

吕哲源. 豫东一次特大暴雨中风暴再度增强成因分析[J]. 陕西气象, 2022(4): 15-22.

文章编号: 1006-4354(2022)04-0015-08

# 豫东一次特大暴雨中风暴再度增强成因分析

吕哲源<sup>1,2</sup>

(1. 开封市气象防灾减灾重点实验室, 河南开封 475000

2. 开封市气象局, 河南开封 475000)

**摘 要:**利用常规观测资料以及中尺度自动站资料、NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  逐 6 h 再分析资料、雷达卫星产品等, 分析了 2021 年 8 月 3—4 日豫东暴雨过程的环流背景与中尺度对流特征。主要结论如下: (1) 暴雨发生在 200 hPa 处于高空辐散区、500 hPa 冷涡底部低槽东移的环流条件下; 中低层副高外围暖湿气流与地面冷锋于豫东形成辐合, 配合高空强辐散为暴雨提供有利的环流背景。(2) 降水前大气处于条件不稳定, 豫东区域水汽饱和; 强降水期间近地层存在温度平流, 使边界层产生扰动导致暴雨增幅。(3) 强降水发展与两个 MCS 系统发生、发展及演变关系密切; 暴雨落区位于中尺度对流云团云顶亮温梯度大值区且靠近其低值中心。(4) 雷达回波表现为多单体合并的混合型回波, V 型缺口对应地面大风; 强降水时段回波低质心、高效率并存在列车效应, 风速辐合位置对应新单体生成。

**关键词:**特大暴雨; 极端短时强降水; 诊断分析; 河南省

**中图分类号:** P458.121

**文献标识码:** A

河南省豫东地区为广阔的冲积平原, 没有山体阻挡, 加之夏季下垫面热力条件较好, 稍加扰动便会导致对流天气的产生。近年来该地区频发对流性暴雨, 导致城市内涝、农田渍涝等次生灾害, 河南省气象科技工作者进行了较多研究。牛淑贞等<sup>[1]</sup>对 2009 年 6 月 3 日豫东飚线形成机制进行了探讨, 结果表明雷暴大风发生在辐合线后侧, 辐合线后侧具有典型的中尺度雷暴高压、风场辐散等特征; 强雷暴高压、高压前侧的强气压梯度以及强飚线的快速移动是极端大风产生的直接原因。张一平等<sup>[2]</sup>对 2009 年 6 月 14 日发生在豫东的强对流天气做了分析, 指出“列车效应”是多地出现大暴雨和多次冰雹的原因, 强对流天气与阵风锋有关, 对流云团合并过程中阵风锋达到最强。董彬<sup>[3]</sup>对 2012 年 7 月 4—5 日河南中东部的持续性强降水天气过程进行分析, 结果表明副热带高压

稳定维持, 配合低空急流、西南涡的移出, 为强对流的持续发展提供了条件, 上干冷下暖湿的配置使大气处于层结不稳定状态, 给该次降水提供了热力不稳定条件。对于产生暴雨的强对流天气, 国内学者从环流形势、形成机理、物理量诊断等方面做了诸多研究<sup>[4-11]</sup>。

2020 年 8 月 3—4 日, 受低槽和副热带高压边缘西南暖湿气流共同影响, 豫东地区发生特大暴雨过程(下简称“8·3”豫东暴雨过程)。本次强降水过程持续时间短, 降水强度大, 雨量分布极为不均(图 1a), 中尺度特征明显。对照兰考红庙站小时降雨量分布图(图 1b)可知, 本次特大暴雨过程主要分为两个降水时段, 分别为 3 日 20—23 时, 4 日 02—05 时。两阶段最大小时雨强分别为 55.4 mm/h(21—22 时)和 88.9 mm/h(03—04 时)。同一站点在出现暴雨量级后, 短短 5 h 内再

收稿日期: 2021-08-28

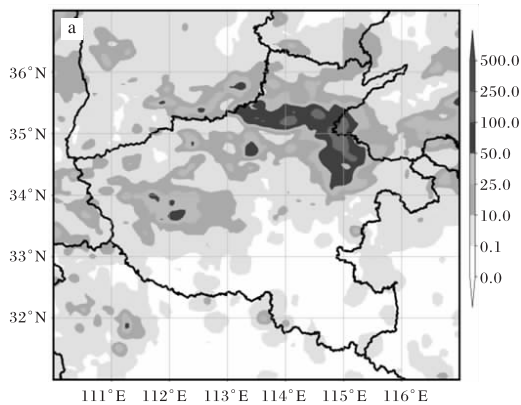
作者简介: 吕哲源(1992—), 男, 汉族, 河南临颖人, 硕士, 工程师, 主要从事天气预报及其研究。

基金项目: 2021 年开封市气象局科研项目(BQK202102)

次出现强度更大的短时强降水,并持续 3 h 出现小时雨强大于 45 mm 的致灾性短时强降水,其再度增强并发展的原因和条件值得进一步研究。本文利用常规探空、地面区域加密自动站观测资料、NCEP  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  逐 6 h 再分析资料和商丘站 S 波段 CINRAD-SB 雷达及风云四号卫星云图资料,分析了“8·3”豫东暴雨过程发生发展的环境条件,重点探讨该强降水过程中风暴发生发展的中尺度特征及其预报着眼点,以期为今后此类暴雨预报预警提供参考。

## 1 过程实况与灾情

2020 年 8 月 3—4 日,河南省出现区域暴雨、



局部特大暴雨天气过程。雨量分布不均(图 1a)。降水集中时段为 3 日 20 时—4 日 08 时,暴雨区主要位于开封市东部与商丘市西部,即兰考、杞县、民权与睢县等地。其中,民权县龙塘站 3 日 22—23 时出现雨强达 107 mm/h 的罕见短时强降水,过程最大雨量为兰考红庙站 271.5 mm,打破当地历史极值,另有多站 12 h 降雨量超过 100 mm,降水过程中伴有雷暴大风出现。据统计,杞县多站出现极大风速 30 m/s 的大风。本次过程造成 105 644 人受灾,受灾面积 8 028  $\text{hm}^2$ ,直接经济损失约 2 549 万元。

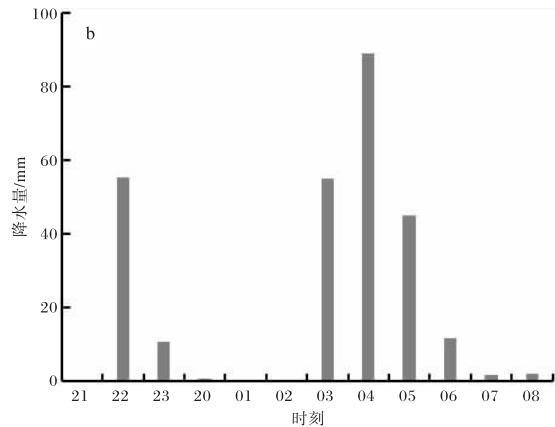


图 1 2020-08-03T08—04T08 河南省降水分布(a,单位为 mm;审图号为 GS(2021)5448 号)和 2020-08-03T20—04T08 兰考红庙站逐小时降水量(b)

## 2 环境条件分析

### 2.1 环流背景与影响系统

8 月 3 日 20 时 500 hPa 高空图(图 2a)上,亚欧大陆呈一槽一脊型,槽区位于中亚,高压脊区覆盖整个东亚,内蒙古北部与黑龙江交界处存在东北冷涡。冷涡底部有低槽东移,河南省位于低槽尾部。西太平洋副热带高压(下简称副高)主体位于日本南部,588 dagpm 脊线位于湖北武汉一带,台风“黑格比”中心位于台湾海峡北部,其外围云系已影响浙江福建沿海。海平面气压场上(图 2b),3 日 20 时四川东部和东北各有一有低压中心,台风低压中心位于海上,华北位于 3 个低压中心之间鞍型场内。4 日 02 时,东北低涡中心稳定,南部有冷空气扩散,贝加尔湖西南侧有一 1 015 hPa 的冷高压中心,冷高压前部气压梯度大值区向东南延伸至内蒙

古,从 3 h 变压和变温上可以看出,两股冷空气于华北汇合南下,冷锋位于河南中部及山东一带。同时台风低压中心登陆浙江沿海,受其外围云系影响,安徽江苏一带偏南风转为东南风,东南风暖湿气流携带大量水汽向豫东一带输送。

### 2.2 高空中尺度分析

3 日 20 时中尺度综合分析图(图 3)显示,200 hPa 高空急流位于河套地区附近,河南省处于高空急流分流辐散区中,高层辐散有利于上升运动发展;500 hPa 豫东地区位于副高外围西西南气流中;700 hPa 焦作地区存在一冷中心,南阳地区存在一暖中心,西南气流将暖湿空气输送到豫东;850 hPa 上,受“黑格比”外围水汽影响,河南大部分地区温度露点差  $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ,水汽基本达到饱和;925 hPa 偏南气流与偏西气流在豫东辐合。

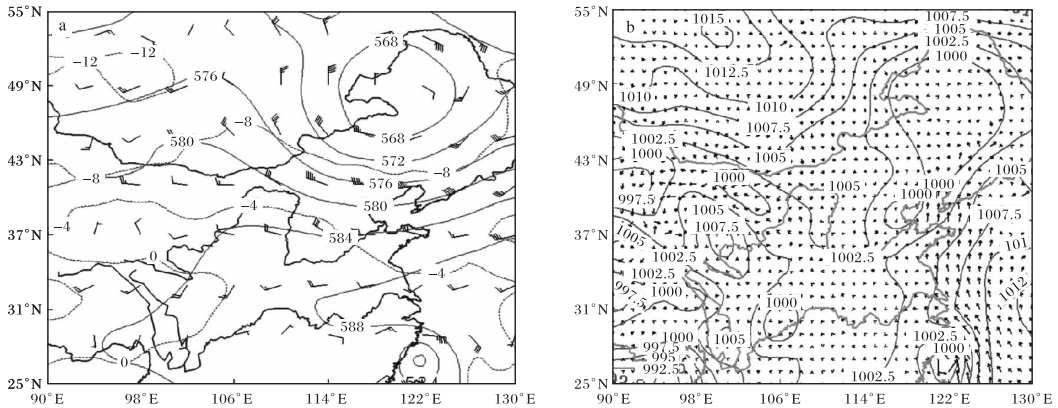


图2 2020-08-03T20 500 hPa 高空天气形势图(a 实线为等高线,单位为 dagpm;虚线为等温线,单位为 $^{\circ}\text{C}$ ;审图号为 GS(2021)5448 号)与地面形势图(b 实线为等压线,单位为 hPa)

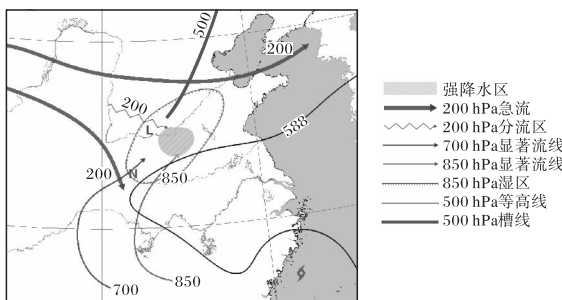


图3 2020-08-03T20 高空中尺度分析综合图(等高线单位 dagpm)

综上所述,200 hPa 存在高空分流辐散区,500 hPa 东北冷涡底部有高空低槽东移,台风“黑格比”即将登陆,700 hPa 暖平流输送,850 hPa 存在高湿区,配合地面冷锋自华北南下,是本次豫东特大暴雨过程产生的主要天气尺度系统。上述各系统的合理配置及其相互作用,为此次特大暴雨发生发展提供了十分有利的环流背景。

## 2.3 物理量诊断分析

### 2.3.1 水汽条件

利用 6 h 间隔 NCEP 资料对 850 hPa 风场、水汽通量与水汽通量散度进行分析可知,3 日 20 时(图 4a),受台风外围和副高共同影响,豫东地区上空存在显著西南气流水汽输送,水汽通量大值中心( $12 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ )与大气可降水量大值区中心( $\geq 75 \text{ mm}$ )均出现在豫东周口一带且二者对应较好,表明暴雨过程前,豫东地区上空已具备充分水汽条件。4 日 02 时,水汽通量大值区进一步扩大,豫中东均处在  $>12 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$  区域内,同时大气可降水量中心北抬移动到开封境内。从 850 hPa 水汽通量矢量与大气可降水量叠加图(图 4b)可看出,豫东地区上空大气可降水量达 140 mm,同时该高度层上偏南气流发展强盛,水汽通量自湖北向河南不断输送,为后续短时强降水提供充足的水汽来源。

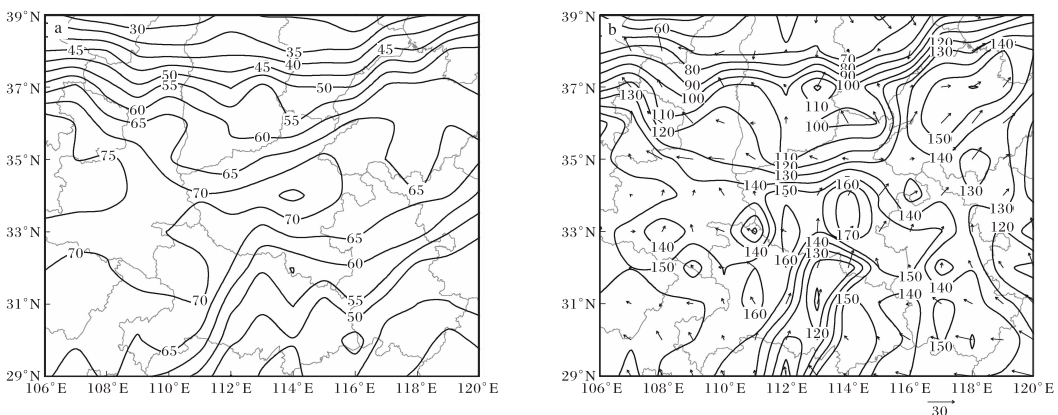


图4 2020-08-03T20 大气可降水量(a,单位为 mm)和 2020-08-04T02 大气可降水量(单位为 mm)与 850 hPa 水汽通量(矢量,单位为  $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}$ )叠加图(b)(审图号为 GS(2021)5448 号)

2.3.2 热力、动力条件 本次豫东暴雨是在散度、涡度和垂直速度相互耦合的动力环境条件下发生的。以兰考红庙站(115°E、35°N)为中心做3日20时豫东地区平均散度、涡度、垂直速度以及假相当位温( $\theta_{se}$ )垂直分布图可知:20时(图5a)近地面边界层内散度为正,涡度为负;850 hPa和300 hPa附近分别出现正涡度大值区,中心强度分别为 $36 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $60 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,500 hPa附近为负涡度;1 000~800 hPa为辐散层,辐散中心( $57 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )位于900 hPa,辐合层位于800~400 hPa,最大强度为 $-90 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右,300~400 hPa为无辐散区,300 hPa以上转为辐散。以上配置有利垂直上升运动发展加强。豫东暴雨区上空1 000~200 hPa均维持上升运动,900 hPa

和400 hPa分别存在两个上升运动中心,最强上升运动为 $-0.6 \text{ Pa/s}$ ;同时由于低层偏南风增大,低层大气增温增湿,不稳定能量增大,暴雨区 $\theta_{se}$ 升高,不稳定层一直向上伸展到600 hPa。4日02时(图5b),第一轮强降水已经过去,第二轮强降水尚未开始。豫东地区上空500 hPa以下维持正涡度柱,由于第一轮强降水释放部分能量,假相当位温最大值有所降低,但低层依旧存在对流不稳定。而辐合层集中在800 hPa至地面,中心值达到 $-30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右,垂直速度场与散度场对应良好,1 000~800 hPa上升运动明显,最强上升运动( $-3 \text{ Pa/s}$ )中心位于900 hPa,说明低层存在动力抬升,同时中层600 hPa辐散增强,最强达 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

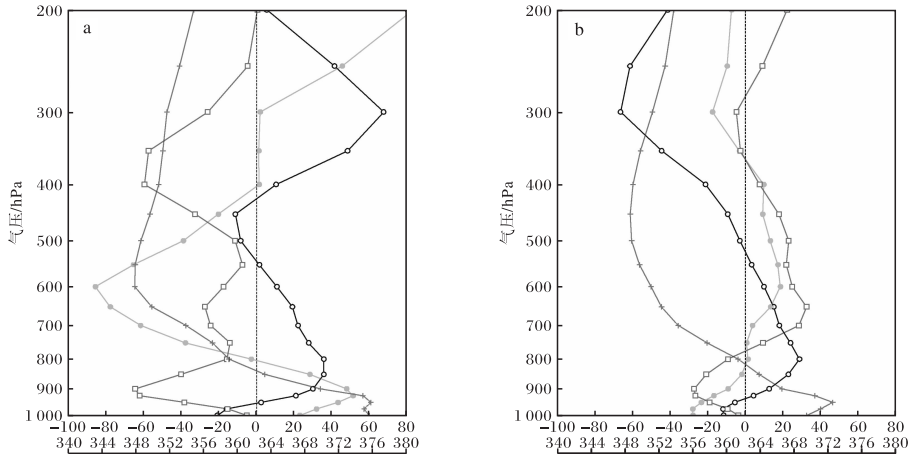


图5 2020-08-03T20(a)和2020-08-04T02(b)豫东地区平均涡度(空心圆线,单位为 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),散度(实心圆线,单位为 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),垂直速度(方块线,单位为 $10^{-2} \text{ Pa/s}$ )(共用横坐标上部标值)和假相当位温(十字线,单位为K)(横坐标下部标值)垂直分布图

从两个时次沿 $34.8^\circ \text{N}$ 经暴雨中心兰考红庙站附近的温度平流纬向剖面图(图略)可见,3日20时,兰考以西 $112^\circ \text{E} \sim 115^\circ \text{E}$ 之间800~600 hPa存在较强暖平流,中心值为 $18 \times 10^{-4} \text{ K/s}$ ,近地面与对流层中高层500 hPa附近为冷平流,高层干冷空气侵入导致未饱和空气趋于饱和,降低了层结稳定度,配合地面冷锋的抬升触发,促进了对流能量以及潜热释放,有利于增强上升运动。4日02时,随着第一轮强降水结束,中层暖平流东移减弱,同时高层冷平流加强至 $-4 \times 10^{-4} \text{ K/s}$ 且中心降低至500 hPa,为低层中尺度对流的垂直上升运动补偿

了下沉气流,导致对流进一步发展,降水不断增强。此外,近地面900~1 000 hPa附近 $112^\circ \sim 116^\circ \text{E}$ 存在正、负温度平流对,3日20时,暴雨区 $115^\circ \text{E}$ 近地面为冷平流,西侧暖平流,4日02时,暴雨区转为暖平流,西侧转为冷平流且强度有所增强。结合 $\omega$ 方程可知,暖、冷平流分别产生上升、下沉运动,近地层正负温度平流在暴雨区边界层产生扰动,上升运动进一步发展,导致暴雨的产生。

### 3 中尺度对流云团成因分析

#### 3.1 强降水发生前对流云团

3日17时,河南省上空大部分区域已受云系

覆盖,豫北、豫西南分别有两条对流云带发展旺盛,对流云带走向与高空 200 hPa 急流风向一致,豫东处在人字形对流云带交界处,由高空急流分流产生的高层辐散对低层大气存在抽吸作用,利于上升运动产生。17:30,山西晋城附近出现对流云团,东南向移动过程中不断增强。3日20时,对流云团主体近似圆形位于新乡一带。从天气系统与红外云图叠加图(图略)来看,副高外围河南至胶东半岛为冷涡云系,低涡云系后侧 500 hPa 上有与 9~12 m/s 风速相伴的冷平流,冷平流向东南方向推进,西北冷平流最前方已到达豫北,同时台风“黑格比”在福建、浙江沿海登陆,受到副热带高压主体的阻挡作用,台风外围螺旋云系与豫东对流云团间形成具有明显边界的无云区。低层 850 hPa 上风速为 8~10 m/s 的偏南气流沿副热带高压边界不断向豫东输送较强暖湿气流,正是在这种高层冷平流、低层暖平流形成的不稳定条件下,对流云团在低涡云系中形成并发展。

### 3.2 对流云团演变特征

从兰考红庙站小时降水量分布可以看出,本次降水过程分为两个阶段。分析 FY4A 卫星云图云顶亮温(TBB)表明,两个阶段的降水过程由多个中- $\alpha$  或中- $\beta$  中尺度对流云团发展、合并加强造成(图 6,见第 21 页)。3日20时,在晋城境内生成发展的中- $\beta$  尺度对流云团 A 移动至新乡、开封一带,呈长、宽约 200 km 的近圆形,TBB 低值中心-55 $^{\circ}\text{C}$ ,此时豫东地区虽处在对流云团内但尚未产生较强降水。21时,云团 A 东移发展,TBB 中心低至-60 $^{\circ}\text{C}$ ,小时雨强大于 30 mm/h 的强降水区域东移至长垣境内,在 500 hPa 西北气流的引导下,对流云团东南向移动。22时,对流云团 A 发展成椭圆形, $\leq -42^{\circ}\text{C}$  的冷云罩几乎覆盖整个豫东地区,杞县与兰考上空 TBB 数值达-70 $^{\circ}\text{C}$ ,对应兰考、杞县、民权多个站点出现 50 mm/h 以上强降水。与此同时,对流云团 A 移动后侧出现 TBB 梯度大值区,对流云团边界出现缺口,说明风暴移动后侧气流组织化减弱,有新的上升气流补充,为风暴持续发展提供有利条件。23时,对流发展达到顶峰,基本呈正圆形且边界光滑,直径约 250 km 且长宽比大于 0.7,为典型

中尺度对流系统特征。豫东地区完全受 $\leq -52^{\circ}\text{C}$  的 TBB 低值区覆盖,而云团中心 TBB 值自 22:23 达到最大值后有所下降,表明对流云团发展结束转为成熟阶段,强降水持续增强并维持,对应民权龙塘雨强 107 mm/h、睢县 81 mm/h。从降水分布看,降水落区与 TBB 梯度大值区对应较好,强降水中心靠近 TBB 低值中心。此时上游地区有一东西向冷锋云系上有对流云团不断生成并向豫东移动。4日00时,豫东地区 $\leq -52^{\circ}\text{C}$  的 TBB 低值区进一步扩大,其覆盖面积在 01 时达到最大,接近  $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,而强降水落区在 TBB 低值区正中心商丘宁陵至睢县一带,强降水雨带走向与云团移动方向基本垂直,雨带南部睢县出现 72 mm/h 降水,周口太康与睢县交界部分站点 50 mm 左右降水。01 时豫东区域总体雨量转小,只有杞县和柘城部分站点出现 30~40 mm 降雨量,其余站点降水均在 10 mm 以下,预示着此次豫东暴雨第一阶段结束,影响第一阶段降水的中尺度对流云团 A 由成熟期转为消亡期。

4日02时,影响豫东的强对流云团 A 减弱, $\leq -52^{\circ}\text{C}$  的 TBB 低值中心范围缩小且逐渐东移,云团后部出现一条弧状云线,位于兰考杞县一带,随着上游低槽系统东移,冷空气通过低槽云系前部无云区与弧状云线相遇,兰考本地有新的对流云团 B 生成,并迅速发展。03时,新生云团 B 已发展成长、宽各 60 km,南部与旧的对流云团主体相连的椭圆形云体,并造成了兰考红庙站出现 55 mm 的降水量。同时中牟附近有对流云团 C 新生东移,其 TBB 低值中心为-32~-52 $^{\circ}\text{C}$ 。03:30,兰考西南部生成的新对流单体与兰考上空对流云团 B 迅速合并,对流云团的合并使强降水得以维持和加强。04时,原中牟境内对流云团 C 已移动至通许尉氏一带,长约 50 km,中心 TBB 值 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 。此时对流云团 B 已发展成熟,其南部呈现涡旋状缺口,云团内部 TBB 低值中心对应兰考红庙站出现了 89 mm/h 雨强,同时兰考境内另外四站点出现 30~65 mm 的短时强降水。05时,对流云团 B 维持的同时,新乡境内沿黄河一带又有多个对流单体生成,并各自产生了 20 mm/h 以上的强降水,随着多个对流单体东移

过程中在兰考地区的合并,兰考地区短时强降水持续,降水区呈南北带状位于云团 TBB 大梯度区内。06—07 时,随着新生对流单体的合并,对流云团 B 持续发展,但强降水区已向北移动至菏泽境内,随着后续对流云团向东北方向移动,豫东降水逐渐停止。

综上所述,本次豫东特大暴雨期间,强降水发展与两个中尺度对流系统发生、发展及演变关系密切。对流云团 A 自西向东移动,导致开封商丘等地区 3 日 21—23 时暴雨区的产生;在兰考地区生成的对流云团 B,由于其后部有新的对流云团不断发展、合并加强,导致兰考、民权等地区出现特大暴雨;暴雨落区位于中尺度对流云团 TBB 梯度大值区且靠近其低值中心。

#### 4 雷达回波演变特征

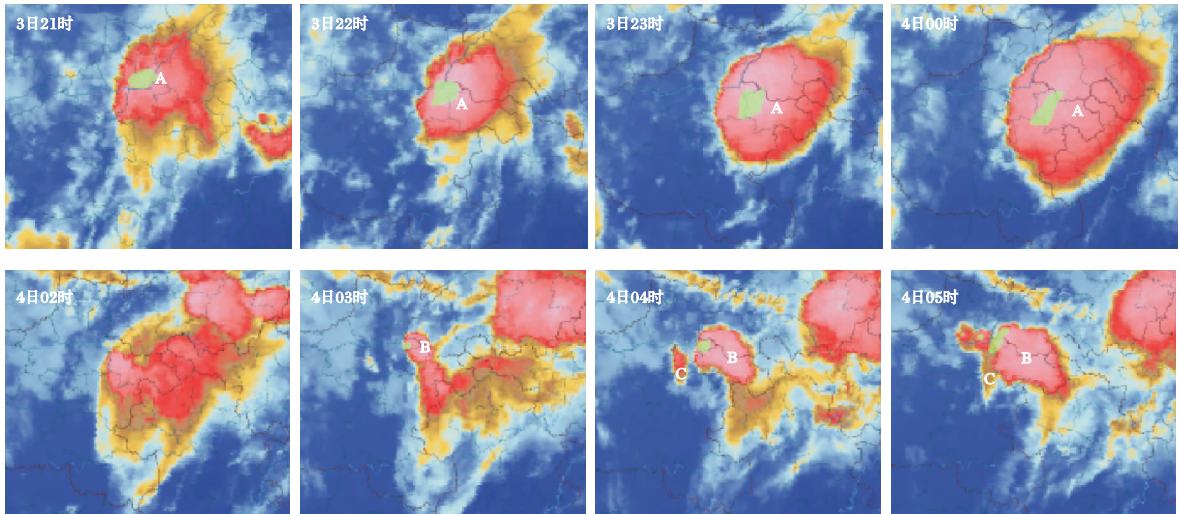
3 日 20 时商丘 S 波段雷达 1.5°仰角雷达回波显示,黄河以北长垣封丘一带有多个对流单体生成,回波中心强度达 65 dBz,并向偏东方向移动。20:30,杞县境内有对流单体生成,并向东北方向移动。21:00 对流单体移至兰考境内,同时原封丘县内多个对流单体在东移过程中向南传播。21:12,多个对流单体在兰考境内合并发展,21:36 多个对流单体形成的混合回波东移发展,后侧出现多个 V 型缺口,预示着强下沉气流产生,对应杞县兰考部分站点大风的产生。随着大于 65 dBz 回波发展旺盛区域东移,21:54,多单体风暴呈现非典型弓形回波特征(图 7a,见第 21 页),回波前沿位于杞县到民权一线,且存在明显高反射率因子梯度区,同时兰考县处于弓形回波后侧弱回波通道中。对应降水量来看,21—22 时兰考红庙站出现了 55.4 mm 的短时强降水。22—23 时,弓形回波向东南方向移动,前沿组织化越发明显,同时降水回波移出兰考,第一阶段强降水结束。

3 日 23 时至 4 日 01 时,杞县境内不断有对流单体生成,并发展向东南移动,兰考境内无明显降水回波。01:42,兰考红庙镇有 45 dBz 以上强度回波生成,一个体扫以后即 01:48,兰考三义寨有新的对流单体生成,中心强度达 45 dBz 以上。两个对流单体处于新生阶段,移速较慢,02:06,

2.4°仰角反射率因子中,睢县附近出现新的对流单体,多个对流单体在地面西南气流引导下于 02:30 形成了中-β 尺度对流系统。02:54 沿风暴移动方向做基本反射率因子剖面图可见(图 8a,见第 21 页),回波主体呈前倾结构,兰考红庙站上空距离地面 4 km 高度处有大于 65 dBz 的强回波中心,回波顶高达 10 km。同时回波移动前方存在回波顶高在 6 km 以下的大范围强回波,对应兰考红庙站 02—03 时出现 55 mm 的强降水。03:36(图 7b,见第 21 页),杞县兰考交界有新的对流单体生成并向东北方向移动。03:54,新生对流单体与之前的对流系统合并,此时由于前期能量已充分释放,对流单体并未继续加强。从 04:36 反射率因子剖面图(图 8b,见第 21 页)可以看出,不同于雹暴结构高悬强回波下的弱回波区特征,50 dBz 以上的回波伸展高度在 4 km 以下,质心较低,无有界弱回波区,主要是由低层暖云产生的高效率降水造成,对应 03—04 时产生了 89 mm 的极端强降水。05 时以后,随着后续对流单体并入对流系统主体并向东北方移动,豫东地区降水逐渐结束。

商丘雷达 1.5°仰角径向速度场显示,3 日 21 时兰考境内有辐合,对应第一阶段强降水回波前沿。21:36,降水回波主体位于兰考红庙站上空,平均径向速度大于 25 m/s,风向为西北风。22:18,大风区移至商丘西部,兰考上空逐渐转为弱的偏西风,持续到 4 日 02 时。02:36(图略),兰考红庙站上空出现速度辐合区,表现为正速度区被大片负速度区所包围,正速度区风速为 -5 m/s。02:42—03:48,兰考境内辐合区原地维持并发展,期间可见小的正速度区,以类似分裂的方式向东北方向移动。03:30(图略),可明显看到三个速度辐合区呈西南—东北向排列,同时辐合区西侧存在着明显的正负速度辐合,而辐合发生的位置则正好位于兰考红庙站附近。04:24,随着系统北移,兰考附近径向速度减弱,转受西南风控制。

综上所述,造成本次豫东特大暴雨的降水回波分为两个阶段。第一阶段(3 日 20—23 时),之后存在降水间歇(3 日 23 时—4 日 01 时),第二阶段(4 日 02—05 时)。第一阶段黄河以北对流云团



阴影部分为短时强降水区域;审图号为 GS(2021)5448 号。

图 6 2020-08-03—04 FY4A 卫星云图上中尺度对流云团 A、B 的云顶亮温演变(文见第 19 页)

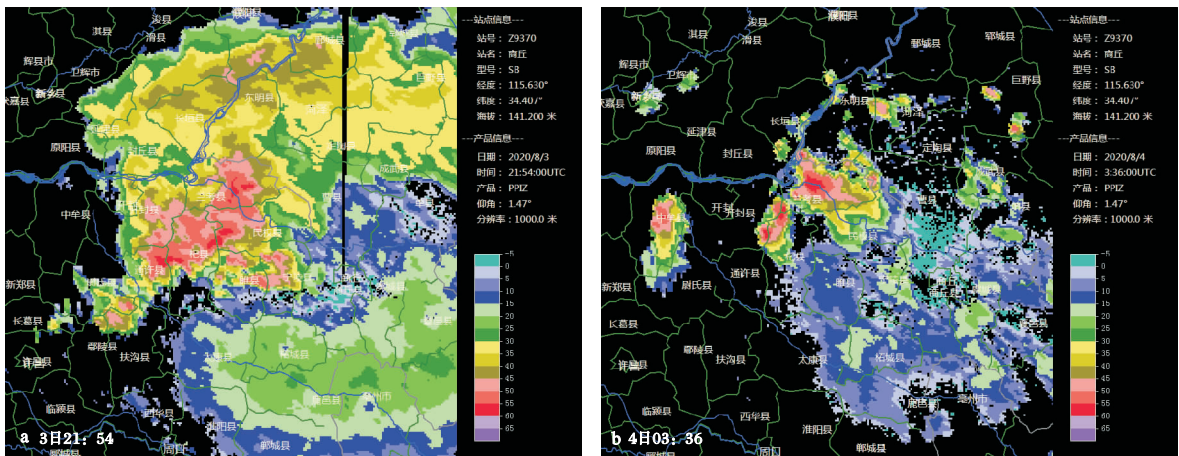


图 7 2020-08-03—04 商丘 1.5°仰角雷达反射率因子图(单位:dBz)(文见第 20 页)

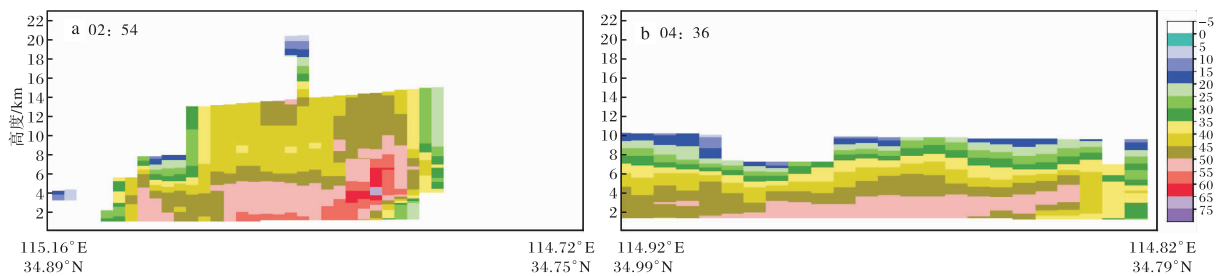


图 8 2020-08-04 商丘雷达反射率因子剖面图(单位:dBz)(文见第 20 页)

发展移动至兰考境内,形成块状多单体风暴,造成第一阶段强降水的产生。第二阶段由多个对流单体合并并在兰考境内形成的中尺度对流复合体,同时由于同一位置长时间强烈的辐合使得中尺度对流复合体在红庙镇附近不断增强。有利的环境风

场使得对流单体在多单体风暴某固定一侧不断生成,使强烈多单体风暴持续数小时之久,造成第二阶段连续 3 h 的短时强降水的产生。

## 5 结论

(1)“8·3”豫东暴雨过程发生在 200 hPa 高

空分流辐散区,500 hPa 冷涡后部低槽东移的环流条件下。中低层台风外围暖湿气流与冷涡后部地面冷锋交汇于豫东,形成强烈辐合,配合高空辐散为暴雨的发生发展提供有利的环流背景。

(2)暴雨发生前,豫东环境场高温高湿,大气处于条件不稳定中,能量条件好。低层水汽通量辐合,大气可降水量较高。强降水第一阶段中低层维持正涡度区和强对流不稳定,高低层散度耦合,为暴雨提供了有利的动力条件;强降水第二阶段近地层存在正负温度平流对,表明边界层扰动促使上升运动发展,导致暴雨增幅。

(3)暴雨期间,强降水发展与两个中尺度对流系统发生、发展及演变关系密切。对流云团 A 自西向东移动,导致开封商丘等地区 3 日 21—23 时暴雨产生;在兰考地区生成的对流云团 B,由于后部新生对流云团合并加强,导致兰考、民权等地区出现特大暴雨;暴雨落区位于中尺度对流云团 TBB 梯度大值区且靠近其低值中心。

(4)强降水第一阶段(3 日 20—23 时),雷达回波表现为多单体混合型回波,后侧 V 型缺口对应地面大风,非典型弓形回波特征对应强降水时段。强降水第二阶段(4 日 02—05 时),多个对流单体形成列车效应;剖面图上回波由质心较高的前倾结构,转变为质心较低形式,具有更高降水效率。径向速度场上表现为速度辐合区,风速辐合位置对应对流单体的生成。

致谢:本文写作过程中,开封市气象台高工李姝霞老师给予大力帮助和指导,在此深表感谢!

#### 参考文献:

- [1] 牛淑贞,张一平,席世平,等.基于加密探测资料解析 2009 年 6 月 3 日商丘强飏线形成机制[J].暴雨灾害,2012,31(3):255-263.
- [2] 张一平,宋培玲,席世平,等.河南一次大范围强风暴雨天气特征综合分析[J].气象与环境科学,2011,34(1):27-35.
- [3] 董彬.周口市 2012 年 7 月 4 日持续性强对流天气过程分析[J].农业灾害研究,2012,2(6):57-62.
- [4] 顾佳佳,武威.2016 年“7.9”豫北特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].暴雨灾害,2017,36(5):440-452.
- [5] 赵强,韩洁,陈小婷.黄土高原一次副高外围暴雨的对流环境及触发条件分析[J].陕西气象,2020(3):1-8.
- [6] 吕维翔,张鑫,汪子琪.浙江西南部一次大暴雨过程分析[J].陕西气象,2020(2):12-17.
- [7] 喻谦花,姜东东,康暑雨.河南省 2011 年 8 月 1—2 日暴雨过程水汽条件与垂直螺旋度分析[J].气象与环境科学,2012,35(2):56-60.
- [8] 叶东.2012 年 7 月 9 日豫北一次短时暴雨诊断分析[J].陕西气象,2013(5):13-19.
- [9] 陈永仁,李跃清.“12.7.22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响[J].气象,2013,39(7):848-860.
- [10] 郭莉,康晓甫,刘坤,等.一次副高控制下的局地大暴雨天气分析[J].陕西气象,2019(6):6-11.
- [11] 蒋翠花,吴新胜,傅云燕,等.一次特大暴雨水汽输送与中尺度分析[J].气象科学,2011,31(增刊):54-60.