

一次甘肃东部强降水过程中多个中尺度对流系统的 对比研究¹

杨丽杰^{1, 2}, 刘维成^{1*}, 刘新雨³, 嵇康², 谭丹⁴, 曹彦超²

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 庆阳市气象局, 甘肃 庆阳 745000; 3. 酒泉市气象局, 甘肃 酒泉 735000; 4. 兰州中心气象台, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 利用多源观测资料和 ERA5 再分析数据, 对比分析了 2022 年 7 月 15-16 日甘肃东部强降水过程中多个中尺度对流系统 (Mesoscale Convective System, MCS) 的差异。结果表明: (1) 此次过程依次由影响宁夏南部-陕北的准静止性 MCS-A、相继东移影响甘肃东南大部 MCS-B、甘肃陇东东部局地发展起来的 MCS-C 和陕西西部的断线状 MCS-D 造成, 形成了 4 条雨带。(2) MCS-A 发生在暖区降水阶段 (15 日 00-12 时), 其雨带 1 范围小、累积雨量大、对流性强且变化平稳, 局地发生极端特大暴雨, 为过程最强。其余 3 个 MCS 均发生在斜压锋生降水阶段 (15 日 13 时-16 日 02 时), 其雨带 2、3、4 分别发生在 MCS-B 触发、MCS-B 与 MCS-C 合并后发展为飚线、飚线断裂与 MCS-D 合并再次加强阶段, 雨带 3、4 降水强度较强, 而雨带 2 较弱。(3) MCS-A 的云顶结构呈孤立发展起来的准椭圆形云团, 中低层对流结构呈准静止后向建立形态, 列车效应显著。而 MCS-B、C、D 则发展合并成了呈带状分布的中尺度持续拉伸型对流系统, 中低层对流结构显示均属尾随层状形态。(4) MCS-A 发展期间, 地面上两个呈犄角之势的冷池长时间维持。MCS-A 由下游冷池 2 的出流边界、上游冷池 1 阻挡转向产生的辐合、中尺度锋生及弱温湿扰动等作用触发, 后通过冷池与低层垂直风切变相平衡、低空急流的风速脉动、平流与传播互相抵消等机制长时间维持。(5) MCS-B 由 700hPa 切变线触发, 之后不同性质地面辐合线形成的“三重点”和较强的温湿扰动先后触发了 MCS-C 和 MCS-D。通过它们之间的多次合并、中低层较强的水汽输送和锋生作用、中高层的冷空气侵入而维持。

关键词: 中尺度对流系统; 极端特大暴雨; 冷池; 垂直风切变; 低空急流

文章编号:

中图分类号: P458.1+21.1

文献标识码: A

¹收稿日期: 2024-12-23; 网络预出版日期:

作者简介: 杨丽杰, 女, 1989 年出生, 学士, 高级工程师, 主要从事天气预报及灾害性天气预警服务工作。Email:1012284386@qq.com.

通讯作者: 刘维成, 男, 1984 年出生, 博士, 正研级高工, 主要从事强对流天气监测预警和数值预报研究。Email:cnliuwc@163.com.

资助项目: 甘肃省青年科技基金项目 23JRRM0750; 中国气象局气象能力提升专项 23NLTSZ001; 甘肃省气象局气象科研项目 Ms2023-08; 甘肃省气象局人才计划项目 2425rczx-B-QNYXRC-05.

Funded by Youth Science and Technology Fund project of Gansu Province 23JRRM0750; Special project for improving meteorological capability of China Meteorological Administration 23NLTSZ001; Meteorological research project of Gansu Meteorological Bureau Ms2023-08; Gansu Meteorological Bureau talent plan project2425rczx-B-QNYXRC-05.

Comparative study of multiple mesoscale convective systems during a heavy rainfall in eastern Gansu Province

YANG Lijie^{1, 2}, LIU Weicheng², LIU Xinyu³, JI Kang¹, TAN Dan⁴, CAO Yanchao¹

- (1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration/Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster/Key Laboratory of Arid Climatic Change, Lanzhou 730020, China;
2. Qingyang Meteorological Bureau, Qingyang 745000, Gansu, China;
3. Jiuquan Meteorological Bureau, Jiuquan 735000, Gansu, China;
4. Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Based on the multi-source observation data and the ERA5 reanalysis data, the differences of the Mesoscale Convective Systems (MCS) during the heavy rainfall in the eastern Gansu Province from July 15 to 16, 2022 were analyzed. The results show that: (1) This process was successively caused by the quasi-stationary MCS-A affecting southern Ningxia and northern Shaanxi, MCS-B affecting most of southeast Gansu, MCS-C developing locally in eastern Longdong, Gansu and broken line MCS-D breaking in western Shaanxi, forming four rainbands. (2) MCS-A occurred in the precipitation stage in the warm region (00-12 hours on the 15th), its rainband 1 had a small range, large cumulative rainfall, strong convection and stable change, and extreme heavy rain occurred locally, which was the strongest process. The other three MCSs all occurred in baroclinic frontal precipitation stage (13:00 on the 15th to 02:00 on the 16th), rain bands 2, 3 and 4 occurred in the stages of MCS-B triggering, MCS-B merging with MCS-C and developing into a squall line, squall line fracture merging with MCS-D and strengthening again, respectively. Rain bands 3 and 4 had higher precipitation intensity, while rain band 2 was weaker. (3) The cloud top structure of MCS-A is a quasi-oval cloud developed in isolation, and the convection structure at the middle and low levels is back-building established, indicating a significant train effect. The cloud-top structure shows a banded mesoscale sustained stretching-type convective system merged from MCS-B, MCS-C and MCS-D, and their mesoscale and lower convective structures all showed a trailing stratiform pattern. (4) During the development of MCS-A, two persistent ground-based cold pools were observed to interact. The initiation of MCS-A is linked to the outflow boundary from the downstream cold pool 2, as well as the convergence, mesoscale frontogenesis, and subtle temperature and humidity perturbations induced by the blocking

effect of upstream cold pool 1. Subsequently, this system is sustained over an extended period through a phase equilibrium between the cold pool and lower-level vertical wind shear, fluctuations in low-level jet stream wind velocity, and mutual cancellation of advection and propagation.(5)MCS-B was initiated by a 700hPa trough line, and subsequently, as various types of surface convergence lines coalesced into a "triple point" amidst intensified temperature and moisture disturbances, MCS-C and MCS-D were successively triggered. Their sustenance was attributed to recurrent mergers, robust water vapor transport at mid-to-low levels, and the generation of cold air at mid-to-upper levels.

Key words:meso-scale convective system; extremely heavy rainstorm; cold pool; vertical wind shear; low level jet

引言

据统计,全球暴雨洪涝灾害造成的损失在所有自然灾害中占比高达40%(周月华等,2019),而我国又是暴雨最频发的地区之一,因此如何对暴雨进行准确的预报预警一直是气象工作者面临的难题。随着气候变暖加剧,近年来我国多地突破历史极值的极端暴雨事件频发(湛芸等,2012;冉令坤等,2021),但由于此类天气发生机制复杂、数值模式预报能力偏低、地形影响显著等,尚存在诸多亟待解决的难题。

在适宜的大尺度环流背景下,中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)因可直接产生暴雨而一直广受关注。MCS是指由多个对流风暴有组织构成的风暴团、飚线、风暴复合体等,空间尺度 $\geq 100\text{km}$ 、生命史 ≥ 3 小时(Schumacher et al,2020)。目前气象学者对暴雨型MCS的研究主要集中在以下三个方面:1.MCS发生发展的环流背景和环境条件总结,如副热带高压稳定少动(黄晓璐等,2022),锋前低值系统、西风槽、切变线东移(张兰等,2023)、低空急流风速脉动(徐明,2018)、低层辐合、高层辐散、700hPa暖平流较强(曾波等,2016),大气斜压性强、垂直风切变大(Laing and Fritsch, 2000)、中层干侵入等(冯晋勤等,2022),对流层中底层充沛的水汽输送(张柳等,2020)等。2.触发维持机制分析。MCS通常由冷池、阵风锋、辐合线、切变线、迎风坡抬升(韦惠红等,2022;徐姝等,2024)、低空急流激发的重力波(Schumacher and Johnson, 2008)等触发,之后通过环境垂直风切变、冷池及后方入流(Chen et al.,2015;田荟君,2018)等动力作用之间的相互影响实现对流组织化而长时间维持。Rotunno et al.(1988)提出了RKW理论,其基本思路是冷池和低层环境风垂直切变分别通过热力和动力作用产生的负水平涡度和正水平涡度影响长生命史飚线。只有当冷池边界的扩张速度和低层风切变相当、两者的水平涡

度相平衡时最有利于飑线的发展和维持,否则将使上升运动倾斜而不利于飑线维持。该理论目前广泛用于解释线状对流系统的发展机制(徐姝等,2019;陈涛等,2020)。3.MCS的组织结构与暴雨的关系。Parker and Johnson(2000)利用高分辨率雷达资料将美国中部的线状MCS分为了尾随层状(TS)型、先导层状(LS)型、平行层状(PS)型三类。之后,Schumacher and Johnson(2006)提出了最易诱发极端降水事件的两类MCS的对流结构,即“列车线/伴随层状”(training line/adjoint stratiform,TL/AS)和“准静止后向建立”(backbuilding,BB)。Gallus et al.(2008)则根据雷达回波结构的变化,提出了更为详细的9种MCS分类方案,包括3类单体型对流(单体对流、单体群和破碎的飑线)、5种线状系统(弓形回波、飑线伴尾随层状型、先导层状型、平行层状、无层状型)和非线性系统,并指出断线状、尾随层状型和先导层状型最易带来暴雨灾害。

我国学者对MCS的研究主要集中在环境特征和触发维持机制方面,对其结构模态的挖掘较少且主要集中在长江中下游等东部地区(王晓芳和崔春光,2012;Zheng et al.,2013),而西北半干旱区的研究尚待开展。2022年7月15-16日,甘肃东部在多个MCS的影响下,产生了一次强降水过程,导致马莲河流域部分河段发生近50年以来最强洪水,经济损失惨重。本文根据时间先后顺序,将这些MCS分别命名为MCS-A、MCS-B、MCS-C和MCS-D,利用多源观测资料和ERA5再分析数据,对比了它们在场、结构形态、触发维持机制等方面的差异,旨在加深对西北半干旱区MCS型暴雨的认识水平并构建概念模型,为今后的工作提供依据。

1 资料和方法

1.1 资料

(1)采用地面自动区域站逐1h加密观测数据用于降水和尺度特征分析,来源于气象大数据云平台;(2)采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,ECMWF)的第五代全球大气(ERA5)0.25°×0.25°逐1h再分析数据用于环流背景和物理量分析,数据来源于Climate Data Store网站(<https://cds.climate.copernicus.eu>);(3)选用FY-4A静止卫星中国区域标称相当黑体温度(TBB)用于MCS云顶结构分析,数据来源于风云卫星遥感数据服务网(<http://satellite.nsmc.org.cn/PortalSite/Default.aspx>);(4)采用甘肃省SWAN雷达拼图资料和西峰CINRAD/CD、陇南CINRAD/CA型多普勒天气雷达资料用于MCS精细对流结构和触发维持机制分析,数据来源于兰州中心气象台、庆阳市气象局和陇南市气象局;(5)采用航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission,SRTM)DEM 90m高程数据用于地形特征分析(图1a),数据来源于地理空

间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>)。

文中底图采用国家测绘地理信息标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)3082 号标准地图制作, 无修改。

1.2 方法

根据甘肃省河东地区的短时强降水等级标准(黄玉霞等, 2017), 本文将雨强 $\geq 20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 作为短时强降水的判别依据, 并将其分为 20.0~29.9、30~49.9 和 $50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 及以上三个等级, 分别统计其站次以分析降水的对流性特征。

对流冷池是由对流性降水的蒸发冷却或拖曳作用形成的密集空气区域, 通过降水的下沉气流输送到地面后再以密度流形式向外传播, 其前沿即出流边界(阵风锋)(Weckwerth and Parsons, 2006), 是边界层主要的辐合线类型。采用 Jake et al. (2019) 的方法计算冷池, 公式如下:

$$B = g \left(\frac{\theta_v - \bar{\theta}_v}{\bar{\theta}_v} \right) \quad (1)$$

式中, B 即冷池, 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, 可以通过 $\leq -0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 的范围判定冷池的强度变化; g 为重力加速度, 单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; θ_v 为虚位温, 单位 K ; $\bar{\theta}_v$ 由 MCS 附近地形相对平坦且无对流影响的 $50\text{km}\times 50\text{km}$ 方形区域的水平平均虚位温计算得出(见图 10 中红色方框), 单位 K 。

采用 RKW 理论(Rotunno et al, 1988) 分析 MCS 的维持机制, 冷池边界扩张速度计算公式如下(陈涛等, 2020):

$$C^2 = 2g \frac{-\Delta\theta}{\bar{\theta}} H = 2g \frac{\Delta\rho}{\bar{\rho}} = 2 \frac{\Delta P}{\bar{\rho}} \quad (2)$$

式中, C 是冷池边界的扩张速度, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\Delta\theta$ 为冷池的扰动位温, 单位: $^{\circ}\text{C}$; H 为冷池厚度, 单位: m ; ΔP 是某一段时间冷池内气压的变化情况, 单位: Pa ; 而 $\bar{\rho}$ 则是冷池内地面空气的平均密度, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

由于对流层中低层 5km 以下垂直风切变对于解释飚线的发展和维持均是合理的(李渝平等, 2020), 本文选用了预报业务中最常用的 0-3km 垂直风切变进行分析, 计算公式如下:

$$U_{0-3\text{km}} = \sqrt{(u_{3\text{km}} - u_{2\text{m}})^2 + (v_{3\text{km}} - v_{2\text{m}})^2} \quad (3)$$

式中, $u_{3\text{km}}$ 、 $v_{3\text{km}}$ 分别指 3km 高度的纬向风和经向风分量, $u_{2\text{m}}$ 和 $v_{2\text{m}}$ 分别指地面 2m 的纬

向风和经向风分量，单位均为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2 天气实况及环流背景

2.1 天气概况

2022 年 7 月 14 日 20 时-16 日 08 时（北京时，下同），甘肃东部出现了一次强降水过程，累积降水量有 7 站超 250mm，17 站超 100mm，最大降水量出现在庆阳市的翟家河站达 373.7mm。主要降水时段在 15 日 00-12 时和 15 日 13 时-16 日 02 时，根据影响系统，可分为暖区降水阶段和斜压锋生阶段，形成了 4 条雨带：雨带 1 即暖区降水雨带（图 1b），强度最强，位于宁夏南部至陕北一带，其中庆阳市中北部出现极端特大暴雨，空间范围不足 $20\text{km}\times 20\text{km}$ ，呈准静止状态（图 3a-d），表明其受中小尺度系统影响显著。最大降水量为翟家河站 367.9mm 占该站总雨量 98%，位居甘肃省 12 小时降水量历史第一高位。其余 3 条雨带（图 1c）均产生在斜压锋生降水阶段，移动迅速但雨强偏弱（图 2e-i），分别是 13-15 时影响甘肃东南大部的呈东北-西南向的中 α 尺度雨带 2，最大降水量产生在陇南市南河站为 94.2mm；16-20 时甘肃东部与陕西交界处呈“个”字型分布的中 β 尺度雨带 3，最大降水量为庆阳市固城站 112.7mm；20 时以后近东西向分布影响陕西南部和陇南东部的中 α 尺度雨带 4，甘肃省内最大降水量出现在陇南小路站 68.2mm。

2.2 降水对流性变化情况

此次过程共出现 220 站次短时强降水， $\geq 30\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时强降水出现 214 站次占比 97%，其中有 40 站次 $\geq 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 达极端短时强降水标准（俞小鼎，2013），可见降水的对流性极强。暖区降水阶段和斜压锋生阶段分别出现短时强降水 66 站次和 154 站次，且均以 $30\sim 50\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 强度占比最多。空间分布上，短时强降水对总降水量贡献率 $\geq 20\%$ 的区域与雨带的分布基本一致，特大暴雨区与 80% 以上的高降水贡献率中心及 3 次以上的高频中心相对应（图 3a），翟家河共出现短时强降水 8 次为研究区最多。

通过雨带和短时强降水的空间分布（图 2）及逐小时短时强降水变化情况（图 3b）可以看出，不同阶段的短时强降水特征差异明显。暖区降水阶段（图 2a-d）的短时强降水主要在庆阳市中北部稳定少动，时间变化上波动特征明显，15 日 04-08 时站次最多、强度强，小时雨量的最大值在 04 和 05 时先后达到过程次强（庆阳市马岭站，84.9mm）和最强（庆阳市翟家河站，84.6mm），之后则波动下降。到了斜压锋生阶段，雨带 2 上(图 2e)短时强降水站次少、小时雨量最大值最小。雨带 3、4 上(图 2f-i)短时强降水范围和强度较强，17-19 时、23 时小时雨量的最大值均超 70mm。

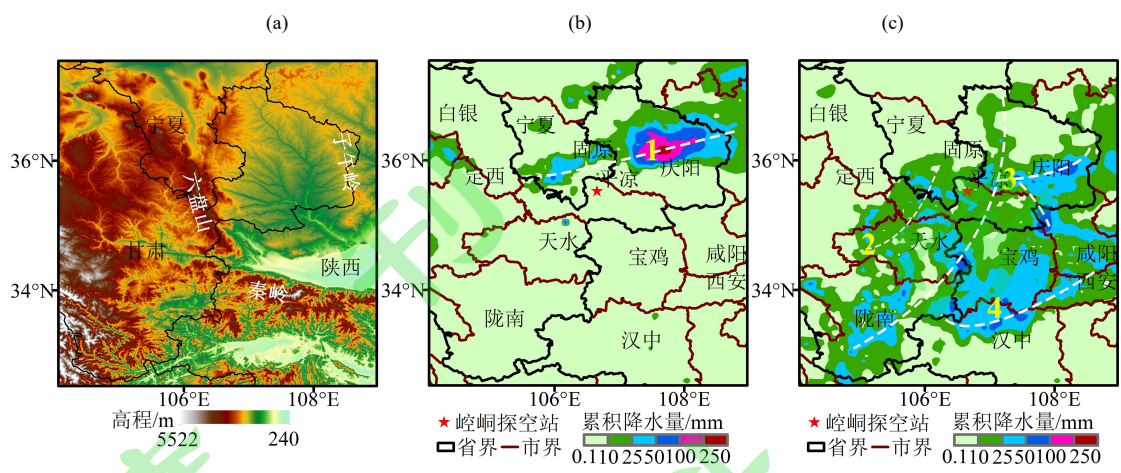
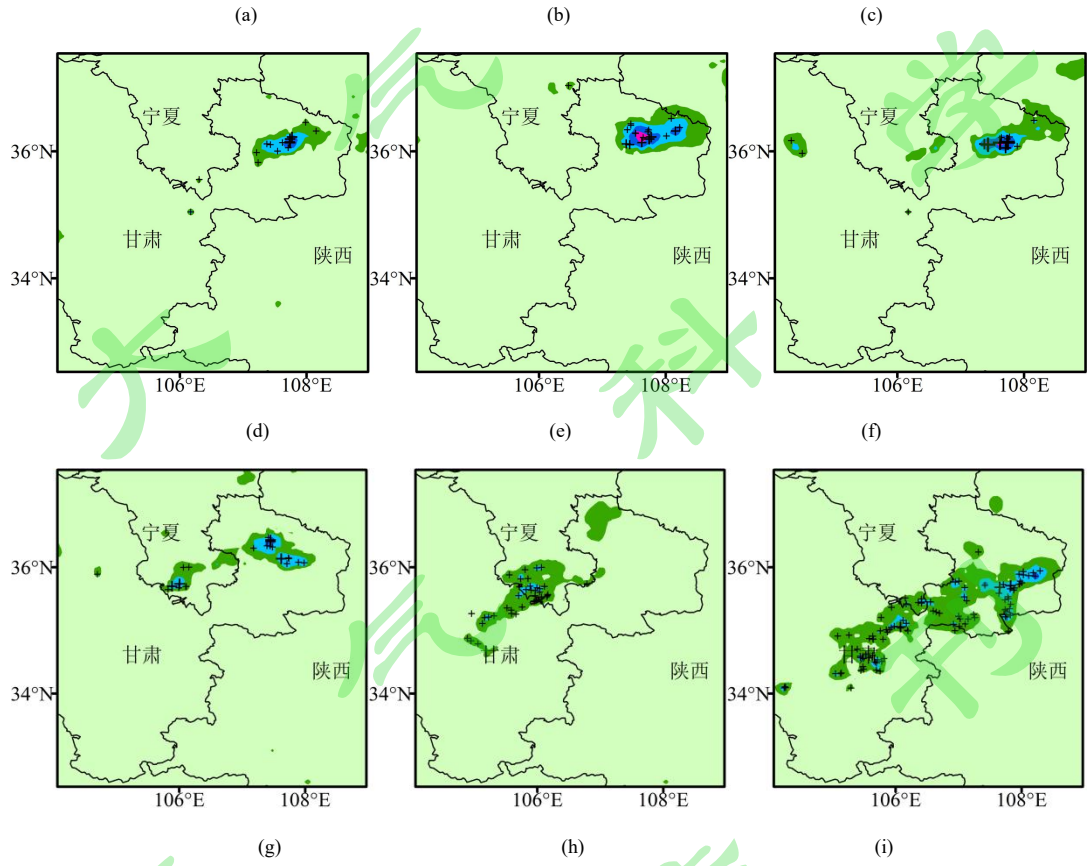


图1 甘肃东部地形(a)、2022年7月15-16日暖区降水(b.15日00-12时)和斜压锋生(c.15日13-16日02时)阶段降水量的空间分布

Fig1. The spatial distribution of eastern Gansu terrain(a),precipitation in stage of warm zone (b.00:00-12:00 on 15) and frontal(c.13:00 on 15-02:00 on 16) July ,2022



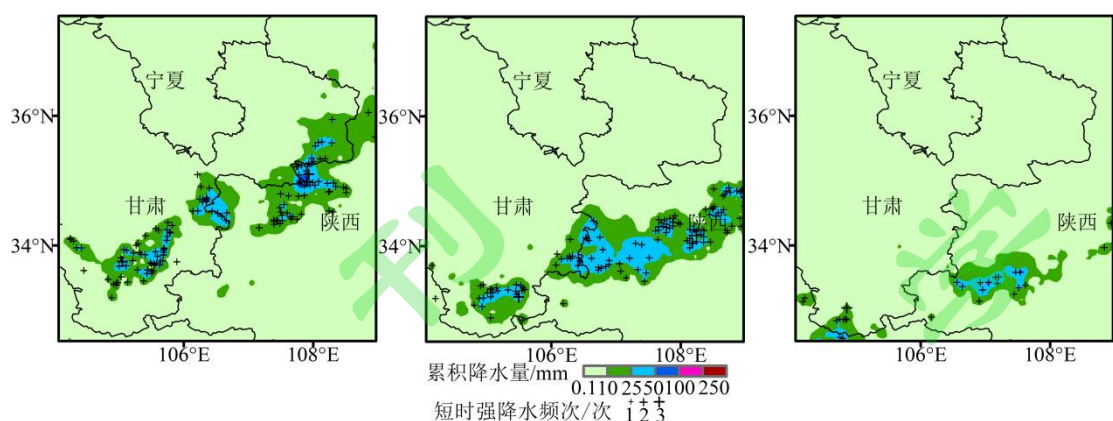


图2 2022年7月15-16日暖区降水阶段（a.01-03时；b.04-06时；c.07-09时；d.10-12时）和斜压锋生降水阶段（e.13-15时；f.16-18时；g.19-21时；h.22时-16日00时；i.16日01-03时）雨带和短时强降水频次的逐3h演变

Fig2.The evolution of the rain band and short time heavy precipitation frequency by 3 hours in stage of warm zone precipitation on(a.01:00-03:00;b.04:00-06:00;c.07:00-09:00;d.10:00-12:00) and baroclinic frontogenic precipitation(e.13:00-15:00;f.16:00-18:00;g.19:00-21:00;h.22:00,15th-00:00,16th;i.01:00-03:00,16th) on July 15-16,2022

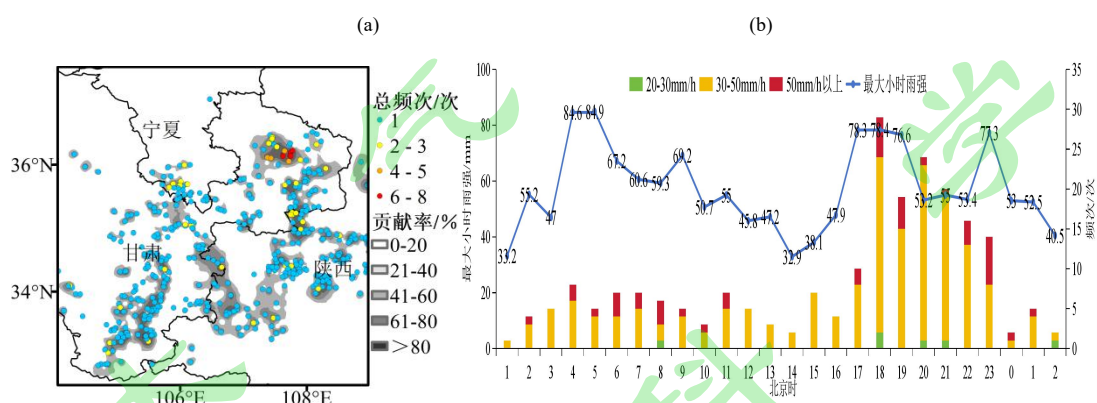


图3 2022年7月15日01时-16日02时短时强降水的空间分布（a）和逐小时变化（b）情况

Fig3.The spatial distribution (a)and hourly changes(b) of short-time heavy precipitation from 01:00 15th to 02:00 16th, July, 2022

以上分析可以看出，雨带1范围小、准静止，具有累积雨量大、雨强强、对流性强且变化平稳等特征；雨带2-4则是移动性的，其中雨带3、4的对流性和累积雨量均较强，而雨带2最弱。下面将重点分析造成以上差异的原因。

2.3 大尺度环流背景及环境场特征

7月14日20时，500hPa（图4a）高度场呈两槽一脊形势，西风槽位于北疆以北地区，其东侧贝加尔湖以南的高压脊与强盛的西太平洋副热带高压（以下简称副高）同位向叠加形成“高压坝”阻挡形势，有利于降水长时间维持。副高588dagpm脊线西伸至102°E附近，其外围的西南气流与700hPa（图4c）宁夏北部低涡切变东南象限的西南风显著流线和地面低压倒槽东侧（图略）的东南风共同向降水区输送着水汽和不稳定能量，大尺度环流背景呈典型的暖区暴雨形势。这种形势一直维持至15日14时，随着500hPa（图4b）副高减弱东

退，高压坝阻挡形势崩溃，西风槽携带冷空气快速向东南推进，配合 700hPa（图 4d）低涡切变、地面冷锋（图 4e）和辐合线（图略），造成了第二阶段的强降水。

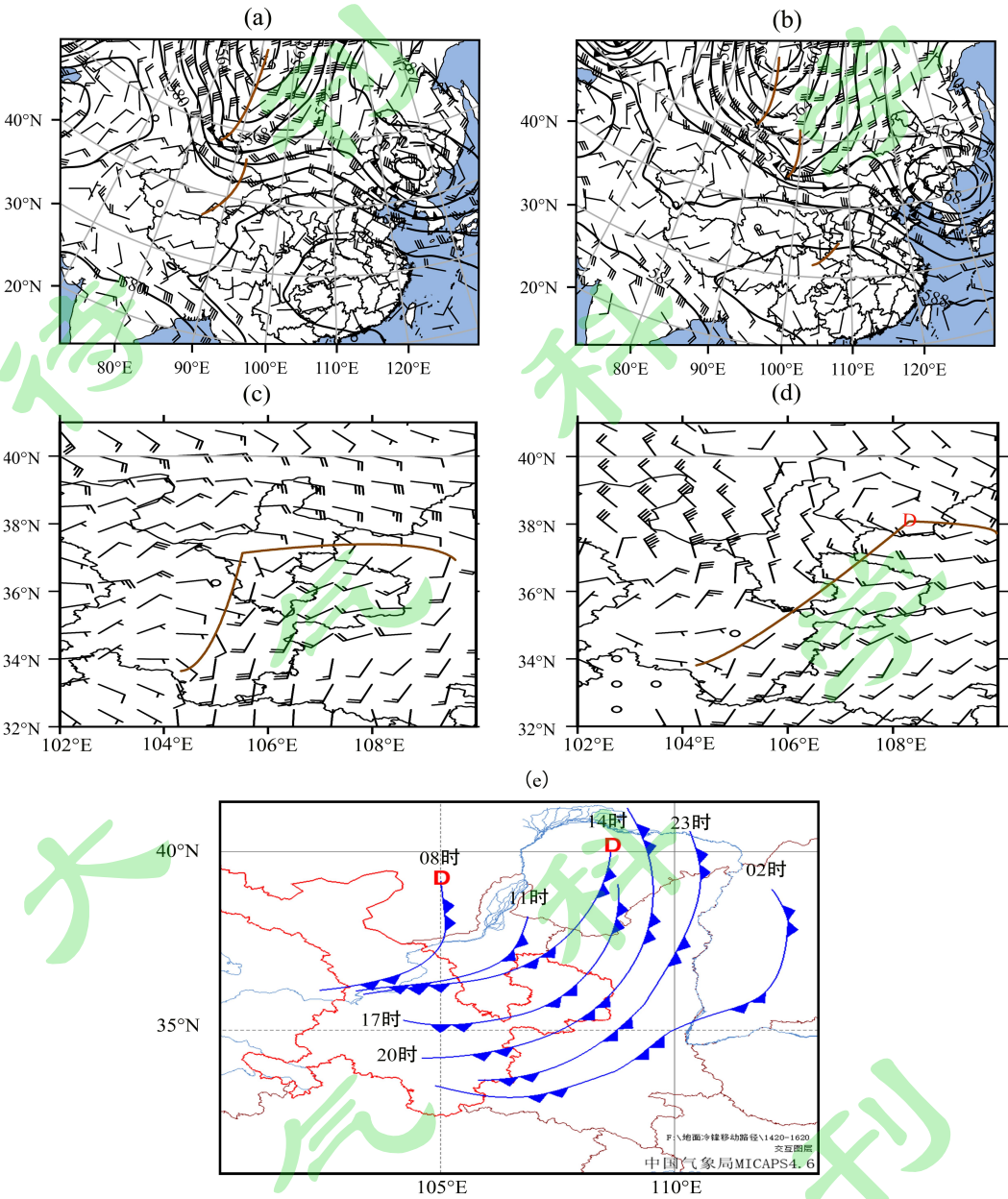


图 4 2022 年 7 月 14 日 20 时 (a,c) 和 15 日 14 时 (b,d) 500hPa (a,b)、700hPa (c,d) 环流形势 (等值线为高度场, 单位: dagpm; 风矢为风场, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 棕线代表槽线或切变线) 及 15 日 08 时-16 日 02 时地面冷锋逐 3 小时移动情况 (e,D 表示地面低压中心位置)

Fig4.The circulation situation of 500hPa (a,b), 700hPa (c,d) at 20:00 on July 14, 2022(a,c) and 14:00 on July 15, 2022(b,d)(contour is geopotential height, Unit:dagpm; wind vector is wind, Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; the brown line represents the trough line or shear line), 3-hour movement of surface cold front from 08-20 on 15th (e,D indicates the location of the surface low-pressure center)

由于两阶段甘肃省最强降水均发生在庆阳市境内，故选取该市距离最近的崆峒站探空资料分析环境特征，发现此次过程发生在高能、高湿的大气环境中，但在不同阶段存在显著差异。14 日 20 时（图 5a），800hPa 附近浅薄的边界层逆温有利于不稳定能量累积，对流有效

位能(Convective Available Potential Energy,CAPE)为 $877.73\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 且呈细长条状形态, 700hPa 比湿和温度露点差分别为 $12\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 1.7°C 。抬升凝结高度位(Lifting condensation level,LCL)和自由对流高度(Level of free Convection,LFC)均低于 800hPa, 表明无需很强的动力抬升即可启动对流。暖云层厚度达 4km 较为深厚, 有利于高效率降水(俞小鼎等, 2020)。到了 15 日 14 时(图 5b), 对流层中高层干冷空气侵入使得层结不稳定显著增强, 暖云层厚度也增大至 4.4km, 700hPa 比湿($10\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)及 CAPE($743.02\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)均有所下降, LCL 和 LFC 明显升高, 触发对流所需的动力条件明显增强。

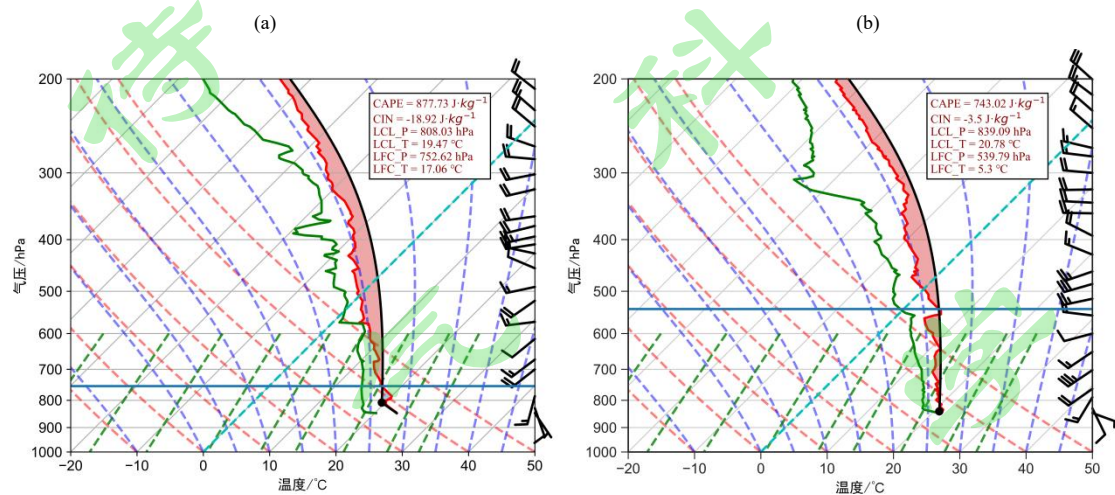


图 5 2022 年 7 月 14 日 20 时 (a) 和 7 月 15 日 14 时 (b.在 08 时基础上利用 14 时地面气温、气压订正得出) 崆峒站 T-lnP 图
Fig.5 T-lnP diagram of Kongtong Station at 20:00 (a) on July 14 and 14:00 (b.on the basis of 08:00, the ground temperature and pressure were revised by 14:00) on July 15, 2022

3 中尺度对流系统特征

由于三个移动性 MCS 发生在相同的天气背景下且互相影响, 故下文将它们作为整体, 与 MCS-A 进行对比分析。

3.1 云顶结构

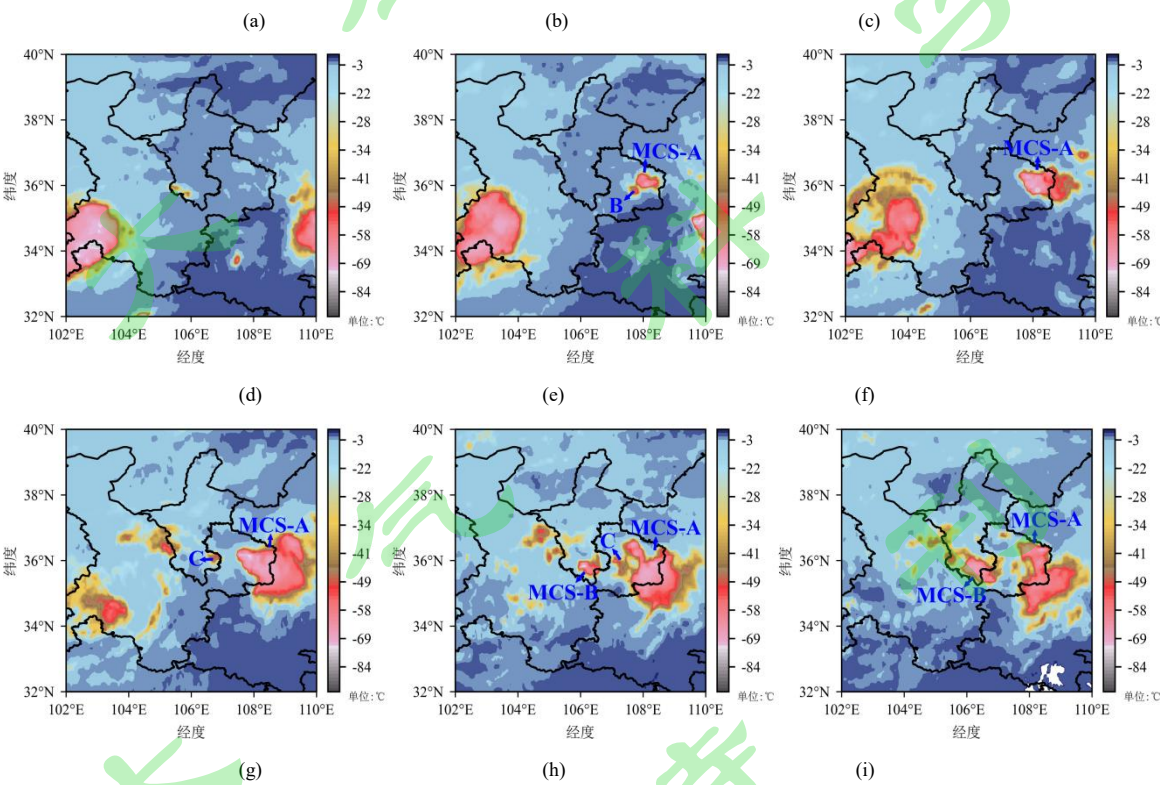
3.1.1 MCS-A

15 日 00:00 前后(图 6a), 庆阳市中北部多个分散性 γ 中尺度对流云团初生, 经过 2 小时发展形成了准椭圆形 β 中尺度 MCS-A, 位于其上风方的庆城县西部有对流云团 B 发展(图 6b)。它们在 03:15 汇合后迅速发展增强(图略), 03:19-03:49 汇合处的 TBB 低中心在汇合处降至 -70°C 以下, 受其影响翟家河等多个站点出现短时强降水。04:00(图 6c) MCS-A 发展为中 α 尺度后开始爆发式增长, 长轴逐渐转为南北向(图 6d-f), $\text{TBB} \leq -70^\circ\text{C}$ 的冷云中心位于云体后部, 与强降水中心相对应。到了 08:15(图 6d), 六盘山南部又有新的对流云团 C 发展东移, 并于 10:45 与 MCS-A 合并(图 6e), 使得强降水持续, 而影响冷锋降水的

MCS-B 开始酝酿。12:00(图 6f)以后, MCS-A 强度明显减弱, 暖区降水趋于结束。

3.1.2 MCS-B、MCS-C、MCS-D

13:00 (图略), 宁夏南部中 β 尺度的 MCS-B 东移进入庆阳市境内, 在其前侧和西南侧的定西市东南部等地有多个分散性中尺度对流云团发展。这些云团逐渐合并, 至 15:00 (图 6g) 形成长轴东北-西南向的带状中尺度持续拉伸型对流系统 B (Persistent Elongated Convective System, PECS) (卓鸿等, 2012)。之后, PECS-B 长轴方向的西南侧先后在陇南、甘南及四川省西部有新的对流云团触发并汇入, 使其持续增强, 期间 $TBB \leq -70^{\circ}\text{C}$ 的冷中心始终位于云体中心或其前部 (图 8g-i), 与之对应甘肃东部出现多站短时强降水。20:15 以后 (图 8g), PECS-B 逐渐断裂为两个 β 中尺度的 MCS-C、MCS-D, 前者继续影响着陇东南大部, 而后者逐渐移出庆阳市开始影响陕西。东移过程中, 这两个 MCS 在其前侧新生对流云团的衔接下, 于 22:00 (图 8i) 前后再次合并后迅速发展增强, 受其影响陇东南的短时强降水也明显增多 (图 3b)。16 日 02 时 (图略) 以后, 云带强度明显减弱并逐渐移出, 甘肃东部的降水趋于结束。



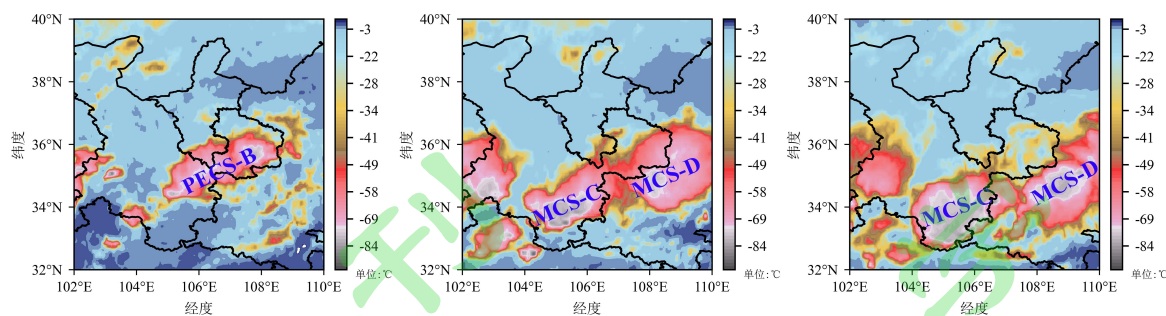


图 6 2022 年 7 月 15 日甘肃东部 FY-4A 卫星 TBB (单位: °C) 特征演变

(a.00:00;b.02:00;c.04:00;d.08:15;e.10:45;f.12:00;g.15:00;h.20:15;i.22:00)

Fig6. The evolution of TBB(unit: °C) characteristics of FY-4A satellite in eastern Gansu Province, July 15,

2022(a.00:00;b.02:00;c.04:00;d.08:15;e.10:45;f.12:00;g.15:00;h.20:15;i.22:00)

3.2 中低层对流结构

3.2.1 MCS-A

根据雷达回波的演变 (图 7), MCS-A 的发展以 4-5 小时为周期, 反复经历了 3 轮对流触发、发展、合并的过程: 14 日 23 时-15 日 01 时 (图 7a), 呈东北-西南向的线状对流 A 和对流单体 B、C 在庆阳市西南部和六盘山南部触发后在承载层西南风的引导下北移并不断发展增强。线状对流 A 于 15 日 00:36 (图 7b) 开始影响特大暴雨区, 其中镶嵌着 50dBz 以上的强中心, 速度场上有中小尺度局地辐合相对应 (图略), 受其影响出现了 3 站分散性的短时强降水。02:16 (图 7c) 以后回波 B 逐渐与对流回波 A 交汇后形成多条南北向的“短雨带”, 不断经过特大暴雨区形成列车效应。03-04 时 (图 7d) 已发展至线状的对流 C 再次北上、增强于 04:20 (图 7e) 与老回波交汇并形成 MCS-A。此阶段强回波轴向与平移方向基本一致并逐渐转为纬向模态。08-09 时 (图 7f), 宁夏东部又有对流回波新生并东移补充形成新一轮列车效应。12 时以后 (图 7g), MCS-A 减弱消散并逐渐移出。

3.2.1 MCS-B、MCS-C、MCS-D

09-10 时 MCS-B 在宁夏东部开始触发 (图 7f), 并于 12 时以后 (图 7g) 发展至中 β 尺度开始影响宁夏东部与甘肃交界处, 其对流回波位于层状云回波后侧呈先导层状 (Trailing Stratiform, TS) 形态。之后 MCS-B 快速东移, 在其前进方向的右前侧天水、陇南、甘南一带不断有呈断线状分布的对流单体触发、补充, 使得其中南段发展较为旺盛, 而北段则不断减弱, 雨带 2 即产生在此阶段。到了 15:24 (图 7h), 距离 MCS-B 北段不足 30km 的庆阳市中东部又有新的对流单体触发并快速发展增强并于 16:12 (图 7i) 发展成为呈“人”字型的 TS 型 MCS-C。MCS-B 和 MCS-C 在 16:30 前后合并成“个”字型结构并迅速发展增强, 到了 17:18 (图 7j) 发展成为空间尺度超 500km 的飑线, 对流发展极其旺盛, 强回波的走向与雨带 3 的分布一致 (图 1c)。19 时以后, 飑线断裂成南北两段, 在其前部呈断线状分布的 TS

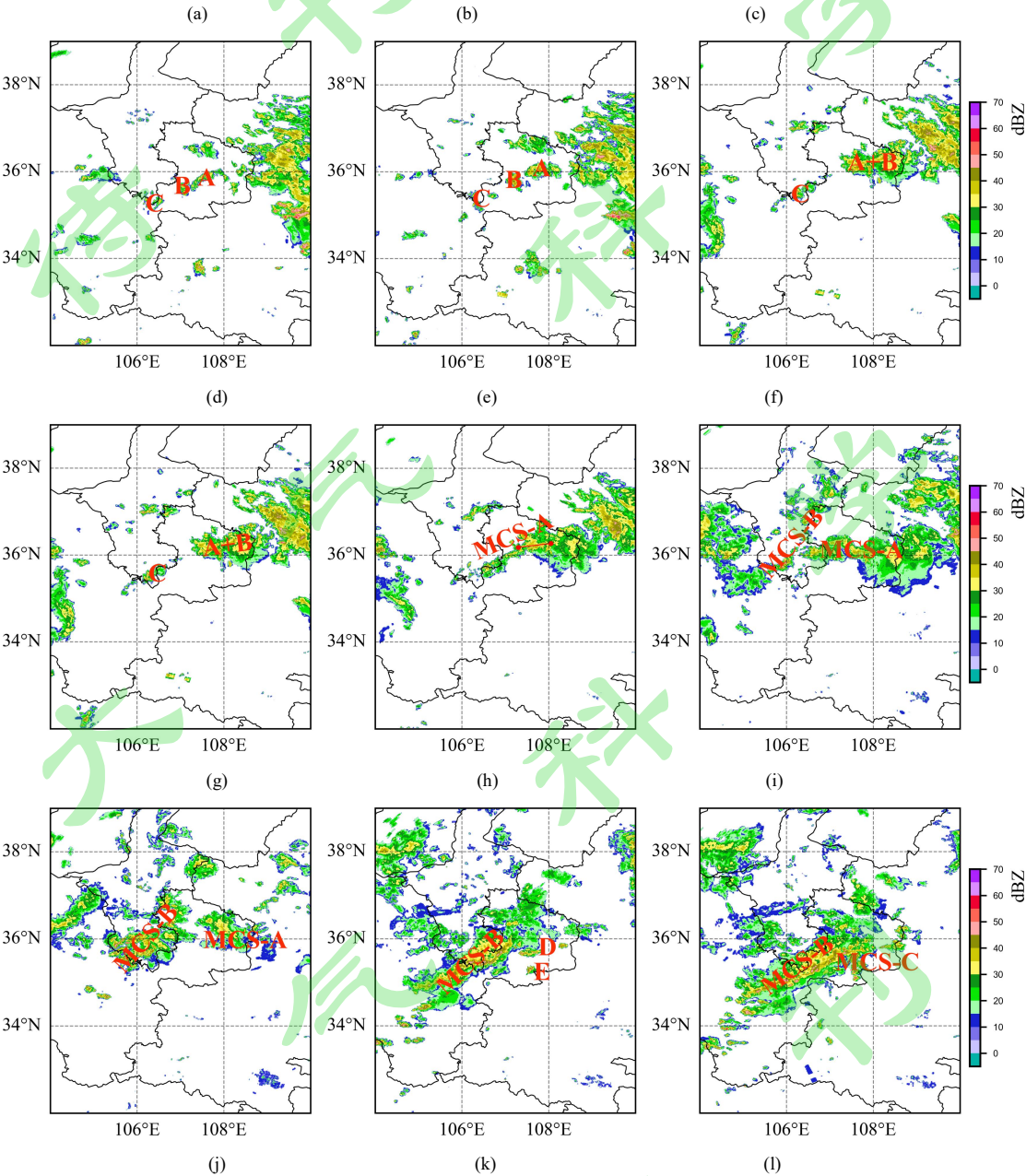
285 型 MCS-D 开始触发。MCS-D 于 20:00 (图 7k) 前后与飑线汇合后并使其再次发展增强, 并
286 表现出典型的弓状回波形态 (图 7l)。之后飑线北段逐渐转为纬向模态, 产生了雨带 4。16
287 日 01:12 (图略) 以后, 飑线减弱东移, 甘肃东部的强降水结束。

288
289

290
291

292
293

294
295



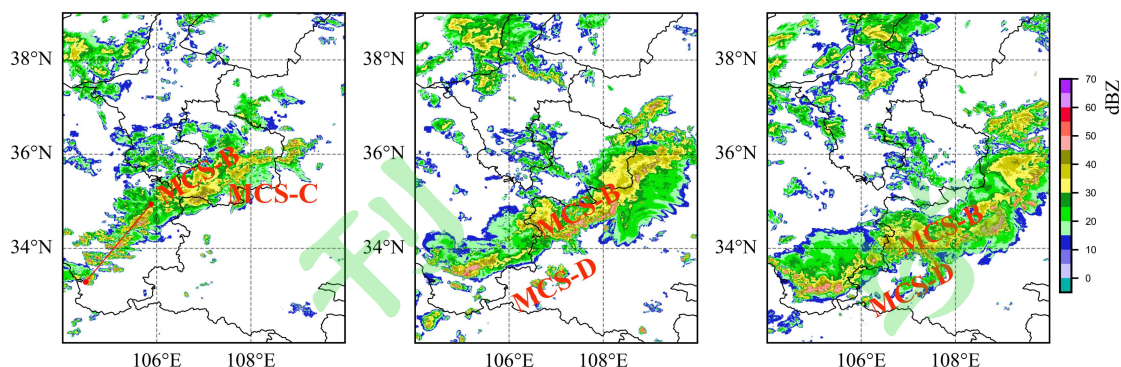


图7 2022年7月14-15日甘肃东部雷达组合反射率(a.14日23:36; b.15日00:36; c.02:12; d.03:30; e.04:48; f.09:30; g.12:18; h.15:24; i.16:12; j.17:18; k.20:00; l.22:00)演变(单位: dBZ)

Fig7. The evolution of radar combination reflectance in eastern Gansu on July 14-15, 2022(a.23:36 on 14th; b.00:36; c.02:12; d.03:30; e.04:48; f.09:30; g.12:18; h.15:24; i.16:12; j.17:18; k.20:00; l.22:00 on 15th)(Unit: dBZ)

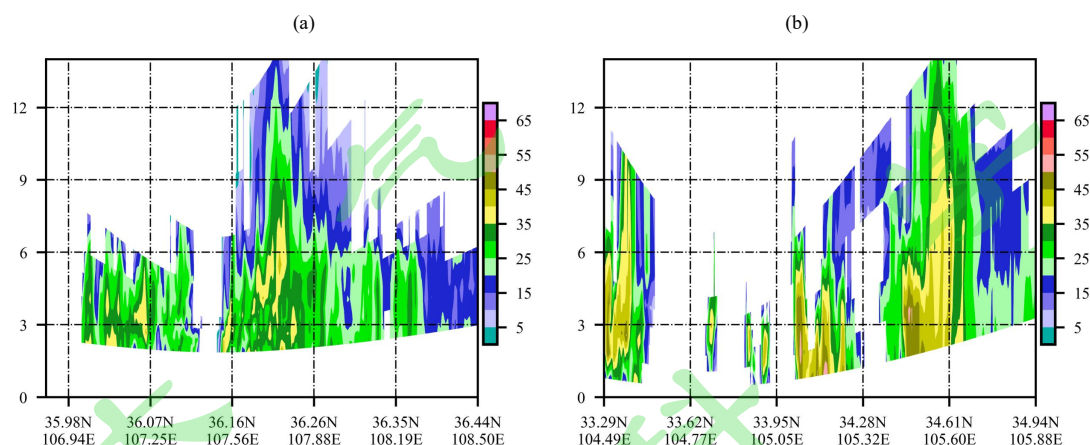


图8 2022年7月15日04:48西峰雷达、17:18陇南雷达分别沿图7e和7j中红线所在位置的垂直剖面图(单位: dBZ)

Fig8. Vertical profiles of Xifeng radar along the red line in Fig7.e at 04:48 and Longnan Radar along the red line in Fig7.j at 17:18 on July 15, 2022 (unit: dBZ)

图8选取了暖区降水和斜压锋生阶段对流发展最为旺盛的时次对比分析了MCS的垂直结构,可以看出前者呈低质心、低顶高的热带型降水结构(图8a),而后者则表现为具有一定回波悬垂的大陆型降水结构(图8b)。在相同的反射率因子下,热带型降水回波可以产生比大陆性回波更强的短时强降水(俞小鼎等,2020),这是MCS-A产生的雨带1降水最强的原因之一。

通过MCS(图7)与雨带(图2)的发展对比还可以看出,雨带1由MCS-A造成,而雨带2、3、4则分别发生在MCS-B触发、MCS-B与MCS-C合并发展成蛇线、断裂的蛇线与MCS-D合并阶段。MCS-A的云顶结构呈独立发展起来的近MCC结构的准椭圆形云团,冷中心生成于云体后部,中低层对流结构呈准静止后向建立形态,列车效应突出。而其余三个MCS的云顶结构表现为合并起来的呈带状的中尺度持续拉伸型对流系统,冷云中心偏于

云体前部，移动迅速，中低层对流结构属尾随层状形态。

4 对流系统的触发机制

深厚湿对流（Deep Moist Convective, DMC）的触发一直是强对流天气预报的难点问题，根据对流触发的高度，可分为地基对流和高架对流。我国的高架对流主要由 850-700hPa 的切变线触发（刘洲洋等，2018），而地基对流触发机制极其复杂，边界层辐合线（出流边界、干线、冷锋、由下垫面热力差异造成的辐合线等）、地形的作用、重力波等都可触发对流，且往往是多个因子共同影响的结果（郑永光和陈炯，2022）。研究表明，不同类型辐合线相遇（如冷锋与出流边界、出流边界与干线、出流边界之间的相互作用与环境暖湿气流形成的“三重点”）、发生“碰撞”或与对流风暴相互作用，可以导致动、热力强迫机制增强，因此有利于对流的触发（陈明轩等，2017；Falk and Van，2023）。此外，冷池边界附近的局地温湿扰动也是对流触发的有利因素（苏爱芳等，2022）。下面对此次过程 MCS 的触发机制进行对比分析。

4.1 MCS-A 的触发

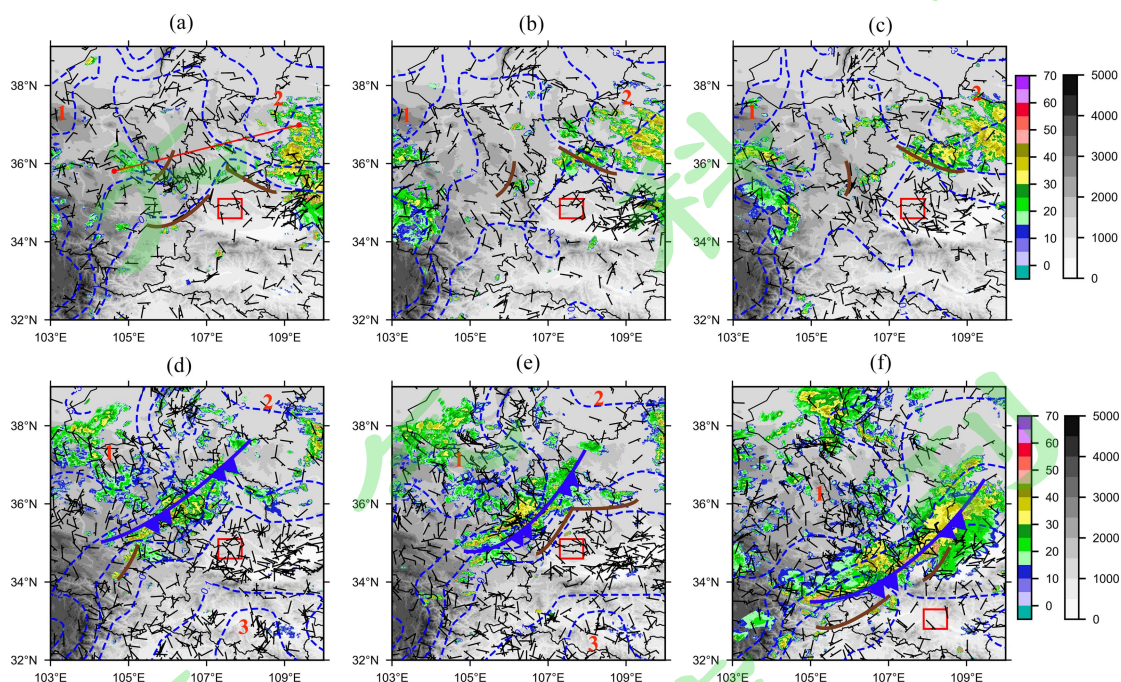


图9 2022年7月14日23时-15日20时地面冷池（蓝线，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ）、风场（风羽，单位： $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ）、辐合线（棕线）、冷锋（蓝色三角线）、临近时次雷达反射率因子（彩色填充区，单位： dBZ ）的变化情况及地形高程（灰色填充区，单位： m ）

（a.14日23时；b.15日02时；c.04时；d.14时；e.16时；f.20时）

Fig9.The change of surface cold pool(blue line,Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), wind(barb,Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),convergence line(brown line),cold front(brow

n triangle line), the radar reflectivity factor(color filled area,Unit: dBZ)of the approaching time(a.23:00 on 14th;b.02:00 on 15th;c.04:00;d.14:00;e.16:00;f.20:00)and topographic elevation (gray filled area, Unit: m)

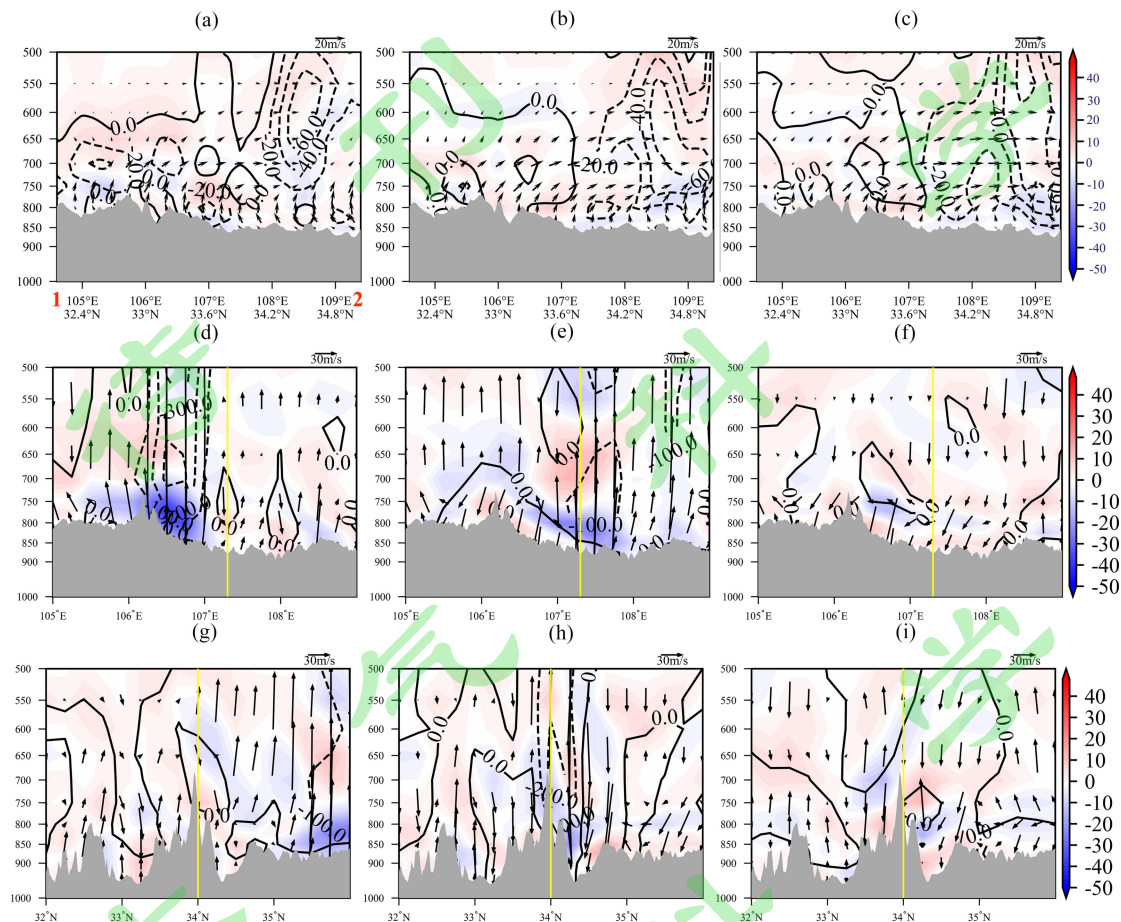
14 日 23 时 (图 9a), 由于前期降水的影响, 在特大暴雨区的上、下游形成了两个呈犄角之势分布的冷池 1、2, 其前侧出流的东、西两路冷空气与倒槽东侧的西南暖湿气流交汇, 形成了呈 Ω 型分布的冷池边界和两条“八”字型地面辐合线, 特大暴雨区主要集中在冷池 2 边界附近。通过梯度对比发现冷池 2 较冷池 1 明显偏强, 在其出流边界(辐合线)的抬升下, 庆阳市中部的线状对流开始触发并因冷池的阻挡作用而移动缓慢。而冷池 1 强度弱, 西南暖湿气流在其边界附近转向、北上, 在六盘山南侧附近与冷空气辐合, 触发对流新生。之后, 新生对流在承载层气流引导下沿着六盘山坡下山减弱, 与下游冷池边界“碰撞”后增强并“追上”老的对流回波而发展增强。这种上、下游冷池挟持暖空气的形势长时间维持, 期间冷池边界的位置略有北抬, 但对流回波总是位于冷池 2 出流边界附近(图 9b-c), 直到冷锋抵达甘肃东部才有所变化。

沿上、下游冷池走向(图 9a 红线所在位置)做散度、垂直速度和流场的垂直剖面(图 10a-c), 发现在两个冷池之间存在一定的弱辐合和上升运动区, 且越靠近下游冷池边界, 辐合上升运动越强。采用露点温度和对局地温湿状况变化较为敏感的 CAPE (郑永光等, 2017) 分析热力强迫机制(图 11a-c), 发现在两个冷池边界附近露点温度梯度较大, 存在一定的中尺度锋生效应, 且下游冷池出流边界附近的锋生作用明显偏强。而冷池附近的 CAPE 为 $100\sim 300\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$, 存在一定弱温湿扰动, 有利于降低 LCL, 触发对流。

4.2 MCS-B、C、D 的触发

15 日 09 时(图略)开始, 700hPa 切变线位于宁夏与甘肃交界处, 在其影响下 MCS-B 开始触发, 而冷池 1 随着冷锋东移开始明显增强并向东扩展, 在其出流边界附近触发多个对流单体, 使得 MCS-B 的南段快速发展, 而其北段则趋于减弱。14 时(图 9d), 700hPa 切变线东移影响庆阳市西北部至天水西部(图 4e), 冷锋位置则落后于切变线(图 4f), 使得中低层的干冷空气叠至在地面暖湿空气之上, 层结不稳定性明显增大, 与之对应 MCS-B 的北段迅速发展增强。此时在锋后强冷空气的补充下, 冷池 1 明显增强, 冷池 2 则有所减弱, 同时在四川东南部-陕西南部又形成了一个弱冷池 3。到了 16 时(图 9e), 冷锋开始影响庆阳市中部超前于 700hPa 切变线, 冷池 1 进一步增强并与冷池 2 边界汇合, 形成了两条呈“人”字型分布辐合线, 受其影响 MCS-C 开始触发。此时冷锋与冷池边界的距离不足 20km, 它们与环境暖湿气流共同构成了“三重点”结构使得 MCS-B 和 MCS-C 汇合后剧烈发展。到了 20 时, 冷池 3 减弱, 其与冷池 1 的边界汇合形成了两个东北-西南面对峙的出流边界, 在

367 出流边界附近分散着多个中小尺度辐合线，MCS-D 开始触发。此时，出流边界与冷锋之间
368 仍呈“三重点”结构。



369 图 10 2022 年 7 月 14-15 日 MCS-A 触发阶段 (a.14 日 23 时; b.15 日 02 时; c.04 时) 沿地面冷池走向 (图 9a 红线)、MCS-C
370 触发前后 (d.14 时; e.16 时; f.18 时) “三重点”所在位置 (35.8° E, 黄线) 的纬向、MCS-D 触发前后 (g.16 时; h.20 时; i.16
371 日 02 时) “三重点”所在位置 (107.25° E, 黄线) 的经向垂直速度 (线条, 单位: $10^{-2} Pa \cdot s^{-1}$)、散度 (填色区, 单位: $10^{-5} s^{-1}$)
372 和流场 (矢量, 单位 $m \cdot s^{-1}$) 的垂直剖面图

374 Fig10. The vertical profile of vertical velocity (line, unit: $m \cdot s^{-1}$), divergence (color filling zone, unit: s^{-1}) and flow field (vector, unit: $m \cdot s^{-1}$)
375 along the trend of the surface cold pool from (red line in Fig 9a) during the triggering of MCS-A (a.23:00 on 14th; b.02:00 on
376 15th; c.04:00; d.14:00; e.16:00; f.20:00), and the vertical distribution of meridional and zonal of the “threepoint” during the triggering of
377 MCS-C (e.14:00; f.16:00; g.20:00) and MCS-D (g.16:00; h.20:00; i.02:00 on 15th) on July 14-15, 2022

378 分别沿着 MCS-C 和 MCS-D 触发阶段的“三重点”所在位置做动力因子的纬向 (图 10d-f)
379 和经向 (图 10g-i) 的垂直剖面图, 可以看出随着“三重点”的建立, 其附近的辐合上升运动
380 显著增强。而热力强迫影响方面, 从 14 时开始 (图 10d-f), 庆阳市东南部、陕西西南部和
381 甘肃南部就形成了几个分散的 $2500 J \cdot kg^{-1}$ 以上的 CAPE 大值区和 $24^{\circ}C$ 以上的高露点温度中
382 心, 且随着时间推移, 高露点温度区对的范围不断扩大, CAPE 也明显增大。

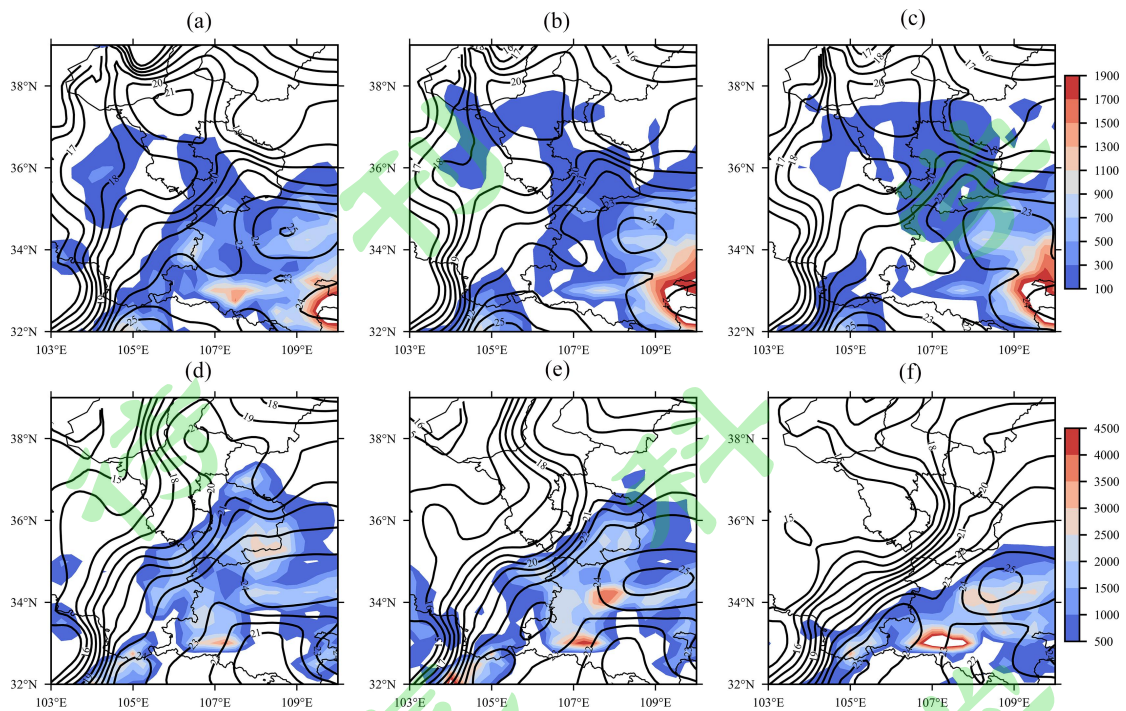


图 11 2022 年 7 月 14-15 日地面露点温度（线条，单位： $^{\circ}\text{C}$ ）和对流有效位能（填色区，单位： $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）的空间分布(a.14 日 23 时；
b.15 日 02 时；c.04 时；d.14 时；e.16 时；f.20 时)

Fig11. The spatial distribution of surface dew point temperature (line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and convective effective potential energy (color region, unit: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) on July 14-15, 2022 (a.23:00 on 14th; b.02:00 on 15th;b.04:00;d.14:00;e.16:00;f.20:00)

5 MCS 的维持机制

5.1 MCS-A 的维持机制

5.1.1 平流和传播作用的相互影响

除了有利的环境、水汽和不稳定能量条件外，降水的持续时间也是影响暴雨的重要因素（Doswell et al,1996）。多单体风暴的移动受到了承载层气流（平流）和新生对流发展（传播）方向的共同影响，当平流和传播之间的夹角 $<90^{\circ}$ 时为前向传播，夹角 $>90^{\circ}$ 时则称为后向传播（俞小鼎等，2020）。对 MCS-A 而言，平流和传播对于处在不同生命阶段的对流风暴作用并不相同（图 13a）。新生的对流风暴向东北方向移动的过程中前向传播（图 10a-e），平流和传播的作用相叠加使其移动迅速；而对于成熟和消亡的对流风暴而言，平流与传播的作用则互相抵消而移动缓慢（韦惠红等，2022），这也为新的对流回波“追上”老的回波提供了有利条件，故 MCS-A 生命史较长。

5.1.2 冷池出流和垂直风切变的作用

402
403

表 1 2022 年 7 月 14 日 20 时-15 日 11 时逐 3 小时地面冷池 2 与低层垂直风切变的变化情况

Table1.The 3hour change of surface cold pool 2 and vertical wind shear at low level from 20:00 on 14 to 11:00 on 15,July,2022

时间	$\Delta p/hPa$	$T_{2m}/^{\circ}C$	$\rho/(kg \cdot m^{-3})$	$C/(m \cdot s^{-1})$	$U_{0-3km}/(m \cdot s^{-1})$	C/U_{0-3km}
14 日 20 时	0.3	17	1.208	7.05	10.6	0.66
14 日 23 时	0.5	18	1.204	9.11	10.1	0.90
15 日 02 时	0.5	18	1.204	9.11	9.9	0.92
15 日 05 时	0.1	17	1.208	4.98	11.3	0.36
15 日 08 时	0.1	18	1.204	4.08	11.5	0.35
15 日 11 时	0.2	20	1.195	5.79	8.5	0.66

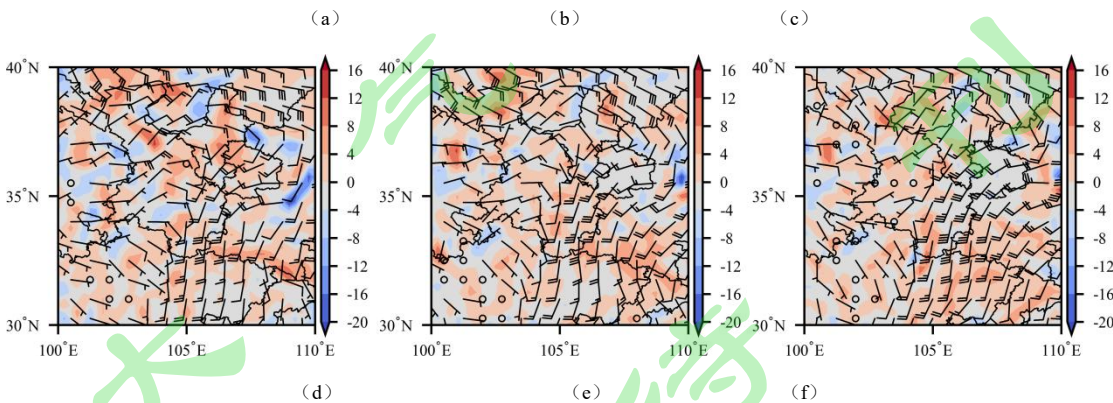
404

405 表 1 分析了 14 日 20 时-15 日 11 时冷池 2 出流边界的扩张速度和其附近低层垂直风切变的
406 逐 3 小时变化情况，7 月 14 日 20 时，冷池 2 强度相对较弱，其边界扩张速度为 $7.05m \cdot s^{-1}$
407 弱于冷池低层垂直风切变 $10.6m \cdot s^{-1}$ ，对流较弱以层状云回波为主（图略）。14 日 23-15 日
408 02 时，MCS-A 的冷池边界扩张速度为 $9.11m \cdot s^{-1}$ ，与低层垂直风切变的扩张速度相当，有利
409 于对流向垂直方向伸展、增强。15 日 05 时以后，冷池边界的扩张速度骤降，其造成的负涡
410 度明显小于低层的垂直风切变造成的正涡度，使得对流回波向前倾斜，不利于对流维持。

411 5.1.3 低空急流的作用

412 MCS-A 发展期间，700hPa 来自四川盆地东部的西南气流向北输送水汽和不稳定能量过
413 程中，其风速发生了两次脉动。14 日 20 时（图 12a）大风速轴北抵陇南，庆阳位于其东北
414 侧风速 $< 8m \cdot s^{-1}$ ；23 时风速轴东移至庆阳南部，风速增大至 $10m \cdot s^{-1}$ (图 12b)；到了 15 日 02
415 时低空急流建立并稳定维持到 15 日 10 时（图 12c）。在此期间，700hPa 的水汽通量持续增
416 强、水汽通量散度（图 12d-f）和散度则减小(图 12a-c)，表明低空急流的风速脉动使得水汽
417 条件和上升运动增强，为暴雨的维持提供了有利条件。

418



419
420

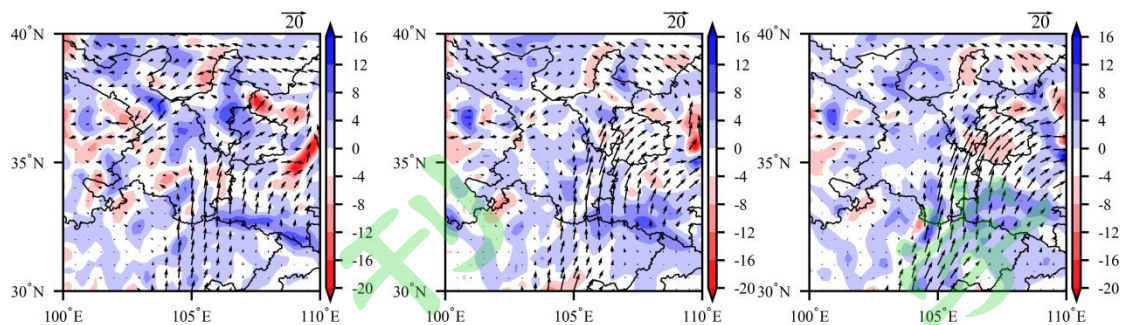


图 12 2022 年 7 月 14 日 20 时 (a、d)、23 时 (b、e) 和 15 日 02 时 (c、f) 700hPa 动力条件 (a-c, 风矢为风场, 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 彩色填充区为散度, 单位: 10^{-5}s^{-1}) 和水汽条件 (d-f, 彩色填充区为水汽通量散度, 单位: $10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$; 箭头为水汽通量, 单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig12.The dynamic (a-c,wind vector is wind,Unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;color shaded is divergence;Unit: 10^{-5}s^{-1}) and water vapor conditions(d-f,color shaded is water vapor flux,Unit: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$;arrow is water vapor flux divergence,Unit: $10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) of 700hPa on July 14 at 20:00(a,d), July 15 at 02:00(b,e)and July 15 at 05:00(c,f)

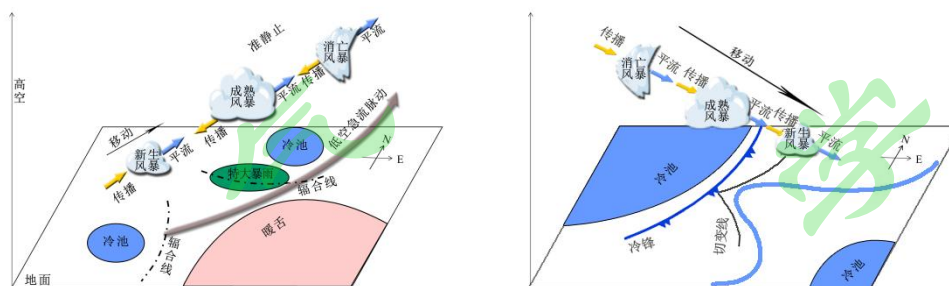


图 13 MCS-A (a)、MCS-B 和 MCS-C (b) 合并阶段引发强降水的概念模型

Fig13. Conceptual model of heavy precipitation induced by MCS-A (a), MCS-B and MCS-C (b) merging phase

由此可知,冷池、垂直风切变和低空急流之间建立了一种地面触发对流、低空补充水汽和动力条件并组织化对流的机制,使得 MCS-A 移动缓慢(图 13a)。

5.2 MCS-B、C、D 的维持机制

5.2.1 平流和传播的相互影响

对于 MCS-B、C、D 而言,处于消散、成熟和新生阶段的对流风暴在东移过程中均是前侧建立的(图 12b),平流和传播的作用使得移动速度大于平流速度而快速地向东南方向移动,故此阶段的累积降水量远远小于 MCS-A 影响阶段。

5.2.2 冷池出流和垂直风切变的作用

表 2 2022 年 7 月 15 日 14 时-16 日 02 时逐 3 小时地面冷池 1 与低层垂直风切变的变化情况

Table1.The 3hour change of surface cold pool 1 and vertical wind shear at low level from 14:00 to 20:00 on 15,July,2022

时间	$\Delta p/\text{hPa}$	$T_2\text{m}/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_{0-3\text{km}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$C/U_{0-3\text{km}}$
15 日 14 时	0.5	19	1.218	9.06	7.8	1.16
15 日 17 时	0.8	18	1.204	11.53	10.2	1.13
15 日 20 时	1.7	17	1.208	16.78	14.4	1.41

15 日 23 时	2.8	21	1.19	21.69	15.2	1.42
16 日 02 时	0.1	21	1.19	4.09	9.8	0.42

表 2 分析了 15 日 14 时-16 日 02 时冷池 1 边界的扩张速度与其附近低层垂直风切变的变化情况,可以看出,在 MCS-C 触发并与 MCS-B 合并发展至飚线阶段、断裂的飚线与 MCS-D 合并再次发展增强阶段,冷池边界的扩张速度基本与垂直风切变相平衡,有利于对流在垂直方向充分发展。而到了 16 日 02 时,之后冷池边界的扩张速度迅速减慢,冷切比骤降低至 0.42,使得对流趋于减弱消散。

5.2.3 水汽、层结及动力条件分析

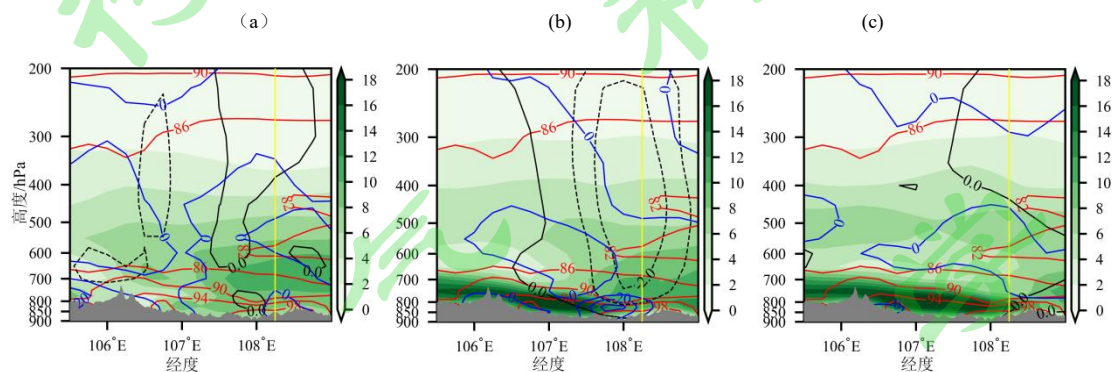


图 14 2022 年 7 月 15 日 13 时、17 时及 20 时沿固城(黄色实线所在位置)站假相当位温(红线,单位: $^{\circ}\text{C}$)、锋生函数(蓝线,单位: $\text{K}\cdot(3\text{h})^{-1}\cdot(100\text{km})^{-1}$)、垂直速度(黑线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)及水汽通量(色斑区,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)的纬向剖面图

Fig14. The zonal profile of potential pseudo-equivalent temperature(red line,unit:K),frontogenesis function(blue line,unit:K·(3h)⁻¹·(100km)⁻¹),vertical velocity(black line,unit:Pa·s⁻¹) and water vapor flux (color shaded,unit:g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹)along Gucheng station (yellow line) at 13:00(a),17:00(b)and 20:00(c) on July 15, 2022

选取雨带 3 上雨量最强的固城站 ($35.85^{\circ}\text{N},108.23^{\circ}\text{E}$) 做纬向垂直剖面分析斜压锋生降水阶段水汽和动力抬升机制的变化情况,发现此阶段的 MCS 主要通过中低层较强的水汽输送、锋生作用及中高层冷空气的侵入,配合多尺度天气系统造成的上升运动而维持。15 日 13 时, $105^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{E}$ 范围内对流层中低层水汽通量达 $7\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 以 106.5° 附近为分界线, 700hPa 以下其西侧为正锋生函数大值区, 其东侧则为假相当位温大值区, 而 300-500hPa 之间 84°C 的假相当位温低值区叠置在底层的高值区之上, 说明有冷空气侵入, 层结的对流不稳定较强。15 日 17 时, 整层水汽通量变化较小, 但 700hPa 以下假相当位温和锋生函数的大值区则移至固城站附近, 中层干侵入的方位也向东收缩。到了 15 日 20 时, 中低层假相当位温和锋生函数明显减弱、低层的水汽通量大值区和干侵入的范围、高度明显东缩甚至转为逆温结构, 层结较为稳定, 故该站降水趋于结束。

6 结论与讨论

利用常规观测资料、再分析数据、雷达和卫星观测数据，以环境场特征、结构形态、触发维持机制为切入点，详细比较了引发 2022 年 7 月 15-16 日日甘肃东部强降水过程的多个 MCS 的差异，并构建了该地区 MCS 型暴雨的概念模型。结果表明：

（1）依据时间前后顺序，此次过程依次由影响宁夏南部-陕北的准静止性 MCS-A、相继东移影响甘肃东南大部的 MCS-B、甘肃陇东东部局地发展起来的 MCS-C 和陕西西部的断线状 MCS-D 造成，共形成了 4 条形态迥异的雨带。

（2）MCS-A 发生在中等强度 CAPE、低 LCL 和 LFC、中低层有较强暖湿气流输送的暖区降水（15 日 00-13 时）阶段，其产生的雨带 1 范围小、累积雨量大、对流性强且变化平稳，为过程最强，陇东的极端特大暴雨主要发生在此阶段。而另外三个移动性的 MCS 则发生在高 CAPE、高 LCL 和 LFC、地面冷锋及辐合线、700hPa 切变线等多尺度天气系统影响的斜压锋生（15 日 14 时-16 日 02 时时）阶段，其中雨带 2 由触发阶段的 MCS-B 产生，为过程最弱，而雨带 3 和 4 则分别发生在 MCS-B 与 MCS-C 合并并发展为飑线、飑线断裂后与 MCS-D 合并后再次增强阶段，范围和强度均较强。

（3）MCS-A 的云顶结构呈孤立发展起来的近 MCC 结构的准椭圆形云团，冷云中心偏于云体后部，移动缓慢，其中低层对流结构呈准静止后向建立形态，列车效应突出；而其余三个移动性 MCS 在云顶上合并为 α 中尺度持续拉伸型对流系统，其中低层对流结构呈尾随层状形态，前向传播。

（4）MCS-A 的发展期间，地面上两个呈犄角之势的冷池长时间维持。MCS-A 由下游冷池 2 的出流边界、上游冷池 1 阻挡转向产生的辐合、中尺度锋生及弱温湿扰动等作用触发，后通过冷池与低层垂直风切变相平衡、低空急流的风速脉动、平流与传播互相抵消等机制长时间维持。

（5）MCS-B 由 700hPa 切变线触发，之后在不同性质地面辐合线形成的“三重点”和较强的温湿扰动作用下先后触发 MCS-C 和 MCS-D，并通过它们之间的多次合并、中低层较强的水汽输送和锋生作用、中高层的冷空气侵入而维持。

孙继松等（2013）提出了一种“列车效应”型多单体风暴的触发维持机制，认为此类风暴往往与惯性重力波的激发和传播、低空急流等因素有关。本研究表明，MCS-A 的发展存在一定的周期性，似乎说明此次过程中重力波也发挥了一定的作用，但限于研究资料、认识水平等的限制，有待借助高分辨率的数值模式及多源观测资料进行深入研究。此外，本文基于个例提出了的两类甘肃东部 MCS 型暴雨的概念模型，其适用性有待更多暴雨事件的验证。

499 参考文献

- 500 Chen Qian, Fan Jiwen, Hagos Samson, et al. 2015. Roles of wind shear at different vertical levels: Cloud system organization and properties[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,120(13): 65
501 51–6574. doi:10.1002/2015JD023253
- 502 Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. 1996. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology[J]. *Weather and Forecasting*,11(4): 560-581.doi: 10.1175/1520-0434(1996)011<0560:FFFAIB>2.
503 0.CO;2
- 504 Falk N M, Susan C., Van d H S C. 2023. Environmental Modulation of Mechanical and Thermodynamic
505 Forcing from Cold Pool Collisions[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*,80(2): 375-395. doi: 10.
506 1175/JAS-D-22-0020.1
- 507 Gallus, William A.,Snook, et al.2008.Spring and Summer Severe Weather Reports over the Midwest as a
508 Function of Convective Mode: A Preliminary Study[J]. *Weather and Forecasting*,23(1): 101-113. doi:
509 10.1175/2007WAF2006120.1
- 510 Jake P M, Stephen W N, Robert J T. 2019. A Case Study of Terrain Influences on Upscale Convective
511 Growth of a Supercell[J]. *Mon. Wea. Rev.*,147(12): 4305-4324. doi: 10.1175/MWR-D-19-0099.1
- 512 Laing A G, Fritsch J M. 2000. The Large-Scale Environments of the Global Populations of Mesoscale C
513 onvective Complexes[J]. *Monthly Weather Review*,128: 2756-2776. doi:10.1175/1520-0493(2000)128<
514 2756:TLSEOT>2.0.CO;2
- 515 Parker M D, Johnson R H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J].
516 *Mon. Wea. Rev.*, 128(10): 3413-3436. doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<3413:OMOMMC>2.0.CO;2
- 517 Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A Theory for Strong, Long-Lived Squall Lines[J].*Journal o*
518 *f the Atmospheric Sciences*,45(3):463-485. doi:10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSLN>2.0.CO;2
- 519 Schumacher R S, Johnson R H. 2006. Characteristics of U.S. extreme rain events during 1999-2003[J]. *W*
520 *ea. Forecast.*, 21(1): 69-85. doi: 10.1175/WAF900.1
- 521 Schumacher R S, Johnson R H. 2008. Mesoscale Processes Contributing to Extreme Rainfall in a Midlatit
522 ude Warm-Season Flash Flood[J].*Mon. Wea. Rev.*,136(10): 3964-3986. doi:10.1175/2008MWR2471.1
- 523 Schumacher R S, Rasmussen K L. 2020. The formation, character and changing nature of mesoscale conv
524 ective systems[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*,1(6): 300-314. doi: 10.1038/s43017-020-0
525 057-7
- 526 Weckwerth T M, Parsons D B. 2006. A review of convection initiation and motivation for IHOP_2002
527 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134 (1): 5–22. doi: 10.1175/MWR3067.1
- 528 Zheng L, Sun J, Zhang X, et al. 2013. Organizational modes of Mesoscale Convective Systems over Cen
529 tral East China[J].*Wea. Forecast.*, 28(5): 1081-1098. doi: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00088.1>
- 530 陈明轩, 肖现, 高峰. 2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应[J].*大气科学*, 4
531 1 (5): 897–917. Chen Mingxuan, Xiao Xian, Gao Feng. 2017. Dynamical effect of outflow bounda
532 ry on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing–Tianjin–Hebei r
533 egion [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (5): 897–917. doi:10.3878/j.iss
534 n.1006-9895.1702.16101
- 535 陈涛, 张芳华, 符娇兰, 等. 2020. 2014年5月8—9日引发珠江口区域强降水的两个长生命史 MCS 特征
536 分析[J]. *气象*,46(4): 449-461.Chen Tao, Zhang Fanghua, Fu Jiaolan,et al. 2020. Analysis of Two S
537 uccessive Rainstorm Induced Long Lived Mesoscale Convective Systems Struck Pearl River Estuar
538 y During 8-9 May 2014[J]. *Meteor Mon*,46(4):449-461. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.04.001
- 539 谌芸, 孙军, 徐珺, 等. 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考 (一) 观测分析及思考[J].*气象*,38 (10):
540 1255-1266. Chen Yun, Sun Jun, Xu Jun, et al. 2012. Analysis and Thinking on the Extremes of t

he 21 July 2012 Torrential Rain in Beijing PartI:Observation and Thinking[J]. Meteor Mon,38(10):1255-1266. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.10.012

冯晋勤, 卢荟荟, 赖巧珍, 等. 2022. 福建西部山区一次中尺度对流系统触发机制分析[J].干旱气象,40(1): 62-72.Feng Jinqin,Lu Yunyun,Liao Laizhen,et al. 2022. Analysis of trigger mechanism of a mesoscale convective system in western mountainous area of Fujian[J]. Journal of Arid Meteorology,40 (1): 62-72. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-01-0062

黄晓璐, 李瑞青, 李林惠, 等. 2022. 内蒙古河套地区一次对流暴雨的中尺度对流系统演变特征[J].干旱区研究, 39(6): 1728-1738. Huang Xiaolu, Li Ruiqing, Li Linhui, et al. 2022. Various characteristics of the mesoscale convection system of a convective rainstorm in the Hetao area of Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 39(6): 1728-1738. doi: 10.13866/j.azr.2022.06.04

黄玉霞, 王宝鉴, 王勇, 等. 2017. 短时强降水等级:DB62/T2755-2017[S].兰州:甘肃省质量监督局. Huang Yuxia, Wang Baojian, Wang Yong, et al. 2017. Registration of short-term heavy precipitation:DB62/T2755-2017[S]. Lanzhou:Gansu Quality Supervision Bureau.

李渝平, 农孟松, 梁维亮, 等. 2020. 基于 RKW 理论的广西一次飑线过程演变特征分析[J].自然灾害学报,29(2): 161-172. Li Yuping, Nong Mengsong, Liang Weiliang, et al. 2020. Analysis on evolutionary characteristics of a squall line in Guangxi Province based on RKW theory[J]. Journal of Natural Disasters,29(2):161-172. doi:10.13577/j.jnd.2020.0217

刘洲洋, 俞小鼎, 王秀明, 等. 2018. 中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J].气象,44(2):258-267.Liu Zhouyang, Yu Xiaoding, Wang Xiuming, et al. 2018. Climatology of Cold Season Elevated Convection in Northern China[J]. Meteor Mon, 4(2): 258-267. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.005

冉令坤, 李舒文, 周玉淑, 等. 2021. 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, 45(6): 1366-1383.Ran Lingkun, Li Shuwen, Zhou Yushu, et al. 2021. Observational Analysis of the Dynamic, Thermal, and Water Vapor Characteristics of the “7.20” Extreme Rainstorm Event in Henan Province,2021[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),45(6):1366-1383. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2109.21160

苏爱芳, 郑永光, 张宁, 等. 2022. 边界层辐合线触发深厚湿对流研究进展[J]. 气象学报, 80 (2) : 177-189. Su Aifang, Zheng Yongguang, Zhang Ning, et al. 2022. A review of research on boundary convergence lines triggering of deep and moist convection[J]. Acta Meteorologica Sinica, 80 (2) :177-189. doi: 10.11676/qxxb2022.013

孙继松, 何娜, 郭锐, 等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学,37 (1): 137-148. Sun Jisong, He Na, Guo Rui, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 137-148. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12015

田荟君, 潘玉洁, 刘佳, 等. 2018. 2014 年 5 月 31 日华东地区一次暖区飑线过程的多普勒天气雷达分析[J].气象科学,38(2):191-202 Tian Huijun, Pan Yujie, Liu Jia, et al. 2018. Analysis on a squall line process in warm region of eastern China on May 31 2014 by Doppler radar[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 38(2):191-202. doi:10.3969/2017jms.0081

王晓芳, 崔春光, 2012. 长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析I: 组织类型特征[J].气象学报,81(5): 909-923.Wang Xiaofang,Cui Chunguang. 2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River.PartI:Organization mode features.[J]. Acta Meteor Sin, 81(5): 909-923. doi: 10.11676/qxxb2012.077

韦惠红, 黄小彦, 刘文婷, 等. 2022. 复杂山地下引发特大暴雨的准静止 MCS 观测分析[J]. 暴雨灾害, 41(3): 241-253. Wei Huihong, Huang Xiaoyan, Liu Wenting, et al. 2022. Analysis of quasi-stationary MCS causing extreme torrential rain event under complex mountains in Southwest Hubei[J]. Torrential

587 Rain and Disasters, 41(3):241-253. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2022.03.001
 588 徐明, 黄治勇, 高崎. 2018. 2016年5月20日广东信宜特大暴雨中尺度对流系统特征分析[J]. 暴雨灾害, 37
 589 (1):32-40. Xu Ming, Huang Zhiyong, Gao Qi. 2018. Analysis of mesoscale convective systems char-
 590 acteristics of torrential rain in Xinyi Guangdong province in 20th May 2016[J]. Torrential Rain and
 591 Disasters, 2018, 37(1):32-40. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2018.01.005
 592 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):
 593 1426-1438. Xu Shu, Dong Gaohong, Xiong Mingming. 2019. Impact of Cold Pool on Mesoscale Co-
 594 nvective System for Extreme Rainfall over Xinxiang on 9 July 2016[J]. Meteor Mon, 45(10):1426-1
 595 438. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.009
 596 徐姝, 易笑园, 熊明明, 等. 2024. 华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J]. 气象,
 597 50(2):181-194. Xu Shu, Yi Xiaoyuan, Xiong Mingming, et al. 2024. Comparative Analysis of Occurre-
 598 nce and Development of Multiple β -Meso Scale Convective Systems During a Localized Severe To-
 599 rrential Rain Event in North China[J]. Meteor Mon, 50(2):181-194.
 600 俞小鼎. 2013. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 32(3):202-209. Yu Xiaoding. 2013. Nowcas-
 601 ting thinking and method of flash heavy rain[J]. Torr Rain Dis, 32(3): 202-209. doi: 10.3969/j.issn.
 602 1004-9045.2013.03.002.
 603 俞小鼎, 王秀明, 李万莉, 等. 2020. 雷暴与强对流临近预报[M]. 北京:气象出版社, 115-116, 384. Yu Xiaodin-
 604 g, Wang Xiuming, Li Wanli, et al. 2020. Approaching thunderstorms and severe convection forecasts
 605 [M]. Beijing: China Meteorological Press, 115-116, 384.
 606 张兰, 陈炳洪, 张东, 等. 2023. 华南前汛期一次锋前暖区暴雨成因及中尺度对流系统分析[J]. 热带气象学
 607 报, 2023, 39(5): 697-710. Zhang Lan, Chen Binghong, Zhang Dong, et al. 2023. Analysis of Causa-
 608 tion and the Meso-scale Convective Systems in a Strong Heavy Rainfall in Warm Sector Ahead of
 609 Fronts in South China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 39(5): 697-710. doi: 10.16032/j.issn.1004-
 610 -4965.2023.061.
 611 张柳, 霍利微, 潘玉洁. 2020. 华东地区夏季中尺度对流系统的活动特征及成因研究[J]. 大气科学学报, 43(2):
 612 392-404. Zhang Liu, Huo Liwei, Pan Yujie, 2020. Research on the activity characteristics and the
 613 formation cause of MCS over East China in summer[J]. Trans Atmos Sci, 43(2):392-404. doi: 10.13
 614 878/j.cnki.dqkxxb.20170111001
 615 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 2017. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 43(6): 641-652. Zheng Yong-
 616 guang, Tao Zuyu, Yu Xiaoding. 2017. Some essential issues of severe convective weather forec-
 617 asting[J]. Meteor Mon, 43(6): 641-652 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.00
 618 1
 619 郑永光, 陈炯. 2022. 大气湿对流的类型和深厚是对流触发机制综述[J]. 北京大学学报(自然科学版), 58(6):
 620 1141-1152. Zheng Yongguang, Chen Jiong. 2022. Review of Atmospheric Moist Convection Catego-
 621 ries and Triggering Mechanism of Deep Moist Convection[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universi-
 622 tatis Pekinensis, 58(6): 1141-1152. doi: 10.13209/j.0479-8023.2022.093
 623 周月华, 彭涛, 史瑞琴. 2019. 我国暴雨洪涝灾害风险评估研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5):494-501. Zhou Yue-
 624 hua, Peng Tao, Shi Ruiqin. 2019. Research progress on risk assessment of heavy rainfall and flood
 625 disasters in China[J]. Torr Rain Dis, 38(5): 494-501. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.011
 626 卓鸿, 赵平, 李春虎, 等. 2012. 夏季黄河下游地区中尺度对流系统的气候特征分布[J]. 大气科学, 36(6):11
 627 12-1122. Zhuo Hong, Zhao Ping, Li Chunhu, et al. 2012. Analysis of climatic characteristics of m-
 628 esoscale convective system over the lower reaches of the Yellow River during summer [J]. Chinese
 629 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(6):1112-1122. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.1
 630 1174

631 曾波, 谌芸, 肖天贵, 2013. 我国中东部地区夏季 MCS 统计分析[J]. 气象, 39(2):180-185. Zeng Bo, Shen Yun,
632 Xiao Tiangui. 2013. Statistical Analysis of MCS in Summer in Central Eastern China[J]. Meteor M
633 on, 39(2):180-185. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.02.006.
634 曾波, 谌芸, 李泽椿. 2016. 中国中东部地区夏季中尺度对流系统发生前环境场特征[J]. 高原气象, 35 (2):
635 460—468. Zeng Bo, Chen Yun, Li Zechun. 2016. Characteristic of precursor environment of meso
636 scale convective system during summer in central-eastern China[J]. Plateau Meteorology, 35 (2) :
637 460—468. doi: 10. 7522/j. issn. 1000- 0534. 2015. 00003.