

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):1512-1524. Kong Q, Fu J L, Chen Y, et al, 2022. Evolution characteristics and formation analysis of mesoscale low-level jet and vortex in Henan Province during the July 2021 severe torrential rain[J]. Meteor Mon, 48(12):1512-1524 (in Chinese).

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*

孔 期 符娇兰 谌 芸 张 芳 胡 宁

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用地面常规气象资料、区域气象站逐小时观测数据、ERA5 再分析资料,分析了 2021 年 7 月 19—20 日河南省特大暴雨过程中尺度低空急流以及中尺度低涡的发展演变特征及其形成机理。研究表明:此次特大暴雨天气过程发生在弱天气尺度系统强迫的背景下,中尺度低空急流以及中尺度低涡是其直接影响系统。低空急流的建立和发展与降水的发生和增强同步,而中尺度低涡出现在低空急流建立后约 10 h,随着低涡发展增强,低空急流强烈发展;西太平洋副热带高压的增强西伸与河套弱低压东移造成的地转风加大是低空急流形成的重要原因;偏北变压风的贡献主要是对风向的改变,使得低空急流以偏东急流为主;低空急流引起的对流层低层水平辐合及扭转是对流层中低层低涡发展的主要原因,对流层中层垂直上升运动造成的涡度垂直平流是对流层中层涡度增强的主要原因。降雨引起的对流层中层凝结潜热加热是低涡发展增强的又一重要原因。

关键词: 低空急流,中尺度低涡,地转风,变压风,低层辐合,凝结潜热加热

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.101001

Evolution Characteristics and Formation Analysis of Mesoscale Low-Level Jet and Vortex in Henan Province During the July 2021 Severe Torrential Rain

KONG Qi FU Jiaolan CHEN Yun ZHANG Fang HU Ning

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on surface conventional meteorological data, hourly observation data from regional meteorological stations and ERA5 reanalysis data, the evolution characteristics and formation mechanism of mesoscale low-level jet and mesoscale vortex during the severe torrential rain process in Henan Province from 19 to 20 July 2021 are analyzed. The results show that the process of this extreme precipitation was directly related to the formation and development of the low-level jet and mesoscale vortex. The establishment and development of low-level jet was synchronized with the occurrence and enhancement of precipitation, while the mesoscale vortex appeared about 10 hours later than the establishment of low-level jet, and the low-level jet developed strongly with the enhancement of low-level vortex development. The strengthening and westward extension of the western Pacific subtropical high and eastward movement of the low pressure on the southeast of the Hetao Area increased the geostrophic wind, which was the main reason for

* 国家自然科学基金项目(41975001)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J014)共同资助

2021 年 12 月 22 日收稿; 2022 年 10 月 17 日收修定稿

第一作者:孔期,主要从事短期天气预报、灾害性天气分析研究. E-mail:qiqinmc@163.com

通讯作者:符娇兰,主要从事短期天气预报、灾害性天气诊断和预报技术研究. E-mail:bluelilyfly@163.com

the formation of the low-level jet. The existence of allobaric wind was the main reason for the easterly jet. The horizontal convergence and torsion in the lower troposphere caused by low-level jet were the main reasons for the development of mesoscale vortex in the middle and lower troposphere. The vertical vorticity advection caused by the vertical motion was the main reason for the enhancement of the vorticity in the middle troposphere. The condensation latent heat in the middle troposphere was another important reason for the vortex development.

Key words: low-level jet, mesoscale vortex, geostrophic wind, allobaric wind, low level convergence, condensation latent heat

引 言

在全球变暖的大背景下,近年来我国极端天气气候事件频发,因强降雨造成的次生灾害给我国经济社会发展、人们生产生活及财产安全带来了严重威胁。造成暴雨的天气系统有高空槽、低涡、切变线、低空急流等。其中,低涡、低空急流及其与暴雨的关系一直是暴雨研究的焦点(陶诗言等,1980;黄士松,1981;孙淑清和翟国庆,1980;丁一汇,2005; Zhang et al, 2000; 赵思雄等, 2004; Chen et al, 2005; 2006; 张敬萍等, 2015; Fu et al, 2016; 2017; Houze, 2018)。根据影响暴雨的低空急流和低涡空间尺度的不同,可分为天气尺度、中尺度等类型。随着观测资料和数值模式时空分辨率不断提升,近年来对与暴雨有关的中尺度低空急流及低涡发生发展机制研究逐步深入,这部分研究多数集中在长江中下游地区的梅汛期暴雨。沈杭锋等(2013)对梅汛期中尺度低涡进行分类统计,指出中尺度涡旋发生发展中,出现暴雨的比例在 70% 以上;出现暴雨的中尺度涡旋中,接近 80% 都出现了低空急流。Chen et al(1998)通过对江淮流域梅雨锋上一次强对流暴雨过程的分析表明,暴雨和中尺度急流的发展几乎是同时的。当降水产生以后,通过凝结潜热释放,产生气柱降压,使流向低压区的气流加速,从而产生中尺度急流。中尺度急流北侧的强辐合以及对流不稳定能量的释放进一步加强了暴雨,同时也加强了中尺度急流本身,中尺度急流和暴雨形成正反馈机制。姜勇强等(2003)通过分析潜热释放造成的气柱变暖和 β 中尺度低涡发生发展的联系,指出在合适的大尺度环境场中,中尺度低空急流在鞍型场内触发暴雨,降水凝结潜热的释放加热大气,加强了低空正涡度区,触发了 β 中尺度低涡的形成, β 中尺度低涡和降水存在正反馈机制。傅慎明等(2012)对梅汛期两

个东移中尺度涡旋进行对比,指出西南涡是由上而下发展的,而大别山涡旋是由下而上发展的,辐合是两类低涡发生发展的重要因子,垂直涡度向水平涡度的转化是导致两类涡旋消亡的重要因子。Fu et al(2021)研究了大别山涡旋与低空急流的关系,指出低空急流产生强烈的低层辐合,并通过拉伸项和垂直平流项对低涡的发展起重要的作用。可见,不同暴雨过程的中尺度低涡及低空急流的演变特征及发生发展机制不尽相同。已有的这些观点都丰富了我们对于低涡暴雨及低空急流影响的认识和理解。

2021 年 7 月 17—22 日,河南省出现了强降雨过程,河南中北部连续四天出现大暴雨。7 月 19—20 日,郑州和新乡连续两天出现特大暴雨,造成重大人员伤亡和财产损失。不同于梅汛期区域性暴雨过程,此次降水过程对应的天气尺度系统较弱,暴雨过程主要与中尺度低空急流以及中尺度低涡系统相关。二者的三维结构及演变特征如何?在弱天气尺度系统强迫的背景下,中尺度低涡和低空急流是如何发生发展的?二者又有什么关系?理解这些问题是此次特大暴雨过程的关键科学问题。

研究所用资料包括中国气象局逐小时加密降水观测资料以及地面常规观测资料。诊断分析所用资料为欧洲中期天气预报中心开发的新一代再分析资料 ERA5,该资料的时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,包括 37 层等压面上的高度、温度、风场、相对湿度、垂直速度等气象要素(Hersbach et al, 2020)。本文所用时间均为北京时。

1 暴雨过程概述

2021 年 7 月 17—22 日,河南省出现了历史罕见的极端强降雨(苏爱芳等,2022;汪小康等,2022;蔡芩宁等,2022;李超等,2022;杨浩等,2021),强降

雨持续 6 d,河南大部地区均出现了暴雨或大暴雨,河南中北部累计雨量达到了 500 mm 以上,单站最大累计降雨量出现在鹤壁,达到了 1122.6 mm。最强降雨时段集中在 19—21 日,3 天单站最大累计降雨量达到 1014.3 mm。19 日午后,郑州附近降雨增强,19 日和 20 日两天持续强降雨(图 1)。20 日,郑州 24 h 降雨量为 624.1 mm,其中 16—17 时,郑州站最大小时降雨量达 201.9 mm,突破中国大陆有观测记录小时降雨量历史极值。21 日白天郑州附近降雨减弱,强降雨区北抬至河南北部。此次强降雨过程持续时间长、累计雨量大、短时降雨极强,造成重大人员伤亡和财产损失。

2 大尺度环流背景及关键影响系统

7 月 15 日前后,西北太平洋副热带高压北跳至日本海附近,17—22 日期间,西段脊线稳定在 42°N 左右,较气候平均位置明显偏北约 14 个纬距(图略)。18—19 日 500 hPa 平均环流形势(图 2a)来看,大陆高压稳定在我国西北地区中东部,西北太平

洋副热带高压西伸至我国东北地区,黄淮及其以南地区受宽广弱低压带控制,内蒙古东部为低槽控制,形成了典型的鞍型场环流形势。19—20 日(图 2b),高空槽东移北收,大陆高压东移并逐渐与副热带高压打通,西北地区东部至黄淮西部为低压倒槽控制。河南正处于低压倒槽内。

对流层高层(200 hPa),高空冷涡长时间维持在东海附近,河套地区高空槽东移加强,形成西北—东南向次天气尺度高空急流,河南地区正处于高空急流入口区的右侧,高空辐散显著增强(图 3a)。对流层低层(850 hPa),16 日鲁豫皖三省交界处,低涡系统发展并缓慢向西偏南方向移动,18 日低涡西移至豫鄂交界处,强度逐步减弱。19 日午后,河南境内低涡环流已明显减弱填塞,仅有弱倒槽逐渐向西移动,河南境内维持偏东风和东南风气旋式切变。19 日夜间,850 hPa 河南中北部中尺度低空急流建立,并一直在河南境内维持,导致河南境内降水迅速增强。20 日 08 时前后,河南西部新生中尺度低涡,低涡东侧的东南风和偏东风之间的辐合增强(图 3b),并形成涡旋雨带,降雨强度进一步增强,对流持续且

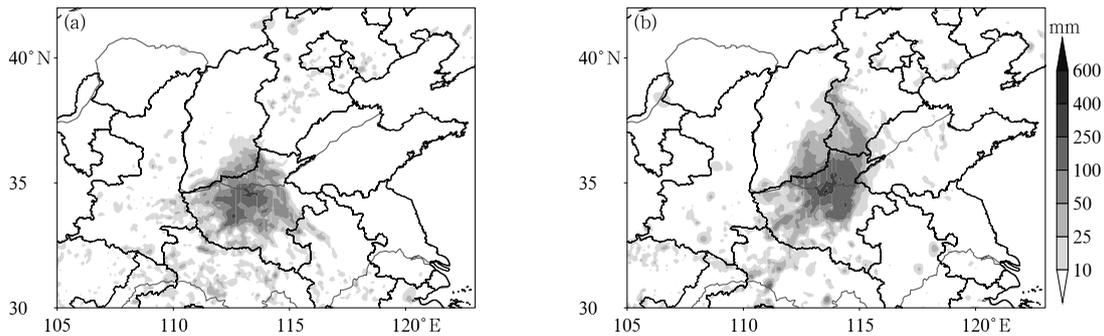


图 1 2021 年 7 月(a)19 日 08 时至 20 日 08 时,(b)20 日 08 时至 21 日 08 时降雨量
Fig. 1 The observed accumulated precipitation (a) from 08:00 BT 19 to 08:00 BT 20, (b) from 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 July 2021

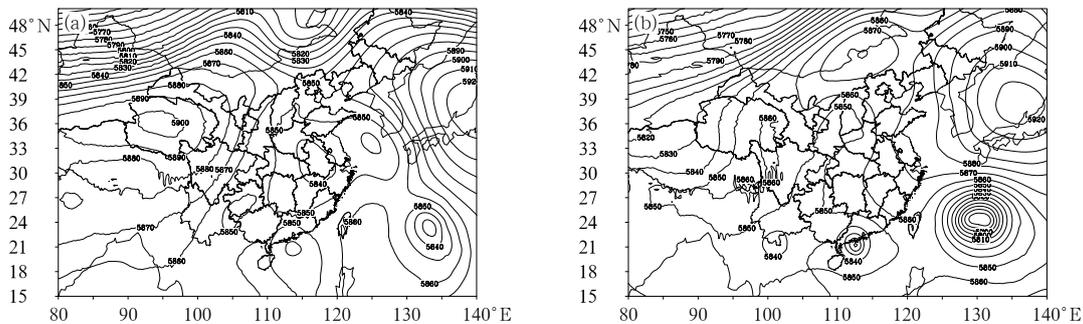


图 2 2021 年 7 月(a)18—19 日,(b)19—20 日 500 hPa 平均位势高度场(单位:gpm)
Fig. 2 The 500 hPa mean geopotential height field (unit: gpm) during (a) 18—19 and (b) 19—20 July 2021

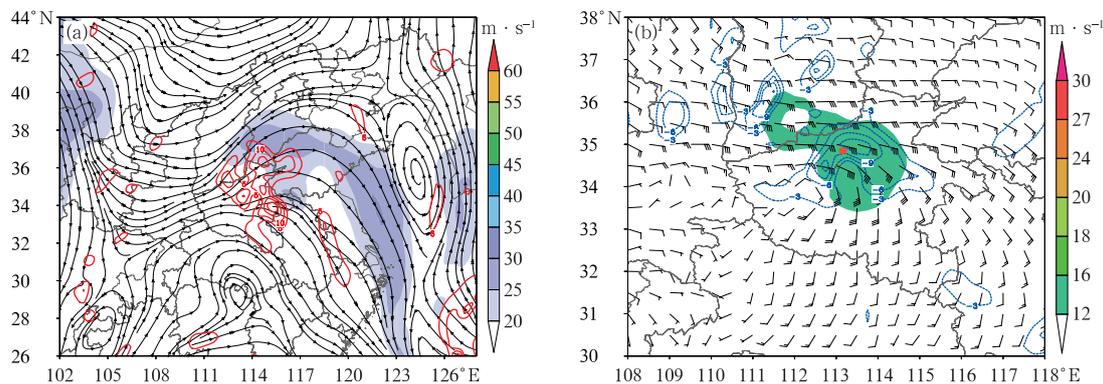


图 3 2021 年 7 月 20 日 08 时 (a)200 hPa 流场、风速(填色)和辐散场(红线,单位: 10^{-5} s^{-1}),
(b)850 hPa 风场(风羽)、风速(填色)和辐合场(蓝线,单位: 10^{-5} s^{-1})
(红点:低空急流核)

Fig. 3 (a) The 200 hPa stream field, wind speed (colored) and divergence field (red line, unit: 10^{-5} s^{-1});
(b) 850 hPa wind field (barb), wind speed (colored) and convergence field
(blue line, unit: 10^{-5} s^{-1}) at 08:00 BT 20 July 2021
(red dot: low-level jet core)

发展增强。上述分析表明,河南此次暴雨天气过程,对流层中高层有较为稳定的环流形势,对流层中高层有高空槽或弱低压东移,其尺度与强度均不及典型的天气尺度系统,属于弱天气尺度强迫,且河南地区位于高空槽或弱低压下游偏东的位置。对流层低层中尺度低空急流和中尺度低涡是暴雨的关键影响系统。因此,对于该系统的发展演变及其形成机制的研究是本文的重点。

3 低空急流和中尺度低涡的发展演变

由上所述,河南省本次暴雨天气过程与对流层低层中尺度低空急流及中尺度低涡系统的形成发展密切相关。因此,本节重点对 7 月 19—20 日期间中尺度低空急流以及中尺度低涡系统的生成发展演变特征进行分析。

3.1 低空急流演变

19 日午后,河南中部偏东风风速逐渐加大,降雨开始发展增强,但是以分散的对流降雨为主。19 日夜间,中尺度低空急流建立,风速明显加强,降雨也随之增强。19 日 20 时,在河南南部和湖北交界处有低压倒槽缓慢自东向西移动,倒槽北侧为低空急流,急流核大致位于 35°N 、 113°E 附近,风速大于 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4a)。雨带位于急流附近,呈西北—东南走向,强降水中心小时雨强在 $20 \sim 35 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 左右。此后,倒槽缓慢西移,急流逐渐西移至山西南

部,强度有所减弱,20 日 02 时,急流强度和范围均减弱。05 时,急流强度和范围均达到最小(图 4b)。06 时,随着河南东侧偏南风分量的增强,低空急流增强(图 4c),河南西部倒槽再次发展。此时雨带呈现螺旋式旋转的特征,有多条中尺度雨团或雨带,分布在倒槽东侧的偏东南气流中,且以逆时针方向旋转。20 日 08—20 时,低空急流再度发展,此阶段低空急流尺度小,仅在 200 km 左右,强度迅速增强。10—15 时,低空急流风速达到 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,降雨从之前的多条带状雨带,逐渐旋转合并加强,雨强达到了 $50 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。16 时,低空急流风速增强到 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,急流强度达到最大(图 4f)。此时河南郑州附近降雨极强,中尺度雨团小时降雨量在 100 mm 以上。郑州站最大小时降雨量达 201.9 mm,突破中国大陆有观测记录的小时降雨量历史极值。18 时,急流强度逐渐减弱。20 时以后,低空急流尺度范围增大,约为 500 km 左右,强度减弱,雨强仍有 $30 \sim 50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,局地达 $70 \sim 80 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

由上分析可知,河南省强降水与中尺度低空急流密切相关。河南降水从 19 日下午开始发展,19 日夜间开始增强,与低空急流的建立和加强几乎同步。为了了解低空急流的时空演变特征,我们选取了强降水区域中低空急流核所在位置(35°N 、 113°E)做剖面(见图 3b 中红点标注位置),由图 5 可见,低空急流的发展分为两个阶段。第一阶段:低空急流发展和建立阶段(19 日 14 时至 20 日 02 时)。19 日夜间低空急流建立发展,最强的急流中心位于 850 hPa

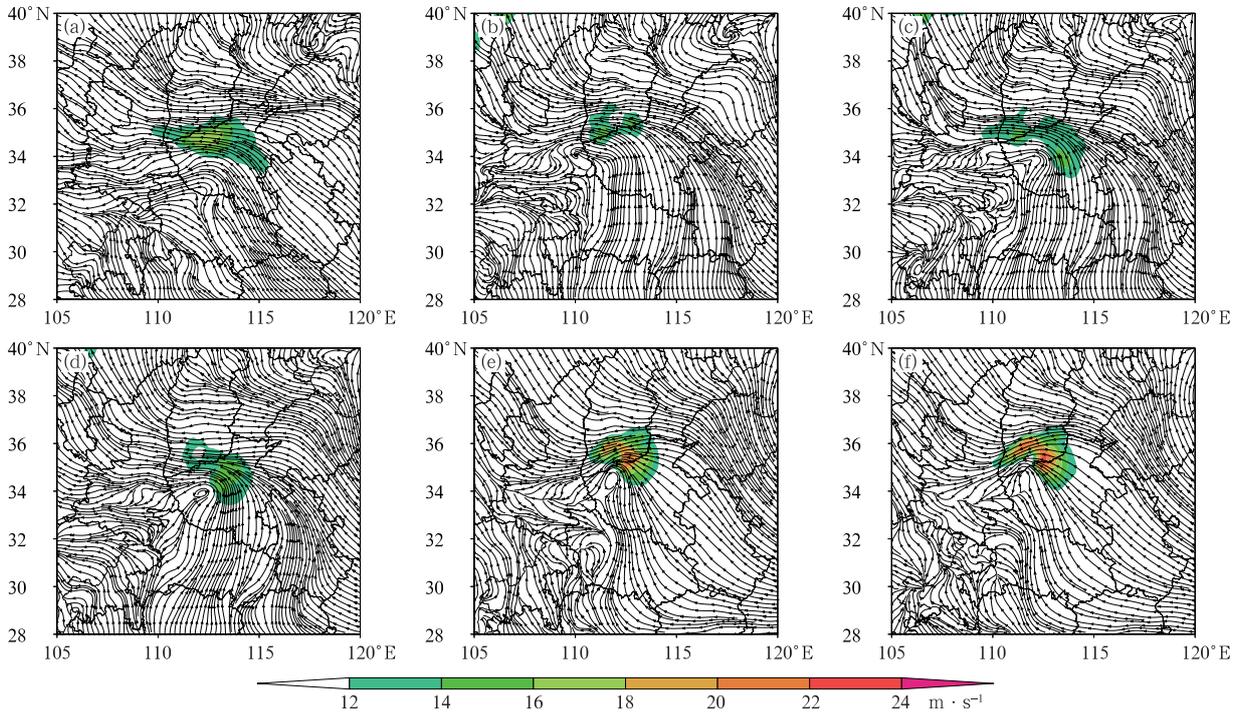


图 4 2021 年 7 月 19—20 日 850 hPa 流场和风速(填色, 风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 19 日 20 时, (b) 20 日 05 时, (c) 20 日 06 时, (d) 20 日 08 时, (e) 20 日 14 时, (f) 20 日 16 时

Fig. 4 The 850 hPa stream field and wind speed (colored, wind speed $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) at

(a) 20:00 BT 19, (b) 05:00 BT 20, (c) 06:00 BT 20, (d) 08:00 BT 20,

(e) 14:00 BT 20 and (f) 16:00 BT 20 July 2021

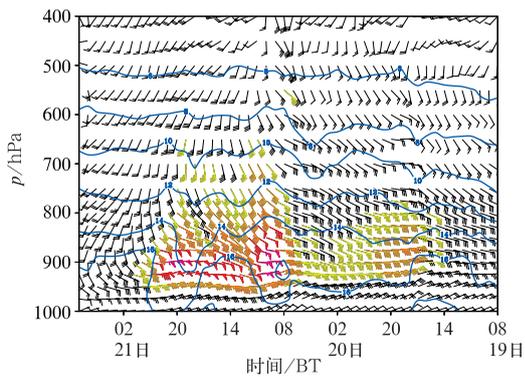


图 5 2021 年 7 月 19—21 日沿强降水中心所在位置 ($35^\circ\text{N}, 113^\circ\text{E}$) 风场(风羽,

彩色代表风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和比湿场 (蓝线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 垂直变化

Fig. 5 Vertical variations of wind (barb, colored; wind speed $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

and specific humidity (blue line; unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) along heavy rainfall center ($35^\circ\text{N}, 113^\circ\text{E}$)

during 19—21 July 2021

附近, 强度为 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 急流所在高度位于 $950 \sim 800 \text{ hPa}$, 为一致的偏东风, 20 日凌晨风速略有减

弱。第二阶段: 低空急流再度加强阶段 (20 日 08—20 时)。20 日白天, 低空急流再度强烈发展, 最强的急流位于 900 hPa 附近, 强度达到 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 低层为偏东风, 而 850 hPa 以上逐渐转为东南风, 急流的伸展高度可以达到 700 hPa 附近。从两个阶段的急流特点来看, 第二阶段的急流与中尺度低涡相伴随, 急流强度明显增强, 并且第二阶段的风场随高度顺时针旋转, 更有利于暖湿空气的输送。

3.2 中尺度低涡演变

从各层流场和涡度场分布来看 (图 6), 20 日 06 时在 $700 \sim 600 \text{ hPa}$ 首先发展形成低涡, 先于 850 hPa (20 日 07 时生成), 500 hPa 以上为一致的西南气流并有气旋性弯曲。显然低涡是从 $700 \sim 600 \text{ hPa}$ 高度层先发展起来, 再向上向下发展。低涡在 700 hPa 上向西偏北方向移动, 一直到 20 时, 维持了近 15 h。600 hPa 低涡西北移动后维持时间更长, 可能与凝结潜热加热在此层次最大有关。850 hPa 低涡维持的时间较短, 16 时消失, 减弱为倒槽, 低涡维持约 10 h (图 7)。低涡向西北方向移动, $700 \sim 600 \text{ hPa}$

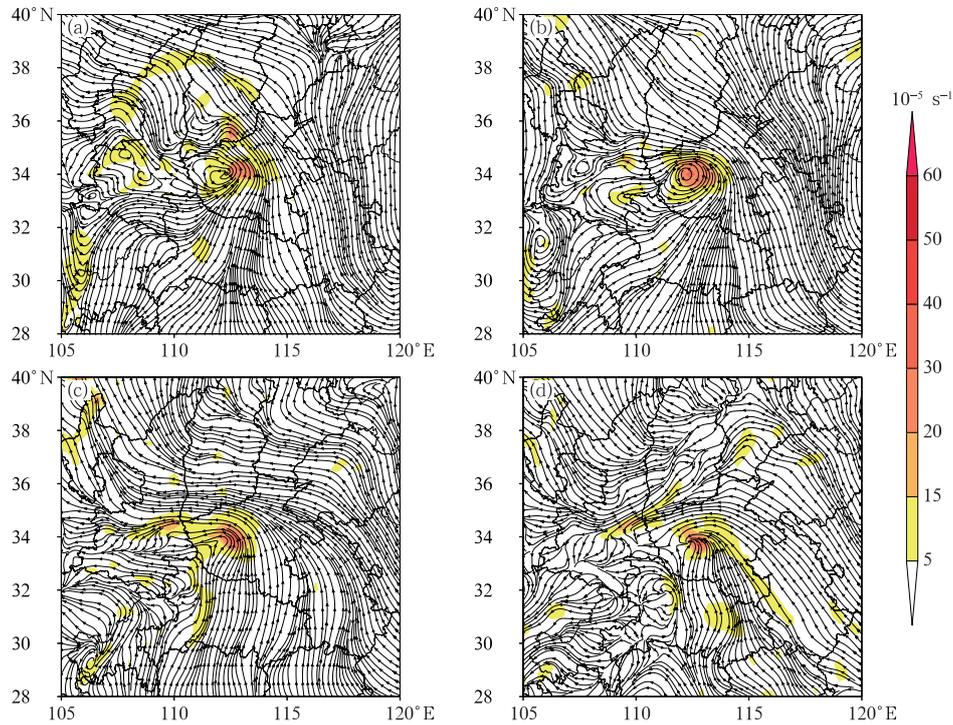


图 6 2021 年 7 月 20 日 06 时(a)600 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa,(d)925 hPa 流场和涡度场(填色)

Fig. 6 The stream field and the vorticity (colored) at (a) 600 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 925 hPa at 06:00 BT 20 July 2021

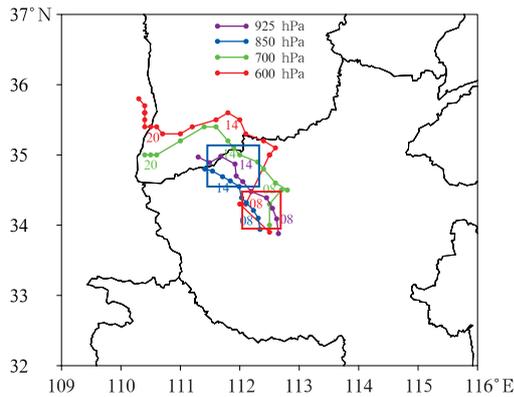


图 7 2021 年 7 月 20 日中尺度低涡各层移动路径 (紫色:925 hPa,07—17 时;蓝色:850 hPa,07—16 时;绿色:700 hPa,06—21 时;红色:600 hPa,20 日 06 时至 21 日 03 时。不同颜色的数字分别对应不同层次 08 时、14 时、20 时的低涡位置。红蓝色方框代表图 11 中所选区域)

Fig. 7 The paths of the mesoscale vortex at different layers on 20 July 2021 (purple: 925 hPa, from 07:00 BT to 17:00 BT; blue: 850 hPa, from 07:00 BT to 16:00 BT; green: 700 hPa, from 06:00 BT to 21:00 BT; red: 600 hPa, from 06:00 BT to 03:00 BT 21. The numbers 08, 14 and 20 in different colors correspond respectively to the positions of the vortex at different levels at 08:00 BT, 14:00 BT and 20:00 BT. Red and blue boxes refer to the areas taken in Fig. 11)

低涡移动较快,维持时间较长,925~850 hPa 低涡移动慢,维持时间较短,低涡中心垂直轴线向西北方向倾斜。

中尺度急流与中尺度低涡在降水发展增强中起到了至关重要的作用。从区域平均的风速、涡度场与降水量的演变来看(图 8),随着低空急流的发展和建立(19 日 20 时前后),降水开始逐渐发展加强。中尺度低涡的形成(20 日 06 时前后)出现在低空急流之后,随着中尺度低涡的发展增强,低涡北侧的中尺度低空急流进一步发展,同时伴随着降水的显著增强,造成了河南省极端的强降水。随着低空急流和低涡系统的减弱,降水逐渐减弱。

4 低空急流及低涡的形成机制

4.1 天气系统对低空急流形成的影响

由前述可知,7 月 19—20 日,我国东部为西太平洋副热带高压(简称副高)控制,而河套东南部为弱低压系统(简称河套弱低压),副高以及河套弱低压的东西摆动,造成两者之间气压梯度的变化,是低空急流形成的重要原因之一。正如我国长江流域及

华南地区的强降水过程,当有低空急流相伴时,急流的东侧往往是副高,西侧多为低压系统(如西南涡),这种高低压系统的过渡带形成了强大的水平气压梯度,从而加强了风速并有利于低空急流的形成(吴哲珺等,2019;刘鸿波等,2014;许美玲等,2004)。19日夜间开始,副高逐渐西伸,5860 gpm 等高线西伸脊点位于 115°E 附近。随着副高的西伸,水平气压梯度加大,风速增强,低空急流建立。此时 850 hPa 急流核中心风速为 $16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。20日 02 时,副高 5860 gpm 等高线略有东撤,同时河套弱低压发展加强。此阶段,低空急流强度有所减弱。06 时,5860 gpm 等高线再度西伸至 115°E 附近(图 9),受 200 hPa 高空槽东移影响,河套弱低压进一步发展并东移,使得高、低压系统之间的过渡带水平气压梯度加大,位于两者之间的黄淮、江淮等地东南气流也随之增强,其中河南为风速大值中心,有中尺度低空急流发展及增强。20日 08 时,对流层低层河南西部中尺度低涡系统已经生成并增强发展,与此同时,低涡北侧的低空急流迅速增强。10 时,急流中心风速达到了 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。12 时,副高进一步西伸,急流略向西移,风速进一步增强,16 时风速达到了 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。18 时之后,河套弱低压西退至陕西中部,强度减弱,急流强度逐渐减弱。由此可见,

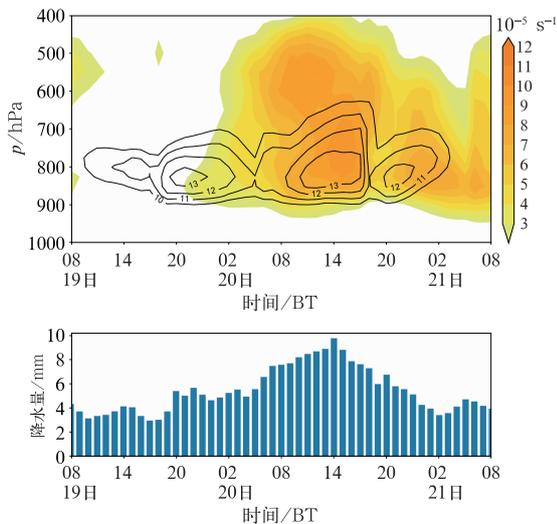


图 8 2021 年 7 月 19—21 日区域平均(34°~36°N、111°~114°E)的(a)风速(实线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、涡度场(填色)和(b)降水量
Fig. 8 Temporal variation of (a) the wind speed (solid line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), vorticity (colored) and (b) precipitation averaged within (34°-36°N, 111°-114°E) during 19-21 July 2021

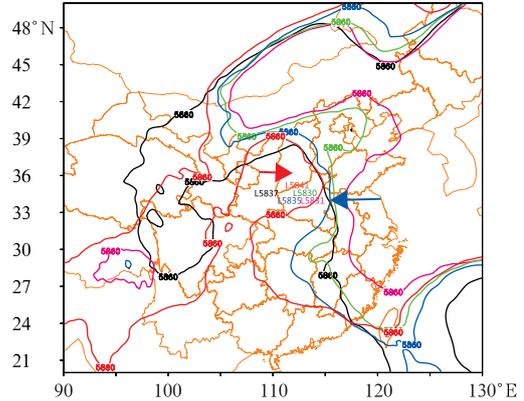


图 9 2021 年 7 月 19 日 20 时(黑线)和 20 日 02 时(紫线)、06 时(绿线)、08 时(蓝线)、12 时(红线)500 hPa 5860 gpm 等高线位置(不同颜色 L 代表相应时刻河套弱低压中心位置,数字代表强度,单位:gpm;蓝色、红色箭头分别表示副高、河套弱低压的移动)

Fig. 9 The position diagram of the 5860 gpm geopotential height at 500 hPa at 20:00 BT 19 (black line), 02:00 BT (purple line), 06:00 BT (green line), 08:00 BT (blue line) and 12:00 BT (red line) 20 July 2021 (L and number in different colors represent the location and intensity of the low pressure in Hetao Area at the corresponding time, respectively. Blue and red arrows represent movement of the subtropical high and Hetao weak low, respectively)

副高的增强西伸和河套弱低压发展东移对低空东南气流的增强及河南境内低空急流发展起到了非常重要的作用。

4.2 地转风及地转偏差风分析

如上所述,受副高和河南上游河套弱低压相向移动影响,河南附近等高线密集度加大。从计算的地转风可以看出,气压梯度的加大导致低压东侧南风或东南风明显加大,这是东南低空急流加大的原因之一。进一步分析地转偏差发现,在河南的中北部有偏北的地转偏差风,从而使得实际上河南北部偏东分量加大,以偏东或东东南急流为主。由于地转偏差的存在,使得实际风场的辐合中心位于地转风涡度中心的南侧,更有利于在郑州附近等地产生强的辐合中心(图 10a)。从计算的 850 hPa 的 24 h 变高来看(图 10b),20 日 08 时,24 h 负变高中心达到了 9 gpm,负变高中心位于河南西部。变高梯度大值区对应偏东北的非地转风,与变高梯度的方向

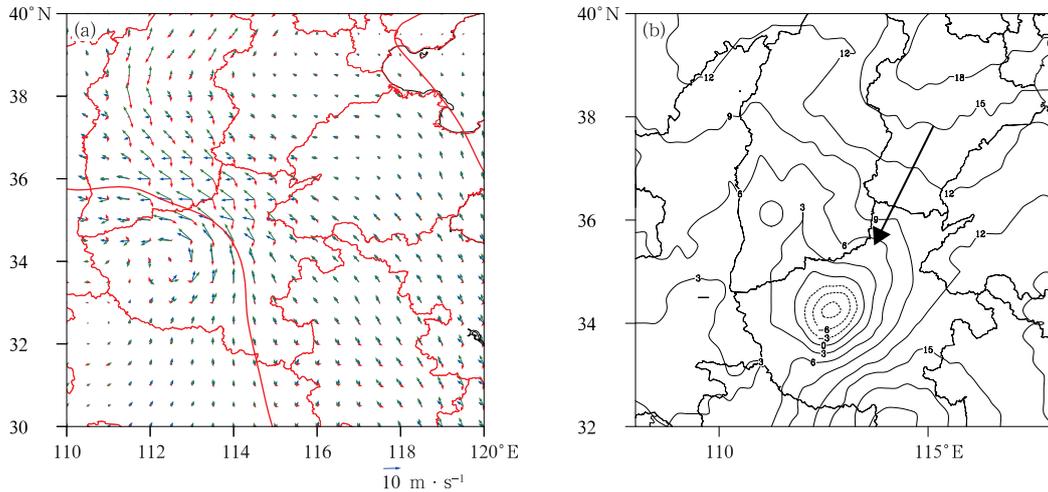


图 10 2021 年 7 月 20 日 08 时 850 hPa(a)高度场(红线)和风场(b)24 h 变高场(单位: gpm)

(图 10a 中:蓝色、绿色、红色风矢分别代表总风场、地转风、非地转风)

Fig. 10 The 850 hPa (a) geopotential height (red line) and wind field

(b) 24 h change of the geopotential height filed (unit: gpm) at 08:00 BT 20 July 2021

(vector blue: total wind field, green: geostrophic wind, red: ageostrophic wind)

一致。20 日 10 时,负变高中心强度达到了 18 gpm,变高梯度有所增强,相应的非地转风也略有增强。从地面观测的 24 h 变压场(图略)亦可以看到强负变压中心。因此河南中北部存在较强的变压风,且变压风的方向为偏东北风,这与分析的地转偏差风较为一致。

因此,在整个低空急流发展加强阶段,地转偏差风的贡献主要是对风向的改变,而对风速动能的增加起正贡献的主要是大尺度地转风速的增大。这不同于一般大尺度低空急流的超地转特征,这方面的机理分析还需要做进一步的相关研究。

4.3 涡度收支分析

由前述可知,中尺度低涡形成后,中尺度低空急流再度发展,强度迅速增强。中尺度低涡的生成发展与中尺度低空急流的增强密切相关。为了进一步分析中尺度低涡形成发展的机制,我们利用涡度方程,计算了涡度场的变化(Kirk,2003)。公式如下:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \left[\underset{A}{u \frac{\partial \zeta}{\partial x}} + v \left(\beta + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) \right] - \underset{B}{\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}} - \underset{C}{(f + \zeta) \times \nabla \cdot \mathbf{V}} - \underset{D}{\left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \right)} - \underset{E}{g \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial \tau_y}{\partial x} - \frac{\partial \tau_x}{\partial y} \right)}$$

式中: u 为纬向水平风速, v 为经向水平风速, ω 为垂直速度, ζ 为涡度, f 为科里奥利参数, $\beta = \partial f / \partial y$,

τ_x 和 τ_y 分别为纬向和经向的摩擦力。等号右侧,A 项为水平平流项,B 项为垂直平流项,C 项为水平辐合项,D 项为扭转项,E 项为摩擦项。中尺度低涡在发展过程中各项对于低涡的发展起到不同的作用,我们对 A、B、C、D 四项取区域平均,忽略摩擦的影响,即不考虑 E 项。

由于低涡尺度小且向西北方向移动,在低涡的不同阶段,选取低涡中心附近区域计算区域平均涡度收支各项的分布(图 11)。低涡生成阶段,水平辐合项在对流层低层使正涡度增加,有利于低层涡旋的发展。在这段期间内,低层辐合对低涡的发展起到了重要的作用。20 日 08 时低层水平辐合项的量值较 02 时有很大的增长,达到了 $3.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$ 。而高层的辐散并没有显著变化。08 时正是低涡形成并强烈发展阶段,这进一步说明由中尺度低空急流造成的低层辐合增强对低涡的发展有重要的作用。对流层中层,由于强烈的上升运动,垂直涡度平流作用也使得涡度增强。从涡度场的垂直分布来看,800 ~ 700 hPa 附近的涡度最强,随着低涡的生成和发展,涡度增强。由此可见,在低涡生成阶段,对流层中低层涡度的增长是由低空急流造成的低层辐合为主要原因,而在对流层中层以垂直平流的作用为主要原因。

中尺度低涡生成后向西北方向移动并强烈发展,涡度场增强,最强涡度值由 08 时的 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 增

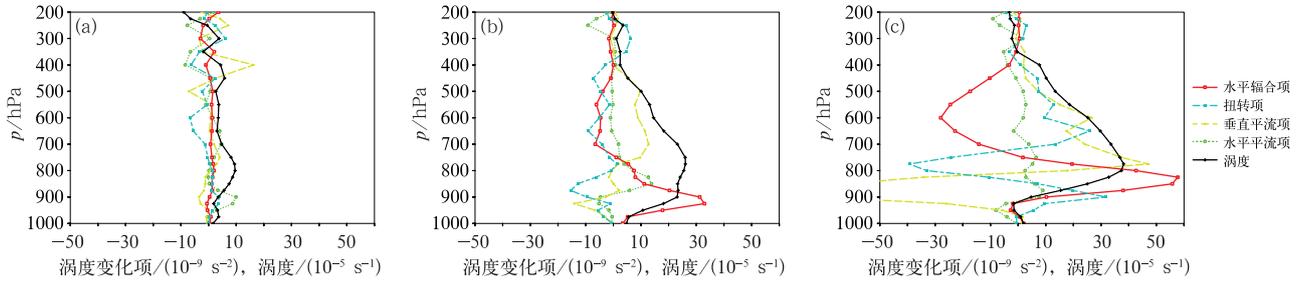


图 11 2021 年 7 月 20 日区域平均涡度各项变化及涡度场的垂直分布

(a) 02 时(低涡形成前, $34.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 、 $112.5^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$),

(b) 08 时(低涡形成时, 图 7 中红色方框区域, $34^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\sim 112.5^{\circ}\text{E}$),

(c) 14 时(低涡形成后, 图 7 中蓝色方框区域, $34.8^{\circ}\sim 35.3^{\circ}\text{N}$ 、 $111.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}\text{E}$)

Fig. 11 Vertical distributions of region-averaged vorticity change and vorticity field

at (a) 02:00 BT 20 (before the formation of low vortex, $34.5^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $112.5^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$),

(b) 08:00 BT 20 July (at the time of low vortex formation) red box in Fig. 7 ($34^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$, $112^{\circ}\sim 112.5^{\circ}\text{E}$),

(c) 14:00 BT 20 July 2021 (low vortex developed) blue box in Fig. 7 ($34.8^{\circ}\sim 35.3^{\circ}\text{N}$, $111.5^{\circ}\sim 112.5^{\circ}\text{E}$)

强至 14 时的 $4.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。14 时, 对流层低层 850 hPa 附近的水平辐合项增强显著, 达到了 $6.0 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$, 由此可见, 低涡生成之后, 伴随中尺度低涡的发展, 中尺度低空急流强烈发展, 使得低层的辐合显著增强, 进而又增强了低层的涡度。另外, 垂直平流项仍对低涡的增长有正贡献, 但高度有所降低, 这也与此时垂直上升运动的大值中心高度相一致。

此外, 扭转项在此次低涡发展过程中也起到了重要的作用, 在低涡生成以后, 随着中尺度低空急流的增强, 扭转项对涡度增强的作用也显著增强, 但其作用集中在对流层低层, 这说明低空急流造成的风速垂直变化, 以及低层垂直速度水平分布不均匀, 使得水平涡度向垂直涡度的转换。

由此可见, 在中尺度低涡发展过程中, 对流层中低层主要由水平辐合项起直接作用, 同时扭转项对中尺度低涡发展也起到了正贡献, 而这两项均与低空急流发展及其垂直结构有直接关系。而在对流层中高层, 与垂直上升运动有关的垂直平流项对低涡发展起到了重要的作用。相比较而言, 水平平流项的作用很小。

不少研究低涡暴雨的学者也都诊断过低涡形成的涡度收支, 不同的个例涡度收支的不同项所起作用不尽相同。例如有学者研究了大别山低涡暴雨 (Fu et al, 2021), 指出拉伸项和垂直平流项对低涡的发展起重要的作用, 而扭转项和水平平流却抑制低涡的发展。这与本个例的研究不完全相同, 但是本次个例中拉伸项和垂直平流项也起到显著的作用。

4.4 凝结潜热加热的作用

伴随低空急流和低涡系统发展出现的强降水, 必然产生强烈的凝结潜热释放 (胡宁等, 2020)。凝结潜热的释放对于低空急流和中尺度低涡有何作用? 我们计算了凝结潜热加热。

潜热加热的计算公式如下:

$$Q = -L \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right)$$

式中: Q 为潜热加热, L 为凝结潜热, q 为比湿, \mathbf{V} 为水平风矢量, ω 为垂直速度。

从各层凝结潜热的分布来看, 凝结潜热的增强和中尺度低涡的发展增强相伴随。700 hPa 凝结潜热的分布来看 (图 12a), 伴随着降水的增强, 低涡环流北侧凝结潜热增强, 同时低涡发展增强。凝结潜热加热从大气低层向上, 凝结潜热加热增大, 至 700 hPa 达到最大, 再向上开始减小, 最大加热层在 700 hPa 附近 (图 12b)。从凝结潜热随时间的变化显示 (图略), 20 日 08 时之后, 对流层中低层的凝结潜热加热显著增强, 同时中尺度低涡发展增强。

由位涡方程 (Hoskins et al, 1985) 可以推导出位涡演变与加热率的近似关系:

$$\frac{dq}{dt} \approx -g\eta \frac{\partial \left(\frac{d\theta}{dt} \right)}{\partial p}$$

式中: q 为位涡, g 为重力加速度, $d\theta/dt$ 为加热率, η 为绝对涡度。由上式可知, 当加热率随高度递增时, 有正的位涡异常产生, 位涡增长率取决于加热梯度,

一般情况下,加热水平梯度引起的位涡增长往往比垂直梯度引起的位涡增长小一个量级。最大加热层 700 hPa 之下会产生正的位涡倾向,因此这也有利于在对流层中下层低涡的发展增强。从 850 hPa 位涡分布(图 13)可见,低涡生成增强时,850 hPa 出现了明显的正位涡分布,位涡增大时,中尺度低涡也强烈增强。此外,正位涡异常将会产生附加的水平气旋性环流,使低涡北侧的偏东风进一步加强,有利于低空急流的增强。

凝结潜热释放是影响中尺度低涡生成发展的重要因素之一,本文仅做了初步的诊断,水汽及其凝结潜热加热对低涡的生成、维持以及结构演变等作用的影响,还需要更为深入和细致的模拟及研究工作。

综上所述,副高的西伸以及河套弱低压东移,两者相向运动造成的气压梯度的加大导致南风或东南风明显加大,这是低空急流建立和发展的主要原因

之一;而因降水造成的负变压及副高西伸造成的正变压使得河南北部具有偏北变压风,该变压风的贡献主要是对风向的改变,从而使得河南在边界层低层以偏东急流为主;低空急流的发展,引起低层辐合增强和涡管扭转,是中尺度低涡生成和发展重要的原因之一,而垂直上升运动造成的涡度垂直平流为低涡发展也提供了重要的动力作用;降雨引起的对流层中层凝结潜热加热是对流层低层中尺度低涡发展增强的又一重要原因之一。此外,中尺度低涡的增强,也进一步促使了低涡北侧低空急流的迅速增强。

通过以上分析,针对中尺度低空急流以及中尺度低涡的特征和形成机制给出本次河南暴雨的概念模型(图 14),该个例在实际预报中极为少见,并不典型。该概念模型与典型的低涡暴雨天气过程的高低层配置有较大的差别。

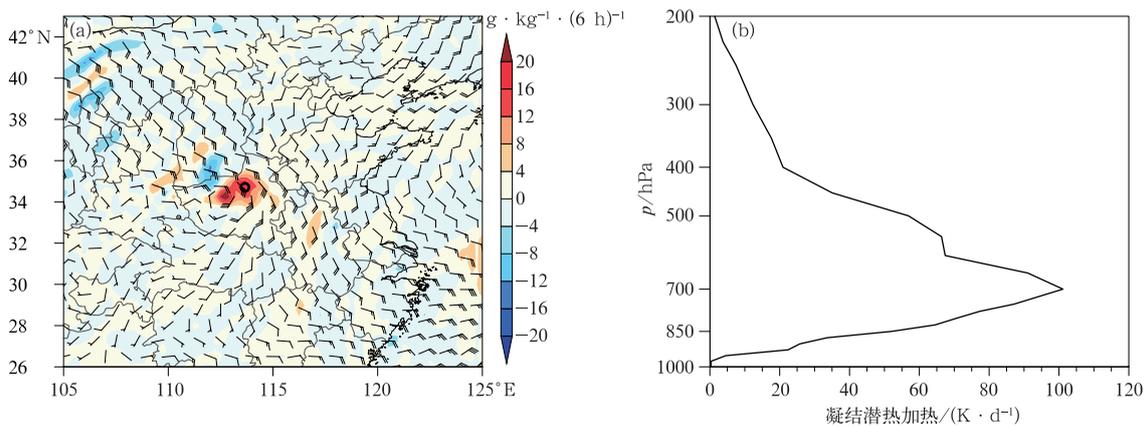


图 12 2021 年 7 月 20 日 08 时(a)700 hPa 凝结潜热加热(填色)和风场(风羽)分布, (b)沿低涡中心(34°N、112.5°E)凝结潜热加热垂直分布

Fig. 12 (a) The 700 hPa latent heating (colored) and wind field (barb), (b) vertical profile of latent heating along vortex center (34°N, 112.5°E) at 08:00 BT 20 July 2021

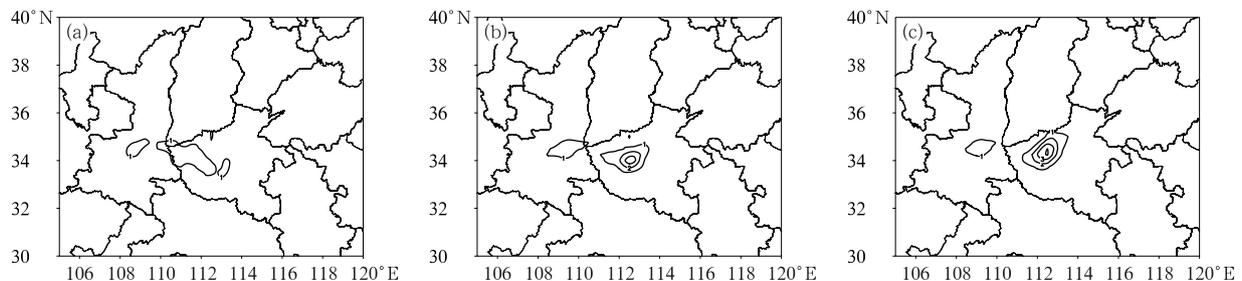


图 13 2021 年 7 月 20 日(a)02 时(低涡形成前),(b)08 时(低涡形成时), (c)10 时(低涡形成后) 850 hPa 位涡分布(单位: $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$)

Fig. 13 The 850 hPa PV (unit: $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1} \cdot K \cdot kg^{-1}$) at (a) 02:00 BT 20 (before the formation of low vortex), (b) 08:00 BT 20 (at the time of low vortex formation), (c) 10:00 BT 20 (low vortex developed) July 2021

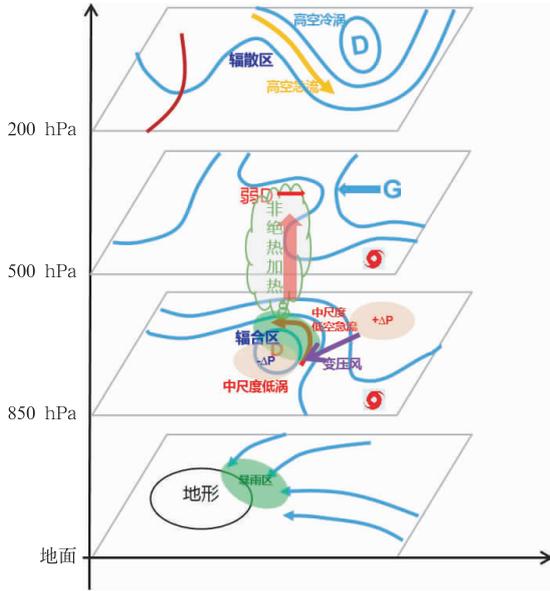


图 14 河南特大暴雨概念模型

Fig. 14 Conceptual model of severe torrential rain in Henan Province

5 结论与讨论

2021 年 7 月 19—20 日河南省出现特大暴雨天气。降水发生期间,对流层中高层环流形势稳定,中高层为弱天气尺度强迫,中低层中尺度低空急流和中尺度低涡的形成和发展增强,是造成强降水的主要影响系统。本文对中尺度低空急流以及中尺度低涡的发展演变特征进行了分析,并进一步探讨了二者的可能形成机制,结论如下:

(1)河南极端暴雨发生在弱天气尺度系统强迫背景下,其直接影响系统为中尺度低空急流以及中尺度低涡。偏东南风低空急流的增强对暴雨产生起了主要作用,与降水的发展和增强同步。低空急流主要维持在近地面至 700 hPa 附近,低层为偏东风,850 hPa 以上逐渐转为东南风。

(2)中尺度低涡的形成出现在低空急流建立后约 10 h,低涡首先从 700 hPa 高度层附近发展起来后再向上向下发展。低涡中心垂直轴线随高度向西北方向倾斜。随着中尺度低涡的发展增强,低涡北侧低空急流强烈发展,同时伴随着降水的显著增强,造成了河南省郑州附近的极端强降水。

(3)西太平洋副热带高压西伸以及河套弱低压东移造成河南境内气压梯度加大,导致南风或东南风明显增强,这是东南低空急流建立和发展的主要

原因之一;而正负变压使得河南北部具有偏北变压风,叠加了地转风,使得河南在低层以偏东急流为主。地转偏差风的贡献主要是对风向的改变,使河南地区在低层以偏东急流为主。

(4)低空急流的发展,引起中低层辐合增强和涡管扭转,是中尺度低涡生成和发展的重要原因之一,而垂直上升运动造成的垂直涡度平流为低涡的发展也提供重要动力作用;降雨引起的对流层中层凝结潜热加热是对流层低层中尺度低涡发展增强的又一重要原因。

(5)低空急流发展增强了降水,低空急流加强以及降水凝结潜热释放有利于中尺度低涡发展加强,低涡的增强又进一步促使低空急流和降水的显著增强,造成了河南极端强降水。中尺度低空急流、中尺度低涡以及暴雨三者之间存在较为复杂的耦合关系,三者之间存在相互正反馈的过程。

本文研究的暴雨过程在实际预报中极为少见且并不典型,在对流层中高层仅为弱的高空强迫下,低层中尺度低涡和中尺度低空急流强烈发展。与典型的梅雨锋低涡暴雨、华北低涡暴雨等都明显不同,这些典型的低涡暴雨个例都是在中高层有明显的动力强迫下,低层的低涡系统强烈发展(赵思雄等,2004;2018;雷蕾等,2017;孙军等,2012;孙建华等,2013)。本次中尺度低涡尺度较小(β 中尺度),类似于梅雨锋上的 β 中尺度低涡,对于中尺度低涡不同发展阶段的主要贡献因子有待做进一步细致的对比研究。

本文的研究仅限于低空急流以及中尺度低涡形成发展的机制分析,而对于暴雨、低空中尺度急流和 β 中尺度低涡之间的关系及物理机制还有待进一步的分析研究。此外,本文主要采用诊断分析方法进行定性分析,对中尺度低空急流和低涡发展各个因子之间的相对重要性还有待深入的模拟研究和敏感性试验。

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).
- 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).
- 傅慎明,于翥,王东海,等,2012. 2010 年梅雨期两类东移中尺度涡旋

- 的对比研究[J]. 中国科学:地球科学, 42(8):1282-1300. Fu S M, Yu F, Wang D H, et al, 2012. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the Mei-yu period of 2010[J]. *Sci China Earth Sci*, 42(8):1282-1300(in Chinese).
- 胡宁, 符娇兰, 汪会, 2020. 华南前汛期强降雨个例模式降水预报误差成因初探[J]. 气象, 46(8):1026-1038. Hu N, Fu J L, Wang H, 2020. Analysis of the source of model precipitation prediction bias for a heavy rainfall event in the pre-flood season in South China[J]. *Meteor Mon*, 46(8):1026-1038(in Chinese).
- 黄士松, 1981. 暴雨过程中低空急流形成的诊断分析[J]. 大气科学, 5(2):123-135. Huang S S, 1981. A diagnostic analysis of the formation and variation of the low-level jet during heavy-rain processes[J]. *Sci Atmos Sin*, 5(2):123-135(in Chinese).
- 姜勇强, 王昌雨, 张维桓, 等, 2003. 台风倒槽内 β 中尺度低涡及特大暴雨的数值模拟[J]. 气象学报, 61(3):312-322. Jiang Y Q, Wang C Y, Zhang W H, et al, 2003. Numerical simulation of extremely heavy rain and meso- β scale low vortex in inverted typhoon trough[J]. *Acta Meteor Sin*, 61(3):312-322(in Chinese).
- 雷蕾, 孙继松, 何娜, 等, 2017. “7·20”华北特大暴雨过程中低涡发展演变机制研究[J]. 气象学报, 75(5):685-699. Lei L, Sun J S, He N, et al, 2017. A study on the mechanism for the vortex system evolution and development during the torrential rain event in North China on 20 July 2016[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(5):685-699(in Chinese).
- 李超, 崔春光, 徐慧燕, 等, 2022. 河南“7·20”暴雨的水汽输送、收支和转化特征对局地强降水的影响机制研究[J]. 气象, 48(11):1497-1511. Li C, Cui C G, Xu H Y, et al, 2022. Study on the characteristics associated with the transportation, budget, conversion of water vapor and the impact on the local precipitation for the Henan “7·20” heavy rainfall event[J]. *Meteor Mon*, 48(11):1497-1511(in Chinese).
- 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等, 2014. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报, 72(2):191-206. Liu H B, He M Y, Wang B, et al, 2014. Advances in low-level jet research and future prospects[J]. *Acta Meteor Sin*, 72(2):191-206(in Chinese).
- 沈杭锋, 翟国庆, 尹金方, 等, 2013. 长江下游梅汛期尺度涡旋特征分析[J]. 大气科学, 37(4):923-932. Shen H F, Zhai G Q, Yin J F, et al, 2013. Feature analysis of mesoscale vortex over lower reaches of Yangtze River during Meiyu period[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(4):923-932(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).
- 孙军, 湛芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. 气象, 38(10):1267-1277. Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing. Part II: Preliminary causation analysis and thinking [J]. *Meteor Mon*, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等, 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征[J]. 大气科学, 37(3):705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al, 2013. Multi-scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing Area on July 21, 2012[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(3):705-718(in Chinese).
- 孙淑清, 翟国庆, 1980. 低空急流的不稳定性及其对暴雨的触发作用[J]. 大气科学, 4(4):327-337. Sun S Q, Zhai G Q, 1980. On the instability of the low level jet and its trigger function for the occurrence of heavy rain-storms[J]. *Sci Atmos Sin*, 4(4):327-337(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社. Tao S Y, 1980. *Rainstorms in China*[M]. Beijing:Science Press(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).
- 吴哲琨, 包云轩, 朱霆, 等, 2019. 长江流域一次大暴雨过程的低空急流形成和影响机制分析[J]. 热带气象学报, 35(3):409-422. Wu Z J, Bao Y X, Zhu T, et al, 2019. Study on the mechanism of low-level jet in a heavy rainfall in the Yangtze River Basin[J]. *J Trop Meteor*, 35(3):409-422(in Chinese).
- 许美玲, 段旭, 孙绩华, 等, 2004. 与低空急流相伴的暴雨天气诊断分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 26(4):320-324. Xu M L, Duan X, Sun J H, et al, 2004. Diagnostic study on the torrential rains coupling with the lower southwest jets in Yunnan[J]. *J Yunnan Univ*, 26(4):320-324(in Chinese).
- 张敬萍, 傅慎明, 孙建华, 等, 2015. 夏季长江流域两类中尺度涡旋的统计与合成研究[J]. 气候与环境研究, 20(3):319-336. Zhang J P, Fu S M, Sun J H, et al, 2015. A statistical and compositional study on the two types of mesoscale vortices over the Yangtze River Basin[J]. *Climatic Environ Res*, 20(3):319-336(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).
- 赵思雄, 孙建华, 鲁蓉, 等, 2018. “7·20”华北和北京大暴雨过程的分析[J]. 气象, 44(3):351-360. Zhao S X, Sun J H, Lu R, et al, 2018. Analysis of the 20 July 2016 unusual heavy rainfall in North China and Beijing[J]. *Meteor Mon*, 44(3):351-360(in Chinese).
- 赵思雄, 陶钜钰, 孙建华, 等, 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究[M]. 北京:气象出版社. Zhao S X, Tao Z Y, Sun J H, et al, 2004. Study on the Mechanism of the Formation and Development of Heavy Rainfall on the Meiyu Front in Yangtze River [M]. Beijing:China Meteorological Press(in Chinese).
- Chen G T J, Wang C C, Lin D T W, 2005. Characteristics of low-level jets over northern Taiwan in Mei-Yu season and their relation-

- ship to heavy rain events[J]. *Mon Wea Rev*, 133(1):20-43.
- Chen G T J, Wang C C, Lin L F, 2006. A diagnostic study of a retreating Mei-Yu front and the accompanying low-level jet formation and intensification[J]. *Mon Wea Rev*, 134(3):874-896.
- Chen S J, Kuo Y H, Wang W, et al, 1998. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front[J]. *Mon Wea Rev*, 126(9):2330-2351.
- Fu S M, Sun J H, Luo Y L, et al, 2017. Formation of long-lived summertime mesoscale vortices over central East China; semi-idealized simulations based on a 14-year vortex statistic[J]. *J Atmos Sci*, 74(12):3955-3979.
- Fu S M, Tang H, Li Y, et al, 2021. On the relationship of a low-level jet and the formation of a heavy-rainfall-producing mesoscale vortex over the Yangtze River Basin[J]. *Atmosphere*, 12(2):156.
- Fu S M, Yu F, Wang D H, et al, 2012. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the mei-yu period of 2010[J]. *Sci China Earth Sci*, 56(2):282-300.
- Fu S M, Zhang J P, Sun J H, et al, 2016. Composite analysis of long-lived mesoscale vortices over the middle reaches of the Yangtze River Valley; octant features and evolution mechanisms[J]. *J Climate*, 29(2):761-781.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al, 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 146(730):1999-2049.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W, 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 111(470):877-946.
- Houze R A Jr, 2018. 100 years of research on mesoscale convective systems[J]. *Meteor Monogr*, 59(1):1-17, 54.
- Kirk J R, 2003. Comparing the dynamical development of two mesoscale convective vortices[J]. *Mon Wea Rev*, 131:862-890.
- Zhang Q H, Lau K H, Wang H Q, et al, 2000. Numerical simulation on mesoscale convective system along Mei-Yu front in southern China[J]. *Chin Sci Bull*, 45(22):2093-2096.

(本文责编:戴洋)