

张晓茹,陈豫英,姚姗姗,等,2022. 贺兰山东麓一次局地强对流暴雨的中尺度特征[J]. 气象,48(7):801-812. Zhang X R, Chen Y Y, Yao S S, et al, 2022. Mesoscale characteristics of a local severe convective rainstorm at the eastern foot of Helan Mountains [J]. Meteor Mon, 48(7):801-812(in Chinese).

## 贺兰山东麓一次局地强对流暴雨的中尺度特征<sup>\*</sup>

张晓茹<sup>1,2,3</sup> 陈豫英<sup>1,2,3</sup> 姚姗姗<sup>1,2,3</sup> 苏 洋<sup>1,2,3</sup> 杨 银<sup>1,2,3</sup>

1 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 银川 750002

2 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 银川 750002

3 宁夏回族自治区气象台, 银川 750002

**提 要:** 利用 Himawari-8 卫星、银川 C 波段多普勒雷达、ERA5 逐 1 h 再分析、自动气象站、常规气象探测等多源气象资料, 对 2019 年 8 月贺兰山东麓夜间突发的一次局地短历时强对流暴雨的中尺度特征进行分析。结果表明: 700 hPa 偏南急流于暴雨前 6 h 建立并在夜间增强北抬, 促进了低层高温高湿、大气不稳定和动力、热力抬升机制的发展加强, 有利于地面中尺度辐合线在东麓山前触发  $\beta$  中尺度对流系统, 并使其增强为  $\alpha$  中尺度对流系统, 导致此次强对流暴雨的发生发展; 暴雨区位于 700 hPa 急流轴左前方及 700 hPa 水汽通量  $\geq 6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  和 850 hPa 比湿  $\geq 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  的高湿区, 对流有效位能  $\geq 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 850 hPa 假相当位温  $\geq 346 \text{ K}$  的高温高能区, 800 hPa 中心强度  $\leq -1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的上升运动区和冷云发展前端辐射亮温梯度大值区; 最大小时降水量出现在急流轴离暴雨区最近时段, 期间辐射亮温  $\leq -66^\circ\text{C}$ 、辐射亮温梯度  $\geq 27^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 、回波强度  $\geq 65 \text{ dBz}$ 、回波顶高  $\geq 10 \text{ km}$ 、垂直累积液态水含量  $\geq 11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $\leq -52^\circ\text{C}$  冷云面积约为中尺度对流复合体的 1/5; 辐射亮温越低、辐射亮温梯度越大、降温率越高, 小时降水量越大; 最低辐射亮温、最大辐射亮温梯度、回波强度和垂直累积液态水含量跃增、回波顶高增幅加大均较强降水提前 10~20 min 出现, 地面中尺度辐合线较降水提前 30 min 出现。

**关键词:** 对流性暴雨, 中尺度对流系统, 辐射亮温梯度, 低空急流

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.101201

## Mesoscale Characteristics of a Local Severe Convective Rainstorm at the Eastern Foot of Helan Mountains

ZHANG Xiaoru<sup>1,2,3</sup> CHEN Yuying<sup>1,2,3</sup> YAO Shanshan<sup>1,2,3</sup> SU Yang<sup>1,2,3</sup> YANG Yin<sup>1,2,3</sup>

1 Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk  
Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002

2 Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Yinchuan 750002

3 Ningxia Hui Autonomous Region Meteorological Observatory, Yinchuan 750002

**Abstract:** The mesoscale characteristics of a local short-time severe convective rainstorm that occurred at the eastern foot of Helan Mountains in Ningxia in August 2019 are analyzed based on the data from Himawari-8 satellite, C-band Doppler radar, ERA5 hourly reanalysis, automatic weather station and conventional observation data. The results show that the southerly jet at 700 hPa, which was formed 6 h before the rainstorm and strengthened at night, contributed to the high temperature, the high humidity, the enhancement of atmospheric instability and the dynamic and thermal uplift mechanisms in the lower layers of

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(41965001)、宁夏回族自治区科技创新领军人才培养工程(2021GKLRLX05)、宁夏回族自治区第五批青年科技人才托举工程(NXKJTG2021089)和宁夏回族自治区自然科学基金项目(2019AAC03256)共同资助

2021 年 1 月 30 日收稿; 2021 年 7 月 10 日收修定稿

第一作者: 张晓茹, 主要从事短时天气预报和灾害性天气监测预警研究. E-mail: 1359194111@qq.com

通讯作者: 陈豫英, 主要从事暴雨机理及灾害性天气预报方法研究. E-mail: chenyy@sina.com

the rainstorm area. It also helped mesoscale ground convergence line to trigger the meso- $\beta$  scale convective system in the eastern slope of Helan Mountains and strengthen it into meso- $\alpha$  scale convective system, leading to the generation and development of the severe convective rainstorm eventually. The rainstorm occurred in the front-left of jet axis at 700 hPa, the high humidity area with water vapor flux  $\geq 6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  at 700 hPa and specific humidity  $\geq 12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  at 850 hPa, the high energy area with convective available potential energy (CAPE)  $\geq 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , the high temperature area with  $\theta_{se} \geq 346 \text{ K}$  at 850 hPa, the vertical upwarding area with central intensity  $\leq -1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  at 800 hPa, and the front of cold cloud where the large gradient ( $G$ ) of radiation brightness temperature (TBB) occurred. During the heaviest rainfall period, the jet axis was closest to the rainstorm area, the  $TBB \leq -66^\circ\text{C}$ ,  $G \geq 27^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ , the radar echo intensity ( $Z$ )  $\geq 65 \text{ dBz}$ , the echo heights ( $H$ )  $\geq 10 \text{ km}$ , the vertical integrated liquid water (VIL)  $\geq 11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ , and the area of the cold cloud below  $-52^\circ\text{C}$  was about 1/5 of mesoscale convective complex. The lower the TBB, the large the  $G$ , the higher the cooling rate and the more the hourly precipitation. The minimum TBB, the maximum  $G$ , the leap of  $Z$  and VIL, and the increase of echo height appeared 10–20 min earlier than the maximum rainfall, and the mesoscale ground convergence line appeared 30 min earlier than the rainfall.

**Key words:** convective rainstorm, mesoscale convective system, radiation TBB gradient, low-level jet

## 引 言

贺兰山东麓地处西北内陆干旱区,位于宁夏中北部,境内自西向东由贺兰山(海拔高度为 2000~3000 m,最高峰为 3566 m)、东坡山洪沟(海拔高度为 1122~1500 m)和银川平原(海拔高度为 1102~1122 m)构成。受地形、下垫面和气候背景的综合影响,该地区容易发生历时短、强度大、局地性强的对流性暴雨,而引发短历时暴雨的天气尺度小、移速快,常规气象探测很难对其捕捉,使得现行业务预报模式经常出现漏报。因此,日常业务主要依靠区域自动气象站(以下简称自动站)、卫星云图及雷达等非常规高分辨率观测资料进行短历时暴雨的监测预警。

国内外众多学者基于非常规高分辨率观测资料对短历时暴雨中尺度对流系统进行了研究,得到了很多具有实际业务应用价值的成果。例如,丁仁海和周后福(2010)利用安徽自动站加密观测资料研究发现,地形作用形成的风场辐合会影响强降水的形成和发展,山区风场在强降水发生前有明显变化,且其变化与强降水的开始和增强具有一定时间对应关系;赵玉春和崔春光(2010)、王宝鉴等(2017)利用雷达图像识别出暴雨中尺度对流系统(MCS)可分为线状和非线状,前者具有明显的组织结构形态,后者则一般为混合性降水回波或无组织结构的单体嵌套在层状降水回波中;石定朴等(1996)、王清平等

(2016)、赵庆云等(2017)、陈传雷等(2018)、鲁亚斌等(2018)和徐姝等(2019)利用卫星资料研究发现,对流云带中向前传播的  $\beta$  中尺度的 MCS 或后向传播-准静止-涡旋状的 MCS 是强对流暴雨的主要引发原因,辐射亮温(TBB)等值线疏密所反映的辐射亮温梯度( $G$ )对 MCS 的发展有很好的指示意义,一般发展中的 MCS 的云体边缘 TBB 等值线密集,且  $TBB \leq -52^\circ\text{C}$  的冷云区范围与暴雨对应较好,强降水易发生在 MCS 移动方前沿 TBB 低值中心偏向温度梯度大值区一侧,雨强变化与 TBB 及其梯度变化密切相关,一般 TBB 越低、 $G$  越大,降水量越大;触发强对流的中尺度系统包括边界层辐合线、中尺度地形和中尺度重力波等,其中最重要的为边界层中尺度辐合线,在雷达上呈现为晴空窄带回波,在可见光云图上有时表现为明显的积云线(丁仁海和周后福,2010;俞小鼎,2012)。

Himawari-8(以下简称 H8)是第三代静止气象卫星,其搭载的先进葵花成像仪(advanced Himawari imager, AHI)具有高时空分辨率的特点,能够在 10 min 内完成全盘扫描,红外通道空间分辨率可达 2 km,在监测暴雨对流云团方面具有明显的持续性和时间分辨率优势,可以较 FY-2 卫星平均提前 23 min 发现对流云团,较雷达平均提前 33 min (Rinaldy et al, 2017; Honda et al, 2018; 张夕迪和孙军, 2018),可提前预判夏季初生对流的发生,进一步提高暴雨的临近预报准确率(郭巍等, 2018)。目前基于卫星资料开展的旱区暴雨研究多集中于

TRMM 卫星和风云系列卫星,而 H8 卫星资料对旱区暴雨的指示作用还有待研究。

2019 年 8 月 2 日夜間,贺兰山东麓出现了一次年内最强的局地短历时强对流暴雨,但业务数值模式漏报了这次过程。本文利用区域自动站逐 5 min、逐 10 min 和逐 1 h 地面加密观测、H8 卫星、银川 C 波段多普勒雷达、ERA5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  逐 1 h 再分析、常规气象探测等多源气象资料,对此次局地强对流暴雨过程的中尺度特征进行分析,以提高对于旱区的短历时强对流暴雨中尺度对流系统的认识,探索这种突发性、局地性很强的对流暴雨的可预报性。

## 1 资料与方法

本文所用资料包括:(1)H8 静止卫星 R21 和 B13 通道数据(中心波长为  $10.4 \mu\text{m}$ ),其时空分辨为  $2 \text{ km} \cdot (10 \text{ min})^{-1}$ ;(2)欧洲中期数值预报中心(ECMWF)提供的空间分辨率为  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、间隔 1 h 的 ERA5 再分析资料;(3)国家气象信息中心

下发的常规观测和探空资料;(4)宁夏气象信息中心提供的逐 5 min、10 min 和 1 h 自动气象站、逐 6 min 银川 C 波段多普勒雷达、逐毫秒雷电等高分辨率观测资料。文中所用时间均为北京时。

其中,H8 的 R21 通道数据和银川 C 波段多普勒雷达资料用于分析 MCS 的触发和发展;H8 的 B13 通道数据和逐 10 min 自动站降水数据用于研究降水期间强对流云团物理量特征,分析中以  $-45^{\circ}\text{C}$  为 TBB 阈值,对降水期间主要降水站点对应的强对流云团进行提取,并对 TBB、G 和降温率(CR)等云团特征参数进行计算,计算方法详见徐双柱等(2011)、张春龙等(2012);ERA5 再分析、常规气象探测和自动站资料用于研究触发 MCS 的环境场特征;自动站降水数据和雷电资料用于降水实况分析。

## 2 降水实况

2019 年 8 月 2 日 19:20—23:00,靠近贺兰山东坡山前突发局地短历时强对流暴雨天气。如图 1a 和

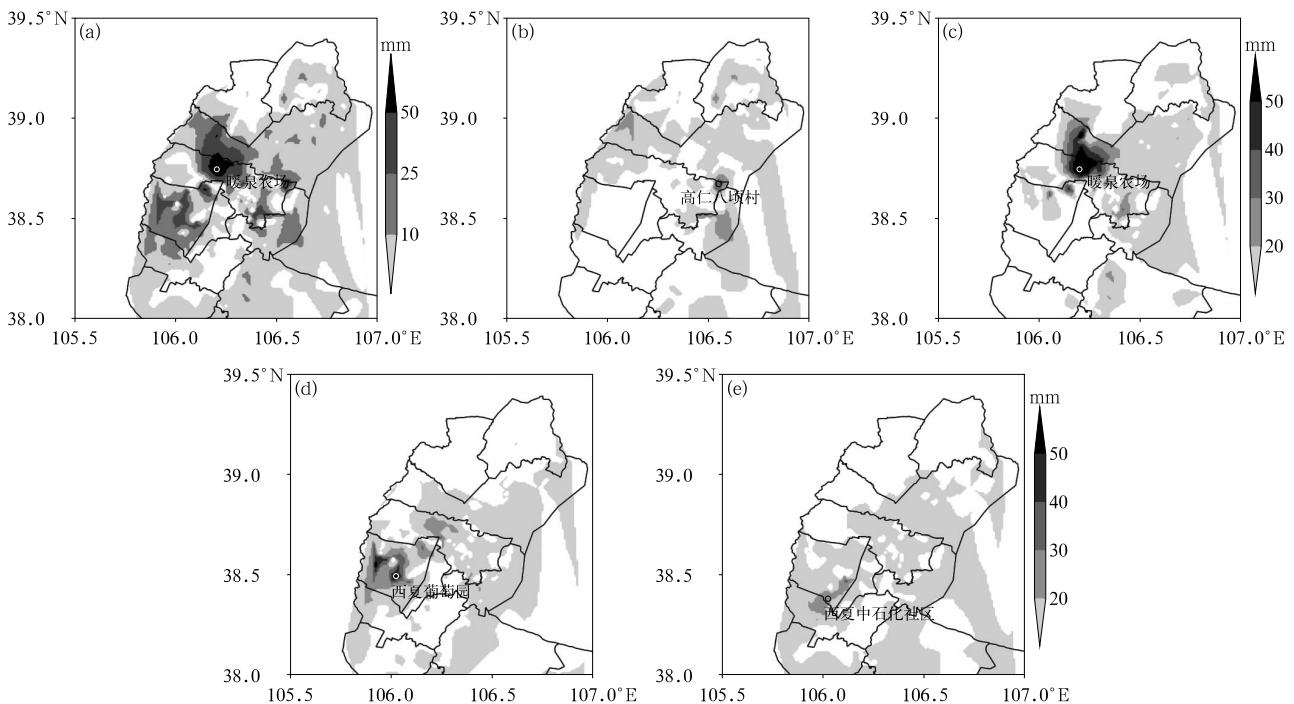


图 1 2019 年 8 月 2 日(a)19:00—23:00、(b)19:00—20:00、(c)20:00—21:00、  
(d)21:00—22:00、(e)22:00—23:00 贺兰山东麓暴雨过程降水量  
(空心圆表示暴雨中心或强降水中心)

Fig. 1 Accumulated rainfall during the rainstorm at the eastern foot of Helan Mountains on 2 August 2019

(a) 19:00 BT to 23:00 BT, (b) 19:00 BT to 20:00 BT, (c) 20:00 BT to 21:00 BT,  
(d) 21:00 BT to 22:00 BT, (e) 22:00 BT to 23:00 BT

(Hollow circles indicate the centers of the rainstorm or strongest hourly rainfall)

表 1 2019 年 8 月 2 日贺兰山东麓暴雨过程相关信息统计

Table 1 Statistics of the rainstorm at the eastern foot of Helan Mountains on 2 August 2019

降水时段/BT	过程降水量 ≥50 mm 测站	小时降水量 ≥20 mm 测站	过程最大 降水量(地点)	最大小时降水 量,发生时段	雷电频数, 发生时段	最大雷电强度, 发生时段
19:20—23:00	6 个	34 个	70.1 mm (暖泉农场)	53.9 mm, 20:00—21:00	60 次, 18:40—22:30	168.6 kA, 19:00—20:00

表 1 所示,该过程历时不足 4 h,降水最强时段在 20:00—21:00,落区集中面积不足 160 km<sup>2</sup>,过程累计雨量超过 50 mm 有 6 个站,最大小时降水量超过 20 mm 的有 34 个站,超过 50 mm 的有 3 个站;最大过程降水量和小时降水量均出现在暖泉农场,分别为 70.1 mm 和 53.9 mm(20:00—21:00),降水效率(1 h 降水量与过程累计降水量之比)高达 76.9%,该站最大 10 min 降水量为 16.8 mm(20:30—20:40);18:40—22:30 暴雨区还出现了 60 次雷电,最强在 19:00—20:00,达 168.6 kA,雷电和强雷电出现时间均较强降水提前约 1 h。由此可见,此次暴雨过程具有历时短、强度大、局地性强、夜发性明显等强对流天气特征。此外,分析强降水期间逐小时降水量落区变化(图 1b~1e)可知,强降水中心先西行,再沿贺兰山东麓山前南下,强降水区集中在银川平原,暴雨中心暖泉农场的海拔高度为 1105 m,距离贺兰山约有 11.2 km。

### 3 触发中尺度对流系统的环境场特征

研究表明,水汽、大气不稳定和抬升触发机制是此类强对流天气产生的基本条件(Parker and Johnson, 2000; 俞小鼎等, 2012; 陈豫英等, 2021),此外,来自热带地区的暖湿水汽输送带也是北方地区产生强暴雨的必要条件,暖而湿的低空急流不仅能为西北地区暴雨提供充足的水汽,也有利于暴雨区大气不稳定与上升运动的增强,从而为暴雨的发生发展创造有利的环境场条件(陶诗言, 1980; 钱正安等, 2018; Chen et al, 2021)。以下围绕低空急流的演变着重分析暴雨区的环境场特征。

#### 3.1 水汽输送

暴雨发生前 22 h,即 8 月 1 日 21:00,700 hPa 和 850 hPa 上来自台风韦伯外围南海和西太平洋副热带高压(以下简称副高)西南侧东海的偏东暖湿气流在四川盆地汇聚后北上,将水汽输送至暴雨区;随着台风在海南登陆北上,2 日 13:00,在 700 hPa 上

甘肃和四川的交界处建立了中心强度为 12 m·s<sup>-1</sup> 的偏南急流;暴雨时段,即 2 日 19:00—23:00,850 hPa 上的东海水汽输送通道与 700 hPa 趋于重合,水汽通量增大、水汽辐合增强(图 2a, 2b),随着 700 hPa 急流不断增强北抬至宁夏中部,中心强度达 14 m·s<sup>-1</sup>,急流将东海和南海的水汽源源不断送到暴雨区,暴雨区水汽通量增加至 6 g·cm<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>·hPa<sup>-1</sup>(图 2c),850 hPa 急流较 700 hPa 偏北(图 2d),暴雨区位于 700 hPa 急流轴左前方。强降水期间,湿层增厚、湿度增大,相对湿度≥70%的高湿区向上扩展至 600 hPa 附近,比湿≥10 g·kg<sup>-1</sup>的湿层延伸至 700 hPa,850 hPa 比湿≥12 g·kg<sup>-1</sup>(图 2e)。

#### 3.2 大气不稳定

暴雨中心位于银川探空站(海拔高度为 1106 m)的西侧,且在强降水期间,对流层低层盛行东南气流。因此,利用 ERA5 再分析资料分析过程前后暴雨中心假相当位温( $\theta_{se}$ ),并利用银川探空资料对比分析暴雨前后对流有效位能(CAPE)、对流抑制能量(CIN)、K 指数、沙氏指数(SI)、抬升指数(LI)和 0~6 km 垂直风切变( $W_{sr}$ )等对流参数,从而诊断环境大气的稳定性。

结合暴雨中心温湿物理量的时空剖面 and 银川站探空资料分析可知,2 日 11:00—15:00,随着低空偏南急流的建立,在 500~850 hPa 上,风随高度顺转逐渐明显(图 3a),对流层中低层暖平流增强,配合 600~800 hPa 上  $\theta_{se}$  等值线梯度增加(图 3a),同时,600~400 hPa 存在明显的干层(图 2e),对流层中低层形成“上干冷、下暖湿”的垂直分布,环境大气处于不稳定状态;2 日 16:00—18:00,受 500 hPa 低涡东北移动影响,500~400 hPa 由偏南风转为偏北、偏东风(图 3a),冷空气入侵,进一步加剧了大气不稳定的发展;2 日 19:00—23:00(暴雨过程中),低空急流加强北上,配合  $\theta_{se}$  在低层(800~650 hPa)水平方向上形成梯度区(图 3a)。同时,暴雨过程中,暴雨区的 CAPE、SI、LI 等对流参数增加了近 5 倍, CIN

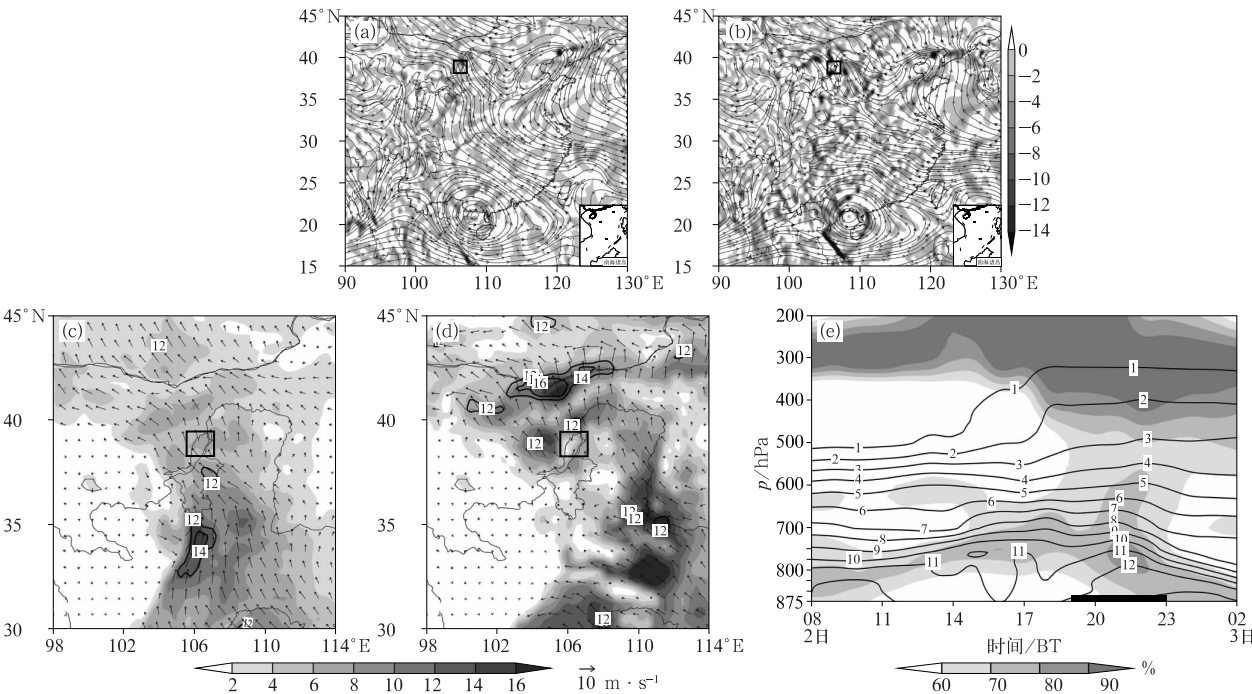


图 2 2019 年 8 月 2 日 19:00(a)700 hPa 和(b)850 hPa 的水汽通量辐合(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )和流场(流线),23:00(c)700 hPa 和(d)850 hPa 的水汽通量(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ )和流场(风矢;黑线分别表示风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流);(e)2 日 08:00 至 3 日 02:00 沿暴雨中心的相对湿度 $\geq 60\%$ (阴影)和比湿(黑线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的时空剖面(图 2a~2d 中黑色方框为暴雨区,图 2e 中 为暴雨时段)

Fig. 2 (a, b) Distribution of water vapor flux convergence (shadow, unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ) and flow field (streamline) at (a) 700 hPa and (b) 850 hPa at 19:00 BT, (c, d) distribution of water vapor flux (shadow, unit:  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ) and wind field (vector, black lines: wind speed  $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  and  $\geq 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at (c) 700 hPa and (d) 850 hPa at 23:00 BT 2 August 2019, (e) spatio-temporal section of relative humidity  $\geq 60\%$  (shadow) and specific humidity (black line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) along the center of rainstorm from 08:00 BT 2 to 02:00 BT 3 August 2019 (Black rectangles represent rainstorm area in Figs. 2a–2d, indicates rainstorm period in Fig. 2e)

减小了近 6 倍,K 指数从  $37^{\circ}\text{C}$  激增到  $45^{\circ}\text{C}$ 。此外, $W_{\text{sr}}$ 在过程前和过程中均较弱,不足  $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (表 2),有利于短时暴雨的发生(肖递祥等,2017;刁秀广等,2020)。上述物理量和对流参数的变化表明,暴雨区环境大气极其不稳定,有利于对流系统的触发和加强。

3.3 抬升触发机制

在此次暴雨发生前和过程中,虽然 CIN 从  $231 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到  $38.9 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,自由对流高度(LFC)

从 567 hPa 下降到 724 hPa(表 2),但 LFC 仍然较高,低层需要一定强度的上升气流克服 LFC 以下的 CIN,将地面附近气块抬升到 LFC,对流系统才能得以被触发。由暴雨中心的风场和垂直运动随时间演变可知,低空急流建立前(13:00 前),中低层无明显的水平风向辐合,弱天气系统强迫的上升运动弱,垂直速度中心位于 600 hPa 附近,仅为  $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 3a);13:00 后,随着急流的建立和发展,不稳定条件加强,低层持续存在 346 K 以上的  $\theta_{\text{se}}$  高温区(图 3a)、相对湿度 $\geq 60\%$ 的高湿区(图 2e)、CAPE 超

表 2 2019 年 8 月 2 日银川站暴雨发生前和发生时的对流参数对比

Table 2 Comparison of convective parameters at Yinchuan Station before and during the rainstorm on 2 August 2019								
时间/BT	CAPE/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	CIN/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	K/ $^{\circ}\text{C}$	LI/ $^{\circ}\text{C}$	SI/ $^{\circ}\text{C}$	$W_{\text{sr}}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	ZH/m	LFC/hPa
08:00	318.9	231.3	37	-1.2	-1.0	0.6	4863	567
20:00	1569.1	38.9	45	-5.7	-4.5	1.2	4766	724

注:ZH 表示零度层高度。  
Note:ZH represents  $0^{\circ}\text{C}$  level height.

过  $1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  的高能区(表2),这种强烈高温高湿高能的热力抬升条件进一步促使了上升运动增强,但强度达  $-1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的上升速度中心较高,在  $400 \text{ hPa}$  附近(图3a);暴雨过程中(2日19:00—23:00),低空急流加强北上,上升运动中心迅速下降,最强降水时段(20:00—21:00),上升速度中心降至  $800 \text{ hPa}$  附近,强度维持在  $-1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  (图3a)。因此,低空急流的建立和发展为中尺度对流系统的触发和维持提供了有利条件。

王晓芳和崔春光(2011)、俞小鼎(2012)、苏爱芳等(2016)研究表明,中尺度抬升机制是强对流天气被触发的必要条件,尤其是中尺度辐合线,可通过提供带状辐合上升运动,起着胚胎和组织积云对流的作用。从逐5 min地面自动站风场可发现,过程降水开始前30 min,即18:50,银川站北侧出现一条东北风和东南风形成的中尺度辐合线A(图3b黑虚线),该辐合线维持至21:05,期间受地形影响和  $500 \text{ hPa}$  低涡外围气流引导而自北向南缓慢移动且略微西行,于19:25发展最明显,东北风和东南风最强分别达  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,对应强降水开始时刻;19:00—20:00,贺兰山沿山平罗—贺兰段也有一条西北风和东南风形成的中尺度辐合线B(图3b红虚线),该辐合线稳定少动,于19:35发展最明显,西北风和东南风最强分别达  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对应雷达回波可知,两条辐合线附近均有对流系统存在(图4a,4b),表明中尺度辐合线的存在和维持也为该过程对流系统的触发、组织和维持提供了有利条件,这和樊利强等(2009)的研究结果相似。

## 4 中尺度对流系统特征

此次暴雨过程从开始到结束持续不足4 h,突发性、局地性和夜发性特征显著,具有 $\beta$ 中尺度活动特征。为此,利用2019年8月2日19:00—23:00的H8卫星和银川C波段多普勒雷达资料,着重对暴雨中尺度对流系统的触发(19:00—20:00)、发展(20:00—21:00)和过程期间(19:00—23:00)云团特征参数进行深入分析。

### 4.1 中尺度对流系统的触发

从H8红外云图演变(图略)分析可知,8月1日08:00,青藏高原就有斜压叶状云系生成,并于20:00发展为低涡云系,对应  $500 \text{ hPa}$  低涡;受东部

副高阻挡,该低涡沿副高外围  $584 \text{ dagpm}$  线西北侧缓慢东北向移动,于2日08:00进入宁夏南部从而逐渐影响宁夏;13:00,低涡云系头部覆盖宁夏北部地区,但云体并不稠密;19:00,配合  $500 \text{ hPa}$  低涡发展、 $700 \text{ hPa}$  急流增强北抬和地面中尺度辐合线生成,云系发展增强,低涡云系头部不断有独立的对流云团于降水区上空生成,初始对流云团M1位置偏东,位于银川平原东侧,面积较小,云顶较低(图5a红圈所示);至19:30,M1受低涡外围偏东气流引导略西移并不断发展,  $\leq -45^\circ\text{C}$  的冷云面积约为  $40 \text{ km}^2$ ,平均辐射亮温( $\text{TBB}_{\text{avg}}$ )约为  $-46^\circ\text{C}$ ,最低辐射亮温( $\text{TBB}_{\text{min}}$ )为  $-52^\circ\text{C}$ ,为引起该过程降水的初始 $\beta$ 中尺度的MCS(图5b),其于10 min(19:20—19:30)内造成平罗县高仁乡八顷村的强降水( $21.2 \text{ mm}$ );19:40,M1的 $\text{TBB}_{\text{min}}$ 已迅速降至  $-62^\circ\text{C}$ ,  $\leq -45^\circ\text{C}$  的冷云面积已增长至上一时次的3倍大小(图5c),同时,受  $500 \text{ hPa}$  低涡后部南下冷空气、东南低空急流及地面辐合线的共同影响,贺兰山沿山平罗段又有小对流云团M2(图5c红框所示)发展;20:00,各独立对流云团已迅速合并发展为一个椭圆形的、 $\text{TBB}_{\text{avg}}$  约为  $-52^\circ\text{C}$ 、 $\text{TBB}_{\text{min}}$  为  $-62^\circ\text{C}$ 、水平范围达 $\alpha$ 中尺度的MCS(图5d),为造成此次局地暴雨过程的主要对流系统。

对应分析雷达(离地  $1180 \text{ m}$ )组合反射率和地面辐合线演变(图3b)可知,19:01,银川站北侧的辐合线A南侧有两个对流单体C1和C2,最大回波强度均超过  $60 \text{ dBz}$ ,且其前侧有一条由冷池出流生成的阵风锋,贺兰山沿山平罗—贺兰段的辐合线B附近有对流单体C3,最大回波强度约为  $50 \text{ dBz}$ (图4a);随后,辐合线A北侧有单体C4于19:20生成,并受东北风引导西南向发展移动,于19:35发展最强( $50 \text{ dBz}$ ),在此期间,单体C1和阵风锋受东南风引导也缓慢西行,C1超过  $50 \text{ dBz}$  的强回波范围发展扩大(图4b),对应区域10 min(19:20—19:30)出现  $21.2 \text{ mm}$  的强降水;19:47—20:04,分散的强对流回波单体C1、C3和C4已于辐合线附近合并成一条多个强度中心为  $55 \text{ dBz}$ 、西北—东南向狭长的强回波带(图4c,4d),对应实况,此时强降水中心西移(图1b,1c)。此外,  $2.4^\circ$  仰角的径向速度图上自19:01起均可观察到低层东南风明显增大(图4e),19:35出现明显的速度模糊,去模糊后东南风速为  $20 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图4f);19:47—20:04径向速度图可看到清楚的“牛眼”结构(图4g,4h),其维持高度



在 1.4~2.0 km, 最大速度超过  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 表明低层存在一定的垂直风切变, 且低空急流已增强明显,

该急流对水汽及能量的输送和动力抬升十分重要。

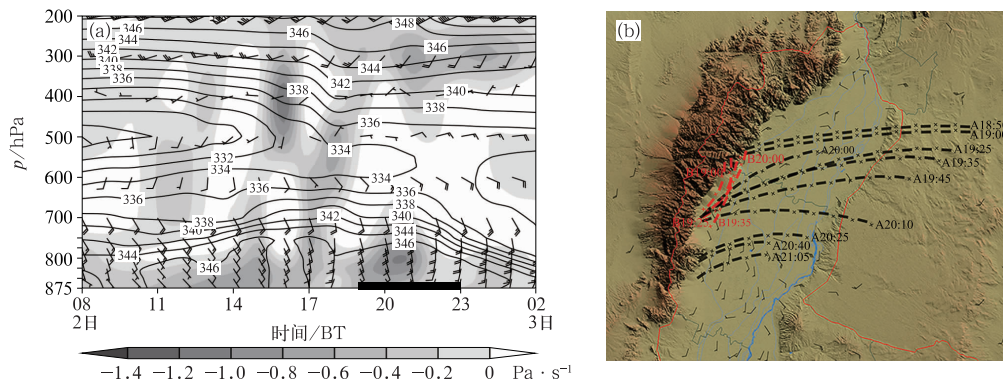


图 3 2019 年 8 月 (a) 2 日 08:00 至 3 日 02:00 暴雨中心(暖泉农场)假相当位温(黑线, 单位: K)、上升速度(阴影)和风场(风羽)的时空剖面, (b) 2 日 18:50—21:05 地面辐合线演变和 19:25 自动站风场(风羽)  
(图 3a 中 为暴雨时段, 图 3b 中  $\times-\times$  和  $\times-\times$  为地面辐合线)

Fig. 3 (a) Spatial-temporal section of  $\theta_{se}$  (black line, unit: K), updraft (shadow) and wind field (barb) along the center of rainstorm (Nuanquan Farm) from 08:00 BT 2 to 02:00 BT 3 August 2019, (b) evolution of the ground convergence line from 18:50 BT 2 to 21:05 BT 2, and the wind field (barb) of automatic weather stations at 19:25 BT 2 August 2019  
( indicates rainstorm period in Fig. 3a,  $\times-\times$  and  $\times-\times$  indicate ground convergence lines in Fig. 3b)

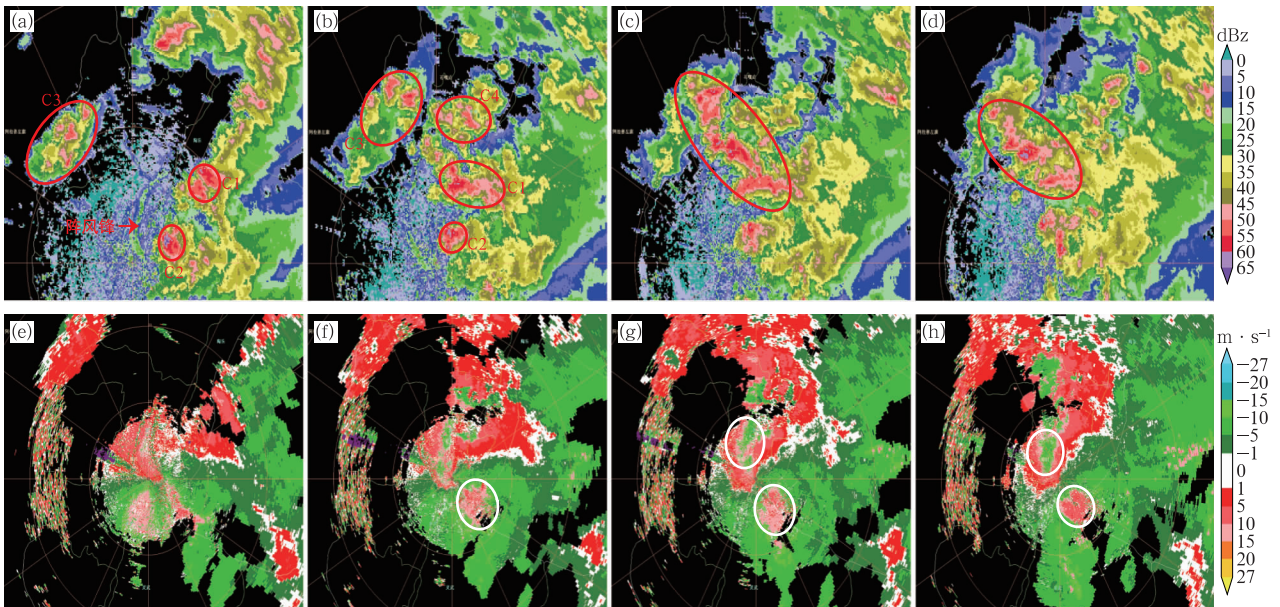


图 4 2019 年 8 月 2 日 (a,e) 19:01、(b,f) 19:35、(c,g) 19:47 和 (d,h) 20:04 的

(a~d) 雷达组合反射率和 (e~h) 雷达  $2.4^\circ$  仰角径向速度场

(图 4a~4d 中红色圆圈代表对流单体或回波带, C1~C4 为单体编号; 图 4f~4h 中白色圆圈代表大风速中心)

Fig. 4 (a—d) Radar composite reflectivity, and (e—h) radial velocity at  $2.4^\circ$  elevation at (a, e) 19:01 BT, (b, f) 19:35 BT, (c, g) 19:47 BT, (d, h) 20:04 BT 2 August 2019

(Red circles in Figs. 4a—4d represent convective cells or echo bands, C1—C4 are cell numbers; white circles in Figs. 4f—4h represent centers of strong wind speed)

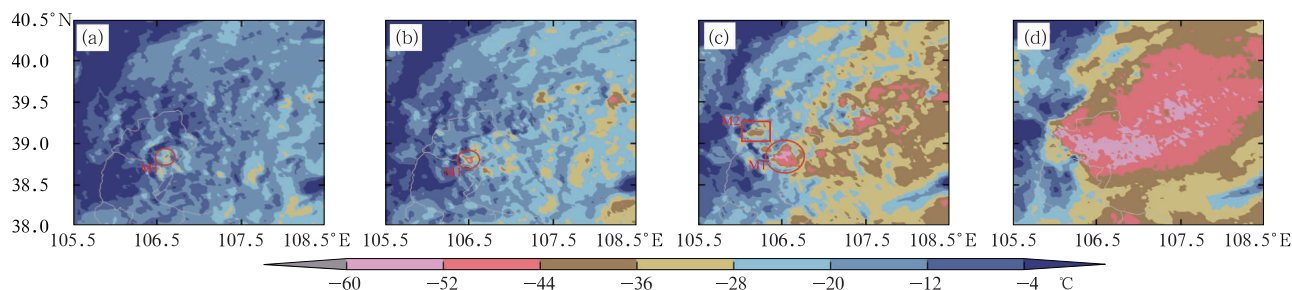


图 5 2019 年 8 月 2 日 (a) 19:00、(b) 19:30、(c) 19:40 和 (d) 20:00 H8 TBB 演变

(红色圆圈 M1 和红色方框 M2 均代表对流云团)

Fig. 5 Evolution of H8 TBB at (a) 19:00 BT, (b) 19:30 BT,

(c) 19:40 BT, and (d) 20:00 BT 2 August 2019

(Red circles M1 and red rectangle M2 represent convective cloud clusters)

## 4.2 对流系统的发展

20:00 后,对流云系始终处于 500 hPa 低涡北侧,受低涡外围偏东气流引导,在  $\alpha$  中尺度 MCS 的上风方,即其后部东北侧不断有对流云团并入,使得云系自身形态和结构不断组织化发展增强,冷云面积不断增加,TBB 也迅速下降,同时,配合偏东气流及贺兰山地形抬升,冷云前端西南侧也不断有对流单体生成并入(图 6a, 6b),使得 MCS 强中心始终沿着贺兰山东麓地形南扩(图 6c, 6d)。MCS 于 20:10—20:40 发展极为强烈,此期间云团更为密实,云顶高度更高,TBB 更低,可见光图上可看到明显的上冲云顶(图略),对应 200 hPa 辐散,850 hPa 辐合,说明此时 MCS 位于天气尺度上升气流区的环境下。对流发展最旺盛的时刻为 20:30—20:40(图 6c),此时  $TBB \leq -45^{\circ}\text{C}$  的面积增加至

$1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,  $TBB \leq -52^{\circ}\text{C}$  的面积增加至  $0.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,但仍小于 Maddox(1980)定义的中尺度对流复合体(MCC)的冷云面积( $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ),约为其 1/5,因此,捕捉和预报这种尺度的天气现象无疑十分困难,但云团特征对其仍有一定反映——冷云中心值迅速降至  $-66^{\circ}\text{C}$ ,冷云发展前端 TBB 等值线密集,  $G$  最大为  $27^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ ,此后 10 min 内最大  $G$  前端出现 16.8 mm 的强降水,落区为暴雨中心暖泉农场,鲁亚斌等(2018)、杨磊等(2020)的研究也可对其印证,MCS 移动前沿的对流旺盛区与短时强降水区域对应较好,强对流暴雨易发生在 TBB 等值线密集区梯度最大处。此期间,低空急流的维持(图略)一方面为降水提供了充沛的水汽,另一方面低层暖湿气流的输送也能维持一定的对流有效位能,从而为促进 MCS 的发展提供了保证。赵娴婷等(2020)也指出,强对流的发展维持与低空急流密切相关。

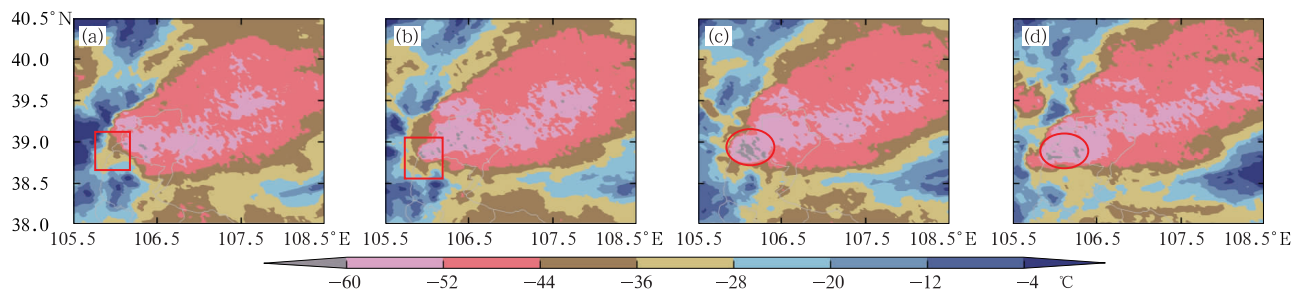


图 6 2019 年 8 月 2 日 (a) 20:10、(b) 20:30、(c) 20:40 和 (d) 21:00 H8 TBB 演变

(图 6a, 6b 中红色方框代表冷云发展处,图 6c, 6d 中红色圆圈代表 MCS 强中心)

Fig. 6 Evolution of H8 TBB at (a) 20:10 BT, (b) 20:30 BT, (c) 20:40 BT, (d) 21:00 BT 2 August 2019

(Red rectangles in Figs. 6a and 6b represent the development area of cold cloud,

red circles in Figs. 6c and 6d represent the severe centers of MCS)



对应的雷达回波和地面辐合线演变(图 3b)显示,受地面辐合线 A 南压和地形影响,强回波带西段不断沿贺兰山东麓向南移动并发展增强。20:26 单体 C2 也并入回波带中(图 7a),强回波整体组织化发展,并呈现涡旋状旋转,于 20:38 达最强(图 7b),此期间对流发展最旺盛,回波带西段移动速度明显较快,伴有大范围 50 dBz 以上的强回波区,最大反射率因子超过 65 dBz,垂直累积液态水含量(VIL)在  $11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$  以上(图 7e),回波顶高超过 10 km(图 7d),强回波的位置和强度均和云图上出现的  $TBB_{\min} \leq -66^\circ\text{C}$  的对流旺盛区对应较好。对 20:38 的强回波如图 7b 黑色实线所示方向做垂直剖面(图 7c),回波带上依次排列着 3 个强度  $\geq 55 \text{ dBz}$  的强回波中心,且 55 dBz 强回波的高度基本在  $0^\circ\text{C}$  以下或附近(20:00 的零度层高度为 4.8 km,表 2),使得降水效率较高,这也是造成该过程 20:00—21:00

小时降水量达 53.9 mm 的原因之一。此外,19:45—20:50 暴雨中心逐 5 min 的降水量与回波强度、回波顶高及 VIL 随时间演变趋势(图 7f)显示,强降水开始(20:25)前,回波顶高始终保持增加趋势,但其增幅在强降水开始前 20 min 明显加大(20:04—20:09 回波高度升高 4.2 km),此时,回波强度和 VIL 也出现跃升现象(20:04—20:09 回波强度和 VIL 分别增加 31 dBz 和  $19.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ),此后逐渐减小,表明回波强度和 VIL 的跃升、回波顶高的持续升高均对强降水的出现有较好的指示作用。

#### 4.3 对流云团特征参数

徐双柱等(2011)、张春龙等(2012)研究指出, TBB、G 和 CR 等云团特征参数能反映对流云团发展程度及对流活跃强度,一般 TBB 越低、G 和 CR 越大,表明云顶伸展越高,云体纹理越丰富、对流发

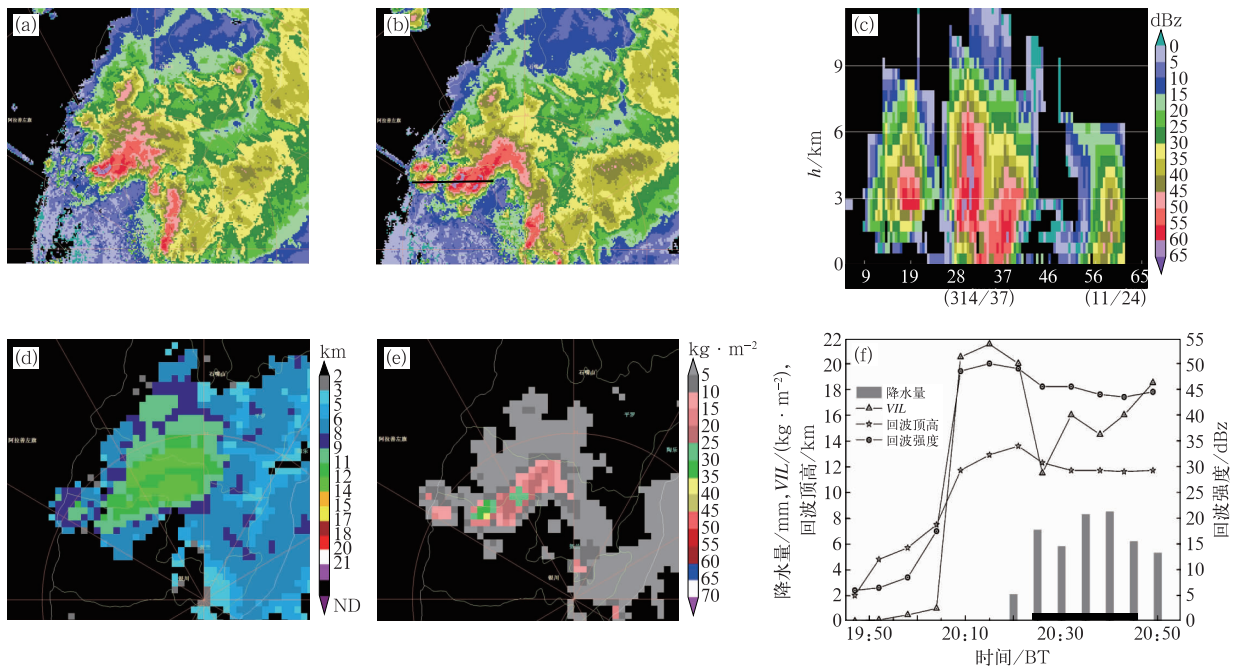


图 7 2019 年 8 月 2 日(a)20:26 和(b)20:38 雷达组合反射率,(c)20:38 的回波垂直剖面,  
(d)回波顶高和(e)VIL;(f)19:45—20:50 暴雨中心(暖泉农场)

逐 5 min 降水量、回波强度、回波顶高及 VIL 随时间演变

(图 7b 中黑线为图 7c 剖面位置, ■ 为强降水时段)

Fig. 7 Radar composite reflectivity at (a) 20:26 BT and (b) 20:38 BT 2 August, (c) radar vertical profile,

(d) radar echo tops and (e) vertical integrated liquid water at

20:38 BT 2 August, (f) evolution of 5 min rainfall, radar echo intensity, radar echo heights

and vertical integrated liquid water at the center of rainstorm

(Nuanquan Farm) from 19:45 BT to 20:50 BT 2 August 2019

(Black line in Fig. 7b is the profile position for Fig. 7c, ■ indicates strongest rainfall period)

展越旺盛。因此,利用 H8 的 B13 通道数据对 19:00—23:00 每小时最大降水量站点对应的强对流云团特

征参数进行计算(表 3),进而结合逐 10 min 降水资料来揭示云团特征参数对暴雨的指示作用。

表 3 2019 年 8 月 2 日暴雨过程中逐小时最大降水量站点对应云团特征参数统计  
Table 3 Statistics of cloud characteristic parameters at the stations with the maximum hourly rainfall during the rainstorm on 2 August 2019

时间/BT	站点	小时降水量/mm	$TBB_{avg}/^{\circ}C$	$TBB_{min}/^{\circ}C$	$G/(^{\circ}C \cdot km^{-1})$	$CR/(^{\circ}C \cdot h^{-1})$
19:00—20:00	平罗高仁八顷村	43.1	-53	-63	24	18
20:00—21:00	贺兰暖泉农场	53.9	-53	-66	27	24
21:00—22:00	西夏葡萄园	44.6	-52	-62	27	18
22:00—23:00	西夏中石化社区	25.9	-49	-54	14	6
平均值	—	41.9	-52	-61	23	16

如表 3 所示,当小时降水量介于 20~30 mm 时, $TBB_{avg}$  和  $TBB_{min}$  分别为  $-49^{\circ}C$  和  $-54^{\circ}C$ ,  $G$  最大为  $14^{\circ}C \cdot km^{-1}$ ,  $CR$  为  $6^{\circ}C \cdot h^{-1}$ ;当小时降水量介于 40~50 mm 时, $TBB_{avg}$  和  $TBB_{min}$  分别约为  $-53^{\circ}C$  和  $-62^{\circ}C$ ,  $G$  最大约为  $27^{\circ}C \cdot km^{-1}$ ,  $CR$  为  $18^{\circ}C \cdot h^{-1}$ ;当小时降水量大于 50 mm 时, $TBB_{avg}$  和  $TBB_{min}$  分别为  $-53^{\circ}C$  和  $-66^{\circ}C$ ,  $G$  最大为  $27^{\circ}C \cdot km^{-1}$ ,  $CR$  为  $24^{\circ}C \cdot h^{-1}$ 。由此可知,小时降水量的变化与强对

流云团特征参数的变化密切相关, $TBB$  越低,  $G$  越大,  $CR$  越高时,小时降水量越大,且小时降水量的变化幅度明显大于  $TBB$  的变化。此外,利用逐 10 min 资料对 19:00—22:00 的 3 个强降水中心(依次为平罗高仁八顷村、贺兰暖泉农场、西夏葡萄园)做降水量与云团特征参数对应关系分析,对于高仁八顷村(图 8a),最大  $G$  较最强降水提前 10 min 出现,  $TBB_{min}$  出现在最强降水时刻;对于暖泉农场

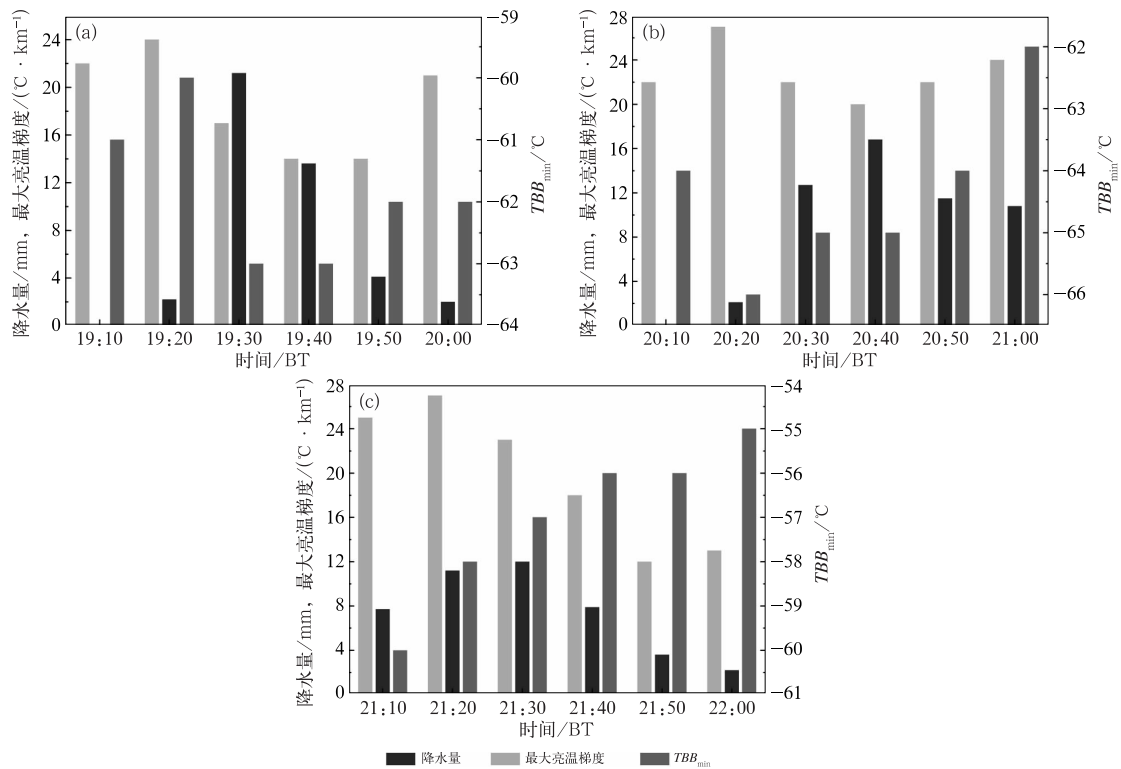


图 8 2019 年 8 月 2 日(a)19:00—20:00、(b)20:00—21:00 和(c)21:00—22:00 最大小时降水量站点的逐 10 min 降水量和云团特征参数对应关系

Fig. 8 Corresponding relationship between 10 min rainfall and cloud characteristic parameters at the stations with the maximum hourly rainfall on 2 August 2019

(a) 19:00 BT to 20:00 BT, (b) 20:00 BT to 21:00 BT, (c) 21:00 BT to 22:00 BT

(图8b),最大 $G$ 和 $TBB_{min}$ 均较最强降水提前20 min出现;对于葡萄园(图8c),最大 $G$ 和 $TBB_{min}$ 较最强降水分别提前10 min和20 min出现,这表明 $TBB_{min}$ 和 $G$ 对强降水的出现也具有明显的指示作用,可作为对流快速发展,降水迅速增强的重要指标。

## 5 结 论

2019年8月2日19:20—23:00,宁夏贺兰山东麓突发年内最强、历时短、强度大、局地性强、夜发性明显的强对流暴雨过程。利用H8卫星、银川C波段多普勒雷达、ERA5  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 逐1 h再分析、地面加密观测、常规气象探测等多源气象资料,对该过程的中尺度特征进行分析,结果表明:

(1)低空急流的建立、发展、加强北上为此暴雨过程提供了有利的环境场条件。来自东海和南海的低空偏东暖湿气流于暴雨前6 h汇合形成低空急流,在暴雨时段增强北抬,促使暴雨区上空水汽、大气不稳定性、动力和热力抬升增强,暴雨区出现在700 hPa急流轴左前方。暴雨期间,700 hPa急流轴距离暴雨区最近,低层持续有中心强度 $\leq -1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动区、346 K以上的 $\theta_{se}$ 高温区、水汽通量 $\geq 6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 和比湿 $\geq 10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高湿区、 $CAPE \geq 1500 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的高能区。

(2) $\beta$ 中尺度的MCS及其组织形成的 $\alpha$ 中尺度的MCS是此次强对流暴雨的直接影响系统。对流发展最旺盛阶段冷云中心 $TBB$ 低至 $-66^\circ\text{C}$ , $G$ 高达 $27^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ ,但低于 $-52^\circ\text{C}$ 的冷云面积约为MCC的1/5。云团特征参数与降水量相关性较好, $TBB$ 越低, $G$ 越大,CR越高,小时降水量越大,且暴雨中心出现在冷云发展前端 $TBB$ 梯度大值区,降水量的变化幅度大于 $TBB$ 的变化。 $TBB_{min}$ 和最大 $G$ 一般较最强降水提前10~20 min出现,可作为对流快速发展,降水迅速增强的重要指标。

(3)降水开始前30 min形成的中尺度地面辐合线为此强对流天气的重要触发机制。辐合线触发生成的对流单体前部因冷池出流又生成阵风锋,两者相互作用,促使回波组织化发展增强。最大小时雨强出现期间,回波中心强度超过65 dBz,回波顶高超过10 km,VIL高于 $11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。回波顶高、强度和VIL对强降水的出现有较好指示作用,强降水出现前20 min,回波强度和VIL跃升、回波顶高

增幅加大。

## 参考文献

- 陈传雷,管兆勇,纪永明,等,2018. 辽宁长历时暴雨中尺度对流系统特征分析[J]. 气象,44(8):1051-1062. Chen C L, Guan Z Y, Ji Y M, et al, 2018. Analysis on mesoscale characteristics convective system of long duration local torrential rain event in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 44(8):1051-1062(in Chinese).
- 陈豫英,苏洋,杨银,等,2021. 贺兰山东麓极端暴雨的中尺度特征[J]. 高原气象,40(1):47-60. Chen Y Y, Su Y, Yang Y, et al, 2021. The mesoscale characteristics of extreme rainstorm in the eastern region of Helan Mountain[J]. Plateau Meteor, 40(1):47-60(in Chinese).
- 丁仁海,周后福,2010. 九华山区下垫面对局地降水的影响分析[J]. 气象,36(3):47-53. Ding R H, Zhou H F, 2010. Influences of underlying surface on local precipitation in Jiuhua Mountains [J]. Meteor Mon, 36(3):47-53(in Chinese).
- 刁秀广,刘畅,万明波,等,2020. 山东3次大暴雨过程云街雷达回波特征及其作用分析[J]. 气象,46(2):179-188. Diao X G, Liu C, Wan M B, et al, 2020. Analysis on cloudstreet echo characteristics and effects during three severe rainfall events in Shandong Province[J]. Meteor Mon, 46(2):179-188(in Chinese).
- 樊利强,王迎春,陈明轩,2009. 利用雷达资料反演方法对北京地区一次强对流天气过程的分析[J]. 气象,35(11):9-16. Fan L Q, Wang Y C, Chen M X, 2009. Analysis of a severe convective storm event in Beijing using the thermodynamical retrieval method of radar data[J]. Meteor Mon, 35(11):9-16(in Chinese).
- 郭巍,崔林丽,顾问,等,2018. 基于葵花8卫星的上海市夏季对流初生预报研究[J]. 气象,44(9):1229-1236. Guo W, Cui L L, Gu W, et al, 2018. Summer convective initiation forecasting in Shanghai based on Himawari-8 satellite[J]. Meteor Mon, 44(9):1229-1236(in Chinese).
- 鲁亚斌,李华宏,闵颖,等,2018. 一次云南强对流暴雨的中尺度特征分析[J]. 气象,44(5):645-654. Lu Y B, Li H H, Min Y, et al, 2018. Analysis of mesoscale weather system characteristics of a severe convective rainstorm in Yunnan[J]. Meteor Mon, 44(5):645-654(in Chinese).
- 钱正安,蔡英,宋敏红,等,2018. 中国西北旱区暴雨水汽输送研究进展[J]. 高原气象,37(3):577-590. Qian Z A, Cai Y, Song M H, et al, 2018. Review of advances in water vapor transport studies of rainstorm in Northwest China[J]. Plateau Meteor, 37(3):577-590(in Chinese).
- 石定朴,朱文琴,王洪庆,等,1996. 中尺度对流系统红外云图云顶黑体温度的分析[J]. 气象学报,54(5):600-611. Shi D P, Zhu W Q, Wang H Q, et al, 1996. Cloud top blackbody temperature analysis of infrared satellite image for mesoscale convective system[J]. Acta Meteor Sin, 54(5):600-611(in Chinese).
- 苏爱芳,张宁,袁小超,等,2016. 河南“7·14”强降水和“8·02”雷暴大风过程 $\beta$ 中尺度对流系统对比分析[J]. 暴雨灾害,35(2):

- 126-137. Su A F, Zhang N, Yuan X C, et al, 2016. Comparative analysis on  $\beta$ -mesoscale convective systems in “7 · 14” extreme precipitation and “8 · 02” thunderstorm gale events in Henan [J]. *Torr Rain Dis*, 35(2):126-137(in Chinese).
- 陶诗言, 1980. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社. Tao S Y, 1980. *Torrential Rain in China*[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- 王宝鉴, 黄玉霞, 魏栋, 等, 2017. TRMM 卫星对青藏高原东坡一次大暴雨强降水结构的研究[J]. *气象学报*, 75(6):966-980. Wang B J, Huang Y X, Wei D, et al, 2017. Structure analysis of heavy precipitation over the eastern slope of the Tibetan Plateau based on TRMM data[J]. *Acta Meteor Sin*, 75(6):966-980(in Chinese).
- 王清平, 彭军, 茹仙古丽 · 克里木, 2016. 新疆巴州“6. 4”罕见短时暴雨的 MCS 特征分析[J]. *干旱气象*, 34(4):685-692. Wang Q P, Peng J, Ru X G L, 2016. Characteristics of mesoscale convective system about a rare short-time rainstorm in Bayangol Mongol Autonomous Prefecture of Xinjiang on 4 June 2012[J]. *J Arid Meteor*, 34(4):685-692(in Chinese).
- 王晓芳, 崔春光, 2011. 暴雨中尺度对流系统研究的若干进展[J]. *暴雨灾害*, 30(2):97-106. Wang X F, Cui C G, 2011. A number of advances of the research on heavy rain mesoscale convective systems[J]. *Torr Rain Dis*, 30(2):97-106(in Chinese).
- 肖逸祥, 杨康权, 俞小鼎, 等, 2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. *气象*, 43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. *Meteor Mon*, 43(10):1165-1175(in Chinese).
- 徐姝, 东高红, 熊明明, 2019. 冷池对引发新乡“7 · 9”特大暴雨的中尺度对流系统的影响分析[J]. *气象*, 45(10):1426-1438. Xu S, Dong G H, Xiong M M, 2019. Impact of cold pool on mesoscale convective system for extreme rainfall over Xinxiang on 9 July 2016[J]. *Meteor Mon*, 45(10):1426-1438(in Chinese).
- 徐双柱, 吴涛, 张萍萍, 2011. 风云 3 号气象卫星资料在暴雨预报中的应用[J]. *灾害学*, 26(3):97-102. Xu S Z, Wu T, Zhang P P, 2011. Application of Fengyun-3 satellite data in rainstorm forecast[J]. *J Catastrophol*, 26(3):97-102(in Chinese).
- 杨磊, 才奎志, 孙丽, 等, 2020. 基于葵花 8 号卫星资料的沈阳两次暴雨过程中对流云特征对比分析[J]. *暴雨灾害*, 39(2):125-135. Yang L, Cai K Z, Sun L, et al, 2020. Comparison of convective cloud characteristics during two torrential rain events in Shenyang based on Himawari-8 satellite data[J]. *Torr Rain Dis*, 39(2):125-135(in Chinese).
- 俞小鼎, 2012. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨成因分析[J]. *气象*, 38(11):1313-1329. Yu X D, 2012. Investigation of Beijing extreme flooding event on 21 July 2012[J]. *Meteor Mon*, 38(11):1313-1329(in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J]. *气象学报*, 70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection[J]. *Acta Meteor Sin*, 70(3):311-337(in Chinese).
- 张春龙, 肖稳安, 邓树民, 等, 2012. 基于气象卫星观测资料的雷电预报指标研究[J]. *黑龙江气象*, 29(1):21-24. Zhang C L, Xiao W A, Deng S M, et al, 2012. Lightning forecast indexes research based on meteorological satellite observational data [J]. *Heilongjiang Meteor*, 29(1):21-24(in Chinese).
- 张夕迪, 孙军, 2018. 葵花 8 号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. *气象*, 44(10):1245-1254. Zhang X D, Sun J, 2018. Application analysis of Himawari 8 in monitoring heavy rain convective clouds[J]. *Meteor Mon*, 44(10):1245-1254(in Chinese).
- 赵庆云, 傅朝, 刘新伟, 等, 2017. 西北东部暖区大暴雨中尺度系统演变特征[J]. *高原气象*, 36(3):697-704. Zhao Q Y, Fu Z, Liu X W, et al, 2017. Characteristics of mesoscale system evolution of torrential rain in warm sector over Northwest China[J]. *Plateau Meteor*, 36(3):697-704(in Chinese).
- 赵娴婷, 王晓芳, 王珏, 等, 2020. 2016 年 7 月 18—20 日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. *气象*, 46(4):490-502. Zhao X T, Wang X F, Wang J, et al, 2020. Analysis of mesoscale characteristics of torrential rainfall in Hubei Province during 18—20 July 2016[J]. *Meteor Mon*, 46(4):490-502(in Chinese).
- 赵玉春, 崔春光, 2010. 2010 年 8 月 8 日舟曲特大泥石流暴雨天气过程成因分析[J]. *暴雨灾害*, 29(3):289-295. Zhao Y C, Cui C G, 2010. A study of rainstorm process triggering Zhouqu extremely mudslide on 8 August 2010[J]. *Torr Rain Dis*, 29(3):289-295(in Chinese).
- Chen Y Y, Li J P, Li X, et al, 2021. Spatio-temporal distribution of the rainstorm in the east side of the Helan Mountain and the possible causes of its variability[J]. *Atmos Res*, 252:105469.
- Honda T, Kotsuki S, Lien G Y, et al, 2018. Assimilation of Himawari-8 all-sky radiances every 10 minutes; impact on precipitation and flood risk prediction[J]. *J Geophys Res*, 123(2):965-976.
- Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 61(11):1374-1387.
- Parker M D, Johnson R H, 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 128:3413-3436.
- Rinaldy N, Saragih I J A, Putra A W, et al, 2017. Identification of mesoscale convective complex (MCC) phenomenon with image of Himawari 8 satellite and WRF ARW model on Bangka Island (case study: 7-8 February 2016)[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 98:012002.

(本文责编:王婷波 何晓欢)