

杨慧,张一平,崔丽曼,等.2024.河南一次伴有龙卷的多阶段强对流天气形成机制分析[J].暴雨灾害,43(3):299–312. YANG Hui, ZHANG Yiping, CUI Liman, et al. 2024. Formation mechanism of a multi-stage severe convective weather event accompanied by local tornado in Henan [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(3):299–312 (in Chinese). doi: 10.12406/byzh.2023–217

## 河南一次伴有龙卷的多阶段强对流天气形成机制分析

杨慧<sup>1,2</sup>,张一平<sup>1,2</sup>,崔丽曼<sup>1,2</sup>,张璞<sup>3</sup>,史一丛<sup>1,2</sup>,李可<sup>1,2</sup>

(1. 中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点实验室,郑州 450003;2. 河南省气象台,郑州 450003;  
3. 河南省鹤壁市气象局,鹤壁 458000)

**摘要:** 利用常规观测资料以及区域自动站、卫星、新一代天气雷达和ERA5再分析等高时空分辨率资料,对2022年6月13日河南一次伴有局地龙卷的多阶段强对流过程(以下简称“6.13”过程)的环流形势、中尺度系统演变特征进行了分析,并探讨了该过程不同阶段对流触发维持机制以及濮阳局地龙卷的雷达监测特征。结果表明:(1)这次东北冷涡槽后西北气流形势下大范围强对流天气具有影响范围广、持续时间长、灾害天气种类多的特点。(2)雷达监测到该过程强对流系统分3个阶段相继经过河南,各阶段强回波均持续8~9 h,移速30~50 km·h<sup>-1</sup>,强对流系统以多单体为主,受西北气流引导自西北向东南方向移动且落区有重叠。(3)河南上空始终维持强条件不稳定层结和中等到强的垂直风切变是“6.13”过程多阶段强对流天气长时间维持的重要原因。第一阶段河南本地强对流主要是由风场日变化、局地冷空气活动和地形分布共同作用形成的边界层辐合线或辐合中心触发;第二、三阶段强对流则由前期或同期周边区域强烈发展的地面中尺度雷暴高压伴随的阵风锋(出流边界)触发。(4)濮阳县局地龙卷由发展迅速的超级单体产生,该单体回波生成后12 min出现钩状回波和中尺度气旋性涡旋,18 min出现龙卷涡旋特征(TVS),且钩状回波和中尺度气旋性涡旋较龙卷发生有6 min的提前量。

**关键词:** 强对流;雷暴大风;龙卷;东北冷涡;形成机制;CAPE重建

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2023–217

## Formation mechanism of a multi-stage severe convective weather event accompanied by local tornado in Henan

YANG Hui<sup>1,2</sup>, ZHANG Yiping<sup>1,2</sup>, CUI Liman<sup>1,2</sup>, ZHANG Pu<sup>3</sup>, SHI Yicong<sup>1,2</sup>, LI Ke<sup>1,2</sup>

(1. CMA / Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support Applied Technique, Zhengzhou 450003; 2. Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003; 3. Hebi Meteorological Office of Henan Province, Hebi 458000)

**Abstract:** Henan encountered a multi-stage severe convective weather event (hereinafter referred to as "6.13" event) accompanied by local tornado on 13 June 2022. Using conventional observation data, regional automatic weather station data, satellite cloud images, Doppler weather radar data, ERA5 reanalysis data and other relevant data, we conducted an analysis on atmospheric circulation environment and the evolution characteristics of mesoscale systems for the "6.13" event. In addition, we discussed the initiation and maintenance mechanisms of convection in the different periods of this event and the radar characteristics of the local tornado in Puyang of Henan. Results are as follows. (1) The "6.13" event occurs under the northwest airflow behind the northeast cold vortex trough, and it is characterized by wide impact range, long duration and multiple types of disaster weather. (2) Radar detection results show that the severe convective systems in the "6.13" event passed through Henan in three periods one after another, and strong echoes in each period lasts for 8–9 hours, with the moving speed of 30–50 km·h<sup>-1</sup>. Most of the severe convective systems are multi-cells that all moved from northwest to southeast, with some of their areas overlapping under the guidance of northwest airflow. (3) Maintenance of the strong conditional instability and the moderate to strong vertical

收稿日期: 2023–10–18;定稿日期:2023–12–16

资助项目: 河南省科技厅科技攻关项目(212102310025);中国气象局预报员联盟复盘总结专项(FPZJ2023–077);中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题面上项目(23SWQXM014);中国气象局东北冷涡科研业务能力提升攻关团队项目

第一作者:杨慧,主要从事天气预报工作及暴雨、强对流天气研究。E-mail: 1226262133@qq.com

通信作者:张一平,主要从事强对流天气预报预警方法与技术研究。E-mail: zhangyiping618@163.com

wind shear over Henan is an important cause for multi-stage severe convective weather in the "6.13" event lasting for a long time. The first period of local severe convection in Henan is mainly triggered by the convergence line or convergence center in the boundary layer formed by the combined effect of daily changes of wind field, local cold air activity, topographic distribution, while the second and third periods of severe convection are triggered by the gust front or outflow boundary accompanied by the surface mesoscale thunderstorm high formed by the strong developing convection systems in the surrounding area in the previous period or the same period. (4) The local tornado in Puyang is generated by a rapidly developing supercell storm. The hook echo and mesoscale cyclonic vortex appear 12 minutes after this supercell storm, and the tornado vortex characteristics (TVS) appear 18 minutes later. The hook echo and mesoscale cyclonic vortex are 6 minutes ahead of the occurrence of tornado, which can provide a reference information for early warning local tornadoes.

**Key words:** severe convective; thunderstorm gale; tornado; cold vortex over Northeastern China; formation mechanism; CAPE reconstruction

## 引言

河南位于黄淮西部的中原地区,每年夏季雷暴大风、冰雹等强对流天气多发,尤其是6月份,在冷涡环流背景下,常出现以风雹为主的强对流天气,并带来严重灾害,甚至造成重大人员伤亡(吴蓁等,2011;牛淑贞等,2012)。冷涡是一种深厚的冷性高空涡旋,常使其周围一定区域形成上层干冷、低层暖湿的温湿配置结构,造成大气层结不稳定(张立祥和李泽春,2009)。冷涡背景下,受高空冷平流强迫的超级单体、飚线等强风暴往往导致极端大风、强冰雹等剧烈灾害天气。不少学者或专业人员基于观测资料和数值模拟资料,通过对冷涡背景下中尺度对流系统发生发展的热力、动力、水汽作用等的研究,揭示了对流系统的形态结构及其组织发展的可能机制与形成机理(王秀明等,2012;蔡雪薇等,2018;Bai et al.,2019;张弛等,2019;杨吉等,2020;吴海英等,2021)。也有较多学者基于高分辨率多源探测资料,分析冷涡背景下雷暴大风、冰雹等强对流天气的环境条件和中尺度对流系统演变,揭示对流风暴的结构特征及其成因(戴建华等,2012;王秀明等,2012;郑媛媛等,2014;张桂莲等,2018;公衍铎等,2019;龚佃利等,2021;彭霞云等,2022)。另外,武威和牛淑贞等(2017)、蔡雪薇等(2019)对比分析了冷涡背景下不同类型强对流天气的成因。孙力(1997)研究指出,冷涡移动缓慢且能再生和发展,冷涡背景下可连续数日出现强对流天气。易笑园等(2010)对比分析连续9 d长生命史冷涡影响下的持续对流性天气与冷涡分裂的冷空气、湿度层结及水汽条件的关系,探讨对流性天气的预报着眼点和不稳定参数阈值。李江波等(2011)的研究表明,京津冀地区降雹主要为长生命史冷涡背景下连续降雹,冷涡背景下持续性对流天气多发生在连续数天的午后,通过每日太阳辐射加热地表进而加热低层大气使不稳定层结重新建立而实现。冷涡背景下同一天同一区域的不同地点也可多次出现强对流天气。如,朱宇宁等(2022)分析了东北冷涡后部京津地区连续发生的4次中尺度对流系统的

组织形态演变和中尺度环境特征。每年暖季尤其是6月份,河南因受冷涡后部西北气流控制,晴空强辐射增温和暖平流配合一定的水汽条件在高空冷平流强迫下非常有利于产生强对流天气,风雹强对流多集中出现在下午到前半夜,其日变化特征明显(王安安等,2023)。然而,河南鲜有冷涡背景下受强回波影响同一天多次出现大范围强对流天气。

2022年6月13日,在东北冷涡环流形势下,河南淮河以北地区出现一次少见的受多个强对流系统影响并伴有局地龙卷的大范围强对流天气过程(以下简称“6·13”过程)。该过程强对流持续影响时间和局地龙卷的发生超出预报员预期,给实际预报预警带来较大困难。为此,利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代全球大气再分析资料(以下简称ERA5再分析资料,空间分辨率 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ ,时间分辨率1 h)和常规地面高空资料以及逐时加密自动站资料、逐10 min风云4A卫星云图、河南新一代天气雷达组合反射率因子拼图、濮阳多普勒天气雷达产品等多源探测资料,对“6·13”过程的天气尺度背景、对流系统演变、局地龙卷的可预警性进行了分析,重点探讨该过程不同阶段强对流触发与维持机制,期望加深对冷涡背景下河南强对流天气机理多样性和复杂性的认识,为今后强对流天气预报预警提供思路和借鉴。

## 1 强对流天气实况及特点

2022年6月13日12时—14日08时(北京时,下同),河南淮河以北大部地区出现一次大范围强对流天气。黄河以北和洛阳、郑州、开封、商丘、平顶山、许昌、漯河、周口、南阳、驻马店等地29个国家自动站和490个区域自动站出现 $\geq 17\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的雷暴大风,最大风速达到 $32.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (11级),出现在南阳市淅川县丹江站(图1a)。安阳、鹤壁、濮阳、新乡、郑州、商丘、漯河等地8县市出现直径2~10 mm的冰雹。濮阳、周口局部出现大到暴雨并伴有短时强降水,河南最大过程雨量为72.2 mm,出现在濮阳市台前县后方站;最大小时雨量为34.5 mm(14日03—04时),出现在周口市商水县袁老

站(图1b)。经分析发现,“6·13”过程主要由6月13日午后到夜间三个阶段强对流持续影响造成:第一阶段为13日12:00—20:00,强对流天气主要出现在河南淮河以北县市;第二阶段为13日16:30—14日01:00,强对流主要出现在豫北、豫东和豫东南;第三阶段为13日21:30—

14日06:30,强对流主要影响豫西北、豫中和豫东。三个阶段强对流天气均以雷暴大风为主,其中第一阶段中13日13:48—13:54濮阳县庆祖镇濮渠路两侧张贾村附近出现EF1级(新国标《龙卷风强度等级》(GB/T 40243-2021)二级中等强度)龙卷风天气。

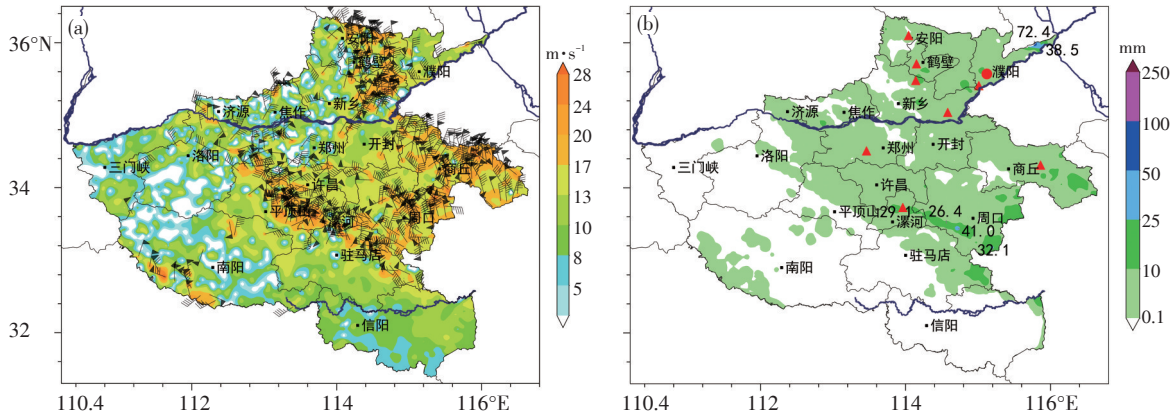


图1 2022年6月13日12时至14日08时河南省 $\geq 17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 极大风(a,风向杆)与累积降水量(b,填色区)分布(图b中,红色三角表示冰雹;红色实心圆表示龙卷发生位置;黑色数字为 $\geq 20 \text{ mm}$ 过程雨量)

Fig. 1 (a) The extreme wind (barbs) that speed is greater than or equal to  $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and (b) the accumulated precipitation (color-filled) in Henan from 12:00 BT 13 to 08:00 BT 14 June 2022. In Fig. 1b, red triangle denotes the hail, red solid circle denotes the place where the tornado occurred, and black number represents the accumulated precipitation greater than or equal to 20 mm

综上可知,“6·13”过程具有3个特点:一是强对流影响时间长,其自13日12:00开始至14日06:30结束,持续近20 h。二是强回波影响时间、空间重叠度高,时间上前一阶段强回波影响还未结束,下一阶段回波又开始发展,而空间上影响河南的强回波均自豫北或豫西北移入河南,随后东南移并过豫中再经豫东移出河南。三是灾害天气种类多、致灾严重,河南淮河以北大部出现大范围雷电、雷暴大风、局地冰雹,短时强降水甚至局地龙卷等强对流天气,其中龙卷影响范围宽300 m左右、长1 000 m左右,造成200余棵树木折断、5根10 kV输电线路电线杆及2根支线电线杆折断、3间简易房损毁,另使若干农业设施大棚受损(图略)。

## 2 环流形势与环境条件

### 2.1 环流形势

6月13日08时,500 hPa天气图上,内蒙古东部有一深厚低涡,低涡中心位势高度低至560 dagpm,温度场上有一 $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷中心与之相配合(图2a),自低涡中心有一冷槽伸向甘肃东部。河南处于冷涡底部西北到偏西气流中,晋冀豫三省交界处也有一 $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷中心。冷涡底部有大片 $\leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的24 h负变温( $\Delta T_{24(500)}$ )区,河南北中部 $\Delta T_{24(500)}$ 在 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下, $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 $\Delta T_{24(500)}$ 中心位于郑州。13日20时,位于内蒙古东部的冷涡中心稳定少动,河南仍位于低涡底部西北到偏西气流中,受冷涡后部偏北气流影响,位于河南上游的太原附近又

形成一 $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷中心,河南大部受较强冷平流控制,且 $\Delta T_{24(500)}$ 在 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下。700 hPa河南处于冷涡南部西北到偏北气流中。850 hPa,13日08时(图2b),深厚冷涡中心也位于内蒙古东部,河南位于冷涡底部偏北气流中,但风速较小( $2 \sim 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),从温度场看,河南大部位于 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 暖区中,郑州、邢台站温度达 $21 \text{ }^\circ\text{C}$ 。 $\geq 6 \text{ }^\circ\text{C}$ 的24 h变温中心( $\Delta T_{24(850)}$ )位于西安到卢氏一带,河南大部位于 $\Delta T_{24(850)} \geq 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的变温区中;20时,河南温度在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上(其中郑州为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ), $\Delta T_{24(850)}$ 在 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上(南阳最大为 $6.2 \text{ }^\circ\text{C}$ )。从上下层系统和关键要素配置图(图2c)上看到,500 hPa低槽自冷涡中心经北京伸向邢台,850 hPa低槽(或切变线)自冷涡中心伸向张家口南部,对流层高中低层系统相距很近且略向前倾。500 hPa河南北部 $-16 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷中心叠置在850 hPa的 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 暖中心之上,较大温度递减率表明河南上空存在强的条件不稳定大气层结;同时, $\Delta T_{24(500)} \leq -3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的负变温中心叠加在 $\Delta T_{24(850)} \geq 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 的正变温之上,加剧了上冷下暖不稳定。因此,上冷下暖不稳定层结的维持和关键要素的恰当配置为此次持续强对流天气发生提供了有利的环境背景条件。

另外,地面图上,6月13日08时,河南处于暖低压带中;14时(图2d),河南大部气温升至 $33 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$ ,地面暖低压发展加强。到20时,河南仍受暖低压中心控制。地面暖低压的维持既有利于不稳定层结建立,也有利于形成地面中尺度辐合中心、辐合线,从而为触发对流提供抬升条件。

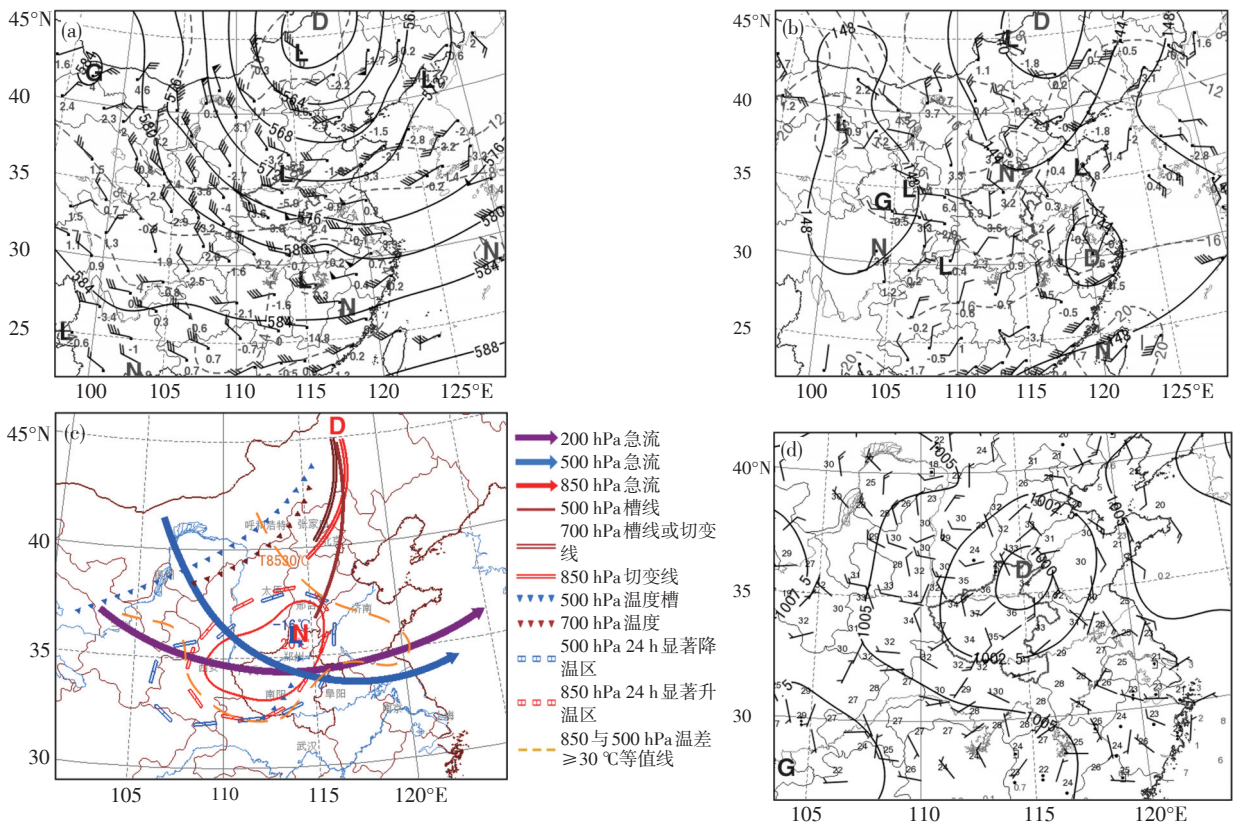


图2 2022年6月13日08时500 hPa (a)与850 hPa (b)环流形势(等值为位势高度,单位: dagpm; 旗杆表示风; 填图数字为24 h变温,单位:  $^{\circ}\text{C}$ ), 以及当日08时中尺度综合分析图(c)与14时地面天气图(d, 填图数字为温度,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 Geopotential height (contours, unit: dagpm), wind (barbs, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and 24-hourly temperature difference (dark number-filled, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa at 08:00 BT 13 June 2022. (c) Superposition of the major weather influencing systems in upper air at 08:00 BT and (d) surface synoptic chart (dark number-filled represents temperature, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) at 14:00 BT 13 June 2022

2.2 环境条件

郑州位于河南北中部, 郑州站探空数据基本能代表“6·13”过程对流发生前河南上空的环境特征。从6月13日08时郑州探空站  $T-Lnp$  图(图3a)上可见, 对流有效位能(CAPE)为  $741 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 不稳定能量较弱; 对流抑制能(CIN)较大, 为  $449.9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 触发对流还需足够的抬升力。此外, 地面到925 hPa高度的逆温层使

上下层湍流交换减弱, 有利于不稳定能量累积。随着太阳辐射不断对地表加热, 辐射增温和下沉增温的共同作用使12时河南北中部大县市气温升至  $32 \sim 36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用对流发生前的13日12时濮阳站温度、露点温度订正的郑州当日08时探空图(图3b)显示, CAPE值明显增大(达  $2050.6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )而CIN迅速减小, 表明较弱的触发条件即可使不稳定能量释放而产生

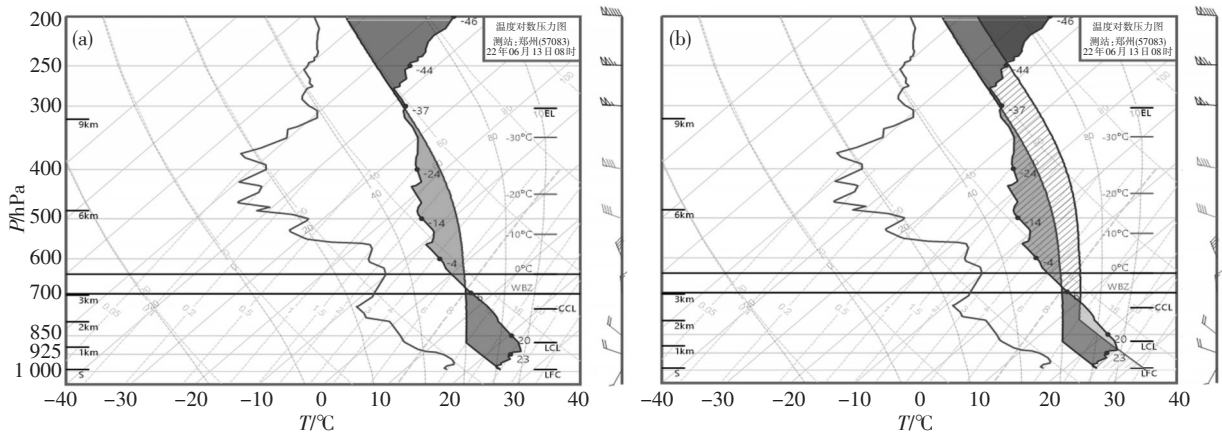


图3 2022年6月13日08时郑州探空站  $T-Lnp$  图(a)以及用12时濮阳站温度和露点温度订正的该站  $T-Lnp$  图(b)

Fig. 3  $T-Lnp$  chart at Zhengzhou sounding station (a) at 08:00 BT and (b) corrected by the temperature and dew point temperature at Puyang station at 12:00 BT 13 June 2022

强对流天气。0—6 km风矢量差较大,为 $18.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。中等强度的CAPE配合中等偏强的垂直风切变非常有利于出现组织化程度较高的多单体强风暴(俞小鼎和郑永光,2020)。

进一步分析郑州13日08时探空图可知,850—500 hPa之间温差( $T_{850-500}$ )高达 $35.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,明显高于以往冷涡背景下河南发生对流天气时的 $T_{850-500}$ 阈值即 $29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (张一平等,2013);12时经订正的探空图上700 hPa到地面温度递减率接近干绝热,下沉对流有效位能(DCAPE)为 $1\,530.9 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,700—400 hPa平均风速较大,以上条件均有利于形成强烈下沉气流和产生雷暴大风。 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度在 $6\,579.5 \text{ m}$ ,湿球 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层(融化层)高度在 $3\,047.1 \text{ m}$ ,中高层冷平流有利于融化层高度进一步下降,加之辐射增温后订正探空中等强度的CAPE(尤其是0— $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 层之间很大)结合中等偏强的垂直风切变,也有利于出现局地冰雹。从整层温度、露点层结曲线看,整层均较干,925 hPa以上温度露点差( $T-T_d$ )几乎都在 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,尤其是中层700—400 hPa之间平均 $T-T_d$ 为 $18.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大单层 $T-T_d$ 为 $28.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,表明对流层中层存在深厚干层;低层925 hPa以下 $T-T_d$ 低于 $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (即 $7.3 \sim 9.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ),表明低层湿度条件差。低层较干、上层更干的大气层结不利于产生短时强降

水,但850 hPa豫东比湿为 $6 \sim 7 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,较西部明显偏大,预示豫东可出现短时强降水。上述分析表明,在有利的天气形势下,强的 $T_{850-500}$ 、中等偏强的0—6 km垂直风切变和中等强度的CAPE有利于强对流系统生成,对流层中层明显偏干有利于产生以雷暴大风为主并伴有局地冰雹等的强对流天气。

另外,使用ERA5再分析资料计算得到“6·13”过程逐时CAPE、 $T_{850-500}$ 和0—6 km垂直风切变。结果显示,6月13日11时,对流发生前河南沿黄及以北地区CAPE在 $1\,000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上, $T_{850-500}$ 超过 $32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图4a),一旦有触发条件,则易使对流回波在该区域发展;河南大部0—6 km垂直风切变超过 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其中南部、中东部在 $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,表明回波移动到此区域后容易发展成组织化程度较高的飏线等对流形式。13日12时后,随着强对流回波发生发展,15时河南不稳定能量释放,CAPE明显减小,20时后CAPE再次增大,到14日02—05时黄淮之间CAPE多为 $500 \sim 1\,500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,当日06时后再次明显减小。从0—6 km垂直风切变看,13日下午维持中等强度( $12 \sim 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),20时后河南大部风切变增大至 $16 \sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,尤其是14日00(图4b)—08时,垂直风切变继续加大,黄淮之间大部为 $18 \sim 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,部分地区高达 $20 \sim 24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

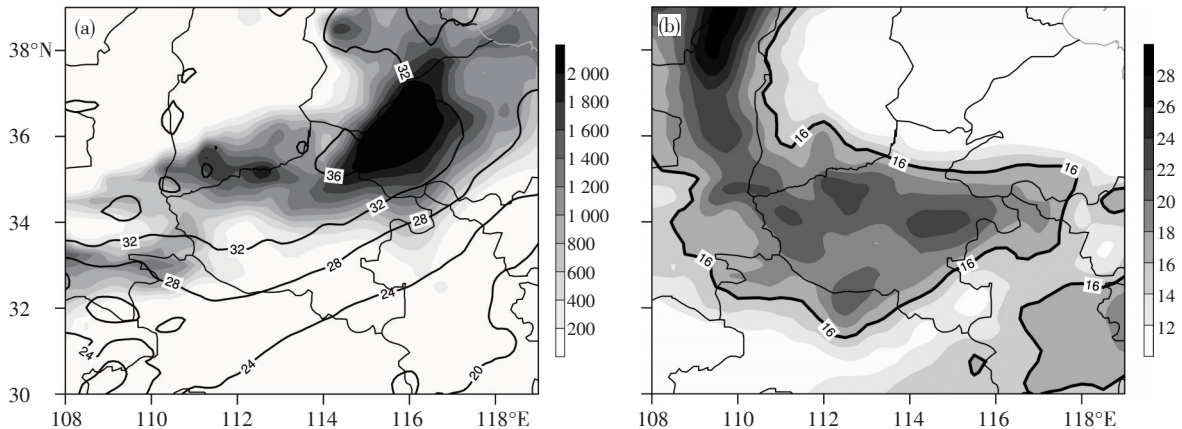


图4 基于ERA5资料计算的2022年6月13日11时对流有效位能(阴影,单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )和850 hPa与500 hPa温差(等值线,单位: $^{\circ}\text{C}$ ) (a)以及14日00时0—6 km垂直风切变(b,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 (a) Convective available potential energy (shaded, unit:  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) and the temperature difference (contours, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) between 850 hPa and 500 hPa at 11:00 BT 13 and (b) the 0–6 km vertical wind shear (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 00:00 BT 14 June 2022 calculated by ERA5

由上述分析可知,6月13日中午前后河南表现为中等的CAPE和中等到强的深层垂直风切变,下午到夜间则为相对较弱的CAPE和强的深层垂直风切变,强天气过程中始终维持大的温度直减率,以上环境条件均对“6·13”过程多阶段强对流发生发展有利。

### 3 中尺度对流系统演变及特征分析

“6·13”过程强对流涉及范围广,山西、河北、河南、山东等省均出现大范围强对流天气(本文主要分析

河南强对流)。气象卫星云图因其覆盖面广,能反映整个对流过程云系发展变化,而天气雷达则能监测到对流风暴活动及其结构特征。因此,本文利用卫星云图分析对流系统的演变过程,并结合风雹等天气实况利用河南省雷达拼图分析河南强风暴演变特征。

#### 3.1 卫星云图特征

由“6·13”过程风云4A逐10 min红外卫星云图(图5)可见,6月13日中午到夜间河南出现的强对流天气主要由不同阶段强对流云团所致。13日08—12时红外

云图上,冷涡中心稳定少动,其周围存在明显的气旋性冷涡旋转云系。12时,山西西北部和晋冀豫三省交界处分别有分散对流云团生成(图5中黑圈表示该过程第一阶段对流云团)。随着高空冷涡旋转,13时30分晋冀豫一带云团在东南移过程中不断发展,同时河北东部和山东西部可见大块积状云发展并向西

南方向传播。随后,上述云团逐渐合并形成东北—西南向中尺度对流系统(MCS),并在继续东南移过程中其西南侧延长线上自河南开封到南阳一带也有弱的小尺度对流云团发展,尔后逐渐形成东北—西南向中尺度对流云带。当日20时前后,前述对流云带移出河南。

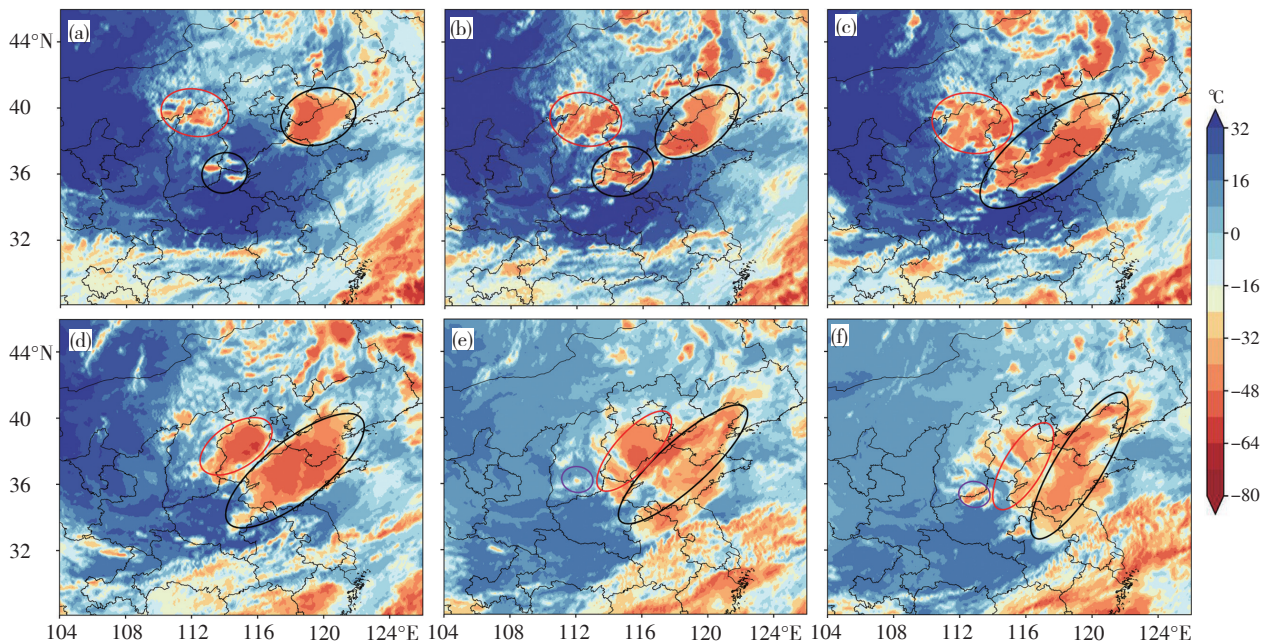


图5 2022年6月13日12:00 (a)、13:30 (b)、15:00 (c)、18:00 (d)、21:30 (e)、23:00 (f) FY-4A 红外云图  
(黑色、红色和紫色椭圆分别表示河南“6.13”过程第1、2、3阶段强对流云团)

Fig. 5 FY-4A infrared cloud images at (a) 12:00 BT, (b) 13:30 BT, (c) 15:00 BT, (d) 18:00 BT, (e) 21:30 BT and (f) 23:00 BT on 13 June 2022.  
Black, red and purple ellipses mark the severe convective cloud clusters during the first, second and third periods of a severe convective weather in Henan on 13 June 2022, respectively

该过程第二阶段,强对流天气主要是由山西北部的对流云团旋转南下造成(图5中红圈)。该对流云团13日16:30移至山西中南部,之后继续东南移至河北西部和河南北部后强烈发展,17时前后在太行山东侧附近自河北中部到河南北部演变为略呈南北走向的MCS,其南部分散的小尺度云团开始影响豫西北的安阳地区且移动缓慢。19时前后,影响安阳地区的对流云团与位于河北境内的MCS主体分离,与新乡地区局地生成的对流云团合并后快速东移影响豫北,同时豫东地区也有对流云团发展东移,14日01时左右第二阶段对流云团移出河南。

到了该过程第三阶段(图5中紫圈),13日21:30山西南部又有尺度较小的对流云团生成,云顶亮温在 $-40^{\circ}\text{C}$ 左右,23时前后自焦作、济源进入河南后,对流云团强烈发展,云顶亮温低至 $-60^{\circ}\text{C}$ ,其随后经豫中向东南方向移动,14日06时前后自豫东移出河南。

从该过程三阶段对流云团的发展看,前两阶段强对流过程均形成了东北—西南(或准南北)向MCS,影响

晋冀鲁豫等多省,同时在河南本地也有分散对流云团生成;第三阶段对流过程则是自山西南部进入河南的弱中尺度对流云团强烈发展所致,主要影响河南。

### 3.2 雷达回波演变特征

雷达监测产品同卫星云图的反映基本一致,即“6·13”过程河南先后出现三个阶段强对流回波,其中既有本地生成的回波,又有周边区域生成后移至河南发展加强的回波。图6为6月13日11:00—14日04:30不同时刻河南新一代天气雷达组合反射率因子拼图(图中分别用黑色、红色和紫色椭圆对三个阶段的强回波进行标注)。

对应该过程的第一阶段,强回波出现时间较早,主要在13日12—20时(图6黑圈)。13日12时前后豫西北安阳、鹤壁及山西南部有块状对流单体生成,生成后原地发展,无明显移动,回波最强中心超过 $65\text{ dBz}$ 。13:30晋冀鲁豫四省交界处有多个块状回波生成、发展,随后向河南移动、传播,并在豫北形成团状多单体强回波,中心强度为 $60\sim 65\text{ dBz}$ 甚至超过

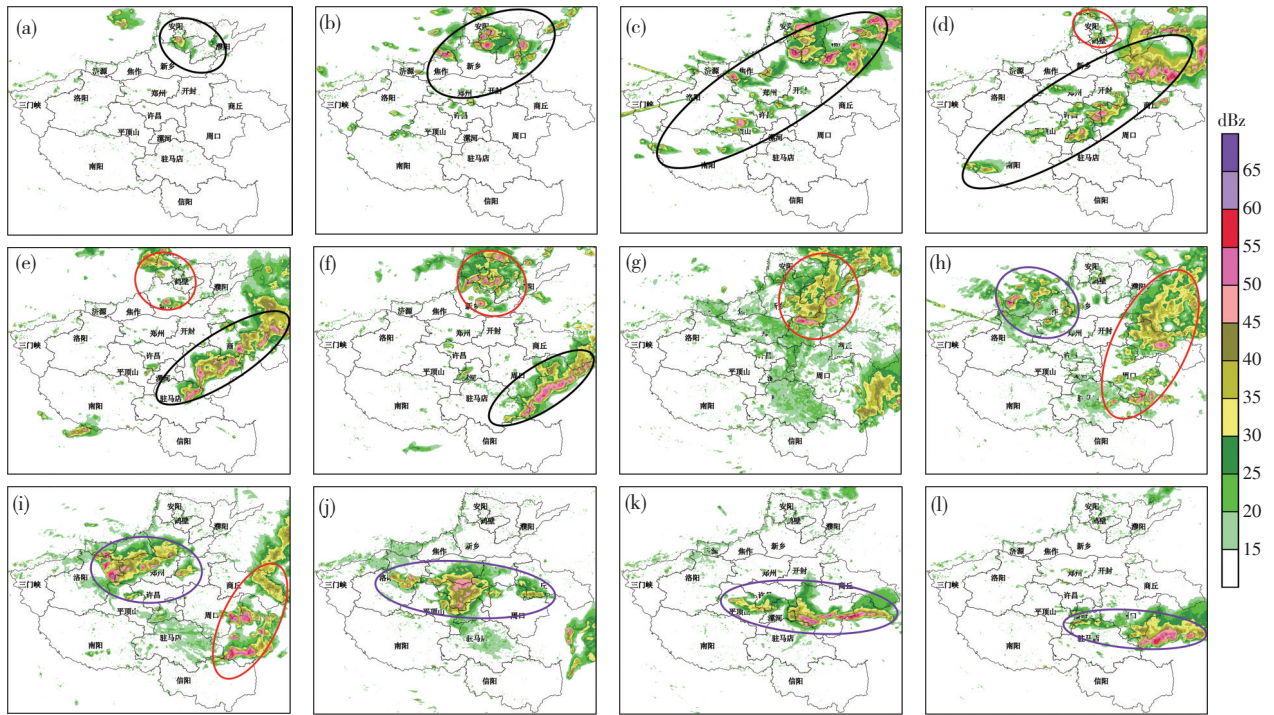


图6 2022年6月13日12:00 (a)、13:30 (b)、15:00 (c)、16:30 (d)、18:00 (e)、19:30 (f)、21:00 (g)、22:30 (h) 以及14日00:00 (i)、01:30 (j)、03:00 (k)、04:30 (l)河南新一代天气雷达组合反射率因子拼图 (黑色、红色和紫色椭圆分别表示河南“6.13”过程第1、2、3阶段强回波)

Fig. 6 Mosaic of composite reflectivity factor from the Henan Dopplor weather radars at (a) 12:00 BT, (b) 13:30 BT, (c) 15:00 BT, (d) 16:30 BT, (e) 18:00 BT, (f) 19:30 BT, (g) 21:00 BT and (h) 22:30 BT on 13, and (i) 00:00 BT, (j) 01:30 BT, (k) 03:00 BT and (l) 04:30 BT on 14 June 2022. Black, red and purple ellipses mark the strong echoes during the first, second and third periods of a severe convective weather in Henan on 13 June 2022, respectively

65 dBz。15时豫北强回波向东南方向移动,同时13—15时从郑州到南阳一带不断有小尺度对流单体生成并整体东南移,回波中心强度为40~50 dBz,16—18时该回波在东南移过程中与豫北东南移多单体回波逐渐结合形成东北—西南向回波带,18时前后在山东西部到驻马店一带逐渐形成飚线且移速加快,20时前后其自商丘、周口和驻马店三地区东部移出河南。

对应该过程的第二阶段(图6红圈),13日16:30强对流回波自山西和河北南部进入安阳,17—19时团状多单体回波在安阳、鹤壁发展并维持,期间豫北新乡附近也有零散块状对流回波生成。20时后,以上回波在东南移过程中合并发展,其前侧不断有对流单体回波新生发展,并以多单体回波形式向东南方向移动、传播,22—23时在商丘、周口、驻马店一带逐渐形成东北—西南向带状多单体回波,14日01时该回波自商丘、驻马店移出河南。此阶段强回波主要影响黄河以北和开封、商丘、周口及驻马店东北部。

对应该过程的第三阶段(图6紫色椭圆),13日21:30,强对流回波自山西东南部进入河南焦作、济源后向东南方向移动,其前侧和东西两侧不断有强对流回波新生;14日01时后,强对流回波逐渐形成东西向

带状并影响豫西北、豫中、豫东多个地市,直到06:30自驻马店移出河南。

结合上文分析结果,对“6·13”过程三个阶段强对流系统演变和相应阶段强对流天气综合特征归纳为表1,从中可知:(1)第一阶段强回波主要由本地生成和晋冀鲁三省强回波东南移或传播共同影响形成,持续近9 h。此阶段强回波带中不断旺盛发展的对流单体或飚线使得河南淮河以北大部出现雷暴大风,其中最大阵风( $32.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )出现在南阳淅川丹江站,安阳、鹤壁、濮阳、新乡、商丘多地出现直径5~10 mm冰雹,同时濮阳县张贾村出现EF1级龙卷(见下文分析)。(2)第二、三阶段强回波分别出现在13日下午到前半夜和当日夜间到14日早晨,强对流回波分别自山西和河北南部进入豫北以及自山西南部进入河南西北部,随后其东南移过程中前沿不断有回波单体新生、加强,主要表现为多单体回波移动和传播特征,后期在豫东平原一带形成线状多单体,其中第二阶段强回波前沿还伴有阵风锋。后两个阶段在其移动路径上均造成大范围雷暴大风、局地冰雹或短时强降水。三个阶段对流形态相似,其发展初期均以强单体构成的团状多单体(局部为超级单体)风暴为主,后期东移至豫东后都形

表1 2022年6月13—14日河南强对流天气过程不同阶段雷达回波特征与其对应的强天气概况

Table 1 Radar echo characteristics and corresponding strong weather types during the different periods of a severe convective weather in Henan from June 13 to 14 in 2022

阶段	持续时间/h	回波特征			强天气	
		形态及形式	平移传播方向及速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	影响区域	类型	实况
1	8.0 (13日 12:00—20:00)	前期团状多单体和局地超级单体;后期线状多单体或飑线	NW—SE 30~40	河南淮河以北大部	以雷暴大风为主,局地冰雹、龙卷、短时强降水	17:10 南阳淅川 $32.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 雷暴大风; 13:00—15:00 安阳、鹤壁、新乡 $5\sim 10 \text{ mm}$ 冰雹; 14:00—15:00 濮阳台前 $31.2 \text{ mm}$ 短时强降水; 13:48—13:54 濮阳 EF1 级龙卷
2	8.5 (13日 16:30—14日 01:00)	前期分散团状多单体;后期线状多单体	NW—SE 50~60	豫北、豫东、豫东南	雷暴大风、局地冰雹	20:38 新乡封丘 $23.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 雷暴大风; 20:10 该地 $2\sim 5 \text{ mm}$ 冰雹
3	9.0 (13日 21:30—14日 06:30)	前期分散强单体或团状多单体;后期准东西向线状多单体	WNW—ESE 40~50	豫西北、豫中、豫东	雷暴大风、局地冰雹和短时强降水	14日 01:16 平顶山叶县 $28.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 雷暴大风; 14日 02:30 漯河郾城 $5 \text{ mm}$ 冰雹; 14日 03:00—04:00 周口商水 $34.5 \text{ mm}$ 降水

成了线状多单体回波(或飑线)。各阶段强回波持续时间均长达8~9 h,所经之地大部县市出现8~9级雷暴大风或局地冰雹(豫东局部还出现短时强降水)。

#### 4 不同阶段对流的触发与维持机制

通常,一个地区在强对流天气过后,不稳定能量得到释放,层结趋于稳定,地面形成雷暴高压,不利于对流天气再次发展(斯公望,1989;牛淑贞等,2012;王秀明等,2012)。与河南以往冷涡背景下发生的强对流天气相比,“6·13”过程持续时间要长得多。那么,冷涡后部西北气流形势下多个阶段强回波接续影响的原因是什么呢?下文从预报预警业务出发,利用多种探测资料探讨其形成机制。

##### 4.1 第一阶段对流的触发与维持

上文对环流背景和郑州订正探空图的分析表明,

强的  $T_{850-500}$ 、中等偏强的0—6 km垂直风切变和中等强度的CAPE为“6·13”强对流天气发生发展提供了有利环境条件,而对流的初生与边界层辐合条件密切相关。6月13日08时,地面图上(图略),河南以偏南风或西南风为主,风速  $2\sim 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在河北西部有东北风沿太行山南下至河北南部,与其东部的偏南风形成南北向狭长辐合线。同时,红外云图上(图略),除河北东部有对流云团发展外,整个西北地区东部及华北到河南、山东一带均是晴空少云。随着地表加热,边界层湍流加强,动量下传使地面风速逐渐加大。12时,河南西北部沿太行山向北的西南风增至  $4\sim 8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与自河北沿太行山南下的东北风在河南西北部太行山东麓汇合,形成边界层辐合中心(图7a)。与此同时,河北东部的边界层辐合线也随南下东北风向南扩展至河南东北部,对流回波分别在河南西北部和东北部生

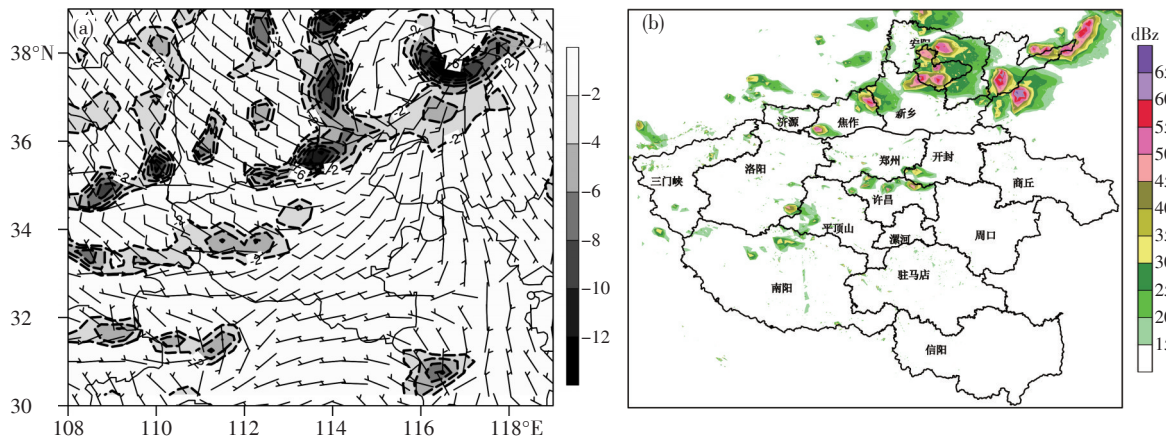


图7 基于ERA5资料计算的2022年6月13日12时地面风场(风向杆)与散度场(阴影和等值线,单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) (a) 以及当日14时河南天气雷达组合反射率因子拼图(b)

Fig. 7 (a) Surface wind (barb) and divergence (shaded or contours, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) at 12:00 BT on 13 June 2022 calculated by ERA5, and (b) mosaic of composite reflectivity factor from the Henan Doppler weather radars at 14:00 BT on the same day



成并快速发展加强(图7b),形成由以强单体为主的块状多单体和超级单体风暴,在豫北造成雷暴大风、冰雹和局地短时强降水,濮阳龙卷也出现在此对流回波快速发展加强阶段。自12时起,山西北部有弱冷空气活动,受其影响,偏北风沿黄河和汾河河谷南下,河南西部伏牛山东北侧的偏南风逐渐转变为沿山的西北风,与伏牛山东南侧河南西南部、中东部一带的西南风形成东北—西南向辐合区,辐合强度较弱(图7a)。随着偏北风继续增强,到14时(图略)伏牛山东北侧西北风增至 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,辐合强度随之增强,沿辐合线在郑州、许昌、平顶山、南阳一带有对流回波生成(图7b)。上述强回波在东南移过程中合并形成东北—西南向回波带并逐渐发展加强为飚线,其移速加快,造成大范围雷暴大风。

以上分析表明,在有利的环境条件下,自河北沿太行山南下的东北风与河南午后增强的偏南风在河南北部形成的辐合线和辐合中心,以及自山西北部沿黄河和汾河河谷南下的偏北风使河南西部风向发生变化进而在伏牛山东部形成的辐合线,触发“6·13”过程第一阶段强对流;同时,上游移来的强回波在层结不稳定条件下也可维持或发展,二者在引导气流的作用

下东南移,影响河南北中部大部地区。

#### 4.2 第二阶段对流的触发与维持

从上节对流系统演变分析结果可知,第二阶段影响河南的强回波,一是自山西和河北南部进入豫北,二是在河南本地生成,随后二者合并东南移影响豫北、豫东和豫东南。下文分别对强回波移入前期已出现强对流天气的豫北后仍维持或发展加强的原因及此阶段河南本地强回波的触发和演变过程进行探讨。

第一阶段强对流回波逐渐东移后,13日17时,河南上空500 hPa气温变化不大(图8a),850 hPa为西北风和自西北地区东部伸向河南东部的暖舌,持续的暖平流使河南 $T_{850-500}$ 维持在 $32 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$ (图8b)。第一阶段强对流天气发生时,12时地面图上豫北气温为 $32 \sim 36 \text{ }^\circ\text{C}$ 。强对流天气发生时,受其影响区域气温迅速下降,如14—15时安阳、鹤壁部分县市气温明显下降,最大降幅达 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上,且气压升高,形成局地小尺度冷池。当强回波移出后,因降水效率低,雨量较小(区域站雨量分布不均,平均雨量 $\leq 1 \text{ mm}$ ,局部10 mm左右),原出现强对流天气的地区在晴空辐射增温和边界层暖平流的共同作用下,16—18时地面气温再次上升至 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,同时由于前期产生降水,地面露点温度

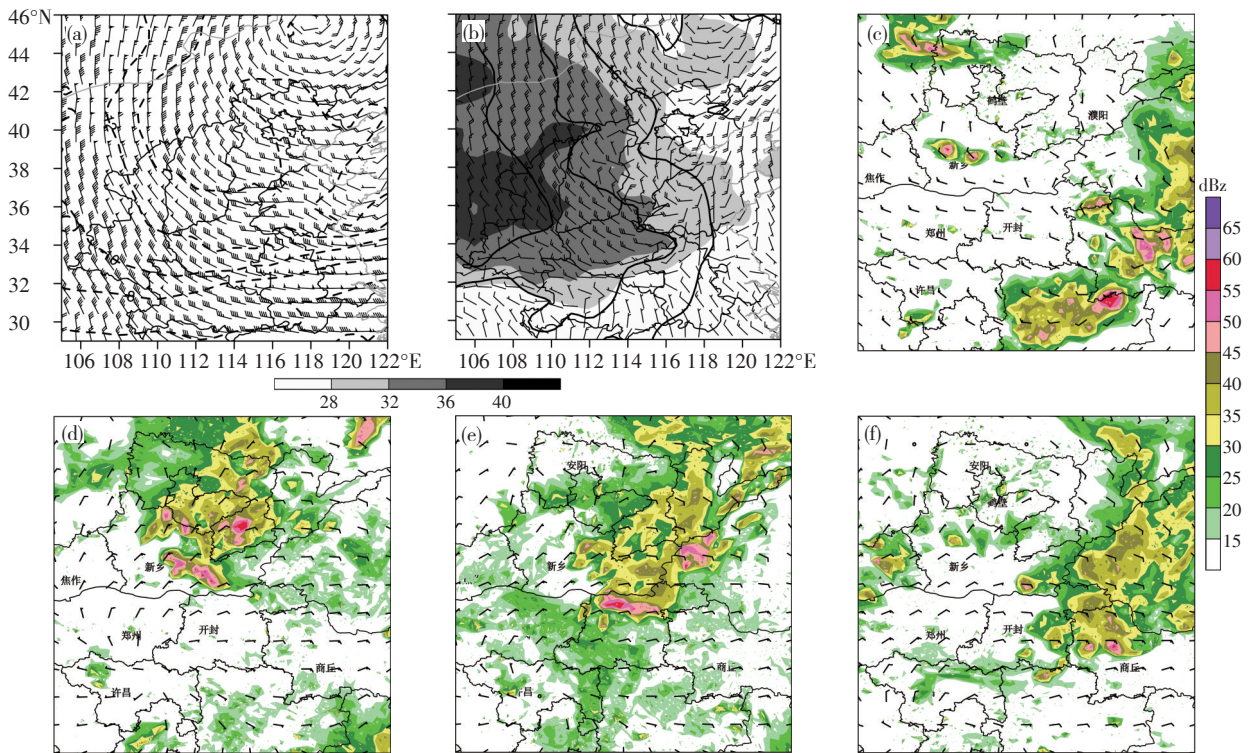


图8 基于ERA5资料计算的2022年6月13日17时500 hPa风场(风向杆)和温度场(等值线,单位:  $^\circ\text{C}$ ) (a), 850 hPa风场(风向杆)、温度场(等值线,单位:  $^\circ\text{C}$ )及850 hPa与500 hPa温差(阴影,单位:  $^\circ\text{C}$ ) (b);当日17时(c)叠加17:42雷达组合反射率拼图(填色)及20时(d)、21时(e)、22时(f)叠加相应时刻雷达组合反射率拼图(填色)的地面风场(风向杆)

Fig. 8 (a) Wind (barb) and temperature (contour, unit:  $^\circ\text{C}$ ) at 500 hPa and (b) wind (barb) and temperature (contour, unit:  $^\circ\text{C}$ ) at 850 hPa and temperature difference (shaded, unit:  $^\circ\text{C}$ ) between 850 hPa and 500 hPa at 17:00 BT on 13 June 2022 calculated by ERA5, and surface wind (barb) at (c) 17:00 BT with superimposition of radar composite reflectivity factor (color-filled) at 17:42 BT and (d) 20:00 BT, (e) 21:00 BT and (f) 22:00 BT with superimposition of radar composite reflectivity factor (color-filled) at the corresponding times on the same day

升高,地面温度和露点温度再次升高有利CAPE重建。以豫北鹤壁市淇县为例(图9,13日白天豫北中高层温度层结变化不大, $T_{850-500}$ 为32~36℃,用淇县强对流天气发生前后的气温和露点温度订正08时郑州探空可大致估计CAPE值变化)。强对流天气发生前,淇县CAPE中等偏强;强对流天气发生后,其CAPE近乎全部释放,14时CAPE值接近0,之后随地面温度回升和露点温度升高,CAPE再次增至821 J·kg<sup>-1</sup>。这使得自河北、山西南部沿太行山发展并移入河南北部的强回波在安阳、鹤壁维持或发展加强。

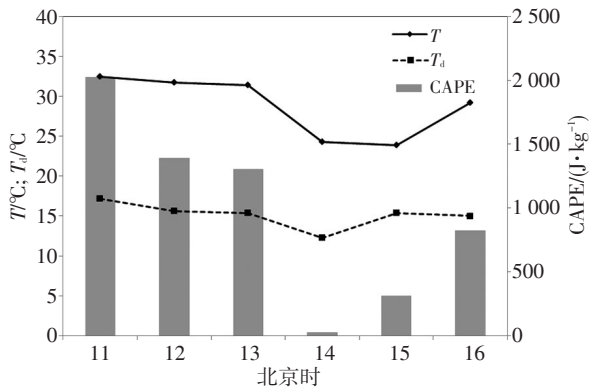


图9 2022年6月13日11—16时淇县气象站气温( $T$ )、露点温度( $T_d$ )和对流有效位能(CAPE)逐时变化

Fig. 9 Hourly variation of temperature ( $T$ ), dew point temperature ( $T_d$ ) and Convective Available Potential Energy (CAPE) at the Qixian meteorological station from 11:00 BT to 16:00 BT on 13 June 2022

此阶段河南本地生成的强回波主要由地面辐合线触发。从地面风场看,第一阶段强回波东移过程中逐渐发展成东北—西南向MCS,17时在山东西北部形成中尺度雷暴高压,而河南北部受强对流天气影响时气压升高,其影响结束后随着气温再次升高、气压降低,表现为负变压,产生了由山东西部指向河南北部的气压梯度和变压梯度,在梯度风和变压风共同作用下,河南北部东北风加大。另外,17时区域自动站观测资料显示,焦作、新乡、开封一线形成西北—东南向边界层辐合线,辐合线两侧温差明显,北侧气温30℃左右,南侧35~36℃,该辐合线除具有风向辐合抬升作用外,力管效应产生垂直于辐合线的次级环流也有利垂直运动增强。17:42组合反射率因子图(图8c)显示地面辐合线附近的新乡附近有强回波生成。19时(图略),自河北、山西南压的强回波和新乡局地生成的强回波在豫北形成团状多单体,20时后(图8d—f),在高空西北气流引导和夜间豫东强的0—6 km垂直风切变共同作用下,团状多单体强对流回波东南移并不断发展且长时间维持。此阶段强回波移动和传播速度快(约50 km·h<sup>-1</sup>),且强回波前沿还伴有明显阵风锋,豫北、豫东尤其是新乡东部、开封、商丘、周口部分县市

出现了大范围雷暴大风和局地冰雹。

综上所述可知,850 hPa持续暖平流使河南上空(850—500 hPa)维持强的条件不稳定层结,前期强对流天气结束后晴空太阳辐射增温和边界层暖平流共同作用使地面气温再次升高,同时前期降水导致地面露点较高,有利CAPE重建,第一阶段强回波影响的区域仍具有对流再次发展的可能性。河南本地生成的强对流回波,则由周边区域强烈发展的对流形成的地面中尺度雷暴高压伴随的阵风锋(出流边界)触发,多单体为主的强风暴在强垂直风切变环境下快速东移导致豫东部分县市出现雷暴大风、局地冰雹。

#### 4.3 第三阶段对流的触发与维持

6月13日21:30红外云图(图5e)显示,山西南部又有弱对流云团发展,中心亮温在-40℃左右,云团随引导气流东南移。23时500 hPa冷涡后有短波横槽携带冷空气南下(图10a),850 hPa 20℃等温线南压至河南中西部,中高层补充冷平流使该地区 $T_{850-500}$ 仍维持在32~36℃(图10b)。地面图上(图10c),随着前两阶段对流在山东和河北形成中尺度雷暴高压东南移,23时河南北部和中东部转为东北风和偏东风,二者在河南西部太行山东侧的焦作、济源辐合,洛阳、平顶山、漯河、周口一线存在明显的辐合线,由ERA5再分析资料计算的23时地面散度场可见河南西北部到中东部存在明显的辐合带,辐合中心位于河南西北和中部,同时因豫东露点温度高、水汽含量大,偏东风还有向河南西北部输送水汽的作用。如豫西沁阳站,露点温度由13日21时的7℃增至14日00时的15℃,再次转好的低层水汽条件配合河南上空条件不稳定层结维持,有利CAPE重新增长。另外,13日后半夜黄淮之间0—6 km风矢量差达20~22 m·s<sup>-1</sup>。上述有利的不稳定层结、水汽和强垂直风切变条件,使得山西南部的弱对流云团移入河南西北部后强烈发展,中心亮温降至-60℃左右(图5f),23时雷达组合反射率因子图(图10d)也显示济源至焦作一带有50 dBz以上强对流回波发展。强对流回波随引导气流沿西北—东南向的辐合带向东南方向移,不断触发新的对流,造成以雷暴大风为主的强对流天气。

通过对“6·13”过程三个阶段对流触发与维持机制的分析可知,受低层持续暖平流和后期中高层补充冷平流影响,整个强对流过程河南上空(850—500 hPa)均维持强的条件不稳定层结,由于第一阶段强对流发生时间较早,对流结束后地面晴空辐射增温和暖平流共同作用使低层条件不稳定层结重新建立,前期降水导致地面露点较高,结合重建的低层条件不稳定形成显著的CAPE,前期强对流天气影响区域仍具有强对

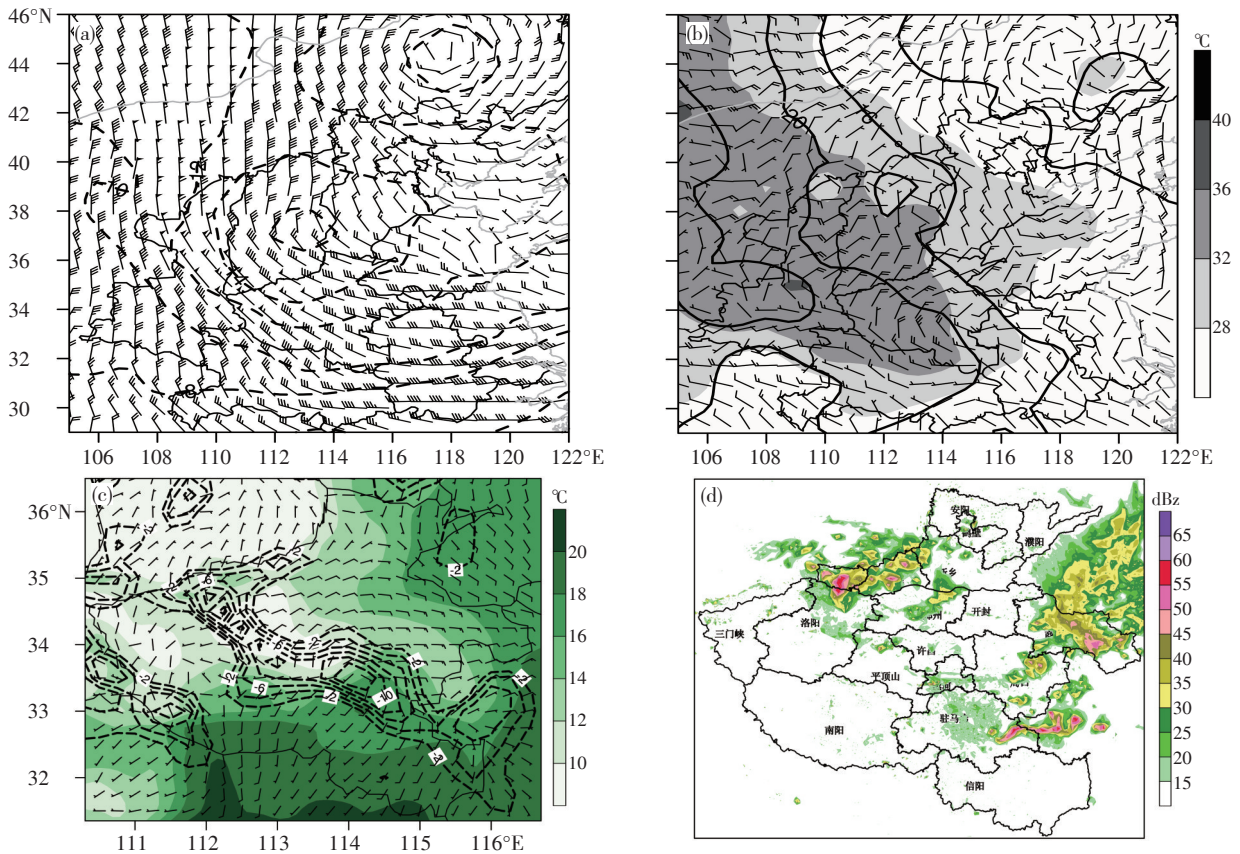


图10 基于ERA5资料计算的2022年6月13日23时500 hPa风场(风向杆)与温度(等值线,单位: °C) (a), 850 hPa风场(风向杆)、温度(等值线,单位: °C)及850 hPa与500 hPa温差(阴影) (b), 地面风场(风向杆)、散度场(等值线,单位:  $10^{-5} s^{-1}$ )和露点温度(阴影) (c), 以及同时刻河南天气雷达组合反射率因子拼图(d),

Fig. 10 (a) Wind (barb) and temperature (contour, unit: °C) at 500 hPa, (b) wind (barb) and temperature (contour, unit: °C) at 850 hPa and the temperature difference (shaded, unit: °C) between 850 hPa and 500 hPa and (c) wind (barb), divergence (contours, unit:  $10^{-5} s^{-1}$ ) and dew-point (shaded, unit: °C) calculated by ERA5, as well as (d) the mosaic of composite reflectivity factor from the Henan Doppler weather radars at 23:00 BT on 13 June 2022

流再次发展的可能性。对于河南本地生成的强对流回波,初期主要由风场日变化、局地冷空气活动和地形分布共同作用形成的边界层辐合线或辐合中心触发,中后期则由前期或同期周边区域强烈发展的强对流系统形成的地面中尺度雷暴高压伴随的阵风锋触发。因此,实际预报业务中,除分析强对流发生前的天气形势和物理量场外,还要密切关注并跟踪环境背景的发展变化以及本地或周边已发生的强对流天气导致的局地风场、温度场和水汽分布等的变化,根据这些变化提前预估不稳定条件重建和强对流持续发展的可能性,有助于提高短临预报预警的时效和准确率。

### 5 濮阳局地龙卷的雷达监测特征

龙卷是局地突发的小尺度剧烈灾害天气,雷达是监测龙卷的有效手段(俞小鼎等,2020)。6月13日08时郑州探空显示抬升凝结高度约为1.2 km,0—1 km垂直风切变河南大部在 $4 \sim 6 m \cdot s^{-1}$ 之间。冷涡背景干环境条件下偏高的抬升凝结高度和较弱的0—1 km垂

直风切变并不有利于出现龙卷。郑州当日08时探空资料不能很好地代表濮阳龙卷发生前的环境条件,而濮阳新一代天气雷达距龙卷发生地约25 km,因此利用该雷达资料分析龙卷发生前后若干回波特征,讨论局地龙卷的可预警性。

6月13日13:30—13:36,可见不规则块状强回波单体在濮阳雷达站东南侧发展,其中心强度超过55 dBz(图略)。13:42,强回波范围扩大,中心强度增至60 dBz以上(图11a),基本反射率因子图上出现与超级单体相关联的钩状回波;同时,速度图上可见明显的正负速度对(图11c),但旋转强度较弱。13:48,强回波面积进一步扩大,强度维持,其气旋性弯曲更明显(图11b);速度图上仍然可见明显的速度对(图11d),入流和出流速度分别为 $21.5 m \cdot s^{-1}$ 和 $16.5 m \cdot s^{-1}$ ,旋转速度为 $19 m \cdot s^{-1}$ 。上述速度对距濮阳雷达站25 km,根据中气旋的旋转速度和中气旋与雷达之间距离的关系,可主观判别其为中气旋且强度为中等,但可能由于持续时间短或垂直伸展厚度小,雷达中气旋探测客观算法并未识别出

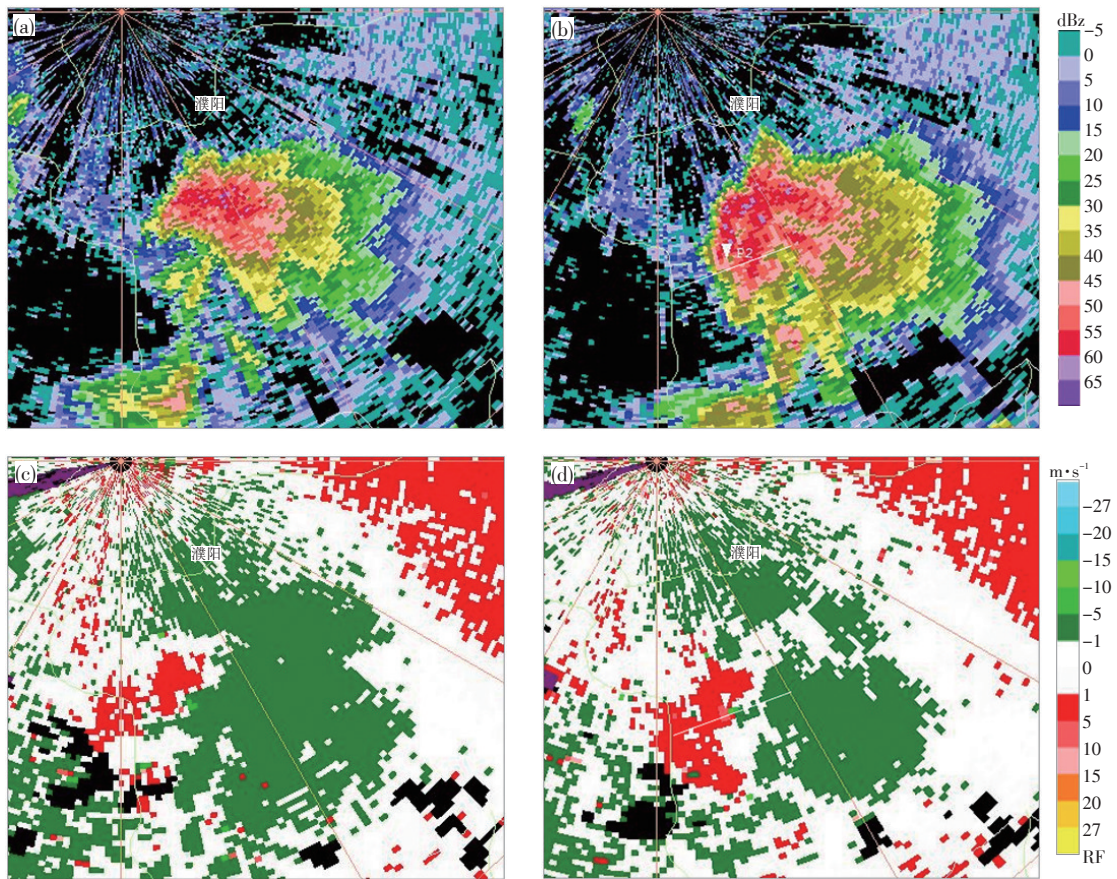


图 11 2022年6月13日13:42 (a, c)和13:48 (b, d)濮阳雷达1.5°仰角基本反射率因子(a, b)和平均径向速度(c, d) (图b, d中白色倒三角表示TVS, 白线所示为剖面方向)

Fig. 11 (a, b) Basic reflectivity factor (RF, unit: dBz) and (c, d) radial velocities (RV, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 1.5° elevation angle at Puyang radar station at (a, c) 13:42 BT and (b, d) 13:48 BT on 13 June 2022. In Fig. 11b and Fig. 11d, white inverted triangles denote TVS, and white solid lines show the direction of vertical cross sections of RF and RV

中气旋。对于龙卷涡旋特征(TVS),距雷达站大致相同距离的相邻径向速度差为 $38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,质控后的雷达平均径向速度图上识别出了TVS(图11b),此TVS和龙卷同时出现,用TVS预警龙卷无提前量。13:54,上述块状回波面积和强度较之前均变化不大,而此时正负速度对消失,表明该单体已开始减弱。14:00,该块状回波分裂为多个强回波中心,结构较之前变松散(图略),并逐渐东移。该回波母体持续约1 h后减弱消失。

另外,从沿图11b中白线所作的13:48反射率因子三维剖面(图略)可见,低层有强上升气流造成的低层弱回波区、有界弱回波区和回波悬垂;同时,沿图11d中白线所作的垂直于雷达径向的速度剖面(图略)显示入流和出流之间在边界层附近构成的辐合切变区。TVS详细信息显示,该TVS底高和顶高分别0.4 km和1.6 km,最大入流和出流速度差 $38\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,对应的最大切变 $167\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 出现在0.8 km高度处。该TVS距离雷达站25 km左右,两个像素之间的距离差约0.43 km,排除径向速度图上速度模糊的干扰,假定该TVS是对称的,经计算可得其垂直涡度约为 $170\times$

$10^{-3}\text{ s}^{-1}$ ,与雷达探测给出的最大切变强度一致,从而证实该极强切变在距离雷达站较近位置出现的可能性,低层强切变的发展是龙卷形成的前提条件。

濮阳县国家站位于上述龙卷发生地北侧15~16 km之间。龙卷发生时,受雷暴高压影响,该站气压升高;龙卷发生时,气压略有下降,而气温和风速无明显变化。距离龙卷发生地最近的子岸自动站在龙卷发生时(13:48—13:54),气温由 $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 快速下降至 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大风速由 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与根据破坏程度判断的龙卷强度相比,只能反映出测站附近有可能发生了龙卷性质的对流,这也说明该龙卷时空尺度非常小,即使与之距离最近的观测站也基本不能监测到。

综上所述,濮阳局地龙卷由生消发展迅速的超级单体风暴产生,龙卷母体维持时间约1 h,在回波生成后12 min出现钩状特征,速度图上有一个体扫的中气旋涡旋,18 min后雷达监测到1个体扫的龙卷涡旋特征后迅速减弱,龙卷出现在该单体发展最强时段,TVS和龙卷发生同时出现,无提前量,而钩状回波和对应的中气旋涡旋较龙卷发生则有6 min的提前量。

## 6 结论与讨论

利用高空地面常规资料及多种高分辨率探测资料,结合ERA5再分析资料等,对2022年6月13日东北冷涡背景下河南大范围强对流天气进行了详细分析,重点探讨了河南多阶段强对流触发与维持机制以及濮阳局地龙卷的雷达监测特征,主要得到如下结论:

(1)“6·13”过程大范围强对流天气具有影响范围广、持续时间长、灾害天气种类多的特点。强的850 hPa和500 hPa温差、中等偏强的0—6 km垂直风切变、中等强度的CAPE极有利产生强对流,对流层中层明显干层有利雷暴大风伴局地冰雹产生。

(2) 雷达探测显示,此过程强对流回波分3个阶段相继影响河南,各阶段强回波均持续8~9 h,移动速度30~50 km·h<sup>-1</sup>。团状和线状多单体强回波受西北气流引导自西北向东南方向移动且落区存在重叠。此次冷涡槽后西北气流形势下多阶段强回波持续影响河南长达20 h。

(3) 受低层持续暖平流和后期中高层补充冷平流影响,整个对流过程河南上空维持强的条件不稳定层结。强对流最初发生时间较早,对流结束后晴空辐射增温和边界层暖平流共同作用使地面气温重新升高,因前期对流降水导致地面露点温度较高,再次形成明显的CAPE,在前期强对流天气影响区域强对流再次发展。第一阶段河南本地强对流回波主要由风场日变化、局地冷空气活动和地形分布共同作用形成的边界层辐合线或辐合中心触发,第二、三阶段强回波则由前期或同期周边区域强烈发展的对流形成的地面中尺度雷暴高压伴随的阵风锋和辐合线触发。整个对流过程,河南上空始终维持强条件不稳定层结和中等偏强的垂直风切变是多阶段强对流天气得以长时间维持的重要原因。

(4) 濮阳县局地龙卷由生消迅速的超级单体风暴产生,龙卷母体风暴维持时间约1 h,该风暴生成12 min时出现钩状回波和中尺度涡旋,18 min时雷达监测到1个体扫龙卷涡旋特征(TVS)并迅速减弱。TVS和龙卷触地同时出现,对龙卷提前预警难度大;钩状回波和中尺度气旋性涡旋较龙卷发生有6 min提前量。

通常,东北冷涡背景下影响河南的强对流多自西北向东南方向移动并一次性经过河南省,很少多阶段反复出现。尽管东北冷涡相似环流背景下对流回波发展表现形式不同,但也并非无规律可循。“6·13”强对流过程中,不稳定层结和CAPE的重建、中等偏强的垂直风切变的维持及地面辐合线的形成等为多阶段强回波持续影响提供了有利条件。因此,实时预报业

务中,对初始对流发生时间较早、降水量级偏小的强对流过程,应特别关注并仔细分析不稳定层结和CAPE重建、地面辐合线形成等对流持续发展的环境条件,以及周边区域对流发展的反馈作用,即上游强对流回波发生发展可对下游影响区域的临近预报提供参考信息。对于西北气流形势下发生的局地龙卷,省市县三级气象台站应密切关注局地对流回波发展尤其是钩状回波处的中气旋或TVS,从而及时判断龙卷可能发生的区域并尽可能提前预警。

## 参考文献(References):

- 蔡雪薇,湛芸,沈新勇,等.2018.冷涡对两类对流系统结构演变作用的个例模拟对比分析[J].气象,44(6):790-801. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al. 2018. Comparative simulation analysis of the effect of cold vortex on structural evolution of two types of mesoscale convective systems [J]. Meteorological Monthly,44(6):790-801 (in Chinese). doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.06.007
- 蔡雪薇,湛芸,沈新勇,等.2019.冷涡背景下不同类型强对流天气的成因对比分析[J].气象,45(3):621-631. Cai X W, Chen Y, Shen X Y, et al. 2019. Cause analysis of different types of severe convective weather under cold vortex background [J]. Meteorological Monthly,45(3):621-631 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.05.003
- 戴建华,陶岚,丁杨,等.2012.一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析[J].气象学报,70(4):609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(4):609-627 (in Chinese)
- 公衍铨,郑永光,罗琪.2019.冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J].气象,45(4):483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q. 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex [J]. Meteorological Monthly, 45(4):483-495 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.004
- 龚佃利,王洪,许焕斌,等.2021.2019年8月16日山东诸城一次罕见强雹暴结构和大雹形成的观测分析[J].气象学报,79(4):674-688. Gong D L, Wang H, Xu H B, et al. 2021. Observational analysis of a rare and severe hailstorm cloud structure and large hailstones formation on 16 August 2019 in Zhucheng, Shandong province [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(4):674-688 (in Chinese). doi: 10.11676/qxb2021.032
- 李江波,王宗敏,王福侠,等.2011.华北冷涡连续降雹的特征与预报[J].高原气象,30(4):1119-1131. Li J B, Wang Z M, Wang F X, et al. 2011. Characteristic and forecasting of continuous hail shooting processes caused by the North China cold vortex [J]. Plateau Meteorology,30(4): 1119-1131 (in Chinese)
- 牛淑贞,张一平,席世平,等.2012.基于加密探测资料解析2009年6月3日商丘强飑线形成机制[J].暴雨灾害,31(3):255-263. Niu S Z, Zhang Y P, Xi S P, et al. 2012. Analysis on the formation mechanism of a strong squall line based on intensive observation data in Shangqiu on June 3, 2009 [J]. Torrential Rain and Disasters, 31(3):255-263 (in Chinese)
- 彭霞云,章丽娜,刘汉华,等.2022.冷涡底部对流引起的杭州湾极端大风形成机制分析[J].气象,48(6):719-728. Peng X Y, Zhang L N, Liu H H, et al. 2022. Formation mechanism of extreme winds in Hangzhou

- Bay caused by convection at the bottom of cold vortex [J]. *Meteorological Monthly*,48(6):719–728 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2022.051601
- 斯公望.1989.暴雨和强对流环境系统[M].北京:气象出版社:116. Si G W. 1989. The environment system of heavy rain and severe convection [M]. Beijing: China Meteorological Press:116 (in Chinese)
- 孙力.1997.东北冷涡持续活动的分析研究[J].*大气科学*,21(3):297–307. Sun L.1997. A study of the persistence activity of Northeast cold vortex in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,21(3):297–307 (in Chinese)
- 王国安,乔春贵,张一平,等.2023.冷涡背景下河南风雹强对流天气统计特征[J].*气象与环境科学*,46(4):27–37. Wang G A, Qiao C G, Zhang Y P, et al. 2023. Statistical characteristics of thunderstorm gale and hail in Henan under the background of cold vortex [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*,46(4):27–37 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673–7148.2023.04.004
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,等.2012.“6.3”区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J].*高原气象*,31(2):504–514. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, et al. 2012. Study on the formation and evolution of “6.3” damage wind [J]. *Plateau Meteorology*,31(2):504–514 (in Chinese)
- 吴海英,曾明剑,蒋义芳,等.2021.一次雹暴过程中对流系统演变特征的模拟分析[J].*高原气象*,40(3):569–579. Wu H Y, Zeng M J, Jiang Y F, et al. 2021. Simulation analysis of evolution characteristics of the convective system [J]. *Plateau Meteorology*,40(3):569–579 (in Chinese). doi: 10.7522/j.issn.1000–0534.2020.00016
- 吴蓁,俞小鼎,席世平,等.2011.基于配料法的“08.06.03”河南强对流天气分析和短时预报[J].*气象*,37(1):48–58. Wu Z, Yu X D, Xi S P, et al. 2011. Analysis of the 3 June 2008 Henan severe convection event with ingredients based method [J]. *Meteorological monthly*,37(1):48–58 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2011.1.006
- 武威,牛淑贞.2017.2015年河南两次东北冷涡型强对流天气对比分析[J].*暴雨灾害*,36(5):397–409. Wu W, Niu S Z. 2017. Comparative analysis on two severe convective weather events associated with northeast cold vortex in Henan in 2015 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,36(5):397–409 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004–9045.2017.05.002
- 易笑园,李泽椿,李云,等.2010.长生命史冷涡影响下持续对流性天气的环境条件[J].*气象*,36(1):17–25. Yi X Y, Li Z C, Li Y, et al. 2010. Analysis of environmental conditions of continuous severe convective weather events caused by long life cold vortex [J]. *Meteorological Monthly*,36(1):17–25 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2010.1.003
- 杨吉,郑媛媛,夏文梅,等.2020.东北冷涡影响下江淮地区一次飑线过程的模拟分析[J].*气象*,46(3):357–366. Yang J, Zheng Y Y, Xia W M, et al. 2020. Numerical analysis of a squall line case influenced by north-east cold vortex over Yangtze–Huaihe River Valley [J]. *Meteorological Monthly*,46(3):357–366 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2020.03.007
- 俞小鼎,郑永光.2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].*气象学报*,78(3):391–418. Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,78(3):391–418 (in Chinese). doi: 10.11676/qxxb2020.035
- 张弛,王咏青,沈新勇,等.2019.东北冷涡背景下飑线发展机制的理论分析和数值研究[J].*大气科学*,43(2):361–371. Zhang C, Wang Y Q, Shen X Y, et al. 2019. Theoretical analysis and numerical study on the development mechanism of squall line in the Northeast Cold Vortex [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,43(2):361–371 (in Chinese). doi: 10.3878/j.issn.1006–9895.1806.18101
- 张桂莲,常欣,黄晓璐,等.2018.东北冷涡背景下超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J].*高原气象*,37(5):1364–1374. Zhang G L, Chang X, Huang X L, et al. 2018. The environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell storm under the background of the Northeast Cold Vortex [J]. *Plateau Meteorology*,37(5):1364–1374 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000–0534.2018.00068
- 张立祥,李泽椿.2009.东北冷涡研究概述[J].*气候与环境研究*,14(2):218–228. Zhang L X, Li Z C. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research*,14(2):218–228 (in Chinese)
- 张一平,吴蓁,苏爱芳,等.2013.基于流型识别和物理量要素分析河南强对流天气特征[J].*高原气象*,32(5):1492–1502. Zhang Y P, Wu Z, Su A F, et al. 2013. Analysis on severe convective weather characteristic in Henan based on flow pattern identification and physical elements [J]. *Plateau Meteorology*,32(5):1492–1502 (in Chinese). doi: 10.7522/j.issn.1000–0534.2012.00139
- 郑媛媛,张雪晨,朱红芳,等.2014.东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究[J].*高原气象*,33(1):261–269. Zhu Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al. 2014. Study of squall line genesis with Northeast cold vortex [J]. *Plateau Meteorology*,33(1):261–269 (in Chinese). doi: 10.7522/j.issn.1000–0534.2013.00005
- 朱宇宁,孟智勇,雷蕾,等.2022.中国东北冷涡背景下连续发生的中尺度对流系统的组织演变特征个例分析[J].*北京大学学报(自然科学版)*,58(3):42–433. Zhu Y N, Meng Z Y, Lei L, et al. 2022. A case study on organization features of successive mesoscale convective systems in the environment of Northeast China Cold Vortex [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*,58(3):42–433 (in Chinese). doi: 10.13209/j.0479–8023.2022.033
- Bai L Q, Meng Z Y, Huang Y P, et al. 2019. Convection initiation resulting from the interaction between a quasi-stationary dryline and intersecting gust fronts: a case study [J]. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*,124(5):2379–2396. doi: 10.1175/JAMC–D–19–0081.1

(责任编辑 王银平)