

罗江珊,李博,万夫敬,等.影响山东的MCC分型及其差异性特征[J].海洋气象学报,2024,44(3):87-94.
LUO Jiangshan, LI Bo, WAN Fujing, et al. Subtypes and their distinguishing features of MCCs affecting Shandong[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 87-94. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240119002. (in Chinese)

影响山东的MCC分型及其差异性特征

罗江珊¹, 李博², 万夫敬¹, 任兆鹏¹

(1. 青岛市气象局, 山东 青岛 266003; 2. 菏泽市气象局, 山东 菏泽 274000)

摘要 利用2007—2022年卫星资料、常规探测资料和ERA5资料,对影响山东的中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)的结构特征及降水分布进行分析。结果表明:(1)MCC多数在傍晚至次日凌晨发展成熟,早晨消亡,生命史较长,平均寿命为7h,生命史为6~8h的占88%。根据对流云团的生成源地和移动路径将MCC分为东移型、北上型和原地生成型,其中东移型最多。(2)MCC强降水与最低云顶亮温(也称黑体温度,black body temperature, TBB)和TBB梯度大值区密切相关。东移型MCC 500 hPa中高纬环流平直,强降水位于MCC的西—西北侧;北上型MCC环流为经向型,最强降水位于MCC的南—西南侧;原地生成型MCC引导气流弱,降水分布零散,范围小,分布在TBB梯度大值区。(3)东移型MCC和北上型MCC伴随冷暖空气交汇造成锋生,暖平流区中锋生最强区域通常对应降水大值中心,锋消区内无显著降水;而原地生成型MCC冷平流弱,强降水主要位于暖区一侧。

关键词 中尺度对流复合体(MCC); 短时强降水; 结构差异; 锋生函数

中图分类号: P458.2 **文献标志码**: A **文章编号**: 2096-3599(2024)03-0087-08

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240119002

Subtypes and their distinguishing features of MCCs affecting Shandong

LUO Jiangshan¹, LI Bo², WAN Fujing¹, REN Zhaopeng¹

(1. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 2. Heze Meteorological Bureau, Heze 274000, China)

Abstract The structural characteristics and precipitation differences of mesoscale convective complexes (MCCs) affecting Shandong are analyzed using satellite data, routine observations and ERA5 (ECMWF Reanalysis v5) data from 2007 to 2022. The results are listed below. (1) Most MCCs, developing and maturing from the evening to the early morning of the next day and then disappearing in the morning, have a long life history with an average lifespan of 7 h and 88% of 6–8 h. Based on the generation sources and moving paths of convective cloud clusters, MCCs can be classified into three types, namely eastward type, northward type and in-situ generating type, with the eastward type being the most frequent. (2) The strong precipitation in MCCs is closely related to the minimum cloud top brightness temperature (also referred to as black body temperature, TBB) and the areas of large TBB gradient. The

收稿日期: 2024-01-19; 修回日期: 2024-05-29

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2021MD010, ZR2021MD062, ZR2023MD118); 山东省气象局创新团队项目(SDCXTD2023-1); 山东省气象局科研项目(2022sdqxm08); 淮河流域气象开放研究基金项目(HRM201807); 青岛市气象局科研项目(2023qdqxz02)

第一作者简介: 罗江珊, 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事沿海灾害性天气机理研究, luo_jsh@126.com。

通信作者简介: 万夫敬, 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事强对流天气机理研究, 1005418392@qq.com。

500-hPa circulation of the eastward type in the mid-high latitudes is flat, and the strong precipitation is located on the west-northwest side of MCC; the circulation of the northward type is meridional, with the strongest precipitation located on the south-southwest side of MCC; the in-situ generating type has weak guiding airflow, scattered distribution and small range of precipitation and the precipitation is distributed in the areas of large TBB gradient. (3) The strong convergence of cold and warm air in the eastward type and northward type leads to frontogenesis, the strongest area of frontogenesis in the warm advection zone usually corresponds to the center of large precipitation, and there is no significant precipitation in the frontolysis zone. However, the cold advection of the in-situ generating type is weak, and the strong precipitation is mainly located on the warm side.

Keywords mesoscale convective complex (MCC); short-term heavy rainfall; structural difference; frontogenesis function

引言

短时强降水往往造成严重的自然灾害,预报预警难度较大^[1-3],而中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)是造成短时强降水的重要系统之一^[4-8]。MCC的概念由Maddox^[9-10]最早提出,定义为: $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积 $S_{-32} \geq 10 \times 10^4 \text{ km}^2$, $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积 $S_{-52} \geq 5 \times 10^4 \text{ km}^2$,持续时间 $t \geq 6 \text{ h}$,椭圆形偏心率 $p \geq 0.7$ 。国内外诸多研究表明,MCC常出现在全球的中纬度、副热带和低纬地区的暖季,强的对流不稳定、高温高湿及充足的水汽输送是MCC发生的有利环境^[11-18]。Laing等^[19]对5个MCC生成的大尺度环境进行研究,认为局地绝对湿度最大和静力稳定度最小适宜其形成。吕艳彬^[20]对6次MCC综合分析指出,华北平原MCC发生在移动性冷锋前的暖区中,对流层中层有短波槽活动,对流层高层为平直西风环流。范俊红^[21]分析表明,MCC形成阶段,中层出现暖中心并且气旋性涡度增大,辐合辐散运动随高度交替出现,量级相当。任丽等^[22]发现MCC发展的环境场较中尺度对流系统而言,中低层气旋涡度更大,高层辐散更强,即高层具有更强的抽吸作用,导致更强的上升运动。万夫敬等^[23]研究指出正涡度高值区、散度和垂直速度的负值中心重叠区等显著的动力条件,可导致MCC后向传播特征。

MCC作为可产生暴雨的一种特殊系统,强降水分布特征较为复杂。赵桂香等^[24-25]发现春季MCC形成阶段发展快、成熟期慢,具有前向传播的特点,降水较为稳定,雨团移动慢,暴雨主要由降水持续时间长造成;盛夏MCC形成慢、发展迅速,为后向传播,以对流性降水为主,雨团移动性强,暴雨主要由短时强降水造成。黄河中游地区MCC形成在低层比湿和能

量扰动的正值中心附近,在低层扰动梯度大值区,靠近正中心的区域发展成熟。刁秀广等^[26]认为强降水基本产生在云顶亮温(也称黑体温度,black body temperature, TBB)冷中心的西侧。钟晓平等^[27]对青藏高原东部地区MCC的降水特征进行研究,指出最大的降雨强度出现在初始阶段的后期和发展阶段的早期。然而,MCC的地域差异较大,目前针对山东地区MCC的形成发展机制及其造成强降水差异的原因分析相对较少。本文利用多种探测资料,采用天气学分析和动力诊断相结合的方法,较为系统地对山东地区MCC分型特点、空间结构特征及差异进行研究,以期对MCC强降水预报提供参考。

1 资料与研究方法

所用资料包括2007—2022年地面常规气象观测资料、ERA5资料(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)、风云2号(FY-2)卫星红外云图、云顶亮温(TBB)以及逐小时区域气象观测站降水资料等。根据Maddox^[9-10]提出的MCC定义标准,利用FY-2卫星TBB和卫星云图逐时或逐半小时资料,筛选影响山东地区的MCC个例。采用ERA5等资料,通过普查历史个例的云团发展演变规律和影响系统的特点等,对MCC进行分型并进行差异性特征分析,结合动力诊断方法,研究山东地区MCC强降水落区预报的关键技术。

2 MCC的基本特征和分型

通过对2007—2022年区域气象观测站逐时降水资料和卫星资料普查,筛选出MCC直接影响的强降水过程共24次(表1)。MCC出现频率年际变化大,其中2010年和2022年最多,均有5次。MCC的

月变化也较显著,有明显的季节性周期,绝大多数 MCC 出现在 5—8 月。96% 的 MCC 生成在夏季,7 月达到峰值,为 11 次,8 月和 6 月次之,均为 6 次,5 月为 1 次,其他月份没有发现产生 MCC。另外, MCC 的生消演变有明显的日变化特征,多数在傍晚前后至次日凌晨发展成熟,早晨前后消亡,生命史较

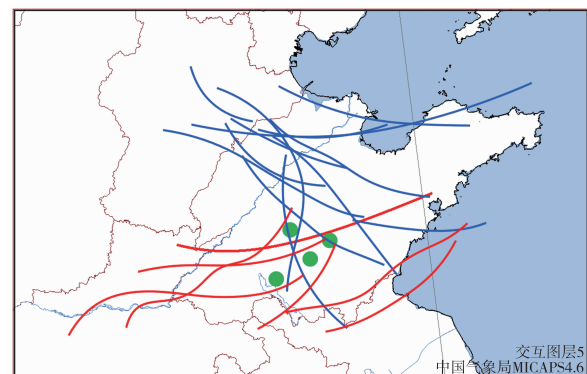
长。生命史为 6~8 h 的占 88%,最长达到 11 h,平均寿命为 7 h。MCC 成熟期 TBB 低,最低 TBB 在 205 K 以下的个例占 83%,最低值低于 180 K,最高值为 212 K。由降水来看,全部的 MCC 均已产生短时强降水,且大多为强对流性降水,雨强最大超过 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表 1 MCC 的持续时间、最强盛时刻 TBB 和分型

Table 1 Duration of MCC, TBB at the strongest moment of MCC and classification

MCC 出现的时段	持续时间/h	最强盛时刻 TBB/K	分型	小时最大降水量/mm
2007 年 7 月 18 日 18:00—19 日 00:30	6.5	180	东移型	81.6
2008 年 7 月 14 日 22:30—15 日 06:30	8.0	190	北上型	54.1
2009 年 7 月 13 日 16:30—23:00	6.5	193	北上型	89.5
2010 年 6 月 17 日 20:15—18 日 02:15	6.0	212	东移型	75.9
2010 年 6 月 22 日 20:15—23 日 03:15	7.0	202	东移型	60.8
2010 年 7 月 1 日 23:15—2 日 05:15	6.0	193	原地生成型	89.7
2010 年 8 月 4 日 17:15—5 日 02:15	9.0	180	东移型	93.0
2010 年 8 月 13 日 20:15—14 日 03:15	7.0	180	北上型	69.6
2011 年 5 月 20 日 03:30—09:30	8.0	200	北上型	75.4
2011 年 8 月 15 日 23:00—16 日 08:00	9.0	195	东移型	83.8
2012 年 7 月 22 日 22:30—23 日 09:30	11.0	196	东移型	66.9
2013 年 7 月 28 日 00:30—08:30	8.0	198	东移型	94.5
2013 年 8 月 16 日 17:30—23:30	6.0	201	东移型	66.3
2015 年 7 月 30 日 23:15—31 日 07:15	8.0	205	北上型	86.0
2016 年 6 月 13 日 22:00—14 日 04:00	6.0	208	东移型	72.8
2017 年 7 月 26 日 20:00—27 日 02:00	6.0	200	原地生成型	84.1
2018 年 6 月 13 日 02:00—08:00	6.0	207	东移型	26.9
2019 年 7 月 23 日 16:00—22:00	6.0	199	原地生成型	65.7
2020 年 8 月 2 日 01:00—07:00	6.0	208	原地生成型	79.8
2022 年 6 月 18 日 01:00—07:00	6.0	201	东移型	38.0
2022 年 6 月 22 日 22:00—23 日 04:00	6.0	200	北上型	73.6
2022 年 7 月 5 日 18:00—6 日 00:00	6.0	193	北上型	89.8
2022 年 7 月 12 日 06:00—13:00	7.0	196	东移型	80.6
2022 年 8 月 19 日 02:00—10:00	8.0	188	东移型	89.0

井喜等^[12]以 200 hPa 环流形势为依据给出了 MCC 天气学模型;赵桂香等^[24-25]同时结合 500 hPa 环流形势为辅助划分了副型。但通过对山东 MCC 强降水云图个例进行深入分析发现, MCC 初始对流云团的活动具有一定规律性,大多数 MCC 来自山东西部、西南部和南部地区。因此,根据影响山东的 MCC 初始对流云团的生成源地和移动路径(图 1),将影响山东地区的 MCC 主要分为 3 类,分别为东移型、北上型和原地生成型。其中,东移型最多,达 13 次,占 54%;北上型次之,为 7 次;原地生成型最少,为 4 次。



蓝色线—东移型;红色线—北上型;绿色圆点—原地生成型
(圆点标注其成熟期云团中心的平均位置)。

图 1 MCC 移动路径
Fig.1 Moving path of MCC

3 不同类型 MCC 的环流背景

3.1 东移型 MCC

东移型 MCC 初始对流云团由河北中南部、山东西部东移并发展进入山东境内(图 1), 此类过程主要影响系统为西风槽, 包含了受西风槽系统影响的极少数南下一个例(1 个)。以 2022 年 7 月 12 日过程为例, 分析其系统配置特点。12 日 00:00(图 2a), 200 hPa 南亚高压强盛, 呈带状分布, 其北支高空存在明显的西风急流, 急流核中心风速超过 $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 山东中北部地区处于高空强辐散区, 辐散中心强度在 $11\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 左右, 有利于深对流发展。500 hPa 环

流形势为纬向型(图 2b), 贝加尔湖一带有西风槽, 分裂小股冷空气南下, 引导气流较强, 500 hPa 西风风速超过 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)西伸控制长江中下游地区, 东亚沿海的高压脊与副高同位相叠加, 形成“东高西低”的环流形势。副高北侧多切变线和短波槽活动, 冷暖空气在黄淮地区交汇, MCC 形成于副高西北侧的西南气流之中。850 hPa, 山东西部—河北和山西一带有纬向型切变线, 切变线南侧西南气流发展强盛, 达到急流强度, 为暴雨区输送充沛的水汽和不稳定能量; 另外, 高低空急流的耦合为强降雨的发生发展提供有利的环境条件。

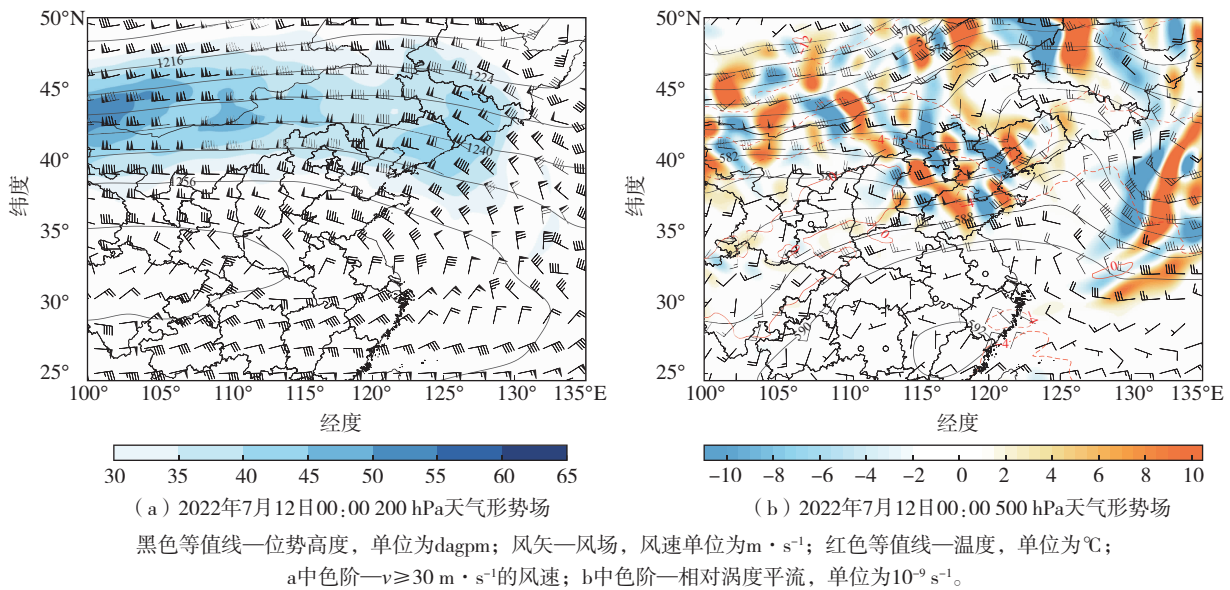


图 2 东移型 MCC 高空环流系统配置

Fig.2 High-level circulation system configuration of eastward-type MCC

强降雨开始前, 12 日 00:00, 河北中部和晋冀豫交界处有对流云团生成, 对应 850 hPa 假相当位温高能舌和比湿舌, 云团逐渐东移。01:00, 山东西部也有小的对流云团生成, 多处对流云团在东移过程中逐渐合并。05:00, 对流云团强烈发展, 范围扩大, 从不规则形状发展成团状, 云顶亮温为 $198\sim 203 \text{ K}$ 。06:00, 在山东境内发展成椭圆形的 MCC, TBB 最低为 198 K 。08:00—12:00, MCC 处于旺盛阶段, 偏心率接近于 1。最强降水中心位于 MCC 最低云顶亮温中心和 TBB 等值线梯度最大处(MCC 云团的西—西北侧), 旺盛阶段最大小时降水量达 80.6 mm (图 3a)。13:00 左右, 云团发生断裂, 中心分裂成 2 个小的对流系统, 由 MCC 减弱成中尺度对流系统,

结构变得松散, 尺度变小, 主体覆盖鲁中、鲁南和半岛中部地区。15:00 左右, 对流云团东移入海, 逐渐消亡。

3.2 北上型 MCC

北上型 MCC 主要影响系统是低涡或切变线, 其初始对流云团从山东的西南—南部一带向东北方向移入, 进而造成强降雨(图 1)。以 2022 年 7 月 5 日过程为例, 分析北上型 MCC 系统配置特点。5 日 14:00(图 4a), 200 hPa 中高纬为“西槽东脊”形势, 山东位于槽前脊后, 高空辐散, 鲁西南处于强辐散分流区, 辐散中心强度为 $14.5\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 利于深对流的发展。500 hPa 环流形势为经向型(图 4b), 有深厚低槽区从贝加尔湖伸到我国华南地区, 山东受南部

西风槽前偏南气流控制,引导气流强,此时副高较弱,中心位于海上,但是亚洲东岸有明显的高压脊,形成“东高西低”形势,有利于强降水的产生。配合500 hPa深槽,850 hPa上内蒙古—河北—河南一带有经向型切变线,高低层配置呈现后倾结构,为强降水的产生提供了整层增湿机制。

14:00前后,安徽、江苏一带有南北向分散的对流云团生成,逐渐合并加强北移。17:00前后,对流云团合并发展成西北—东南带状结构。18:00左右,对流云团的北部进入山东境内发展成近似圆形

的MCC,TBB最低为198 K。20:00—23:00,MCC偏心率逐渐接近于1,缓慢向东北移动。5日23:00—6日00:00,云团尺度变小,结构松散,主体入海逐渐消亡。随着MCC移动,降水的大值中心位于TBB低于213 K的冷云区中心附近及其南—西南侧,即最低云顶亮温中心及TBB梯度大值区(图3b)。对比东移型MCC,北上型MCC强降水分布范围广,单点雨强较强,5日21:00—22:00最大小时降水量达89.8 mm,其降水的分布倾向于云团的南侧和西南侧,而不是西北侧。

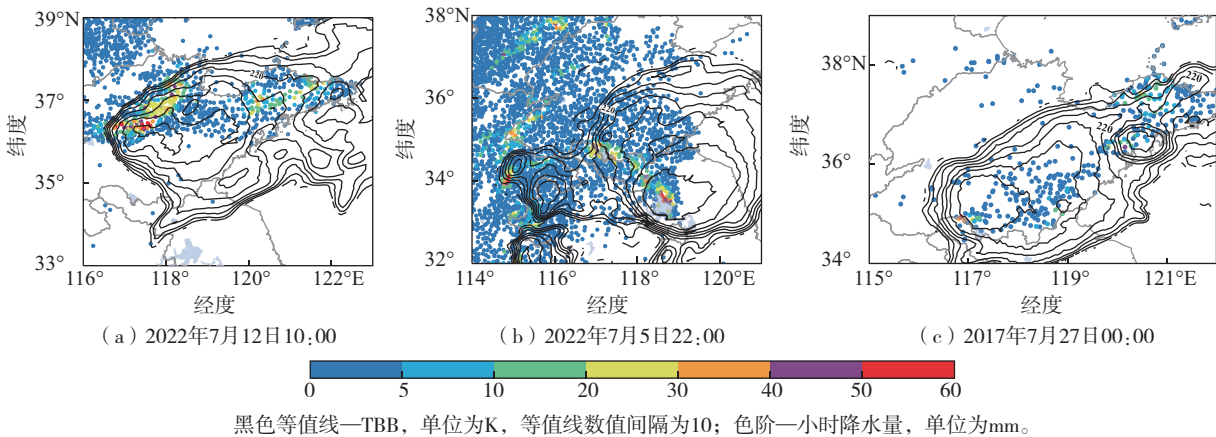


图3 卫星红外亮温叠加小时降水量
Fig.3 Satellite infrared brightness temperature and hourly precipitation

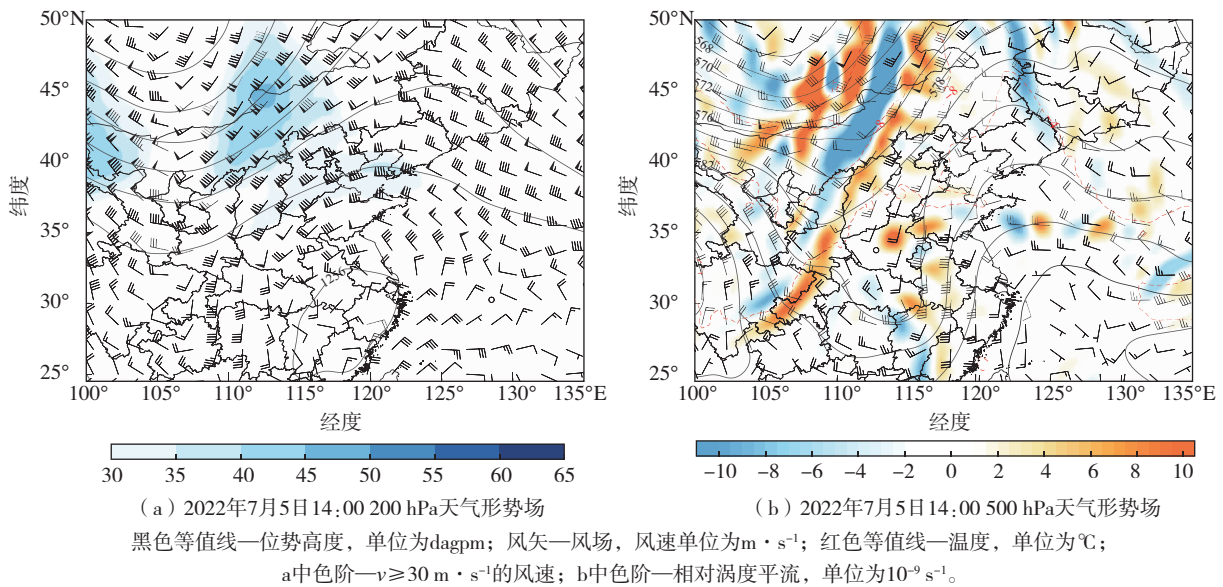


图4 北上型MCC高空环流系统配置
Fig.4 High-level circulation system configuration of northward-type MCC

3.3 原地生成型MCC

原地生成型MCC是指在山东境内原地生成的

孤立对流云团合并而成,其整体组织结构比较零散,造成山东强降水的云团有很多并不是从其他地方移

入的,多产生在鲁南和苏皖北部交界处,位置相对偏南,这种对流云团一般尺度都比较小,很难达到中 α 尺度,但有时也会造成局地强降水,其影响系统较为复杂,2007—2022 年仅形成 4 个原地生成型 MCC。以 2017 年 7 月 26 日过程为例,分析原地生成型 MCC 系统配置特点。26 日 16:00,200 hPa 南亚高压为带状分布,高空急流位于华北和东北一带,高空辐散弱于其他两类(图 5a)。500 hPa(图 5b),山东位于高空急流入口右侧,高空辐散,有利于上升运动发展;鲁南一带以偏西气流为主,但引导气流较弱,风

速仅为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。850 hPa 暖式切变线位于山西、陕西一带,山东受切变线前部西南气流控制,未达到低空急流标准。16:00—18:00,有分散的对流云团在山东南部生成,云团逐渐增强,20:00 前后与其他对流云团在鲁东南发生合并,形成团状结构。26 日 23:00—27 日 00:00,对流云团在鲁东南发展成近似圆形的 MCC,偏心率逐渐接近于 1,TBB 最低为 200 K。00:00 以后云团尺度逐渐变小,结构松散,趋于消亡,最大小时降水量达 84.1 mm,降水的大值中心位于 TBB 梯度大值区(图 3c)。

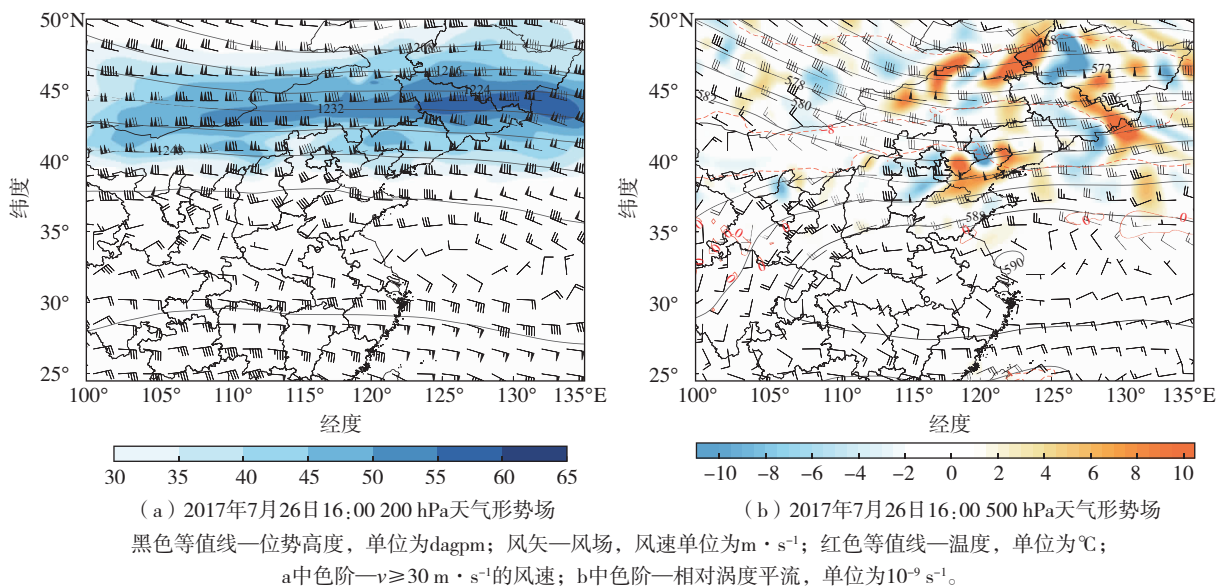


图5 原地生成型 MCC 高空环流系统配置

Fig.5 High-level circulation system configuration of in-situ-generating-type MCC

4 MCC 降水分布特征

对比分析三类 MCC 个例后发现,三类过程 200 hPa 高空均为辐散区,500 hPa 下游形成“东高西低”的阻挡形势,有利于强降水形成。东移型 MCC 中高纬环流较平直,山东地区引导气流为偏西风,有利于 MCC 等降水系统东移,最强降水中心位于 MCC 最低云顶亮温中心和 TBB 等值线梯度最大处(MCC 云团的西—西北侧)。北上型 MCC 环流的经向度大,山东地区引导气流为偏南气流,有利于降水系统北抬,其暖湿条件好,降水极值大,降水大值站点数多,影响范围大,降水的大值中心位于 TBB 梯度大值区(MCC 对流云团的南—西南侧)。原地生成型 MCC 引导气流弱,但由于本地热力、动力条件较为适宜,也可以造成 MCC,但其降水分布零散,强

降水范围小,是三类中降水最弱的一类,降水的大值中心位于 TBB 梯度大值区(表 2)。

锋生是锋的形成或加强的过程,锋消是相反的过程。锋生函数 F 采用公式(1)进行计算,当 $F > 0$ 时为锋生,当 $F < 0$ 时为锋消。锋生函数包含位温、散度、水平风切变等因子,是与热力和动力条件有关的综合参量。

$$F = \frac{1}{2} |\nabla\theta| [D\cos(2\beta) - \delta], \quad (1)$$

式中: θ 为位温, D 为变形项(水平风切变), β 为膨胀轴(x 轴)与等位温线的夹角, δ 为散度^[28]。

分析 MCC 强降水前后的锋生函数、温度平流和风场分布可知,MCC 降水区与低层环境参量的关系密切。东移型 MCC(图 6a),最强降水时段的低层冷暖平流均较强,暖平流更加显著,体现出 MCC 生

成是强烈暖平流处于主导地位,在 36.5°E、118.3°N 附近有冷平流中心(即负值中心)侵入暖平流区,冷暖空气交汇,锋生效应显著;鲁西北地区东部有东北—西南走向的锋生区,与最强降水区走向一致,强降水集中在冷暖平流交界的锋生区偏暖气团一侧,锋消区内无显著降水。北上型 MCC(图 6b),冷平流非常弱,而暖平流仍然处于主导地位,其短时强降水的分布主要在暖平流区之中,暖平流区中锋生最强区域通常对应降水大值中心。原地生成型

(图 6c),暖平流处于主导地位,冷平流作用不显著,但暖平流造成较强的暖锋锋生,强降水主要位于暖锋的暖区一侧,并且原地生成型 MCC 南风风速较前两类小。由此可见,三类 MCC 都是暖平流处于主导地位,其中东移型和北上型 MCC 都有冷平流参与,强降水集中在锋生函数的正值区中,暖平流区中锋生最强区域通常对应降水大值中心,锋消区内无显著降水;而原地生成型 MCC 冷平流弱,强降水主要位于暖区一侧。

表 2 三类 MCC 降水的分布特征

Table 2 Distribution characteristics of precipitation in three types of MCC

MCC 分型	天气形势	降水分布特点	降水与 TBB 的关系
东移型	中高纬平直纬向环流,偏西风引导气流,有利于降水系统东移。500 hPa“东高西低”,形成下游阻挡形势,有利于山东地区强降水的维持	冷空气强,对流性强,单点降水极值大	最强降水中心位于 MCC 最低云顶亮温中心和 TBB 等值线梯度最大处(MCC 的西—西北侧)
北上型	环流经向度大,山东地区引导气流为偏南风,有利于降水系统北抬。中高层同样存在明显的“东高西低”下游阻挡形势,有利于强降水的发生	暖湿条件好,降水极值大,降水大值站点数多,范围大	最强降水中心位于 MCC 最低云顶亮温中心及 TBB 梯度大值区(MCC 的南—西南侧)
原地生成型	弱“东高西低”阻挡形势,引导气流在三类中最弱,移动性不明显	降水分布不均匀,强降水范围小	最强降水中心位于 TBB 梯度大值区

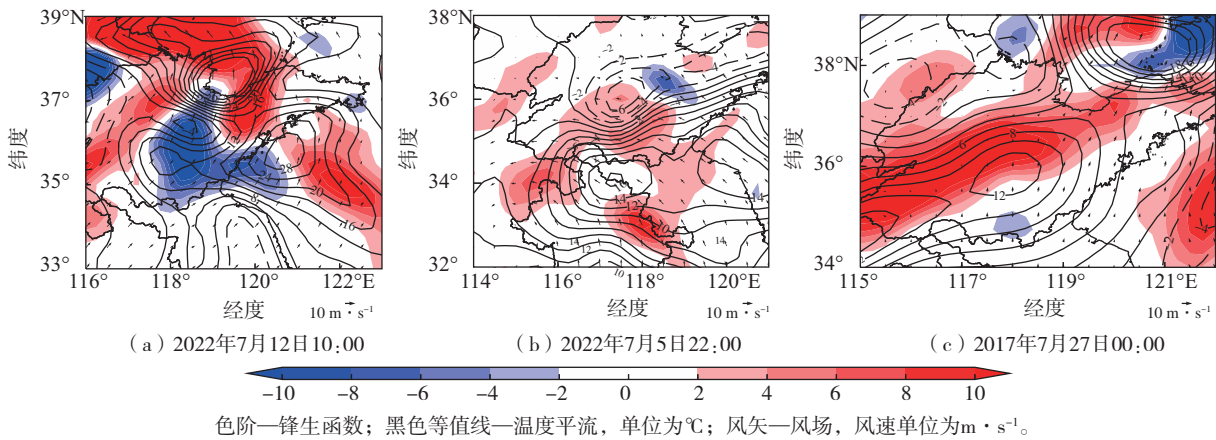


图 6 925 hPa 锋生函数、温度平流叠加风场
Fig.6 Frontogenesis function, temperature advection and wind field at 925 hPa

5 结论

利用 2007—2022 年卫星、常规探测和 ERA5 等资料,对影响山东的 MCC 进行天气学分型,并对其结构特征及降水差异进行归类分析。得出以下主要结论:

(1) MCC 出现频率年际变化很大,2010 年和 2022 年最多。同时, MCC 显示出明显的季节性周期,96%的 MCC 生成在夏季,7 月最多,8 月和 6 月次之,5 月为 1 次,其他月份未发现产生 MCC。MCC

的生消演变也有明显的日变化特征,多数在傍晚前后至次日凌晨发展成熟,早晨消亡,生命史较长,平均寿命为 7 h,生命史在 6~8 h 的占 88%,最长寿命达 11 h。MCC 成熟期云顶亮温低,最低云顶亮温在 203 K 以下的个例占 83%。全部的 MCC 均产生短时强降水,7 月大多表现为强对流性降水。

(2) 根据 MCC 初始对流云团的生成源地和移动路径,将影响山东的 MCC 分为东移型、北上型和原地生成型。其中,东移型最多,达 13 次,占 54%;北上型次之,为 7 次;原地生成型仅为 4 次。

(3) MCC 强降水与最低云顶亮温和 TBB 梯度大值区密切相关。东移型 MCC 中高纬环流较平直, 引导气流为偏西风, 最强降水中心位于 MCC 最低云顶亮温中心和 TBB 等值线梯度最大处 (MCC 云团的西—西北侧)。北上型 MCC 环流经向度大, 山东地区引导气流为偏南风, 降水极值大, 影响范围大, 最强降水位于 MCC 对流云团的南—西南侧。原地生成型 MCC 引导气流弱, 降水分布零散, 影响范围小, 是三类中降水最弱的。

(4) 三类 MCC 都是暖平流处于主导地位。东移型和北上型 MCC 均有冷平流参与, 强烈的冷暖空气交汇造成锋生, 暖平流区中锋生最强区域通常对应降水大值中心, 锋消区内无显著降水; 而原地生成型冷平流弱, 强降水主要位于暖区一侧。

参考文献:

- [1] 万夫敬, 孙继松, 孙敏, 等. 山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J]. 气象学报, 2021, 79(5): 717-731.
- [2] 赵海军, 潘玲, 毛子卿. 山东省持续性短时强降水过程物理量特征分析[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(1): 63-74.
- [3] 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等. 一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究[J]. 气象学报, 2019, 77(5): 785-805.
- [4] 侯淑梅, 唐巧玲, 史茜, 等. 2020年5月山东强对流天气特点及成因[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(4): 47-61.
- [5] 黎惠金, 李向红, 黄芳, 等. 广西一次特大暴雨的 MCC 演变过程及结构特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3): 806-817.
- [6] BLAMEY R C, REASON C J C. The role of mesoscale convective complexes in southern Africa summer rainfall [J]. J Climate, 2013, 26(5): 1654-1668.
- [7] 杨忠明, 吴哲红, 王兴菊. 贵州中南部 2 次 MCC 致洪暴雨的综合分析[J]. 干旱气象, 2013, 31(2): 362-372.
- [8] 韦惠红, 徐双柱, 郭英莲, 等. 长江中游两次 MCC 过程环境流场及物理条件分析[J]. 气象科技, 2013, 41(6): 1061-1067, 1094.
- [9] MADDOX R A. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61(11): 1374-1387.
- [10] MADDOX R A. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes[J]. Mon Wea Rev, 1983, 111(7): 1475-1493.
- [11] CONIGLIO M C, HWANG J Y, STENSRUD D J. Environmental factors in the upscale growth and longevity of MCSs derived from rapid update cycle analyses [J]. Mon Wea Rev, 2010, 138(9): 3514-3539.
- [12] 井喜, 屠妮妮, 井宇, 等. 中国 MCC 时空分布与天气学特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1597-1607.
- [13] 蒲学敏, 白爱娟. 高原涡与西南涡相互作用引发 MCC 暴雨的形成机制分析[J]. 气象科学, 2021, 41(1): 27-38.
- [14] 井宇, 井喜, 王瑞, 等. 黄河中游一次 MCC 致洪暴雨综合诊断分析[J]. 气象, 2008, 34(3): 56-62, 131.
- [15] 常煜. 内蒙古典型暴雨过程的中尺度雨团观测分析[J]. 应用气象学报, 2016, 27(1): 56-66.
- [16] 王宁, 王秀娟, 张硕, 等. 吉林省一场持续性暴雨成因及 MCC 特征分析[J]. 气象, 2016, 42(7): 809-818.
- [17] 张晰莹, 吴英, 王承伟, 等. 东北地区 MCC 雷达回波特征分析[J]. 气象, 2010, 36(8): 32-39.
- [18] 杨晓霞. 副热带高压边缘连续两次强降水形成机制分析[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(3): 62-72.
- [19] LAING A G, FRITSCH J M. Mesoscale convective complexes in Africa [J]. Mon Wea Rev, 1993, 121(8): 2254-2263.
- [20] 吕艳彬. 华北地区中尺度对流复合体的三维结构[J]. 民航学报, 2017, 1(1): 44-47, 30.
- [21] 范俊红. 河北省一次中尺度对流复合体 (MCC) 分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [22] 任丽, 杨艳敏. 东北冷涡底部一次 MCC 暴雨动力热力特征分析[J]. 干旱气象, 2021, 39(1): 65-75.
- [23] 万夫敬, 刁秀广. 两次 MCC 红外云图特征与天气实况异同性分析[J]. 气象, 2018, 44(6): 759-770.
- [24] 赵桂香, 王晓丽, 王一颀, 等. 黄河中游地区 MCC 天气学分型及结构差异分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(1): 1-14.
- [25] 赵桂香, 王晓丽, 王一颀. 黄河中游地区初春与盛夏 MCC 结构特征比较分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1638-1654.
- [26] 刁秀广, 孟宪贵, 万明波. 一次 MCC 红外云图演变特征及成因分析[J]. 山东气象, 2015, 35(2): 1-7.
- [27] 钟晓平, 杨淑群, 朱远琼. 青藏高原东部地区中尺度对流复合体的降水特征[J]. 高原气象, 1994, 13(2): 113-121.
- [28] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法 [M]. 3 版. 北京: 气象出版社, 2000: 393-397.