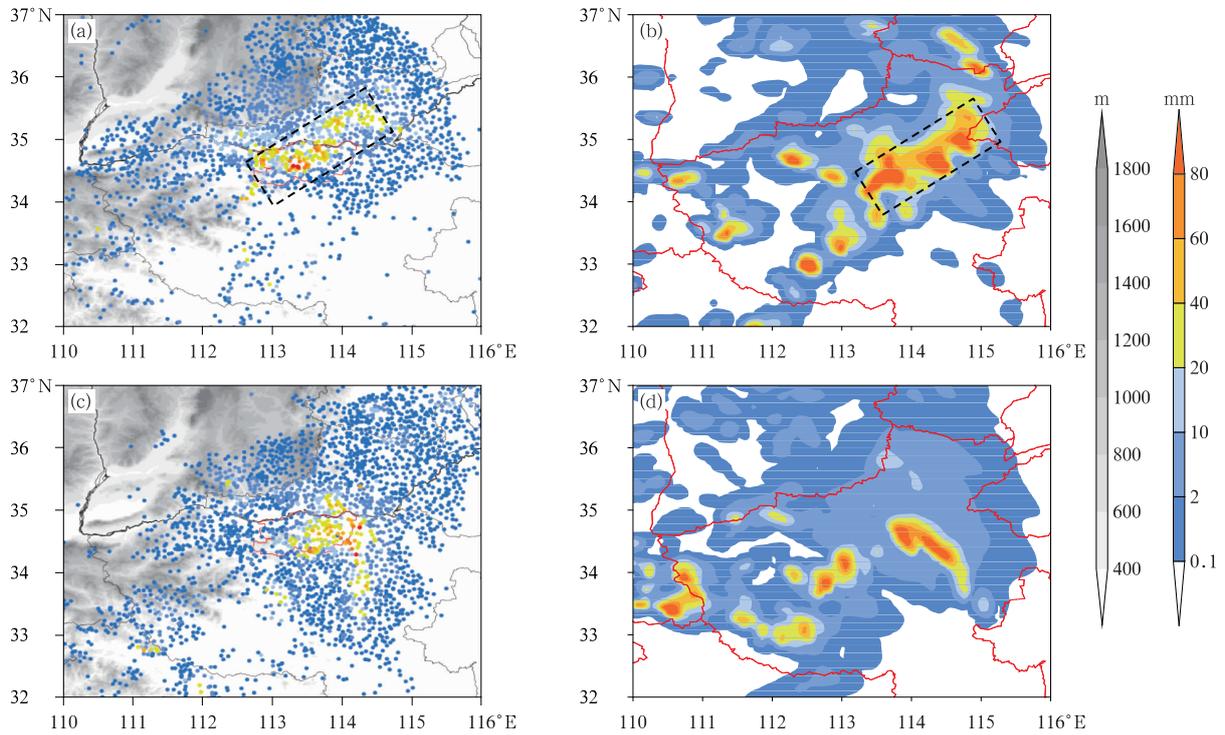


图 2 2021 年 7 月 20 日 (a,b)16 时与 (c,d)19 时对应的 (a,c)逐小时降水实况(站点降水)和 (b,d)模拟降水(格点降水)对比

(图 2a,2b 中虚线方框为逐小时降水强度采取面积平均的区域;阴影:地形)

Fig. 2 Comparison between (a, c) the gauge-observed precipitation and (b, d) the simulated precipitation of hourly accumulated precipitation at (a, b) 16:00 BT and (c, d) 19:00 BT 20 July 2021

(dotted box: average area of hourly precipitation intensity area in Figs. 2a, 2b; shaded: terrain)

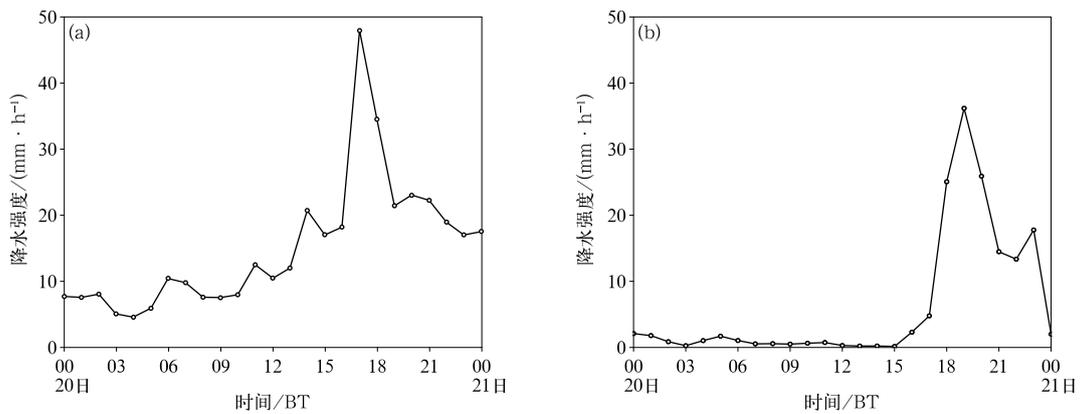


图 3 2021 年 7 月 20 日 (a)实况和 (b)模拟的强降水主要落区附近(图 2 中虚线方框)的区域面积平均逐小时降水强度随时间的演变

Fig. 3 Comparison between (a) observed and (b) simulated precipitation intensity in temporal variation of the regional average (The range to calculate the regional average is marked out with the dashed rectangle box in Fig. 2) on 20 July 2021

况和模拟结果。通过对比可以发现,虽然模拟的 850 hPa 等压面上局地水平风场相较于实况在河南

省中南部的南风分量偏大,但是总体而言局地水平风场的实况和模拟结果仍然保持了较好的一致性,

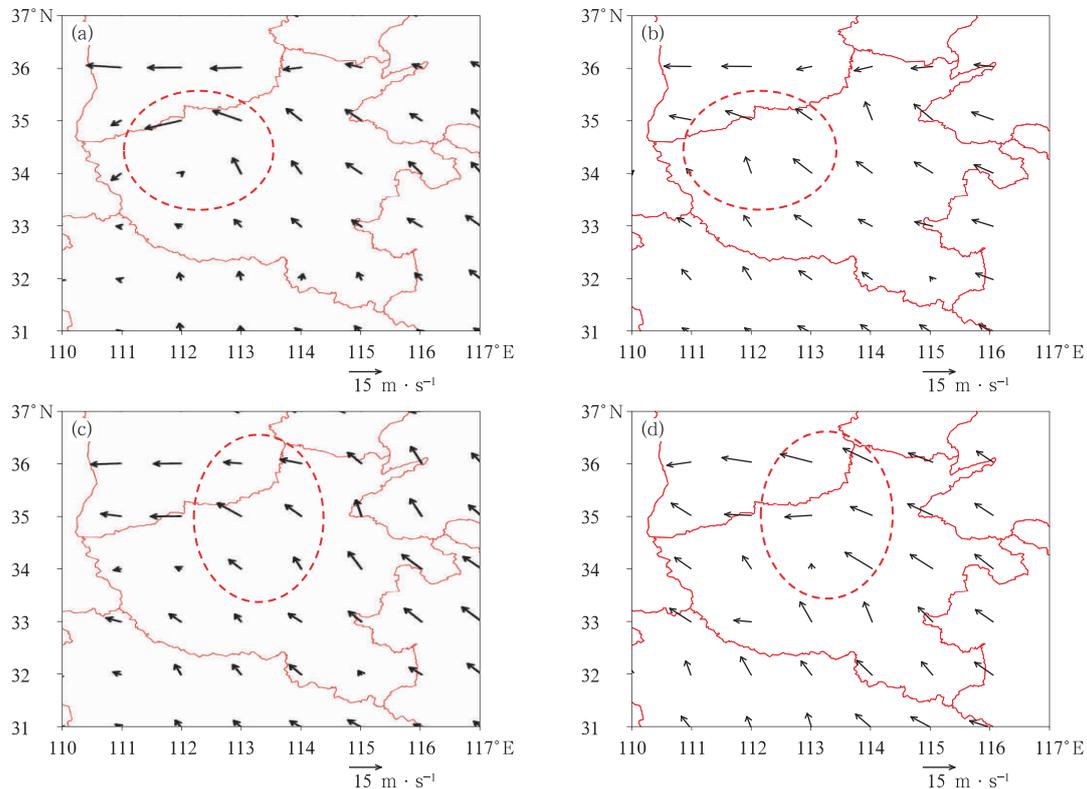


图 4 2021 年 7 月 20 日(a,b)14 时与(c,d)20 时 850 hPa 等压面局地水平风场(风矢)的(a,c)实况和(b,d)模拟对比

(实况基于 FNL 再分析资料中的风场数据,模拟基于模式的输出结果;
虚线椭圆:风场出现显著气旋性切变区域)

Fig. 4 Comparison between (a, c) the gauge-observed precipitation and (b, d) simulated precipitation corresponding to horizontal wind at 850 hPa isobaric surface (vector) at (a, b) 14:00 BT and (c, d) 20:00 BT 20 July 2021

(Observation is based on the FNL reanalysis wind data and simulation based on the model output, dashed ellipse circle indicates area having significant cyclonic shear in wind field)

具体表现为,模拟结果较准确地反映了对流层低层局地水平风场在强降水区附近的气旋性辐合特征(图 4 中的红色椭圆标记处)。

综上所述,模拟结果不仅较好地反映了局地强降水的分布形态,也较准确地捕捉到了对流层低层局地水平风场的演变特征,因此该模拟结果具有较高的可靠性,其结果能进一步地应用于后续降水机制诊断研究。

3 水汽输送、收支及转化机制的诊断分析

3.1 大尺度水汽输送特征

根据式(1)和式(2)分别计算了极端降水出现时

段内 850 hPa 等压面的单层水汽通量和整层水汽通量积分,计算结果如图 5 所示。从图中水汽输送通量分布可以看出,无论就 850 hPa 单层等压面水汽通量还是整层积分的水汽通量而言,由于受到稳定强盛的台风烟花以及中高纬稳定的阻塞环流形势的共同影响,总共建立了三条从海上到内陆地区的水汽输送通道,依靠这些水汽通道,海洋上的水汽分别沿西南、西北和东北三个方向源源不断地向内陆地区输送。其中出现极端降水的区域正好位于东南—西北方向的这条水汽输送通道上,此外极端降水的主要落区(图 5 中红色方框所示)附近还出现了水汽通量的大值中心。综合上述特征,可以进一步分析得出,依靠上述稳定建立的水汽输送通道,使得大量海洋上的水汽能被远距离地输送到极端降水落区附近,继而为极端降水发生发展提供充足的水汽供给。

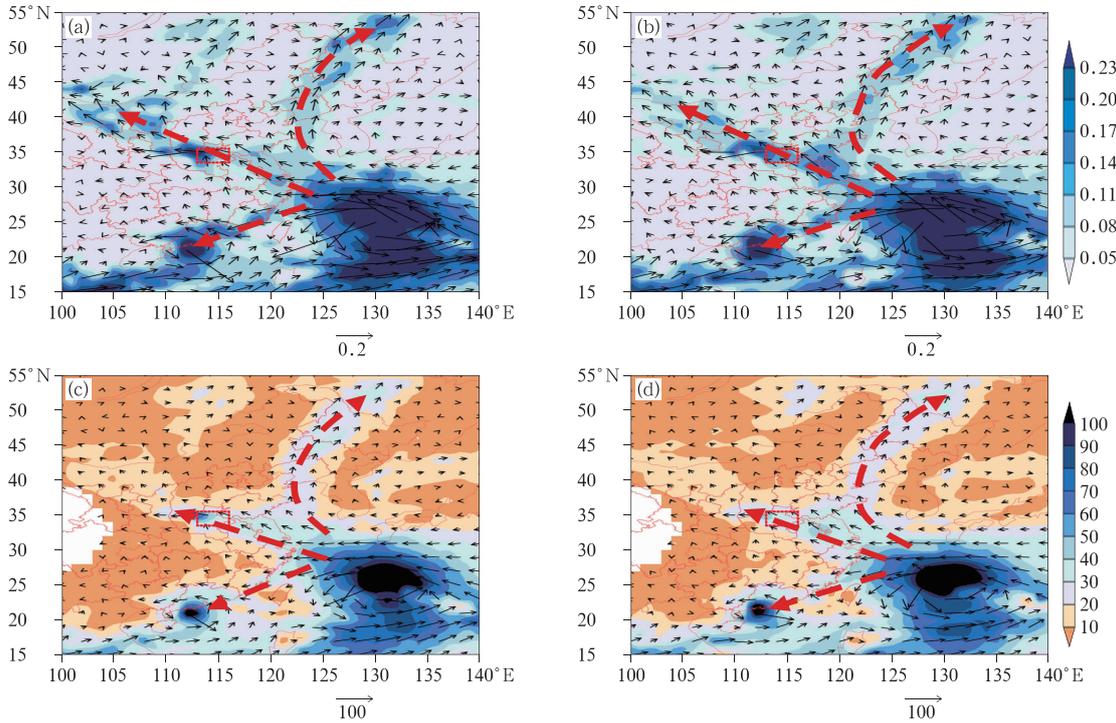


图 5 2021 年 7 月 20 日 (a,c)08 时与 (b,d)14 时的 (a,b)850 hPa 单层等压面与 (c,d)整层积分的水汽通量

(矢量:水汽通量矢量,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; 填色:水汽通量标量,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$;
整层积分包含从地面到 700 hPa 等压面之间的所有等压面层;红色方框:极端降水主要落区)

Fig. 5 (a, b) The 850 hPa water vapor flux and (c, d) vertical integration from surface to 700 hPa at (a, c) 08:00 BT and (b, d) 14:00 BT 20 July 2021

(vector: water vapor flux vector, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; colored: water vapor flux scalar, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; red box: falling area of extreme precipitation)

3.2 中尺度水汽区域收支及水汽辐合特征

围绕极端降水主要落区(图 6a)的区域水汽收支特征,根据式(3)~式(5),计算 2021 年 7 月 20 日 00 时至 21 日 00 时极端降水主要落区范围内的水汽净收支随时间的演变,结果如图 6b 所示。通过分析上述区域水汽收支结果发现,区域水汽收支的演变特征与极端降水区对应的区域平均降水随时间的演变特征存在一定差异,这主要是因为计算极端降水区范围内水汽收支结果仅能从水汽的角度反映出背景环流场为极端降水的发生和维持提供的水汽条件,而局地极端降水的演变还受到除水汽以外的局地环境场动力和热力条件的影响。尽管存在上述差异,区域水汽收支结果还是较好地反映出极端降水出现前(15 时之前),区域内的水汽收支为负,而在极端降水出现后(15 时之后),区域内的水汽收支由负转正,且不断增加的演变特征,这说明背景环流场为区域内水汽由净流出转为净流入提供了有利的环

境场条件,这对于降水的发生和维持起到了重要的推动作用。尽管区域水汽收支的演变与区域平均降水的演变并非完全同步,但当水汽供给有负转正并开始迅速增加时,区域平均降水也在此时开始出现显著增强,所以水汽的演变对局地降水的演变具有一定的指示意义。

此后,为了进一步研究局地中尺度地形在局地水汽辐合过程中所起的作用,有针对性地开展了极端降水落区内的区域平均水汽通量散度随时间演变的地形敏感性试验(局地地形高度降低的敏感性试验区域范围为 $32^{\circ} \sim 36^{\circ} \text{N}$ 、 $109^{\circ} \sim 114^{\circ} \text{E}$ 的矩形区域,该区域在图 7 中用黑色虚线方框表示),最终该敏感性试验结果(图 8)表明显著降低局地中尺度地形高度相较于保留局地中尺度地形时,对流层低层 850 hPa 以下的水汽通量辐合强度显著减弱,对流层低层 850 hPa 以下的水汽通量出现强辐合的时间显著缩短,最强水汽通量辐合的高度也进一步降低,从而证实局地中尺度地形对于对流层低层的水汽辐

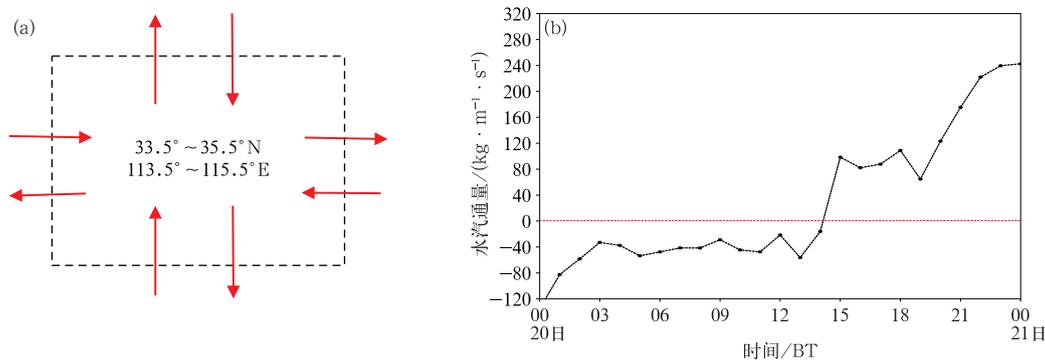


图 6 2021 年 7 月 20 日(a)极端降水落区与(b)落区内水汽通量净收支随时间的演变

(图 6a 中方框代表极端降水落区的东、西、南、北四个边界截面,朝内箭头代表水汽的流入,朝外箭头代表水汽的流出)

Fig. 6 (a) The extreme precipitation area temporal variation of (b) water vapor flux budget in Fig. 6a on 20 July 2021 (In Fig. 6a, dashed rectangle box denotes the vertical section in the directions of east, west, south and north, the inner red arrow vector denotes the inflow of water vapor, the outer red arrow vector denotes the outflow of water vapor)

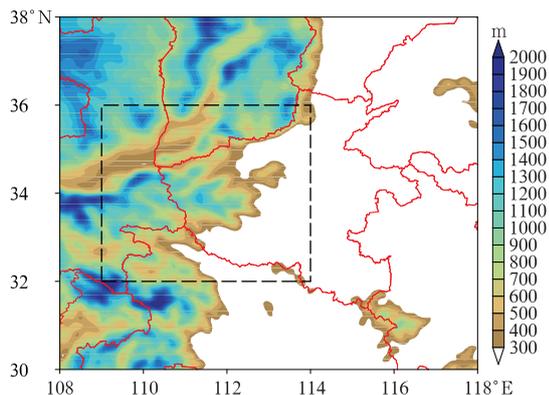


图 7 河南省及其周边区域地形

(填色:地形高度,虚线方框:开展局地地形敏感性试验时将局地地形高度乘以 0.1 的主要区域范围)

Fig. 7 The topographical distribution around Henan Province

(colored: topographical height, the black dashed rectangle box: topographical sensitivity experiment region where the topographical altitude is reduced to one-tenth of the original)

合起到了重要的促进作用。此外陈红专等(2019)指出低层水汽通量辐合的增强有利于水汽的垂直输送,也有利于对流活动的增强。综上所述,在稳定少动的中尺度低值天气系统对应的辐合风场影响下,极端降水区域内水汽的净收支增加,导致区域内水汽含量的进一步增加。在河南省西部山脉的迎风坡地形阻挡作用下,水汽在迎风坡前的对流层低层出现辐合,通过对流层低层的水汽辐合产生的动力机

制,使低层汇聚的水汽被进一步输送到对流层中高层,以此促进对流的发展和降水的增强。中尺度低值系统和局地地形的共同作用导致的局地水汽辐合和垂直输送为对流和极端降水的发生发展提供了极其有利的局地水汽条件。

3.3 云微物理尺度水汽转化特征

降水无论就对流的时间尺度还是空间尺度而言,均可通过云微物理过程产生,因此水汽的凝结或凝华过程对降水的演变必定会产生重要的影响,而降水效率作为一个重要的量化诊断指标,可用于评估在对流系统作用下水汽转化为雨水过程中的转化效率(Sui et al, 2007)。本文通过分析极端降水持续期间降水效率的分布特征,从云微物理过程角度进一步揭示了局地水汽通过相关云微物理过程转化为地面降水的这一主要的水汽消耗机制。

按照式(6)~式(8),计算得出了极端降水持续期间的小时降水效率,首先对比极端降水持续时间内代表性时刻 20 日 17 时与 19 时的降水强度及其对应小时降水效率的水平空间分布特征(图 9),之后进一步对比了对应时刻的降水强度、小时降水效率以及局地风场在极端降水落区内的沿 34.43°N 的纬向垂直分布特征(图 10)。

通过小时降水效率与降水强度的分布(图 9)对比可以看出,局地强降水中心附近出现了降水效率的最大值中心,局地强降水中心附近的降水效率甚至超过 90%,此外,在降水较少或没有降水的区域,

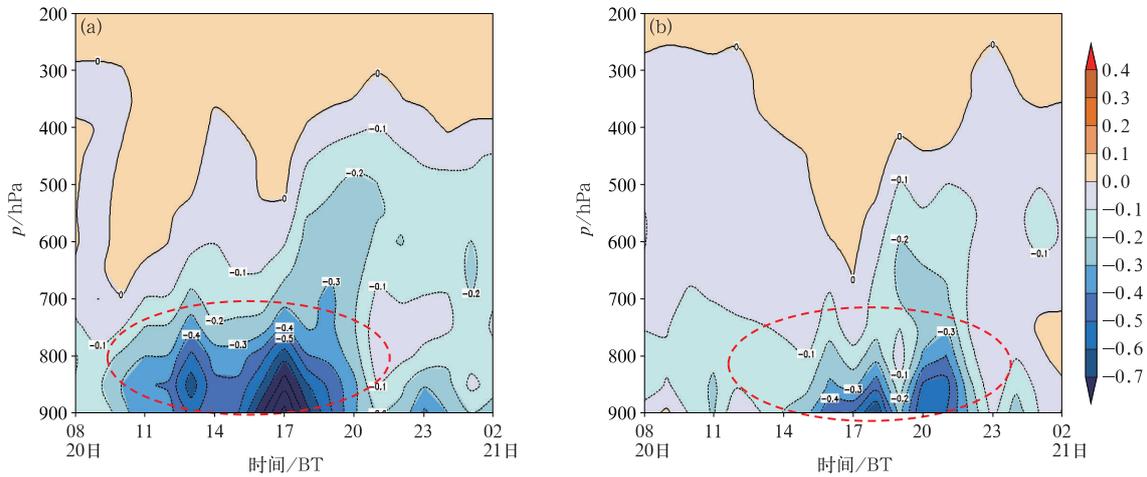


图 8 2021 年 7 月 20 日 08 时至 21 日 02 时极端降水落区范围内(图 6a)的区域平均水汽通量散度(填色,等值线,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)的垂直分布的地形敏感性试验结果

(a)保留局地地形的控制试验,(b)代表将局地地形高度乘以 0.1 的敏感性试验

Fig. 8 The result of sensitivity experiment on the vertical distribution of regional average water vapor flux divergence (contour, colored, unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) across the extreme precipitation area (a) control experiment retaining the topographical height, (b) sensitivity experiment decreasing ten times of the topographical height during 08:00 BT 20 to 02:00 BT 21 July 2021

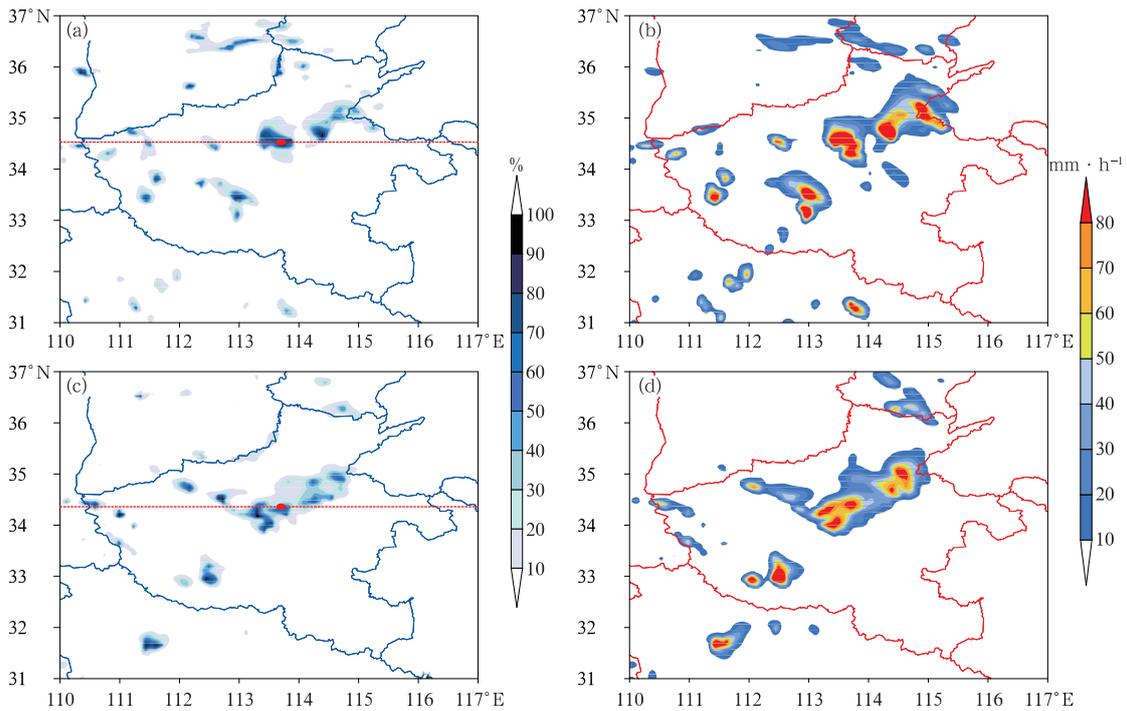


图 9 2021 年 7 月 20 日(a,b)17 时,(c,d)19 时极端降水持续期间代表性时刻的(a,c)小时降水效率以及(b,d)降水强度的空间分布

(图 9a,9c 中,红色圆点:郑州站,红线:图 12 与图 13 纬向剖面位置)

Fig. 9 Spatial distribution of (a, c) the precipitation efficiency (colored) and (b, d) corresponding hourly precipitation intensity (colored) at (a, b) 17:00 BT and (c, d) 19:00 BT 20 July 2021

(in Figs. 9a, 9c, red dot: Zhengzhou Station, red line: location of the vertical profile shown in Fig. 12 and Fig. 13)

降水效率普遍在 10% 以下。降水强度与小时降水效率之间极好的对应性,一方面表明降水效率对局地强降水的演变有较好的指示意义,另一方面说明极端降水发生区域出现了水汽向降水的高效转化过程。因此可以通过进一步分析降水效率的演变机制来揭示极端降水发生机制。

通过降水效率(图 10b,10e)、降水强度(图 10a, 10d)的纬向剖面对比可以发现,在靠近西侧迎风坡地形时,降水强度出现显著的增强特征,降水效率相应呈现显著的增加趋势,在迎风坡地形区附近的小时降水效率最高可达 95% 以上,通过分析局地风场的垂直分布发现,由于受到迎风坡地形抬升作用的影响,迎风坡地形附近的垂直上升运动被显著增强(图 10c,10f)。因此局地中尺度地形作用除了有利于局地水汽在地形迎风坡前侧出现有效辐合外,其产生的地形抬升作用通过增强垂直上升运动,间接促进降水效率的提升,继而促进局地水汽向降水的高效转化,最终导致地面降水强度的增加。

为了进一步揭示图 10 中导致降水效率在迎风坡地形和对流活动影响下出现显著空间分布差异的可能机制,以及降水中心位于地形不同区域时对应降水效率出现显著差异的可能机制,进一步详细分析了影响降水效率的关键水汽凝结过程(P_{LADJ})、凝华过程(P_{IADJ} 、 P_{SDEP} 、 P_{GDEP})及总水凝物含量(Q_{CM})的纬向垂直分布特征(图 11),研究结果表明当局地强降水中心位于迎风坡地形附近时(20 日 17 时),水汽凝结过程(P_{LADJ})在远离迎风坡地形区域时维持相对较高的转换水平,而在靠近迎风坡地形区域时维持相对较低的转换水平,表明迎风坡地形对水汽的暖云转化过程促进作用不明显,相反水汽凝华过程(P_{IADJ} 、 P_{SDEP} 、 P_{GDEP})在远离迎风坡地形区域时维持较低的转化水平,而在靠近迎风坡地形区域时转化水平得到显著增强,尤其是水汽向云冰粒子的转换过程(P_{IADJ})和水汽向雹粒子的转换过程(P_{GDEP})的增强特征更加明显,表明迎风坡地形对以 P_{IADJ} 与 P_{GDEP} 为主的水汽的冰云转化过程起到了重

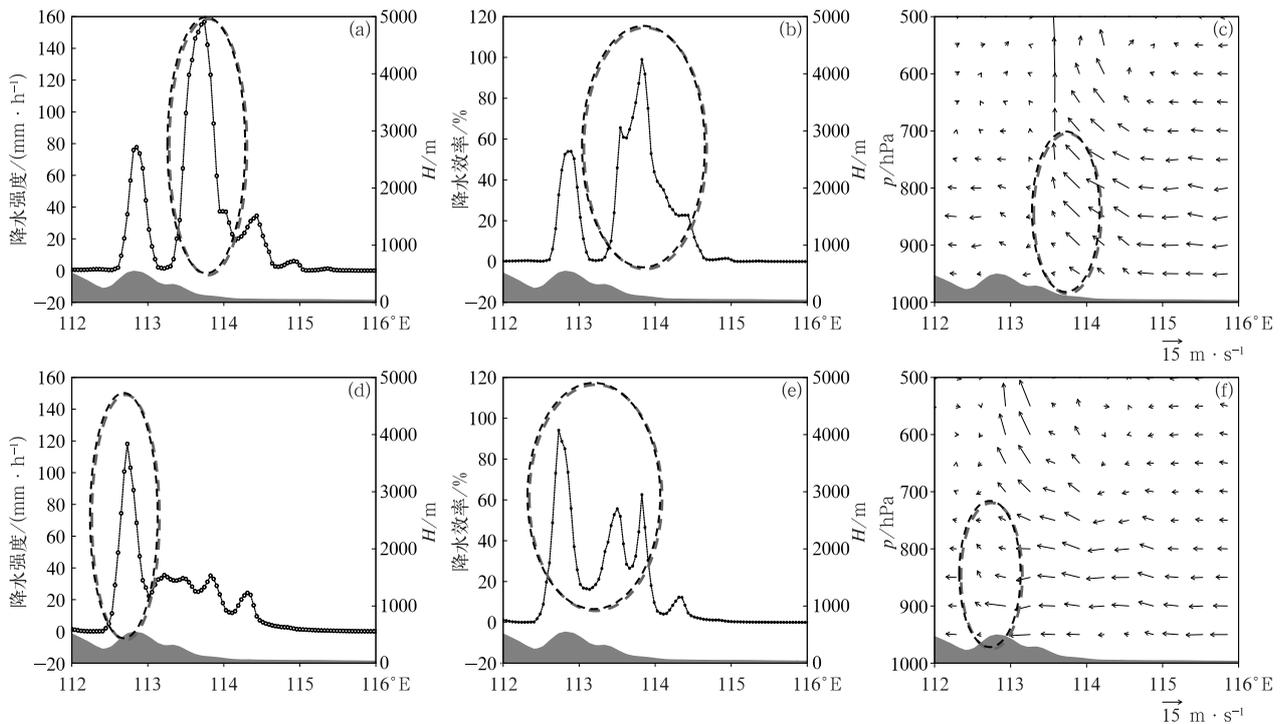


图 10 2021 年 7 月 20 日(a,b,c)17 时,(d,e,f)19 时极端降水持续期间代表性时刻的(a,d)降水强度, (b,e)小时降水效率以及(c,f)局地风场沿 34.43°N(郑州站本站所处纬度)的纬向垂直剖面 (阴影:地形剖面;椭圆:两个时段内有显著变化的区域,下同)

Fig. 10 The vertical latitudinal profile along 34.43°N of (a, d) hourly precipitation intensity, (b, e) precipitation efficiency and (c, f) local wind field at (a, b, c) 17:00 BT and (d, e, f) 19:00 BT 20 July 2021 (shaded: topographical profile; ellipse: significant changes in two periods, the same below)

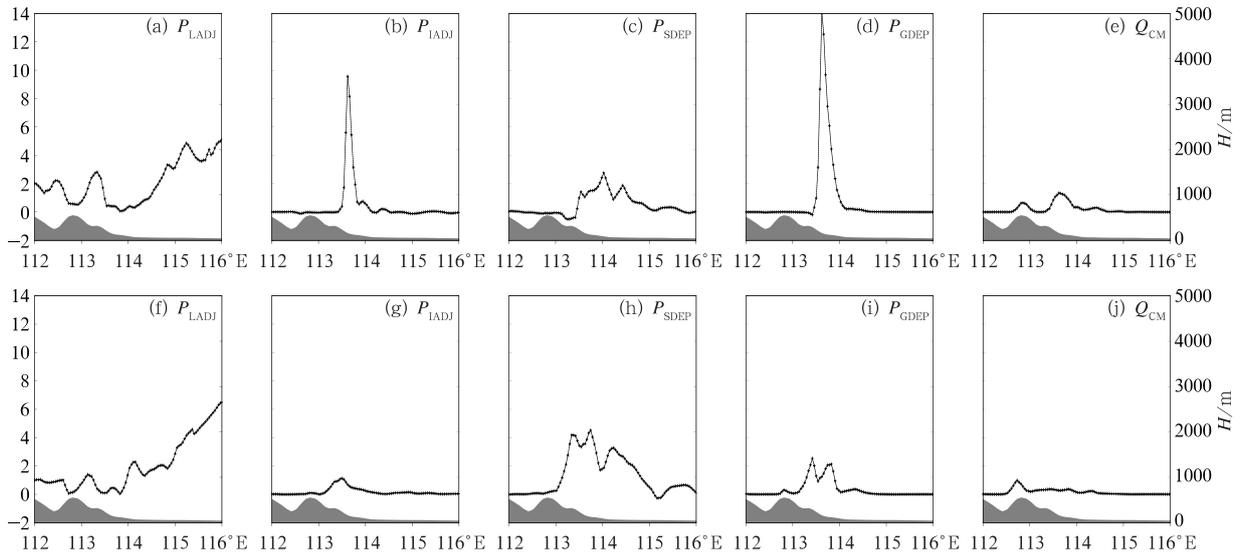


图 11 2021 年 7 月 20 日 (a,b,c,d,e) 17 时, (f,g,h,i,j) 19 时极端降水持续期间代表性时刻影响降水效率的整层垂直积分后的 (a,f) 水汽凝结过程 (P_{LADJ})、(b,c,d,g,h,i) 凝华过程 (P_{IADJ} 、 P_{SDEP} 、 P_{GDEP}) 和 (e,j) 总水凝物含量 (Q_{CM}) 沿 $34.43^{\circ}N$ 的纬向垂直剖面 (单位: $g \cdot kg^{-1}$) (阴影: 地形剖面)

Fig. 11 The vertical latitudinal profile along $34.43^{\circ}N$ of vertically integrated of (a, f) water vapor condensation process (P_{LADJ}), (b, c, d, g, h, i) desublimation process (P_{IADJ} , P_{SDEP} , P_{GDEP}), and (e, j) total hydrometeor content (Q_{CM}) (unit: $g \cdot kg^{-1}$) at (a, b, c, d, e) 17:00 BT and (f, g, h, i, j) 19:00 BT 20 July 2021 (shaded: topographical profile)

要的促进作用。上述特征的出现主要归结于迎风坡地形抬升作用以及强降水中心附近对流活动产生的剧烈垂直上升运动, 通过将更多水汽垂直输送到对流层中高层, 继而增强水汽的冰云转化过程 (Houze, 2012)。而根据水凝物浓度 (Q_{CM}) 纬向分布看出, 迎风坡地形作用对水凝物浓度 (Q_{CM}) 变化的影响非常有限。此外, 当局地强降水中心位于山顶附近时 (20 日 19 时), 其降水效率相较于局地强降水中心位于迎风坡地形附近时呈现略微降低的变化趋势, 对应水汽向云冰粒子的转化过程以及水汽向雹粒子的转化过程呈现出显著减弱的变化趋势, 风场的纬向垂直分布在 20 日 17 时与 19 时的对比结果表明, 伴随降水中心由迎风坡地形附近移至地形山顶处, 迎风坡地形对 850 hPa 以下对流层低层气流的抬升作用被显著削弱 (图 10c, 10f 的虚线椭圆标记), 导致水汽向对流层高层的垂直输送作用也相应减弱, 使得强降水中心附近 P_{IADJ} 与 P_{GDEP} 过程也呈现显著减弱的变化趋势。综上所述, 降水效率的诊断结果表明此次极端降水过程在降水强度增强期间具有显著冰云转换特征, 而降水效率在地形迎风

坡处的显著增强与地形迎风坡抬升作用促使更多水汽被输送到对流层中高层后向云冰粒子和雹粒子转换过程增强有密切联系。

为了证实地形对降水效率的影响, 本文针对郑州站的小时降水效率与降水强度开展了相应的局地中尺度地形敏感性试验 (图 12) 以及沿郑州市所在纬度的纬向风场剖面敏感性试验 (图 13), 局地中尺度地形高度降低的敏感性试验区域范围同图 6a 保持一致。敏感性试验结果表明, 当移除局地迎风坡地形后, 郑州站的极端降水强度被显著削弱, 对应的降水效率也被显著削弱, 表明局地迎风坡地形作用确实对降水效率的增强起到了促进作用。进一步分析上述特征出现的原因, 发现一方面迎风坡地形对低层水汽的阻挡对低层的水汽辐合产生了积极的影响, 另一方面迎风坡地形抬升作用通过增强垂直上升运动, 使更多的水汽被输送到对流层更高的高度上, 而水汽向冰相粒子转换过程的增强有利于云中更多的冰相粒子的形成, 考虑到此次极端降水过程具有显著的冰云降水特征, 冰相粒子含量的增加为冰相粒子下落融化时提供更多的冰相粒子源, 最终

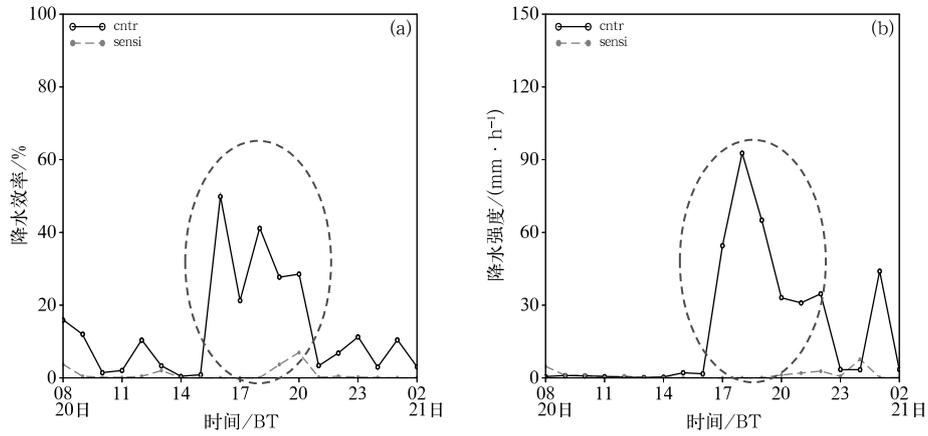


图 12 2021 年 7 月 20 日 08 时至 21 日 02 时极端降水持续期间郑州站的

(a)小时降水效率与(b)降水强度局地地形敏感性试验结果

(黑色折线:保留局地地形的控制试验结果,灰色折线:将局地地形高度乘以 0.1 的敏感性试验结果)

Fig. 12 The result of sensitivity experiment on the (a) precipitation efficiency and (b) hourly precipitation intensity at Zhengzhou Station during 08:00 BT 20 to 02:00 BT 21 July 2021

(black polygonal line: results of control experiment retaining the topographical height,

grey polygonal line: results of sensitivity experiment that decreasing ten times the topographical height)

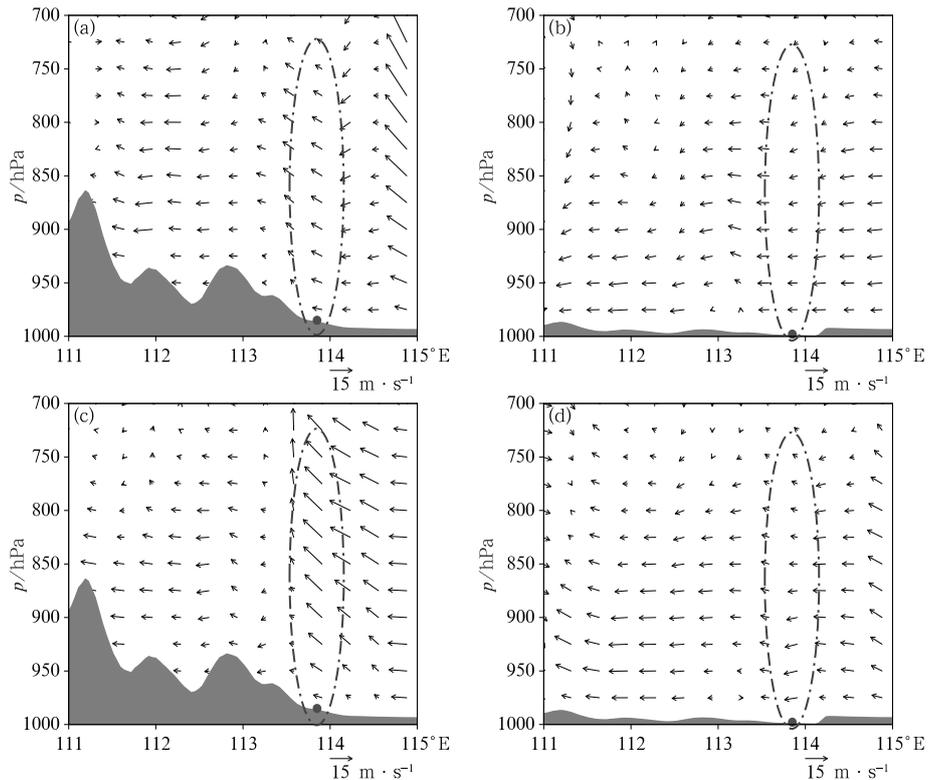


图 13 2021 年 7 月 20 日 (a,c)17 时,(b,d)19 时极端降水持续期间代表性时刻

沿 34.43°N(圆点:郑州站位置)的风场(风矢)纬向垂直剖面

(a,b)控制试验,(c,d)敏感性试验

(阴影:地形剖面)

Fig. 13 The wind section (vector) along 34.43°N abstract from (a, b) control experiment and (c, d) sensitivity experiment (dot: Zhengzhou Station)

at (a, c) 17:00 BT and (b, d) 19:00 BT 20 July 2021

(shaded: topographical profile)

导致地面降水强度的增加,上述水汽向冰相粒子转换的过程作为影响降水效率的关键云微物理过程,其演变对降水效率的增强起到了决定性的作用,而位于迎风坡地形区域的郑州市,其降水效率增强表征的水汽向地面降水的高效转换对局地降水的演变起到了极好的指示作用。综上所述,局地迎风坡地形作用确实对降水效率的增强起到了重要的促进作用。

4 结论与讨论

本文针对 2021 年 7 月 20 日河南省的区域性特大暴雨过程,重点围绕极端降水的演变特征,利用大气再分析资料、国家基准站降水观测数据和高分辨率的数值模拟结果,系统性研究了多尺度系统协同影响下的水汽特征对极端降水演变的影响机制,并全面揭示了极端降水区内水汽的主要产生和消耗过程,得到的主要研究结论如下:

(1)异常稳定的大尺度阻塞环流形势,极端降水区附近加强且稳定维持的中尺度低值系统,以及有利的中尺度地形动力条件的共同作用,为此次极端降水的发生和持续提供了良好的环境场条件。

(2)在海上稳定维持的台风烟花、北抬的副热带高压以及中高纬度长波槽的共同作用下,建立了三条从海洋到内陆地区的稳定水汽输送通道,而极端降水的落区正好位于其中的一条东南—西北向的水汽输送通道上。

(3)极端降水落区内水汽净收支在降水持续期间的逐渐增长,以及在地形迎风坡前对对流层低层产生的强烈水汽辐合,为对流和极端降水的发生发展提供了极其有利的局地水汽条件。

(4)降水效率的诊断结果表明降水效率对极端降水的演变有较好的指示意义,而相关云微物理过程的进一步诊断研究发现,通过迎风坡地形抬升作用增强气流的垂直上升运动,使更多的水汽被垂直输送到对流层中高层,继而促使水汽向云冰粒子和霰粒子的凝华转换过程增强,最终导致降水效率得到显著提升。

综上所述,河南“21·7”特大暴雨多尺度系统通过系统间的协同作用,为极端降水的发生发展提供了有利的水汽条件,此后对流活动和迎风坡地形抬升作用的影响,降水效率得到显著增强,降水效率增强表征的局地水汽向地面降水转化效率的提高,最

终有效地阐释了地形迎风坡前出现极端降水的发生机理。相较于过去研究中较多关注水汽的来源以及水汽在局地降水区内的辐合等一系列水汽来源过程,本文通过降水效率诊断对水汽转化为雨水这一水汽消耗过程开展了更加深入的研究,从而对极端降水发生期间水汽的产生和消耗的整个过程有了更加全面系统的认识。然而,本文的研究也存在一些不足之处,例如在分析大尺度水汽输送时,仅定性分析了大尺度环流形势建立的远距离水汽输送对极端降水演变的影响,而忽略了研究气候态下环流形势的异常产生的气候态下的水汽输送异常导致极端降水出现的可能物理机制。此外,在分析极端降水持续期间降水效率的增强特征时,仅关注了地形迎风坡抬升作用对降水效率中关键水凝物转化过程的影响,而忽视了其他环境场条件对上述云微物理过程的影响研究。上述研究不足之处,有待针对极端降水的云微物理过程和云内环境场条件的数值模拟能力和观测能力进一步提升后,再完善相关研究。

参考文献

- 蔡芎宁,陈涛,谌芸,等,2022. 对流层高层冷涡对“21·7”河南持续性极端暴雨影响分析[J]. 气象,48(5):545-555. Cai X N, Chen T, Chen Y, et al, 2022. Dynamic impact of upper tropospheric cold low on persistent extreme rainstorm of Henan during 17-22 July 2021[J]. Meteor Mon, 48(5):545-555(in Chinese).
- 陈红专,叶成志,陈静静,等,2019. 2017 年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9):1213-1226(in Chinese).
- 崔晓鹏,2009. 地面降水诊断方程对降水过程的定量诊断[J]. 大气科学,33(2):375-387. Cui X P, 2009. Quantitative diagnostic analysis of surface rainfall processes by surface rainfall equation[J]. Chin J Atmos Sci, 33(2):375-387(in Chinese).
- 丁一汇,2005. 高等天气学:第 2 版[M]. 北京:气象出版社. Ding Y H, 2005. Advanced Synoptic Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 孔期,符娇兰,谌芸,等,2022. 河南“21·7”特大暴雨过程中尺度低空急流和低涡的演变特征及成因分析[J]. 气象,48(12):1513-1525. Kong Q, Fu J L, Chen Y, et al, 2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex during the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. Meteor Mon, 48(12):1513-1525(in Chinese).
- 李启华,陆汉城,钟玮,等,2018. 双台风条件下水汽的中尺度输送特征与收支诊断[J]. 物理学报,67(3):039201. Li Q H, Lu H C, Zhong W, et al, 2018. Meso-scale transport characteristics and

- budget diagnoses of water vapor in binary typhoons[J]. *Acta Phy Sin*, 67(3):039201(in Chinese).
- 卢萍, 宇如聪, 周天军, 2009. 四川盆地西部暴雨对初始水汽条件敏感性的模拟研究[J]. *大气科学*, 33(2):241-250. Lu P, Yu R C, Zhou T J, 2009. Numerical simulation on the sensitivity of heavy rainfall over the western Sichuan Basin to initial water vapor condition[J]. *Chin J Atmos Sci*, 33(2):241-250(in Chinese).
- 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 L K, Li S W, Zhou Y S, 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]. *Chin J Atmos Sci*, 45(6):1366-1383(in Chinese).
- 单磊, 谭桂容, 姚叶青, 等, 2014. 一次台风远距离暴雨水汽条件及输送过程研究[J]. *热带气象学报*, 30(2):353-360. Shan L, Tan G R, Yao Y Q, et al, 2014. On the water vapor condition and moisture transport for a rain caused by a remote tropical cyclone[J]. *J Trop Meteor*, 30(2):353-360(in Chinese).
- 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 A F, Lyu X N, Cui L M, et al, 2021. The basic observational analysis of “7. 20” extreme rainstorm in Zhengzhou[J]. *Torr Rain Dis*, 40(5):445-454(in Chinese).
- 苏爱芳, 席乐, 吕晓娜, 等, 2022. 豫北“21·7”极端暴雨过程特征及成因分析[J]. *气象*, 48(5):556-570. Su A F, Xi L, Lyu X N, et al, 2022. Analysis on characteristics and causes of the July 2021 extreme rainstorm in northern Henan[J]. *Meteor Mon*, 48(5):556-570(in Chinese).
- 汪小康, 崔春光, 王婧羽, 等, 2022. “21·7”河南特大暴雨水汽和急流特征诊断分析[J]. *气象*, 48(5):533-544. Wang X K, Cui C G, Wang J Y, et al, 2022. Diagnostic analysis on water vapor and jet characteristics of the July 2021 severe torrential rain in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 48(5):533-544(in Chinese).
- 王婧羽, 崔春光, 王晓芳, 等, 2014. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J]. *气象*, 40(2):133-145. Wang J Y, Cui C G, Wang X F, et al, 2014. Analysis on water vapor transport and budget of the severe torrential rain over Beijing Region on 21 July 2012[J]. *Meteor Mon*, 40(2):133-145(in Chinese).
- 王宇虹, 徐国强, 贾丽红, 等, 2015. 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*, 41(4):389-400. Wang Y H, Xu G Q, Jia L H, et al, 2015. Numerical simulation analysis on impact of Taihang Mountain and vapor sensitivity on the 21 July 2012 extremely severe rainstorm in Beijing[J]. *Meteor Mon*, 41(4):389-400(in Chinese).
- 徐国强, 胡欣, 苏华, 1999. 太行山地形对“96. 8”暴雨影响的数值试验研究[J]. *气象*, 25(7):3-7. Xu G Q, Hu X, Su H, 1999. Simulation study of Taihang Mountain terrain effects on heavy rain in August 1996[J]. *Meteor Mon*, 25(7):3-7(in Chinese).
- 徐洪雄, 徐祥德, 张胜军, 等, 2014. 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[J]. *大气科学*, 38(3):537-550. Xu H X, Xu X D, Zhang S J, et al, 2014. Long-range moisture alteration of a typhoon and its impact on Beijing extreme rainfall[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(3):537-550(in Chinese).
- 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. Yang H, Zhou W, Wang X K, et al, 2022. Analysis on extremity and characteristics of the “21·7” severe torrential rain in Henan Province[J]. *Meteor Mon*, 48(5):571-579(in Chinese).
- 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 X, Yang H, Wang X M, et al, 2021. Analysis on characteristic and abnormality of atmospheric circulations of the July 2021 extreme precipitation in Henan[J]. *Trans Atmos Sci*, 44(5):672-687(in Chinese).
- Houze R A Jr, 2012. Orographic effects on precipitating clouds[J]. *Rev Geophys*, 50(1):RG1001.
- Shen S J, Xiao H, Yang H L, et al, 2021. Variations of water vapor transport and water vapor-hydrometeor-precipitation conversions during a heavy rainfall event in the Three-River-Headwater Region of the Tibetan Plateau[J]. *Atmos Res*, 264:105874.
- Stohl A, Forster C, Sodemann H, 2008. Remote sources of water vapor forming precipitation on the Norwegian west coast at 60°N—a tale of hurricanes and an atmospheric river[J]. *J Geophys Res*, Atmos, 113(D5):D05102.
- Sui C H, Li X F, Yang M J, 2007. On the definition of precipitation efficiency[J]. *J Atmos Sci*, 64(12):4506-4513.
- Xu H Y, Zhai G Q, Li X F, 2017. Precipitation efficiency and water budget of Typhoon Fitow (2013): a particle trajectory study[J]. *J Hydrometeorol*, 18(9):2331-2354.
- Yin J F, Gu H D, Liang X D, et al, 2022. A possible dynamic mechanism for rapid production of the extreme hourly rainfall in Zhengzhou City on 20 July 2021[J]. *J Meteor Res*, 36(1):6-25.

(本文责编:王婷波)