

文章编号: 2096-1618(2024)03-0291-09

# 西行低涡特征及其对“21.7”河南暴雨影响分析

方震天<sup>1,2</sup>, 谌芸<sup>1,3</sup>, 肖天贵<sup>1</sup>, 郭照华<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 德州市气象局, 山东 德州 253000; 3. 国家气象中心, 北京 100081)

**摘要:**2021年7月河南出现极端暴雨, 黄淮地区存在一个自东向西移动的低涡, 是降水过程发展增强的主要影响系统。针对低涡的研究主要集中于自西向东的移动路径, 很少考虑西行低涡的机制及特征。利用地面常规气象资料、区域气象站及雷达等非常规观测资料、ERA5再分析资料, 对“21.7”暴雨的大气环流形势、西行低涡移动路径、各层系统配置及低涡西行原因进行特征分析, 并从水汽、热力、动力及对流触发等方面分析西行低涡对“21.7”暴雨的影响, 结果表明: (1) “21.7”河南暴雨期间大气环流形势稳定, 黄淮地区为典型的“鞍型场”, 西行低涡移动路径为先向西南后向西北。(2) 西行低涡各层系统配置复杂, 低涡东侧副高及台风“烟花”西进使低涡附近偏东急流加强, 低涡自东向西移动。(3) 西行低涡水汽条件充沛、动力条件旺盛、热力条件充足, 低涡与低层切变线、地面辐合线共同作用, 使对流触发条件增强。

**关键词:** 中尺度气象; 河南暴雨; 西行低涡; 移动路径; 特征分析

**中图分类号:** P458.1+21.1

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2024.03.005

## 0 引言

2021年7月, 河南出现历史罕见的极端暴雨天气, 最大过程雨量1631 mm, 郑州站最大小时雨量201.9 mm, 打破了国家站记录。“21.7”河南暴雨是东亚大气环流异常协同作用下的结果, 涉及高中低层多种类、多尺度天气系统间的相互作用<sup>[1]</sup>。丁一汇等<sup>[2]</sup>提出低涡、暖切变线和低槽冷锋是造成华北暴雨的3种主要天气系统, 华北暴雨大部分出现在两个及以上天气系统相互作用或叠加的情况下。周玉淑等<sup>[3]</sup>研究发现华北暴雨经常伴随地面大风, 大风的阵性及分布不均造成局地辐合辐散变化大, 极易产生中尺度涡旋。谌芸等<sup>[4-5]</sup>对北京市2012年“7.21”大暴雨过程分析指出极端降水过程发生在高层辐散、中低层低涡切变和地面辐合线等高低空系统耦合的背景下。Xu等<sup>[6]</sup>将“21.7”河南暴雨环流背景归类于第8环流型, 其特征为副高与台风之间的水平气压梯度导致华北平原受强东南风影响, 极端降水事件在沿山脉地区表现为强降水强度和长持续时间。蔡芴宁等<sup>[7]</sup>研究“21.7”河南暴雨指出对流层高层冷涡对河南暴雨过程中天气系统的稳定维持、高空辐散增强有重要作用, 并与副高、台风等天气系统有复杂影响。孔期等<sup>[8]</sup>研究指出

“21.7”河南暴雨发生在弱天气尺度系统强迫背景下, 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。

夏季中国北方处于中纬度盛行西风带, 低涡的移动路径通常都是自西向东<sup>[9]</sup>, 但长期的业务预报经验发现, 在低层特定环流背景下有低涡自东向西移动的现象<sup>[10]</sup>, “21.7”河南暴雨是由西行低涡触发形成。Jiang等<sup>[11]</sup>对西行低涡的发展机制进行理论研究, 指出鞍形场是导致中尺度涡旋和强降水发生的常见模式。鞍形场的弱环境有利于低涡的形成和维持<sup>[12]</sup>, 强烈的水平和垂直水汽梯度有利于中尺度对流涡发展<sup>[13]</sup>。Jiang等<sup>[14]</sup>研究指出切变线内易形成中尺度低涡, 切变线以南的低空急流带来暖湿空气<sup>[15]</sup>, 当对流由低层向高层发展时, 潜热在中高层释放并使低层强烈辐合, 非地转西南风使低涡东南象限降雨迅速增强<sup>[16]</sup>。陈联寿等<sup>[17]</sup>关于高空冷涡诱发台风生成的研究发现, 在冷性环流延伸到地面之后, 高空部分减弱衰亡, 低层留下一个低涡, 高空槽两侧高压脊反气旋打通, 把低涡切断在东风气流中, 运动方向由向东转为向西, 这与西行低涡的形成过程类似<sup>[18]</sup>。

西行低涡移动路径特殊, 触发机理复杂, 降水性质独特, 在业务预报实践中把握难度很大, 当前面临许多尚待解决的科学问题: (1) 西行低涡产生形势背景, 其移动路径特点; (2) 西行低涡的垂直结构, 低涡西行的原因; (3) 西行低涡对水汽输送和热、动力条件增幅效

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52239006、41930972、41975001)

通信作者: 谌芸. E-mail: chenyun@cma.gov.cn

果,对暴雨的触发和维持的作用。文中常规地面观测数据和加密地面观测数据主要采用中国气象局天擎整编国家站和区域站逐小时观测,天气形势诊断分析主要基于 ECMWF-ERA5( $0.25^{\circ}\times0.25^{\circ}$ ,逐1 h)再分析数据,雷达数据主要采用郑州站 CIN-RAD/SA 雷达基数据(逐6 min)。目前对西行低涡形成机理及特征分析的研究很少,希望通过研究西行低涡的生消演变特征及其诱发暴雨活动的特点为低涡暴雨的研究及预报提供有价值的参考。

1 西行低涡与“21.7”河南暴雨实况

1.1 西行低涡与降水落区的位置关系

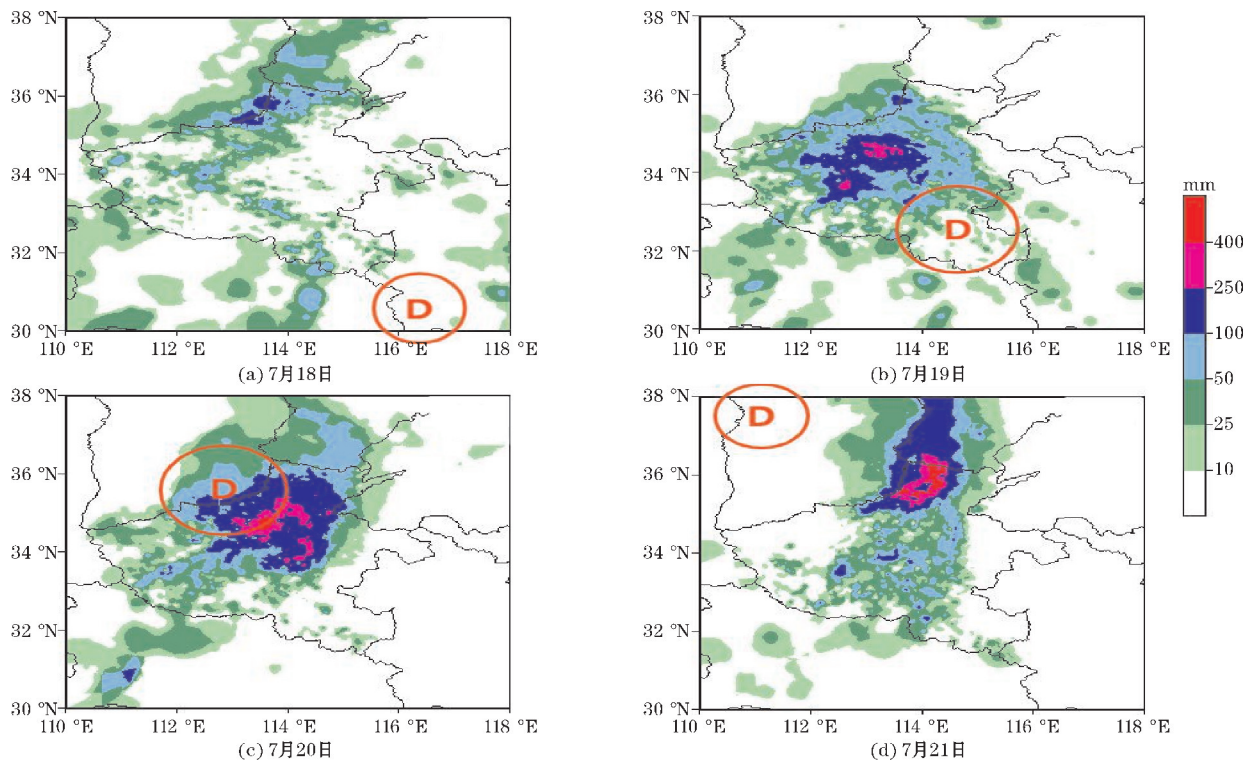


图1 2021年7月18–21日逐日降水量空间分布(D与圆圈表示当日低涡在500 hPa上位置)

此次过程降水强度呈现极端性(图2),17–22日河南1514个站出现共计6007次短时强降水(小时降水量 $\geq 20$  mm),郑州站20日17时小时降水量达201.9 mm,打破中国国家站小时降水量记录。从短时强降水落区空间分布来看,短时强降水大值区主要集中在郑州—新乡—鹤壁一带<sup>[19]</sup>,从地形上来看属于太行山脉迎风坡,同时也是20日西行低涡的东南象限,与累计降水量分布基本一致,呈现显著的局地性特征。这与西行低涡的移动路径及降水特征相吻合,呈现高度一致性,低涡的移动路径直接影响降水落区及强度。

此次降水过程主要集中在18–21日(图1),持续时间4天,其中19日08时–21日08时最强,降水落区和大值区主要集中在河南中北部。18日低涡位于安徽西部与河南交界处,强降水主要发生在河南中部和北部,新乡—安阳一带出现大暴雨;19日低涡向西北方向移动至河南东南部,随着低涡的发展深入,河南降水范围开始明显扩大;20日低涡继续移动至河南西北部与山西交界处,河南中北部地区降水强度进一步增大,降水落区主要集中在低涡东南象限,累计降水量及短时强降水达到过程最大;21日低涡继续西北移至山西西部,强降水落区随之向河南北部及河北南部发展,范围减小,但强度不减,强降水落区更加集中;22日后,低涡逐渐减弱消亡,河南地区降水范围和强度逐渐减弱,此次降水过程趋于结束。

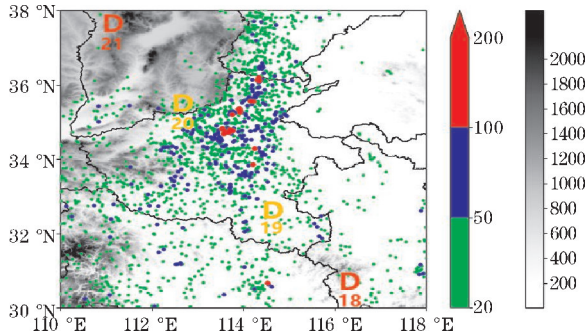


图2 2021年7月17–22日小时短时强降水空间分布及地形(数字表示日期,D表示低涡当日20时在500 hPa上位置)



### 1.2 西行低涡与雷达回波发展关系

由图3可见,20日14时低涡位于郑州西北部,郑州附近存在大面积混合回波,强回波( $\geq 50$  dBZ)区域相对分散,主要位于郑州东北和西南方向,并在郑州上空呈气旋式旋转。15时郑州上空回波区南部出现倒“V”状弱回波缺口,郑州附近水汽聚集抬升,此时强回波区域逐渐向郑州聚集。16时郑州上空强回波继续

发展集中,大量水汽和能量被快速抬升至空中凝结,形成团状强风暴<sup>[20]</sup>,中心大值区达64 dBZ,同时“V”型缺口已抵达郑州站附近,小时降水量开始增加到60.6 mm。17时深厚强盛的回波区在郑州上空集中,中心强度长时间维持在60 dBZ左右,强回波继续发展并向东南方向移动,“V”型缺口伴随着东南气流,将大量的能量和充沛的水汽输送到郑州,郑州小时降水量达201.9 mm。

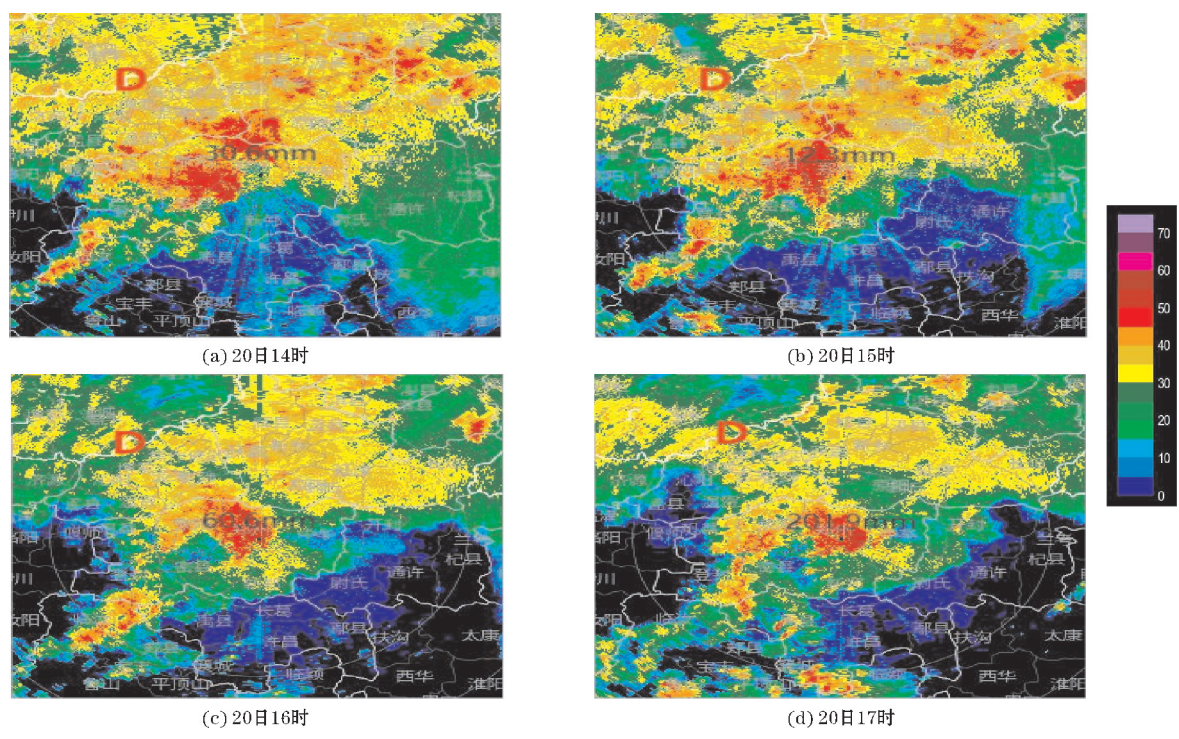


图3 2021年7月20日14–17时郑州多普勒雷达(0.5°仰角组合反射率因子数字为该时次郑州站降水量)

大面积分散回波向郑州聚集的过程是位于郑州西北方向的低涡引起的,低涡伴随着强烈的不稳定运动和充足的水汽输送,与中层切变线、地面中尺度辐合线共同作用,将郑州周边大量的能量和充足的水汽推送到郑州,快速抬升至空中凝结,在郑州上空形成强回波区,并长时间维持在60 dBZ左右,加之地形影响,最终导致位于低涡东南象限迎风坡附近的郑州发生了历史罕见极端降水。

## 2 “21.7”河南暴雨大尺度环流背景及西行低涡移动路径

### 2.1 “21.7”河南暴雨大尺度环流背景

500 hPa上(图4a),7月17日20时,南亚高压稳定深厚地维持在中国西北地区,西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)位于日本海附近,势力强盛且位置偏北,形势场呈现“两高对峙”态势,上游系统移动受

阻,河套地区附近有一低槽,有利于冷空气南下,西风带低值系统在黄淮地区长时间维持(红色框),形成典型的“鞍形场”环流形势。台风“烟花”和“查帕卡”在台湾东部和广东南部形成,使东部沿海低值系统势力加强。黄淮地区受宽广的弱低压带控制,有利于低空辐合系统生成发展<sup>[21]</sup>,山东、安徽和江苏交界处由风场切变生成一个低涡。18日20时–21日20时,西太副高西伸,台风“烟花”和“查帕卡”向西移动,蒙古–山西低槽东移收缩,黄淮地区无明显锋区活动,天气形势较稳定,河南处于低压辐合区,为强降水提供有利的环境动力条件。

700 hPa上(图4b),7月16–21日中国西北部南亚高压整体位置东移减弱,同时副高西伸加强,588线控制范围扩大,台风“烟花”也随之西移。风场上,河南北部受东北风控制(红色框),处在东北高、西南低的气压场里,河南南部有气旋性风切变(蓝色框),20日一条东北西南方向的中尺度地面辐合线从河南境内穿过。河南处于南亚高压和副高之间的低压区,高空



辐散低空辐合配置在河南地区稳定少动,有利于降水系统的维持。来自副高和台风“烟花”的东南气流和来自台风“查帕卡”的西南气流辐合明显,副高与台风“烟花”西进过程中的偏东气流与黄淮低涡外围东南气流叠加,有利的环境场条件长时间维持是河南极端暴雨发生的重要原因之一<sup>[22]</sup>。

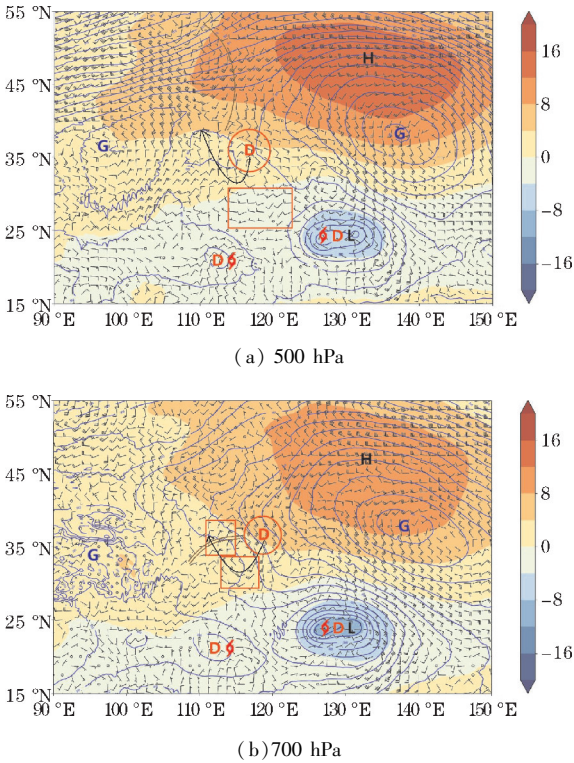


图4 2021年7月17-22日平均位势高度场(蓝色等值线)、距平(填色,1990-2020年7月气候平均)及17日08时风场(G表示高压中心,D表示低压中心,H表示距平正值区,L表示距平负值区)

2.2 西行低涡移动路径

西行低涡形态和强度在500 hPa和700 hPa上显著。500 hPa上(图5a),低涡尺度在500~1000 km,低涡强度稳定,闭合中心线在584~586 dagpm。16日低涡在山东、安徽和江苏3省交界处的“鞍形场”内由风场切断生成<sup>[23]</sup>,17日低涡向南发展,移至安徽东南部,18日低涡缓慢移动到安徽西部与河南交界处,随着东南气流的推移,19日低涡向西北方向移动至河南南部,20日低涡继续向西北方向移动至河南西北部与山西交界处,夜间移出河南,21日低涡持续向西北方向移至山西西部,22日低涡逐渐填塞消亡。

西行低涡在700 hPa上比500 hPa上生命周期短,生成源地、途径地点与消亡位置也有明显区别,但移动轨迹十分相似<sup>[24]</sup>。500 hPa上(图5b),低涡尺度在700~1000 km,低涡强度稳定,闭合中心线在310~312 dagpm。16日低涡在山东南部生成,随后向西南

方向发展,17日低涡移动到安徽西部与河南交界处,随着偏东气流的推移,18日低涡缓慢西移至河南南部与湖北交界处,19日低涡转向西北方向移动至河南西部,20日低涡继续向西北方向移出河南,至山西南部与河南交界处,21日低涡继续向西北方向移动并在地形摩擦下逐渐填塞消亡。

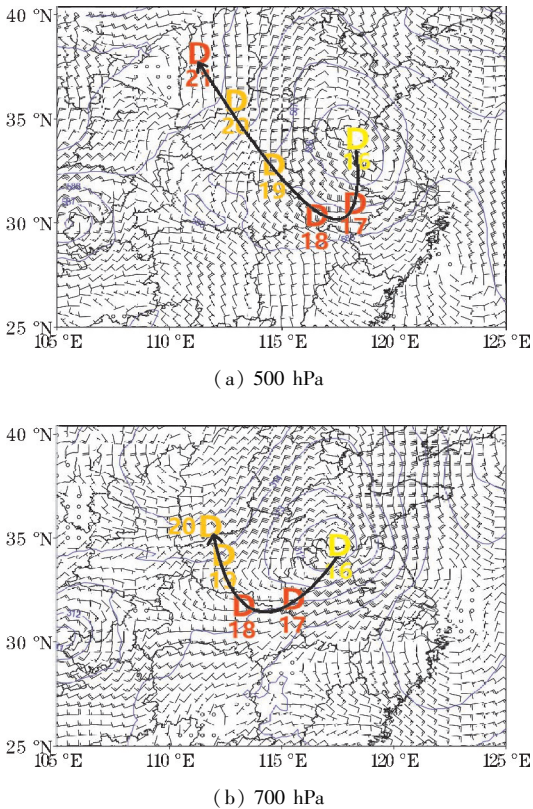


图5 2021年7月16日20时高度场(蓝色等值线)及风场(数字表示日期,D表示低涡当日20时位置,字体颜色表示当日低涡中心强度,500 hPa:584为红色,585为橙色,586为黄色;700 hPa:310为红色,311为橙色,312为黄色)

3 西行低涡概念模型与西行原因

3.1 西行低涡概念模型

图6西行低涡概念模型中给出了200 hPa、500 hPa、700 hPa及近地面所有与西行低涡相关的天气尺度和中尺度天气系统的位置及其随时间的变化。其中200 hPa上天气系统为紫色、500 hPa为蓝色、700 hPa为棕色,近地面为黑色。

200 hPa上南亚高压位于青藏高原上空,17-19日西移减弱,20-21日东伸加强,控制范围最远到达甘肃中部地区。河套附近有一低槽并逐渐加深发展,黄淮地区受河套槽前高压脊控制,脊上分流辐散增强,有利于低空辐合系统发展。东海上空有一高空冷涡,在东



部沿海向西北方向移动,其外围风场影响范围逐渐延伸到陆地,使江淮地区高空偏北风转为西北风,形成了一条西北向的大风速带,19日最大风速达 $26\text{ ms}^{-1}$ 。

500 hPa上南亚高压位于青藏高原北部并东伸到西北地区东部,副高位置偏北、势力强盛,17–20日西进,588线控制范围最远到达黄淮地区,21日略东退。高空冷涡系统深厚,由200 hPa延伸到500 hPa,强盛的副高和深厚的冷涡有利于天气形势的稳定<sup>[25]</sup>。蒙古国东部到中国山西中部有一低槽,黄淮地区处于东西“两高”和南北“两低”之间的“鞍形场”内,风场切断生成了一个低涡,低涡先向西南后向西北方向移动,移动路径呈“V”形。

700 hPa和850 hPa上河南西北部存在一条东北至西南向的一条切变线,随着西南气流发展,切变线旋转呈东西向,由河南境内北抬至山西陕西中部。太平洋上副高、台风“烟花”西进过程中,两个系统之间的东南气流与低涡外围的东南气流叠加,形成一条海上一内陆的东南气流水汽输送带;南海上的台风“查帕卡”也逐渐发展起来,将南方的水汽持续向北输送到内陆。

地面上20日郑州附近有一条东北—西南方向的中尺度辐合线,河南处于东北高、西南低的气压场里,东北风引导冷空气扩散南下。来自河南南部的偏南风受山脉地形影响转为西南风,与来自河南东北部的偏东风汇合,在郑州地区形成了一条东北—西南方向的中尺度辐合线,附近地区持续维持负变压,近地面动力抬升和水汽辐合作用增强<sup>[26]</sup>。

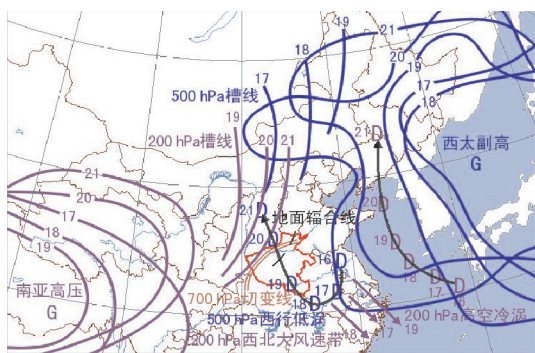


图6 西行低涡概念模型(南亚高压等高线为1256 dagpm, 西太副高等等高线为588 dagpm)

### 3.2 低涡西行原因

南亚高压和副高分别稳定维持在中国西部地区和日本海附近,呈现“两高对峙”态势,阻挡了上游系统移动,导致西风带低值系统在华北、黄淮地区长时间维持。南亚高压东伸至西北地区中东部,副高持续西进至中国东北地区,内蒙古东部为低槽控制,黄淮地区受

宽广弱低压带控制,形成典型的“鞍型场”环流形势<sup>[27]</sup>。中尺度低涡在“两高两低”之间的“鞍型场”内部发展起来,北部东北风引导冷空气扩散南下,南部西南气流输送暖空气持续北上,使得低涡加强维持。副高和台风“烟花”西进,受深厚的东风急流和稳定的低涡切变影响,低涡附近中尺度偏东和偏北急流明显加强,有利于低涡再次发展,加之低涡东侧降水潜热释放和弱暖平流影响,低涡进一步发展。

南亚高压东移,高空槽东移北收,西北地区东部至黄淮西部为低压倒槽控制,河南处于低压倒槽内<sup>[28]</sup>。河套低槽加深发展,黄淮地区受河套槽前高压脊控制,脊上分流辐散增强,有利于低空辐合系统发展。高空冷涡长时间维持在中国东海上空,沿西北方向向东部沿海移动,其外围风场影响范围逐渐延伸到陆地,使江淮区域高空偏北风转为西北风,河南处于高空西北大风速带入口区右侧,高空辐散显著增强。河套槽前高压脊和东部沿海深厚低压系统共存,使黄淮地区天气形势较稳定。河套低槽加深,黄淮中西部高压脊发展,有利于黄淮地区低层低涡的发展和维持。对流层中高层环流形势较稳定,有高空槽或弱低压东移,黄淮地区位于高空槽或弱低压下游偏东的位置,在弱天气尺度强迫背景下,低涡自东向西移动。

## 4 西行低涡对“21.7”河南暴雨影响分析

### 4.1 西行低涡对水汽输送的增幅作用

此次过程中,河南一直存在一条东南—西北方向的深厚水汽输送带(图7)。副高位置偏北且强盛稳定,南侧的台风“烟花”缓慢西进,南海上的台风“查帕卡”也在缓慢西北上。19日,副高和台风“烟花”西进,迫使低涡向西移动进入河南,其强盛的偏东气流与南海的南风气流汇合,将太平洋和南海的水汽输送到大陆,在河南地区形成了一片水汽通量大值区,此时海上一内陆的强水汽输送带已经形成。20日,副高和台风“烟花”继续西移,且强度明显增强,其外围已到达大陆附近,低涡西行至河南西北部,随之东风水汽输送更加强盛;同时,台风“烟花”西北侧的东北气流和台风“查帕卡”东北侧的东南气流在华南沿海一带辐合<sup>[29]</sup>,形成一条南风水汽输送带,将充沛的水汽送往河南地区;两支强水汽输送带合力将河南地区强降水在20日推向顶峰。21日,低涡移出河南,东南风气流和南风气流减弱,两条水汽通道相继减弱,河南地区水汽通量整体减小,水汽通量大值区亦向北移出河南,降水过程趋于结束。



水汽通量辐合强度一定程度上表征着降水强度,图 7 中水汽通量辐合强度大值区对应着强降水区域。19 日随着西行低涡进入河南,水汽通量散度开始增强,其大值区位于河南西北部,20 日水汽通量辐合达

到过程顶峰,其中心位置在河南北部郑州附近,与低涡位置对应良好,21 日水汽通量辐合仍然较强,但大值区已随低涡逐渐向北移出河南。

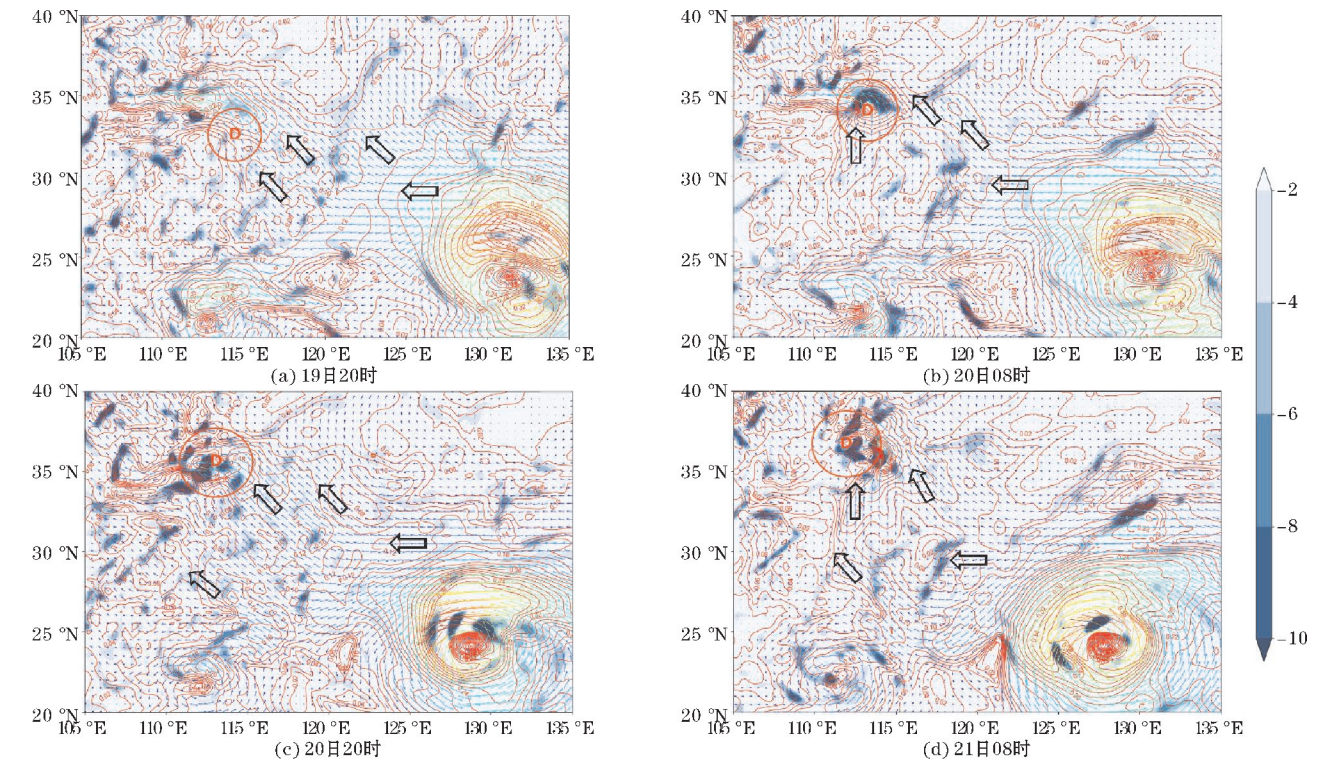


图 7 2021 年 7 月 19–21 日 850 hPa 水汽通量(箭头)及其散度(填色)

综上,河南地区来自东南方向的水汽输送非常强,西太平洋上,副高南侧和台风“烟花”北侧的偏东气流相叠加,将太平洋上的水汽源源不断地输送到内陆;南海上,强而深厚的西南季风与逐渐发展强盛的台风“查帕卡”共同作用,将南方的水汽持续向北输送到内陆。多股气流共同作用,推动低涡向西移动,低涡外围的东南气流又将上述两条通道<sup>[30]</sup>的水汽汇聚叠加,将水汽输送到更远的内陆地区,加之河南西部山脉地形的阻挡,使来自东南方向的水汽在河南辐合加强,为河南强降水的产生和加强提供充足的水汽条件。

4.2 西行低涡的动力及热力条件

图 8 为 7 月 18 日 08 时–22 日 08 时郑州站(34.7°N,113.65°E)上空温度、垂直速度、相对湿度及风场随时间的变化。19 日 20 时,低涡西行进入河南,在低涡前部郑州附近,600~700 hPa 上有强风切变。20 日 08 时,低涡移动至郑州西部,此时低涡非常深厚,从 850 hPa 垂直伸展到 500 hPa,同时相对湿度也达到最高,整层接近饱和状态。受低涡外围风场影响,郑州低层东风分量比南风分量更强劲,郑州东侧低层为东风入流,中高层垂直运动发展旺盛,郑州地区强辐

合中心下移至地面,并伴随极强的上升气流;20 日 14 时,低涡移动到郑州西北部,郑州低空辐合中心减弱并转为辐散,近地面仍然存在较强辐合<sup>[31]</sup>,郑州上空暴雨区垂直风切变增强,存在较强的上升气流且随高度向东倾斜。20 日 20 时,低涡向西北方向移出河南,郑州低空辐合区减弱,上升气流随时间加强,随高度倾斜发展,降水系统逐渐移出郑州地区。

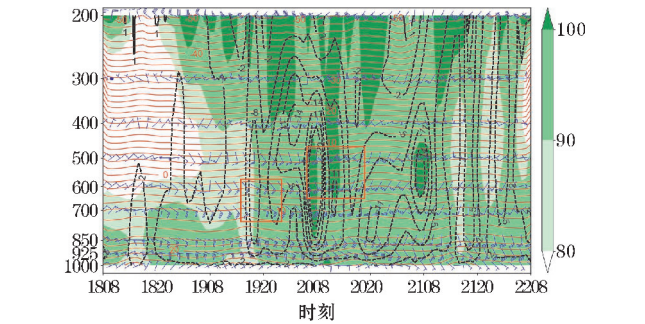


图 8 2021 年 7 月 18 日 08 时–20 日 08 时郑州上空综合廓线图温度(红色实线)、垂直速度(黑色虚线)、相对湿度(填色)与风场分布

图 9 为 7 月 18 日 08 时–22 日 08 时郑州站上空涡度、散度及相当位温随时间的变化。18 日 08 时–19 日 08 时郑州上空 850~500 hPa 为散度正值区,19 日 08 时



低涡进入河南境内,其前部开始影响郑州,郑州上空垂直结构变为低层辐合、高层辐散,此时河南地区雨区开始扩大,雨量开始增加。20 日 08 时郑州上空低层辐合中心发展至最大,出现了整层的正涡度柱<sup>[32]</sup>,925 ~ 200 hPa均为正涡度,大值区在700 hPa附近;850 hPa以下低层辐合显著,高层200 hPa附近出现了强辐散中心,此时低涡移动至郑州附近,深厚的正涡度层始终在郑州上空低层维持,整层都维持着极强的上升运动。20 日 20 时,正涡度大值中心移动到了低层,郑州上空涡度为正,散度为负,有利于暴雨在此区域维持。

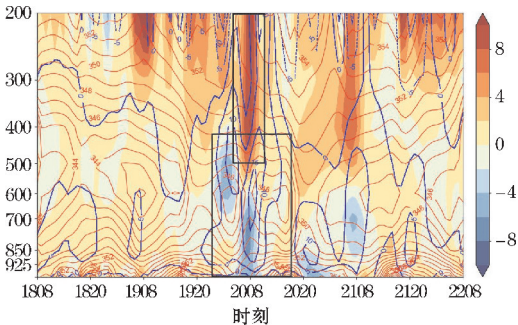


图9 郑州上空7月18日08时-22日08时散度(填色)、涡度(蓝线)、相当位温(红线)的高度-时间剖面

18-21 日郑州近地面为强暖湿中心,850 hPa 维持弱层结不稳定,边界层内稳定与强层结不稳定交替出现<sup>[33]</sup>。19 日 08 时低涡移入河南境内,受其影响郑州上空大气不稳定度明显增强;19 日 20 时不稳定能量

逐渐降低,大气趋于弱不稳定;20 日 08 时低涡移至郑州西部,郑州上空不稳定度又开始增强,随后对流触发,产生降水;20 日 17 时郑州位于低涡东南象限,850 hPa以下等位温线最为密集,上空位势不稳定持续增强,该时刻为郑州短时降水最强时刻。20 日 20 时后,低涡移出河南,郑州地面高温高湿状况随之减弱,大气变为弱对流不稳定或中性层结。

综上,位于低涡东南象限的郑州地区长时间存在正涡度大值区,低层辐合旺盛,加之地形抬升,形成强烈的上升运动,为郑州强降水提供有利的动力条件。郑州地面为暖湿中心,上空层结不稳定,同时低涡西行带来充沛的水汽,使得郑州地区低层高能高湿,具备强烈的不稳定条件,极易触发对流活动<sup>[34]</sup>。

4.3 西行低涡使对流触发条件增强

由图 10 可见,20 日 14-15 时,低涡已经移动到郑州西北部,来自河南南部的偏南风受山脉地形影响转为西南风,与来着河南东北部的偏东风汇合,在郑州中部形成了一条东北—西南方向的中尺度辐合线,导致附近地区持续维持负变压,近地面动力抬升和水汽辐合作用增强。16-17 时,受北方冷空气扩散南下影响,辐合线向东北方向伸展,辐合线附近温度变化较大<sup>[35]</sup>,中尺度辐合中心出现在郑州附近,促使地面辐合进一步增强,最终导致郑州发生极端强降水。

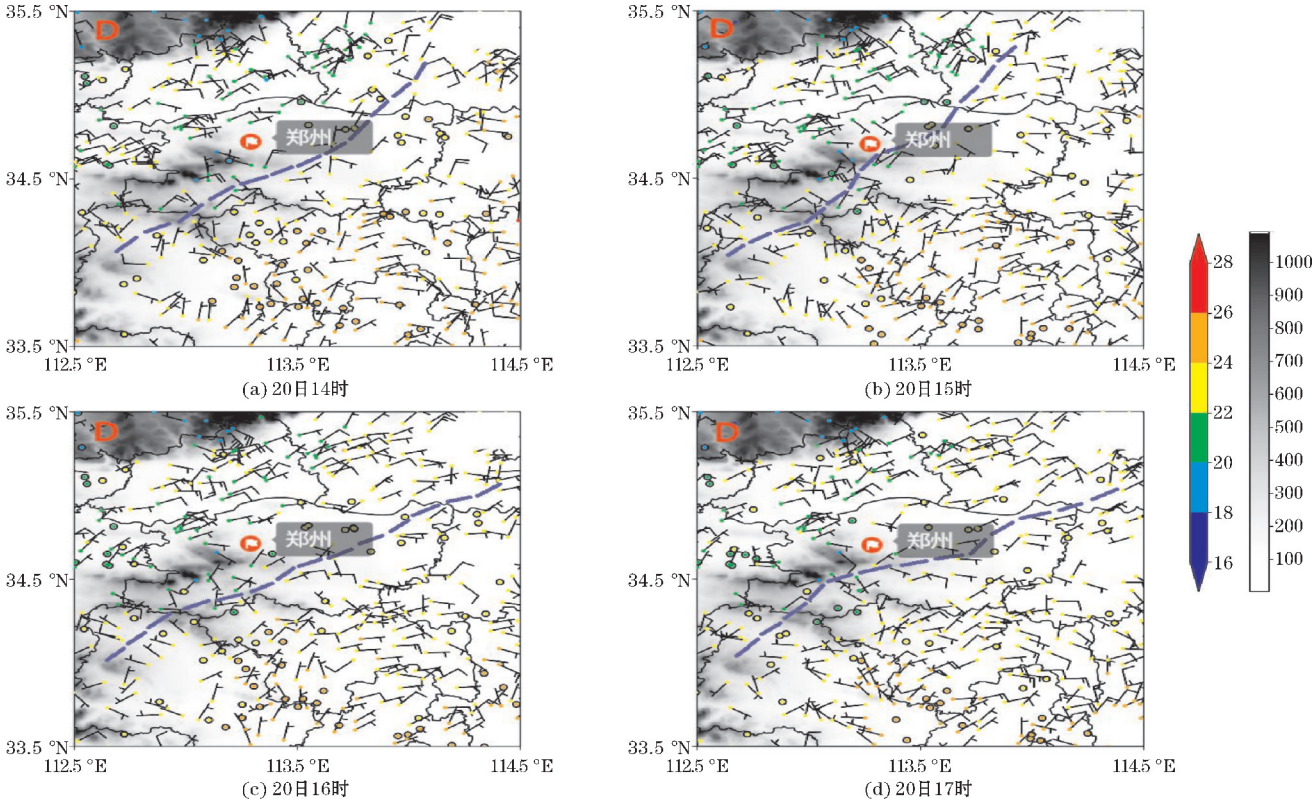


图 10 2021 年 7 月 20 日 14-17 时地面温度(站点填色)、风场分布及地形(D 与圆圈表示低涡在 500 hPa 上位置,蓝色虚线表示中尺度辐合线)

综上,整个降水过程中,500 hPa的低涡、700 hPa的切变线与地面中尺度辐合线在河南地区稳定少动,其西南气流遇上副高和台风“烟花”带来的东南气流形成辐合区。河南西北部的太行山—嵩山—伏牛山共同组成了东北—西南方向的高大山脉,低涡西行遇到地形阻挡,在山前形成风速辐合<sup>[36]</sup>。深厚的低涡与辐合区共同存在,有利于垂直运动稳定发展,促使暴雨在河南地区长时间维持。低涡的发展与降水增强过程相对应,是河南强降水过程的主要触发因子。

## 5 结论与讨论

2021年7月17–22日河南出现历史罕见极端暴雨,期间中国黄淮地区中低层存在一个低涡,过程累计降水量与短时强降水大值区均集中在低涡东南象限,呈现显著的局地性特征,低涡的移动路径直接影响降水落区及强度,是降水过程发展增强的主要影响系统。对“21.7”暴雨的大气环流形势、西行低涡的移动路径、各层次的系统配置及低涡西行的原因进行分析,并从水汽、热力、动力及对流触发等方面分析西行低涡对“21.7”河南暴雨的影响,主要结论如下:

(1)“21.7”河南暴雨期间大气环流形势稳定,南亚高压和副高“两高对峙”,黄淮地区形成典型的“鞍型场”,有利于低层低涡的发展和维持,西行低涡在500 hPa和700 hPa上显著,生命周期短,强度稳定,移动路径为自东先向西南后向西北,整体呈“V”形。

(2)西行低涡各层系统配置复杂,黄淮地区高层辐散、低层辐合,北部东北风引导冷空气扩散南下,南部西南气流输送暖空气持续北上,东部副高及台风“烟花”西进,带来了深厚的东风急流和暖平流,低涡附近中尺度偏东急流加强,低涡自东向西移动。

(3)西行低涡对水汽输送增幅显著,将水汽汇聚输送至内陆,水汽条件充沛;西行低涡系统稳定维持,上升运动强烈,动力条件旺盛;西行低涡低层辐合高层辐散,层结不稳定强,热力条件充足;西行低涡与低层切变线、地面辐合线共同作用,使对流触发条件增强。

基于多种观测和再分析资料,从西行低涡这一中尺度系统入手,对河南极端暴雨过程进行分析,受限于资料连续性及分析方法局限性,仍存在诸多问题有待进一步深入研究,如导致极端短时强降水的中小尺度系统其他因素;中小尺度系统与天气尺度系统相互作用情况;西行低涡对于副高、季风和台风的水汽输送增幅数值。这些问题都尚需进一步探索,值得深入研究。

## 参考文献:

[1] Saulo C, Ruiz J, Skabar Y G. Synergism between the Low-Level Jet and Organized Convection at Its Exit Region[J]. Monthly Weather Review, 2007,

135(4):1310–1326.

[2] 丁一汇,李吉顺,孙淑清,等.影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析[G].中国科学院大气物理研究所集刊(第9号),暴雨及强对流天气的研究.北京:科学出版社,1980:1–13.

[3] 周玉淑,刘璐,朱科锋,等.北京“7.21”特大暴雨过程中尺度系统的模拟及演变特征分析[J].大气科学,2014,38(5):12.

[4] 湛芸,孙军,徐珺,等.北京“7·21”特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[C].第九届全国灾害性天气预报技术研讨会.中国气象中心,2012.

[5] 孙军,湛芸,杨舒楠,等.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,2012,38(10):1267–1277.

[6] Xu Jun, Li Rumeng, Zhang Qinghong, et al. Extreme large-scale atmospheric circulation associated with the “21·7” Henan flood[J]. Science China Earth Sciences, 2022(9):65.

[7] 蔡芎宁,陈涛,湛芸,等.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,2022,48(5):11.

[8] 孔期,符娇兰,湛芸,等.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,2022,48(12):13.

[9] Chen Yongren, Li Yueqing. Convective Characteristics and Formation Conditions in an Extreme Rainstorm on the Eastern Edge of the Tibetan Plateau[J]. Atmosphere, 2021, 12(3):381.

[10] Guan B, Waliser D E. 2015. Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies[J]. Geophys. Res.: Atmos., 120(24):12514–12535.

[11] Jiang Yongqiang, Wang Yuan, Huang Hong, et al. A Study on the Dynamic Mechanism of the Formation of Mesoscale Vortex in Col Field[J]. Progress in Atmospheric Science (English Version), 2012(6):52.

[12] Ntwali D, Ogwang B, Ongoma V. The impacts of topography on spatial and temporal rainfall distribution over Rwanda based on WRF model[J]. Atmospheric and Climate Sciences, V. 2016, 62013(6):145–157.

[13] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc, 2020, 146(730):1999–2049.

[14] Jiang Yongqiang, Wang Yuan, Chen Chaohui, et al. A Numerical Study of Mesoscale Vortex Formation in the Midlatitudes: The Role of Moist Processes[J]. Advances in Atmospheric Sci-



- ences,2019,36(1):65-78.
- [15] Davis R S. Flash flood forecast and detection methods: severe convective storms [J]. Meteor Monogr,2001. 69:481-525.
- [16] Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. Large and Meso- $\alpha$  scale characteristics of intense rainfall in the mid-and lower reaches of the Yangtze River[J]. Chinese Sci. Bull. 2002,47:779-786.
- [17] 陈联寿,丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社,1979.
- [18] Ding Yihui, Wang Zunya, Song Yafang, et al. The unpriced-dented freezing disaster in January 2008 in Southern China and its possible association with the global warming[J]. Acta Meteorological Sinica,2008,22(4):538-558.
- [19] 杨浩,周文,汪小康,等. “21·7”河南特大暴雨降水特征及极端性分析[J]. 气象,2022(5):48.
- [20] 喻谦花,吕哲源,李姝霞,等. 郑州“7·20”特大暴雨卫星云图和双偏振雷达特征分析[J]. 气象与环境科学,2022(2):45.
- [21] 周鸣盛. 我国北方50次区域性特大暴雨的环流分析[J]. 气象,1993,19(7):14-18.
- [22] 雷雨顺. 经向型持续性特大暴雨的合成分析[J]. 气象学报,1981,39(2):166-180.
- [23] 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(2):45.
- [24] 郑永骏,吴国雄,刘屹岷. 涡旋发展和移动的动力和热力问题: PV-Q 观点[J]. 气象学报,2013,71(2):13.
- [25] 高守亭,周玉淑,冉令坤. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学,2018,42(4):14.
- [26] 崔恒立,赵宇,王东仙,等. 引发暴雨的低涡发生发展机制分析[J]. 灾害学,2016,31(2):7.
- [27] 陈栋. 引发川东暴雨的“鞍”型大尺度环流背景及西南涡发展的诊断验证[J]. 高原山地气象研究,2011,31(3):10.
- [28] 苏爱芳,吕晓娜,崔丽曼,等. 郑州“7.20”极端暴雨天气的基本观测分析[J]. 暴雨灾害,2021,40(5):10.
- [29] 布和朝鲁,诸葛安然,谢作威,等. 2021年“7.20”河南暴雨水汽输送特征及其关键天气尺度系统[J]. 大气科学,2022,46(3):20.
- [30] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2022,50(5):9.
- [31] 段汀,陈权亮,廖雨静. “21.7”郑州极端暴雨的形成过程及致灾机理分析[J]. 气象科学,2022(2):42.
- [32] 赵宇,李媛,赵光平. 引发暴雨天气的中尺度低涡的数值研究[J]. 大气科学学报,2013,36(6):13.
- [33] 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):18.
- [34] 张一平,王新敏,梁俊平,等. 黄淮地区两次低涡暴雨的中尺度特征分析[J]. 暴雨灾害,2013,32(4):303-313.
- [35] 赵宇,崔晓鹏,高守亭. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究[J]. 大气科学,2011(5):157-174.
- [36] 孙继松. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响[J]. 高原气象,2005,24(1):62-69.

## Characteristics of Westward Vortex and its Impact on “21.7” Henan Rainstorm

FANG Zhentian<sup>1,2</sup>, CHEN Yun<sup>1,3</sup>, XIAO Tianguai<sup>1</sup>, GUO Zhaohua<sup>1</sup>

(1. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Dezhou Meteorological Bureau, Dezhou 253000, China; 3. National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In July 2021, an extreme rainstorm occurred in Henan Province, and there was a vortex moving from east to west in the Huanghuai area, which was the main influencing system for the development and enhancement of the precipitation process. Although research on this vortex mainly focuses on its eastward movement, little attention has been paid to the mechanism and characteristics of its westward movement. Based on the conventional meteorological data, regional meteorological stations, radar, and other unconventional observation data, ERA5 reanalysis data, the characteristics of the atmospheric circulation situation, the moving path of the westward vortex, the configuration of each layer system and the reasons for the westward movement of the vortex were analyzed, and the influence of the westward vortex on the “21.7” rainstorm was analyzed from the aspects of water vapor, heat, power and convection triggering. The results show that: (1) During the rainstorm of “21.7” in Henan, the atmospheric circulation situation was stable, the Huang-Huai area was a typical “saddle field”, and the moving path of the westward vortex was from southwest to northwest. (2) The subtropical high on the east side of the vortex and the westward advance of typhoon “fireworks” strengthen the easterly jet near the vortex, and the vortex moves from east to west. (3) The westerly vortex has abundant water vapor conditions, strong dynamic conditions and sufficient thermal conditions. The vortex interacts with the low-level shear line and the ground convergence line to enhance the convective triggering conditions.

**Keywords:** mesoscale meteorology; Henan rainstorm; westward vortex; movement path; characteristic analysis